



**Leitfäden für die Ausbildung
Im Deutschen Wetterdienst**

6

Meteorologische Bodenmesstechnik

(vormals: Instrumentenkunde)

Dritte, vollständig neu bearbeitete Auflage
von
Hans Löffler

Zitationsvorschlag:

Löffler, Hans: Meteorologische Bodenmesstechnik (vormals: Instrumentenkunde). Offenbach am Main: Leitfaden für die Ausbildung im Deutschen Wetterdienst Nr. 6, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, 2012.

Nutzungsbedingungen:

Dieses Dokument steht unter folgender Creative Commons-Lizenz:



Sie dürfen das Werk bzw. den Inhalt unter folgenden Bedingungen vervielfältigen, verbreiten und öffentlich zugänglich machen: Sie müssen den Namen des Autors/Rechteinhabers in der von ihm festgelegten Weise nennen. Dieses Werk bzw. dieser Inhalt darf nicht für kommerzielle Zwecke verwendet werden und es darf nicht bearbeitet, abgewandelt oder in anderer Weise verändert werden. Mit der Verwendung dieses Dokumentes erkennen Sie die Nutzungsbedingungen an.

Für den Inhalt ist der Autor verantwortlich.

ISSN 0459-0236

ISBN 978-3-88148-456-5

Herausgeber und Verlag:

Deutscher Wetterdienst
Frankfurter Straße 135
D-63067 Offenbach am
Main Mail:
bibliothek@dwd.de
Internet: www.dwd.de

Anschrift des Autors:

RDir a.D. Hans Löffler
Aurikelweg 16
87700 Memmingen
Mail: loefflermm@t-online.de

VORWORT ZUR 3. AUFLAGE

Der vorliegende Leitfaden ist eine Neuauflage der zweiten Auflage des Leitfadens Nr. 6 Instrumentenkunde von 1973. Die Einführung neuer Messtechniken verbunden mit neuen Messgeräten erforderte eine Neuausgabe.

Der neue Leitfaden soll eine Ausbildungshilfe in Ergänzung zum Unterricht bei der Laufbahnausbildung des gehobenen Wetterdienstes (FH-Studium) und mit Abstrichen, insbesondere in den theoretischen Teilen, auch bei der Laufbahnausbildung im mittleren Wetterdienst sein. Gleichzeitig kann er als Nachschlagewerk in der Praxis dienen.

Die 3. Auflage des Leitfadens trägt den Titel „Meteorologische Bodenmesstechnik“ und ist an die Entwicklung neuer Messgeräte der letzten Jahre und an den heutigen Stand der messtechnischen Einrichtungen angepasst. Bei den Messverfahren unterscheidet man grundsätzlich zwischen in-situ-Verfahren, bei denen das Messelement im zu messenden Medium ist, bzw. die Verhältnisse in der direkten Umgebung des Messelementes erfasst werden und den Fernerkundungsverfahren (Remote Sensing), die mit akustischen und/oder elektromagnetischen Wellen Informationen über den Zustand der Atmosphäre in größeren Entfernungen sammeln.

Der Titel „Bodenmesstechnik“ soll darauf hinweisen, dass es sich um Messgeräte handelt, die an Wetterstationen im synoptischen und klimatologischen Messnetz („Bodenmessnetz“) eingesetzt werden. Seit dem Jahr 1996 wurde im Deutschen Wetterdienst die Automatisierung der Messungen in diesem Messnetz stark vorangetrieben. Da auch einige Augenbeobachtungen eines Wetterbeobachters zur Fernerkundung gezählt werden können, ist es nur logisch, dass diese teilweise auch durch Fernerkundungsverfahren ersetzt werden. Überwiegend dienen die an den Wetterstationen gewonnenen Messungen der Zustandserfassung der atmosphärischen Bodenschicht (Prandtl-Schicht), also bis etwa 20 m Höhe über dem Boden. Für die Erfassung der Wolkenuntergrenze werden dort jedoch auch Fernerkundungsverfahren eingesetzt.

Die Möglichkeiten der elektronischen Datenerfassung und -verarbeitung und die Entwicklung neuartiger Sensoren führten weitgehend zur Ablösung etablierter Instrumente auch in der Routinemesspraxis. Aus Gründen der Homogenität langer Messreihen und um Vergleiche moderner Sensorik mit früher eingesetzten Messgeräten anstellen zu können, werden allerdings an bestimmten Wetterstationen (z. B. ausgewählten Klimareferenzstationen und neben-/ehrenamtlich besetzten Wetterstationen) die klassischen Methoden weiterhin beibehalten. Daher wurde den klassischen Messgeräten auch in diesem Leitfaden der entsprechende Raum eingerichtet. Hier konnten einzelne Passagen mit einiger Veränderung aus dem Leitfaden von 1973 übernommen werden. Dabei ist der Text überarbeitet und aktualisiert worden.

Die Nomenklatur wurde weitgehend dem heutigen Standard angepasst. Auf Themen, die in der heutigen Zeit nicht mehr aktuell sind, bspw. die manuell ausgeführte Auswertung von Registrierstreifen, ist ganz verzichtet worden.

Der Schwerpunkt bei den Geräte- und Sensorbeschreibungen liegt auf den im Deutschen Wetterdienst (DWD) eingesetzten Geräten. Zur Erweiterung der Kenntnisse im messtechnischen Bereich, insbesondere auch um die Vielfalt der Messprinzipien und Arbeitsweisen der Messgeräte kennen zu lernen sind darüber hinaus auch solche Geräte und Sensoren beschrieben, die z. T. nur an (meteorologischen) Instituten und Forschungseinrichtungen zu finden sind oder aber von nationalen Wetterdiensten benachbarter Länder genutzt werden. Dabei konnten nicht alle berücksichtigt werden, so dass es sich um exemplarische Vorstellungen solcher Geräte handeln soll.

In wieweit der Wechsel von Messgeräten mit völlig neuen Messprinzipien Auswirkungen auf die Homogenität von klimatologischen Datenreihen und damit auf langfristige klimatologische Betrachtungen zum Klimawandel haben könnte, wird in einem eigenen Kapitel anhand von Beispielen kurz dargestellt.

Gemäß Bundestagsbeschluss und Rahmenvereinbarung benutzen der DWD und der Geoinformationsdienst der Bundeswehr (GeoInfoDBw) das gleiche meteorologische Gerät, soweit dem nicht zwingende Gründe entgegenstehen. Es werden beim GeoInfoDBw jedoch weniger Sensoren betrieben als beim DWD.

Obwohl alle bis zum Zeitpunkt der Veröffentlichung im Einsatz befindlichen Messgeräte erfasst und beschrieben wurden, wird im Laufe der Jahre auch dieser Leitfaden nicht mehr ganz den neuesten Entwicklungen auf dem Gebiet der meteorologischen Messtechnik entsprechen.

Auch wenn es galt, möglichst umfassend die neueren Messtechniken mit ihren Geräten anzusprechen und zu beschreiben, erfordert es bei weitergehendem Bedarf des zusätzlichen Studiums der entsprechenden meteorologischen Lehrbücher, die auch das Thema Messtechnik abdecken. Firmenbeschreibungen (oftmals nur in Englisch verfügbar) können diesen Mangel nur teilweise abdecken. Gerade bei der Beschreibung der Messprinzipien wurde, um nicht den Rahmen dieses Leitfadens zu sprengen, aber auch um Anreize für weitere Literaturrecherche zu geben, manches nur ansatzweise erwähnt. Einschlägige Physiklehrbücher zur Erweiterung der theoretischen Grundlagen werden dazu empfohlen. Das Literaturverzeichnis im Anhang kann bei der Suche hilfreich sein.

Januar 2012

INHALTSVERZEICHNIS

EINFÜHRUNG	10
1. Einführung in die meteorologische Messtechnik	10
2. Bedeutung und Nutzung von meteorologischen Messdaten	10
PHYSIKALISCH-TECHNISCHE GRUNDLAGEN	11
3. Grundsätzliches zu Messmethoden	11
3.1 Allgemeine Grundlagen zur Messung physikalischer Größen	11
3.2 Physikalische Größen und ihre Einheiten im internationalen Einheitensystem	11
3.2.1 SI-Einheiten und ihre Umrechnung	12
3.2.2 Physikalische Größen und Konstanten	13
3.3 Verknüpfung physikalischer Größen – Physikalische Gleichungstypen	14
3.3.1 Größengleichungen	14
3.3.2 Einheitengleichungen	14
3.3.3 Zahlenwertgleichungen	14
4. Datenerfassung im Rahmen meteorologischer Messtechnik	15
4.1 Messtechnik Allgemein	15
4.2 Messgerät, Messeinrichtung und Normal	15
4.3 Messfühler, Messwert, Messsignal	16
4.4 Datenerfassung	17
4.4.1 COMBILOG Datenlogger	17
4.4.2 Datenlogger SYNMET-NAV	18
4.5 Messumformung	18
4.6 Messprinzip, Messverfahren	19
4.7 Messort, Messzeitpunkt	20
5. Messergebnis, Messunsicherheit, Messabweichung	20
5.1 Systematische Messabweichungen	20
5.2 Zufällige Messabweichungen	21
6. Elektrische/Elektronische Grundlagen und Begriffe	21
6.1 Kapazitive Messungen	21
6.2 Piezoelektrischer Effekt	22
6.3 Photodiode	22
6.4 Oszillator	23
6.5 Hysterese eines Messgerätes	23
MESSUNG METEOROLOGISCHER	23
ELEMENTE	23
7. Luftdruckmessung	23
7.1 Allgemeines	23
7.1.1 Luftdruckmessgrößen	24
7.1.1.1 Berechnung/Bestimmung des QFE-Wertes	24
7.1.1.2 Berechnung des QFF-Wertes	24
7.1.1.3 Berechnung des QNH-Wertes	25
7.1.2 Maßeinheiten des Luftdruckes	25
7.2 Allgemeine Messprinzipien	26
7.2.1 Flüssigkeitsbarometer	26
7.2.2 Aneroidbarometer	27
7.2.3 Kapazitätsmessung	28
7.2.4 Siedebarometer (Hypsometer)	28
7.2.5 Bestimmung des Ionenflusses	29
Piezoelektrischer Effekt	29
Alphatron, Betatron	29
7.3 Sensoren/Messgeräte	29
7.3.1 Flüssigkeitsbarometer	29
Stationsbarometer	29
Normalbarometer	31
7.3.2 Aneroidbarometer, Barograph, Höhenmesser	31
Aneroidbarometer 15ps	31
Barographen	31
Höhenmesser	33

7.3.3 Digitalbarometer	33
Barocap® PTB220	33
Barocap® PTB330	34
Präzisionsluftdruckhandmessgerät DPI 740	35
7.3.4 Primär-Drucknormal	35
Drehkolbenmanometer DHI PG7601	36
7.4 Messunsicherheiten und Fehlerquellen	36
8. Temperaturmessung	37
8.1 Allgemeines	37
8.1.1 Temperaturmessgrößen	38
8.1.2 Maßeinheiten der Temperatur	38
8.2 Allgemeine Messprinzipien	39
8.2.1 Thermische Änderungen	40
8.2.2 Elektrische Änderungen	41
8.2.3 Messung der Wärmestrahlung	44
8.2.4 Messung der Änderung der Schallgeschwindigkeit	44
8.2.5 Messung der Änderung der Materialwerte (Stoffkonstante)	45
8.3 Sensoren/Messgeräte	46
8.3.1 Ausdehnungsthermometer	46
8.3.1.1 Flüssigkeitsthermometer	46
8.3.1.2 Bimetall-Thermometer, Thermograph	50
8.3.2 Elektrische Thermometer	50
8.3.2.1 Widerstandsthermometer	50
Pt 100	50
8.3.2.2 Halbleiter-Thermometer	52
8.3.2.3 Thermoelemente/Thermosäulen	52
8.3.3 Kapazitive Temperatursensoren	52
8.3.4 Strahlungsthermometer	52
8.3.5 Normal-Platinwiderstandsthermometer	53
8.4 Messunsicherheiten und Fehlerquellen	53
8.4.1 Allgemeines	53
8.4.2 Trägheitsfehler von Thermometern	53
8.4.3 Strahlungsfehler von Thermometern	55
8.4.4 Weitere Fehlerquellen bei Flüssigkeitsthermometern	56
9. Luftfeuchtigkeitsmessung	56
9.1 Allgemeines	56
9.1.1 Feuchtmessgrößen	57
9.1.1.1 Messgrößen feuchter (ungesättigter) Luft	57
9.1.1.2 Messgrößen gesättigter Luft	59
9.1.2 Maßeinheiten der Luftfeuchtigkeit	60
9.2.1 Thermodynamische (psychrometrische) Methode	61
9.2.2 Hygroskopische Methode	62
9.2.3 Kondensationsmethode (Taupunktspiegel)	62
9.2.4 Elektrische Methoden	63
Kohleschicht(Karbon)-hygrometer	63
Kapazitive Polymer-Hygrometer	63
9.2.5 Spektroskopische/Infrarotmethode	63
9.2.6 Diffusionsmethode	64
9.3 Sensoren/Messgeräte	64
9.3.1 Psychrometer	64
Hüttenpsychrometer	64
Aspirationspsychrometer nach Assmann	65
Schleuderpsychrometer	66
Schleuderpsychrometer PTS 30	66
Psychrometer nach Frankenberger	66
Minipsychrometer	67
9.3.2 Haarhygrometer	67
Polymeter	67
Hygrograph	68
Thermohygrograph	68

9.3.3 Kapazitive Feuchtesensoren	69
Feuchtesensor HMP45D	69
Temperatur-Feuchtesensor HMP155	70
Feuchte- und Temperaturmesswertgeber HUMICAP® HMT337	70
Feuchtesensor MP101A	71
9.3.4 Taupunktspiegel-Hygrometer	71
Thermo-Hygrometer Thygan	71
9.3.5 DWD-Normal für Feuchtesensoren	72
Feuchtgenerator	72
DewMaster	72
9.4 Messunsicherheiten und Fehlerquellen	73
10. Messung der Wolkenhöhe und Wolkenbedeckung	74
10.1 Allgemeines	74
10.1.1 Messgrößen der Wolken	74
Höhe der Wolkenuntergrenze	74
Bedeckungsgrad	74
Wolkenobergrenze	74
Art der Bewölkung (Wolkengattung)	74
10.1.2 Maßeinheiten der Wolkenuntergrenze	75
10.2 Allgemeine Messprinzipien zur Messung der Wolkenuntergrenze	75
10.2.1 Messungen der Laufzeit von Laserimpulsen	75
10.2.2 Messungen mit dem Nachtwolkenscheinwerfer/Ceilometer	76
10.3 Sensoren/Messgeräte	77
10.3.1 Laserceilometer	77
LD40 „Tropopausen“	77
CL31	79
CHM 15k	80
Laserceilograph LD-WH M	82
10.3.2 Nachtwolkenscheinwerfer	83
10.4 Messunsicherheiten und Fehlerquellen	84
11. Niederschlagsmessung	84
11.1. Allgemeines	84
11.1.1 Messgrößen des Niederschlages	84
11.1.2 Maßeinheiten des Niederschlages	84
11.2 Allgemeine Messprinzipien	85
11.3 Sensoren/Messgeräte	85
11.3.1 Volumenmessung des Niederschlages (Niederschlagssammler)	86
Niederschlagsmesser n. Hellmann	86
Niederschlagsschreiber n. Hellmann	87
Gebirgsniederschlagsmesser	88
Totalisator	88
11.3.2 Gewichtsbestimmung des Niederschlages	89
Ombrometer HP mit Wippe und Tropfer	89
Wägesensor PLUVIO	90
PLUVIO ²	92
Niederschlagsmengenmesser	93
Niederschlagssensor mit Kippwaage n. Joss-Tognini	94
Regenmesser RG13H	94
11.3.3 Optische Niederschlagserfassung – Distrometer	95
Laser-Niederschlagsmonitor (LNM)	95
Laser-Distrometer Parsivel®	97
Niederschlagswächter	98
Joss-Waldvogel-Distrometer RD-80	98
11.3.4 Erfassung des Niederschlages mittels Widerstandsmessung	99
Niederschlagsmelder	99
11.3.5 Messung abgelagerter Niederschläge, Schneehöhenmessung	100
11.3.5.1 Schneepegel	100
11.3.5.2 Ultraschallsensoren	101
Ultraschallschneehöhensensor SR50-G1	101
Schneehöhensensor SHM30	102
USH-8 Schneehöhensensor	103
Optischer Schneespektrograph	103

11.3.5.3 Vereisungssensoren	103
Vereisungssensor o871LH1	104
Eisablagerungsgerät EAG	104
Eismonitor	105
11.3.6 Bestimmung des Wasseräquivalents	105
Schneeausstecher	106
Schneesonde WS 43	106
Tschechische Schneesonde	107
11.4. Bestimmung des Erdbodenzustandes	107
11.5 Bestimmung des Straßen- und Rollbahnzustandes	108
11.6 Messunsicherheiten und Fehlerquellen	108
12. Messung von Richtung und Geschwindigkeit des Bodenwindes	113
12.1 Allgemeines	113
12.1.1 Koordinatensysteme	113
Kartesisches Koordinatensystem	113
Polarkoordinatendarstellung	113
Druck-Koordinatensystem	113
Horizontalwind	114
12.1.2 Messgrößen des Windes	114
12.1.3 Maßeinheiten der Windgeschwindigkeit	115
12.2 Allgemeine Messprinzipien	115
12.2.1 Dynamischer Druck des Windes	115
12.2.2 Thermische (abkühlende) Wirkung des Windes	118
12.2.3 Wirkung des Windes auf die Schallwellenausbreitung	119
12.3 Sensoren/Messgeräte	120
12.3.1 Rotationsanemometer	120
Schalenanemometer mit Windfahne	120
Windgeschwindigkeitsgeber SK565	121
Windrichtungsgeber SK566	121
Windanzeige	122
Windsensor für Windrichtung und -Geschwindigkeit	123
Windschreiber n. Woelfle	123
Schalenhandanemometer	124
Handanemometer VT 1204	124
Propelleranemometer	125
Flügelradanemometer	125
12.3.2 Ultraschallanemometer	125
Ultraschallanemometer 2D	125
Ultraschallanemometer 3D	126
Ultraschallanemometer USA-1	127
Windcap® Ultrasonic WS425	127
Turbulenzmessung mit Ultraschallanemometern	128
Messsysteme zur Bestimmung der turbulenten Flüsse von Impuls sowie fühlbarer und latenter Wärme (Wasserdampf) nach der Eddy-Kovarianz-Methode	128
12.3.3 Thermische Anemometer	128
12.3.4 Aerodynamische Anemometer	129
Prandtl-Staurohr	129
Strömungssonde	129
12.3.5 DWD-Normal für Windgeschwindigkeitensensoren	129
12.4 Messunsicherheiten und Fehlerquellen	130
13. Messung der Sichtweite	130
13.1 Allgemeines	130
13.1.1 Messgrößen der Sichtweite	130
13.1.2 Maßeinheiten der Sichtweite	133
13.2.1 Messung der Transmission bzw. Extinktion	134
13.2.2 Messung des Streulichtes	134
13.3 Sensoren/Messgeräte	135
13.3.1 Transmissometer	135
Skopograph II (Flamingo)	135
Hintergrundleuchtdichtesensor LM21	136
Transmissometer LT31	137

13.3.2 Streulichtmesser	138
Vorwärtsstreulichtmesser DF20+	138
Sensoren für Sichtweite und aktuelles Wetter PWD20/22	139
Sichtweitensensor FS11	140
Rückwärtsstreusensor Videograph	140
13.4 Anerkannte Sichtweitensensoren	141
13.5 Messunsicherheiten und Fehlerquellen	141
14. Die Messung der Sonnenscheindauer und der Strahlung	141
14.1 Allgemeine Grundlagen	141
14.1.1 Strahlungsgrößen	145
14.1.2 Maßeinheiten der Strahlung	146
14.2 Allgemeine Messprinzipien	146
14.2.1 Messprinzipien für die Messung der Sonnenscheindauer	146
14.2.2 Messprinzipien für die Messung kurz- und langwelliger Strahlung und Globalstrahlung	147
14.3 Sensoren / Messgeräte für die Sonnenscheindauer	147
14.3.1 Sonnenscheinautograph (n. Campbell-Stokes)	147
14.3.2 Sensoren für die Sonnenscheindauer	148
Sonnenscheindauersensor Typ SONIe3	148
Sonnenscheindauersensor CSD 3	149
14.4 Sensoren/Messgeräte für die kurzwellige Strahlung und Globalstrahlung	150
14.4.1 Pyranometer	150
Pyranometer CM21/CM22	151
Pyranometer CM11	152
Sonnenscheinpyranometer SPN1	153
Sonnenscheingeber Hänni Solar 111B	153
Messung der UV-Strahlung	153
UV-Sensor (UVS-AE-T)	154
14.4.2 Pyrheliometer	154
Pyrheliometer CHP1	154
Messung der UV-Strahlung mit externem Sensor UVA-UVB-Radiometer UV34	155
PAR Sensor	155
14.5 Sensoren/Messgeräte für die langwellige Strahlung und Globalstrahlung	155
Pyrgeometer	155
Pyrgeometer CGR3/CGR4	155
Pyrgeometer CG 4	156
Pyrgeometer PIR	156
14.6 Sensoren/Messgeräte für die kurz- und langwellige Strahlung und Globalstrahlung	157
14.6.1 Pyrradiometer	157
Netto-Radiometer CNR1	157
Netto-Radiometer NR LITE	157
Netto-Radiometer CNR4	158
14.6.2 SCAPP-Messung der Strahlung und der Sonnenscheindauer	158
14.7 Messunsicherheiten und Fehlerquellen	159
14.8 Nationales / Regionales Strahlungszentrum am MOL	160
SPECTRO 320D	160
BSRN-Station	161
14.9 Strahlungsmessungen an der Antarktisstation	161
15. Agrarmeteorologische Messungen	162
15.1 Allgemeines	162
15.2 Messgrößen in der Agrarmeteorologie	162
15.2.1 Verdunstung	162
15.2.2 Bodenfeuchte	163
15.3 Messverfahren / Messgeräte / Sensoren	163
15.3.1 Verdunstungsmessung	164
Lysimeter	164
Wägbares Großlysimeter	164
Verdunstungswanne / Verdunstungskessel	165
15.3.2 Bodenfeuchtemessung	165
Gravimetrische Bestimmung der Bodenfeuchte (Bohrstockmethode)	165
TDR-Sonde und kapazitive Messsonde	165
Tensiometer zur direkten Messung der Bodenwasserspannung	165
Einstich-Tensiometer	166

15.3.3	Messung von Lufttemperatur und Luftfeuchte im Bestand	166
15.3.4	Messung der Blattbenetzung	167
15.3.5	Messung des fühlbaren Wärmestromes	167
15.3.6	Messung des Bodenwärmestromes	168
15.3.7	FRODIT – Messgerät zur Bestimmung der Frosteindringtiefe	168
15.3.8	Messung mit Splashmetern	168
15.3.9	Bestimmung der Oberflächentemperatur mit Hilfe einer Thermografiekamera	169
15.3.10	Messung mit der Streuwaage	170
15.4	Versuchseinrichtungen	170
16.	Ersatzmessungen	171
16.1	Notmessgeräte-Koffer	171
16.2	Ersatzmessungen der Temperatur, Luftfeuchte, Luftdruck und Wind	171
16.3	Ersatzmessungen des Niederschlages	171
16.4.	Ersatzmessungen nach VuB3 BHB „Havarieplan“	172
17.	Vergleich konventioneller Messtechnik mit modernen Sensoren	172
17.1	Allgemeines	172
17.2	Vergleich der Messwerte von Flüssigkeitsthermometern mit digitalen Sensoren	173
17.3	Vergleich der Strahlungsmessungen	173
17.4	Vergleich von Niederschlagsmesswerten	174
18.	Automatische Messsysteme	174
18.1	Allgemeine Angaben	174
18.2	AMDA – Automatische Meteorologische Daten-erfassungsanlage	175
18.3	ASDUV	177
18.4	Automatisches Wetterbeobachtungssystem MIDAS IV AWOS	179
19.	Messnetze in Deutschland, Schweiz und Österreich	180
19.1	Allgemeines	180
	Messnetz 2000 des DWD	180
	Weitere Messnetze in Deutschland	181
19.2	Anforderungen an den Standort	181
19.3	Stationstypen des DWD und ihre instrumentelle Ausstattung	182
19.4	Messfeld des DWD und GeoInfoDBw	185
19.4.1	Anforderungen an das Messfeld	185
19.4.2	Aufstellung der Sensoren/Messgeräte	185
19.4.4	Genauigkeitsforderungen der WMO und ICAO	197
	Allgemeine Umgebungsbedingungen der Sensoren:	197
	Kalibrierzyklen der DWD-Sensorik	197
19.5	Übersicht über Mess- und Beobachtungsnetze	199
19.5.1	DWD-Mess- und Beobachtungsnetz einschließlich GeoInfoDBw (Anhang 7.1)	199
19.5.2	WeBoKaN – Wetterbeobachtungskamera-Netzwerk des DWD	199
19.5.3	Stationsnetz im Rahmen von KLIWA (Anhang 7.2)	200
19.5.4	Mobile Messeinheiten des DWD	200
19.5.5	Temporäre Stationsmessungen	201
19.5.6	Maritimes Messnetz DWD	202
19.5.6.1	Meteorologischer Hafendienst	203
19.5.6.2	Bordwetterwarte auf FS METEOR	203
19.5.6.3	Bordwetterwarte auf FS Polarstern	205
19.5.7	Solares UV-Messnetz in Deutschland (Anhang 7.3)	205
19.6	Übersicht über weitere Mess- und Beobachtungsnetze	206
19.6.1	Hessisches Niederschlagsmessnetz (Anhang 7.4)	206
19.6.2	Stadtmessnetz. B.rlin und Messnetz der TU Berlin (Anhang 7.5)	206
19.6.3	Messnetz des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie – BSH (Anhang 7.6)	207
19.6.4	Messnetz der Lawinenwarnzentrale Bayern (Anhang 7.7)	207
19.6.5	Messnetz der Bayerischen Wasserwirtschaft (Anhang 7.8)	207
19.6.6	Messnetz des Schweizer Wetterdienstes – MeteoSchweiz (Anhang 7.9)	208
19.6.8	Messnetz des Österreichischen Wetterdienstes (Anhang 7.10)	209
ANHANG		210
1.	Geschichtlicher Rückblick auf die Entwicklung meteorologischer Messgeräte	210
	Zu 7. Kurzer geschichtlicher Rückblick zur Luftdruckmessung	210
	Zu 8. Kurzer geschichtlicher Rückblick zur Temperaturmessung	212
	Extremthermometer	213

Zu 9. Kurzer geschichtlicher Rückblick zur Luftfeuchtigkeitsmessung	214
Zu 10. Kurzer geschichtlicher Rückblick zur Messung der Wolkenhöhe	216
Zu 11. Kurzer geschichtlicher Rückblick zur Niederschlagsmessung	216
Zu 12. Kurzer geschichtlicher Rückblick zur Messung des Windes	216
Zu 14. Kurzer geschichtlicher Rückblick zur Strahlungsmessung	217
Zu 19. Kurzer geschichtlicher Rückblick auf die Entwicklung meteorologischer Messnetze	217
2. Literatur- und Quellenverzeichnis	218
Deutscher Wetterdienst, Unterlagen/Richtlinien, Berichte	218
WMO, Unterlagen/Richtlinien	219
Sonstige Unterlagen	219
Diverse Firmenunterlagen / Beschreibungen	219
3. Abbildungsverzeichnis	220
4. Datenerfassung im Rahmen meteorologischer Messtechnik	220
6. Elektrische/Elektronische Grundlagen und Begriffe	220
7. Luftdruckmessung	220
8. Temperaturmessung	220
9. Feuchtemessung	220
10. Messung der Wolkenhöhe und Wolkenbedeckung	221
11. Niederschlagsmessung	221
12. Windmessung	222
13. Messung der Sichtweite	222
14. Die Messung der Sonnenscheindauer und der Strahlung	222
15. Agrarmeteorologische Messungen	223
16. Ersatzmessungen	223
17. Vergleich	223
18. Automatische Messsysteme	223
19. Messnetze	223
4. Tabellenverzeichnis	224
3. Grundsätzliches zu Messmethoden	224
4. Datenerfassung im Rahmen meteorologischer Messtechnik	224
7. Luftdruckmessung	224
8. Temperaturmessung	224
9. Feuchtemessung	225
10. Wolkenhöhenmessung	225
11. Niederschlagsmessung	225
12. Windmessung	225
13. Messung der Sichtweite	225
14. Messung der Sonnenscheindauer und der Strahlung	226
15. Agrarmeteorologische Messungen	226
16. Ersatzmessungen	226
18. Automatische Messsysteme	226
19. Messnetze	226
5. Abkürzungsverzeichnis	226
Behörden/Ämter/Dienststellen	227
6. Sicherheitsbestimmungen und Schutzvorschriften beim Umgang mit meteorologischen Geräten/Sensoren	228
6.1 Gefahren des elektrischen Stroms für den Menschen	228
6.2 Umgang mit Lasergeräten, Laserklassen	229
6.3 Einsatz von Frostschutzmitteln bei Niederschlagsmessgeräten	230
6.4 Umgang mit Quecksilber	230
7. Messnetze	231
7.1 Übersicht über das Mess- und Beobachtungsnetz des DWD am 1.1.2012	231
7.2 Stationsnetz im Rahmen von KLIWA in den Bundesländern Bayern und Baden-Württemberg	231
7.3 Solares UV-Monitoring in Deutschland	232
7.4 Hessisches Niederschlagsmessnetz des HULG	232
7.5 Stadtmessnetz Berlin und Messnetz der TU Berlin, Fachgebiet Klimatologie	232
7.6 Messnetz des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie – BSH	232
7.7 Messnetz Lawinenwarnzentrale Bayern	232
7.8 Neues automatisches Niederschlagsmessnetz (DWD und Bayerische Wasserwirtschaft)	233
7.9 Messnetz des Schweizer Wetterdienstes – MeteoSchweiz	233
7.10 TAWES-Messnetz des Österreichischen Wetterdienstes	233
8. Danksagung	234

EINFÜHRUNG

1. EINFÜHRUNG IN DIE METEOROLOGISCHE MESSTECHNIK

Die Messtechnik ist so interdisziplinär wie kaum ein anderes Fachgebiet ausgerichtet. Die Anwendungen ganz allgemein und in der Meteorologie sind zahlreich. Auf dem Gebiet der Messtechnik ist eine rasche Entwicklung zu beobachten. Die Innovationszyklen werden immer kürzer. Das betrifft vor allem die Sensorik, die Messwertaufnahme und Messwertverarbeitung, die sich seit Einführung der Computer in die Messtechnik vereinfacht hat. Die Sensoren werden immer kleiner und intelligenter und die Funktionen der Messgeräte werden immer universeller.

Für gezielte Forschungsprogramme und im operationellen Bereich werden in zunehmendem Maße komplexe Messsysteme und Messsystemträger eingesetzt. Dabei kommen den Methoden der indirekten Sondierung vom Boden und von Flugzeugen oder Satelliten aus immer größere Bedeutung zu.

Im Gegensatz zur Meteorologie ist die Metrologie die Lehre und Wissenschaft vom Messen, von den Maßsystemen und deren Einheiten. Sie ist ein Teilgebiet der Physik mit der Aufgabe, die wissenschaftlichen Grundlagen des Messens zu erarbeiten, die Einheitlichkeit des Messens zu sichern und die richtige Anwendung der Messgeräte und Messverfahren zu gewährleisten.

2. BEDEUTUNG UND NUTZUNG VON METEOROLOGISCHEN MESSDATEN

Meteorologische Beobachtungen und Messungen werden aus verschiedensten Gründen vorgenommen. Es geht um die Bestimmung von Wetteranalysen in Echtzeit, um Vorhersagen, für Unwetterwarnungen, um Klimastudien, um lokale wetterabhängige Tätigkeiten z. B. im Bau, in der Fliegerei, in der Landwirtschaft, in der Forschung und vieles mehr.

Die kontinuierliche Wetterbeobachtung ist die Erfassung des augenblicklichen Zustands der Atmosphäre mittels Augenbeobachtungen durch den Menschen und automatischer Messungen. Sie liefert damit an erster Stelle einen wichtigen Baustein für die Erstellung der Wetteranalyse als Grundlage für Wettervorhersagen, für Klimadaten und -statistiken sowie für die Erfüllung relevanter Forschungsaufgaben, die in der Zeit des Klimawandels immer mehr an Bedeutung gewinnen. Darüber hinaus haben die Messwerte eine unterschiedlich hohe Bedeutung in den verschiedensten Bereichen der Meteorologie und Klimatologie. Dies wird im Folgenden kurz dargestellt.

Flugmeteorologie (Flugwetterberatung)

Zur Sicherung des Flugbetriebes bei Start und Landung in meteorologischer Hinsicht stellt der DWD der Deutschen Flugsicherung (DFS) wichtige beobachtete oder gemessene

Informationen zur aktuellen Wettersituation zur Verfügung. Dabei werden hauptsächlich die folgenden Parameter verbreitet:

- Windrichtung und -geschwindigkeit, Wolkenhöhe, Landbahnsichtweite sowie
- Luftdruck, Lufttemperatur und -feuchte

Klimatologie

Das Nationale Klimadatenzentrum (NKDZ) im DWD besitzt eine umfassende Datenbasis für Forschung, Klimaüberwachung und angewandte Klimatologie. Die Daten basieren auf Beobachtung und Messung verschiedenster meteorologischer Parameter, die an den Wetterstationen/ Wetterwarten professionell gewonnen werden. Daneben archiviert der DWD im NKDZ die Daten seiner automatischen Stationen sowie der nebenamtlichen Klima- und Niederschlagsstationen. Die Datenbasis wird kontinuierlich um aktuelle Werte erweitert. Aus diesen Beobachtungsdaten erzeugt der DWD kontinuierlich Produkte, die verlässliche Aussagen zur Klimaüberwachung, insbesondere im Hinblick auf Aussagen zur Klimaänderung ermöglichen.

Operationeller Warndienst

Mit AutoWARN hat der DWD ein Warnsystem entwickelt, das trotz immer weiter schrumpfender Personalressourcen und zeitlich gestiegenen Anforderungen an die Qualität der Vorhersagen und Warnungen in Raum und Zeit, alle z. Zt. verfügbaren meteorologischen Informationen zusammenführt und automatisch aufbereitet werden.

Wettervorhersagen für alle Bereiche der Volkswirtschaft und der Öffentlichkeit

Wichtig für eine sinnvolle Vorhersage im Kurzfrist-, Kurzfrist- und Mittelfristbereich ist, dass man den sogenannten **Anfangszustand** möglichst genau kennt. Dazu spielen die Messdaten aus dem meteorologischen Beobachtungsnetz im Rahmen der Datenassimilation für die verschiedenen Wetter- und Klimamodelle für die Bestimmung des Ist-Zustandes der Atmosphäre, sowohl für den Anfangszustand als auch für die Verifikation eine entscheidende Rolle. Allerdings reichen diese verwendeten Beobachtungsdaten bei weitem nicht aus, um den Anfangszustand genügend genau festzulegen, da sie nicht dicht genug über Deutschland und letztlich über die ganze Welt verteilt sind. Daher werden z. B. zusätzlich aus Radardaten abgeleitete Verteilungen der Niederschlagsraten, die eine feinere Auflösung insbesondere im Hinblick auf konvektive Zellen liefern, eingesetzt um sie in Vorhersagemodelle zu assimilieren. Die in hoher zeitlicher und räumlicher Dichte vorliegenden Daten aus Satellitenmessungen ergänzen und verdichten die Bodendaten in idealer Weise.

3. GRUNDSÄTZLICHES ZU MESSMETHODEN

3.1 Allgemeine Grundlagen zur Messung physikalischer Größen

In Physik und Technik wird versucht, die Natur nach ihren Merkmalen (Eigenschaften, Erscheinungen, Zuständen u. ä.) zu beschreiben. Dazu werden **physikalische Gesetzmäßigkeiten qualitativ und quantitativ** untersucht. Um ein rationales Arbeiten zu ermöglichen, sind feste Bezeichnungen für charakteristische Merkmale definiert, die eine eindeutige Verständigung auch im mathematischen Sinne ermöglichen. Sie werden ganz allgemein als physikalische Größen bezeichnet. **Eine physikalische Größe beschreibt qualitativ und quantitativ die Eigenschaften und Erscheinungen eines Objektes.**

Nach Einstein muss eine physikalische Größe messbar sein, d. h. ein Messverfahren definieren. Die charakterisierenden Merkmale können grundsätzlich in zwei verschiedene Arten unterteilt werden. Sie sind entweder direkt messbar (Messgrößen) oder können aus Messgrößen berechnet werden (abgeleitete Größen).

1. messbare Merkmale sind Eigenschaften, Erscheinungen, usw., die nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ beschrieben werden können. Dem Merkmal „Raum“ haftet bereits in der Bezeichnung die Messbarkeit an, da man von einem doppelt so großen Raum sprechen kann
2. nicht messbare Merkmale sind Eigenschaften, Erscheinungen, usw., mit denen sich nur qualitative Aussagen verbinden, z. B. vermittelt das Merkmal „bunt“ wohl einen bestimmten subjektiven Eindruck, der aber nicht messbar ist. Dies kommt hier bereits in der Bezeichnung zum Ausdruck, da man nicht von doppelt so bunt sprechen kann.

Die Objekte selbst – z. B. Gegenstände, Vorgänge oder Zustände wie auch nicht quantifizierbare Merkmale, etwa Aussehen oder Geschmack – sind keine physikalischen Größen.

In der **Physik** und der **Technik** beschäftigt man sich fast ausschließlich mit objektiv messbaren Vorgängen, so dass in diesem Rahmen nur die unter 1. genannten messbaren Merkmale von Bedeutung sind. In der Meteorologie dagegen ist nicht alles messbar, aber dennoch von Bedeutung, z. B. Wolkengattung und -art, Niederschlagsart und -phase.

Die physikalischen Gesetze bringen Beziehungen zwischen physikalischen Größen zum Ausdruck. Jede physikalische Größe (Messgröße) ist das Produkt aus **Zahlenwert und Einheit (Maßeinheit) bzw. Maßzahl und Dimension** wobei die Dimension **Zeit, Länge, Temperatur, Geschwindigkeit** lediglich die Qualität einer Größe beschreibt. Erst das Produkt Zahlenwert und Einheit gibt den Wert einer

Größe, die Quantität an. Die Messung jeder physikalischen Größe erfordert den Vergleich mit einem genauen Standard, einer Maßeinheit. Sie beschreibt, wie viel mal diese Einheit in der bezeichneten Größe enthalten ist, z. B.

$$l = 900 \text{ m}, t = 30 \text{ s}$$

oder als abgeleitete Größe

$$v = 25 \text{ m s}^{-1}, F = 2.8 \text{ N}$$

Nun kann es Größen geben, die sich wohl in der Quantität, nicht aber in ihrer Qualität unterscheiden. Man hat daher neben dem Begriff der physikalischen Größe noch den übergeordneten Begriff der „**physikalischen Größenart**“ eingeführt, der nur eine qualitative Aussage beinhaltet. Z. B. gehören die verschiedenen Größen: Fläche 1, Fläche 2, Fläche 3 alle zu der gleichen Größenart Fläche.

Die physikalische Größenart beschreibt lediglich die Qualität bestimmter messbarer Eigenschaften, Erscheinungen, Zustände der Natur.

Zur weiteren Vereinfachung werden die Größen und Größenarten symbolhaft durch einen Buchstaben bezeichnet. Erst mit solchen Vereinbarungen lassen sich die Naturvorgänge und ihre funktionellen Zusammenhänge überschaubar beschreiben. So lässt sich z. B. das grundlegende physikalische Gesetz, das **2. NEWTONsche Gesetz** in einfacher Weise formulieren mit:

$$F = m \cdot a$$

mit $m = \text{die Größe „Masse“}$
 $a = \text{die Größe „Beschleunigung“}$

wenn man der Wirkung, die ein abgebremster Körper ausübt, die Größe „Kraft“ zuordnet und symbolisch mit F kennzeichnet. Dabei hat die Kraft, die hier als Größe auftritt, in ihrer Bedeutung als Größenart über diese Einzelgleichung hinaus allgemeine Gültigkeit. Größen stellen Merkmale mit allgemeinen Eigenschaften dar und sind somit keine Zahlen im mathematischen Sinn.

3.2 Physikalische Größen und ihre Einheiten im internationalen Einheitensystem

In physikalisch-meteorologischen Formeln erscheinen physikalische Größen. Von den meteorologischen Elementen gehört nur die Temperatur zu den SI-Basiseinheiten, während alle anderen meteorologischen Größen abgeleitete SI-Einheiten darstellen. Dabei wurde für den Luftdruck eine eigene Einheit (Pa) definiert. Die meteorologischen Größen Strahlung, Luftfeuchtigkeit (allgemein), Wind, Niederschlag, Verdunstung, Immission müssen noch zusätzlich entsprechend präzisiert werden. Das geschieht für die Strahlung z. B. durch die Begriffe wie Bestrahlungsstärke, Bestrahlung oder Strahlungsflussdichte, für den Niederschlag durch die Niederschlagshöhe, für die Immission durch die Immissionskonzentration usw. Die Vorteile einer solchen Vorgehensweise sind vom gleichen Charakter wie

die durchgängige Verwendung der Einheiten im internationalen Einheitensystem.

System von Einheiten und Grundgrößen sind

- absolute Maßsysteme
(CGS-System – Centimetre Gram Second)
- technische Maßsysteme
- Einheitensysteme
 - MKSA-System
 - SI-Einheiten

3.2.1 SI-Einheiten und ihre Umrechnung

In der Physik und damit auch in der Meteorologie muss ein einheitliches Einheitensystem verwendet werden. Im Jahre 1960 einigten sich fast alle Staaten der Erde auf ein neues internationales Einheitensystem (SI – *Système International d'Unités*). Durch das Gesetz über Einheiten im Messwesen vom Juli 1969 wurden ab 1.1.1978 die Vereinbarungen in der Bundesrepublik Deutschland eingeführt. Für die Überwachung der Konsistenz und Eindeutigkeit des SI ist das Internationale Büro für Gewichte und Maße (BIPM) zuständig. National sind die metrologischen Staatsinstitute zuständig, für sie hat sich die Abkürzung NMI (= national metrological institute) eingebürgert. NMI ist in Deutschland die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), in der Schweiz das Bundesamt für Metrologie und Akkreditierung (METAS), in Österreich das Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV)

Das SI-Einheitensystem basiert auf sieben Basiseinheiten, die in allen Ländern die gleichen Kurzbezeichnungen haben. In den Bezugsgleichungen für die Einheiten darf nach dem SI nur die Zahl 1 als Zahlenfaktor auftreten
(z. B. $1 \text{ W} = 1 \text{ J s}^{-1} = 1 \text{ N m s}^{-1} = 1 \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-3}$).

Abgeleitete Einheiten, die auch durch Division oder Multiplikation der Basiseinheiten abgeleitet werden können, besitzen z. T. eigene Namen und Bezeichnungen (Tab. 3.1) und werden ohne Verwendung von Zahlenfaktoren abgeleitet. So z. B. m s^{-2} für die Beschleunigung, m s^{-1} für die Geschwindigkeit, Joule für die Energie oder Newton und Pascal für Kraft und Druck. /TAB. 3.1

Weitere abgeleitete Einheiten

In Tabelle 3.2 sind weitere abgeleitete Einheiten zusammengestellt, die im weiteren Verlauf erwähnt werden. Alle Einheiten sind inkohärent und somit keine SI-Einheiten.
/TAB. 3.2

Grundsätzlich können physikalische Größen auch in anderen als SI-Einheiten angegeben werden. Einheiten aus unterschiedlichen Einheitensystemen sollten jedoch nach Möglichkeit nicht gemischt verwendet werden.

SI-Vorsätze

Häufig muss mit Maßeinheiten umgegangen werden, die sehr viel größer oder kleiner als die SI-Einheiten sind. Dann ist es sinnvoll, Zehnerpotenzen der SI-Einheiten zu nutzen

Tab. 3.1 SI-Basiseinheiten und abgeleitete Einheiten

Basisgröße	Basiseinheit		Abgeleitete Einheiten	
	Name	Zeichen	Einheit / Maßeinheit	Umrechnung
Länge	Meter	m		$1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$ $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$
Masse	Kilogramm	kg	Dichte (kg m^{-3})	
			Kraft (N)	$1 \text{ N} = 1 \text{ kg m s}^{-2}$
			Druck (Pa)	$1 \text{ Pa} = \text{N m}^{-2}$ $1 \text{ Pa} = 1 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$
			Luftdruck (hPa)	$1 \text{ hPa} = 100 \text{ Pa}$ $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N m}^{-2} = \text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$
			Arbeit, Energie Wärmemenge (J)	$1 \text{ J} = 1 \text{ N m} = 1 \text{ W s}$ $1 \text{ J} = 1 \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2}$
			Leistung (W)	$1 \text{ W} = 1 \text{ J s}^{-1} = 1 \text{ N ms}^{-1}$ $1 \text{ W} = 1 \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-3}$
			Energieflussdichte (W m^{-2})	$1 \text{ W m}^{-2} = 1 \text{ kg s}^{-3}$
Zeit	Sekunde	s	Geschwindigkeit (m s^{-1})	$1 \text{ km h}^{-1} = 0,2778 \text{ m s}^{-1}$
			Beschleunigung (m s^{-2})	
Temperatur (thermodynamische Temp.)	Kelvin	K	Celsius-Temperatur, Temperaturdifferenz	$0^\circ\text{C} = 273,15 \text{ K}$
elektrische Stromstärke	Ampere	A		
Lichtstärke	Candela	cd	Leuchtdichte	$= \text{cd m}^{-2}$
Stoffmenge	Mol	mol		

Tab. 3.2 Weitere abgeleitete Einheiten

Name	Maßeinheit		Umrechnung
	Name	Zeichen	
Frequenz	Hertz	Hz	$= 1 \text{ s}^{-1}$
elektrische Ladung	Volt	V	$= \text{W A}^{-1} = \text{m}^2 \text{ kg s}^{-3} \text{ A}^{-1}$
Kapazität	Farad	F	$= \text{C V}^{-1} = \text{s}^4 \text{ A}^2 \text{ m}^{-2} \text{ kg}^{-1}$
elektrischer Widerstand	Ohm	Ω	$= \text{V A}^{-1} = \text{m}^2 \text{ kg s}^{-3} \text{ A}^{-2}$
Beleuchtungsstärke	Lux	lx	$= \text{lm m}^{-2} = \text{cd sr m}^{-2}$
Wärmekapazität, Entropie	Joule pro Kelvin	J K^{-1}	$= \text{m}^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ K}^{-1}$
Spezifische Wärmekapazität, spezifische Entropie	Joule pro Kilogramm Kelvin	$\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$	$= \text{m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ K}^{-1}$
Spezifische Energie			
	Joule pro Kilogramm	J kg^{-1}	$= \text{m}^2 \text{ s}^{-2}$
Elektrische Ladungsdichte	Coulomb pro Kubikmeter	C m^{-3}	$= \text{s A m}^{-3}$

(Tab. 3.3), die als Vorsätze (Präfixe) bezeichnet werden und auf jede SI-Einheit angewendet werden können. /TAB. 3.3

Tab. 3.3 Vielfache oder Teile von SI-Einheiten

Faktor	Präfix	Symbol	Faktor	Präfix	Symbol
10^{12}	tera	T	10^{-1}	dezi	d
10^9	giga	G	10^{-2}	zenti	c
10^6	mega	M	10^{-3}	milli	m
10^3	kilo	k	10^{-6}	mikro	μ
10^2	hekto	h	10^{-9}	nano	n
10^1	deka	da	10^{-12}	piko	p

Darüber hinaus sind in der Meteorologie noch einige nicht gesetzliche Einheiten in Gebrauch, z. B. die Stunde (h) und Minute (min). Im Bereich der Seefahrt und auch in der Fliegerei werden Längenangaben oft in Seemeilen bzw. nautische Meilen (NM) und die Geschwindigkeit in Knoten (kn) angegeben. Diese Maßeinheiten sind also keine SI-Einheiten, wegen ihrer Bedeutung aber in Wissenschaft und Technik in Spezialgebieten zugelassen.

Es kommt manchmal vor, dass in einer Rechnung eine Maßeinheit in eine andere umgerechnet werden muss, wobei auch mit anderen als in Tabelle 3.1 genannten Maßeinheiten umgegangen werden muss, z. B. soll mit der Angabe der Geschwindigkeit (z. B. 120 km h^{-1}) der Weg, der in einer bestimmten Zeit (z. B. 4 h) zurückgelegt wird, berechnet werden, also

$$v = \frac{s}{t} \left(\frac{\text{km}}{\text{h}} \right) \text{ gleich } s = 120 \cdot 4 \left(\frac{\text{km} \cdot \text{h}}{\text{h}} \right) = 480 \text{ km.}$$

Die Einheit der Zeit kann wie jede andere Zahl gekürzt werden, so dass die Maßeinheit km übrig bleibt. So lassen sich viele andere Maßeinheiten ineinander umrechnen.

Bei den Maßeinheiten ist auf eine exakte Anwendung zu achten. Die Jahressumme der Niederschlagshöhe mit der Einheit mm/a anzugeben wäre falsch. Diese Einheit entspricht einer Niederschlagsintensität, keiner Niederschlagshöhe. Der Jahresbezug muss bei der Niederschlagshöhe verbal ausgedrückt werden, also „Jahressumme der Niederschlagshöhe in mm“ oder „jährliche Niederschlagshöhe in mm“.

3.2.2 Physikalische Größen und Konstanten

Tabelle (3.4) enthält nur physikalische Größen und Konstanten, die im Zusammenhang mit der meteorologischen Messtechnik und im Rahmen dieses Leitfadens stehen. Ausführliche Tabellen sind in jedem guten Physikbuch enthalten. Die nachfolgend verwendeten bzw. erwähnten Konstanten entsprechen der Internationalen Temperaturskala von 1990 (ITS-90). Auf die Angabe von Abweichungen, die sich in den meisten Fällen auf Werte nach der 3. Stelle hinter dem Komma beziehen, ist verzichtet worden, da in der Regel Mess- und Materialwerte höchstens mit dieser Genauigkeit vorliegen. /TAB. 3.4

Tab. 3.4 Physikalische Größen und Konstanten

Größen und Konstanten	Symbol	Wert
Standard-Schwerebeschleunigung	g ₀	9,80665 m s ⁻²
Stefan-Boltzmann-Konstante	σ	5,670 10 ⁻⁸ W m ⁻² K ⁻⁴
Wiensche Konstante	λ _{max} T	2,897 10 ⁻³ m K
universelle Gaskonstante (n. Cohen und Taylor, 1986)	R	8,31451 J mol ⁻¹ K ⁻¹
Gaskonstante trockener Luft	R _L	287,058 J kg ⁻¹ K ⁻¹
Gaskonstante von Wasserdampf	R _w	461,525 J kg ⁻¹ K ⁻¹
Psychrometerkonstante (Wasser) (Eis)		6,53 10 ⁻⁴ pK ⁻¹ 5,75 10 ⁻⁴ pK ⁻¹
Lichtgeschwindigkeit im Vakuum	c	299.792.458 m s ⁻¹

Ob die Naturkonstanten wirklich konstant sind, ist nicht abschließend geklärt. Es gibt immer wieder Versuche, zeitliche Änderungen dieser Größen zu messen. Da aber bisher noch keine eindeutigen Hinweise auf zeitliche Änderungen der Naturkonstanten gefunden wurden, müssen mögliche Variationen sehr klein sein. Der in Tabelle 3.4 angegebene Wert für die Lichtgeschwindigkeit ist erst seit dem 20.10.1983 auf Grund genauer Messungen endgültig festgelegt worden.

3.3 Verknüpfung physikalischer Größen – Physikalische Gleichungstypen

Ähnliches wie für Größen gilt für Gleichungen. So ist bspw. die Energiehaushaltsgleichung in der Form

$$\text{Strahlung} = \text{Bodenwärmestrom} + \text{Konvektionswärmestrom} + \text{Verdunstungswärmestrom}$$

keine Gleichung physikalischer Größen, sondern nur eine „Wortgleichung“ mit einem gewissen Erkenntniswert, für quantitative Zwecke aber nicht widerspruchsfrei anwendbar.

3.3.1 Größengleichungen

Größengleichungen verknüpfen verschiedene physikalische Größen und als Unterscheidungsmerkmal zwischen gleichartigen Größen deren Größenwerte (Messwerte) miteinander. Sie sind das Produkt aus Zahlenwert und Einheit, unabhängig von den verwendeten Einheiten. Die Größenart muss auf beiden Seiten des Gleichheitszeichens jedoch übereinstimmen, damit die Gleichung physikalisch sinnvoll ist.

Größengleichungen sind Definitionsgleichungen für abgeleitete Größen. Sie sind unabhängig

- von Maß- und Einheitensystemen und
- von der Angabe eines Messverfahrens.

Die in der Größengleichung symbolisch durch einen Buchstaben gekennzeichnete Größe ist bei der zahlenmäßigen Auswertung der Gleichung entsprechend der Definition

$$\text{Größe} = \text{Zahlenwert} \times \text{Einheit}$$

durch das Produkt zu ersetzen und die Einheiten sind wie Zahlenwerte als algebraische Rechengröße zu behandeln. Ein Beispiel hierzu ist das bereits erwähnte **2. NEWTON-AXIOM**, das „Grundgesetz der Mechanik“

$$F = m \cdot a \quad (\text{Kraft} = \text{Masse} \times \text{Beschleunigung})$$

mit der SI-Einheit Newton $1 \text{ N} = 1 \text{ kg m s}^{-2}$.

Der **Vorteil** von Größengleichungen liegt darin, dass man beliebige Einheiten verwenden kann und dass sie für jedes beliebige Dimensionssystem richtig sind, also ohne gleichzeitig erklären zu müssen, auf welches Einheiten- und Dimensionssystem sich diese Gleichung bezieht.

Der **Nachteil** der Größengleichung besteht darin, dass man bei der Auswertung immer das Produkt Zahlenwert x Einheit einsetzen und für beide Faktoren die Rechnung durchführen muss. Der Rechenaufwand ist deshalb größer als der mit reinen Zahlenfaktoren. Muss die Gleichung in der Praxis sehr häufig gelöst werden, so sind die Einheiten der Größen oft festgelegt, so dass man sich die Rechnung für die Einheiten sparen kann, wenn man eine besondere Form der Größengleichung – **die zugeschnittene Größengleichung** – aufstellt. Durch das Setzen der Formelzeichen in Klammern oder die Division der Größen durch die jeweils gewünschte Maßeinheit, erhält man dann die sogenannte zugeschnittene Größengleichung. Sie wird aus der Größengleichung entwickelt, indem man die einzelnen Größen mit den gewählten Einheiten erweitert

$$\text{Größe} = \text{Zahlenwert} \times \text{Einheit}$$

$$\text{Beispiel: } v = \frac{s}{t} \left(\frac{km}{h} \right)$$

oder die reine Zahlenwertgleichung anwendet.

3.3.2 Einheitengleichungen

Eine Einheitengleichung ist eine zahlenmäßige Beziehung zwischen den Maßeinheiten physikalisch-chemischer Größen. In der Einheitengleichung treten nur Maßeinheiten und Zahlenwerte auf und wie erwähnt, nach dem SI immer nur mit der Zahl 1 als Zahlenfaktor, z. B.:

$$\frac{1 \text{ N}}{\text{m}^2} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2 \text{m}^2} = 1 \frac{\text{kg}}{\text{m s}^2}$$

3.3.3 Zahlenwertgleichungen

In Zahlenwertgleichungen haben die Formelzeichen ausschließlich die Bedeutung von Zahlenwerten. Sie sind daher abhängig von der Wahl der Einheiten und nur brauchbar, wenn diese auch bekannt sind. Sie werden heute noch angewandt, führen aber leicht zu Fehlern und sind ohne weitere Beschreibung nicht auswertbar. Sie folgen aus der zugeschnittenen Größengleichung, indem die Einheiten fortgelassen werden. Formeln in historischen Texten, „Faustformeln“ und empirische Formeln sind meistens in der Form von Zahlenwertgleichungen angegeben. In einigen Fällen stehen die zu benutzenden Einheiten mit in der Gleichung.

Die Formelzeichen bedeuten hier Zahlen. Ein Beispiel soll das verdeutlichen

$$\Delta p = -\rho \cdot g \cdot \Delta z \quad \text{und} \quad p = \rho \cdot R_L \cdot T_V$$

ergibt

$$\Delta z = \frac{R_L \cdot T_V}{g \cdot \rho} \Delta p \quad (\text{hydrostatische Grundgleichung})$$

mit $T_V = 281 \text{ K}$
 $\rho = 954 \text{ hPa}$
 $R_L = 287 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
 $g = 9.81 \text{ m s}^{-2}$

Die Zahlenwerte in die Formel eingesetzt ergibt:

$$\Delta z = \frac{287 \cdot 281}{9.81 \cdot 954} \Delta p \quad \Delta z = \frac{\text{J kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \text{K}}{\text{ms}^{-2} \cdot \text{hPa}} \Delta p$$

$$\Delta z = 8.617 \Delta p \quad (\Delta z \text{ in m, } \Delta p \text{ in hPa})$$

Weitere Beispiele für Zahlenwertgleichungen sind

- virtuelle Temperatur $T_V = t(1 + 0,608 \cdot t)$
- spezifische Feuchte siehe 9.1.1.1
- Henningsche Formel in Fuß $h = 400(t - t_d)$ in Fuß
- Psychrometer-Formel siehe 9.1.1.1

4. DATENERFASSUNG IM RAHMEN METEOROLOGISCHER MESSTECHNIK

4.1 Messtechnik Allgemein

Die folgenden Ausführungen basieren überwiegend auf der DIN 1319, die grundlegende deutsche Norm der Messtechnik, die erstmals 1942 herausgegeben wurde. Der Begriff Messtechnik ist ein Sammelbegriff für alle messenden Verfahren zur **empirischen Bestimmung (Messung) von zahlenmäßig erfassbaren Größen** mit Hilfe von Messgeräten in Wissenschaft und Technik.

Messen ist der experimentelle Vorgang, durch den ein spezieller Wert einer physikalischen Größe, der sog. Messgröße als Bruchteil oder Vielfaches einer Einheit ermittelt wird. Der gemessene Wert heißt **Messwert** und wird als Produkt von Messgröße und Einheit angegeben, z. B.

$$v = \frac{s}{t} \left(\frac{m}{s} \right)$$

Die Messgröße ist die Einheit des Messwertes. Ist eine Messgröße lediglich durch eine Komponente bestimmt wird, heißt sie **Skalar**. Die meisten Messgrößen auf dem Gebiet der Meteorologie sind Skalare. Eine Messgröße, bei der eine Komponente durch eine zweite, in eine bestimmte Richtung zielende Komponente ergänzt wird, heißt **Vektor**, z. B. die Angabe der Windgeschwindigkeit zusammen mit der Windrichtung.

Jede Wissenschaft hat im Laufe der Zeit seine eigene Messtechnik entwickelt. Die **meteorologische Messtechnik** hat zum Ziel, Kenntnisse über die Zustandsgrößen der Atmosphäre und in der Atmosphäre ablaufende Prozesse durch

physikalische Messverfahren zu gewinnen. Messgrößen sind hier die meteorologischen Elemente Temperatur, Luftdruck, Luftfeuchte, Niederschlag, Wolkenuntergrenze, Wind, Sicht, Strahlung u. a. Dabei geht die Meteorologie vom gleichen Ansatz wie die Physik aus, hat aber spezielle Probleme, wie

- kein „abgeschlossenes“ Labor
- Störeinflüsse nicht ausschaltbar
- ständige Variation der Versuchsbedingungen
- physikalische Gesetze für dynamische und thermodynamische Prozesse liegen bereits vor

Besonderheit sind die vielen „Freiheitsgrade“, d. h. die Vorhersagbarkeit ist schwierig aufgrund der

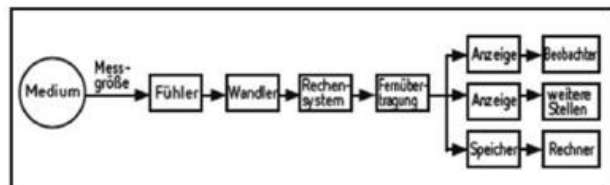
- Gleichzeitigkeit der Vorgänge auf verschiedenen Skalen und der
- Wechselwirkungen der verschiedenen Prozesse [38].

Die in diesem Zusammenhang mit der meteorologischen Messtechnik auftretenden Begriffe werden im Folgenden erläutert.

4.2 Messgerät, Messeinrichtung und Normal

Mit einem Messgerät werden der Messwert und der Zahlenwert einer Messgröße ermittelt. Die Grundstruktur und die gemeinsamen Grundfunktionen aller Messgeräte oder Messeinrichtungen zeigt die nachfolgende Abbildung. /ABB. 4.1

Abb. 4.1 Grundstruktur und Grundfunktionen einer Messeinrichtung



Die Aufgabe eines Messgerätes ist die Umwandlung einer physikalischen Größe in ein elektrisches Signal, welches durch einen Datenlogger (siehe 4.4) digitalisiert und aufgezeichnet werden kann. Ein solches Gerät wird charakterisiert durch folgende Eigenschaften:

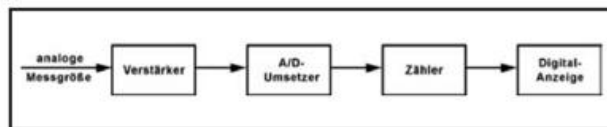
- den Messbereich, der angibt, innerhalb welcher Grenzen der Sensor überhaupt messen kann,
- die Sensibilität (= Empfindlichkeit) ist nach DIN 1319 die „Änderung des Wertes der Ausgangsgröße eines Messgerätes bezogen auf die sie verursachende Änderung des Wertes der Eingangsgröße“,
- die dynamische Kenngröße, die zeitliche Verzögerung, mit der der Sensor eine Änderung des Messwertes (Ansprechzeit) erfasst,
- die Zuverlässigkeit, d. h. die Reproduzierbarkeit, die den Unterschied zwischen den vom Sensor ausgegebenen Wert bei gleichen Bedingungen zu verschiedenen Zeiten angibt (charakterisiert durch die Standardabweichung),
- die Messunsicherheit, als ein Maß für die Abweichung eines angezeigten Wertes vom tatsächlichen Wert,

- die Linearität, die Fähigkeit des Messgebers über dem gesamten Messbereich auf Änderungen der Eingangsgröße mit einer proportionalen Änderung der Ausgangsgröße zu reagieren,
- die Ansprechschwelle ist nach DIN 1319 die „kleinste Änderung des Wertes der Eingangsgröße, die zu einer erkennbaren Änderung des Wertes der Ausgangsgröße eines Messgerätes führt“.

Eine **Messeinrichtung** ist die Gesamtheit aller Messgeräte und zusätzlicher Einrichtungen zur Erzielung eines Messergebnisses. Ein digitales Messgerät besteht aus einem Verstärker, einem Analog-Digital-Wandler (AD-Wandler oder ADC für Analog-to-Digital-Converter), einem Zähler und der Digitalanzeige. Ein **Analog-Digital-Umsetzer (ADU)**, setzt analoge Messgrößen, die zunächst verstärkt werden, in digitale Daten bzw. einen Datenstrom um, der dann weiterverarbeitet oder gespeichert werden kann. Für die Umsetzung sind unterschiedliche Methoden in Gebrauch. Das Gegenstück ist der **Digital-Analog-Umsetzer (DAU)**. Ein Zähler wandelt die binäre Größe in eine geeignete Größe, z. B. den BCD-Code für die dezimale Digitalanzeige um.

/ABB. 4.2

Abb. 4.2 Aufbau eines digitalen Messgerätes



Zu den wesentlichen **Merkmale von Messgeräten** gehören

- der Messbereich, Bereich derjenigen Werte der Messgröße, für den gefordert ist, dass die Messabweichung eines Messgerätes innerhalb festgelegter Grenzen bleibt,
- die Ansprechschwelle, die kleinste Änderung des Wertes der Eingangsgröße, die zu einer erkennbaren Änderung des Wertes der Ausgangsgröße eines Messgerätes führt,
- die Empfindlichkeit, d. h. die Änderung des Wertes der Ausgangsgröße eines Messgerätes, bezogen auf die sie verursachende Änderung des Wertes der Eingangsgröße und
- die Auflösung, d. h. nahe beieinanderliegende Messwerte eindeutig zu unterscheiden,

Bei einem **Normal** handelt es sich um ein Messgerät, Messeinrichtung oder Referenzmaterial, das den Zweck hat, eine Einheit oder einen oder mehrere bekannte Werte einer Größe darzustellen, zu bewahren oder zu reproduzieren, um diese an andere Messgeräte durch Vergleich weiterzugeben. Man unterscheidet dabei mehrere Ausführungen. Man unterscheidet dabei das

- **Gebrauchsnormale**, routinemäßig eingesetzte Normale,
- **Bezugsnormale**, ein Normal von der höchsten örtlich verfügbaren Genauigkeit, von dem an diesem Ort vorgenommene Messungen abgeleitet werden, nur zur gelegentlichen Kalibrierung der Gebrauchsnormale eingesetzt,

- **Primärnormal**, das die höchsten meteorologischen Forderungen auf einem speziellen Anwendungsgebiet erfüllt. Das Primärnormal wird außer zum Vergleich mit Sekundär- oder Bezugsnormale nicht unmittelbar für Messungen benutzt.

Auch ein Normal weist eine Messunsicherheit auf, die bei der Messung berücksichtigt werden muss. Einige, im DWD zur Kalibrierung eingesetzten Normale sind unter 7.3.4/8.3.5/9.3.5 und 12.3.5 kurz dargestellt.

Vielfachmessgeräte, auch **Multimeter** genannt, sind in der Regel digitale Messgeräte. Mit ihnen lassen sich mehrere verschiedene Werte messen, sogar ohne dabei die Art der Spannung oder des Stroms bzw. die Polarität beachten zu müssen. Das Messgerät wertet die anliegende Messgröße selbstständig aus. Anstelle von Multimetern kommen bei meteorologischen Messungen normalerweise Datenlogger (siehe 4.4) zum Einsatz.

4.3 Messfühler, Messwert, Messsignal

In einem Medium soll eine bestimmte Messgröße gemessen werden. Dazu muss der Messfühler Kontakt mit dem Medium haben. In vielen Fällen findet zwischen dem Fühler und dem Medium ein Energieaustausch (z. B. Wärmeaustausch) statt.

Der Messfühler (Sensor) wandelt eine physikalische Größe in ein für Menschen oder Computer verarbeitbares Signal um. Das Ausgangssignal hängt von der Messgröße ab. Die Messgeräte erzeugen Signale, z. B. Strom, Spannung, Frequenz oder Impulse die durch «Interfaces» in Zahlenwerte umgeformt (digitalisiert) werden. So genannte «intelligente» Sensoren geben ihre Messwerte direkt als Zahlen oder Zeichenketten aus. Die so computergerecht aufbereiteten Daten werden dann im Datenlogger (siehe 4.4) abgespeichert und können anschließend vom Zentralrechner abgefragt werden.

Die Messsignale können

- analoge Signale (kontinuierlicher Wertebereich mit beliebigen Zwischenwerten innerhalb des Messbereichs) oder
- digitale Signale (diskontinuierlicher Wertebereich mit nur ganz bestimmten Werten des Ausgangssignals → Quantifizierung und Codierung)

sein. Sie entscheiden zwischen analogem bzw. digitalem Messen. Digitale Datenerfassungssysteme haben analoge Systeme vielfach abgelöst. /ABB. 4.3 und 4.4

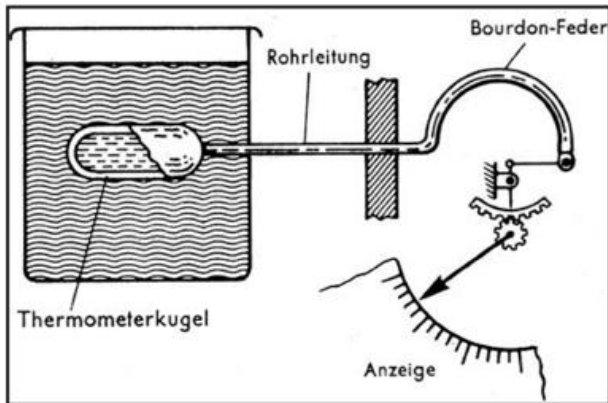
Beispiele: Voltmeter, Uhr, Tachometer

analog → Zeiger

digital → Zahl

Hier kommt der Begriff DSP-Technologie (engl.: Digital Signal Processing) zum Tragen, bei dem es um auf spezielle Aufgaben der digitalen Signalverarbeitung geht. Die meisten Signale in unserer Umgebung liegen in analoger Form vor, die heutzutage von zahlreichen Systemen verarbeitet werden müssen, um etwa die Raumtemperatur zu überwachen und gegebenenfalls Alarm zu geben. Wegen der schnell fortschreitenden Entwicklung der Digitaltechnik

Abb. 4.3 Beispiel einer analogen Anzeige



gewinnt deshalb die digitale Signalverarbeitung immer mehr an Bedeutung. Ein analoges Signal kann z. B. eine von der Zeit t abhängige Spannung $U(t)$ sein, die aus beliebigen reellen Zahlenwerten besteht. Dieses Signal ist zeit- und wertekontinuierlich. Digitale Signale sind sowohl zeitdiskret, als auch wertediskret. Es ist die numerische Repräsentation eines analogen Signals [46].

Die digitale Anzeige vermittelt häufig einen sehr genauen Messwert. Wie bei analogen Messgeräten ist die Genauigkeit von der Messung und der Abtastfrequenz abhängig. Diese Abtastfrequenz legt die Abstände der Abfrage an den Sensor fest und muss sehr genau auf diesen abgestimmt sein. Zwar sind die Messfehler geringer als bei analogen Messgeräten, allerdings sind die elektronischen Schaltungen temperaturabhängig. Außerdem treten Messfehler durch Leitungslänge und elektrische Störungen auf. Daher ist eine sensornahe Digitalisierung anzustreben. Digitale Messgeräte haben den Vorteil, dass sie nicht so empfindlich von äußeren Einflüssen sind. Soll der Messwert einem Beobachter vermittelt werden, muss die Anzeige einem Sinnesorgan, in der Regel dem Auge zugänglich sein.

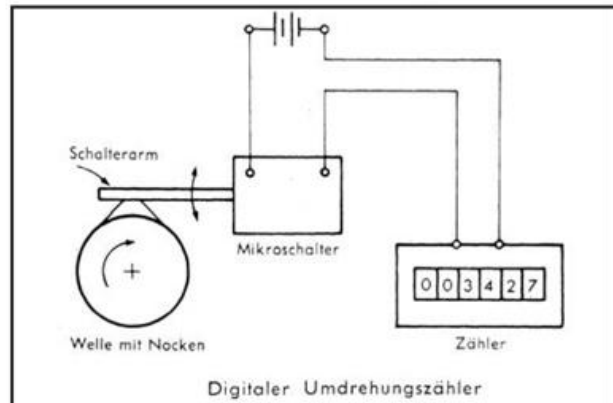
4.4 Datenerfassung

Heutige Datenerfassungssysteme sind in ihrer Grundfunktion Datenlogger mit mehreren analogen und digitalen Eingangskanälen und seriellen Schnittstellen für die Datenaufnahme und -ausgabe. Die analogen Eingangskanäle verfügen über einen AD-Wandler (siehe 4.2), der die analogen Messsignale digitalisiert. Solch ein Datenerfassungssystem kann somit sowohl analoge als auch digitale Sensoren synchron erfassen, die Daten zwischenspeichern und an andere Systeme übertragen. In begrenztem Umfang lassen sich auch arithmetische Operationen (z. B. Mittelwertbildung) programmieren.

Auf die Datenerfassung im DWD wird unter 18.2 näher eingegangen.

Für spezielle Messaufgaben (Forschung, Messkampagnen, Erprobung) werden handelsübliche meteorologische Datenlogger verwendet, deren Messeingänge und interne Software bereits auf den Anschluss meteorologischer Sen-

Abb. 4.4 Beispiel einer digitalen Anzeige



soren (z. B. Pt 100-Temperaturfühler) vorbereitet sind. Diese Logger werden über ihre serielle Schnittstelle für den jeweiligen Einsatzzweck konfiguriert.

Datenlogger sind üblicherweise auf einen stromsparenden Betrieb ausgelegt und lassen sich daher relativ einfach mit einer eigenen Energieversorgung (z. B. durch ein akkugepuffertes Solarpaneel betreiben, die auch die an ihn angeschlossenen Messgeräte/Sensoren versorgt. Die Datenspeicherung erfolgt typischerweise auf Speicherkarten. Dadurch wird einem möglichen Datenverlust (bei elektrischen Defekten oder leerem Akku) vorgebeugt.

Exemplarisch werden zwei Datenlogger vorgestellt, die in Verbindung mit meteorologischen Sensoren verwendet werden.

4.4.1 COMBILOG Datenlogger

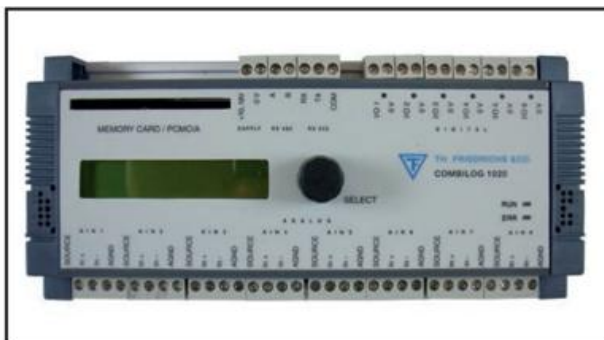
Die Konfigurierung für den COMBILOG der Fa. Friedrichs erfolgt über eine auf WINDOWS® basierende PC-Software. Dabei wird die Kanalbelegung sämtlicher Eingänge durch eine integrierte Datenbank für die gebräuchlichsten Sensoren unterstützt. Die Konfiguration und Anschlussbelegung wird auf dem Bildschirm dargestellt. Speichern und Ausdrucken ist ebenso möglich. /TAB. 3.1

Tab. 4.1 Spezifikationen COMBILOG Datenlogger 1020 (Friedrichs)

Einsatzbereich	-30 bis +60 °C
Genauigkeit	0,01 bis 0,3 %, bereichsabhängig;
Auflösung	0,003 bis 0,03 %, bereichsabhängig;
Messintervalle	0,5 s bis 60 min
Messwertauflösung	16 Bit AD-Wandlung
Temperaturdrift	25 ppm K ⁻¹ ; 2 ppm K ⁻¹ mit Driftkorrektur;
Linearität	0,01 %
Schnittstellen	1 x RS232, 1 x RS485; im ASCII- oder PROFIBUS-Format, Baudrate max. 38.400 Bit/s
Taktfrequenz	2 Ausführungen: 20 MHz (Standard) oder 5 MHz (Low Power Version)

Messbereiche	Große Bandbreite (z. B. Spannungen ab $\pm 6,25$ mV). Messungen von Thermoelementen
Eingänge	8 analoge, 6 digitale I/O Ports, zusätzliche Arithmetikkanäle, dadurch Erweiterung auf insgesamt 32 Kanäle möglich. Anschluss aller gängigen Sensoren; analoge Eingänge in 2-, 3- oder 4-Leitertechnik
Versorgung	10 bis 18 V DC, je nach Konfiguration ab 70 mW

Abb. 4.5 COMBILOG Datenlogger 1020 (Friedrichs)



Neben analogen und digitalen Eingangskanälen lassen sich arithmetische Verknüpfungen (Summen- und Differenzbildung, Maximum- und Minimum usw.), sowie Überwachungsfunktionen, Alarmfunktionen und Linearisierung von Kennlinien realisieren.

4.4.2 Datenlogger SYNMET-NAV

Auf ca. 60 Einheiten der Marine der Bundeswehr (u. a. auf der Gorch Fock, der Planet) wird der Datenlogger SYNMET-NAV der Fa. Lambrecht speziell für Hochsee- und Schiffs-einsatz ausgerüstet.

Abb. 4.6 Datenlogger SYNMET-NAV (Lambrecht)



Es handelt sich dabei um einen Logger, der eigene Schiffsdaten in Verbindung mit Bordrechnern erfasst und für die Steuerung und Sicherheit des Schiffes verarbeitet.

Tab. 4.2 Spezifikationen Datenlogger SYNMET_NAV (Lambrecht)

Einsatzbereich	-30 bis +70 °C, 0 bis 100 %
Genauigkeit	Abhängig von Parametern und Sensoren, 12-Bit-ADC, 8 μ s Wandlungszeit
Auflösung	14-Bit-ADC
Messintervalle	1 bis 60 s, Mittelwerte 1 bis 60 min
Speicher	dyn. Ringspeicher für Mittel- und Extremwerte, 512 KB RAM
Schnittstellen	redundante Schnittstellen für FWD und AFT-Bordrechner
Eingänge	12 analoge, 5 digitale, universelle Sensoreingänge, belegbar als/für Widerstandsmessung Pt 100, Spannung, Strom, Frequenz, Impuls, Status, serielle Sensoren
Versorgungsspannung	18 bis 32 V DC

Turbulenzerkennung, Luv- und Leevergleich, True Wind sowie Fahrt über Grund stehen dafür beispielhaft.

4.5 Messumformung

Bei den erwähnten Messprinzipien zur Temperaturmessung wird durch die Messgröße eine Spannung bzw. Widerstand so gesteuert, dass diese mit der Messgröße eindeutig zusammenhängen. Ein derartiger Vorgang heißt Messumformung.

Dabei ist zu unterscheiden zwischen Messgrößenumformungen

- bei der eine Messgröße in eine andere umgewandelt wird. **Beispiel:** Umformung einer Widerstands- in eine Spannungsänderung
- bei der sich der Messwert ändert, die Größenart aber bestehen bleibt. **Beispiel:** Verstärkung einer Spannung

Bei der elektrischen Messung nicht-elektrischer Größen folgen im Allgemeinen mehrere Messumformungen aufeinander. Zum Beispiel die Messwertumformung

- der Temperatur in eine Widerstandsänderung,
- der Widerstandsänderung in eine Spannungsänderung,
- die Spannungsverstärkung und das Umformen der Spannung in eine Auslenkung des Anzeigers.

Jede dieser Messumformungen geht in einem Messglied vor sich.

Messumformer werden häufig auch als Sensoren bezeichnet. Ein Messumformer liefert, im Unterschied zu einem Sensor, jedoch ein genormtes Signal für einen voreingestellten Messbereich, z. B. ein 0 bis 10 V Signal oder ein 0/4 mA bis 20 mA Signal. Des Weiteren gibt es auch Mess-

umformer, die eine Frequenz oder die Zeit als Ausgangssignal verwenden. Dies hat den Vorteil, dass die Information im zeitlichen Abstand der elektrischen Pulse oder der Pulsrate steckt und nicht in der Signalhöhe. Deshalb sind diese Signale sicherer in der Übertragung und einfacher mittels digitaler Elektronik (Zählerbausteine) zu verarbeiten. Intern besteht ein solcher Messumformer aus zwei Komponenten, einem Sensor und einer elektronischen Einheit, welche das genormte Signal formt. Der Sensor bezeichnet einmal das Messelement und einmal den Messfühler mit Elektronik im Gehäuse mit Ausgangsschnittstelle.

Die Messgröße wird vor und nach jeder Messumformung durch ein bestimmtes Messsignal dargestellt. Das Ausgangssignal ist eine Funktion des Eingangssignals, es wird durch dieses, welches sich am Eingang jedes Messglieds befindet, gesteuert. Der Weg, den ein Messsignal in der Reihe der Messglieder durchläuft, heißt Signalflussweg.

Eingangssignal (vom Medium)
 → Änderung der Messgröße
 Ausgangssignal
 → Reaktion des Messfühlers → **Messwert**

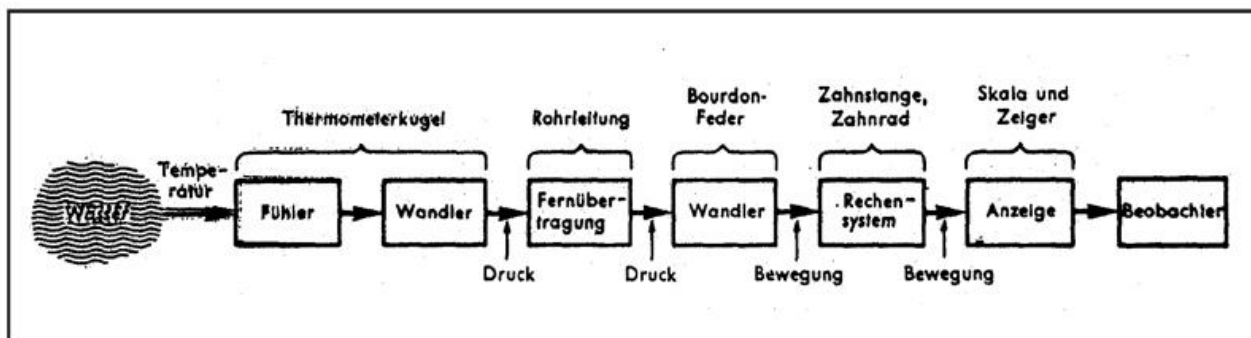
Das Ausgangssignal des Messfühlers ist eine physikalische Größe, z. B. eine Anzeige an einer Skala oder eine elektrische Spannung. In manchen Fällen ist es nötig, einen Messwertwandler zu verwenden, um die Ausgangsgröße ihrerseits in eine andere, leichter zu handhabende Größe umzuwandeln (nicht alle Messgeräte enthalten einen Wandler, manche dagegen gleich mehrere). Im Anschluss an den Wandler ist ein Rechensystem vorgesehen, um mit dem Messsignal gewisse, mathematische Operationen vorzunehmen (z. B. Multiplizieren, Radizieren). Oft wird das Messsignal jedoch lediglich verstärkt, also mit einem konstanten Faktor multipliziert. Messsignale, die durch ein überlagertes Rauschen stark gestört sind, werden gefiltert, um das Rauschen zu unterdrücken

Die meisten Anzeigen sind die

- Stellung eines Zeigers an einer Skala,
- die direkte Ziffernanzeige oder
- eine Aufzeichnungsvorrichtung, in der der Verlauf der Messwerte auf entsprechend gezeichnetes Papier aufgeschrieben wird.

Beispiel eines Flüssigkeitsdruckthermometers:

Abb. 4.7 Beispiel eines Flüssigkeitsdruckthermometers



Der Messfühler muss durch die Messgröße beeinflusst werden, so dass er irgendwelche Eigenschaftsänderungen (Volumenänderung, Gewichtsänderung, Längenänderung, Widerstandsänderung u. a.) erfährt. Andererseits darf der Messfühler bzw. die Messeinrichtung das zu messende Medium nicht beeinflussen und die zu messende Größe nicht verfälschen (Rückwirkung des Messfühlers). Diese Beeinflussung ist im Prinzip nie ganz vermeidbar.

Beispiel: ein kaltes Thermometer entzieht der zu messenden Flüssigkeit Wärme, und verfälscht damit die Temperatur am Messort. Man kann diesen Einfluss z. T. dadurch verhindern, dass man ein Thermometer mit möglichst geringer Wärmekapazität wählt.

Für mikrophysikalische Objekte ist diese Forderung prinzipiell unerfüllbar.

4.6 Messprinzip, Messverfahren

Das **Messprinzip** beruht auf den physikalischen Erscheinungen des zu messenden Mediums. Es wird nach der charakteristischen physikalischen Eigenschaft benannt, mit deren Hilfe die Messung durchgeführt wird.

Beispiel: die Temperatur kann nach dem Messprinzip des thermoelektrischen Effekts oder nach dem Messprinzip der Temperaturabhängigkeit eines elektrischen Widerstands gemessen werden.

Das **Messverfahren** dagegen ist die spezielle Anwendung des Messprinzips. Eine Messung kann bei gleichem Messprinzip nach verschiedenen Messverfahren durchgeführt werden. Hierbei können grundsätzlich drei verschiedenen Messverfahren unterschieden werden:

- Ausschlagverfahren → der Änderung des Eingangssignals folgt eine umgehende Änderung des Ausgangssignals (nur im Zusammenhang mit mechanischen Geräten)
- Digitalmessverfahren
- Kompensationsverfahren (Kompensation der Änderung der Messgröße)

Der Träger der Messgröße heißt **Messgegenstand** oder Messobjekt, bei Gasen und Flüssigkeiten **Messmedium**.

4.7 Messort, Messzeitpunkt

Die Stelle, an der die Messgröße aufgenommen wird, ist der **Messort**. Er soll eine repräsentative Lage haben (siehe 19.4). Die Anzeige des Messwertes kann weit vom Messort entfernt erfolgen.

Der **Messzeitpunkt** muss festgelegt sein. In der Meteorologie ist er fast immer international vereinbart und zwar für durchzuführende Beobachtungen/Messungen zum

- gleichen Zeitpunkt (synoptisch) oder
- gleichen Sonnenstand (klimatologisch).

5. MESSERGEBNIS, MESSUNSIKERHEIT, MESSABWEICHUNG

Kein Messgerät misst die Messgröße absolut genau, d. h. die angezeigten Messwerte weichen grundsätzlich mehr oder weniger vom wahren Wert ab (den man eigentlich nie kennt). Man spricht daher gemäß „Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen“ (GUM – Guide to the expression of uncertainty in measurement) nur noch vom **Wert einer Messgröße**. Der systematischen Messabweichung ist eine, wenn auch sehr kleine Messunsicherheit zugeordnet, weil auch Normale mit einer Messunsicherheit behaftet sind.

Die Messunsicherheit wird definiert als Kennwert, der zusammen mit dem Messergebnis angegeben wird, d. h. dem Messergebnis durch die Messung beigeordnet wird, und den Bereich der Werte charakterisiert, die der Messgröße durch die Messung vernünftigerweise zugeschrieben werden können.

Die Messunsicherheit umfasst die zufälligen (statistischen) und die systematischen Fehler. Sie kann durch die Standardabweichung ausgedrückt werden. Diese wird durch Wiederholmessungen mit **einem** Messgerät an einem konstanten Messobjekt oder durch Doppelbestimmungen mit **zwei gleichen** Messgeräten bestimmt. Der wesentliche Unterschied zwischen diesen Fehlerarten ist, dass systematische Messabweichungen rechnerisch oder experimentell berücksichtigt werden können, während sich zufällige Messabweichungen nur abschätzen lassen. Die zufällige Messabweichung gibt allgemein die Messunsicherheit eines Messmittels an.

Praktisch ist jede Messung mit Unsicherheiten behaftet, auch bei verstärktem Einsatz der Elektronik bei Aufnahme, Umwandlung und Verarbeitung der Messwerte. Der angezeigte Messwert

- kann identisch mit dem Messergebnis sein,
- beinhaltet jedoch in den meisten Fällen Fehler, deren Ursachen in der herstellungsbedingten Unvollkommenheit
 - des Messgerätes
 - des Messsystems
 - der Messmethode

zu suchen sind. Als Messfehler wird also die Differenz zwischen dem gemessenen Wert einer bestimmten Größe und dem wahren Wert der Messgröße bezeichnet, deren Angabe immer zum Messergebnis gehört. Es sind keine Fehler im herkömmlichen Sinne, sondern Ungenauigkeiten, die auch als Messabweichung oder Messunsicherheit bezeichnet werden.

Ferner treten Beeinflussungen durch die Umwelt (z. B. Temperatur- und Druckschwankungen) und die Beobachter auf. Daher muss aus den unterschiedlichen Werten das Messergebnis abgeleitet werden:

$$y = f(x_i)$$

d. h. der Wert der Messgröße y ist der korrigierte Messwert.

Die unzureichende Kenntnis des Wertes der Messgröße wird durch die **Unsicherheit des Messergebnisses** widerspiegelt. Selbst nach angefügter Korrektur hinsichtlich der erkannten Einflüsse ist das Messergebnis infolge der Unsicherheit immer noch nur ein **Schätzwert der Messgröße**, die sich aus systematischen und zufälligen Einflüssen ergibt.

5.1 Systematische Messabweichungen

Systematische Messabweichungen setzen sich aus den folgenden Fehlern zusammen:

Instrumentenfehler

Messgeräte können mangelhaft kalibriert sein, wodurch Fehler auftreten. So können sich z. B. Nullpunktfehler und Amplitudenfehler im Laufe der Zeit einstellen. Sie werden durch **Kalibrierscheine** weitgehend eliminiert, welche von den zuständigen Stellen (im DWD sind das die Service und Logistik-Einheiten, im weiteren Verlauf kurz SL-Einheiten genannt) erstellt bzw. nachgeprüft werden müssen.

Mangelnde Reinheit der Messsubstanz, z. B. des Quecksilbers kann auch zu systematischen Fehlern führen. Regelmäßige Vergleiche der Geräte/Sensoren sorgen dafür, dass geräteseitige Fehlmessungen rechtzeitig erkannt werden, damit das fehlerbehaftete Gerät aus dem Einsatz genommen werden kann, und von der zuständigen Stelle überprüft und ggf. neu kalibriert bzw. ausgetauscht wird.

Fehler durch ungünstige Aufstellung der Messgeräte/Sensoren

Zu den Aufstellungsfehlern gehören vor allem die Hüttenfehler (siehe 8.4.3).

Fehler durch schlechte Handhabung der Messgeräte/Sensoren

Zu den Handhabungsfehlern gehören u. a. die Korrektions- und Reduktionsfehler bei Barometern. Besonders häufig sind dabei Ablesefehler von 5 hPa.

Systematische Messabweichungen sind durch Unvollkommenheit der Messgeräte/Sensoren und des Messverfahrens hervorgerufene Fehler, z. B.

- falsche Kalibrierung
- Einflüsse der Umwelt (Erwärmung des Maßstabes, Abnutzung von Gewichten) die man messen oder abschätzen kann. Sie sind bei genauer Wiederholung des Messvorgangs stets gleich groß und lassen sich durch Korrekturen oder (besser) Vermeidung beseitigen. Sie können durch eine Verbesserung des Messverfahrens reduziert oder sogar vermeiden werden. Systematische Messabweichungen sind durch das Vorzeichen plus (+) oder minus (-) und nach dem Betrag bekannt und können durch entsprechende Korrektur berücksichtigt werden.

5.2 Zufällige Messabweichungen

Zufällige Messabweichungen werden durch messtechnisch nicht erfassbare (und nicht beeinflussbare) objektive und subjektive Ursachen hervorgerufen, z. B.

- Ablesefehler des Beobachters, vor allem bei analoger Anzeige und durch Parallaxenfehler,
- Ungeschicklichkeit beim Messen oder Ablesen,
- Erschütterung des Messgerätes,
- Temperatureinflüsse auf den Messfühler,
- Reibung oder toter Gang bei mechanischen Messfühlern (z. B. Aneroidbarometern).

Zufällige Messabweichungen haben positives oder negatives Vorzeichen, d. h. sie schwanken bei jeder Messung nach Betrag und Vorzeichen, daher kann erst durch wiederholte Messungen einer bestimmten Größe unter denselben Bedingungen festgestellt werden, dass die Anzeige statistisch um einen Mittelwert (wahren Wert) schwankt. Bei nur einmaliger Messung ist die Messabweichung zu schätzen, bei mehrfachen Messungen (Messreihen) kann sie mit statistischen Methoden bestimmt werden.

6. ELEKTRISCHE/ELEKTRONISCHE GRUNDLAGEN UND BEGRIFFE

In diesem Kapitel werden einige Grundlagen und Begriffe erläutert, die im Zusammenhang mit mehreren meteorologischen Sensoren/Geräten stehen. Tritt ein Begriff bei nur einem Gerät auf, findet die Erklärung dort statt. Mit einer nur kurzen Erläuterung soll das Verständnis für die Anwendung des elektronischen Bauteils hergestellt werden. Für eine weitergehende Erklärung und Anwendung wird auf die einschlägige Physik- und Elektronikliteratur verwiesen.

Sicherheitshinweise zum Umgang mit elektrischem Strom siehe Anhang 6.1.

6.1 Kapazitive Messungen

Fast alle kapazitiven Sensoren basieren auf dem Prinzip, dass zwei Platten einen elektrischen Kondensators bilden, von denen eine Platte durch den zu messenden Effekt verschoben oder verformt wird. Verschiedene Bauformen von Kondensatoren sind als Sensoren für eine Reihe physikalischer bzw. meteorologischer Größen (Luftdruck, Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit) geeignet, daher soll hier etwas

ausführlicher auf dieses Messprinzip eingegangen werden. Diese genannten meteorologischen Größen bewirken eine Änderung der Permittivität (dielektrische Leitfähigkeit), also der Durchlässigkeit eines Materials für elektrische Felder oder enthaltener Ladung. Beides kann durch eine nachfolgende Schaltung ausgewertet werden.

Das Messprinzip ist eine Kapazitätsmessung, d. h., dass sich zwischen zwei Kondensatorplatten ein dielektrisches (nicht leitendes) Material als Messfühler befindet. Als Kondensatorplatten aus elektrisch leitfähigem Material werden häufig dünne Metallfolien verwendet, die durch eine dünne Kunststoffschicht voneinander getrennt und gegeneinander isoliert sind. Wenn diese Anordnung aufgerollt wird, kann auf verhältnismäßig kleinem Raum ein großer Flächeninhalt untergebracht werden, um so die Kapazität eines Kondensators zu erhöhen [46].

Die maximale Anzahl Ladungen, die eine Kondensatorplatte bei einer bestimmten angelegten Spannung aufnehmen (bzw. abgeben) kann ist die Kapazität C des Kondensators. Sie ist das Verhältnis der zugeführten Ladung Q zur entstandenen Spannung U

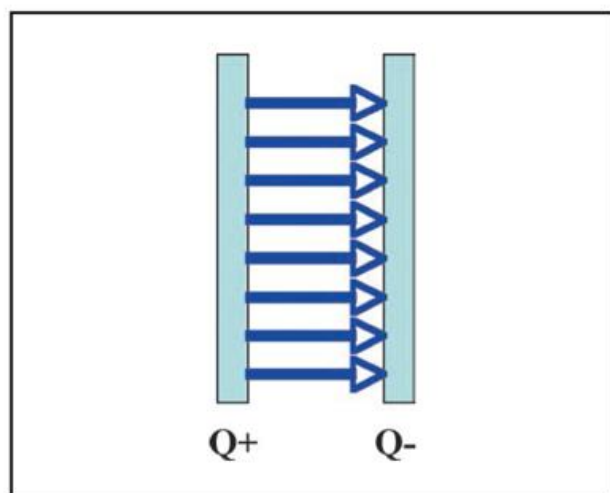
$$C = \frac{Q}{U} \text{ (F)} \quad (6.1)$$

mit C = Kapazität (F)
 Q = Ladungsmenge = Amperesekunde (A·s) = Coulomb (C)
 U = elektrische Spannung (V)

Da die Spannung bei einem einzelnen Leiter proportional zur Ladung ist, hängt das Verhältnis weder von Q noch von U, sondern nur von der Größe und Gestalt des Leiters ab.

Unter Einwirkung einer Spannung U, die am Pluspol der Spannungsquelle liegt, werden von einer Platte Elektronen abgezogen (freie Ladungsträger im Metall) und zur anderen Platte transportiert. Es wandert also elektrische Ladung von einer Platte zur anderen und der Kondensator wird elektrisch aufgeladen. Damit ist eine Platte positiv (Q+) und die andere Platte negativ (Q-) geladen.

Abb. 6.1 Schematische Darstellung eines Plattenkondensator



Die abgeleitete SI-Einheit der Kapazität ist das Coulomb pro Volt, das nach dem englischen Physiker **MICHAEL FARADY** (1791–1867) genannt wird: 1 Farad (1 F) ist die Kapazität eines Kondensators, der beim Anlegen einer Spannung von 1 Volt eine Ladungsmenge von 1 Coulomb (As) speichert. Da das Farad eine große Maßeinheit ist, werden in der Praxis häufig nur Bruchteile (Vorsätze, Tab.3.3) davon (z. B. $1 \mu\text{F} = 10^{-6} \text{ F}$) verwendet.

Die Einheit der Permittivität kann im SI-Einheitensystem als

$$\text{F} \cdot \text{m}^{-1} = \text{A}^2 \cdot \text{s}^4 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-3} = \text{As} \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} = \text{C} \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$$

ausgedrückt werden.

Bei den unterschiedlichsten Kondensatorbauarten spielt der Plattenkondensator eine wichtige Rolle. Er besteht aus zwei Leiteroberflächen (Zweiplattenkondensator) beliebiger Geometrie, den Elektroden, welche durch einen dazwischenliegenden Isolator, das Dielektrikum getrennt sind. Die gespeicherte Ladung ist proportional zu der Spannung des Kondensators. Die Proportionalitätskonstante ist das wesentliche Merkmal eines Kondensators und hängt von folgenden Eigenschaften ab:

- dem Plattenabstand d , je kleiner (Abstand der Platten wesentlich kleiner als ihre Ausdehnung), umso größer ist die Kapazität
- der wirksamen Plattenoberfläche A , je größer die Fläche einer Platte, umso größer ist die Kapazität
- der Permittivitätszahl ϵ , abhängig vom Material zwischen den Platten

Damit gilt für die Kapazität eines Plattenkondensators

$$C = \epsilon \frac{A}{d} \quad (\text{F}) \quad (6.2)$$

Die derzeit gültige Permittivitätszahl des Vakuums beträgt $\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12} \pm 0,0003 \text{ F m}^{-1}$

Der Begriff Dielektrizitätskonstante sollte nicht mehr verwendet werden, insbesondere weil es sich hierbei um keine Konstante handelt, sondern um eine Funktion, die von mehreren Parametern abhängt. An ihrer Stelle tritt der Begriff Permittivitätszahl oder relative Permittivität [46].

Je größer die Kapazität ist, umso mehr Ladung kann ein Kondensator bei einer bestimmten Spannung speichern.

6.2 Piezoelektrischer Effekt

In bestimmten Kristallen wie Quarz, Turmalin und Topas führt mechanischer Druck auf diese Kristalle zur Polarisierung der Moleküle. Dies wird als piezoelektrischer Effekt bezeichnet (1880 von den Brüdern P. und P.J. Curie entdeckt). Die dabei auftretende Verformung der Kristallstruktur verursacht eine Verschiebung der Ionen im Kristallgitter und erzeugt eine elektrische Spannung. Der erzeugte elektrische Strom wird über zwei an dem Kristall angebrachte Elektroden gemessen und in ein Drucksignal umgewandelt. Die

Größe der auftretenden Ladung ist von der Größe der einwirkenden Kraft (z. B. Luftdruck) abhängig und kann nach entsprechender Verstärkung zur Messung verwendet werden.

Heute werden piezoelektrische Kristalle in Wandlern (z. B. Mikrofonen, Tonabnehmern von Plattenspielern) eingesetzt und vielfach auch in Spezialgeräten zur Luftdruckmessung ausgenutzt. Im praktischen Wetterdienst sind solche Messfühler nicht in Gebrauch, daher folgt keine weitere Beschreibung von Sensoren.

Ein anderes Messprinzip, zu welchem im weiteren Verlauf ein Gerät beschrieben wird, beruht auf der Änderung des elektrischen Widerstandes eines piezoelektrischen Leiters. Diese Drucksensoren bestehen vorzugsweise aus einem aus Silizium hergestellten **Dehnungsstreifen** (siehe 11.3.2), der in eine dünne Membran eindiffundiert wurde. Ändern sich die Druckkräfte auf diesen Dehnungsstreifen, kommt es zu geringfügigen Längenänderungen, die den elektrischen Widerstand des Dehnungsstreifens verändern. Nachteilig bei der Verwendung von Silizium ist, dass Fremdatome eindiffundieren können und so die Messung verfälschen können.

Bei einem frequenzanalogen Drucksensor wird ein solcher Dehnungsstreifen in einen elektrischen Oszillator (siehe 6.4) eingebaut. Die durch Druckänderung bewirkte Widerstandsänderung verstimmt nun die Frequenz des Oszillators und durch Messung der Frequenzänderung kann die Druckänderung bestimmt werden.

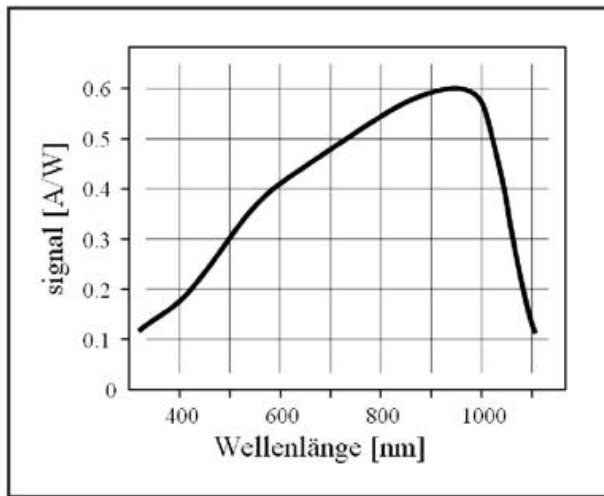
6.3 Photodiode

Eine **Photodiode** ist eine Halbleiter-Diode, die sichtbares Licht, in manchen Ausführungen auch IR (Infrarot)-, UV- oder Röntgenstrahlen, an einem pn-Übergang (p- und n-leitendes Material stoßen aneinander) durch den inneren Fotoeffekt in einen elektrischen Strom umwandeln. Sie werden unter anderem verwendet, um Licht in elektrische Spannung oder Strom umzusetzen oder um mit Licht übertragene Informationen zu empfangen.

Photodioden bestehen z. B. aus Silizium (für sichtbares Licht bis ca. $1 \mu\text{m}$ Wellenlänge), Germanium (für IR bis etwa $1,8 \mu\text{m}$ Wellenlänge) oder anderen, inzwischen auch organischen Halbleiterdetektor-Materialien. Für einen ähnlichen Wellenlängenbereich wie den des Germanium sind Photodioden aus dem besser geeigneten Material InGaAs (Indium Gallium Arsenid) üblich.

Photodioden können auch für den Bereich des mittleren Infrarot (Wellenlänge $5 \mu\text{m}$ bis $20 \mu\text{m}$) gefertigt werden (CdTe-, Ge: Au-Dioden). Sie müssen dann allerdings z. B. mit flüssigem Stickstoff gekühlt werden, weil die Wärmebewegung bei Raumtemperatur ausreicht, um Elektronen vom Valenzband ins Leitungsband zu heben. Dadurch wird der Dunkelstrom dieser Photodioden bei Raumtemperatur so groß, dass das zu messende Signal darin untergeht. Ein zweiter Grund ist die ansonsten stattfindende Überlagerung der IR-Strahlung des Sensorgehäuses selbst [46].

Abb. 6.2 Empfindlichkeit einer Silizium-Photodiode, abhängig von der Wellenlänge des einfallenden Lichts



6.4 Oszillator

Ein **Oszillator** ist ein **schwingungsfähiges System**, bei dem ein oder mehrere physikalische (also auch elektronische) Parameter zeitlich wiederholt dieselben Werte annehmen, insbesondere periodische Bewegungen um einen Nullpunkt (Ruhelage) durchführen.

Oszillatoren beruhen überwiegend auf einem zeitbestimmenden schwingungsfähigen System, dessen Schwingungen ohne weitere Maßnahmen meist gedämpft sind, d. h. mit der Zeit verschwinden. Um ungedämpfte Schwingungen erzeugen zu können, kommt eine Einrichtung zur Zuführung von Energie hinzu. Ein Oszillator enthält immer frequenzbestimmende Bauteile und eine Schaltung zur Anfachung von Schwingungen. Das ist entweder ein rückgekoppelter Verstärker oder ein Bauelement mit negativem differenziellem Widerstand [46].

Oszillatoren findet man überwiegend in der Elektrotechnik bzw. Elektronik und der Mechanik. Jedoch sind Systeme mit periodischem Verhalten auch aus anderen Bereichen wie der Pneumatik, Biologie und Chemie bekannt.

6.5 Hysterese eines Messgerätes

Die Hysterese (engl.: Hysteresis) ist das Merkmal eines Messgerätes, das darin besteht, dass der zu ein und demselben Wert der Eingangsgröße sich ergebende Wert der Ausgangsgröße von der vorausgegangenen Aufeinanderfolge der Werte der Eingangsgröße abhängt. Die Umkehrspanne ist ein quantitatives Maß für die Hysterese eines Messgerätes. Sie ist die Differenz der Werte der Ausgangsgröße, die sich daraus ergibt, dass der Wert der Eingangsgröße einmal von größeren und anschließend von kleineren Werten her stetig oder langsam schrittweise eingestellt wird [44].

MESSUNG METEOROLOGISCHER ELEMENTE

Standardmessungen in den meteorologischen Messnetzen erfolgen nach den durch die WMO international festgelegten Empfehlungen. National sind diese häufig noch umfassender geregelt, um insbesondere bei Klimastationen und Umweltüberwachungsstationen eine hohe und unveränderte Datenqualität zu erreichen. Überwiegend einheitlich sind die Vorschriften zur Messhöhe, Geräteaufstellung und anderen Faktoren (siehe 19.4).

Bei der Beschreibung der Messmethoden zu den einzelnen Parametern werden zunächst alle grundsätzlich möglichen Messprinzipien dargestellt. Bei den dazugehörigen Messgeräten liegt der Schwerpunkt bei den im DWD in der Praxis eingesetzten Geräten/Sensoren. Wie bereits im Vorwort erwähnt, sollen aber z. T. auch solche Geräte erfasst werden, die an anderen Einrichtungen (Behörden, Instituten, Universitäten, Forschungseinrichtungen und meteorologischen Diensten benachbarter Staaten) verwendet werden, um auf diese Weise auch andere Möglichkeiten der technischen Umsetzung von Messprinzipien kennen zu lernen.

Meteorologische Messgeräte werden überwiegend im Freien installiert und müssen schwierigen Witterungsverhältnissen standhalten. Aus diesem Grunde müssen die Geräte/Sensoren widerstandsfähig und einfach austauschbar sein. Die Beschreibung solcher Geräte erfolgt nun im Hinblick auf die Messung der einzelnen meteorologischen Parameter.

7. LUFTDRUCKMESSUNG

7.1 Allgemeines

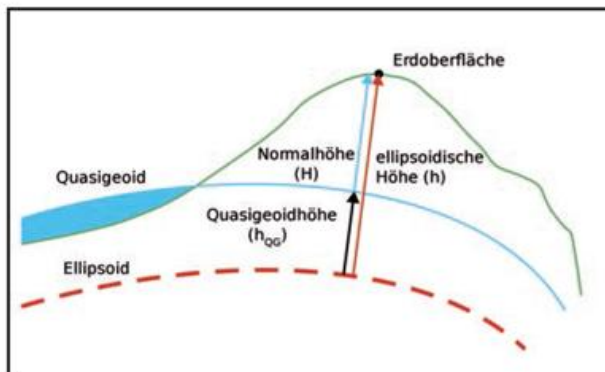
Neben der Temperatur gehört der Luftdruck zu den ältesten in der Meteorologie gemessenen Größen. Mit Luftdruck wird der von der Masse der Luft unter der Wirkung der Erdanziehung ausgeübte statische Druck bezeichnet. Er ist definiert als das Gewicht einer gedachten vertikalen Luftsäule, die vom Erdboden bis an den Rand der Atmosphäre reicht, ausgeübt auf eine Einheitsfläche. Der Luftdruck ist als die Kraft pro Fläche definiert.

Für den statischen Luftdruck hat der Mensch kein Empfindungsorgan. Eine Empfindung hat der Mensch nur für Druckdifferenzen etwa bei mangelndem Druckausgleich in einem Flugzeug, wenn Druck auf den Ohren verspürt wird und für schnelle Luftdruckschwankungen im Frequenzbereich des Schalls. Unter anderem wird darauf die Föhnfähigkeit zurückgeführt.

Wie anschließend zu sehen sein wird, ist besonders im Zusammenhang mit der Luftdruckmessung die Angabe der Höhe über dem Meeresspiegel von Bedeutung. Wenn eine Höhe angegeben wird, so ist anzugeben, um welche Höhe es sich handelt. Der Begriff „Mean Sea Level“ (MSL) ist definiert als „Mittleres Niveau der Ozeanoberfläche“, gemessen über eine volle Gezeitenperiode von 18,6 Jahren. Diese

Höhenangabe ist nicht eindeutig und wenig präzise – im Hochgebirge kann es zu Abweichungen von mehreren Dezimetern kommen – und sollte daher nicht mehr verwendet werden. Grundsätzlich fällt nämlich die Meeresoberfläche nicht mit einer Niveaulfläche des Erdschwerefeldes, also z. B. mit einem Geoid zusammen. Die auftretenden Abweichungen werden als Meerestopographie bezeichnet.

Abb. 7.1 Zusammenhang zwischen ellipsoidischer Höhe, Normalhöhe und Quasigeoidhöhe (Wikipedia)



Der Abstand zwischen Ellipsoid und Geoid wird in der geodätischen Fachsprache als Undulation bezeichnet. Ist nun in einem Punkt die geographisch-ellipsoidische Höhe bekannt, z. B. mittels GPS bestimmt, und ist weiter ein Geoidmodell gegeben, so dass die Undulation angegeben werden kann, dann lässt sich daraus die orthometrische Höhe berechnen.

Seit dem 1. Januar 2000 wird in ganz Deutschland das Höhensystem auf Normalhöhen zum Nullpunkt des Amsterdamer Pegels umgestellt. Das neue Normalhöhennull ist gleichzeitig die Grundlage für das United European Leveling Net (UELN), in dessen Rahmen die Höhensysteme der europäischen Länder vereinheitlicht werden. Die Höhen werden in diesem System in **Meter über Normalhöhennull (m ü. NHN)** angegeben. Normalhöhennull (NHN) ist die Bezugsfläche für Höhen über dem Meeresspiegel im Deutschen Haupthöhennetz 1992.

NHN wurde am 1. Januar 2002 in Deutschland als neue amtliche Höhe eingeführt, da für die Höhen über Normalnull (NN) das tatsächliche Schwerefeld der Erde nicht berücksichtigt wurde und bis 31.12.2001 die amtliche Höhe war. Sie ist den physikalischen Höhen zuzuordnen. Damit ändern sich sowohl die bisher westdeutschen normal-orthometrischen Höhen (neue Berechnungsmethode) als auch die Normalhöhen Ostdeutschlands (Bezug auf den neuen Pegel Amsterdam). Gegenwärtig werden die westdeutschen normalorthometrischen Höhen und die ostdeutschen Normalhöhen in diese Höhenangabe überführt, die sich auf das Quasigeoid beziehen. Oft enthalten aktuelle topografische Karten noch Höhen über den alten Bezugsflächen [46].

Negative Höhen, gemeint sind Tiefenangaben von Gewässern werden auf eine Bezugsfläche bezogen, die man als Karten-Null (KN) bezeichnet. Seekarten und andere nautische Informationssysteme nutzen See-Karten-Null (SKN). SKN und NN sind nicht identisch.

7.1.1 Luftdruckmessgrößen

Das Gewicht der Luftsäule über einem Beobachtungsort ist abhängig von seiner Höhe über dem Meeresspiegel. Je tiefer dieser Ort am Grunde des Luftmeeres liegt, umso größer ist auch das Gewicht der Luftsäule, welches über ihm lastet. Dies hat zur Folge, dass man von der Stationshöhe abhängige, nicht miteinander vergleichbare Luftdruckwerte erhält, die damit nicht in Bodenwetterkarten eingetragen werden können um z. B. die Verteilung von Hoch- und Tiefdruckgebieten mit Hilfe von Isobaren darzustellen zu können. Eine Lösung ist die Umrechnung (Reduktion) des Luftdruckes auf eine Referenzhöhe, in der Meteorologie auf Meeresniveau. So geben die meisten meteorologischen Stationen einen direkt (an der Station) gemessenen **und** einen auf NHN reduzierten Luftdruck an, d. h., dass daraus unterschiedliche Luftdruckmessgrößen resultieren. Für die Reduktion gibt es für jede Wetterstation eigene Reduktionstabellen bzw. wird der Reduktionswert über die Software berechnet.

Bei der Reduktion des Luftdruckes auf NHN werden, abhängig von der Verwendung des reduzierten Luftdruckwertes unterschiedliche Methoden angewandt. Dabei geht es in jedem Fall um eine gedachte Luftsäule von einer Station bis zum NHN. Dafür benutzt man Bezeichnungen aus den international üblichen Q-Gruppen. Diese unterschiedlichen Luftdruckwerte werden im Folgenden kurz behandelt.

7.1.1.1 Berechnung/Bestimmung des QFE-Wertes

Das QFE ist der in Platzhöhe, bezogen auf die offizielle Flugplatzhöhe, die den höchsten Punkt des Start- und Landebahnsystems eines Flugplatzes darstellt, korrigierter bzw. abgelesener Luftdruckwert. Eventuell erforderliche Korrekturen hängen vom genutzten Messgerät ab und werden bei der jeweiligen Beschreibung des Gerätes angesprochen.

Das QFE wird berechnet, indem der korrigierte Luftdruckwert in Barometerhöhe mittels „aktueller Atmosphäre“ auf die Flugplatzhöhe reduziert wird. Für Höhendifferenzen <20 m kann ein einmal berechneter konstanter Wert angenommen werden.

7.1.1.2 Berechnung des QFF-Wertes

Die Reduktion des Luftdruckes kann nach der statischen Vorstellung vom Luftdruck vereinfacht als das Hinzufügen des Gewichts einer vom Barometergefäß bis NHN reichenden (gedachten) Luftsäule betrachtet werden. Ausgehend vom Luftdruck in Barometerhöhe bzw. Luftdruck bezogen auf offizielle Flugplatzhöhe (QFE) wird das QFF für Anwendungen in der Meteorologie (Eintragung in Bodenwetterkarten) berechnet.

Der exakte formelmäßige Zusammenhang für die Reduktion auf Meeresniveau ergibt sich aus der Differenzialform der hydrostatischen Grundgleichung

$$dp = -g \cdot \rho \cdot dz \quad (7.1)$$

und der für die Druckabnahme mit der Höhe sich daraus ergebenden Differenzialform der barometrischen Höhenformel

$$dp = -\frac{g \cdot \rho}{R_L \cdot T_v} dz \quad \text{oder} \quad dz = \frac{R_L \cdot T_v}{g \cdot \rho} dp \quad (7.2)$$

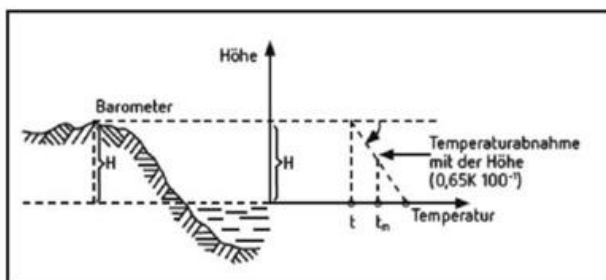
mit $g = 9,80665 \text{ m s}^{-2}$
 $R_L = 287,058 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
 $\rho = 1,225 \text{ kg m}^{-3}$

wobei mit dp die Korrektur des Luftdrucks in Stationshöhe mit der Stationshöhe dz ist. Da bei einer gedachten Luftschicht zwischen Meeresniveau und Stationshöhe keine Angaben über die Luftdichte vorliegen können, müssen Annahmen über mittlere Dichtewerte, in diesem Fall über eine mittlere virtuelle Temperatur T_v (9.16) gemacht werden.

Ausgehend von der aktuellen Temperatur in 2 m Höhe wird dazu mit einer

- mittleren Temperaturabnahme von $0,65 \text{ K } 100 \text{ m}^{-1}$ bis Meeresniveau, sowie mit
 - mittleren Wert für die Feuchte (des Dampfdruckes), die der aktuellen Lufttemperatur im langjährigen Mittel entspricht,
- eine mittlere virtuelle Temperatur (Schichtmitteltemperatur) für die Schicht dz bestimmt. Der wirkliche Temperaturverlauf in der Atmosphäre kann dabei ganz anders sein.

Abb. 7.2 Reduktion des Luftdrucks auf NHN



Für die Berechnung des QFF wird eine **von der WMO verbindlich festgelegte Form** der barometrischen Höhenformel benutzt, um Abweichungen durch unterschiedliche barometrische Höhenformeln auszuschalten. Die Berechnung führt die Zentrale des DWD nach folgender, in Annäherung an die von der WMO festgelegten Gleichung durch:

$$QFF = B_n \cdot 2,71828183^{\frac{H_m \cdot g_n}{T + e \cdot C_n + \frac{a \cdot H_m}{2}}} \quad (7.3)$$

mit $e =$ natürliche Zahl $2,71828183$
 $a =$ vertikaler Temperaturgradient $0,0065 \text{ K m}^{-1}$
 $B_n =$ Luftdruck in Barometerhöhe (in normgeopotenzielle Meter)
 $C_n =$ Beiwert zur Berücksichtigung der mittleren Dampfdruckänderung mit der Höhe ($0,12 \text{ K hPa}^{-1}$)
 $e =$ Dampfdruck in Stationshöhe (hPa)
 $g_n =$ Normalfallbeschleunigung $9,80665 \text{ m s}^{-2}$
 $H_m =$ Barometerhöhe in gpm
 $R_L =$ Gaskonstante trockener Luft $287,058 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
 $T = 273,15 \text{ K} + t$ ($t =$ Lufttemperatur $^{\circ}\text{C}$)

In dieser Gleichung gehen einige Größen ein, die nicht aktuell gemessen werden, sondern als Annahmen sich an die ICAO-Standardatmosphäre (ISA – ICAO Standard Atmosphere) orientieren. Aufgrund dieser Annahmen sind mit einer Reduktion des Luftdrucks auf Meeresniveau immer mehr oder weniger große Fehler verbunden. Vor allem bei einer dickeren Schicht ist die Bestimmung der mittleren virtuellen Temperatur meist nicht ohne größere Fehler möglich. Daher ist erst durch Integration, d. h. durch die Aufsummierung unendlich dünner und unendlich vieler Schichten möglich, eine exakte Reduktion durchzuführen, d. h., die barometrische Höhenformel muss in die Integralform überführt werden. Sie lautet dann

$$-R_L \cdot \int_{p_n}^p \frac{dp}{p} \cdot T_v = g \cdot \int_{z_n}^z dz \quad (7.4)$$

Dennoch werden die Reduktionsfehler umso größer, je höher die Station liegt, d. h. je länger die angenommene Luftsäule zwischen Station und Meeresniveau ist. Deshalb wird ab einer Stationshöhe von **750 m NHN** nicht mehr reduziert, sondern das Geopotenzial der nächstgelegenen Hauptdruckfläche berechnet.

Bei geringen Höhendifferenzen von $<20 \text{ m}$ zwischen Barometer bzw. Drucksensor und NHN kann die Reduktion mittels einer einmal berechneten Konstante erfolgen, da dann der Einfluss der aktuellen Temperatur und Feuchte vernachlässigbar gering wird.

7.1.1.3 Berechnung des QNH-Wertes

Das QNH ist ein nach der ISA auf NHN reduzierter Luftdruckwert mit dem QFE als Ausgangswert. Die Addition der Druckzunahme für die gedachte Luftsäule von der Station bis NHN erfolgt hier nach Werten der ISA:

- Lufttemperatur $15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ bei einem Luftdruck von $1013,25 \text{ hPa}$ in NHN
- Temperaturgradient $0,65 \text{ K } 100 \text{ m}^{-1}$
- Relative Feuchte 0% (in allen Höhen)

Wegen der Reduktion mit Hilfe der Werte der ISA entfällt eine Temperaturabhängigkeit, d. h. dass bei gleichem Luftdruck in Plathöhe (QFE) der Reduktionsbetrag immer gleich groß ist. Daher kann für die Reduktion zum QNH eine Tabelle benutzt werden, in der das QFE Eingangswert ist. Der daraus erhaltene Wert ist das QNE, ein Druckhöhenwert, welcher der Höhe (in m oder ft) des QFE-Wertes über $1013,25 \text{ hPa}$ entspricht. Als QNH ergibt sich dann die Differenz von Tabellenwert minus Plathöhe.

7.1.2 Maßeinheiten des Luftdruckes

Barometer zeigen den Luftdruck in verschiedenen Einheiten an. Gebräuchlich war lange Zeit die Einheit Millibar. Bei älteren Barometern ist noch die Einheit Torr (= mmHg oder Millimeter Quecksilbersäule) zu finden. Es gilt die Beziehung $1 \text{ mbar} = 0,75 \text{ Torr}$. Bis Ende 1977 war diese Angabe zulässig, obwohl bereits 1912 die Internationale Kommission für wissenschaftliche Luftfahrt auf Antrag von **VILHELM BJERKNES** (1862–1951) empfahl, in den Veröffentlichungen beide Maßeinheiten (mmHg/mbar) anzugeben. Die Seewarte veröffentlichte am 1. März 1930 die erste Wetterkarte mit Millibarangaben.

Die Standard-Maßeinheit für den Luftdruck, auf die sich die **Generalkonferenz für Maß und Gewicht** (CGPM = Conférence Générale des Poids et Mesures) 1971 einigte, ist heute Pascal (*Pa*). Sie wird seit 1984 verwendet und ist nach dem französischen Mathematiker, Physiker und Philosophen **BLAISE PASCAL** (1623–1662) benannt. Damit die Zahlenwerte nicht zu groß werden und das Druckmaß für die Luftdruckmessung dem „alten“ Millibar (mbar) entspricht, wird der Zusatz *h* (hekto) bei *hPa* verwendet; 1 *hPa* entspricht dann 1 *mbar*. Es gilt: 1 *hPa* = 100 *Pascal (Pa)* = 100 *Newton/Quadratmeter (100 N m⁻²)* = 100 *kg/m s²*.

Tab. 7.1 Umrechnung von Luftdruckeinheiten

	1 mmHg	1 inchHg	1 hPa
1 mmHg	1	0,039	1,3332
1 inchHg	25,425	1	33,864
1 hPa	0,75	0,0294	1

Um auch ältere Werte umrechnen zu können, enthält Tabelle 7.2 die dazu erforderlichen, veralteten Maßeinheiten.

Tab. 7.2 Weitere (veraltete) Maßeinheiten des Luftdrucks

	Pa	Bar	atm	Torr
1 Pa (N m ⁻²)	1	10 ⁻⁵	0,987 • 10 ⁻⁵	7,50062
1 bar	10 ⁵	1	0,98692	750,062
1 atm	101325	1,01325	1	760
1 Torr	133,322	0,00133	0,001315	1

Der Luftdruck beträgt z. B. nach der ICAO-Standardatmosphäre im Meeresniveau 1013,25 *hPa* = 760 *Torr* oder 760 *mmHg* = 1 (technische) *Atmosphäre (atm)* = 29,92 *inchHg*.

7.2 Allgemeine Messprinzipien

Folgende Messprinzipien werden in den Messgeräten zur Luftdruckmessung genutzt:

- die Bestimmung des Gewichts oder der Länge einer Flüssigkeitssäule, die dem Luftdruck das Gleichgewicht hält – Flüssigkeitsbarometer,
- die Bestimmung des Gewichts eines Kolbens, der dem Luftdruck das Gleichgewicht hält – Kolbenmanometer (Druckwaage),
- die Bestimmung der durch den Luftdruck hervorgerufenen Formänderung elastischer Hohlkörper oder Membrane – Aneroidbarometer (mechanisch, kapazitiv) – kapazitive und piezoelektrische Membran-Barometer,
- die Bestimmung des Siedepunktes einer reinen Flüssigkeit – Hypsometer,
- Messung der druckabhängigen Schwingungsfrequenz eines Körpers im Gas, piezoelektrische Detektion,
- die Bestimmung der Ionenflussdichte – Alphantron, Betatron,

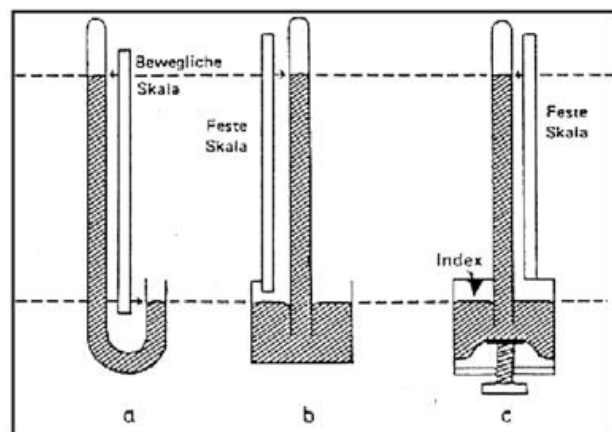
Von diesen Methoden können lediglich die beiden erstgenannten zu einer Absolutmessung gemacht werden, nach der die anderen Methoden geeicht werden müssen. Allerdings

werden inzwischen nur noch Kolbenmanometer als Primärreferenzen bei der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) und beim DWD eingesetzt. Nicht alle genannten Messprinzipien werden im praktischen Wetterdienstes genutzt.

7.2.1 Flüssigkeitsbarometer

Alle Flüssigkeitsbarometer basieren auf dem Prinzip von kommunizierenden Röhren nach dem Versuch von Torricelli. Diese Barometer bestehen aus einem meist mit Quecksilber (*Hg*) gefülltem, senkrechtem (Glas-)Rohr, das am oberen Ende luftdicht verschlossen ist. Das untere Ende taucht in ein Vorratsgefäß das ebenfalls *Hg* enthält. Durch ihr Eigengewicht fließt die Flüssigkeit aus dem Rohr, wobei im oberen Ende über dem Quecksilber ein nahezu luftleerer Raum die sogenannte „**Torricellische Leere**“ entsteht. Dieser Raum ist nicht ganz luftleer, da dort der Quecksilberdampfdruck (bei Raumtemperatur ca. 10⁻⁵ *atm*) herrscht. Der Luftdruck im Vorratsgefäß wirkt dem entgegen, so dass die Flüssigkeitssäule bei einer bestimmten Höhe nicht weiter ansteigt. Damit wird die Bestimmung der Länge einer *Hg*-Säule zu Grunde gelegt.

Abb. 7.3 Prinzip der verschiedenen Flüssigkeitsbarometer



- Heberbarometer, (bewegliche Skala, so dass ihr Nullpunkt auf den unteren Quecksilberspiegel eingestellt werden kann).
- Gefäßbarometer, Typ Kew (feste Skala; um die Höhenänderung des unteren Quecksilberspiegels zu kompensieren ist die Längeneinheit der Skala verkleinert.)
- Gefäßbarometer, Typ Fortin (feste Skala, aber die Höhe des unteren Quecksilberspiegels kann auf die Höhe eines festen Zeigers gebracht werden, den Nullpunkt der Skala.)

Die Niveaudifferenz des Quecksilbers in einem U-förmig gebogenen Rohr (Abb. 7.3 a) kann ebenfalls als Maß für den Luftdruck zu Grunde gelegt werden.

Für genaue Ergebnisse muss der abgelesene Wert rechnerisch auf die Standardbedingungen korrigiert werden, da aus der Ableseung der Höhe der *Hg*-Säule die Angabe des Drucks noch nicht eindeutig ist. Dabei verändert sich die Dichte des Quecksilbers $\rho = \rho(t)$ mit der Temperatur, wobei sich streng genommen *Hg* und Glasrohr bei einer Temperaturerhöhung ausdehnen. Mit Hilfe eines zusätzlich angebrachten Thermometers wird die Temperatur des Queck-

silbers bestimmt und anschließend anhand von Tabellen (DWD VuB 3 BHB, Tab. 6-22/6-23) der abgelesene Barometerstand auf 0 °C korrigiert. Für eine Skalierung in hPa wird der Korrektionsfaktor nach (7.5) bestimmt:

$$C_t = \frac{B - (\alpha - \beta)xt}{1 + \alpha \cdot xt} - 1,33 \frac{V}{A} (\alpha - 3\eta)xt \quad (7.5)$$

- mit C_t = Temperatur-Korrektionswert in hPa
 α = kubischen Ausdehnungskoeffizient des Hg = $181,9 \cdot 10^{-6} K^{-1}$
 β = linearer Ausdehnungskoeffizient der Skala $1,84 \cdot 10^{-5} K^{-1}$
 η = linearer Ausdehnungskoeffizient, der die Ausdehnung der Glasrohre und des Gefäßes erfasst $1,0 \cdot 10^{-5} K^{-1}$
 t = abgelesene Temperatur am Beithermometer (°C)
 B = abgelesener Barometerstand (hPa)
 V = Volumen des Quecksilbers in mm^3
 A = Quecksilberoberfläche im Gefäß in mm^2
 $1,33$ = Umrechnungsfaktor mmHg in hPa

Die Formel kann für Fuess Stationsbarometer mit vernachlässigbarer Ungenauigkeit vereinfacht werden. Bei Skalierung des Barometers in hPa ist dann

$$C_t = -0,000163 (B + 31) t \quad (7.6)$$

Eine weitere Korrektion, die sich ebenfalls auf die Länge der Quecksilbersäule auswirkt, ist wegen des Einflusses der Schwerebeschleunigung erforderlich. Sie ist ortsabhängig von der geographischen Breite und der Höhe über NHN und muss daher auf Normalschwere ($9,80665 m s^{-2}$) auf Normbreite $\varphi = 45^\circ 32' 33''$ und auf NHN korrigiert werden. Der Korrekturfaktor setzt sich also aus zwei Komponenten zusammen. Die Berechnung des Korrektionswertes für die Schwerebeschleunigung wird annähernd mit folgender vereinfachten Formel durchgeführt:

$$B_n = B_t + B_m \left(\frac{g_{\varphi,h}}{g_n} \right) - 1 \quad (7.7)$$

- mit B_n = Barometerstand auf 0 °C und Normalfallbeschleunigung korrigiert
 B_t = Barometerablesung auf 0 °C korrigiert
 B_m = langjähriger Mittelwert von B , an der Station
 $g_{\varphi,h}$ = Fallbeschleunigung an der Station
 g_n = Normalfallbeschleunigung $9,80665 m s^{-2}$

Zusammengefasst ist der Term $B_t + B_m \left(\frac{g_{\varphi,h}}{g_n} \right) - 1 = C_g$ der

Korrektionswert der Schwerebeschleunigung. Die Gleichung gilt für Luftdruckangaben in hPa oder mmHg, je nachdem mit welcher Einheit die Werte für B bestimmt worden sind.

Für jede Station ergibt sich ein Wert, der auf längere Zeit konstant ist. Unter Berücksichtigung aller Einflüsse erfolgt die Luftdruckberechnung nach folgender Formel:

$$p = B_t + C_i + C_t + B_n \cdot 181,9 \cdot 10^{-6} K^{-1} \quad (7.8)$$

mit C_i = Instrumentenkorrektion, die in der Regel erforderlich ist.

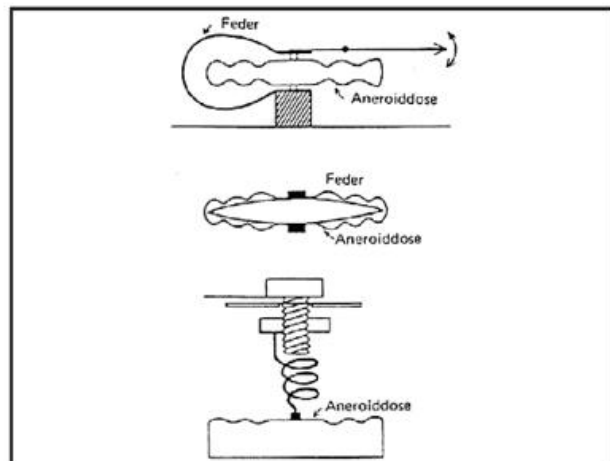
Eine weitere Möglichkeit der Luftdruckberechnung kann durch die **Bestimmung des Gewichtes** einer Hg-Säule erfolgen. Da diese Methode jedoch selten ist, wird sie nicht näher beschrieben.

7.2.2 Aneroidbarometer

Das Quecksilberbarometer ist insbesondere für Messungen an wechselnden Orten relativ unhandlich und auch für Registrierungen ungeeignet. Deshalb werden in solchen Fällen Dosenbarometer verwendet. Das Messprinzip von Dosen-(Aneroid) barometer (a neroid = ohne Flüssigkeit) beruht auf der Ausnutzung der elastischen Eigenschaften dünner Metallmembrane. Zwei runde, gewölbte Metallmembranen mit einer gewellten Oberfläche sind an den Rändern zusammengeschweißt und bilden einen elastischen Hohlkörper (Vidiedosen), dessen Innenraum ganz oder teilweise evakuiert (Innendruck höchstens 5 hPa) ist. Eine flache, elastische Metallfeder sorgt dafür, dass die Dosen unter den beträchtlichen Werten der Druckkräfte von etwa 20 kg auf einer Membran mit 5 cm Durchmesser nicht völlig zusammengedrückt werden. Metalle wie Neusilber, Cu, Ni, Zn-Legierung, eine Kupfer-Beryllium-Legierung oder verschiedene Stähle besitzen so gute elastische Eigenschaften, dass auf zusätzliche Federn, die infolge Reibung wieder Fehler bewirken, im Allgemeinen verzichtet werden kann.

Unterschiedliche Druckkräfte auf beiden Seiten der Membrane bewirken eine Deformation, die so lange anhält, bis die elastischen Kräfte dem äußeren Luftdruck das Gleichgewicht halten. Bei jeder Luftdruckänderung tritt eine neue Gleichgewichtslage ein.

Abb. 7.4 Typen von Aneroiddosen



Der Ausschlag einer ebenen dünnen Membran ist proportional \sqrt{p} . Zur Linearisierung und Vergrößerung des Ausschlags werden die Membranen mit kreisförmigen Rillen versehen. Die Empfindlichkeit des Aneroids ist eine Funktion der effektiven Oberfläche, der elastischen Eigenschaften und Stärke des Materials. Je dünner das Material, desto empfindlicher reagiert die Dose auf Druckänderungen. Die durchschnittliche Empfindlichkeit von Aneroiddosen liegt bei $3 \mu m hPa^{-1}$. Die Deformation wird, wenn eine Membran an einem Rahmen

befestigt ist, als Längenverschiebung über ein Hebelsystem, das zu einer Vergrößerung des Ausschlags dient, zur Anzeige mittels Zeiger auf einer entsprechenden Skala gebracht. Mit elektrischen Gebern (z. B. kapazitiv) versehene Dosen können die Änderung elektronisch auf ein Anzeigesystem übertragen, so dass eine elektronische Datenerfassung möglich wird.

Dosenbarometer bestehen aus einer oder mehreren Druckdosen. Zur Vergrößerung des Ausschlags werden mehrere Dosen hintereinander geschaltet, wodurch sich die Ausschläge der Einzeldosen (ihr Volumen) addieren. Die Amplitude wächst auch mit der Größe der Oberfläche, der Dünne und Elastizität des Materials.

Vorteil von Dosenbarometern ist, dass sie klein und handlich und bei der Messung des Luftdrucks von der Lage am Messort unabhängig sind. Ein Nachteil ist der mögliche Einfluss von äußeren Temperaturänderungen auf die Messung. Durch die thermische Trägheit des Aneroids folgt die Gastemperatur in Aneroiden nicht perfekt der Lufttemperatur, so dass daraus eine Messabweichung resultiert.

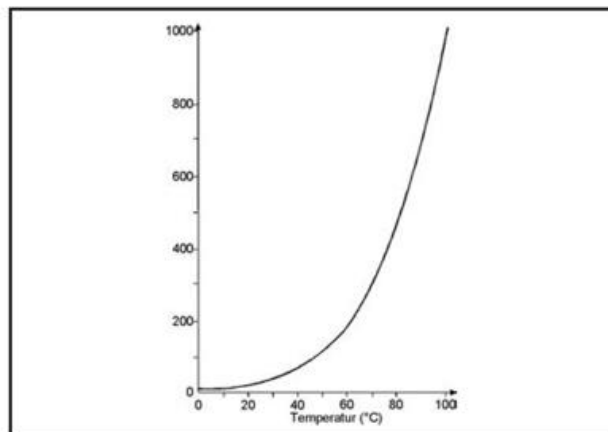
7.2.3 Kapazitätsmessung

Unter 6.1 wurde ausführlich die kapazitive Messung behandelt. Bei der Luftdruckmessung besteht der Drucksensor aus einer mikromechanisch in Silizium eingetätzten Druckdose, deren eine Membran vom Luftdruck durchgebogen wird. Dadurch verändert sich der Plattenabstand des Mikrokondensators und damit sein Ausgangssignal, das dann ein Maß für den Luftdruck ist.

7.2.4 Siedebrometer (Hypsometer)

Das Messprinzip nutzt die Tatsache, dass der Siedepunkt einer chemisch reinen Flüssigkeit eine Funktion des Luftdrucks ist. Eine Flüssigkeit beginnt zu sieden, sobald ihr Sättigungsdampfdruck gleich dem entgegengesetzt gerichteten äußeren Luftdruck ist. Diese Abhängigkeit des Siedepunktes vom Luftdruck kann durch ihre Dampfdruckkurve (Abb. 7.5) für destilliertes Wasser dargestellt werden.

Abb. 7.5 Sättigungsdampfdruckkurve



Allein die Messung der Temperatur des Siedepunktes genügt daher zur Bestimmung des Luftdrucks. Der Zusammenhang

zwischen dem Sättigungsdampfdruck und der Temperatur liefert mit guter Näherung die aus der Thermodynamik bekannte **CLAUSIUS-CLAPEYRON-Gleichung** (Rudolf Clausius und Benoit Clapeyron, 1834). Sie beschreibt den Gleichgewichtszustand zwischen flüssigem und gasförmigem Wasser und lautet:

$$\frac{de_w}{dt_s} = \frac{L}{t_s(v_d - v_R)} \quad (7.9)$$

- mit L = Verdampfungswärme bei t
 e_w = Sättigungsdampfdruck über Wasser
 t_s = Siedetemperatur ($^{\circ}\text{C}$)
 $v_d - v_R$ = spezifische Volumina des Dampfes und der Flüssigkeit

Aus der Beziehung ergibt sich, dass die Siedetemperatur mit abnehmendem Luftdruck abnimmt und umgekehrt proportional zum Logarithmus des Luftdrucks ist. Die Empfindlichkeit nimmt daher mit abnehmendem Luftdruck zu. Wegen dieser Möglichkeit, die Höhe zu bestimmen, wird das Gerät auch als Hypsometer bezeichnet. Bezeichnet man die Empfindlichkeit mit

$$\sigma = \frac{dt_s}{dp} \left[\frac{\text{K}}{\text{hPa}} \right] \quad (7.10)$$

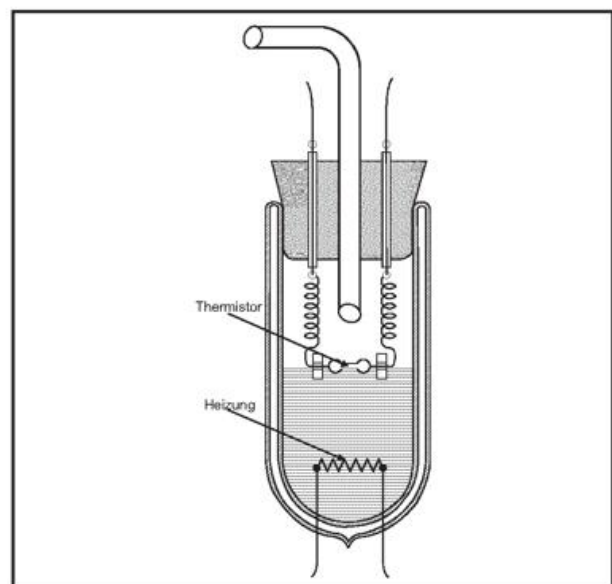
ergibt sich nach Umformung von (7.10) der Ausdruck, der die Abhängigkeit vom Luftdruck deutlich macht

$$\sigma = 0,434 \frac{dt_s^2}{a \cdot p}$$

- mit a = Konstante
 p = Luftdruck (hPa)

In einem Gefäß für den Dampf wird meist destilliertes Wasser zum Sieden gebracht. Neben Wasser können auch andere Flüssigkeiten (Freon, Schwefelwasserstoff) in der Hypsometrie eingesetzt werden. Beheizt wird elektrisch oder mit Spiritus. Dann wird die Siedetemperatur des Wasserdampfes gemessen und mit deren Hilfe der Luftdruck bestimmt.

Abb. 7.6 Hypsometer (schematisch)



Diese Methode erfordert äußerst genaue Thermometer (Einteilung $0,01^{\circ}\text{C}$ bis $0,02^{\circ}\text{C}$), die daher nur einen sehr kleinen Temperaturbereich (95°C bis 105°C) umfassen. Eine Änderung des Siedepunktes um nur $0,027\text{ K}$ entspricht einer Druckänderung von 1 hPa , d. h. dass die Genauigkeit der Temperaturmessung $0,0027\text{ K}$ betragen muss, um für Druckwerte im Bereich von 1000 hPa den Luftdruck auf $0,1\text{ hPa}$ genau angeben zu können. Tabelle 7.3 soll das verdeutlichen.

Tab. 7.3 Siedetemperatur des Wassers in Abhängigkeit vom Luftdruck

Luftdruck (hPa)	Temperatur des Wasserdampfes ($^{\circ}\text{C}$)
960	98,49
980	99,07
1000	99,63
1020	100,18
1040	100,73

Bei einem Luftdruck von 1000 hPa ist der Wert $\sigma = 0,028$.

Um eine so hohe Genauigkeit zu erreichen, werden Spezialthermometer mit großem Hg-Gefäß und enger Kapillare eingesetzt (siehe 8.3.1.1). Vielfach ist die Temperaturskala bereits durch eine Druckskala ersetzt. Die Temperaturmessung kann auch mit *Pt 100* (siehe 8.3.2.1) erfolgen. Korrekturen bezüglich Schwerebeschleunigung und Temperatur entfallen.

Siedebarenometer werden vorwiegend zu Kontrollzwecken, bei Expeditionen oder dort, wo der Einsatz von Quecksilberbarometern nicht möglich ist, genutzt. Sie wurden auch in einigen Radiosonden mit einer speziellen Füllflüssigkeit verwendet, da sie bei niedrigen Druckwerten eine höhere Genauigkeit gegenüber Aneroidbarometern haben. Vorteil einiger Flüssigkeiten ist, dass ihr Siedepunkt oft unter oder wenig über der Umgebungstemperatur liegt. Im praktischen Wetterdienst finden Hypsometer keine Anwendung mehr, daher wird auf eine Gerätebeschreibung verzichtet.

7.2.5 Bestimmung des Ionenflusses

Piezoelektrischer Effekt

Die Grundlagen zu diesem Effekt wurden unter 6.2 erläutert. Bei einem frequenzanalogen Drucksensor wird ein Dehnungsstreifen (siehe 11.3.2 PLUVIO) in einen elektrischen Oszillator eingebaut. Die durch Druckänderung bewirkte Widerstandsänderung verstimmt nun die Frequenz des Oszillators (siehe 6.4) und durch Messung der Frequenzänderung kann die Druckänderung bestimmt werden.

Alphatron, Betatron

Das Messprinzip basiert auf der Abhängigkeit der Zahl freier Ionen vom äußeren Luftdruck. In einem geschlossenen Raum werden durch ein Radiumpräparat α -Strahlen (Alphatron) oder durch ein Tritium-Titan-Präparat β -Strahlen (Betatron) emittiert. Die dadurch erzeugte Anzahl freier Ionen ist eine Funktion der Dichte und der Zusammensetzung des Gases und damit des Gasdrucks (Luftdrucks).

Geeignete polarisierte Elektronen halten im zu messenden Luftvolumen ein elektrisches Feld aufrecht, sodass die entstehenden Ionen einer Kollektorelektrode zugeführt werden. Der Ionenstrom ist der Zahl der Ionen und damit dem Luftdruck proportional.

Der Zusammenhang zwischen Ionenzahl und Luftdruck ist nicht linear, da bei zunehmender Dichte Rekombinationen der Ionen zunehmen. Der Einfluss der Temperatur der Luft und des Gerätes ist vernachlässigbar gering. Der Messbereich reicht bis 10^{-3} hPa , die Messgenauigkeit liegt bei 1% für den gesamten Messbereich.

Im praktischen Wetterdienst werden solche Messfühler nicht verwendet, daher folgt keine weitere Beschreibung eines Gerätes.

7.3 Sensoren/Messgeräte

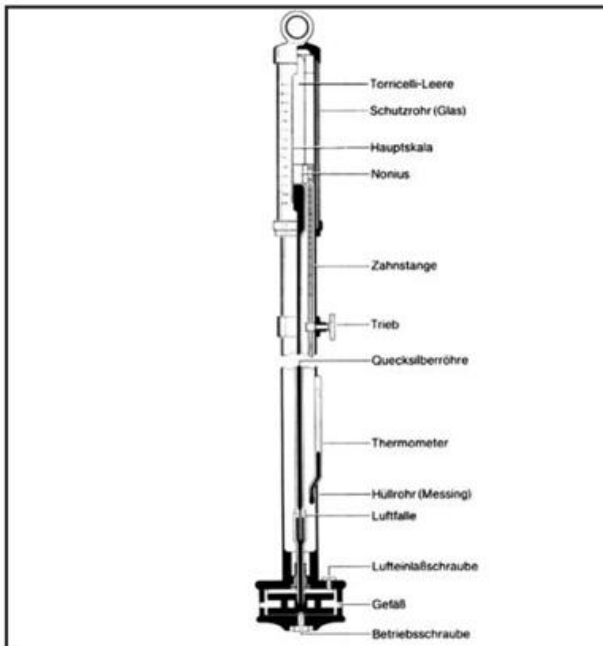
7.3.1 Flüssigkeitsbarometer

Im Laufe der Jahre wurden eine Reihe unterschiedlicher Hg-Barometertypen in der Praxis eingesetzt. Von diesen ist in vielen meteorologischen Diensten heute fast ausschließlich noch das Stationsbarometer in Gebrauch.

Stationsbarometer

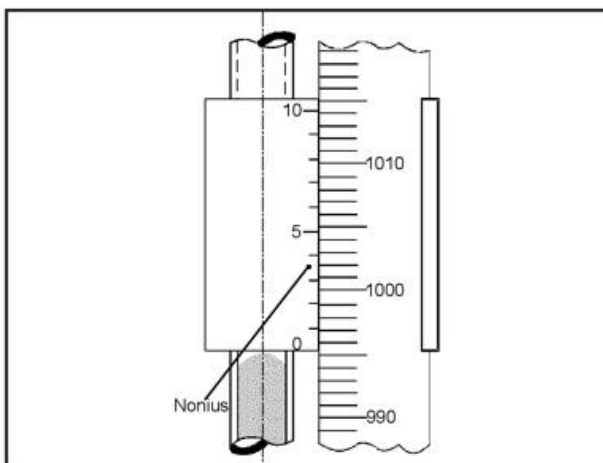
Das Stationsbarometer ist ein Gefäßbarometer mit einem dreigeteilten Barometergefäß, dessen Boden in der Mitte eine Gewindeöffnung für die Transport- oder die Betriebschraube besitzt. Neuere Geräte haben eine kombinierte Transport-/ Betriebschraube. Das Gefäßmittelteil ist eine dicke Stahlscheibe mit zusätzlichen Bohrungen zum Durchtritt des Quecksilbers, die eine Teilmenge Quecksilber ersetzen soll. In eine weite Mittelbohrung ragt das Quecksilberrohr (hier sollte nicht von einer Kapillare gesprochen werden), das mit einem Gewinde eingeschraubt ist. Mehrere kleinere Bohrungen sind als Durchlass für das Quecksilber und die Luft vorgesehen. Der Gefäßdeckel ist fest mit dem Hüllrohr verschraubt. Die Oberseite des Deckels hat ein Gewinde für die Lufteinlassschraube. Es ist etwas weiter geschnitten als das der Schraube, so dass bei gelockelter Schraube die Luft Zutritt hat. Diese Schraube darf nicht entfernt werden, da sonst das Quecksilber Staub aufnimmt. Die Folge wären Dichteverminderung und dadurch Fehlanzeigen. In der Mitte des Gefäßdeckels befindet sich ein weiteres Gewinde zur Aufnahme des Barometerrohres. Alle Teile, die mit Quecksilber in Berührung kommen sind aus Stahl oder Glas, um chemische Reaktionen mit dem Quecksilber zu vermeiden.

Abb. 7.7 Stationsbarometer



Die drei Teile des Gefäßes sind so miteinander verschraubt, dass die Strichmarken genau übereinander stehen. Etwa in halber Höhe ist der Triebknopf, eine große Rändelschraube, auf deren Achse im Innern des Hüllrohres ein Zahnrad sitzt, mit dessen Hilfe eine Zahnstange auf- und abwärts bewegt wird, die an ihrem oberen Ende die Visiereinrichtung, auch Nonienschieber genannt trägt. Der Nonius (Abb. 7.8) ist die Messeinrichtung zum Ermitteln der Zehntel Hektopascal (*hPa*). Es ist ein aufrecht stehender Metallring dessen Unterkante, das Visier, die Nullmarke darstellt. Die 10 Teilstriche des Nonius entsprechen 19 Teilen der Hauptskala. Diese ist Teil des Hüllrohres, geschützt durch das Glasrohr.

Abb. 7.8 Nonius am Stationsbarometer



Da beim Stationsbarometer der Nullpunkt im Gerät nicht eingestellt werden kann, die Quecksilberspiegel sich aber sowohl im Gefäß als auch im Barometerrohr mit dem Luftdruck ändern, muss eine „reduzierte“ Skala verwendet werden. Das Verhältnis des Querschnittes des Barometerrohres (im Ablesebereich) zum Querschnitt der *Hg*-Oberfläche im

Gefäß ist 50 mm^2 zu 2000 mm^2 (gerundete Werte) oder $1:40$. Das bedeutet, dass bei einem Luftdruckanstieg von 1 mm das Quecksilber im Rohr tatsächlich nur um $39/40 = 0,975 \text{ mm}$ steigt, während es gleichzeitig im Gefäß um $1/40 = 0,025 \text{ mm}$ fällt. Deshalb entspricht 1 mm der Skala nur $0,975$ metrischen *mm*. Diese gegenläufige Bewegung der beiden Quecksilberspiegel, deren Abstand dem Luftdruck entspricht, ist also in die Skala eingearbeitet. Das gilt gleichermaßen für die Barometer mit einer *hPa*-Skala.

Im unteren Teil des Rohres befindet sich eine Luftfalle, die sog. **Buntesche Spitze**. Diese soll Luftbläschen auffangen, die an der Rohrwand aufsteigen. Oberhalb des Quecksilbers im *Hg*-Rohr ist im Idealfall Vakuum. Wenn sich vom Füllen her dennoch Restluft darin befindet, erzeugt sie einen Gegendruck, der eine zu niedrige Anzeige bewirkt. Diese wird bei der Kalibrierung durch eine zusätzliche *Hg*-Menge kompensiert. Das Barometerrohr hat nur im Ablesebereich den vorgenannten Querschnitt von 50 mm^2 . In den unteren zwei Dritteln ist es schlanker und läuft schließlich zum offenen Ende hin konisch zu.

Tab. 7.4 Spezifikationen Hg-Barometer (Thies)

Messbereich	800 bis 1080 hPa, 560 bis 1030 hPa
Genauigkeit	$\pm 0,3 \text{ hPa}$, Ablesung $0,1 \text{ hPa}$ durch Nonius
Temperatur-Messbereich	$-15 \dots +50 \text{ }^\circ\text{C}$

Da die Länge der *Hg*-Säule außer vom Luftdruck auch von der Temperatur abhängig ist, hat das Quecksilberbarometer ein Beithermometer, welches im Hüllrohr eingebaut ist und mit dessen Hilfe die Temperatur des Quecksilbers bestimmt wird. Anschließend wird anhand von Tabellen der abgelesene Barometerstand auf $0 \text{ }^\circ\text{C}$ korrigiert (siehe 7.2.1).

Im DWD werden an den Wetterwarten und Flugwetterwarten Stationsbarometer mit Quecksilberfüllung nur noch zur Durchführung von Kontrollmessungen verwendet. Sie verbleiben in erster Linie in den Stationen, die als Klimareferenzstationen (siehe 19.3) festgelegt wurden. Die Einsatzmöglichkeiten von *Hg*-Barometern sind wegen des Gewichts und den Anforderungen an Messort, Transport und der erforderlichen Korrekturen auf ortsfeste Messstellen begrenzt. Stationsbarometer sind als Relativgeräte zu betrachten und bedürfen daher häufiger Vergleiche mit Referenzgeräten. Wegen ihrer hohen Messgenauigkeit können sie aber als Referenzgeräte für andere Luftdruckmesssysteme genutzt werden.

Sicherheitshinweise zum Umgang mit Quecksilber siehe Anhang 6.4.

Pflege und Kontrolle der Funktionstüchtigkeit

Hg-Barometer müssen im 10-Jahresabstand geprüft werden. Äußerlich müssen sie nach Bedarf vom Staub befreit werden. Da an den Wetterwarten mehrere Luftdruckmesssysteme vorhanden sind, werden fehlerhafte Messungen durch Vergleiche auch beim *Hg*-Barometer meist schnell erkannt.

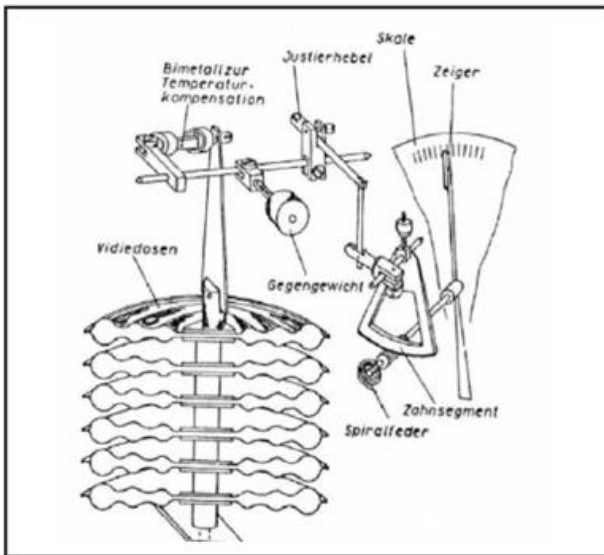
Normalbarometer

Als Normalbarometer werden in der Physik solche Geräte bezeichnet, bei denen alle Fehlerquellen um eine Zehnerpotenz genauer als bei Vergleichsinstrumenten bestimmt werden können. Sie werden dort eingesetzt, wo die Bestimmung des Luftdrucks mit hoher Genauigkeit von Bedeutung ist. Im DWD wurde bis vor einigen Jahren ein Hg-Normalbarometer im Referat Messsysteme in Hamburg zur Kalibrierung der Transfer-Normale der SL-Referate eingesetzt. Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig als höchstes metrologisches Staatsinstitut in Deutschland hat bereits seit den 1990-er Jahren das Hg-Normalbarometer durch ein Drehkolbenmanometer (siehe 7.3.4) ersetzt. Seit einigen Jahren findet die Kalibrierung der Stationsbarometer im DWD ebenfalls mit Drehkolbenmanometern statt.

7.3.2 Aneroidbarometer, Barograph, Höhenmesser

Aneroidbarometer haben gegenüber Hg-Barometern gewisse Vorteile. Sie gestatten eine schnellere Bestimmung des Luftdrucks, weil die abgelesenen Werte weder eine Temperatur- noch Schwerekorrektur erfordern. Mit Aneroidbarometern kann direkt der Luftdruck in Stationshöhe, bei ausreichend niedrig gelegenen Stationen auch der auf Meeresniveau umgerechnete Luftdruck abgelesen werden. Präzisionsbarometer, wie sie in den Wetterdiensten meist verwendet werden, haben eine vergleichbare oder höhere Messgenauigkeit. Am Präzisionsbarometer ist auf der Rückseite des Gerätes eine kleine Schraube, mit der die Anzeige korrigiert werden kann.

Abb. 7.9 Aneroid Messeinheit



Da Aneroidbarometer darüber hinaus ein geringes Gewicht, einen robusten Aufbau und eine geringe Transportempfindlichkeit besitzen, eignen sie sich insbesondere für mobile Stationen (Schiffe, Flugzeuge, Radiosonden). Im DWD werden Aneroidbarometer vereinzelt noch in elektrischen Sensoren für automatische Wetterstationen verwendet. Eingesetzt werden Aneroide auch in Barographen und im Notmessgeräte-Koffer des DWD (siehe 16.1).

Aneroidbarometer 15ps

Das Aneroidbarometer der Fa. Müller, Meteorologische Instrumente R. Fuess, Berlin wird im Notmessgeräte-Koffer des DWD (siehe 16.1) eingesetzt. Die Dosen bestehen aus hochwertigem Spezialwerkstoff mit hervorragenden elastischen Eigenschaften und sind daher praktisch frei von Hysterese und elastischen Nachwirkungen. Ein besonders durchgebildetes Bimetallsystem bewirkt unabhängig von der Höhe des Luftdrucks eine vollkommene Ausschaltung des Temperatureinflusses über den gesamten Messbereich, so dass diesbezügliche Stand- und Gangfehler vermieden sind. Die Ausbildung des Zeigers mit übereinanderliegenden Schneiden gewährleistet eine parallaxenfreie Ablesung.

Abb. 7.10 Aneroidbarometer 15ps (Müller, R. Fuess)



Die Normalausführung besteht aus hochglänzendem Metallgehäuse mit einem Aufhängerring. Die 360°-Skala hat eine Doppelteilung für Ortshöhen bis 1500 m NHN, mit Werkprüfschein und Aufbewahrungskasten.

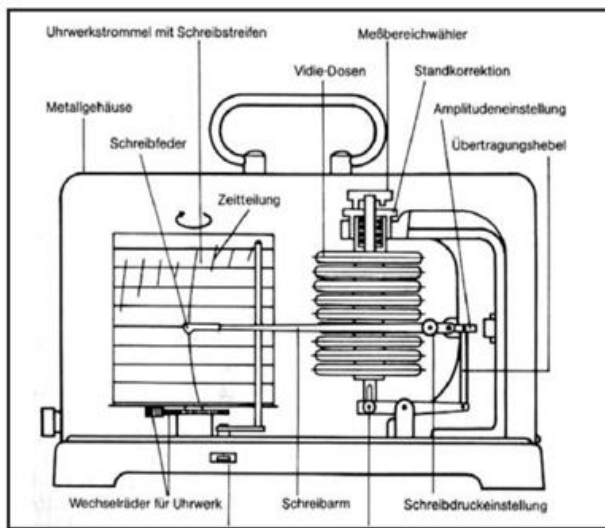
Tab. 7.5 Spezifikationen Aneroidbarometer 15ps (Müller, R. Fuess)

Messbereiche	620 bis 800 mm Hg
	820 bis 1060 hPa
Skalenteilung	0,5 mm Hg bzw. 1 hPa
Zeigerausschlag	360°
Messgenauigkeit	±0,2 bis 0,5 Skalenteile

Barographen

Barographen sind Aneroidbarometer mit einer Schreibeinrichtung. Das Messelement besteht aus einem System von bis zu neun aufeinander gesetzten, fast luftleer gepumpten Vidiedosen, deren Formänderungen sich addieren und so den Ausschlag vergrößern.

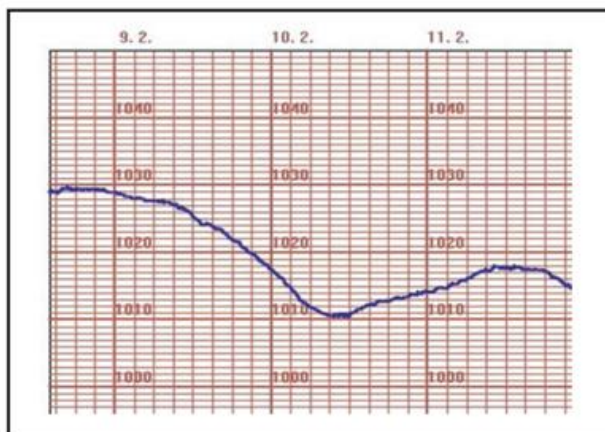
Abb. 7.11 Schemazeichnung Barograph



Durch einen Hebel wird über ein Gestänge der Ausschlag auf einen Schreibarm übertragen und so die Registrierung des Druckverlaufs, in der Regel von einer Woche durchgeführt. Damit ist auch die Ablesung der Drucktendenz möglich. Eine Trommel wird durch ein Uhrwerk angetrieben.

Barographen können auf mehrere Messbereiche eingestellt werden, so dass das gleiche Gerät für fast beliebige Seehöhen verwendbar ist. Zu diesem Zweck ist das Verbindungsstück zwischen den Übertragungsachsen mit bezifferten Einstecklöchern für den Kupplungsstift versehen.

Abb. 7.12 Barograph-Aufzeichnung (Ausschnitt)



Tab.7.6 Spezifikationen Barograph (Lambrecht)

Messelement	Aneroid-Dosensatz (Neusilber), 9-fach gealtert, temperaturkompensiert
Messbereich	945 bis 1051,7 hPa
4 einstellbare Druckmessbereiche	je 106,7 hPa
Genauigkeit	$\pm 0,2$ hPa vom Messwert
Nennregistrierzeit	7 Tage
Einsatzbereich	-10 bis +50 °C

Die Barographen besitzen ein Druckmesswerk mit Überlastungsschutz für Transporte bis 2700 m Höhe über NNH.

Abb. 7.13 Barograph (Foto: Lambrecht)



An einigen Dienststellen sind große Barographen, sog. Mikrobargraphen zur noch präziseren Luftdruckaufzeichnung in Gebrauch. Sie haben meist neun, manche bis zu 15 Einzeldosen hintereinander geschaltet, um dadurch einen vergrößerten Ausschlag zu erreichen.

Tab.7.7 Spezifikationen „Großer“ Barograph (Lambrecht)

Messelement	Aneroid-Dosensatz (Neusilber), 9-fach gealtert, temperaturkompensiert
4 einstellbare Druckmessbereiche	je 106,7 hPa, für folgende Ortshöhen (m NNH) 865 bis 1051,7 785 bis 971,7 705 bis 891,7
Genauigkeit	$\pm 0,2$ hPa vom Messwert
Nennregistrierzeit	7 Tage
Einsatzbereich	-35 bis +80 °C

Da sowohl der Dosensatz als auch das Gestänge temperaturabhängig ist, wird zur Ausschaltung des Temperatureinflusses im Hebelwerk ein Bimetallstreifen eingeschaltet. Mit der Standkorrekturschraube kann der Dosensatz als Ganzes gehoben oder gesenkt und damit eine Nullpunkteinstellung zur Korrektur von konstanten Messfehlern vorgenommen werden. Die Amplitudenschraube darf nicht verändert werden.

Pflege und Kontrolle der Funktionstüchtigkeit

Luftdruckmessgeräte mit Aneroiddosen sind sehr langlebig und halten bei entsprechend pfleglicher Handhabung viele Jahrzehnte. Die Pflege beschränkt sich auf Staubbefreiung und Reinigung der Glasscheiben. Zur Überprüfung der Anzeigegenauigkeit erfolgt eine Kontrollmessung mit dem Stationsbarometer. Dabei genügen Zeitabstände von einem Jahr. Sollten Anzeigedifferenzen auffallen, muss eine Kontrollmessung durchgeführt werden. Danach wird entschieden, ob das Gerät auszutauschen ist.

Höhenmesser

Ist die Skala eines Dosenbarometers nach einer Druck-Höhenbeziehung (z. B. ICAO-Standard-Atmosphäre) geeicht, kann das Aneroidbarometer auch als Höhenmesser (und umgekehrt) verwendet werden. Höhenmesser gehören zur Grundausstattung von Flugzeugen und werden zur Ermittlung der Höhe über ein bestimmtes Bezugsniveau eingesetzt. Höhenmesser sind vom Prinzip Aneroidbarometer. Sie reagieren auf Luftdruckänderungen in der Atmosphäre, weshalb eine Korrektur der Höhenanzeige während eines Fluges erforderlich ist. Dafür ist eine Nebenskala (oder Druckkorrekturskala) zur Einstellung eingebaut.

Abb. 7.14 Barometrischer Höhenmesser



Mit Hilfe eines Kurbeltriebes wird die Bewegung der Aneroiddose in eine Drehbewegung umgewandelt und auf einen Zeiger übertragen. Der Druckwert der Bezugsdruckfläche (über Grund, MSL oder 1013 hPa) kann dabei in einem Fenster eingestellt werden und ist die Basis für die Höhenanzeige.

Neben Flugzeughöhenmessern gibt es die von Bergsteigern benutzten, etwas einfacher konstruierten Höhenmesser. Sie zeigen meist das QFE an, wenn aber die momentane Höhe bekannt ist, kann durch Drehen der Skala auch das QNH ermittelt werden.

7.3.3 Digitalbarometer

Im DWD werden seit vielen Jahren digitale Barometer der Baureihe **AIR DB-1A**, **-1AB** und **-1AX** der Fa. Air Cooperation, USA zur Luftdruckmessung mit unterschiedlichen Messbereichen an Wetterstationen eingesetzt. Der Sensor AIR DB-1A ist für einen Messbereich von 1060 hPa bis 800 hPa, der Sensor DB-1B für einen Messbereich von 1100 hPa bis 600 hPa, in einem Bereich von +5 °C bis +40 °C ausgelegt.

Abb. 7.15 Luftdrucksensor AIR DB 1-A (Air Cooperation, USA)



Die angegebene Messgenauigkeit beträgt $\pm 0,3$ hPa (DB-1A) und $\pm 0,5$ hPa (DB-1B).

Da diese Sensoren nicht mehr hergestellt werden, wurde als Nachfolgegerät das Digitalbarometer PTB220 der Fa. Vaisala eingeführt. Einige Exemplare der AIR-Reihe sind noch an Wetterstationen vorhanden.

Barocap® PTB220

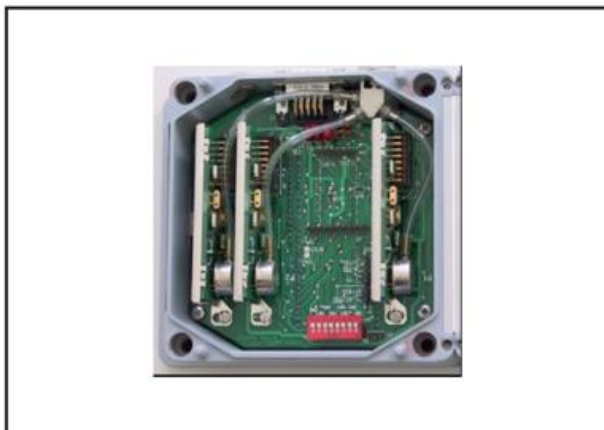
Beim BAROCAP®-Absolutdrucksensor der Fa. Vaisala handelt es sich um einen flachen Kondensator auf Siliziumbasis mit einem Vakuum als Dielektrikum. Eine Luftdruckänderung induziert eine Änderung in der Distanz der beiden Elektroden, aus der eine Veränderung der elektrischen Kapazität der Zelle folgt. Diese wird durch Bestimmung der Resonanzfrequenz eines elektrischen Schwingkreises (Oszillator, siehe 6.4) bestimmt, in den das Messelement eingebaut ist. Die Messung des Luftdrucks ist demnach auf eine Messung der Kapazität zurück zu führen.

Abb. 7.16 Luftdrucksensor PTB220A (Vaisala)



Der Geber enthält drei Zellen des Typs BAROCAP®. Er digitalisiert alle 10 ms die gemessenen Daten, kompensiert die Nicht-Linearität der verwendeten Sensoren und die Temperatureffekte, die durch einen integrierten Temperaturfühler gemessen werden, berechnet benötigte Mittelwerte aus 100 Messungen, führt eine einfache Qualitätskontrolle durch und kommuniziert über eine serielle Schnittstelle mit dem Logger. Zusätzlich erlaubt das Gerät die Wahl der Einheiten oder des Datenformates.

Abb. 7.17 PTB220A Innenansicht (Vaisala)



Tab. 7.8 Spezifikationen Barocap® PTB220A (Vaisala)

Messbereich	500 bis 1100 hPa
Abtastfrequenz durch den Logger bestimmt	0,1 Hz
Erweiterte Gesamtunsicherheit (k=2)	±0,15 hPa
Kalibrierunsicherheit	±0,07 hPa
Auflösung	0,01 hPa
Langzeitstabilität	±0,10 hPa pro Jahr
Hysterese	±0,03 hPa
Ansprechzeit	0,2 s
Einsatzbereich	-40 bis +60 °C
Versorgungsspannung	10 bis 30 V DC

Fehler durch Druckschwankungen, verursacht durch Wind oder eine Klimaanlage sind nicht berücksichtigt. Wie diese zu vermeiden sind, wird unter 7.4 hingewiesen.

Abb. 7.18 Kapazitiver Drucksensor



Dieser Sensor zeichnet sich durch eine wesentlich geringere Hysterese (Abb. 7.22) gegenüber Aneroiden aus, besitzt eine gute Temperatur- und Langzeitstabilität mit minimaler Temperaturdrift. Er ist mechanisch sehr robust und wesentlich genauer als ein HG-Barometer. Die Anzeige (ohne notwendige, manuelle Korrekturen) kann von verschiedenen Luftdruckmessgrößen (QFE, QNH) erfolgen.

Der DWD hat diesen Sensor für die Luftdruckmessung in AMDA an allen Wetterwarten und Wetterstationen. Auch an Stationen des SwissMetNet ist dieser Sensor eingesetzt.

Pflege und Kontrolle der Funktionstüchtigkeit

Der Luftdrucksensor PTB220A benötigt keine besondere Pflege.

Barocap® PTB330

Der Absolutsensor PTB330 der Fa. Vaisala der neuen Generation wurde als Nachfolgemodell des Sensors PTB220 entwickelt. Er enthält das gleiche Messelement, einen kapazitiven Silicon Barocap®-Sensor (Silicon ist der englische Begriff für Silizium und soll auf die chemische Verwandtschaft zu Carbon hinweisen), der den Luftdruck mit gleich hoher Genauigkeit misst und ebenfalls eine hohe Langzeitstabilität besitzt. Das Gehäuse ist für weitere Einbauten vorgesehen und daher größer als beim PTB220.

Abb. 7.19 Barocap®-Sensor PTB330 (Vaisala), Version mit Display



Tab. 7.9 Spezifikationen Barocap® PTB330 (Vaisala)

Messbereich	500 bis 1100 hPa
Linearität	$\pm 0,05$ hPa
Temperaturabhängigkeit	$\pm 0,10$ hPa
Ansprechzeit (one sensor)	2 s
Genauigkeit bei +20°C	$\pm 0,10$ hPa
Gesamtgenauigkeit zw. -40 bis +60°C	$\pm 0,15$ hPa
Kalibrierunsicherheit	$\pm 0,07$ hPa
Langzeitstabilität	$\pm 0,10$ hPa pro Jahr
Hysterese	$\pm 0,03$ hPa
Settling time at power-up (one sensor)	4 s
Versorgungsspannung	10 bis 35 V DC
Einsatzbereich	-40 bis +60 °C

In modernen Radiosonden wird seit Jahren ebenfalls die kapazitive Messmethode angewandt, so z. B. das BAROCAP®-Prinzip in der Radiosonde RS-92 SGP (Fa. Vaisala), die sowohl im DWD als auch im GeoInfoDBw geflogen wird. Hier kann der Druck kapazitiv mit einer Genauigkeit von ca. 0,1 hPa gemessen werden.

Präzisionsluftdruckhandmessgerät DPI 740

Neben dem fest installierten Barocap® PTB220A ist an einigen Dienststellen des DWD ein mobiles Digitalbarometer DPI 740 der Fa. Lambrecht vorhanden. Es basiert auf dem piezoresistiven Messprinzip (siehe 6.2). Der Messfühler ist ein Silizium-Resonator, dessen schwingendes Messelement mit einem mikromechanischen Verfahren aus Silizium geätzt wird. Das frequenzgebende Messprinzip ermöglicht eine Langzeitstabilität von 0,01 % pro Jahr. Es soll als Ersatz-/Ausweichgerät bei Ausfall der Berechnung der abgeleiteten Luftdruckwerte mit speziellem Programm auf dem Rechner beim Beobachter dienen.

Tab. 7.10 Spezifikationen DPI 740 (Lambrecht)

Messbereich	750 bis 1150 hPa
Hysterese, Wiederholbarkeit sowie Temperaturfehler	$\pm 0,02$ % des Endwertes
Auflösung	0,01 % v. Endwert
Sensitivität	0,1 hPa
Langzeitstabilität	$\pm 0,01$ % pro Jahr
Einsatzbereich	-10 bis +50 °C
Batteriebetrieb	3 x 1,5 V Alkaline-Zelle

Der gemessene Luftdruckwert wird direkt, oder auf NHN umgerechnet angezeigt. Ferner kann die Höhe bezogen auf NHN in m oder ft angezeigt werden. Die Messrate beträgt 2 Messwerte je Sekunde. Minimum und Maximum werden im Hintergrund gespeichert und können bei Bedarf abgerufen werden. Die Werte zeigen, dass das Gerät sehr genau und mit der Güte eines Quecksilberbarometers vergleichbar ist. 24 verschiedene Maßeinheiten des Luftdrucks sind verfügbar. Batteriebetrieben ist das Gerät bis zu 20 Stunden betriebsbereit.

Abb. 7.20 Mobiles Digitalbarometer DPI 740 (Lambrecht)



Eine Vergleichsprüfung eines DPI 740 mit dem PTB220A soll täglich um 0550 UTC erfolgen. Maximal sind 0,6 hPa Abweichung erlaubt, darüber ist eine Wartung einzuleiten.

7.3.4 Primär-Drucknormal

Wie bereits erwähnt, findet die Kalibrierung der Stationsbarometer, die in erster Linie an den Klimareferenzstationen des DWD verbleiben, bei den regionalen Einheiten Service und Logistik des DWD in Oberschleißheim (SLS) mit Drehkolbenmanometer oder mit Präzisions-Druckmessumformern des Typs Vaisala PTB220A mit zwei Druckaufnehmern in Hamburg (SLN), die wiederum monatlich mit einem Drehkolbenmanometer kalibriert werden.

Die verwendeten Drehkolbenmanometer sind Kalibriereinrichtungen, mit denen auch kapazitive Barosensoren kalibriert und daher an dieser Stelle kurz beschrieben werden.

Drehkolbenmanometer DHI PG7601

Das Kalibrierlabor von SLN und SLS verfügt über ein Normalgerät des Typs DHI PG7601 (Fa. DH Instruments, Fluke Company, Phoenix, Arizona), welches sich auf einem Betonsockel mit eigenem, vom restlichen Gebäude getrenntem Fundament befindet. Es handelt sich um ein Fundamentalnormal und ist somit ein Primär-Drucknormal (Normalgerät).

Das Kolbenmanometer wird zur Generierung eines definierten Druckes mittels Auflage-Massen verwendet. Es besteht aus einer Kolben-Zylinder-Einheit aus Wolfram-Karbid, in der sich der Kolben mit bekanntem Querschnitt befindet, der mit seinem Eigengewicht senkrecht nach unten drückt und eine Kraft ausübt. Der Druck berechnet sich aus Kraft pro Fläche.

Damit der Kolben nur durch sein Eigengewicht die Kraft ausübt, wird der obere Bereich des Kolbens mit einer Glasglocke abgedeckt und mittels Vakuumpumpe bis auf einen Restdruck $< 5 \text{ Pa}$ evakuiert. Eine Temperaturkompensation der Kolben-Zylindereinheit wird automatisch durchgeführt.

Mit Hilfe eines Druckreglers sowie Unterdruckpumpe und Überdruck aus einer Stickstoffflasche wird ein Druck auf die Unterseite des Kolbens ausgeübt und dieser in die Schwebelage gebracht. Danach wird der Kolben in Rotation versetzt, um Reibungskräfte auszuschalten und der Druckregler stellt seine Arbeit ein. Der Druck wird nun einzig durch den rotierenden Kolben bestimmt.

Um nun verschiedene Drücke, mit Messunsicherheiten von nur wenigen Pascal, realisieren zu können, wird der Kolben mit einem Massenaufsatz bestückt und vor der Evakuierung mit einer berechneten zusätzlichen Masse beladen. Die Evakuierung mit einer Vakuumpumpe ist erforderlich, da ein Absolutdruck „hergestellt“ werden muss. Der Restdruck in diesem Feinvakuum ist mindestens 20.000-mal geringer als der atmosphärische Druck.

Abb. 7.21 Drehkolbenmanometer DHI PG7601 (DH Instruments, Fluke Company)



Die Berechnung der Masse wird dabei in Abhängigkeit von der Auflösung durch die geräteinterne Software durchge-

führt. Die Bestückung der Kolben mit Massenaufgaben erfolgt vollautomatisch während des Kalibrierablaufs. Für die Generierung eines Gasdruckes von etwa 1000 hPa wird eine Gesamtmasse (inklusive der Masse des Kolbens und des Massenaufsatzes) von ca. 10 kg benötigt.

Tab. 7.11 Spezifikationen Drehkolbenmanometer DHI PG7601 (DH Instruments, Fluke Company)

Druckbereich (je nach Masse)	80 bis 3500 hPa
Unsicherheitsangabe des Herstellers (inkl. Massen)	$\pm 0,2 \text{ Pa} + 13 \text{ ppm}$
Auflösung, modellabhängig	$> 0,1 \text{ Pa}$

Durch die Grundmasse von 800 g (500 g Kolben plus 300 g Massenaufsatz) beträgt der niedrigste generierbare Druck 80 hPa . Die Obergrenze liegt bei 3500 hPa .

Das Medium ist Stickstoff mit einer Reinheit von $99,996 \%$.

7.4 Messunsicherheiten und Fehlerquellen

Bei allen Barometern, auch bei den kapazitiven können Messfehler durch Staudruckeffekte auftreten, die durch Umströmen des Druckeinlasses hervorgerufen werden. Nach der Gleichung von **D. BERNOULLI** (1700–1782) ist

$$p_0 = p_s + \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 \quad (7.11)$$

- mit p_0 = Gesamtdruck
- p_s = statischer Druck
- ρ = Dichte des Mediums (Luft)
- v = Windgeschwindigkeit

der Gesamtdruck gleich der Summe aus hydrostatischem Druck p_s und dynamischem Druck $\frac{1}{2} \rho \cdot v^2$. Er erreicht beispielsweise bei 15 m s^{-1} einen Wert von etwa $1,5 \text{ hPa}$. Der dynamische Winddruck (Staudruck), abhängig von Geschwindigkeit und Richtung kann bei Messungen in einem Gebäude, insbesondere bei böigen Wind Werten von $2 - 3 \text{ hPa}$ (WMO-Toleranz $0,3 \text{ hPa}$) annehmen und es ist unmöglich, die Werte rechnerisch zu korrigieren. Daher gilt es, den Staudruck, der durch ein strömendes Medium hervorgerufen wird, durch geeignete Maßnahmen auszuschalten. In solchen Fällen muss ein außerhalb des Gebäudes angebrachter statischer Druckeinlass verwendet werden. Darüber hinaus sollen Luftdruckmessungen auf keinen Fall in klimatisierten Räumen erfolgen, da Lüftungsanlagen den statischen Luftdruck ändern. Auch in diesem Fall ist ein externer statischer Druckeinlass unbedingt zu verwenden.

In den 1980-er Jahren wurde am Instrumentenamt Hamburg von Lindner und Hülsen ein kompakter „statischer Druckeinlass“ für den Einsatz auf Schiffen entwickelt, da dort Staudruckeffekte aufgrund des Fahrtwindes besonders stark ausgeprägt sind. Diese Anordnung ist bis heute auf Schiffen und einzelnen Flughafenstandorten im norddeutschen Raum im Einsatz. Vom Instrumentenamt München wurde eine alternative, aufwändigere Lösung für Landstationen konzipiert,

die bis heute an süddeutschen Flughäfen im Einsatz ist: Der Druckeinlass ist dort ebenerdig im Niveau der Runway ausgeführt, da am Erdboden die Strömungsgeschwindigkeit und somit der Staudruckterm gegen Null geht. Von einem in die Erde eingelassenen Tank, der als Wasserabscheider fungiert, führt ein Druckschlauch bis zum Barometer durch die Wand in das Landebahnbeobachterhaus.

In diesem Zusammenhang muss noch hervorgehoben werden, dass frühere Barometer temperaturempfindlich und deshalb nicht für den Außeneinsatz geeignet waren. Aus diesem Grunde wurde damals vom statischen Druckeinlass auf dem Messfeld bis zum Barometer eine Druckleitung verlegt.

Moderne Digitalbarometer verwenden temperaturstabile Drucksensoren und sind durch eine zusätzliche aktive Temperaturstabilisierung für den Außeneinsatz geeignet. Sie können deshalb am Ort des statischen Druckeinlasses z. B. in einem Verteilerkasten installiert werden. Die Messwerte werden dann über die üblichen Messleitungen digital zum Erfassungsrechner übertragen. Damit ist auch ein starkes Argument für einen Umstieg von Hg-Barometer auf Digitalbarometer gegeben.

Auch der Druckgradient, besser die Druckänderung (hPa) pro Stunde kann sich als Fehlerquelle bemerkbar machen. Die größten Abweichungen treten bei starken positiven und negativen Druckänderungen auf. Da mit einem hohen Druckgradient in der Regel große Windgeschwindigkeiten einhergehen, wird ein eventuell vorhandener Trägheitseffekt des Barometers durch den Staudruckeffekt überlagert.

Stationsbarometer

Neben Fehlern des Beobachters (Einstellen, Ablesen usw.) kann es noch Instrumentenfehler durch ungleiche Kalibrierung im Ablesebereich geben. Dieser Fehler (zu eng = zu hohe - zu weit = zu niedrige Anzeige) wird rechnerisch behoben; die Korrektionswerte können dem Prüfschein entnommen werden.

Ein absolutes Vakuum ist technisch nicht realisierbar. Gelangt dennoch Luft in die „Torricellische Leere“. Bereits ein Luftbläschen von nur $0,7 \text{ mm}^3$ Volumen vermindert bei einer 760 mm ($= 1013,23 \text{ hPa}$) langen Hg-Säule die Anzeige um $0,13 \text{ hPa}$, ein Luftbläschen von $3,1 \text{ mm}^3$ schon um $0,67 \text{ hPa}$. Bei höherem Barometerstand ist der Fehler größer, bei niedrigerem geringer. Ist die Luftansammlung größer, muss das Barometer ausgetauscht werden. Ebenso muss das Gerät bei Hg-Verlust ausgetauscht werden, da die Eichung nur für eine bestimmte Hg-Menge gültig ist.

Gelangt trotz aller Vorsicht Luft in das Barometerrohr, werden die Luftblasen in der Luftfalle zurückgehalten und können das Vakuum nicht verschlechtern. Die Luftblasen werden dabei im Allgemeinen vom Quecksilber so komprimiert, dass die durch sie erzeugte zu hohe Anzeige unterhalb der Ablesegenauigkeit liegt.

Gelangt Staub in das Quecksilber, so bewirkt er eine Verminderung der Dichte (zu hohe Anzeige) und führt möglicherweise auch zu chemischen Reaktionen. Sauberes Quecksilber ist hell-silbrig. Erkennbar ist Verschmutzung auch an der Wölbung der Hg-Kuppe und der Meniskushöhe. Die Funktions-

tüchtigkeit des Hg-Barometers ist gegeben, wenn die Höhe der konvexen Kuppe der Hg-Säule $0,3 - 0,7 \text{ mm}$ beträgt. Ist der Meniskus flacher, ist das Barometer auszutauschen, weil sich mit der Verschmutzung auch das spezifische Gewicht des Quecksilbers ändert. Die Kontrolle soll monatlich einmal bei steigendem und einmal bei fallendem Luftdruck erfolgen.

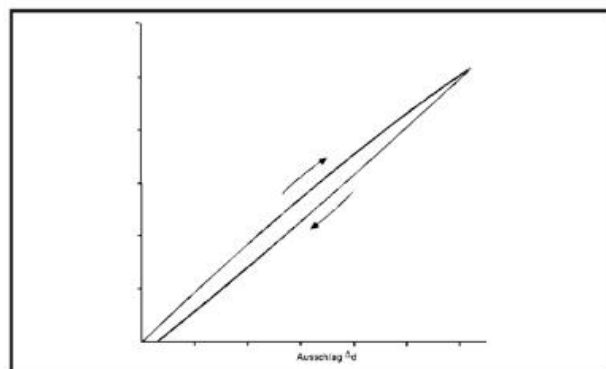
Temperaturschwankungen im Beobachterraum verursachen ebenfalls Fehler, wenn sie kurzfristig auftreten und nicht durch Korrektion berücksichtigt werden.

Der Transport von Hg-Barometern wird von der zuständigen SL-Einheit durchgeführt. Dazu ist ein spezieller Transportkasten vorhanden, mit dem das Barometer so transportiert werden muss, dass der Gefäßteil höher liegt als der Skalenteil.

Aneroidbarometer

Fehlanzeigen von Aneroidbarometern resultieren häufig durch Hysterese (siehe 6.5). Damit ist das elastische Nachhinken gemeint, das dazu führt, dass der angezeigte Wert bei Druckanstieg nicht gleich dem bei Druckfall ist.

Abb. 7.22 Hysterese



Dieser Fehler wächst mit der Größe der Druckänderungen und deren Geschwindigkeit. Die Ursache dieser elastischen Fehler ist in der molekularen Struktur der Metalle begründet. Durch künstliches Altern der Dosen, d. h. eine mehrfache zyklische Druckänderung vor dem Gebrauch, wird dieser Fehler praktisch beseitigt.

Die Genauigkeit von Präzisions-Dosenbarometern liegt bei $0,3 \text{ hPa}$.

8. TEMPERATURMESSUNG

8.1 Allgemeines

Die Temperatur ist wie der Druck und das Volumen eine physikalische Zustandsgröße, die den messbaren Wärmezustand eines Körpers oder Luftvolumens als Maß für den Wärmeinhalt eines thermodynamischen Systems beschreibt. Dieser ist nach der kinetischen Gastheorie proportional zur mittleren kinetischen Energie (Translationsenergie) der ungeordneten Bewegung der Luftmoleküle. Wenn einem Luftvolumen Energie zugeführt wird, nimmt die Geschwindigkeit (Größenordnung etwa 10^3 m s^{-1}) der Moleküle zu und umso höher ist auch seine Lufttemperatur.

Grundsätzlich unterscheidet man zwischen Kontaktthermometer und berührungslos messende Thermometer. Erstere erfordern einen Wärmekontakt zum Messobjekt (z. B. Luft), dessen Temperatur sie erstmal annehmen müssen, da sie zunächst nur ihre eigene Temperatur anzeigen. Dagegen basieren berührungslose Thermometer, sog. Pyrometer auf dem physikalischen Effekt, dass Festkörper und Flüssigkeiten abhängig von ihrer Temperatur eine elektromagnetische, vorwiegend infrarote Strahlung ($T < 1000\text{K}$) abgeben.

Um die Lufttemperatur messen zu können, muss der Messkörper eines Thermometers im Wärmegleichgewicht mit der Luft stehen, d. h. der Energietransport zwischen Messkörper und der umgebenden Luft muss ausgeglichen sein. Nur dann hat das Thermometer die gleiche Temperatur wie die Luft. Dies ist nur zu erreichen, wenn das Thermometer strahlungsgeschützt und gut ventiliert aufgestellt ist. Strahlungsgeschützt bedeutet, dass das Thermometer nicht von kurzweiliger, energiereicher Sonnenstrahlung, nach Möglichkeit aber auch nicht von der Wärmestrahlung der Umgebung getroffen wird und damit seine Anzeige verfälscht werden kann.

8.1.1 Temperaturmessgrößen

Die Messung der Temperatur umfasst eine ganze Reihe von Größen, die entweder direkt gemessen oder aus gemessenen Werten abgeleitet bzw. berechnet werden können. Zu den direkt messbaren Größen gehören

- Lufttemperatur, einschl. Feuchttemperatur in 2 m über Grund (DWD)
- Temperatur in 5 cm über Grund
- Extremtemperaturen (Maximum, Minimum eines Tages)
- Erdbodentemperaturen in verschiedenen Tiefen bis 1 m
- Wassertemperatur (des Meerwassers von See- und Küstenstationen, in der Regel in 1 m Tiefe)

Daraus abgeleitet/berechnet werden

- Tagesmitteltemperaturen,
- Mitteltemperaturen für verschiedene Zeiträume/Termine und
- weitere, definierte Temperaturbegriffe wie Sommertag, Frosttag usw.

Die **Tagesmitteltemperatur** T_t wurde vom DWD von 1931 bis zum 31. März 2001 aus den Temperaturablesungen T_7 um 7.00 Uhr, T_{14} um 14.00 Uhr und T_{21} um 20.30 Uhr („Mannheimer Stunden“) wahre Ortszeit (WOZ), etwa also 7.30 Uhr, 14.30 Uhr und 21.30 Mitteleuropäischer Zeit (MEZ) nach folgender Formel berechnet:

$$T_t = \frac{1}{4}(T_7 + T_{14} + 2T_{21}) \quad (8.1)$$

Seit dem 1. April 2001 werden für die Berechnung der Tagesmitteltemperatur alle zur vollen Stunde gemessenen Temperaturwerte im Zeitraum 0 bis 23 Uhr UTC herangezogen und durch 24 dividiert:

$$T_t = \frac{1}{24}(T_0 + T_1 + T_2 + T_3 \dots + T_{23}) \quad (8.2)$$

Fehlen durch Ausfall mehr als 3 Stundenwerte, wird die Tagesmitteltemperatur alternativ aus den gemessenen Tem-

peraturwerten zu den synoptischen Hauptterminen 0, 6, 12 und 18 Uhr UTC gebildet:

$$T_t = \frac{1}{4}(T_0 + T_6 + T_{12} + T_{18}) \quad (8.3)$$

Die Vergleichbarkeit von Mittelwerten wird durch diese unterschiedlichen Methoden erschwert. Hinzu kommt, dass Wetterdienste anderer europäischer Länder noch weitere Methoden zur Mittelbildung anwenden. So berechnen Bosnien-Herzegowina, Kroatien, Tschechische Republik, Slowakische Republik, Ungarn und Slowenien die Mittelwerte wie im DWD bis März 2001. Italien, Frankreich berechnen die Mittelwerte auf der Basis der Beziehung

$$T_t = (t_x + t_n)/2 \quad (8.4)$$

mit t_x = tägliches Maximum
 t_n = tägliches Minimum.

Die o. a. Höhenangabe für die Messung der Temperatur in 2 m über Grund betrifft die Praxis im DWD. Leider gibt die WMO hierzu einen Höhenbereich von 1,25 bis 2,00 m an, was dazu führt, dass es Abweichungen in einigen Ländern gibt. So wird z. B. in den Niederlanden die Temperatur in 1,50 m gemessen.

8.1.2 Maßeinheiten der Temperatur

Um eine Vergleichbarkeit von Temperaturwerten zu gewährleisten, muss es ein einheitliches Bezugssystem (Skala) geben. Eine Skala muss eindeutig und reproduzierbar sein. Dazu müssen wenigstens zwei Fixpunkte festgelegt sein, die zwei bekannten Wärmeständen eines bestimmten Materials entsprechen und diesen jeweils einen festen Wert zuordnen. Der Abstand zwischen diesen Fixpunkten wird als Fundamentalabstand bezeichnet und kann beliebig unterteilt werden.

Für die Temperaturen gibt es folgende, mit den Skalen nach ihren Erfindern benannte Maßeinheiten, die bis heute (noch) in Gebrauch sind: Kelvin (K), Celsius (°C) und Fahrenheit (°F)

Kelvin-Skala

Die Kelvinskala, nach William Thomson (1824–1907), meist als **LORD KELVIN** bekannt, ist aus physikalischer Sicht eine sinnvollere Temperaturangabe als die Celsius- oder die Fahrenheitskala, da sie aus thermodynamischen Überlegungen heraus resultiert, da die Wärmeenergie über die mittlere Bewegungsenergie der Moleküle definiert ist. Sie ist so aufgebaut, dass die theoretisch tiefste Temperatur, der absolute Nullpunkt, an dem die Moleküle keine Bewegungsenergie mehr haben, gleich 0 Kelvin (−273,15 °C) ist. Kelvin wird als SI-Einheit zur Berechnung physikalischer Gleichungen oder zur Angabe von Temperaturunterschieden verwendet.

Celsius-Skala

Anders CELSIUS (1701–1744) griff den Gedanken von Ole Römer auf, den Schmelz- und den Siedepunkt chemisch reinen Wassers für die Graduierung der Thermometer zu verwenden. So legte Celsius den Schmelzpunkt bei 100 °C und den Siedepunkt bei 0 °C fest. **Carl von LINNÉ** (1707–1778)

änderte 1742 die Skala in die heute gebräuchliche Form, indem er die zwei Fixpunkte gegeneinander austauschte, so dass der Schmelzpunkt nun mit 0°C und der Siedepunkt mit 100°C angegeben wird. Definiert werden diese Werte bei Normalluftdruck $1013,25\text{ hPa}$ in NHN.

Die Skalierung der Kelvin-Skala entspricht der Celsius-Skala, d. h. die Fixpunkte liegen genau 100 Einheiten auseinander. Für die Umrechnung in $^{\circ}\text{C}$ gilt daher:

$$t(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273,15$$

$$T(\text{K}) = t(^{\circ}\text{C}) + 273,15$$

Fahrenheit-Skala

Die Fixpunkte der Fahrenheit-Skala wurden von **D. G. FAHRENHEIT** (1686–1736) bei $-17,8^{\circ}\text{C}$ (entspricht 0° Fahrenheit) und bei $37,8^{\circ}\text{C}$ (entspricht 100° Fahrenheit, Körpertemperatur des Menschen) festgelegt. Den Bezug zur Celsius-Skala stellen folgende Beziehungen her: einer Temperaturdifferenz von

- 1°C entspricht $1,8^{\circ}\text{F}$ -Differenz,
- 1°F entspricht etwa $0,556^{\circ}\text{C}$ -Differenz.

Für die Umrechnung in Grad Fahrenheit (bei bekanntem Grad-Celsius-Wert) gilt somit:

$$t(^{\circ}\text{F}) = t(^{\circ}\text{C}) \cdot 1,8 + 32 \quad (8.5)$$

Für die Umrechnung Grad-Fahrenheit in Grad Celsius ergibt sich:

$$t(^{\circ}\text{C}) = 0,556 (t(^{\circ}\text{F}) - 32) \quad (8.6)$$

In den meisten WMO-Mitgliedstaaten wird die Temperatur in der Meteorologie gemäß dem SI-Einheitensystem in Kelvin (K) oder Grad Celsius ($^{\circ}\text{C}$) angegeben. Ausnahmen bilden auch heute noch die USA, Großbritannien und Irland mit Angaben zusätzlich in Grad Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$).

Alle drei Skalen sind durch zwei Fixpunkte festgelegt. Für die Celsius- und die Kelvin-Skala gelten dabei dieselben Fixpunkte (Tab. 8.1). Die Fixpunkte dienen auch zur Eichung der Thermometer, d. h. Punkte, bei denen sich ein physikalischer Vorgang immer wiederholt und unter gleichen Voraussetzungen unschwer nachvollziehbar ist. Zu den Eichpunkten gehören der Schmelzpunkt, Erstarrungspunkt, Sublimationspunkt und Siedepunkt der verschiedenen Stoffe.

Tab. 8.1 Fixpunkte der Temperaturskalen

Einheit	absoluter Nullpunkt	Gefrierpunkt des Wasser	Siedepunkt des Wassers
Kelvin	0	273,15	373,15
Celsius	$-273,15^{\circ}$	0°	100°
Fahrenheit	$-459,67^{\circ}$	32°	212°

Die Temperatur ist die einzige physikalische Größe mit zwei Formelzeichen (T , t) je nach verwendeter Einheit (K, $^{\circ}\text{C}$). Beide können gleichzeitig in einer Formel vorkommen, dürfen dann aber nicht gegeneinander gekürzt werden. Die SI-Vorsätze für dezimale Vielfache und Teile dürfen von Grad Celsius nicht gebildet werden.

8.2 Allgemeine Messprinzipien

Unter bestimmten Voraussetzungen können physikalische Körper – Gase, Flüssigkeiten und Festkörper – Energie in Form von Wärmemengen untereinander austauschen. Solche Austauschvorgänge ziehen meist physikalische Folgeprozesse nach sich, z. B. Deformation von Körpern, Temperaturabnahme bei Energieabgabe in Form von Wärme bzw. Temperaturanstieg bei Wärmezufuhr. Ein Körper gibt dann Wärme an einen anderen Körper ab, wenn er sich in einem Zustand höherer Temperatur befindet als der andere. Haben in einem System von Körpern alle Körper die gleiche Temperatur, befinden sie sich im thermodynamischen Gleichgewicht und es findet kein Wärmeaustausch statt. Wird also die Temperatur gemessen, kann auf Grund einer physikalischen Größe eine Aussage über Energieumsätze gemacht werden, ohne die Wärmemenge messen zu müssen. Die Thermodynamik liefert eine wichtige empirische Aussage über die Richtung der Wärmeaustauschvorgänge und auch eine Definition, die als Messvorschrift geeignet ist.

Bei der Temperaturmessung sind im Prinzip alle physikalischen Zusammenhänge fester, flüssiger und gasförmiger Stoffe geeignet, die in reproduzierbarer Weise von der Temperatur abhängig sind. Es werden jedoch nur solche Stoffe verwendet, deren Eigenschaften sich stark mit der Temperatur ändern und leicht zu handhaben sind. Die Messungen sollten einfach durchführbar sein. Aus diesen Vorgaben ergibt sich eine Reihe von völlig unterschiedlichen Messgeräten/Sensoren für die meteorologische Praxis.

Die relative Änderung einer physikalischen Größe in Abhängigkeit von der Änderung der Temperatur gegenüber einer Bezugstemperatur wird durch den **Temperaturkoeffizient** beschrieben. Temperaturkoeffizienten gibt es für die Länge, das Volumen (Ausdehnungskoeffizient), den Druck, den elektrischen Widerstand, die Temperaturspannung einer Halbleiterdiode und andere Größen. Die Stoffe sollten dabei über einen großen Temperaturbereich den Aggregatzustand nicht ändern. Die Forderung nach einem linearen Zusammenhang ist im Allgemeinen nur in einem begrenzten Temperaturintervall erfüllt, für den Bereich der Meteorologie aber meist gegeben. Im Wesentlichen werden in der Meteorologie folgende Eigenschaften genutzt:

- der Ausdehnung von festen, flüssigen und gasförmigen Stoffen
 - Volumenänderung mit der Temperatur von Flüssigkeiten, die in Glasgefäße eingeschlossen sind
 - miteinander verschweißter Metalle mit unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten
- die thermoelektrischen Eigenschaften (thermische Leitfähigkeit) von Stoffen
 - Änderung des Widerstandes von Leitern/Halbleitern
 - die Thermospannung
- die Emission elektromagnetischer (thermischer Strahlung), d. h. die strahlungsbedingte Änderung der Temperatur
- die Änderung der Schallgeschwindigkeit

Nahezu alle in der Praxis eingesetzten Thermometer gehören in die Gruppe der Berührungsthermometer, einige auch in die Gruppe der Strahlungsthermometer. Bei der Tempera-

turmessung nach den ersten zwei Strichaufzählungen wird nicht die Lufttemperatur direkt gemessen, sondern die Temperatur eines Messkörpers, der mit der umgebenden Luft im Wärmegleichgewicht steht. Ein Berührungsthermometer misst grundsätzlich „nur“ seine eigene Temperatur. Die Temperatur des Sensors wird dann durch Messung einer anderen Größe (Ausdehnung, elektrischer Widerstand usw.), die eine Abhängigkeit von der Temperatur zeigt, bestimmt.

Die Temperaturanpassung dieses Messkörpers folgt dem **NEWTONschen Abkühlungsgesetz** (8.28), welches für alle Mechanismen der Wärmeübertragung gilt und die Grundlage der Temperaturmessung darstellt (siehe 8.4.2).

8.2.1 Thermische Änderungen

Eine wichtige und auch häufige Anwendung bei der Temperaturmessung ist die thermische Ausdehnung von Volumen oder Länge von flüssigen, festen und gasförmigen Stoffen. Dabei wird die Änderung einer physikalischen Größe in Abhängigkeit von einer Temperaturänderung gemessen, d. h. es handelt sich, wie bereits erwähnt, um ein indirektes Messverfahren, bei dem eine andere Größe in hinreichend eindeutiger und reproduzierbarer Weise von der Temperatur abhängt.

Der thermische Ausdehnungskoeffizient γ_t drückt die Änderung pro Temperaturänderung aus, und zwar als thermischer Volumenausdehnungskoeffizient nach der Beziehung

$$V_t = V_0(1 + \gamma_t \Delta t) \quad (8.7)$$

und als thermische Längenausdehnungskoeffizient nach

$$l_t = l_0(1 + \gamma_l \Delta t) \quad (8.8)$$

Bei isotropen Körpern ist $V_t = 3 l_t$. Im meteorologisch relevante Bereich nimmt γ linear mit der Temperatur zu. Da γ aber gering temperaturabhängig ist, ist die Teilung einer Skala nicht äquidistant, d. h. Thermometer, welche nach diesem Prinzip arbeiten, müssen alle 20 K bis 30 K kalibriert werden.

Thermische Änderung von Flüssigkeiten

Flüssigkeiten dehnen sich wesentlich stärker aus als feste Körper und in alle Richtungen aus. Wegen der leichten Verschiebbarkeit der Moleküle nehmen Flüssigkeiten die Form des Gefäßes an, in dem sie sich befinden. Ist eine Flüssigkeit in eine Glaskapillare eingeschlossen, muss die Ausdehnung der Kapillare ebenfalls berücksichtigt werden. Gemessen wird dann die Differenz der Volumenänderung von Flüssigkeit und Glas.

Bei den üblichen Flüssigkeitsthermometern ist die Volumenänderung des Glases wesentlich geringer als die der Flüssigkeit, so ist z. B.

$$\gamma_{Hg} = 181,9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}, \text{ Quarzglas} = 15 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

d. h. der scheinbare kubische Ausdehnungskoeffizient beträgt

$$\gamma_{\delta Hg} = 166 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

Tabelle 8.2 enthält einige, in diesem Zusammenhang interessierende Volumenausdehnungskoeffizienten.

Tab. 8.2 Volumenausdehnungskoeffizient verschiedener Stoffe

	Stoff	γ (10^{-6} K^{-1})
Gase	Luftgemisch	3665
	Wasserstoff	3660
	Helium	3659
Flüssigkeiten	Wasser	207,0
	Quecksilber*	181,9
	Ethanol	110
Feste Körper	Quarzglas (SiO_2)	15
	Invar	1,5-2,0
	Eisen	36
	Aluminium	71,4
	Messing	18

* Quecksilber ist das einzige Metall, das unter Normalbedingungen flüssig ist.

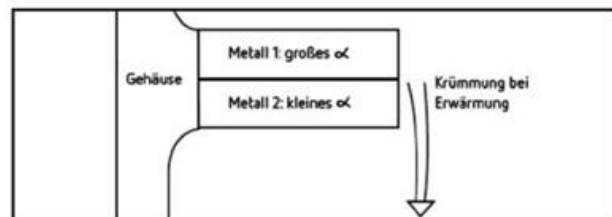
Verwendung: Flüssigkeitsthermometer.

Thermische Änderung von festen Körpern

Das Messprinzip basiert auf der unterschiedlichen thermischen Ausdehnung (Formänderung) zweier verschiedener, miteinander verschweißter oder vernieteter Metalle in Abhängigkeit von einer Temperaturänderung. Es wird also die Deformationsänderung gemessen, die von der Kombination der verwendeten Metalle abhängt, die unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten haben. So hat z. B. Stahl etwa den 12-fachen Ausdehnungskoeffizienten von Invarstahl, einer besonders ausdehnungsarmen Legierung.

Infolge der ungleichen Ausdehnung (Längenänderung) beider Metalle (Bimetalle) bei Erwärmung krümmt oder biegt sich der Metallstreifen oder die Spirale. Das eine Ende ist befestigt, das andere, freie Ende bewegt einen Zeiger, der auf einer Skala die jeweilige Temperatur anzeigt.

Abb. 8.1 Prinzip des Bimetalls



Der Ausschlag dS des freien Endes eines Bimetallkörpers bei Temperaturänderung $d\theta$ kann mit Hilfe der folgenden Beziehung bestimmt werden:

$$dS = \frac{4}{5} \cdot \frac{L^2}{\delta} \cdot \frac{R}{\varphi} \cdot k \cdot d\theta \quad (8.9)$$

mit L = Länge des Bimetalls

δ = mittlere Dicke

φ = Zentriwinkel

(Mittelpunktswinkel – Winkel zwischen ...)

$R = f(\varphi)$

$k = \alpha_2 - \alpha_1$ (lineare Ausdehnung)

Der Ausschlag dS ist damit abhängig von

- Quadrat der Streifenlänge (L)
- der Streifendicke (δ)
- Differenz der Ausdehnungskoeffizienten k (~ proportional)
- Temperaturänderung $d\vartheta$
- geometrischen Form des Streifens R
- Elastizität der Materials (c)

Tab. 8.3 Einige Zentriwinkel und ihr Einfluss auf den Ausschlag

φ	0	40	160	360
R/φ	0,5	0,49	0,4	0,16

Der Ausschlag eines Bimetallthermometers ist bei gestreckten Bimetallen am größten, d. h. k sollte möglichst groß sein. Der lineare Längenausdehnungskoeffizient beträgt z. B. bei Messing $= 18 \cdot 10^{-6} (K^{-1})$, bei Invarstahl $= 1,5 \text{ bis } 2,0 \cdot 10^{-6} (K^{-1})$, das ergibt

$$\begin{aligned} k &= \alpha_2 - \alpha_1 \\ &= 18 \cdot 10^{-6} - 1,5 \cdot 10^{-6} (K^{-1}) \\ &= 16,5 \cdot 10^{-6} (K^{-1}) \\ &= 0,0165 \cdot 10^{-3} (K^{-1}) \\ &= 0,0165 \cdot 10^{-3} (K^{-1}) \end{aligned}$$

Verwendung: Bimetallthermometer, Thermograph, Temperaturkompensation, Thermostat

Thermische Änderung von Gasen

Die Ausdehnung von Gasen ist bedeutend stärker (etwa 150 bis 200-fach) als die fester und flüssiger Körper, d. h. sie haben eine wesentlich größere Empfindlichkeit. Außerdem weisen nur Gasthermometer absolute Linearität von Volumenänderungen infolge Temperaturänderungen auf.

Das Gesetz von **BOYLE-MARIOTTE** (R. Boyle, 1627–1691 und E. Mariotte, 1620–1684) bietet zwei Möglichkeiten. Es kann entweder das Volumen bei konstantem Druck oder den Druck bei konstantem Volumen in Abhängigkeit von der Temperatur bestimmt werden.

Ein Gas (z. B. Helium oder Wasserstoff), das sich bezüglich der Ausdehnung bei Erwärmung bei allen Temperaturen so verhält, nennt man ein **ideales Gas**. **Reale Gase** verhalten sich in der Nähe des absoluten Nullpunktes anders, weshalb zur Messung sehr tiefer Temperaturen andere Messmethoden angewandt werden müssen. In guter Näherung gilt aber für den meteorologischen Bereich der Temperaturmessung der Volumenausdehnungskoeffizient für ideale Gase

$$\gamma = 0,00366 K^{-1} = \frac{1}{273,15 K} = \frac{1}{T_0}$$

Damit ergibt sich gem. (8.9)

$$\begin{aligned} V_t &= V_0 \left(1 + \frac{t}{273,15} \right) \\ &= V_0 \frac{T}{273,15} \end{aligned} \quad (8.10)$$

Es zeigt sich, dass reale Gase diesem Verhalten sehr nahe kommen.

Gasthermometer haben in der meteorologischen Routinepraxis keine Bedeutung, daher wird nur an dieser Stelle kurz darauf eingegangen. Mit einem Gasthermometer lassen sich sehr tiefe und sehr hohe Temperaturen – bis zum Schmelzpunkt des Gefäßes – messen. Ein mit Helium gefülltes Gasthermometer mit linearer Skala ist am genauesten. Die damit gemessene Temperatur entspricht recht genau der thermodynamischen Skala. Sie werden daher auch als Normalthermometer zur Eichung anderer Thermometer und dienen der Gewinnung von Temperaturskalen.

8.2.2 Elektrische Änderungen

Elektrische Änderung eines Widerstandes

Ebenso wie die Ausdehnung von festen, flüssigen und gasförmigen Körpern ist auch der elektrische Widerstand eine gut reproduzierbare Funktion der Temperatur. Grundlage ist das Gesetz von 1826 von **Georg Simon OHM** (1789–1854) mit der SI-Einheit Ohm (Ω) für den Widerstand

$$U = R \cdot I \text{ oder } R = \frac{U}{I} (1 \Omega = 1V A^{-1}) \quad (8.11)$$

mit $R = \text{konstant}$

Das nach Ohm benannte Gesetz ist kein Naturgesetz, sondern eine empirische Beschreibung des Verhaltens (nicht aller) elektrischen Leiter. Bei vielen Materialien bleibt der Widerstand über weite Bereiche der äußeren Bedingungen konstant. Der Widerstand von bestimmten Materialien hängt aber außerdem vom Strom I ab, dann ist also U nicht proportional zu I . Der Widerstand eines Leiters ist proportional zu seiner Länge, umgekehrt proportional zu seinem Querschnitt und abhängig von seiner Temperatur, d. h. (8.11) ist dann

$$R = r \frac{l}{A} \quad (8.12)$$

mit $r = \text{Proportionalitätsfaktor (= spezifischer Widerstand)}$

Das daraus abgeleitete Messprinzip ist die elektrische Leitfähigkeit, z. B. die Änderung des elektrischen Widerstandes von Metallen (Kupfer, Nickel oder Platin), am häufigsten von Platin in Abhängigkeit von einer Temperatur. In Analogie zu (8.8) muss es hier lauten

$$R_t = R_0(1 + \gamma t) \quad (8.13)$$

wobei der Widerstandskoeffizient γ bei metallischen Leitern positiv ist, d. h. der Widerstand nimmt mit steigender Temperatur zu (PTC – positive temperature coefficient). Platin hat einen zu anderen Metallen vergleichsweise kleinen, dafür aber praktisch konstanten Widerstandskoeffizienten von $\gamma = 0,385 K^{-1}$ bei allen in der Meteorologie in Frage kommenden Temperaturen.

Zur Widerstandsmessung muss der Widerstand von einem konstanten Strom durchflossen werden, wobei die Stromstärke aber gering sein muss, um die Eigenerwärmung gering zu halten. Beim Pt 100 ist er nicht höher als 1 mA.

In Verbindung mit Widerstandsthermometern wird die sog. **Vierleiterschaltung** eingesetzt. Sie ermöglicht eine von den Zuleitungen unabhängige Widerstandsmessung des Temperatursensors. Je zwei Leiter sind mit Sensoranschlussdrähten verbunden, so dass zwei getrennte Messkreise entstehen.

Abb. 8.2 Vierleiterschaltung

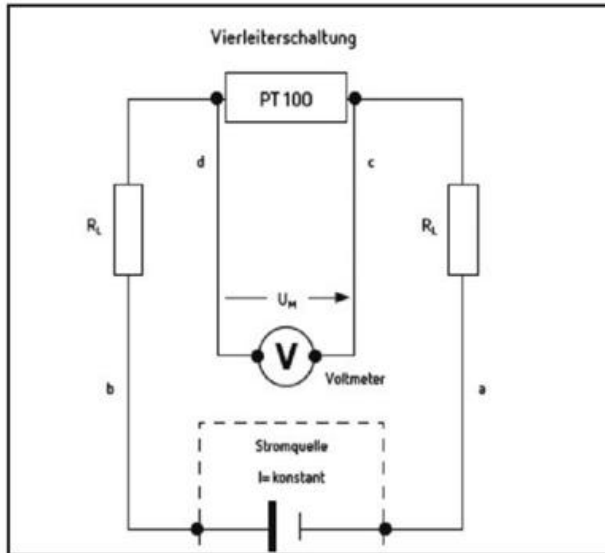
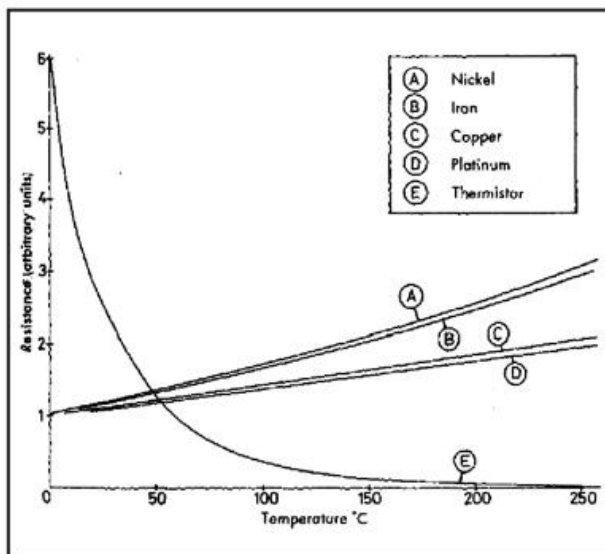


Abb. 8.3 Widerstandsänderungen im Vergleich



Ein Messkreis wird zur Stromversorgung „I“, der zweite zur Messung des Spannungsabfalls „U“ genutzt. Liegt der Eingangswiderstand der Auswerteelektronik um ein Vielfaches höher als der Leitungswiderstand, dann ist der ermittelte Spannungsabfall unabhängig von den Eigenschaften der Zuleitungen.

Anstelle von Metallen kann der Widerstand auch mit Halbleitern (Thermistoren) bestimmt werden. Halbleiter sind physikalisch dadurch gekennzeichnet, dass nur in geringem Umfang freie Elektronen (und Löcher) als Ladungs-

träger vorhanden sind, die dadurch entstehen, dass durch thermische Anregung einzelne Elektronen aus dem vollständig gefüllten Valenzband in das leere Leitungsband angehoben werden. Da die Zahl der Elektron-Lochpaare mit zunehmender Temperatur zunimmt, nimmt entsprechend der elektrische Widerstand ab. Man spricht daher auch von Sensoren mit negativen Temperaturkoeffizienten (NTC = Negative Temperature Coefficient). Sie bekommen also bei höheren Temperaturen eine gewisse Leitfähigkeit.

Obwohl ihr Widerstand eine etwa 10-fache Temperaturempfindlichkeit gegenüber PTC-Widerständen hat, jedoch keine lineare Kennlinie besitzt (große Toleranz der einzelnen Kennlinien), werden PTC-Thermometer den Thermistoren in der Praxis vorgezogen. Es muss nämlich für jeden einzelnen Thermistor eine eigene Eichkurve erstellt werden, die zudem nicht über längere Zeit konstant bleibt. Damit ist die Austauschbarkeit von Thermistorfühlern stark eingeschränkt.

NTC-Widerstandsthermometer bestehen meist aus einer Mischung aus Magnesium- und Titanoxid oder Magnesium- und Nickeloxid.

Messung der Potenzialdifferenz an Thermoelementen

Eine andere Methode der elektrischen Temperaturmessung beruht auf thermoelektrischen Effekten, die in der Festkörperphysik und ihrer Anwendung in der Praxis eine wichtige Rolle spielen. Dabei sind der **SEEBECK-** (1770–1831), **PELTIER-** (1785–1845) und **THOMSON-** (1824–1907) Effekt die wichtigsten thermoelektrischen Erscheinungen [41].

Besteht zwischen den Kontaktstellen (Lötstellen) zweier verschiedenartiger Metalle eines elektrischen Stromkreises eine Temperaturdifferenz, so entsteht eine Thermospannung (Seebeck-Effekt). Diese temperaturabhängige Kontaktspannung wird gemessen und berechnet mit

$$S = \frac{\partial U}{\partial T}(T) \quad (8.14)$$

mit S = Seebeck-Koeffizient
 ∂U = differenzielle Thermospannung $U_T - U_0$
 ∂T = Temperaturunterschied $T_T - T_0$

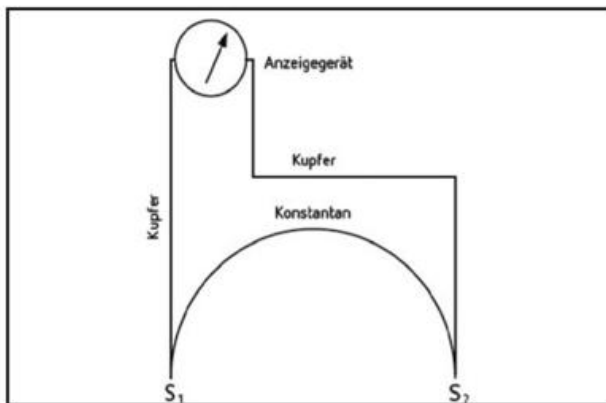
Der Betrag und das Vorzeichen der Thermospannung werden durch das Produkt aus dem Temperaturunterschied und der differenziellen Thermospannung mit dem Seebeck-Koeffizient S bestimmt, der abhängig von der Metallkombination, der absoluten Temperatur und von der Reinheit der Metalle ist.

Eine Umkehrung des thermoelektrischen Effekts ist der Peltier-Effekt. Peltier entdeckte 1834, dass die von einem elektrischen Strom durchflossene Lötstelle zweier verschiedenartiger Metalle sich je nach Stromrichtung erwärmt oder abkühlt. Dadurch konnte durch die Regelung des Stromes auf elektrischem Wege eine bestimmte Temperatur an einer Verbindungsstelle zweier verschiedener Metalle erzeugt werden. Berechenbar wurde der Peltier-Effekt viel später mit Hilfe der theoretischen Physik.

Die physikalische Ursache der Thermospannung ist die Thermodiffusion (Ursache des Seebeck-Effekts) von Ladungsträgern [43]. Bei Stromlosigkeit muss der Thermodiffusionsstrom durch einen Gradienten des elektrochemischen Potentials kompensiert werden, welcher zur Thermospannung führt. Obwohl zum elektrochemischen Potenzial im Allgemeinen nicht nur das elektrostatische Potenzial, sondern auch das nichtelektrische chemische Potenzial beiträgt, ist die am Thermoelement gemessene Thermospannung rein elektrostatischen Ursprungs. Die elektrischen Ladungen, welche dieses elektrische Potenzial erzeugen, befinden sich unter stationären Bedingungen nicht im Innern der Leiter, sondern auf den Grenzflächen an den Kontaktstellen (Lötstellen) und auf den Leiteroberflächen. Unter nichtstationären Bedingungen wird der langsame Temperaturausgleich von (im Allgemeinen schwachen) Raumladungen und Strömen im Inneren der Leiter begleitet [42].

Der Aufbau eines Thermoelementes ist in Abbildung 8.4 dargestellt. Mit jedem Ende eines Konstantandrahtes ist z. B. ein Kupferdraht verbunden (Lötung, Schweißung, Quetschung oder eine andere Verbindungsart), so dass zwei Berührungsstellen entstehen. Der Stromkreis wird dann über Zuleitungen zu einer Anzeigeeinheit geschlossen. Wenn beide Kontaktstellen unterschiedliche Temperatur haben fließt Strom, der von der Temperaturdifferenz abhängig ist. Haben beide Lötstellen die gleiche Temperatur, fließt kein Strom.

Abb. 8.4 Messprinzip Thermoelement



Mit Thermoelementen wird also immer eine Temperaturdifferenz gemessen, d. h. sie ist nur möglich, wenn die Temperatur einer der beiden Lötstellen bekannt ist (z. B. 0°C). Für die durch diese Temperaturunterschiede hervorgerufene Spannungsdifferenz gilt:

$$\partial U = U_1 - U_2 = a(T_1 - T_0) + b(T_1 - T_0)^2 \quad (8.15)$$

mit a, b = thermoelektrische Materialkonstanten
 T_0, T_1 = Temperaturen der beiden Lötstellen

Die Differenz der Kontaktspannungen gibt die Größenordnung der Thermospannung an.

Im Allgemeinen ist die Temperaturabhängigkeit der gemessenen integralen Thermospannung nicht linear und kann mit einer Parabel durch den Nullpunkt angenähert werden. Im meteorologisch relevanten Temperaturbereich sind sie aber nahezu linear.

Die Größe der Thermospannung ist abhängig von

- der Temperaturdifferenz
- der Wahl der beiden Metalle

Tabelle 8.4 enthält einige gebräuchliche Stoffpaarungen. Die oberen Grenztemperaturen dürfen nur kurzzeitig gemessen werden, da sich die Thermokraft bei hohen Temperaturen durch Korrosion verändert und die Thermoelemente neu geeicht werden müssen.

Tab. 8.4 Differenzielle Thermospannungen gebräuchlicher Metall-Legierungen

Metall-Kombination	$S \left[\frac{\text{mV}}{0 \dots 100^{\circ}\text{C}} \right]$	Einsatztemperatur $^{\circ}\text{C}$
Cu/Konstantan*	4,25	-200 bis +350
Fe/Konstantan	5,37	-200 bis +800
Ni-Cr/Konstantan	6,21	-200 bis +800

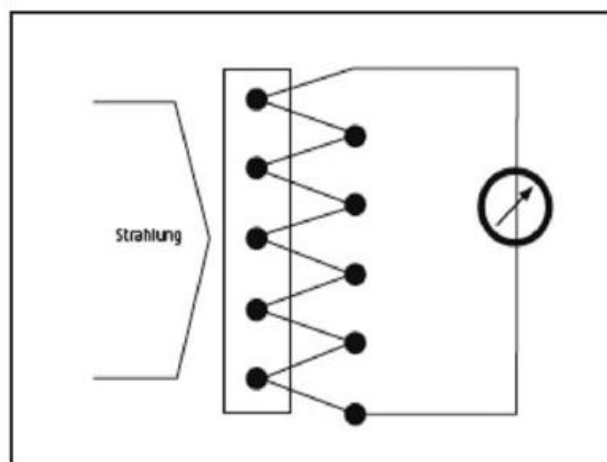
*Konstantan ist ein Markenname von ThyssenKrupp mit $54 \text{ Cu}/45 \text{ Ni}/1 \text{ Mn}$. Auszug aus C.-G. Oertel, TU Dresden, Fachrichtung Physik, 2003 [41]

Die Kombination aus Kupfer (Cu) und Konstantan eignet sich besonders gut, da sie sich gut löten lässt und eine relativ hohe Thermospannungen liefert, und zwar von

$$\begin{aligned} \text{Cu} &= 7,4 \mu\text{V K}^{-1} / \text{Konstantan} = 32,5 \mu\text{V K}^{-1} \\ \partial U &= U_1 - U_2 \\ \partial U / \partial t &= 7,4 + 32,5 = 40 \mu\text{V K}^{-1} \end{aligned}$$

Diese Thermokraft $\partial U / \partial t$ beträgt für die Elemente Cu/Konstantan also ca. $40 \mu\text{V K}^{-1}$ im Bereich zwischen 0°C bis 100°C . Da Thermospannungen sehr klein sind, stellt das Verfahren hohe Ansprüche an die elektrischen Mess- und Registrierungseinrichtungen. Besonders große Thermospannungen werden mit Halbleiter-Thermoelementen erzielt, die zur thermoelektrischen Energieumwandlung genutzt werden.

Abb. 8.5 Thermosäule



Zur Erhöhung solcher Spannungen lassen sich mehrere (bis zu 80) Thermolemente zu einer sogenannten Thermosäule (Thermobatterie) hintereinander schalten. Die dabei erreichte Spannung ist gleich der Summe der Spannung der Einzelemente. Zusätzlich wird damit auch eine geringere Trägheit erreicht. Voraussetzung dabei ist, dass nur jede 2. Verbindungsstelle einer Temperaturänderung ausgesetzt werden darf (siehe Abb. 8.5).

Mit diesem Messprinzip können Thermolemente auch als Windmessgeräte eingesetzt werden, indem eine Lötstelle dem Wind ausgesetzt ist und dann die Temperaturänderung bestimmt wird.

Vorteile der Thermolemente als Messfühler sind:

- punktförmige Messstelle
- geringe Größe, daher geringe Wärmekapazität
- geringe Trägheit
- keine Hilfsstromquelle erforderlich

Nachteil:

- etwas aufwendige Handhabung, da es sich um eine Differenzmessung handelt

Kapazitive Messung

Die Grundlagen der kapazitiven Messprinzipien wurden bereits unter 6.1 erläutert. Da die Kapazität und somit die Spannung eines Kondensators auch abhängig vom Dielektrikum zwischen den Elektroden ist, wird bei der Temperaturmessung ein temperaturempfindliches Dielektrikum eingesetzt. Damit ändert der Kondensator, abhängig von der Lufttemperatur seine Spannung, die zur Anzeige gebracht wird.

Alle unter 8.2.2 aufgeführten, nach elektrischen Messprinzipien arbeitende Thermometer sind: Widerstandsthermometer, Thermistoren, Thermolemente und Thermosäulen, Thermocap®. Gegenüber mechanischen Thermometern haben elektrische Thermometer den Vorzug, dass der Temperaturfühler sich in verhältnismäßig großer Entfernung vom Anzeigegerät befinden kann und die nichtelektrische Größe „Temperatur“ unmittelbar in ein für die Datenverarbeitung geeignetes Signal geliefert werden kann.

8.2.3 Messung der Wärmestrahlung

Strahlungsthermometer (Infrarotthermometer) messen die von der Oberfläche eines Körpers emittierte elektromagnetische Strahlung (Strahlungsemission nach dem **PLANCKschen Gesetz**), bis 600 °C nur im infraroten Spektralbereich (Temperaturstrahlung), im sog. „atmosphärischen Fenster“ (8 µm bis 14 µm), dort wo keine Absorptionsbanden von H₂O oder anderen Luftbestandteilen, z. B. CO₂, vorhanden sind und außerhalb des Einflussbereichs der reflektierenden Sonnenstrahlung. Die Emission der elektromagnetischen Strahlung ist mit einem Energiefluss verbunden, der einen Energieverlust für den emittierenden Körper bedingt.

Die Wellenlänge und die Strahlungsflussdichte φ_e (siehe 14.1.2) ist nach dem **STEFAN-BOLTZMANN-Gesetz** (Josef Stefan, 1835–1893 u. Ludwig Boltzmann, 1844–1906) nur von

der Temperatur und vom Emissionsgrad des Körpers abhängig. Die Berechnung der Temperatur erfolgt nach dem Gesetz

$$\varphi_e = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (8.16)$$

mit φ_e = Strahlungsflussdichte ($W m^{-2}$)
 ε = Emissionsgrad eines realen Körper ($\varepsilon = 0$ bis ≤ 1), abhängig von seinen Materialeigenschaften
 $\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$ (Stefan-Boltzmann-Konstante)
 T = Oberflächentemperatur (K)

Das Gesetz besagt:

1. Jeder Körper mit einer von Null verschiedenen (absoluten) Temperatur emittiert (thermische) Strahlung,
2. Die vom Körper emittierte Leistung ist stark, und zwar zur 4. Potenz seiner (absoluten) Oberflächentemperatur proportional,
3. Nach Messung der Gesamtemission des Körpers, kann daraus die Temperatur bestimmt werden.

Die emittierte Strahlung eines Körpers bei einer bestimmten Wellenlänge hängt, wie (8.16) zeigt, neben seiner Temperatur auch noch von der Beschaffenheit seiner Oberfläche ab. Wenn ein Körper die Obergrenze, die die maximal mögliche Emission für eine Wellenlänge beschreibt, aussendet, wird er als „schwarzer Körper“ bezeichnet. Ein schwarzer Körper hat ein $\varepsilon = 1,00$, alle anderen Stoffe haben Werte von $\varepsilon < 1,00$. Bei Pflanzenoberflächen liegen die Werte nahe $\varepsilon = 1,00$. Verschiedene Stoffe besitzen teilweise wesentlich kleinere Werte, z. B. ist bei Quecksilber $\varepsilon = 0,09$ bis $0,12$.

Ein Körper befindet sich im thermischen Gleichgewicht mit seiner Umgebung, wenn er die gleiche Temperatur wie seine Umgebung hat, dann absorbiert er genauso viel Strahlung wie er emittiert.

Vorteil von Strahlungsthermometern ist, dass sie völlig ohne Berührung mit dem Medium, notfalls auch ohne jegliches stoffliches Medium, d. h. im luftleeren Raum messen können. Die Anwendung von Strahlungsthermometern beschränkt sich aber fast ausschließlich auf Sondermessungen, so z. B.

- Messung der Blattoberflächentemperatur (siehe 15.3.9)
- im Rahmen der Fernerkundung (mit Satelliten) werden großflächige Messungen von Oberflächentemperaturen des Bodens, des Wassers oder an Wolkenobergrenzen (z. B. von Flugzeugen, Satelliten) durchgeführt.

8.2.4 Messung der Änderung der Schallgeschwindigkeit

Schallwellen breiten sich in idealen Gasen und damit in guter Näherung auch in Luft mit einer Geschwindigkeit aus, die deutlich von der Lufttemperatur, geringfügig von der Luftfeuchte, aber kaum messbar vom Luftdruck abhängt. Änderungen dieser Einflussgrößen wirken sich also auf das Messergebnis aus. Dieser physikalische Zusammenhang kann für eine Temperaturmessung der Luft bei bekannter und konstanter chemischer Zusammensetzung genutzt werden.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls ist über eine Wurzelfunktion von der absoluten Temperatur der Luft abhängig. Mit hinreichender Genauigkeit gilt für die Schallgeschwindigkeit c in Luft (Fortpflanzungsgeschwindigkeit) in Abhängigkeit von der Temperatur t ($^{\circ}\text{C}$)

$$c = 331,5 + 0,596 \cdot t \text{ (m s}^{-1}\text{)} \quad (8.17)$$

Daraus folgt, dass 1 K Temperaturänderung eine Änderung der Schallgeschwindigkeit um 60 cm s^{-1} ergibt. Mit folgender Formel ist die Schallgeschwindigkeit genauer zu berechnen:

$$c = 331,5 \cdot \sqrt{\frac{t + 273,15}{273,15}} = 331,5 \cdot \sqrt{1 + \frac{t}{273,15}} \text{ (m s}^{-1}\text{)} \text{ mit } t \text{ (}^{\circ}\text{C)} \quad (8.18)$$

Eine andere Möglichkeit, die Schallgeschwindigkeit in Gasen zu berechnen ist:

$$c = 20,067 \sqrt{T \left(1 - 0,3192 \frac{e}{p}\right)} \quad (8.19)$$

Wegen der schwachen Abhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls von der Luftfeuchte bezieht sich die „akustische Virtuell-Temperatur“ auf trockene Luft (0 % Feuchte) unter gleichen Druckbedingungen wie die aktuell gemessene. Über Land können Feuchteschwankungen vernachlässigt oder ausreichend parametrisiert werden. Die Abweichung der gemessenen „akustischen Virtuell-Temperatur“ zur realen Lufttemperatur ist linear vom absoluten Feuchtegehalt der Luft abhängig.

Die Formel (8.19) kann mit der virtuellen Temperatur (siehe 9.1.1.1), d.h. Lufttemperatur und –Feuchte zusammengefasst, vereinfacht mit

$$c = 20,067 \sqrt{T_v} \quad (8.20)$$

verwendet werden. Dabei wird die virtuelle Temperatur nach (9.16) berechnet mit

$$t_v = t (1 + 0,608 \cdot r)$$

mit r = Mischungsverhältnis (g kg^{-1}).

Einige Werte dazu enthält Tabelle 8.5.

Tab. 8.5 Temperaturabhängige Schallgeschwindigkeiten

Temperatur $^{\circ}\text{C}$	Schallgeschwindigkeit m s^{-1}
-20	319,1
0	331,5
+20	343,5
+30	349,3

Der Wert der SI-Einheit bei 20°C entspricht umgerechnet 1235 km h^{-1} , 767 mph , 1125 ft s^{-1} oder 666 Kn (Knoten).

Schall wird im Gegensatz zu Licht und anderer elektromagnetischer Strahlung von bewegter Luft mitgeführt. Die Laufzeit des Schalls von einem Sender zu einem Empfänger hängt somit von der Temperatur **und** von der Komponente der Windgeschwindigkeit in Richtung der Verbindungslinie zwischen Sender und Empfänger ab.

Aus der über beide Laufrichtungen gemittelten Laufzeit können die Schallgeschwindigkeit in ruhender Luft und damit die Lufttemperatur bestimmt werden. Damit sind Temperaturfluktuationmessungen mit hoher zeitlicher Auflösung möglich. Die Korrelation der so bestimmten Wind- und Temperaturfluktuationen ergibt den turbulenten Wärmefluss. Ultraschallthermometer sind somit gleichzeitig **Wind-, Temperatur- und Wärmeflussmessgeräte**.

Die Vorteile dieser Messmethode bestehen zum einen in ihrer trägheitsfreien Reaktion auf die aktuelle Lufttemperatur, zum anderen in der Vermeidung von Messfehlern wie z. B. durch Aufheizung eines Temperatursensors durch Strahlung. Dennoch werden Ultraschallmessgeräte zur Temperaturmessung in der meteorologischen Messpraxis nicht eingesetzt, es wird daher kein Messgerät beschrieben.

8.2.5 Messung der Änderung der Materialwerte (Stoffkonstante)

Als **Materialwerte** oder **Stoffkonstante** wird der Wert einer physikalischen Größe bezeichnet, der unter festgelegten Bedingungen hauptsächlich vom verwendeten Stoff, kaum aber von anderen äußeren Einflüssen abhängt. Es handelt sich also um eine stoffeigene Größe, die jedem Stoff einen konstanten Wert bezüglich einer bestimmten Stoffeigenschaft zuordnet.

Die Dichte ist unter Normalbedingungen z. B. eine Materialkonstante, da sie spezifisch für den verwendeten Stoff ist. Materialkonstanten, die für Temperaturmessungen benutzt werden können sind

- spezifische Wärmekapazität
- spezifischer Widerstand
- Temperaturkoeffizient
 - Volumenausdehnungskoeffizient (siehe 8.2.1)
 - Längenausdehnungskoeffizient (siehe 8.2.1)
- Permittivität (siehe 6.1 kapazitive Messung)

Einige sind bereits behandelt, eine weitere Materialkonstante wird im Folgenden dargestellt.

Spezifische Wärmekapazität

Die spezifische Wärmekapazität c ist

$$c = \frac{\Delta Q}{m \cdot \Delta T} \left(\frac{\text{J}}{\text{g} \cdot \text{K}} \right) \quad (8.21)$$

mit c = spez. Wärmekapazität, d. h. die Wärmeenergie, die erforderlich ist, um die Substanzmasse $m = 1 \text{ kg}$ um 1 K zu erwärmen ($\text{kJ kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)

ΔQ = Wärmemenge, die der Materie zugeführt oder entzogen wird (J)

ΔT = Temperaturänderung (K)

Die SI-Einheit für die Wärmemenge ist Joule ($1 \text{ cal} = 4,184 \text{ J}$). Mit der ursprünglichen Definition der Einheit Kalorie ist die spezifische Wärmekapazität c_w von Wasser

$$c_w = 1 \text{ cal g}^{-1} (\text{°C})^{-1} = 1 \text{ kcal kg}^{-1} (\text{°C})^{-1} = 4,184 \text{ kJ kg}^{-1} (\text{°C})^{-1}$$

Tab. 8.6 Spezifische Wärmekapazität einiger Flüssigkeiten bei 20 °C

Substanz	c (kJ kg ⁻¹ (°C) ⁻¹)
Wasser	4,18
Quecksilber	0,14
Ethanol	2,4
Aluminium	0,90
Silber	0,223
Wasserdampf (bei 1 bar)	2,02

In Tabelle 8.6 ist die wesentlich höhere Wärmekapazität von Wasser als von allen anderen aufgeführten Stoffen auffallend. Das erklärt die sehr gute Speicherkapazität von Wasser; vorteilhaft in Solarkollektoren oder auch als Kühlmittel in Automotoren. Vernachlässigbar ist die geringe Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärmekapazität von Wasser. Sie liegt zwischen 0 °C bis 100 °C bei etwa 1 %. Der Begriff Wärmekapazität bedeutet nicht, dass der betreffende Gegenstand eine bestimmte Wärmemenge enthält oder aufnehmen kann.

8.3 Sensoren/Messgeräte

Die Vielzahl von Temperaturmessverfahren erlaubt eine weitgehende Anpassung an das Ziel der jeweiligen Messung. Die zwei erstgenannten Messprinzipien werden überwiegend für meteorologische Standardmessungen, die

anderen werden heutzutage fast ausschließlich für Sondermessungen eingesetzt.

8.3.1 Ausdehnungsthermometer

8.3.1.1 Flüssigkeitsthermometer

Die gebräuchlichsten Flüssigkeitsthermometer sind Quecksilber- und Alkoholthermometer. In diesem Zusammenhang wird Quecksilber als Flüssigkeit betrachtet, weil es im Temperaturbereich meteorologischer Messungen flüssig ist, obwohl es, wie bereits erwähnt zu den Metallen zählt. Die Eigenschaften dieser Messflüssigkeiten sind in Tabelle 8.7 im Vergleich dargestellt. /TAB. 8.7

Es ist leicht erkennbar, dass beide Flüssigkeiten sowohl Vor- als auch Nachteile haben, die bei der Herstellung von Thermometern für den jeweiligen Zweck und Messbereich abgewogen werden müssen. Mit wenigen Ausnahmen wird dabei dem Quecksilber der Vorzug gegeben.

Flüssigkeitsthermometer bestehen aus dem dünnwandigen Thermometergefäß, das die thermometrische Flüssigkeit enthält, einer daran angeschlossenen dünnen Glasröhre (Kapillare), die in der Expansionserweiterung endet und der mit der Kapillare mechanisch verbundenen Temperaturskala. Infolge des Unterschiedes zwischen der thermischen Ausdehnung der Flüssigkeit und der des Gefäßes ändert sich mit der Temperatur die Länge des in der Kapillare befindlichen Flüssigkeitsfadens. Am Ende des Flüssigkeitsfadens wird die Temperatur auf der Skala abgelesen.

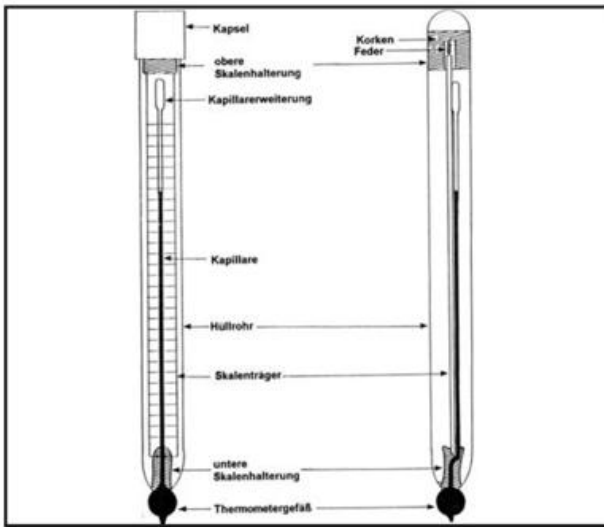
Bei dem im DWD ausschließlich verwendeten sog. Einschlussthermometer (Flüssigkeits-Glasthermometer nach DIN 12770) befindet sich die Skala auf einem von der Kapillare getrennten, direkt dahinter liegenden Skalenträger.

Tab. 8.7 Vergleich von Quecksilber und Alkohol (Ethanol)

	Quecksilber (Hg) Hg = Hydragryum	Alkohol (Ethanol) C ₂ H ₅ OH
Ausdehnungskoeffizient γ	181,9 10^{-6} K^{-1} bei 20 °C praktisch konstant	103-143 10^{-5} bei 20 °C unstetig
Fixpunkte	-38.87° / 356.6°	-114.2° / 78.3°
Messbereich*	-35 bis +350 °C	-114 bis +78 °C
e_p	gering (<0.01 mmHg)	groß
Kohäsionskraft	groß	gering
Trägheit	$\lambda = 58 \text{ s}$	$\lambda = 72 \text{ s}$
Wärmeleitfähigkeit	0.92 J	0.001799 J
spez. Wärme	0.138 J g ⁻¹ K ⁻¹	2.386 J g ⁻¹ K ⁻¹
Strahlung	unempfindlich	empfindlich
Meniskus	konvex	konkav
Füllgas	meist Vakuum	Vermeidung von Überdestillation
Vorteile	lineare Skala geringe Trägheit gut reflektierend	größeres γ leicht preisgünstig
Nachteile	schwer giftig	nicht lineare Skala große Trägheit

* Messbereich von HG-Thermometern kann mit Hg-Thallium-Füllung bis -58°C erweitert werden

Abb. 8.6 Aufbau Einschlußthermometer



Ein mit dem Gefäß verschmolzenes Umhüllungsrohr umschließt bei dieser Bauart luftdicht Kapillare und Skalenträger. Besondere Vorrichtungen sorgen dafür, dass sich der Skalenträger bei Erwärmung zwar ausdehnt, seine Lage gegenüber der Kapillare jedoch nicht ändern kann und an dieser fest anliegt. /ABB. 8.6

Mit Ausnahme des Minimumthermometers sind die an den Beobachtungsstationen eingesetzten Thermometer ausschließlich mit Quecksilber gefüllt. Da Quecksilber bei einer Temperatur von $-38,87^{\circ}\text{C}$ erstarbt und die Anzeige bereits in der Nähe dieser Temperatur unzuverlässig wird, endet bei etwa -35°C der nutzbare Messbereich.

Im DWD kommen Flüssigkeitsthermometer zur Messung der Temperatur fast nur noch für Ersatzmessungen oder zu festgelegten Terminen an Klimareferenzstationen zum Einsatz. Dabei handelt es sich um die nachfolgend aufgeführten Flüssigkeitsthermometer: /ABB. 8.7

- Psychrometer-Thermometer (Stationsthermometer)
- Maximum-, Minimumthermometer
- Thermometer 370 mm lang für Hüttenpsychrometer (trockenes und feuchtes Thermometer) nach DIN 58660
- Erdbodentiefenthermometer

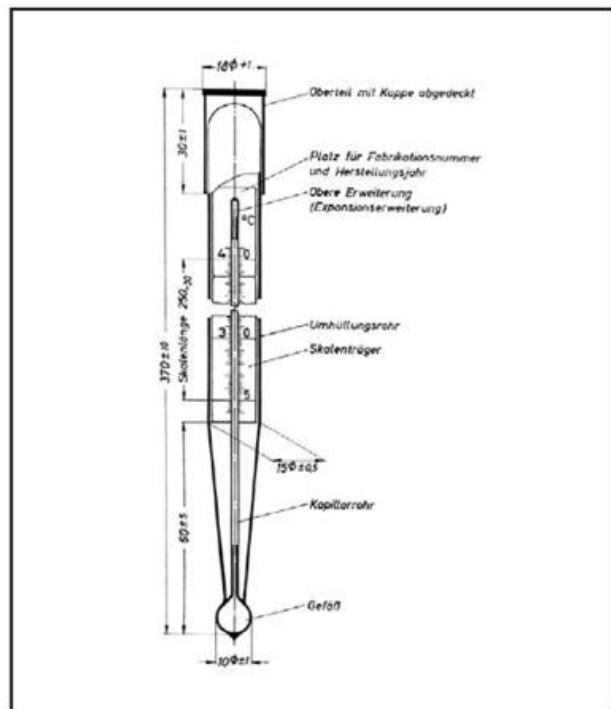
Psychrometer-Thermometer

Die Psychrometer- Thermometer sind zwei baugleiche Hg-Thermometer, die zur Messung der Lufttemperatur und Feuchttemperatur dienen. Die Skala reicht von etwa -35°C bis $+40^{\circ}\text{C}$. Der geprüfte Bereich liegt zwischen -30°C ... $+40^{\circ}\text{C}$. Der Abstand der Teilstriche auf der Skala entspricht $0,2\text{ K}$, die ungeraden $1/10^{\circ}\text{C}$ sind zu schätzen. Das Ende des Quecksilberfadens zeigt die augenblickliche Lufttemperatur oder Feuchttemperatur an.

Abb. 8.7 Flüssigkeitsthermometer im DWD



Abb. 8.8 Psychrometer-Thermometer

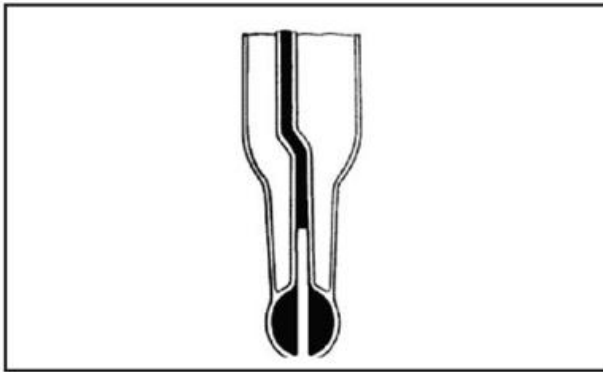


Zur Anwendung der Psychrometer-Thermometer wird auf 9.3.1 verwiesen.

Maximumthermometer

Das Maximumthermometer ist ein Hg-Thermometer zur Bestimmung des Höchstwertes der Lufttemperatur innerhalb eines bestimmten Zeitraumes.

Abb. 8.9 Funktionsweise Maximumthermometer



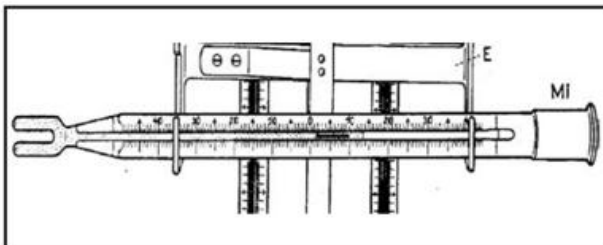
Die Maximumvorrichtung besteht aus einem im Gefäß eingeschmolzenen Glasstift, der in das Kapillarrohr hineinragt und dort eine Verengung hervorruft. Bei Temperaturzunahme wird das Quecksilber infolge Ausdehnung durch die Verengung hindurch gedrückt, kann aber bei Temperaturabnahme ohne zusätzliche Kraft nicht zurückfließen. Bei abnehmender Temperatur reißt deshalb der Hg-Faden am Glasstift ab, bleibt in der Kapillare liegen und zeigt mit seinem oberen Ende den jeweiligen Höchstwert der Temperatur an. Nach jeder Ablesung muss das in der Kapillare befindliche Quecksilber in das Hg-Gefäß zurück geschleudert werden.

Die Skala reicht von etwa -30°C ... $+50^{\circ}\text{C}$, der geprüfte Bereich liegt zwischen -25°C ... $+40^{\circ}\text{C}$. Der Abstand der Teilstriche auf der Skala entspricht $0,5\text{ K}$, die Zehntel müssen geschätzt werden. Das Maximumthermometer wird in der Hütte etwas schräg, mit dem Thermometergefäß etwas tiefer gelagert, damit sich der Hg-Faden nicht verschiebt.

Minimumthermometer

Das Minimumthermometer ist ein Alkoholthermometer, da mit Alkohol tiefere Temperaturen gemessen werden können. Es dient der Bestimmung des Tiefwertes der Lufttemperatur innerhalb eines bestimmten Zeitraumes. Die Gefäßoberfläche ist zur Reduzierung der Trägheit durch die gabelartige Gestalt vergrößert, weil Alkohol gegenüber Quecksilber eine geringere Wärmeleitfähigkeit aufweist (Tab. 8.7) und dies zu einer größeren Trägheit des Thermometers führt.

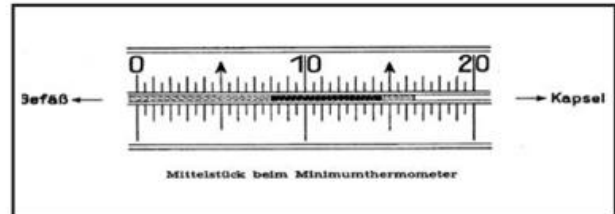
Abb. 8.10 Minimumthermometer



Das nach innen gewölbte Ende des farblosen und deshalb schwer zu erkennende Ende des Alkoholfadens zeigt die aktuelle Lufttemperatur an. Innerhalb des Alkoholfadens in der Kapillare liegt eine Schleppmarke aus gefärbtem Glas, deren Enden verdickt sind.

Bei abnehmender Temperatur nimmt der Alkoholmeniskus die Schleppmarke aufgrund seiner Oberflächenspannung mit, während bei steigender Temperatur der Alkohol die Schleppmarke umströmen kann und diese sich deshalb nicht fortbewegt, so dass am rechten Ende der Schleppmarke die aufgetretene niedrigste Temperatur des betreffenden Zeitraumes abgelesen werden kann.

Abb. 8.11 Ablesung am Minimumthermometer



Die Skala erstreckt sich von etwa -40°C ... $+40^{\circ}\text{C}$, der geprüfte Bereich liegt zwischen -30°C ... $+30^{\circ}\text{C}$. Der Abstand der Teilstriche auf der Skala entspricht $0,5\text{ K}$, die Zehntel müssen geschätzt werden.

Lufttemperatur 5 cm über dem Erdboden

An Beobachtungsstationen in einer Lage über 650 m NHN wird für den Einsatz einer Lufttemperatursonde LTS2000 eine variable Höhenverstellung verwendet, um bei einer Schneedecke das Thermometer über die Schneedecke anzuheben.

Abb. 8.12 Sensorhalter Lufttemperatur 5 cm (Eigenbrodt)



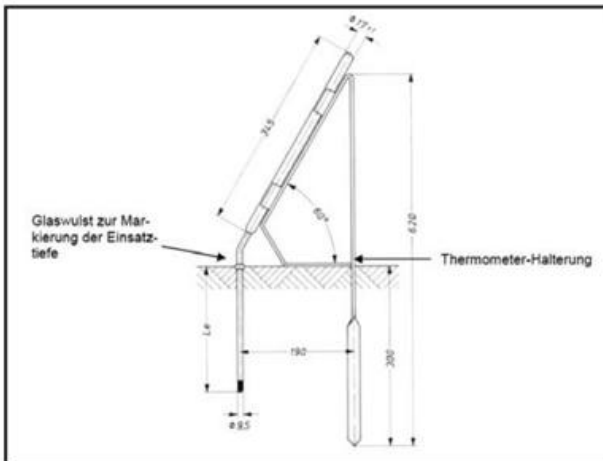
Erdbodenthermometer

Die Erdbodentemperaturen werden durch Messungen im Erdboden festgestellt, im DWD in den Messtiefen 5 cm , 10 cm , 20 cm , 50 cm und 100 cm . Dazu werden

- Stockthermometer für die Messtiefen 5 cm , 10 cm und 20 cm nach DIN 58655 und
- Erdbodentiefenthermometer für die Messtiefen 50 cm und 100 cm nach DIN 58664 eingesetzt.

Erdbodenthermometer in 5 cm, 10 cm und 20 cm Tiefe
Stockthermometer sind mit Quecksilber als Messflüssigkeit gefüllt. Der „Stock“ ist das Verlängerungsstück zwischen Gefäß und Kapillare dessen Länge der gewählten Messtiefe entspricht. An seinem oberen Ende befindet sich ein einfa-

Abb. 8.13 Stockthermometer mit Halterung



cher oder ein Doppelwulst (ältere Bauart), damit die Installation in der richtigen Tiefe kontrolliert werden kann. Die Skala ist zur besseren Ablesung in Richtung Nord abgewinkelt, das Thermometerende weist nach Süden. Die Thermometer werden in einer speziellen Halterung gelagert. Durch die Unterschiede der möglichen Temperaturen in den verschiedenen Tiefen haben die Erdbodenthermometer verschiedene Messbereiche mit Teilstrichen auf der Skala im Abstand von $0,2\text{ K}$. /ABB. 8.13

Erdbodentiefenthermometer für Messtiefen 50 cm und 100 cm

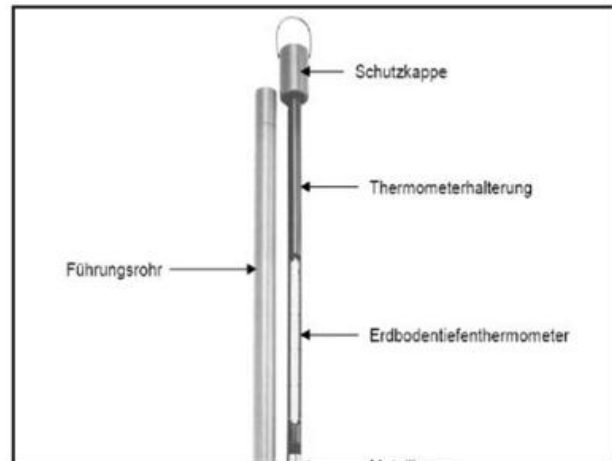
Tiefen- oder Stabthermometer sind ebenfalls mit Quecksilber gefüllt und in einen Kunststoffstab eingebaut, der unten abgeschlossen ist. Dieser Stab wird zur Ablesung mit einem Handgriff aus einem Hüllrohr herausgezogen. Dabei ist darauf zu achten, ob die Metallkapsel, die das Thermometergefäß umschließt, Grundwasserberührung hatte. In diesem Fall darf die Messung in dieser Tiefe nicht durchgeführt werden.

Da die Differenz zwischen Luft- und Bodentemperatur oft groß ist, muss das Thermometer sehr träge sein, damit sich die Anzeige bis zur Ablesung nicht sofort ändert. Dies wird durch eine große Quecksilbermenge in einem ungewöhnlich großen Thermometergefäß erreicht. Ein Polster um das Gefäß (gegen Beschädigung) bringt weitere Isolierung.

Der Messbereich beträgt $-10\text{ °C} \dots +30\text{ °C}$, die Teilung der Skala $0,2\text{ K}$. Bei der Ablesung der Erdbodenthermometer ist auf die Gefahr des Parallaxenfehlers zu achten, der gerade bei der Ablesung der sog. Stockthermometer groß sein kann. Führt man den Stab in das Hüllrohr zurück, ist der Handgriff erst loszulassen, wenn die Metallkapsel Bodenberührung hat, da sonst Bruchgefahr beim Thermometer droht.

An Klimareferenz- und Bergstationen des DWD bleibt es beim Einsatz dieser mit Quecksilber gefüllten Erdbodentiefenthermometer. An der Klimareferenzstation Potsdam (siehe 19.3) werden Erdbodentemperaturen bis 12 m Tiefe, dabei allerdings mit Pt 100 (siehe 8.3.2.1) gemessen. /ABB. 8.14

Abb. 8.14 Erdbodentiefenthermometer



Pflege und Kontrolle der Funktionstüchtigkeit von Thermometer

Die Thermometer müssen stets sauber gehalten werden, damit eine einwandfreie Ablesung möglich ist und der Energieaustausch der Thermometergefäße mit der umgebenden Luft ungehindert gewährleistet ist.

Da beim Minimumthermometer die Schleppmarke in der Kapillare leicht beweglich sein muss, können durch Erschütterungen Fehlanzeigen hervorgerufen werden. Der Standfestigkeit der Thermometerhütte, dem sorgsamem Umgang beim Öffnen und Schließen der Hüttentüren sowie dem ruhigen Lauf des Aspirators ist deshalb besondere Beachtung zu schenken.

Aufgrund seiner Bauart und Funktionsweise ist das Minimumthermometer gegenüber den Quecksilberthermometern etwas empfindlicher.

Nach längerem Gebrauch kann sich die als thermometrische Flüssigkeit verwendete Alkoholmischung zersetzen. Dies zeigt sich durch eine Verfärbung der Flüssigkeit und durch die Ablagerung ausgefallener Bestandteile in der Kapillare. In beiden Fällen ist das Thermometer auszutauschen.

Ein Ersatz des Thermometers ist auch in den Fällen erforderlich, in denen die Schleppmarke an dem in der Nähe des Gefäßes liegenden Knie der Kapillare klemmt, bei der Einstellung nicht gleichmäßig bis zum Flüssigkeitsmeniskus herabsinkt oder die Schleppmarke aus der Flüssigkeit austritt und nicht wieder zurückführbar ist.

Siedethermometer

Eine besondere Art von Thermometer sind Siedethermometer. Sie sind mit einem relativ großen Quecksilbergefäß ausgestattet, um für eine größere Genauigkeit eine größere Menge Quecksilber aufnehmen zu können. Da gleichzeitig die Oberfläche zugenommen hat, bleibt auch die Trägheit in annehmbaren Grenzen. Da die Änderung der Siedetemperatur mit der Änderung des Luftdrucks sehr gering ist (siehe 7.2.4), muss die Skala in möglichst kleine Einheiten unterteilt sein. Meist ist sie in Einheiten des Luftdrucks angegeben, um auf diese Weise die Umrechnung zu ersparen und eine mögliche Fehlerquelle auszuschalten.

8.3.1.2 Bimetall-Thermometer, Thermograph

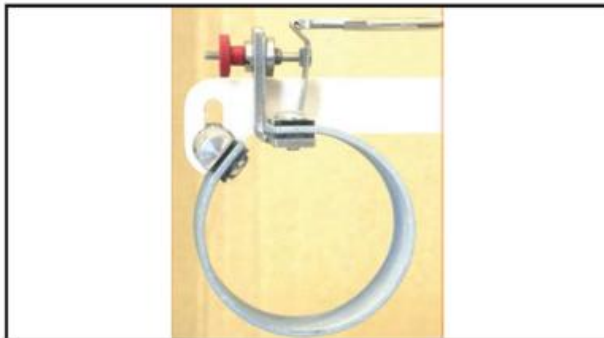
Bimetallthermometer

Bimetalle bestehen aus zwei miteinander verbundenen Metallstreifen mit unterschiedlichem Ausdehnungskoeffizienten hinsichtlich der Temperatur. Das Messelement ist so angeordnet, dass es von der Außenluft ungehindert umspült werden kann. Solche Arten von Thermometer sind in den Wetterdiensten nur noch in wenigen Geräten zu finden.

Thermograph

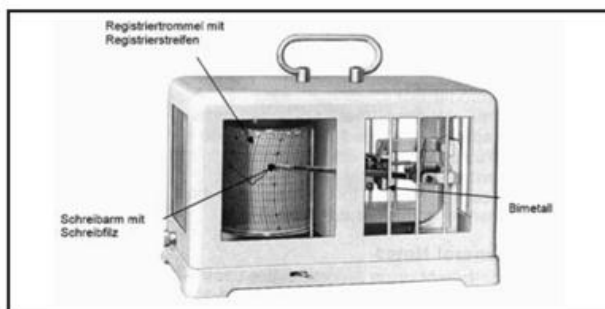
Ein Thermograph ist ein Registriergerät zur laufenden Aufzeichnung der Lufttemperatur für einen bestimmte Zeit. Der Messfühler ist ein ringförmiges Bimetall aus zwei durch Pressschweißung verbundenen Metallstreifen mit unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten. Die Wirkungsweise von Bimetallthermometern wurde bei den Messprinzipien erläutert. Die Formänderung wird mechanisch übertragen und kommt deshalb bei mechanischen Registriergeräten zum Einsatz.

Abb. 8.15 Bimetallfühler im Thermograph



Bei diesen Registriergeräten ist ein Ende des Bimetallfühlers mechanisch fest mit dem Gerät verbunden, am anderen Ende des Fühlers wird dessen temperaturbedingte Bewegung abgegriffen und über ein Hebelsystem auf einen Schreibarm mechanisch übertragen. Die Schreibfeder liegt durch das Eigengewicht des Schreibarms mit stets gleichem Druck am Registrierstreifen. Auf diese Weise entsteht auf einem Registrierstreifen, der auf einer von einem Laufwerk angetriebenen Trommel aufgespannt ist, eine kontinuierliche Aufzeichnung der Lufttemperatur. Der Schreibarm kann durch einen Hebel von außen abgehoben werden.

Abb. 8.16 Thermograph (Lambrecht)



Die Registrierung der Temperatur erfolgt mit einem Uhrwerk vorrangig im Wochenumlauf. Der Registrierstreifen hat eine Skalierung in °C und der Zeit in einem 2-Stundenintervall. Bei Registriergeräten, die im Tagesumlauf betrieben werden, ist die Zeitskalierung im 10 min-Intervall aufgedruckt. Der Messbereich des Thermographen liegt zwischen -35°C bis $+45^{\circ}\text{C}$, die Messunsicherheit beträgt $\pm 0,2\text{ K}$ bis $0,3\text{ K}$.

Im DWD wird vorwiegend ein Thermohygrograph (siehe 9.3.2), eine Kombination aus Thermograph und Hygrograph eingesetzt.

Pflege und Kontrolle der Funktionstüchtigkeit

Es ist zweckmäßig, die Angaben von Bimetall-Thermographen von Zeit zu Zeit mit denen eines genauen Thermometers zu vergleichen. Abweichungen werden durch Verdrehen der am Bimetall befindlichen roten Rändelschraube (Standkorrektur) beseitigt. Alle übrigen Verstellmöglichkeiten des Hebelsystems (z. B. die Amplitudenjustierung), die nach der Kalibrierung mit Lack (meist rot) gesichert werden, dürfen nicht verändert werden.

8.3.2 Elektrische Thermometer

8.3.2.1 Widerstandsthermometer

Als Messfühler wird am häufigsten Platin verwendet. Es gibt Platinmesswiderstände in verschiedenen Ausführungen:

- als frei gespannter Platindraht von $0,015\text{ mm}$ bis $0,03\text{ mm}$ Durchmesser, der nahezu strahlungsfrei Temperaturen liefert, aber für Routinemessungen wegen ihrer Empfindlichkeit wenig geeignet ist,
- ein Platindraht, der um einen dünnen Glimmerstreifen gewickelt ist; diese Anordnung ist betriebssicherer als o. a. beschriebene Methode
- in Glas oder Keramik eingeschmolzener Platindraht, dessen Länge und Dicke verschieden sind. Wegen der schlechten Wärmeleitfähigkeit von Glas ist die Trägheit dieser Fühler größer als bei den o. a. Methoden, sie liegt fast im Bereich von Quecksilberthermometern. Zudem ist das Messelement nicht mehr ganz strahlungsfrei.

Pt 100

Widerstandsthermometer vom Typ Pt 100 der Fa. Th. Friedrichs und der Fa. Ketterer werden im DWD zur Messung der Lufttemperatur (LTS2000) in 2 m Höhe, als Erdbodenthermometer (ETS2000) und der Temperatur in 5 cm über Grund und der Wassertemperatur verwendet. Da der Widerstand dieser Platindraht-Thermometer bei 0°C $100\ \Omega$ beträgt, lautet die Kurzbezeichnung Pt 100.

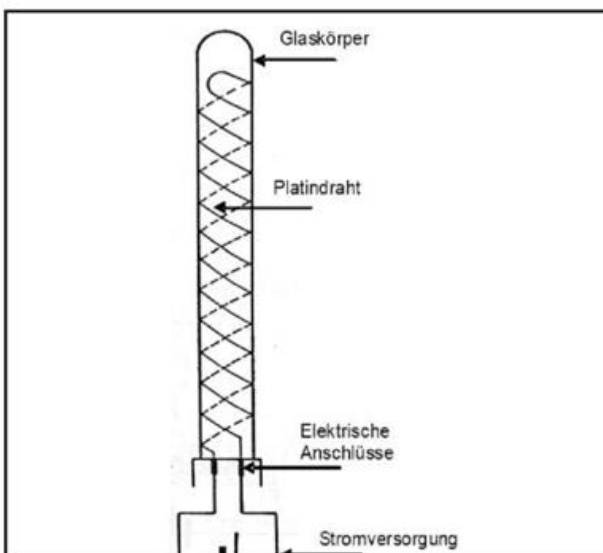
Abb. 8.17 Widerstandsthermometer Pt 100 ohne Gehäuse



Der elektrische Widerstand eines Pt 100 wird über eine Vierleiterschaltung (siehe 8.2.2), je zwei für Stromversorgung und Spannungsabgriff ermittelt. Kurz vor jedem Messzeitpunkt wird ein kontinuierlicher Messstrom oder ein Stromimpuls vorgegebener Dauer (*ms*) von der Datenerfassungsanlage durch die Leitung geschickt. In jedem Fall darf der Messstrom des Sensors den maximalen Schwellenwert von $1,5\text{ mA}$ nicht überschreiten, um eine Heizwirkung zu vermeiden.

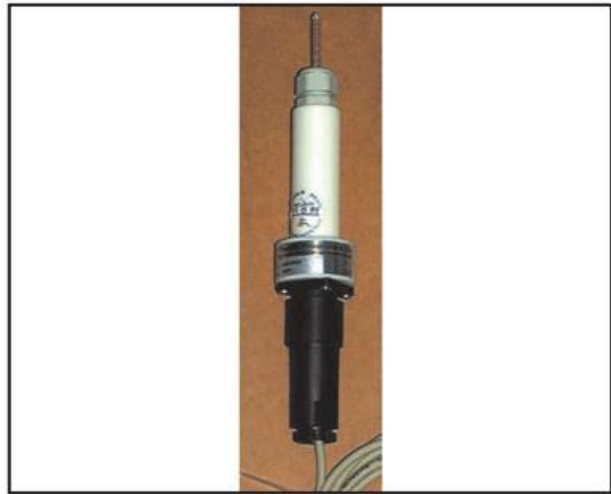
Der Platindraht ist bifilar (d. h. auf- und absteigende Wicklungen, die sich nicht berühren) auf einen Hartglasstab gewickelt. Die Wicklungen werden anschließend mit einer dünnen Glasschicht überschmolzen.

Abb. 8.18 Widerstandsthermometer Pt 100 (schematisch)



Im DWD werden drahtgewickelte Pt 100-Widerstände als Messelemente eingesetzt. Die fertig konfektionierten Fühler werden von der Fa. Ketterer bezogen.

Abb. 8.19 Messelement Pt 100 (Ketterer)



Pflege und Kontrolle der Funktionstüchtigkeit

Die Reinigung der Sensoren, die in der LAM630 (siehe 19.4.2) gedoppelt installiert sind, wird von den zuständigen SL-Einheiten des DWD vorgenommen. Speziell eingewiesenes Personal an den Wetterwarten kann die eventuell verschmutzten Sensoren aus der LAM630 vorsichtig entnehmen und mit einem weichen Tuch reinigen. Beim Wiedereinbau muss darauf geachtet werden, dass die Sensoren die gleiche Position haben wie vor der Entnahme aus der LAM630.

Stockthermometer für Messtiefen 5 cm, 10 cm, 20 cm, 50 cm und 100 cm

Zur Messung der Erdbodentemperaturen an automatischen Wetterstationen und sonstigen Stationen (außer an Klimareferenz- und Bergstationen) werden die Routinemessungen der Temperatur zum größten Teil mittels Pt 100-Widerstandsthermometern durchgeführt. Diese elektrischen Thermometer sind mit einer Edelstahlummantelung gekapselt und werden in den Messtiefen 5 cm, 10 cm, 20 cm, 50 cm und 100 cm im Bodenmessfeld mittels Tiefenschablone eingesetzt. Die Schablone der Bodenthermometer sollte mit der Erdbodenoberfläche abschließen.

Pflege und Kontrolle der Funktionstüchtigkeit

Die Überprüfung der Messwerte bei Verdacht von Abweichungen kann mit den an der Wetterwarte noch vorhandenen konventionellen Messmitteln erfolgen (Psychrometer nach Assmann, Hüttenpsychrometer oder Schleuderpsychrometer). Sollten zur Messung der Erdbodentemperaturen noch Quecksilberthermometer vorhanden sein, können diese auch mit einbezogen werden, falls in den verschiedenen Messtiefen zweifelhafte Temperaturwerte auftreten.

Wassertemperaturen

Für die Messung der Wassertemperatur werden gekapselte, wasserdichte Pt 100 verwendet. Zur Messung bis höchstens 1 m Tiefe wird das Schöpfthermometer an einem Seil in die entsprechende Tiefe gebracht und einige Minuten dort be-

lassen. Anschließend wird das Messgerät aus dem Wasser gezogen und zügig abgelesen. Der Messbereich liegt zwischen $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Abb. 8.20 Marinepütz (Friedrichs)



Die fest installierten Messfühler befinden sich bei Schiffen meist am Einlasskanal für das Kühlwasser.

Stationen im Küstenbereich oder an Binnenseen messen die Wassertemperatur in 50 cm Tiefe. Bei einer Veränderung des Wasserstandes muss auch die Einsatztiefe angepasst werden. Auf die Einhaltung der geforderten Messtiefe ist zu achten. Die Wassertemperatur wird von Seestationen, von beauftragten Küsten- und Landstationen (Nord- und Ostsee sowie an Binnengewässern), an Wetterstationen vom Typ I und II und auf Schiffen vom Vorschiff aus auf der Strom abgewandten Seite (z. B. FS METEOR) gemessen.

8.3.2.2 Halbleiter-Thermometer

Der Fortschritt in der Elektronik hat dazu geführt, dass die Widerstandsthermometermessung, z. T. durch Einsatz moderner Schaltkreise (Abb. 8.2) gegenüber der früher verwendeten Wheatstone-Brücke die Halbleiter (Thermistoren) als Messelemente weitgehend verdrängt hat.

Die äußere Form richtet sich nach dem Verwendungszweck. Es sind entweder dünne Stäbchen verschiedener Stärke und Länge, die als Stabthermistoren bezeichnet werden, oder in Form von kleinen Kügelchen als Kugel- oder Perltthermistoren mit einem Durchmesser von etwa 1 mm.

Vorteil der NTC-Widerstände ist, dass sie nahezu trägheitslos und verstrahlungsfrei sind, eine hohe Empfindlichkeit besitzen und extrem klein sind. Sie werden besonders da verwendet, wo Flüssigkeits- und Widerstandsthermometer nicht gebraucht werden können, u. a. für mikrometeorologische Untersuchungen, zur Bestimmung von Oberflächentemperaturen und in Strahlungsmessgeräten (Pyrheliometer). Sie werden seit vielen Jahren auch in Radiosonden eingesetzt.

8.3.2.3 Thermoelemente/Thermosäulen

Den Aufbau eines Thermoelements zeigt Abb. 8.4. Ein Draht wird an beiden Enden mit einem anderen Draht aus einem anderen Material durch Anlöten verbunden. Während die

eine aktive Lötstelle als Messfühler fungiert, ist die andere passive Lötstelle zum Vergleich.

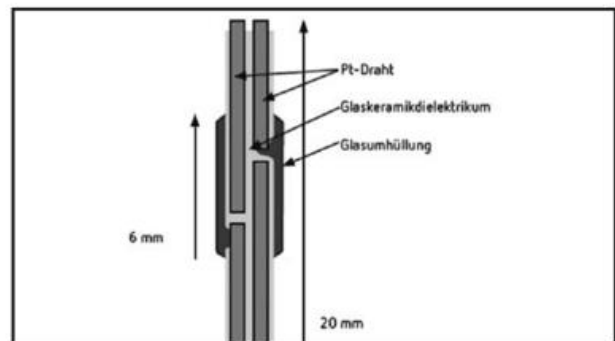
Verwendung finden Thermoelemente dort, wo keine Hilfsstromquelle vorhanden ist, bzw. wo es um die Messung hoher Temperaturen (im Vergleich zur Zimmertemperatur) geht. Thermoelemente oder Thermosäulen werden u. a. in Strahlungsmessgeräten (Pyrheliometer, Pyranometer, Strahlungsbilanzmesser, Albedometer) eingesetzt, wo es auf die Erfassung rascher Temperaturschwankungen ankommt.

Vor- und Nachteile wurden bereits bei der Erläuterung des Messprinzips diskutiert.

8.3.3 Kapazitive Temperatursensoren

Bei den sogenannten Thermocap[®]-Messfühlern der Fa. Vaisala kommt ein Glaskeramik-Dielektrikum zum Einsatz. Der Messbereich liegt zwischen $-52\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$, die Genauigkeit bei $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ beträgt $\pm 0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Abb. 8.21 Kapazitiver Sensor (Vaisala)



Eigenschaften des Thermocap[®]-Fühlers sind

- kurze Reaktionszeit
- Minimierung der Strahlungseffekte sowohl für kurz- als auch langwellige Strahlung

Das kapazitive Messprinzip wird auch in Radiosonden eingesetzt.

8.3.4 Strahlungsthermometer

Die unter den Messprinzipien bereits erwähnten Strahlungsthermometer haben in der meteorologischen Routinepraxis wenig Bedeutung, daher soll hier nur kurz darauf eingegangen werden. Ein Beispiel für den Routineeinsatz eines Strahlungsthermometers ist beim Bayerischen Lawinenwarndienst zu finden. Es ist ein berührungsloser Sensor der Fa. Sommer, Voralberg zur Erfassung der Schnee-Oberflächentemperatur mittels Infrarot-Thermoelement.

Ein Strahlungsthermometer (Infrarotthermometer) besteht im Wesentlichen aus einem Filter, der nur in dem unter dem Messprinzip erwähnten Spektralbereich ($8\text{ }\mu\text{m}$ bis $14\text{ }\mu\text{m}$) durchlässig ist und einem Bolometer, d. h. einem durch die Strahlung erwärmten, sehr empfindlichen Thermometer, meist elektrischem Messfühler. Da jedes Material andere Emissionseigenschaften (ϵ -Werte) hat, ist eine Materialkorrektur zu berücksichtigen.

Ein externer Messumformer dient zur Signalwandlung. Er ist in ein Strahlungsschild eingebaut.

Abb. 8.22 Oberflächen-Temperatursensor IR-T/C.5 (Sommer)



Tab. 8.8 Oberflächen-Temperatursensor IR-T/C.5 (Sommer)

Messelement/-prinzip	IR-Thermoelement
Spektralbereich	6,5 bis 14 μm
Messbereich	-18 bis +30 $^{\circ}\text{C}$
Nichtlinearität	$\pm 2\%$
Messkegel	11 $^{\circ}$
Ausgang	0 mA bis 20 mA
Stromversorgung	12 V DC
Stromaufnahme	max. 5 mA
Abmessungen	\varnothing 120 mm, Länge 270 mm

Ein weiteres Beispiel für den Einsatz einer IR-Thermografie ist im Bereich der agrarmeteorologischen Messungen (siehe 15.3.9) zu finden.

8.3.5 Normal-Platinwiderstandsthermometer

Zur Kalibrierung von Widerstandsthermometern (Pt 100) werden bei SLS und SLSN des DWD Normal-Platinwiderstandsthermometer verwendet. Unter der Kalibrierung eines Berührungsthermometers versteht man in diesem Sinne die messtechnische Bestimmung des Zusammenhanges zwischen der Temperatur des Sensors und der Ausgangsgröße des Thermometers. Messunsicherheiten aufgrund mangelnder thermischer Ankopplung des Thermometers sind nicht in der Messunsicherheit der Kalibrierung des Thermometers enthalten.

Die Thermometer (**SPRT** – Standard-Platinum Resistance Thermometer) bestehen aus spektral reinem Platindraht, der frei von mechanischen Spannungen gewickelt ist. Elektrisch zeichnen sich diese Thermometer durch einen besonders großen Temperaturkoeffizient aus. SPRTs ermöglichen prinzipiell die genauesten Temperaturmessungen, da durch ihre Kennlinie im Temperaturbereich von 13,8 K bis 962 $^{\circ}\text{C}$ die internationale Temperaturskala ITS-90 festgelegt ist. Die Kennlinie ist dadurch gut reproduzierbar, da reines Metall ohne alle Legierungsbestandteile verwendet wird.

Zur Messung mit dem Kalibriergegenstand und/oder dem Normalthermometer müssen geeignete elektrische Messmittel eingesetzt werden (Ohmmeter, Widerstandsmessbrücke, Normalwiderstände), die auch rückführbar kalibriert sein müssen.

8.4 Messunsicherheiten und Fehlerquellen

8.4.1 Allgemeines

Die Messung der „wahren“ Lufttemperatur gehört zu den schwierigen messtechnischen Aufgaben in der Meteorologie. Die Problematik wird dabei häufig erheblich unterschätzt, da die meisten verwendeten Messelemente wie Bolometer wirken, d.h. sie erwärmen sich, wenn sie der Strahlung ausgesetzt werden und sind dann eher ein Strahlungsmessgerät als ein Temperaturmessgerät [6].

Daneben erfordern Berührungsthermometer einen engen Wärmekontakt zum Messobjekt, so dass die Moleküle beider Systeme eine ausreichend lange Zeit ihre kinetische Energie austauschen können. Ist dieser unzureichend, so kommt es wegen zu großer Wärmeableitung durch das Thermometer zu Messfehlern.

8.4.2 Trägheitsfehler von Thermometern

Thermometer zeigen immer ihre Eigentemperatur an. Erst nach einer gewissen Zeit stimmt diese mit der Umgebung überein, d.h. Thermometer besitzen eine gewisse Trägheit, die bei der Temperaturmessung eine wichtige Rolle spielt. Einerseits sollte ein Thermometer, welches in einer Wetterhütte untergebracht ist, eine gewisse Trägheit aufweisen, die dafür sorgt, dass man die Hütte öffnen und das Thermometer ablesen kann, ohne dass sich durch Annäherung der Person und kurze Einstrahlung in die Hütte der angezeigte Wert verändert. Andererseits darf die Trägheit nicht zu groß sein, um ein zu langes Nachhinken der Temperatur zu vermeiden.

Das Wärmegleichgewicht (thermische Gleichgewicht) zwischen Messfühler und umgebender Luft ist vorhanden, wenn völliger Wärmeaustausch durch Wärmeleitung stattgefunden hat. Das geht in einem endlichen Zeitintervall vor sich, die Temperatur hinkt der wahren Umgebungstemperatur stets nach. Die dazu benötigte Zeit wird durch die Trägheit des Thermometers ausgedrückt.

Ausgehend von der Wärmehaushaltsgleichung

$$Q_s + L + V + B = 0 \quad (8.22)$$

mit Q_s = Strahlungsbilanz ($\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1}$) Summe der Strahlungszufuhren abzüglich der reflektierenden Einflüsse
 L = Strom fühlbarer Wärme zur Messfühleroberfläche, der dem Temperaturunterschied (Lufttemperatur ϑ_l und Eigentemperatur des Messfühlers ϑ) proportional ist

$$L = -\alpha_L (\vartheta - \vartheta_l) (\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}) \quad (8.23)$$

mit B = Bodenwärmestrom (hier: Körperwärmestrom der aus dem Körper an seine Oberfläche fließende Strom)

V = Strom latenter Wärme

α_L = Proportionalitätsfaktor (=Wärmeübergangszahl)

worin

$$\alpha_L = 35 \sqrt{\frac{v}{d}} \quad (J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot K^{-1}) \quad (8.24)$$

mit d = Durchmesser (cm)
 v = Luftgeschwindigkeit ($m \cdot s^{-1}$)

Der Proportionalitätsfaktor α_L ($J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot K^{-1}$) hängt von der Form und der Art der Anströmung, vor allem von der Windgeschwindigkeit (Ventilation) ab.

Die Werte in Tabelle 8.9 stellen Anhaltswerte der Wärmeübergangszahlen in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit dar.

Tab. 8.9 Wärmeübergangszahl in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit

v ($m \cdot s^{-1}$)	0,1	0,2	0,5	1,0	2,0	5,0	10,0
α_L ($J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot K^{-1}$)	10	15	20	30	50	70	100

Alle zur Oberfläche fließenden Ströme werden positiv gezählt und auf die Flächeneinheit bezogen, d. h. wenn $\dot{\theta}_L > \dot{\theta}$ ist $L > 0$. Tritt keine andere Form des Wärmeaustausches, z. B. durch Strahlung mit der Umgebung des Messfühlers auf, erhöht ein positiver Strom fühlbarer Wärme (L) die Temperatur des Thermometers $\dot{\theta}$.

Hat ein Messfühler eine gute Wärmeleitfähigkeit und treten keine Temperaturinhomogenitäten im Inneren auf, dann ist der Wärmeverlust durch die Oberfläche der Wärmestrom B gleich

$$B = - \frac{cM}{F} \cdot \frac{d\dot{\theta}}{dt} \quad (J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}) \quad (8.25)$$

mit c = spezifische Wärmekapazität
 F = Oberfläche des Messfühlers

Da B und L für die Wärmebilanz eines unstrahlenden, trockenen Messfühlers entgegengerichtet sind, ist dann die Wärmehaushaltsgleichung für den Messfühler

$$L + B = 0$$

nach (8.22) und (8.23) ist $-\alpha_L (\dot{\theta} - \dot{\theta}_L) - \frac{cM}{F} \frac{d\dot{\theta}}{dt} = 0$ (8.26)

$$\text{oder } \frac{d\dot{\theta}}{dt} = - \frac{1}{\tau} (\dot{\theta} - \dot{\theta}_L)$$

$$\text{mit } \tau = \frac{cM}{\alpha_L F}$$

Hieraus ergibt sich die zeitliche Änderung der Temperatur $\dot{\theta}$ des Thermometers in einem Medium der Temperatur $\dot{\theta}_L$.

$$\dot{\theta} = \dot{\theta}_L - \frac{c}{\alpha_L \cdot F} \frac{d\dot{\theta}}{dt} = \dot{\theta}_L - \lambda \frac{d\dot{\theta}}{dt} \quad (8.27)$$

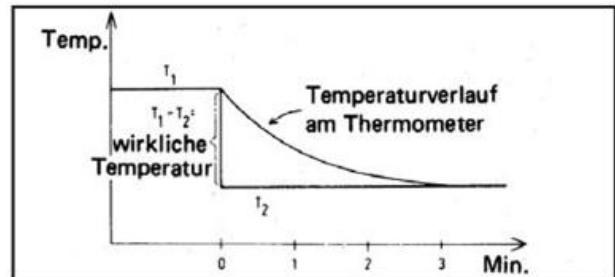
Ist $\dot{\theta}_L = \text{const}$, so erhält man durch Integration der Gleichung folgende Lösung:

$$\dot{\theta} = \dot{\theta}_L - (\dot{\theta}_0 - \dot{\theta}_L) e^{-\frac{t}{\lambda}}$$

mit $\dot{\theta}_0$ = Temperatur des Messfühlers zur Zeit $t = 0$

Nur für $t \rightarrow \infty$ wird $\dot{\theta} = \dot{\theta}_L$ d. h. die Temperatur des Messfühlers nähert sich lediglich asymptotisch der Lufttemperatur (Abb. 8.23), sie wird – streng genommen – nie 1.

Abb. 8.23 Temperaturanzeige am Thermometer



Wird nun $\tau = \frac{c}{\alpha_L F}$ eingesetzt, ergibt es das sog. NEWTONsche Abkühlungsgesetz

$$\frac{d\dot{\theta}}{dt} = - \frac{1}{\tau} (\dot{\theta} - \dot{\theta}_L) \quad (8.28)$$

Dabei ist die Abkühlungsgeschwindigkeit mit der Zeit $\frac{d\dot{\theta}}{dt}$ direkt proportional zur Temperaturdifferenz zwischen Körpertemperatur und Umgebungstemperatur. Ist der Körper wärmer als seine Umgebung, nähert sich seine Anfangstemperatur, vorwiegend durch Konvektion und Strahlung, entsprechend einer abklingenden e-Funktion der Umgebungstemperatur, und zwar umso schneller, je größer die Temperaturdifferenz ist. Der Messkörper(-fühler) passt sich also mit einer gewissen Trägheit der Lufttemperatur an. Wegen der Temperaturabnahme ist der Term negativ.

Die Trägheit verursacht bei Temperaturänderungen eine Amplitudendämpfung und Phasenverschiebung. Bei einem rechtwinkligen Temperatursprung dauert es Sekunden, bis das Thermometer sich dem tatsächlichen Wert nähert.

Die Trägheit eines Messfühlers wird durch die **Trägheitskonstante** α angegeben. Das ist die Zeit, nach welcher die Temperaturdifferenz zwischen Thermometer und Luft auf das $1/e$ -fache $(\dot{\theta} - \dot{\theta}_L) = 0,37 (\dot{\theta}_0 - \dot{\theta}_L)$ der anfänglichen Temperaturdifferenz abgesunken ist oder anders ausgedrückt: bei einer plötzlichen Temperaturänderung und einer $v = 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ sollen 63% des Wertes innerhalb von 30 s bis 60 s angezeigt werden.

α ist eine Funktion von Wärmeleitfähigkeit, Ausdehnungskoeffizienten, Zähigkeit und ist

- proportional der spez. Wärmekapazität (c) der thermometrischen Substanz
- umgekehrt proportional zur Oberfläche (F) und Ventilation des Messfühlers (v) und
- proportional zur Größe des Messfühlers (d)

Letzteres folgt aus der Tatsache, dass die Wärmekapazität c proportional dem Volumen ist, d. h. bei Vergrößerung des Messfühlers wächst c stärker als F .

Beispiele für α für verschiedenen Thermometer bei einer Ventilation $v = 2 \text{ m s}^{-1}$

Bimetall $\alpha = 43 \text{ s}$ (stark abhängig auch von der Dicke des Bimetalls)

Hg-Thermometer $\alpha = 58 \text{ s}$

Alkohol-Thermometer $\alpha = 72 \text{ s}$

In der Messtechnik sind häufig noch weitere Begriffe zu finden, wie

- **Halbwertzeit** $\vartheta - \vartheta_L = 0,5 (\vartheta_0 - \vartheta_L)$ für $t = 0,7\alpha$ die besagt, wann eine ursprüngliche Temperaturdifferenz auf die Hälfte abgenommen hat
- **5%-Zeit** $\vartheta - \vartheta_L = 0,05 (\vartheta_0 - \vartheta_L)$ für $t = 3\alpha$ nach einer Zeit von 3α verringert sich die ursprüngliche Temperaturdifferenz $\vartheta_0 - \vartheta_L$ auf 5%.

8.4.3 Strahlungsfehler von Thermometern

Ein Messkörper steht nicht nur unter dem Einfluss von Wärmeströmen aus der Luft, sondern auch Strahlungsprozessen von Sonne, Himmel und anderen reflektierenden Körpern (z. B. Häuser) der Umgebung, die meist eine andere Temperatur haben spielen eine Rolle. Der Messkörper, z. B. ein Thermometer absorbiert kurzwellige Strahlung

- die zu einer Erwärmung des Thermometerglases und
- Erwärmung der Flüssigkeit bzw. des Metalls

führt und emittiert bzw. absorbiert langwellige Strahlung. Nachteilig dabei ist, dass die meisten Thermometer empfindlich auf Strahlung und nur träge auf Wärmeleitung reagieren, da der Energieaustausch über die Strahlung nicht nur mit der Luft, sondern mit den o.a. Faktoren hinzukommt.

Speziell bei der Messung der Lufttemperatur erfolgt der Wärmeaustausch über molekulare Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung. Ein fundamentales Problem meteorologischer Temperaturmessung ist es also, den entstehenden Strahlungsfehler durch geeignete Schutzvorrichtungen so gut wie möglich zu verringern. So gut wie möglich heißt, dass ein vollkommen ausgeschalteter Strahlungseinfluss theoretisch nie, praktisch jedoch für Zwecke der Meteorologie mit der erforderlichen Genauigkeit erfüllbar ist.

Unter dem Begriff Strahlungsfehler fällt auch die Emission von Wärmestrahlung, bei der dem Thermometer Energie entzogen wird, wodurch sich die Temperatur des Thermometers unter die der Luft abkühlen kann und damit eine geringere als die tatsächliche Temperatur gemessen wird. Dieser Fall tritt in kalten Nächten ein, wenn die atmosphärische Gegenstrahlung geringer ist als die Wärmestrahlung die das Thermometer emittiert, wenn es die gleiche Temperatur wie die umgebende Luft hat. Das Thermometer kühlt sich so weit ab, bis die von der Luft aufgenommene Wärme gleich diesem Strahlungsverlust ist.

Die Möglichkeit eines akzeptablen Kompromisses zwischen der Unterdrückung nicht interessierender und der Erfassung interessierender Einflüsse auf die Anzeige eines

Thermometers, wie sie beim Trägheitsfehler möglich ist, besteht beim Strahlungsfehler nicht.

Ausgehend von der Wärmehaushaltsgleichung (8.22) gilt unter Voraussetzung eines

- trockenen Messfühlers (bei $v = 0$) und eines
- stationären Gleichgewichts $B = 0 = \frac{d\vartheta}{dt}$ für den allgemeinen Strahlungsfehler

$$\begin{aligned} Q_S + L &= 0 \\ Q_S - \alpha_L (\vartheta - \vartheta_L) &= 0 \\ Q_S + L &= Q_S - \alpha_L (\vartheta - \vartheta_L) \\ \vartheta - \vartheta_L &= \frac{Q_S}{\alpha_L} \\ \vartheta &= \vartheta_L + \frac{Q_S}{\alpha_L} \text{ bzw. } \Delta\vartheta = \frac{Q_S}{\alpha_L} \end{aligned} \quad (8.29)$$

Bei konstanten Strahlungsverhältnissen ändert sich ϑ nach einer gewissen Zeit nicht mehr, d. h. dann ist $\vartheta = \text{const}$. Die Temperatur ϑ eines bestrahlten Messfühlers weicht also umso mehr von ϑ_L ab, je größer die Strahlungsbilanz Q_S und je kleiner die Wärmeübergangszahl α_L ist. Die Abweichung von der Lufttemperatur ϑ_L durch den Strahlungsfehler hängt somit ab von der

- Strahlungsbilanz Q_S ($\text{J m}^{-2} \text{ s}^{-1}$),
- Wärmeübergangszahl für Strahlung $\alpha_L = 0,25$ ($\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$), d. h. von der Ventilation v (siehe Tab. 8.9)

Soll nun der Strahlungsfehler möglichst klein gehalten werden, muss Q_S (mittels Strahlungsschutz) klein und v möglichst groß genug sein, d. h. das Thermometer **muss** künstlich ventiliert werden. Beides wird mit Hilfe von modernen Thermometerhütten mehr oder weniger gut erreicht, bzw. es wird versucht, einen Kompromiss zwischen beidem zu finden. Folgende Möglichkeiten wurden und werden genutzt:

1) Unterbringung in luftdurchlässigen, gut reflektierenden Gehäusen (Wetterhütten)

- **Englische Hütte**, auch Stevensonhütte genannt (siehe 19.4.2), ist Schutz gegen direkte, nur kurzwellige Strahlung, jedoch nicht allseitig, natürliche Belüftung v/v_0 , nur zwischen 10 % bis 20 % bei Eis/Schnee,
- **Lamellenhütte** LAM630 (siehe 19.4.2).

Natürlich ventilierte Wetterhütten (wie die Englische Hütte) liefern nur ab Windgeschwindigkeiten von etwa 2 m s^{-1} bis 3 m s^{-1} akzeptable Messwerte innerhalb der zulässigen Messunsicherheit von $0,5 \text{ K}$. Daher werden zukünftig natürlich ventilierte Wetterhütten ohne Lüfterunterstützung in der Basisprüfung nicht mehr zuzulassen. Mit Lüfterunterstützung sind Wetterhütten geeignet, wenn der Lüfter im Bereich der Messfühler eine Strömungsgeschwindigkeit von mindestens 1 m s^{-1} erbringt. Solch ein Lüfter wirkt an windschwachen Strahlungstagen einem Wärmestau in der Wetterhütte entgegen und hält den Strahlungsfehler innerhalb der geforderten Grenzen. Bei diesem Wetterhütten-typ ist es wichtig, die Funktion des Lüfters regelmäßig zu überprüfen. Dank der zusätzlich vorhandenen natürlichen Ventilation ist ein Lüfterausfall nicht so kritisch wie im Fall

einer dauerventilierten Wetterhütte. In der Regel sind ab einer Windgeschwindigkeit von ca. 2 m s^{-1} die Messwerte auch ohne Lüfter akzeptabel. Damit dies erfüllt ist, muss der interne Ventilationsfaktor (= Quotient aus Strömungsgeschwindigkeit am Thermometer (in der Wetterhütte) und Windgeschwindigkeit (außerhalb der Wetterhütte) $> 0,5$ sein.

Die Temperatur in der englischen Hütte kann gegenüber der Temperatur der Außenluft, besonders bei windschwachen Lagen, durch passive Ventilation in den Mittagsstunden bis $+4 \text{ K}$ und in den Morgen- bzw. Abendstunden um $2,0 \text{ K}$ zu niedrig sein kann. Und sie besitzt durch ihre große Masse eine große Trägheit. Bei Niederschlag kann ein Psychrometereffekt auftreten. Wenn dann mit den falschen Temperaturwerten die relative Luftfeuchte berechnet wird, fällt sie mittags niedriger und nachts höher als die wahre Luftfeuchte aus. So ist nach Langelo (1947) bei 4 kn Wind eine Verzögerung von 5 min , bei noch geringerem Wind von bis zu 15 min und mehr zu erwarten.

Strahlungsschutzhütten von automatischen Stationen zeigen Unterschiede zur (Englischen) Hütte, bedingt durch unterschiedliche Bestrahlung und Belüftung, sowie des unterschiedlichen Ansprechverhaltens von Quecksilber-/Alkoholthermometern und dem elektrischen Messfühler Pt 100. Die Messwerte sind daher nicht ohne weiteres vergleichbar. Während die Temperaturmessung mit dem Messfühler Pt 100 (ebenfalls strahlungsgeschützt) nur eine äußerst kurze Reaktionszeit benötigt, ist bei den Hütten-thermometern aufgrund der thermischen Trägheit innerhalb der Hütte (Eigenklima), besonders bei windschwachen Lagen eine längere Reaktionszeit notwendig.

2) Ummantelung des Fühlers mit doppelwandigen blanken Metallzylindern, die künstlich ventiliert werden.

- Assmannsches Aspirationspsychrometer (siehe 9.3.1)

Abgesehen davon, dass beispielsweise die englische Hütte die Strahlung im langwelligen Bereich nur schlecht reflektiert (Überhitzung an klaren Tagen, Unterkühlung in klaren Nächten) entstehen durch Strahlungsschutzvorrichtungen neue Fehlerquellen, bedingt durch

- mangelhafte Ventilation (siehe oben) und
- Wärmekapazität der Hütte (Englischen Hütte 59000 J K^{-1}), die zu einem eigenen Hüttenklima führen.

Im Laufe der Jahre wurden neue Strahlungsschutzhütten, z. B. LAM630 entwickelt, die diese genannten Fehler zumindest in dieser Größenordnung nicht haben. Sie haben zu einem großen Teil die konventionellen Hütten ersetzt.

Zur näheren Beschreibung der Wetterhütten/Gehäuse siehe 19.4.2

8.4.4 Weitere Fehlerquellen bei Flüssigkeitsthermometern

Trotz der in den DIN- und Liefervorschriften festgelegten Fertigungstoleranzen, treten bei Flüssigkeitsthermometern Fehler auf. Zu jedem einzelnen Thermometer gehört deshalb ein Kalibrierschein, nach dessen Angaben die abgelesenen Werte korrigiert werden müssen. Weitere Fehlerquellen können sein:

- Veränderung des Kapillarvolumens durch Alterung (Nachwirkungserscheinungen des Glases); Thermometer mit einer Hg-Füllung haben spätestens nach 10 Jahren einen Messfehler durch Alterung des Glases. Nach dieser Zeit sollte das Thermometer neu geprüft werden.
- ungleiche Kalibrierung
 - reversibel: thermisches Nachhinken bei raschen $\Delta\theta/\Delta t$
 - irreversibel: ca. $+2 \text{ }^\circ\text{C}$ nach 10 bis 20 Jahren
- Fadenrisse können bei allen Flüssigkeitsthermometern auftreten. Hierbei entstehen Unterbrechungen des Flüssigkeitsfadens durch Erschütterungen oder Gaseinschlüsse im Thermometer. Dieser Fehler kann bei Quecksilberthermometern durch Schleuderbewegung oder durch langsame Erwärmung behoben werden. Durch die blasenförmige Erweiterung am Kapillarende, kann der Messbereich bei der Erwärmung um das Doppelte überschritten werden, ohne dass das Thermometer platzt
- Reibung an den Glaswänden (toter Gang)
- Herausragen des Fadens aus dem zu messenden Medium (z. B. Max-Thermometer)
- Überdestillation bei Alkoholthermometern, lässt sich durch vorsichtige Erwärmung meist beseitigen.

Für genaue Messungen ist zu beachten, dass viele Thermometer (auch Platin-Widerstandsthermometer) einen **Hystereseeffekt** zeigen, d. h. der Zusammenhang zwischen Temperatur und Widerstand ist abhängig von der Vorgeschichte des Thermometers. Dieser Effekt tritt z. B. auf, wenn Platin eng mit einem Keramikträger verbunden ist und durch die unterschiedliche Wärmeausdehnung mechanische Spannungen auftreten.

9. LUFTFEUCHTIGKEITSMESSUNG

9.1 Allgemeines

Mit Luftfeuchtigkeit, kurz Luftfeuchte, wird der Anteil des gasförmigen Wassers (Wasserdampf) am Gasgemisch der Erdatmosphäre bezeichnet. Durch Verdunstung wird der Erdoberfläche Wasser entzogen, das der Atmosphäre in Form von Wasserdampf zugeführt wird. Bei der Umwandlung von Wasserdampf in Wasser oder Eis wird die durch die Verdunstung zugeführte Energie in Form von Kondensations- bzw. Sublimationswärme (latenter Wärmestrom) in die Atmosphäre gebracht. Verdunstung und Wärmestrom werden auch durch den Wind beeinflusst.

Die Sublimation beschreibt den direkten Übergang von Wasser der festen Phase (Eis oder Schnee) direkt in die gasförmige Phase, ohne dass der dazwischen liegende Aggregatzustand (flüssig) angenommen wird. Im Allgemeinen wird der Begriff auch für den umgekehrten Vorgang verwendet, den Übergang von Wasserdampf direkt in die Eisphase (auch als Resublimation oder Eisverdunstung bezeichnet).

Beim Übergang von einem niedrigeren in einen höheren Aggregatzustand (z. B. Wasser in Wasserdampf) wird Energie benötigt, die bei der Umkehrung des Übergangs (Wasserdampf in Wasser) frei wird. So werden z. B. bei Verdunstung

von Wasser bei 0 °C etwa 2501 J kg⁻¹, bei der Verdunstung von Eis bei 0 °C etwa 2835 J kg⁻¹ verbraucht.

Die Wasserdampfmenge in der Atmosphäre hat großen Einfluss auf eine Reihe meteorologischer Prozesse und ist eine wichtige Kenngröße für zahlreiche meteorologische Vorgänge und letztlich für die Entwicklung des Wetters insgesamt. Der Wasserdampf ist Voraussetzung für die Bildung von Wolken und Niederschlag. Hohe Luftfeuchtigkeit in Bodennähe kann zur Nebel- oder Reifbildung führen. Wasserdampf emittiert und absorbiert Wärmestrahlung – so ist Wasserdampf das wichtigste natürliche Treibhausgas der Atmosphäre. Eine geringe Luftfeuchtigkeit führt zu einer verstärkten Verdunstung von Wasser aus dem Boden, was zur Austrocknung beiträgt. Sehr hohe Luftfeuchtigkeit hingegen reduziert die Verdunstung aus dem Boden und die Transpiration von Pflanzen.

Wenn die maximal mögliche Menge an Wasserdampf erreicht ist, welche die Luft abhängig von der Temperatur aufnehmen kann, ist sie mit Wasserdampf gesättigt. Bei jeder Temperatur kann in einem bestimmten Luftvolumen nur eine bestimmte Höchstmenge Wasserdampf enthalten sein. Da der Wasserdampf bei der Kondensation seine latente Kondensationswärme freisetzt, wird es verständlich, dass tropische oder sommerliche Luftmassen wesentlich wetterwirksamer sind als polare oder winterliche.

Als „trockene Luft“ bezeichnet man in der Meteorologie ein Luftgemisch völlig ohne Wasserdampf. Dies ist nur für theoretische Überlegungen (z. B. in der ICAO-Standardatmosphäre) von Bedeutung, da der Wasserdampfanteil in der realen Atmosphäre zeitlich und räumlich zwischen nahe Null (bei extremer Kälte) und 4 Volumenprozent schwanken kann.

Die große Bedeutung des Wasserdampfgehaltes der Luft macht es erforderlich, seine Menge möglichst genau zu bestimmen. Da der Wasserdampf aber nicht von den anderen Bestandteilen der Luft zu trennen ist, muss der Anteil relativ zum Volumen oder zum Gewicht der Luft bestimmt werden.

9.1.1 Feuchtmessgrößen

Die Messgrößen des Wasserdampfes beziehen sich, abhängig von der Phase des Wasserdampfes auf ein

- ungesättigtes Gasgemisch, d. h. aus trockener Luft und nicht kondensiertem Wasserdampf und
- gesättigtes Gasgemisch, d. h. aus trockener Luft und kondensiertem Wasserdampf.

Die verschiedenen, anschließend beschriebenen Feuchtmessgrößen können nicht alle gemessen werden. Einige können nur anhand anderer, gemessener Werte berechnet werden. Wieder andere Luftfeuchteparameter können sowohl gemessen als auch berechnet bzw. bestimmt werden. Für die indirekt bestimmbar Größen stellen die sogenannten Aspirations-Psychrometertafeln (DWD 7. Auflage, 1998) [19], kurz Psychrometertafeln, mit den von **Prof. Dr. D. SONNTAG** (1990) auf der Grundlage der Internationalen Temperaturskala 1990 (ITS-90) neu berechneten Gleichungen eine praktische Hilfe bei der Ermittlung dieser Werte

dar. Die Tabellen sind für einen Luftdruck von 1013,25 hPa berechnet. Wenn der Luftdruck in Barometerhöhe von 1013,25 hPa abweicht, müssen die Werte der zentralen Tafel 3 nach Tafel 12 und 14 berichtigt werden.

Sämtliche Zahlenwerte, Einheiten und die Symbolik, die in dieser Beschreibung vorkommen, wurden auf die o. a. 7. Auflage abgestimmt. Auch die Hinweise zu den Tafeln beziehen sich auf diese Psychrometertafeln.

9.1.1.1 Messgrößen feuchter (ungesättigter) Luft

Der **Dampfdruck** e' ist der Teildruck des Wasserdampfes (hPa) im Gasgemisch Luft, solange keine Kondensation stattgefunden hat. Feuchte Luft kann als eine Mischung aus Gaskomponenten betrachtet werden, aus trockener Luft p_L (selbst ein Gasgemisch) und aus Wasserdampf. Beide Komponenten üben jede für sich einen Partialdruck aus, die nach dem **DALTONSchen Gesetz** (John Dalton, 1766–1844) in der Summe den herrschenden Luftdruck p ergeben. Für feuchte Luft gilt also:

$$p = p_L + e' \quad (9.1)$$

d. h. auch, dass der Dampfdruck als unabhängiger Partialdruck des Gasgemisches in der Atmosphäre vorhanden ist und der maximale Dampfdruck der Atmosphäre nur vom Dampfdruck des Wasser abhängig ist.

Nach der Gaszustandsgleichung ist

$$e' = p_w \cdot R_w \cdot T \quad (9.2)$$

mit p_w = Masse des Wasserdampfes m_w /Volumen V
 = Dichte des Wasserdampfes in $kg\ m^{-3}$
 $R_w = 461,525\ J\ kg^{-1}\ K^{-1}$, Gaskonstante von Wasserdampf
 T = Temperatur des Wasserdampfes in K .

Der aktuelle Dampfdruck feuchter Luft (e') in hPa lässt sich mit der Psychrometerformel (auch Sprungsche Formel) für Wasser berechnen. Sie lautet:

$$e'(p, t_d) = 1,0047e_w(t_w) - 0,662(1 + 0,000944 t_w)(t - t_w) \quad (hPa) \quad (9.3)$$

mit e' = tatsächlicher Dampfdruck
 e_w = Sättigungsdampfdruck (über Wasser) bei t_w
 $t - t_w$ = psychrometrische Differenz

Der Faktor $f = 1,0047$ für die Umrechnung des Sättigungsdampfdruckes in reiner Phase in den Sättigungsdampfdruck feuchter Luft beim Standardluftdruck $p_n = 1013,25\ hPa$ gilt auch für die nachfolgenden Formeln. Der Begriff in „reiner Phase“ bedeutet, dass kein anderes Gas außer Wasserdampf (bzw. Eisdampf) vorhanden ist. Damit werden, dem internationalen Trend folgend, beide Sättigungsdampfdrücke unterschieden.

Nach der Aspiration kann mit Hilfe der Psychrometertafeln zunächst der Taupunkt t_d über die Luft- und Feuchte-temperatur (Tafel 3) und anschließend für jede Taupunkttemperatur der zugehörige Dampfdruck (Tafel 14) bestimmt wer-

den. Die Korrektionswerte für den Dampfdruck bezüglich des Luftdruckes sind aus Tafel 12 zu entnehmen.

Die Psychrometerformel für Eis für den aktuellen Dampfdruck e' bei t_i (= Temperatur des vereisten Thermometers) lautet:

$$e' = 1,0047e_i(t_i) - 0,583(t - t_i) \quad (9.4)$$

Bei bekannter relativer Feuchte kann der aktuelle Dampfdruck auch wie folgt berechnet werden:

$$e' = 1,0047 \frac{U}{100} e_w(t) \quad (9.5)$$

Das **Mischungsverhältnis** feuchter Luft r gibt den Anteil Wasserdampf in $g \text{ kg}^{-1}$ trockener Luft an, berechnet aus dem Dampfdruck $e'(t_d)$ in hPa und dem Luftdruck p in hPa mit

$$r = \frac{0,62198 \cdot 10^3 \cdot e'}{p - e'} \quad (9.6)$$

Bei einer anderen Berechnung, basierend auf dem Taupunkt t_d und dem Luftdruck p gilt

$$r = \frac{0,62198 \cdot 10^3 \cdot 1,0047 \cdot e_w(t_d)}{p - [1,0047 \cdot e_w(t_d)]} \quad (9.7)$$

In (9.7) ist e_w eingesetzt, wenn t_d anstelle von t eingesetzt wird.

Das Mischungsverhältnis kann mit Hilfe der Psychometertafel aus dem Dampfdruck feuchter Luft und Luftdruck (Tafel 6) oder aus Taupunkttemperatur und Luftdruck (Tafel 7) bestimmt werden.

Die **Spezifische Feuchte** (q) ist der Masseanteil des Wasserdampfes feuchter Luft ($g \text{ kg}^{-1}$) bei t_d zur Gesamtmasse feuchter Luft aus

$$q = 622 \frac{e_w}{p - e_w + \gamma e_w} \left[\frac{g}{kg} \right] \quad (9.8)$$

mit γe_w = Psychrometerkonstante $0,666 \text{ hPa K}^{-1}$

Diese Größe q ist als reiner Zahlenwert dimensionslos, er wird aber meist in der Einheit $g \text{ kg}^{-1}$ angegeben. Die spezifische Feuchte ist nicht, wie die absolute Feuchte druckabhängig, sie lässt sich aus dem Mischungsverhältnis feuchter Luft r mit der Psychometertafel (Tafel 8) bestimmen oder einfach berechnen mit

$$q = \frac{10^3 \cdot r}{10^3 + r} \quad (9.9)$$

Da die Zahlenwerte von q und r sich kaum voneinander unterscheiden und wenn sie dimensionslos angegeben werden, immer kleiner $0,04$ sind, kann in guter Näherung (für die Praxis) gelten:

$$q \approx r$$

Die **absolute Luftfeuchte** über Wasser bzw. über Eis ist die Menge des Wasserdampfes in Gramm (oder Kilogramm), die in einem Kubikmeter Luft ($g \text{ m}^{-3}$ oder $kg \text{ m}^{-3}$) enthalten

ist. Sie ist eine andere Bezeichnung für die Dichte ρ_w des Wasserdampfes und stellt ein direktes Maß für den Anteil Wasserdampfgehalt in einem Volumen Luft dar.

$$\rho_w = \frac{216,6 \cdot e}{T} (g \text{ m}^{-3}) \quad (9.10)$$

Da das Volumen von Druck und Temperatur abhängig ist, können Werte der absoluten Feuchte aus unterschiedlichen Höhen nicht miteinander verglichen werden.

Die **relative Feuchtigkeit** U (t, t_d) ist ein relatives Maß der Luftfeuchte, angegeben in Prozent. Sie ist ein Maß für den Sättigungsgrad der Luft, nicht aber für ihren Feuchtegehalt. Sie bezeichnet das Verhältnis des momentanen Wasserdampfgehalts der Atmosphäre zum maximal möglichen bei gleicher Temperatur und ist dann 100 %, wenn der Sättigungsdampfdruck gleich dem aktuellen Dampfdruck ist, wenn also $e'(t_d) = e_w(t)$ ist.

Die relative Feuchte kann mit dem Haarhygrometer gemessen werden, was jedoch relativ ungenau ist. Sie kann über den Dampfdruck e' bzw. e_w mit Hilfe der Psychometertafel (Tafel 3) bestimmt werden, wobei der Korrektionswert bezüglich des Luftdrucks (Tafel 13) berücksichtigt werden muss. Sie kann aber auch mit folgender Formel berechnet werden

$$U = 100 \frac{e'}{1,0047 \cdot e_w} = 100 \frac{e'}{e_w(t)} (\%) \quad (9.11)$$

Im Gegensatz zur absoluten Feuchte ist also die relative Feuchte von der Temperatur der Luft abhängig. Sie nimmt bei gleichem Spread (beispielsweise $t - t_d = 5 \text{ K}$) mit abnehmenden Temperaturen immer weiter ab (Tab. 9.1).

Tab. 9.1 Relative Feuchte in Abhängigkeit von Temperatur und Spread von 5 K

t	td	U
35	30	76
5	0	70
-30	-35	61
-60	-65	52

Der **Taupunkt** t_d oder besser die Taupunkttemperatur ist die Temperatur, auf die ein ungesättigtes Luftquantum über einer ebenen, chemisch reinen Wasserfläche isobar abgekühlt werden muss (Reifpunkt über Eisfläche), um Sättigung zu erlangen. Da im Sättigungszustand die relative Luftfeuchtigkeit 100 % beträgt, tritt bei weiterer Abkühlung Kondensation ein und flüssiges Wasser wird ausgeschieden. Dieser Effekt findet z. B. beim Beschlagen von Fensterscheiben, bei der Taubildung und ähnlichen Phänomenen statt.

Beim Taupunkt ist der aktuelle Dampfdruck e' gleich dem Sättigungsdampfdruck e_w über Wasser (mit dem Umrechnungsfaktor $1,0047$ bei einem von $1013,25 \text{ hPa}$ abweichendem Luftdruck)

$$e'(p_n, t_d) = 1,0047 \cdot e_w(t) \quad (9.12)$$

Der Taupunkt lässt sich aus der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit mit Hilfe empirischer Formeln berechnen oder anhand der Messwerte der Trocken- und Feuchttemperatur aus den Aspirations-Psychrometertafeln (Tafel 3) bestimmen.

Der **Reifpunkt** ist die Sättigungstemperatur des aktuellen Dampfdruckes in Bezug auf eine ebene Eisfläche.

Der **Spread** ist die Temperatur-Taupunktdifferenz ($t - t_w$) in °C oder K.

Das **Sättigungsdefizit** SD ist für eine gegebene Temperatur t die Differenz von Sättigungsdampfdruck und aktuellem Dampfdruck oder aus der Lufttemperatur t und der Feuchttemperatur t_w mit

$$SD = 1,0047 \cdot e_w(t) - e' \quad (9.13)$$

Ist die relative Feuchte bekannt, kann die Formel in der Form

$$SD = 1,0047 \cdot e_w(t) \left(1 - \frac{U}{100}\right)$$

verwendet werden. (9.14)

Mit Hilfe der Psychrometertafel lässt sich das Sättigungsdefizit aus der psychrometrischen Differenz (Tafel 11) oder aus Lufttemperatur und relativer Feuchte (Tafel 10) bestimmen.

Schließlich seien noch drei Größen erwähnt, die als Feuchtegrößen gelten können, wenn sie auch keine direkte Angabe des Feuchtegehalts sind: die Feuchttemperatur (t_w/t_i), die Äquivalenttemperatur (t_e) und die virtuelle Temperatur (t_v). Sie treten im Zusammenhang mit Kondensationsprozessen auf und werden u.a. bei der psychrometrischen Feuchtemessmethode verwendet.

Die **Feuchttemperatur** t_w/t_i in °C ist die tiefstmögliche Temperatur, die sich durch Verdunstung über einer Wasser- bzw. Eisfläche erreichen lässt, weil dann die darüber liegende Luft gesättigt ist. Die zur Verdunstung benötigte Wärme wird dabei der Luft entnommen. Dieser Vorgang ist identisch mit dem am feuchten Thermometer stattfindenden Prozessen. Die Feuchttemperatur kann also auch als Temperatur des feuchten Thermometers bezeichnet werden. Das genaue physikalische Prinzip ist unter 9.2.1 näher erläutert.

Die **Äquivalenttemperatur** t_e in °C oder K ist die diejenige Temperatur, die feuchte Luft annimmt, wenn der gesamte in ihr enthaltene Wasserdampfgehalt isobar kondensiert und die dabei frei werdende Kondensationswärme (latente Wärmegehalt) der Luft hinzugefügt würde. Sie kann aus der Lufttemperatur t und dem Mischungsverhältnis r mit einer Näherungsformel errechnet werden

$$t_e = t + 2,5 \cdot r \quad (9.15)$$

Sie lässt sich auch aus der Psychrometertafel (Tafel 9) entnehmen. Eingangsgrößen sind die Lufttemperatur und die relative Feuchte.

Die **virtuelle Temperatur** t_v in °C oder K ist die Temperatur, die trockene Luft haben müsste, damit sie bei gleichem Druck die gleiche Luftdichte aufweisen würde wie feuchte (wasserdampfhaltige) Luft. Berechnet wird sie mit

$$t_v = t (1 + 0,608 \cdot r) \quad (9.16)$$

Der Term $1 + 0,608 \cdot r$ wird als virtueller Zuschlag bezeichnet und führt dazu, dass die virtuelle Temperatur immer etwas höher als die Lufttemperatur ist. Mit der virtuellen Temperatur kann feuchte Luft so behandelt werden als wäre sie trocken. So kann bei der Anwendung der Zustandsgleichung für feuchte Luft t_v anstelle von t eingesetzt werden und die Gaskonstante für trockene Luft beibehalten werden.

9.1.1.2 Messgrößen gesättigter Luft

Der **Sättigungsdampfdruck** e_w/e_i ist der höchstmögliche Druck des Wasserdampfes (hPa) über einer ebenen Wasser- bzw. Eisfläche und ist allein eine Funktion der Temperatur t , die wiederum den Verdunstungsprozess bestimmt. Die grundlegende physikalische Gleichung, die die Abhängigkeit des Sättigungsdampfdruckes von der Temperatur beschreibt, ist die bereits beim Siedebrometer erwähnte Clausius-Clapeyronsche Gleichung (7.9).

Der Sättigungsdampfdruck kann mit auf experimentellem Wege bestimmten empirischen Formeln abgeleitet werden. Eine davon ist die nach dem deutschen Physiker und Chemiker Magnus (1802–1870) benannte **MAGNUS-Formel**. Sie lautet (n. Sonntag, 1990) für den Bereich zwischen -45°C bis $+60^\circ\text{C}$ über ebenen Wasseroberflächen

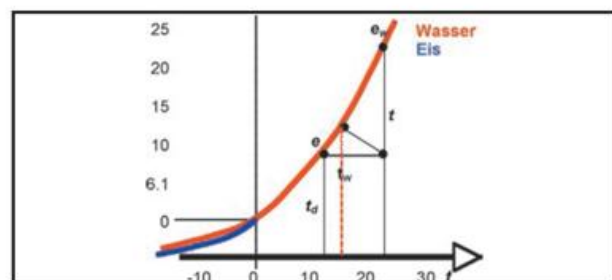
$$e_w(t) = 6,112 \frac{17,62 \cdot t}{243,12 + t} \text{ (hPa)} \quad (9.17)$$

und für den Bereich von -65°C bis $+0,01^\circ\text{C}$ über ebenen Eisoberflächen

$$e_i(t) = 6,112 \frac{22,46 \cdot t}{272,62 + t} \text{ (hPa)} \quad (9.18)$$

Die Magnus-Formel zeigt, dass der Sättigungsdampfdruck exponentiell von der Temperatur abhängt. Diese Tatsache wurde bereits als Messprinzip eines Siedebrometers (siehe 7.2.4) beschrieben. Der Sättigungsdampfdruck steigt mit zunehmender Temperatur zunächst allmählich, dann aber immer schneller an und verdoppelt sich nahezu pro 10 K. Tabelle 9.2 verdeutlicht dies und zeigt auch die Unterschiede zwischen dem Sättigungsdampfdruck über Wasser und Eis und die Differenz zwischen beiden, die bei einem Maximum zwischen -10°C bis -15°C liegt.

Abb. 9.1 Sättigungsdampfdruckkurve



Tab. 9.2 Sättigungsdampfdruck über Wasser und Eis für verschiedene Temperaturen

t (°C)	e _w (hPa)	e _i (hPa)	e _w - e _i
30	42,470	-	-
20	23,392	-	-
10	12,281	-	-
0	6,112	6,111	0,0006
-10	2,865	2,598	0,266
-20	1,255	1,032	0,2235
-30	0,510	0,380	0,130

Mit Hilfe der entsprechenden Tabellen der Psychrometertafel kann mit t als Eingangswert nach der Aspiration der Sättigungsdampfdruck e_w bzw. e_i bestimmt werden.

Die absolute Luftfeuchte bei Sättigung über Wasser (d_w) bzw. bei Sättigung über Eis (d_i) ist die Menge des Wasserdampfes in Gramm (oder Kilogramm), die in einem Kubikmeter Luft (kg m⁻³) enthalten sein kann. Es ist also eine Angabe, die den maximal möglichen Gehalt an Wasserdampf in einem definierten Luftvolumen angibt, der von der Temperatur und geringfügig vom Luftdruck abhängig ist. Anders ausgedrückt, ist das Sättigungsmaximum die Feuchtigkeitsmenge, die ein Kubikmeter Luft bei einer bestimmten Temperatur maximal aufnehmen kann.

Die Berechnung kann mit Hilfe nachstehender Formeln erfolgen, und zwar bei Sättigung

$$\begin{aligned} \text{über Wasser} \quad d_{wv} &= \frac{1,0047 \cdot e_w(t) \cdot 10^5}{Z \cdot R_v \cdot T} && \text{bzw.} \\ \text{über Eis} \quad d_{iv} &= \frac{1,0047 \cdot e_i(t) \cdot 10^5}{Z \cdot R_v \cdot T} && (9.19) \end{aligned}$$

mit $Z = \text{Kompressibilitätsfaktor} \approx 1 - (343 \cdot T) p_n \cdot 10^{-8}$
 $R_v = \text{Gaskonstante des Wasserdampfes } 461,525 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$

$$\text{oder} \quad d_{wv} = \frac{r}{V} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

$$\text{im idealen Gas} \quad d_{wv} = \frac{r}{R_v \cdot T} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad (9.20)$$

9.1.2 Maßeinheiten der Luftfeuchtigkeit

Bei den unter 9.1.1 behandelten Feuchtemessgrößen sind bereits die Maßeinheiten mit angegeben. Tabelle 9.3 fasst alle Luftfeuchtegrößen im Überblick noch einmal zusammen, mit den entsprechenden Hinweisen zu ihrer Messung bzw. Bestimmung. Dabei geben die Funktionen bei den direkt messbaren Größen gleichzeitig an, wie sie auch mit Hilfe der o.a. Aspirations-Psychrometertafeln bestimmt bzw. auch berechnet werden können. /TAB. 9.3

Tab. 9.3 Luftfeuchtegrößen, ihre Messung bzw. Bestimmung

Messgröße	Symbolik	Maßeinheit	Funktion von	Messgerät/Sensor
direkt messbar				
Feuchttemperatur	t _w /t _i	°C		Psychrometer
absolute Feuchte über Wasser/Eis		kg m ⁻³	t _d , p	Lyman-α-Hygrometer
Relative Feuchte	U	%	t, t _d oder t, t _w	Hygrometer, Hygrograph Kapazitive Hygrometer
Taupunkt	t _d	°C	t, t _w oder t, U	LiCl-Taupunktfühler Taupunktspiegel
indirekt bestimmbar				
Dampfdruck feuchter Luft	e'	hPa	p _n , t _d	
Sättigungsdampfdruck über Wasser/Eis	e _w /e _i	hPa	t	
Absolute Feuchte bei Sättigung über Wasser/Eis	d _{wv} /d _{iv}	kg m ⁻³	t, p	
Mischungsverhältnis feuchter Luft	r	g kg ⁻¹ trockener Luft	e', p oder t _d , p	
Spezifische Feuchte	q	g kg ⁻¹ feuchter Luft	r	
Spread (Temperatur-Taupunktdifferenz)	t-t _d	°C oder K	t, t _d	
Sättigungsdefizit	SD	hPa	t, t _w oder t, U	
Äquivalenttemperatur	t _e	°C oder K	t, U	
Virtuelle Temperatur	t _v	°C oder K	t, r	

9.2 Allgemeine Messprinzipien

In den weltweiten Wetterstationen der nationalen Wetterdienste werden zur Messung der Luftfeuchte verschiedene Feuchtemessgeräte/Sensoren eingesetzt, die die unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften bestimmter Materialien als Messprinzipien ausnutzen. Dazu gehören:

- Thermodynamische Methode (Psychrometermessung)
- Sättigungsgleichgewicht hygroskopischer Substanzen
 - Längenänderung von Haaren
 - Lithiumchlorid Hygrometer
- Kondensationsmethode (Tau- und Frostpunkthygrometer)
- Elektrische Methode einschl. Absorptionsmethode (chemische und elektrische Absorptionshygrometer)
 - Elektrolythygrometer
 - Kapazitive Polymer-Hygrometer
 - Lithiumchlorid-Absorptionshygrometer
- Diffusionsmethode
- Absorption elektromagnetischer Strahlung (spektroskopische Methode)
 - Lyman-alpha Linie im Ultravioletten (Buck, 1976)
 - UV-Absorption

9.2.1 Thermodynamische (psychrometrische) Methode

Die Psychrometermessung (griech. psychrós = frostig, kühl) arbeitet nach dem Verdunstungsprinzip. In einer mit Wasserdampf nicht gesättigten Luft verdunstet flüssiges Wasser. Die zu dieser Verdunstung benötigte Wärmemenge wird der Umgebungsluft entnommen, wodurch sich diese abkühlt. Die Verdunstung und somit die Abkühlung ist umso größer, je trockener die Luft und je größer die Verdunstungsmöglichkeit ist. Dazu werden zwei baugleiche Thermometer eingesetzt, von denen das „trockene Thermometer“ die Lufttemperatur anzeigt, während ein zweites mit einem Baumwollgewebe umwickeltes Thermometergefäß besitzt, das zur Messung befeuchtet wird und als „feuchtes Thermometer“ durch die Verdunstung Wärmeenergie abgibt, die die Temperatur absinken lässt. Gleichzeitig wird Wärme aus der Umgebungsluft zugeführt.

Wenn sich Wärmeabgabe durch Verdunstung und fühlbarer Wärmestrom aus der Luft das Gleichgewicht halten, bleibt die Temperatur des feuchten Thermometers konstant, jedoch auf einem niedrigeren Niveau als die des trockenen Thermometers. Dieser Gleichgewichtsprozess kann durch Ventilation beschleunigt werden, die damit einen Einfluss auf das Messergebnis hat.

Das trockene und feuchte Thermometer sind die Hauptbestandteile eines Psychrometers. Der Temperaturunterschied zwischen beiden wird so zu einem Maß für die Luftfeuchtigkeit. Je größer diese Temperaturdifferenz ist, umso größer ist das Sättigungsdefizit, auch als psychrometrische Differenz bezeichnet und desto geringer ist die aktuelle Luftfeuchte. In gesättigter Luft, wenn die relative Luftfeuchte 100 % beträgt, ist die Differenz Null. Auf dieser Grundlage können der Taupunkt und auch die relative Feuchte bestimmt werden.

Da die Verdunstung den Wasserdampfdruck erhöht, ist $t_w > t_d$. Wenn $t_w < t_d$ wäre, so wäre der Dampfdruck am feuchten Thermometer niedriger als e' und am feuchten Thermometer könnte nichts mehr verdunsten – Wasser müsste an ihm kondensieren.

Ein **ideales Psychrometer** ist eine Kombination aus einem feuchten Thermometer, bei dem die zur Verdunstung nötigen Wärme V allein vom Strom fühlbarer Wärme L aus der Luft geliefert wird und mit einem trockenen Thermometer zur Messung der Lufttemperatur.

Grundlage ist die **Wärmehaushaltsgleichung** (8.22) einer feuchten Oberfläche.

Im Fall des idealen Psychrometers sind die Strahlungsbilanz Q_s und der Wärmestrom B aus dem Körperinneren vernachlässigbar. Vorausgesetzt der Ventilationsstrom beträgt $\geq 2 \text{ m s}^{-1}$, so vereinfacht sich (8.22) zu

$$L + V = 0 \quad (9.21)$$

Ein feuchtes Thermometer, dessen Wärmehaushalt den Term $Q_s + B$ nicht enthält, wird als ideales Feuchtthermometer bezeichnet. Beim idealen Psychrometer ist demnach die zur Verdunstung V benötigte Wärmemenge nur abhängig vom Strom fühlbarer Wärme L aus der Luft.

Beim **realen Psychrometer** muss die vollständige Wärmehaushaltsgleichung (8.22) für eine feuchte Oberfläche herangezogen werden. In der Strahlungsbilanz Q_s kann von der kurzwelligen Strahlung der Sonne abgesehen werden, denn ohne Strahlungsschutz ist jede Temperaturmessung unbrauchbar. Es verbleibt dann die langwellige Strahlung von praktisch schwarzen Körpern mit der Lufttemperatur t der Umgebung.

Im Gegensatz zur Gleichung des idealen Psychrometers enthält die Gleichung für ein reales Psychrometer den Proportionalitätsfaktor, also die Wärmeübergangszahl α_c , (8.24), die den Einfluss der Ventilation darstellt. Je stärker die Ventilation ist, desto mehr nähert sich das reale Psychrometer dem idealen, desto weniger fallen die Terme Q_s und B gegenüber L und V ins Gewicht. Wenn die Windgeschwindigkeit (der Ventilationsstrom) über 2 m s^{-1} beträgt, kann für das reale Psychrometer die (vereinfachte) Gleichung (9.21) des idealen Psychrometers verwendet werden.

Anhand der Temperaturdifferenz (=Psychrometerdifferenz) der beiden Thermometer können weitere Feuchtegrößen (siehe 9.1.1) mit Hilfe der Psychrometertafeln bestimmt bzw. mit der Psychrometerformel (9.3) berechnet werden.

Die Psychrometerdifferenz ist normalerweise positiv, sie kann aber geringfügig negativ dann sein, wenn hohe Luftfeuchtigkeit bei Eissättigung auftritt. Dann kann die freiwerdende Sublimationswärme (bei 0°C ca. 2835 J kg^{-1}) nur an die Luft abgegeben werden, solange die Lufttemperatur kleiner ist als die Temperatur am feuchten Thermometer (bei Eisansatz). Zur Verdeutlichung zeigt Tabelle 9.4 die Feuchttemperatur t_w über Wasser bzw. über Eis t_i in Abhängigkeit von der Lufttemperatur t und der relativen Feuchte U .

Tab. 9.4 Feuchttemperatur über Wasser bzw. Eis in Abhängigkeit von t und U

U % t °C	40	50	80	100
Wasser	t_w	t_w	t_w	t_w
30	20,1	22,0	27,1	30,0
10	4,6	5,6	8,3	10,0
0	-3,5	-2,9	-1,1	0,0
-10	-11,9		-10,6	-10,0
Eis	t_i	t_i	t_i	t_i
0	-3,3	-3,0	-1,1	0,0
-10	-11,8	-11,5	-10,4	-9,7
-20	-20,8	-20,6	-20,0	-19,7
-30	-30,3		-30,0	-29,8

Die zunehmende Ungenauigkeit der Psychrometermessung bei immer tieferen Temperaturen wird in Tabelle 9.4 ebenfalls deutlich. Bei einer Temperatur von -30 °C über Eis ergibt die geringe Temperaturdifferenz von nur $0,2\text{ K}$ ein ΔU von 20 ‰ . Erkennbar ist auch die höhere (wärmere) Feuchttemperatur t_i gegenüber t_w bei einer Lufttemperatur von -10 °C bei 100 ‰ relativer Feuchte.

Vorteile der Psychrometermessung sind hohe Messgenauigkeit, hohe Langzeitstabilität und hohe Zuverlässigkeit. Wegen dieser Vorteile galt die Psychrometermessung viele Jahrzehnte als Standardmethode zur Eichung anderer Feuchtemessgeräte. Sie wird heute nur noch bei Ersatzmessungen, Kontrollmessungen und an Klimareferenzstationen durchgeführt.

9.2.2 Hygroskopische Methode

Das allgemeine Prinzip der hygroskopischen Feuchtemessung beruht auf der Erkenntnis, dass viele Körper hygroskopische Eigenschaften besitzen, durch Kondensation aus der Luft Wasser aufzunehmen und dadurch ihre Länge oder ihr Gewicht zu erhöhen und bei sinkender Feuchtigkeit durch Verdunstung die Feuchte wieder abzugeben. Hygroskopische Eigenschaften besitzen sowohl

- organische Stoffe, wie Menschenhaare, tierische Haare usw. als auch
- anorganische Stoffe, wie Salzlösungen, Kohle u. a.

Das Messprinzip eines Haarhygrometers beruht auf der Eigenschaft des menschlichen Haares, sich bei Feuchtigkeitsaufnahme aufzuquellen (auszudehnen) und bei Feuchtigkeitsentzug wieder zu verkürzen. Mit zunehmender relativer Feuchte wird der Wassergehalt der hygroskopischen Substanz immer größer, und ihr Volumen nimmt zu, bei lang gestreckter Form ist die Längenänderung besonders groß. Der Betrag der Längenänderung folgt ungefähr der von Joseph L. GAY-LUSSAC (1778–1850) gefundenen Abhängigkeit, d. h. es ergeben sich größere Änderungen bei niedrigen Luftfeuchten, dagegen kleinere Änderungen bei hohen Luftfeuchten. Von einer Gesamtlängenänderung von nur etwa $2,5\text{ ‰}$ entfallen allein ca. 21 ‰ der Gesamtlängenänderung

eines normalen (gewalzten) Haares auf den relativen Feuchtebereich von 0 ‰ bis 10 ‰ , dagegen nur ca. 7 ‰ der Änderung auf den Feuchtebereich von 90 ‰ bis 100 ‰ .

Zusätzlich ist eine temperaturabhängige Längenänderung gegeben. Sie entspricht einer Änderung der relativen Feuchte von $0,3\text{ ‰}$ bei 100 ‰ bzw. $0,1\text{ ‰}$ bei 30 ‰ , d. h., dass bei 20 °C und 100 ‰ relative Feuchte anzeigende Hygrometer bei -10 °C nur 91 ‰ relative Feuchte anzeigt.

Das Haarhygrometer ermittelt auch bei Temperaturen, bei denen normalerweise die befeuchtete Gewebeshülle des Psychrometers bereits vollständig eingefroren ist, Werte der relativen Luftfeuchte, die dem Partialdruck des Wasserdampfes über einer ebenen Wasseroberfläche entsprechen. Dieses Verfahren wurde eingeführt, um die psychrometrisch ermittelten Feuchtwerte unabhängig von der Phase des Wassers in der Gewebeshülle des befeuchteten Thermometers mit den Werten einer Haarhygrometers vergleichen zu können.

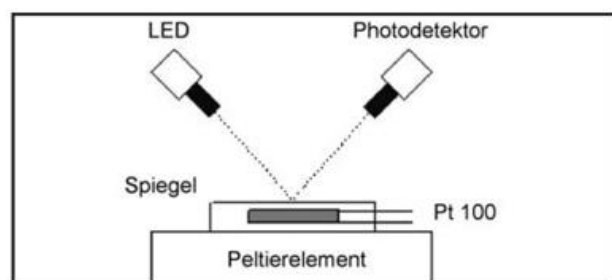
Der beste dafür geeignete Sensor ist blondes, sorgsam präpariertes (gut entfettetes) Frauenhaar (sog. Pernix-Haar). Es weist die optimalen Eigenschaften für die Anzeige der relativen Luftfeuchte auf. Diese Haare haben eine mechanische Vorbehandlung durch Walzen derart erfahren, dass ihre äußere Schicht (Keratin-Schicht) zum Teil zerquetscht wurde. Dadurch wird ihre Trägheit geringer, aber auch ihre Ausschlagcharakteristik verändert, sodass für Pernix-Haare besondere Registrierstreifen benötigt werden. Es gibt seit längerer Zeit auch künstlich hergestelltes Haar, dass diese Eigenschaften ebenfalls aufweist.

9.2.3 Kondensationsmethode (Taupunktspiegel)

Die Abkühlung feuchter Luft bis zur Erkennbarkeit der Sättigung bei Erreichen der Taupunkttemperatur wird bei einem Taupunktspiegel-Hygrometer genutzt. Dazu wird eine spiegelnde Metalloberfläche solange abgekühlt, bis sich auf dieser eine Tauschicht bildet und so eine relative Feuchte von 100 ‰ erreicht wird. Dieser Beschlag wird optisch mit einer Leuchtdiode und einem Fototransistor erfasst.

Zum Zeitpunkt der Betauung wird die Taupunkttemperatur (= Oberflächentemperatur des Spiegels) mit einem Thermometer – bspw. Pt 100 – gemessen. Der Taupunktssensor liefert zwei Signale, eines zur Oberflächentemperatur proportionales Widerstandssignal und eines von der Betauungsschichtdicke abhängiges Spannungssignal.

Abb. 9.2 Funktionsweise eines Taupunktspiegels



Findet die Sättigung bezüglich Eis statt, spricht man vom Frostpunkt. Die Kühlung bzw. Heizung des Taupunktspiegels wird über eine Fozozelle gesteuert. Taupunktspiegel mit Peltierkühlung sind für einen Messbereich von -90°C bis $+100^{\circ}\text{C}$ mit einer Messunsicherheit von $\pm 0,1\text{ K}$ einsetzbar. Sie unterliegen weder einer Drift noch einer Hysterese. Weitere Vorteile dieser Methode sind die kurzen Ansprechzeiten, die hohe Messgenauigkeit und Langzeitstabilität.

9.2.4 Elektrische Methoden

Kohleschicht(Karbon)-hygrometer

Das Messprinzip basiert auf der Änderung der elektrischen Leitfähigkeit eines hygroskopischen Elektrolyten mit Feuchtigkeitsänderung der umgebenden Luft. Durch Feuchtigkeitsaufnahme einer hygroskopischen (Kohle-)Schicht, die auf einen Probekörper aufgebracht ist, quillt diese Schicht auf und verringert den Kontaktdruck der Kohleteilchen. Die elektrische Leitfähigkeit ist dann umgekehrt proportional der absoluten Feuchte. Neben einigen wenigen Vorteilen, wie sehr geringe Trägheit, elektrisches Ausgangssignal, bestehen eine Reihe von Nachteilen bei dieser Art von Hygrometer. Diese sind die sehr verschiedenen Kalibrierkurven, die Altersempfindlichkeit, Salze in der Kohleschicht, die Elektrolyse bewirken würden und die hygroskopische Hysterese (Abb. 9.27).

Kapazitive Polymer-Hygrometer

Die Grundlagen des kapazitiven Messprinzips wurden unter 6.1 erläutert. Bei einem kapazitiven Hygrometer beeinflusst die Luftfeuchtigkeit die Permittivitätszahl eines hygroskopischen Isolationsmaterials, welches sich zwischen zwei Kondensatorplatten befindet. Dieses Material verändert seinen Wasseranteil synchron zur relativen Feuchte der Umgebungsluft, indem es Wasserdampf absorbiert, wenn die relative Feuchte der Umgebungsluft steigt und ihn wieder abgibt, wenn die Umgebungsluft trockener wird.

Es gibt eine Vielzahl von elektronischen Sensoren zur Bestimmung der relativen Feuchte. Durchgesetzt haben sich kapazitive Polymer-Hygrometer. Dabei wird die Luftfeuchte durch die Messung der Änderung der elektrischen Eigenschaften eines Kondensators bestimmt, dessen Dielektrikum aus einer hygroskopischen Polymerschicht (Dünnschicht-Polymere) zwischen den Kondensatorplatten besteht. Ein **Polymer** ist eine chemische Verbindung, die aus Ketten oder verzweigten Molekülen (Makromolekül) besteht, die aus gleichen oder gleichartigen Einheiten (den sogenannten Monomeren) bestehen. Dabei handelt es sich um ein poröses, hygroskopisches Material, das aus der Luft Wasserdampf kondensiert. Bei Feuchteaufnahme oder -abgabe verändert sich die Kapazität des Kondensators, sie wird gemessen und aus ihrem Wert kann auf die relative Feuchte geschlossen werden.

9.2.5 Spektroskopische/Infrarotmethode

Wasserdampf hat Absorptionsbanden im UV-Bereich (Lyman-Alpha-Banden) und im IR-Bereich. Beide Absorptionsbanden werden zur Feuchtemessung, besonders zur Messung turbulenter Feuchteschwankungen genutzt.

Bei diesem Messprinzip wird die unterschiedliche Strahlungsabsorption von UV-Strahlung an den Wasserstoffatomen des Wassermoleküls im Wasserdampf in benachbarten Spektralbanden (Wasserdampfabsorptionsbande und Wasserdampffenster) als Maß für den Wasserdampfgehalt ausgenutzt.

Wasserstoff absorbiert Strahlung u.a. bei einer Wellenlänge von $0,1216$ und $0,218\ \mu\text{m}$. Diese Absorptionslinie der UV-Strahlung heißt **Lyman-Alpha**. Die Absorption dieser Wellenlänge ist abhängig von der Konzentration der Wasserstoffatome in der Luft, die proportional zur absoluten Feuchte ist.

Infrarothygrometer nutzen oft zwei unterschiedlich stark absorbierende Wellenlängen, z.B. $2,6$ und $2,3\ \mu\text{m}$. Beides sind sog. schnelle Messgeräte, weil sie die Absorptionsänderung praktisch trägheitslos messen [36].

Zur Messung werden eine UV-Strahlungsquelle und ein UV-Detektor benötigt. Die Strahlungsquelle durchstrahlt eine definierte Wegstrecke und die dabei gemessene Abschwächung der Strahlung ist proportional zur Wasserdampfdichte und damit zur absoluten Feuchte.

Ein weiteres Messprinzip basiert auf der Abschwächung einer konstanten Strahlungsintensität von UV-Licht durch Absorption durch den Wasserdampf in der Luft im Bereich der Kryptonlinie. Das Kryptonhygrometer dient zur Messung von Feuchtefluktuationen mit hoher zeitlicher Auflösung.

Die Kalibrierung der Absorptionshygrometer ist nicht stabil, die Messdaten müssen über die Psychrometernmessungen nachträglich kalibriert werden. Eine Echtzeitauswertung des latenten Wärmestroms ist daher praktisch nicht möglich.

Ein Lyman-Alpha-Hygrometer wird u.a. am Institut für Meteorologie und Klimaforschung der Uni Karlsruhe eingesetzt. In der meteorologischen Routinepraxis sind solche Hygrometer sonst nicht in Gebrauch. Sie dienen oft zur Messung turbulenter Feuchteschwankungen.

Abb. 9.3 Lyman-Alpha-Hygrometer (rechts neben Ultraschallanemometer)



9.2.6 Diffusionsmethode

Bei der Diffusionsmethode werden semipermeable Membranen (Hartgummi, Keramik), die den Durchlass von trockener Luft und Wasserdampf regeln, bzw. für Wasserdampf nur geringfügig durchlässig sind, eingesetzt. Im Inneren eines U-Rohr-Differenzdruckmessers, der mit Öl gefüllt ist, wird Wasser oder ein Trockenmittel eingefüllt und ein Manometer als Druckmessgerät zeigt die Druckdifferenz $e_w - e'$ an.

Diese Methode ist in der Praxis nicht im Einsatz, daher ist kein Messgerät/Sensor dazu beschrieben.

9.3 Sensoren/Messgeräte

Die Anforderungen an Feuchtemessgeräte sind im Wesentlichen folgende:

- Verwendbarkeit in einem großen Temperaturbereich
- Unempfindlichkeit gegen Verschmutzung
- kurze Ansprechzeit
- hohe Messgenauigkeit
- Unabhängigkeit der Messung von Druck, Temperatur, Strömung und Gaszusammensetzung
- Wartungsfreiheit

Kein Messgerät kann all diese Anforderungen gleichzeitig erfüllen. Daher hängt die Anwendung der Messgeräte/Sensoren wesentlich vom Einsatzspektrum und vom Stationstyp (bemannt oder automatisch) ab.

Wie bereits erwähnt, werden nicht zu allen aufgeführten Messprinzipien im praktischen Wetterdienst Messgeräte genutzt, daher werden im Folgenden nur die eingesetzten Messgeräte ausführlicher dargestellt werden.

9.3.1 Psychrometer

Hüttenpsychrometer

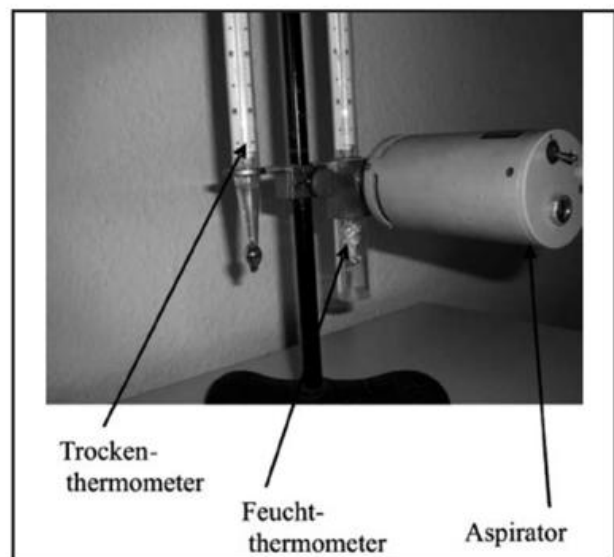
Die beiden baugleichen Thermometer (siehe 8.3.1.1) des Hüttenpsychrometers werden an einer senkrechten Halterung in der Thermometerhütte so montiert, dass sich die Thermometergefäße 2 m über Grund befinden. Das trockene Thermometer ist am oberen Halter links festgeklemmt und ragt durch den Ring des unteren Halters.

Abb. 9.4 Psychrometer Gesamtansicht



Das feuchte Thermometer ist am oberen Halter rechts festgeklemmt. Die untere Halterung enthält den Luftkanal mit einem Ansaugstutzen für den Aspirator sowie ein Luftansaugsrohr. Das Quecksilbergefäß des feuchten Thermometers ist mit einem Schlauchgewebe überzogen, welches vor der Messung befeuchtet wird. Der Aspirator soll das Feuchthermometer mit einer konstanten Strömungsgeschwindigkeit von etwa $2,5 \text{ m s}^{-1}$ bis 4 m s^{-1} belüften.

Abb. 9.5 Psychrometer Detailansicht



Wenn Gleichgewicht zwischen Wärmeabgabe durch Verdunstung und Wärmezufuhr aus der umgebenden Luft herrscht (nach ca. 3 min), ist die Feuchttemperatur $t_w = \text{const}$ und die Ableseung kann erfolgen, zuerst am feuchten und anschließend am trockenen Thermometer. Beide Werte sind Eingangsgrößen in den Psychrometertafeln, aus denen dann Taupunkt und relative Feuchte (Tafel 3) bestimmt werden können. Dabei ist bei negativen Temperaturen darauf zu achten, ob der befeuchtete Mullstrumpf noch feucht oder bereits vereist ist, damit die entsprechenden Tabellen der Psychrometertafeln herangezogen werden. Tabelle 9.5 zeigt deutlich die geringere relative Feuchte U , auch bei Sättigung über Eis und den tieferen Taupunkt über Eis, zunehmend zu tieferen Temperaturen.

Tab. 9.5 Vergleich der Werte t_d und U über Wasser und Eis

t_w / t_i	-4,0	-5,0	-6,0
	über Wasser		
	über Eis		
t	t_d / U	t_d / U	t_d / U
-3,0	-6,0/79 -6,4/77	-9,8/59 -10,0/58	-14,8/40 -14,8/40
-4,0	-4,0/100 -4,5/96	-7,2/78 -7,7/76	-11,2/57 -11,6/56
-5,0	-	-5,0/100 -5,6/95	-8,4/77 -9,0/74

Es ist darauf zu achten, dass beim Absinken der Lufttemperatur auf den Gefrierpunkt die Anzeige vorübergehend bei 0°C zum Stillstand kommt. Ursache ist die freiwerdende Gefrierwärme von ca. 333 J g^{-1} beim Übergang der flüssigen in die feste Phase am Mullstrumpf. Erst wenn sämtliches Wasser zu Eis geworden ist, sinkt die Temperatur weiter ab. Das bedeutet, dass der Aspirationsvorgang im Winterhalbjahr länger (ca. $\geq 5\text{ min}$) dauern kann als sonst.

Nach der Messung wird der Aspirator abgenommen und die Öffnungen des Glasansatzrohres und des Ansatzstückes durch Korke abgedichtet. Durch das Abdichten wird die Feuchtigkeit am Gewebeüberzug des feuchten Thermometers erhalten.

Pflege und Kontrolle der Funktionstüchtigkeit

Für den Betrieb elektrischer Aspiratoren sind für die Akkumulatoren entsprechende Ladeeinrichtungen erforderlich. Die Prüfung der Batterie- bzw. Akkukapazität erfolgt bei laufendem Gerät. Der Aspirator ist betriebsbereit, solange sich der Zeiger des Kontrollinstruments im „grünen“ Bereich befindet. Bewegt sich der Zeiger im Übergangsbereich von „grün“ zu „rot“, so ist im Allgemeinen noch eine Betriebsreserve von ca. 1 h vorhanden, ein Batteriewechsel oder eine Aufladung wird dann erforderlich. Wandert der Zeiger während des Betriebes in das rote Feld, ist eine Aufladung notwendig. Es ist weiterhin erforderlich, die Thermometer sauber zu halten und auf einen eventuellen Fadenriss zu kontrollieren. Am Feuchtthermometer muss gewährleistet sein, dass der Baumwollstrumpf sauber ist. Andernfalls muss er gewechselt werden.

Die Dichtung am Feuchtthermometer muss regelmäßig kontrolliert werden und bei Verschleiß ausgetauscht werden. Die Dichtung verrutscht im Laufe der Zeit oft nach oben und muss wieder nach unten geschoben werden, da sonst die Ventilation am Feuchtthermometer gestört ist. Die Überprüfung der Messwerte kann mit dem Aspirationspsychrometer nach Assmann vorgenommen werden. Allgemein kann davon ausgegangen werden, dass bei guter Pflege das Hüttenpsychrometer über viele Jahre exakte Daten liefert. Eine Überprüfung der Quecksilberthermometer ist nach 10 Jahren erforderlich.

Aspirationspsychrometer nach Assmann

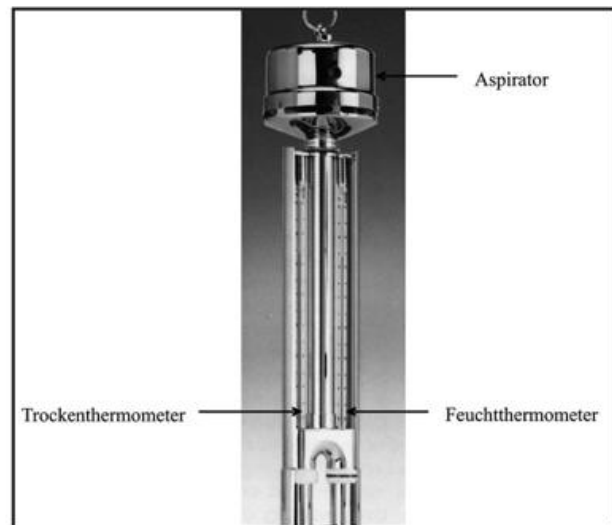
Das Aspirationspsychrometer nach **Richard A. ASSMANN** (1845–1918) arbeitet nach dem gleichen Prinzip wie das Hüttenpsychrometer, ist aber deshalb zuverlässiger, weil es die Voraussetzungen – Strahlungsschutz und ausreichend Ventilation – eines idealen Psychrometers erfüllt. Ein am Kopf des Gerätes angeschraubter, federwerksgetriebener Aspirator erzeugt den Luftstrom mittels einer rotierenden Schlitzscheibe, die die Luft nach den Seiten hinausschleudert. Den Antrieb liefert eine kräftige Spiralfeder über eine starke Übersetzung in einem Federgehäuse. Den Luftstrom saugt der Aspirator durch ein Rohrstück gleichmäßig an beiden Thermometern mit ca. $2,5\text{ m s}^{-1}$ vorbei, sodass auch das trockene Thermometer ventiliert wird. Die Ventilationszeit beträgt wie beim Hüttenpsychrometer je nach Jahreszeit 3–5 min.

Die Thermometer sind durch eine doppelwandige Umhüllung mit äußerer Hochglanzverchromung weitgehend gegen äußere Strahlungseinflüsse geschützt. Alle Metallteile,

wie die doppelten Hüllrohre der Thermometergefäße, der Strömungskanal, die seitlichen Blenden neben den Thermometern und der Aspirator sind zur Strahlungsreflexion verchromt.

Mit diesem Aspirationspsychrometer können auch im Freien außerhalb der Wetterhütte Messungen durchgeführt werden. Daher eignet sich das transportable Psychrometer für den mobilen Einsatz, für Ersatzmessungen und für Vergleichsmessungen. Es ist aber beim Einsatz im Freien, insbesondere bei voller Sonne darauf zu achten, dass der Aspirator einen Ventilationsstrom von mindestens $1,7\text{ m s}^{-1}$ erzeugt.

Abb. 9.6 Aspirationspsychrometer n. Assmann



Zur Messung wird das Aspirationspsychrometer nach Assmann entweder am Handgriff gegen den Wind gehalten, da sonst mit einer Wärmezufuhr vom Körper des Beobachters gerechnet werden muss oder besser noch mittels der dazugehörigen Halterung an einem Pfahl o. a. befestigt. Dabei muss darauf geachtet werden, dass die Thermometergefäße in 2 m Höhe hängen. Dauerbefeuchtung kann bei diesem Gerät nicht durchgeführt werden, weil zu diesem Zweck der Strahlungsschutz am Feuchtthermometer entfernt werden muss.

Pflege und Kontrolle der Funktionstüchtigkeit

Beim Aspirationspsychrometer nach Assmann muss darauf geachtet werden, dass die verchromten Blechteile nicht korrodieren, d. h. nach dem Einsatz bei Regenwetter muss es gut abgetrocknet werden.

Um die erforderliche Belüftungsgeschwindigkeit zu überprüfen wird der Gehäuseumlauf des Federaspirators getestet. Der Aspirator läuft langsam an, erreicht mit der zweiten Umdrehung des Federgehäuses die Höchstgeschwindigkeit und wird bis zur 6. Umdrehung allmählich langsamer. Wenn der Aspirator geprüft werden muss, zieht man ihn bis zum Anschlag auf und lässt ihn laufen bis der senkrechte Strich am Ende des Pfeils (auf dem Federgehäuse) im Sichtfenster auf der Strichmarke steht. Jetzt wird die Schlitzscheibe bis zum Stillstand abgebremst und festgehalten. Nachdem das Uhrwerk wieder bis zum Anschlag nachgezogen ist, gibt man den Start frei und betätigt gleichzeitig die Stopp-

uhr. Der nächste Durchgang des Pfeilendstriches durch die Strichmarke (eine Umdrehung des Federgehäuses aus der Ruhelage) darf längstens nach 90 s (ideal 75 s) erfolgen.

Schleuderpsychrometer

Eine weitere Art von Psychrometer sind Schleuderpsychrometer, die in erster Linie für den mobilen Einsatz, an Bord und auch für Notmessungen herangezogen werden können.

Die erforderliche Ventilation muss hier durch Schleudern von ca. 2–3 min mit dem Arm erfolgen. Danach muss die Ablesung beider Thermometer rasch erfolgen, da sonst der Aspirationseffekt verloren geht und ein erneuter Schleudervorgang notwendig ist.

Schleuderpsychrometer PTS 30

Das Schleuderpsychrometer Modell DWD wurde von der Fa. Eigenbrodt, Königsmoor als eine einfache und leichte Schleuder entwickelt und konstruiert. Das Gerät ist bei Ausfall der anderen Sensoren im Notmessgeräte-Koffer des DWD (siehe 16.1) vorhanden. Nach über 2-jährigen Versuchen und Erprobungen sowie Vergleichsmessungen an Bord verschiedener Forschungsschiffe ist die Schleuder im Beobachtungsnetz des DWD und in der Bundeswehr eingesetzt. /ABB. 9.7

Die für die psychrometrische Messung erforderliche Luftventilation wird durch kreisende Schleuderbewegung erzielt, hierbei wird eine Ventilation von ca. $v = 5 \text{ m s}^{-1}$ erreicht.

Die nach der Messung abgelesenen Temperaturwerte des trockenen und feuchten Thermometers dienen zur Bestimmung der relativen Feuchte mit Hilfe einer graphischen Auswertetafel.

Die Vorteile der Bauart bestehen darin, dass die Thermometer und die wenigen Einzelteile leicht ausgewechselt werden können und die Reparaturanfälligkeit sehr gering ist. Der Schwerpunkt des Griffes liegt durch den Schrägansatz nahe an der Hand, sodass sich die beim Schleudern auftretende Zentrifugalkraft verringert.

Die Thermometer sind in zwei Strahlenschutzröhrchen mit einer Trennwand für die Thermometergefäße untergebracht. Sie sind mit einer Skalenteilung von 0,5 K versehen.

Abb. 9.7 Schleuderpsychrometer PTS 30 (Eigenbrodt)



Abb. 9.8 Psychrometer n. Frankenberg (Friedrichs)



Psychrometer nach Frankenberg

Im mobilen Messeinsatz des DWD (siehe 19.5.4), u.a. im Stadtmessnetz Freiburg und in einem Messfeld der Universität Bayreuth wird ein elektrisch ventiliertes Psychrometer nach Frankenberg eingesetzt. Das Gerät ermöglicht die Messung der trockenen und feuchten Lufttemperatur mit zwei Widerstandsthermometern Pt 100. Eines davon ist mit einem Strumpf überzogen und wird aus einem angeschraubten Wasserbehälter (Inhalt ca. 200 cm³ destilliertes Wasser) entgegen dem Ventilatorstrom dauerbefeuchtet. Aus den Werten beider Temperaturen lassen sich die relative Luftfeuchte und der Taupunkt bestimmen. /ABB. 9.8

In der schrägen Anordnung sitzen die Pt 100-Thermometer unter Schutzrohren. Das unterste Teil (braun) ist das Wassergefäß für das feuchte Thermometer. Das schwarze Teilstück ist der Netzanschluss, unter der Metallhaube befinden sich der Motor und der Ventilator. /ABB. 9.9

Verchromte Strahlungsschutzrohre sind gegeneinander sowie gegen den Thermometerhalter durch Kunststoffringe wärmeisoliert. Der doppelte Strahlungsschutz wirkt gegen Global- und Reflexionsstrahlung. Einflüsse von Wind, Strahlung und Verdunstung werden weitgehend eliminiert.

Auch in der Agrarmeteorologie des DWD (siehe 15.) wird ein Psychrometer nach Frankenberg, meist in Beständen nahe an der Bodenoberfläche (Abb. 9.10) eingesetzt. /ABB. 9.10

Tab. 9.6 Spezifikationen Psychrometer n. Frankenberg (Friedrichs)

Messelement	Pt 100 n. DIN 60751 Klasse B, 1/3 Toleranz Fühler mit Kennlinie für –20 bis +40 °C
Genauigkeit	±0.1 K bei 0 °C
Ventilator	>3.5 m s ⁻¹ , externer Drehmotor ohne Kollektor
Gehäuse	Aluminium eloxiert mit Schutzlackierung Wasserbehälter 200 cm ³ Fassungsvermögen
Stromversorgung	230 V AC/160 mA, 24 V AC/100 mA, 12 V DC 40 mA

Abb. 9.9 Dauerbefeuchtung aus Vorratsbehälter (Friedrichs)



Abb. 9.10 Psychrometer n. Frankenberger über gefrorenen Boden
(Foto: DWD ZAMF, Braunschweig)



Minipsychrometer

In der Agrarmeteorologie des DWD (siehe 15.) werden sog. Minipsychrometer eingesetzt. Sie sind im Eigenbau des DWD entstanden und bestehen aus 2 Widerstandsthermometern Pt 100, eines als trockenes, das andere als feuchtes Thermometer. Am Thermometer ist ein Mullstrumpf über den Glaszylinder gestülpt. Damit entspricht das Messprinzip den sonst üblichen Psychrometern. /ABB. 9.11

Psychrometersensoren werden heute auf der Basis von Pt 100-Thermometer auch an automatischen Stationen betrieben. So ist eine kontinuierliche Aufzeichnung der Luftfeuchte möglich.

Abb. 9.11 Minipsychrometer (Eigenbau DWD)



9.3.2 Haarhygrometer

Hygrometer sind Geräte zur direkten Messung der Luftfeuchte. Es gibt sie in verschiedenen Ausführungen. Das älteste, heute immer noch teilweise eingesetzte klassische Messgerät ist das Haarhygrometer. Die Längenänderung der parallel gespannten Haare (Haarharfe) wird über ein feines Hebelwerk mechanisch auf eine Anzeige übertragen. Während das eine Ende fest eingespannt ist, ist das andere Ende an einer Blattfeder befestigt, die mit dem Gehäuse verbunden ist. Die Stellung der Blattfeder und damit der Aufhängepunkt des Haares kann mittels Standschraube verändert werden. Das untere Ende des Haares ist am Ende einer als Amplitudenhebel wirkenden Schraube befestigt, die auf der Zeigerachse sitzt und die Längenänderung des Haares auf den Zeiger überträgt. Die Ablesung der Momentanwerte ist an der in Prozent geteilten Skala möglich.

Noch heute werden neben künstlichen Haaren Naturhaare (Frauhaare) eingesetzt.

Abb. 9.12 Haarhygrometer (Fischer)



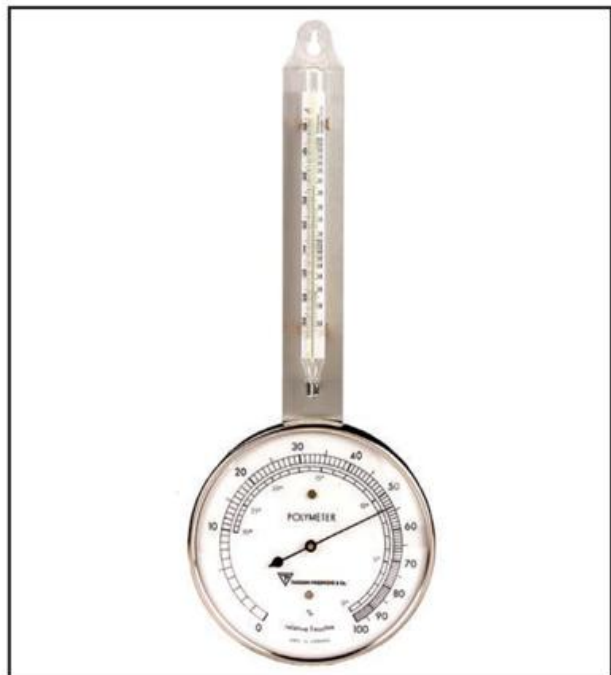
Ähnlich aufgebaute Haarhygrometer werden von verschiedenen Firmen hergestellt.

Polymeter

Ein Polymeter ist ein Kombigerät zur Ermittlung von relativer Feuchte, Temperatur, Taupunkttemperatur, Sättigungsdampfdruck, Sättigungsdefizit und der absoluten Feuchte.

Das Polymeter der Fa. Th. Friedrichs ist ein mit einem Thermometer kombiniertes Haar-Hygrometer zur Messung von Lufttemperatur und relativer Feuchte. Aus beiden Größen können auf einfachem Wege Sättigungsdampfdruck, aktueller Dampfdruck, absolute Feuchte, Taupunkt und Sättigungsdefizit (mittels Psychrometer-Tafel) ermittelt werden.

Abb. 9.13 Polymeter (Friedrichs)



Tab. 9.7 Spezifikationen Feuchtsensor Polymer (Friedrichs)

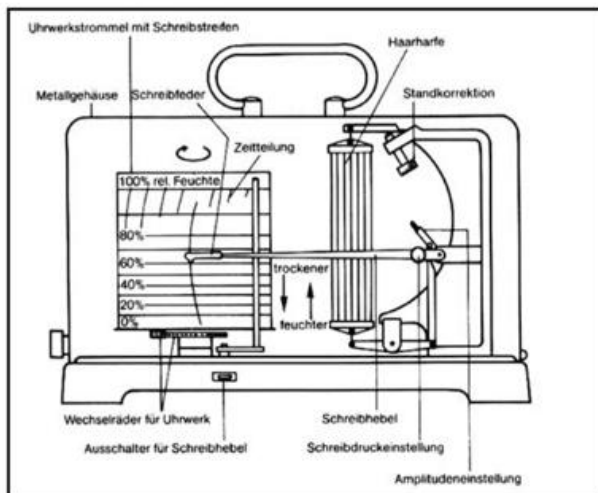
Messfühler	Pernix-Element
Messbereich	0 bis 100 % rel. Feuchte, -30 bis +50 °C
Messgenauigkeit	±3 % rel. Feuchte
Teilung	1 % relative Feuchte, 1 °C.
Einsatzbereich	-25 bis +60 °C

Hygrograph

Der Hygrograph dient zur Messung und Registrierung der relativen Feuchte. Als Feuchtemessfühler wird eine Haarharfe (bis zu 50 Haare) zur Erhöhung der Stellkräfte eingesetzt. Bei allen Hygrographen der verschiedenen Fabrikate wird der Ausschlag des Messfühlers über ein verstellbares Hebelgetriebe auf einen Zeiger mit Schreibfeder übertragen. Diese Schreibfeder zeichnet auf einer mit Registrierpapier bespannten, uhrwerksgetriebenen, rotierenden Trommel die Tages-, Wochen- oder Monatsverläufe der relativen Feuchte auf. Im DWD werden Registrierstreifen mit Wochenumlauf verwendet.

Bei der Kalibrierung wird jeder einzelne Messfühler durch Veränderungen am Übertragungsmechanismus auf den vorgegebenen Registrierstreifen abgeglichen. Die Amplitudenschraube ist maßgebend für die Vergrößerung des Messfühlerausschlages. Mit der Standschraube, die als einzige vom Personal der Wetterstation in gewissen Fällen bedient werden darf, werden Korrekturen der Anzeige bei Vergleichsmessungen vorgenommen.

Abb. 9.14 Hygrograph, schematisch (Lambrecht)



Hygrographen der verschiedenen Hersteller unterscheiden sich hauptsächlich durch die Form und die Anbringung der Messfühler. Bei dem in Abb. 9.14 und 9.15 dargestellten Gerät der Fa. Lambrecht hängt die Haarharfe als Messfühler senkrecht, mit ihrem oberen Ende in einer Halterung befestigt. Die einzelnen „Saiten“ dieser Haarharfe bestehen ihrerseits aus mehreren Haaren. In das untere Ende wird das Übertragungsgestänge eingehängt. Der Schreibfederdruck kann mittels einer Rändelschraube am rechten Ende des Schreibarms eingestellt werden. Die Haare werden durch ein Gegengewicht straff gehalten.

Abb. 9.15 Hygrograph (Lambrecht)



Pflege und Kontrolle der Funktionstüchtigkeit

Wenn über längere Zeit nur niedrige relative Luftfeuchten auftreten, drifft die Registrierung zu höheren Werten ab. In diesem Fall ist ein „Regenerieren“ der Haare erforderlich. Der Gehäuseteil mit dem Messfühler wird mit einem nassen, aber nicht tropfenden Tuch eingehüllt. Sind die Haare stark ausgetrocknet, kann das Regenerieren bis zu 48 Stunden dauern.

Je nach Verschmutzungsgrad der Luft am Einsatzort müssen die Haare ein oder mehrmals im Jahr mit einem weichen Pinsel und destilliertes Wasser gereinigt werden. Falls erforderlich, wird das Gehäuse des Hygrographen innen und außen mit einem sauberen, feuchten Lappen gereinigt.

Die Überprüfung der angezeigten relativen Luftfeuchte des Hygrographen erfolgt durch Messung der Feuchtegrößen mit dem Hüttenpsychrometer oder mit dem Aspirationspsychrometer nach Assmann bzw. dem Schleuderpsychrometer PTS 30 aus dem Notmessgeräte-Koffer. Auftretende Abweichungen können mit der Standschraube ausgeglichen werden.

Thermohygrograph

Der Thermohygrograph ist ein Kombigerät aus Thermograph und Hygrograph. Er besitzt Messfühler eines Thermographen und Hygrographen. /ABB. 9.16

Dazu sind zwei Aufzeichnungstrommeln zur gleichzeitigen Registrierung von Lufttemperatur und relativer Luftfeuchte erforderlich, oder aber auf einem gemeinsamen Schreibstreifen (Abb. 9.17) werden die Werte registriert. /ABB. 9.17

Pflege und Kontrolle der Funktionstüchtigkeit von Registriergeräten

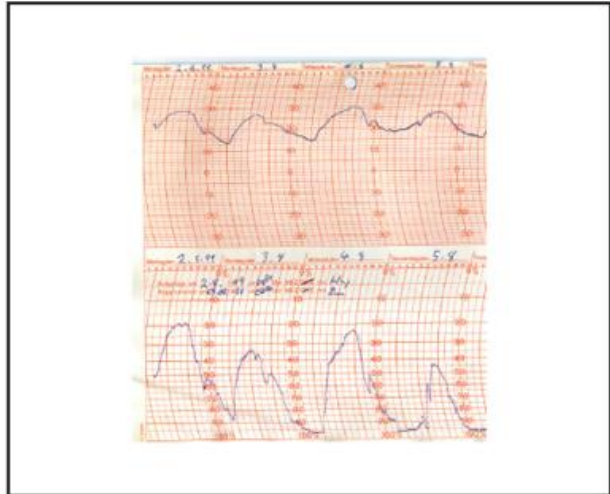
Die Registriergeräte werden in den SL-Einheiten des DWD überprüft und gewartet. Das Beobachterpersonal kann nur die Richtigkeit der Registrierung überprüfen und mit der Standschraube justieren, d. h. lediglich die Anzeige insgesamt anheben oder senken. Die Amplitude des Gerätes darf nicht verändert werden.

Messfühler und Übertragungsgestänge werden mit Hilfe eines Pinsels (nicht feucht!) wenigstens 2 x im Jahr gereinigt. Auch das Gehäuse wird nach Bedarf gereinigt. Die Verkleinerung der Amplitude entsteht durch Abnutzung der Lagerstellen im Übertragungsgestänge. Sie führen meist auch zu einem „Stufenschrieb“. Ebenso verkleinern Korrosion und Alterung des Bimetalls die Amplitude. Bei Korrosion des Messfühlers und bei zu großem Amplitudenfehler ($>0,5 K$) muss das Gerät ausgetauscht werden. Thermographen sind ansonsten recht robust und müssen nur bei Bedarf gepflegt werden.

Abb. 9.16 Thermohygrograph (Lambrecht) (Foto: B. Henning)



Abb. 9.17 Registrierung eines Thermohygrograph (Ausschnitt)



9.3.3 Kapazitive Feuchtesensoren

Kapazitive Feuchtesensoren haben in den Messnetzen Haarhygrometer vollständig ersetzt. Andere Verfahren werden nur noch für ergänzende Messungen herangezogen.

Feuchtesensor HMP45D

Der Feuchtesensor HUMICAP® 180 HMP45D der Fa. Vaisala, Oyi Finnland besteht aus einer Dünnschicht-Polymerschicht (siehe 9.2.4) als kapazitives Messelement in einem Plattenkondensator und einem integrierten Temperaturfühler Pt 100 in Vierleiterschaltung, passiv oder 0...1 V, aktiv (optional). Beide Sensoren sind auf einem Sockel an der Sondenspitze montiert. Durch eine entsprechende Elektronik im Sensor erscheint als Ausgangssignal des Sensors eine lineare Spannung die proportional zu einem bestimmten Feuchtegehalt der Luft ist.

Abb. 9.18 Feuchtesensor HUMICAP® HMP45D ohne Sensorschutzkappe (Vaisala)



Die Sensorschutzkappe enthält ein Teflon-Membranfilter, das Gehäusematerial ist ABS-Kunststoff.

Abb. 9.19 Feuchtesensor HUMICAP® HMP45D mit Membranfilter (Vaisala)



Tab. 9.8 Spezifikationen Feuchtesensor HMP45D (Vaisala)

Messbereich Feuchtesensor	0,8 bis 100 % = 0 bis 1 V
Auflösung	0,1 %
Sensor	Pt 100 passiv
Genauigkeit bei 20°C	±0,2°C
Ausgangssignal	0 bis 1 V
Einschwingzeit nach Einschalten	500 ms
Ansprechzeit bei 20°C	15 s
Langzeitstabilität	<1 % pro Jahr
Einsatzbereich	-40 bis +60 °C, 0 bis 100 %
Stromaufnahme	≤4 mA
Versorgungsspannung	7 bis 35 V DC

Im DWD wird dieser Sensor in der Lamellenschutzhütte LAM630 gedoppelt eingesetzt.

Pflege und Kontrolle der Funktionstüchtigkeit

Zur Überwachung des Sensors bei auffälligen Abweichungen der Feuchtedaten, können die an der Wetterwarte noch verbliebenen konventionellen Messmittel benutzt werden (Psychrometer nach Assmann, Schleuderpsychrometer oder Hüttenpsychrometer). Sollte dabei ein Abdriften der Messwerte festgestellt werden, muss der Sensor ausgetauscht werden. Die Reinigung verschmutzter Sensoren oder deren Austausch muss von den SL-Einheiten des DWD erfolgen.

Speziell eingewiesenes Personal der Wetterwarte kann am Sensor Reinigungsarbeiten vornehmen. Evtl. muss die Schutzkappe ausgetauscht werden. Es ist wichtig, den Aus- und Einbau des Sensors mit größter Vorsicht durchzuführen und die Position des Sensors in der LAM630 nicht zu verändern.

Temperatur-Feuchtesensor HMP155

Die Fa. Vaisala hat mit dem HUMICAP® 180R HMP155 ein Nachfolgeprodukt des HMP45D entwickelt. Er wird voraussichtlich auf Regionalflugplätzen zum Einsatz kommen. Der neue Sensor verfügt über einen Feuchtefühler und zusätzlich einen integrierten Pt 100-Temperaturfühler. Beide Sensoren sind auf einem Sensorsockel auf der Sondenspitze montiert und werden durch ein Teflonfilter vor flüssigem Wasser, Dunst und Schmutz geschützt.

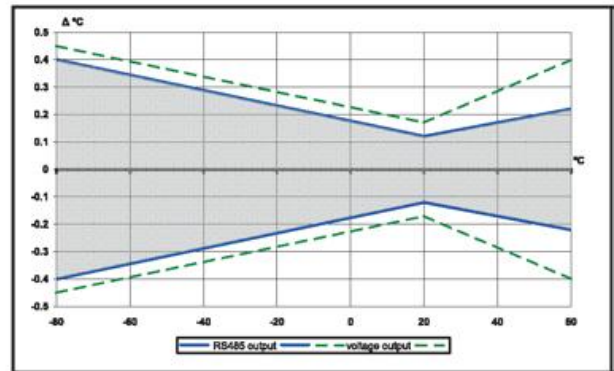
Abb. 9.20 Feuchtesensor HUMICAP® HMP155, rechts mit zusätzlichem Pt 100-Sensor (Vaisala)



Tab. 9.9 Feuchtesensor HUMICAP® HMP155 (Vaisala)

Messbereich Feuchtesensor	0...100 % = 0...1 V
Messbereich Temperatursensor	-80...+60 °C Pt 100 RTD 1/3 Class B IEC 751
Genauigkeit bei +15...+25 °C	0...90 % ± 1 % rel. Feuchte
-20...+40 °C	90...100 % ± 1.7 % rel. Feuchte ± 1 %
Ansprechzeit mit Ventilation 3 m s ⁻¹	63 % <20 s, 90 % <35 s
Genauigkeit bei -80...+20 °C	±0,226-0,0028x Temperatur °C
+20...+60 °C	±0,055+0,0057x Temperatur °C
Stromversorgung	7...28 V DC

Abb. 9.21 Darstellung der Genauigkeit des HMP155 (Vaisala)



Den HMP155-Feuchtesensor gibt es in zwei Ausführungen, von der die passive Ausführung dem HMP45D entspricht. Die aktive Ausführung besitzt einen Heizwiderstand, mit dem der Feuchtefühler über die Lufttemperatur beheizt wird und mit einem externen Pt 100 der Taupunkt direkt bestimmt wird. Dann wird die relative Feuchte auf der Grundlage der mit dem Feuchtesensor gemessenen Taupunkttemperatur, sowie des mit dem zusätzlichen Temperaturfühler gemessenen Wertes berechnet. Dabei müssen die Sensoren nahe beieinander liegen, um möglichst gleiche Umgebungsbedingungen zu haben.

Die HMP155 wird ständig beheizt, sodass die Temperatur stets über der Lufttemperatur liegt und so die Bildung von Kondensat am Sensor verhindert wird.

In der weltweit verbreiteten Radiosonde RS 92BGP von Vaisala arbeitet ebenfalls ein Humicap®-Sensor.

Feuchte- und Temperaturmesswertgeber HUMICAP® HMT337

Dieser Feuchte- und Temperaturmesswertgeber der Fa. Vaisala wird an den mobilen Einheiten des DWD (siehe 19.5.4) eingesetzt und ist für industrielle und meteorologische Hochfeuchteanwendungen geeignet. Er entspricht im Wesentlichen den Feuchtesensoren HMP45D bzw. HMP155 derselben Firma mit einem HUMICAP® als Feuchtesensor. Die gem. Tab 9.10 angegebene Genauigkeit ist inkl. Nichtlinearität, Hysterese und Wiederholbarkeit.

Tab. 9.10 Feuchte- und Temperaturmesswertgeber HMT337 (Vaisala)

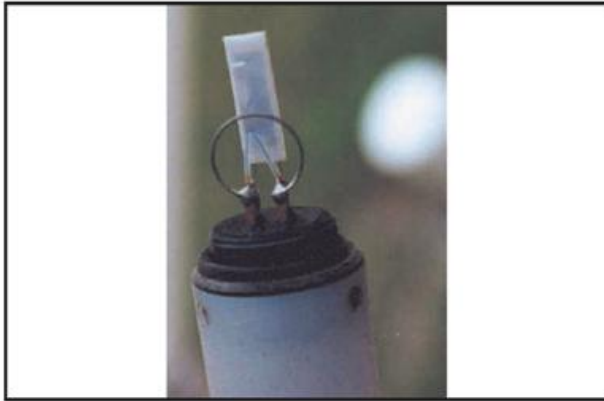
Messbereich Feuchtesensor	0...100 %
Temperatursensor	-70...+180 °C Pt 100 IEC 751 1/3 Class B
Genauigkeit bei +20 °C	0...90 % ± 1 % rel. Feuchte 90...100 % ± 1.7 % rel. Feuchte ± 0,2 °C
Betriebsspannung	10...35 V DC, 24 V AC

Weitere berechnete Größen sind je nach Modell Taupunkt, absolute Feuchte, Mischungsverhältnis und Wasserdampfdruck. Der integrierte Datenspeicher hat eine Speicherkapazität von mehr als vier Jahren.

Feuchtesensor MP101A

Dieser Feuchtesensor Hygromer®IN-1 wird von der Fa. ROTRONIC Messgeräte, Schweiz hergestellt. Er besitzt einen Pt 100-Sensor mit linearem Ausgangssignal.

Abb. 9.22 Polymer-Feuchtesensor MP101A (Rotronic AG)



Bei diesem Sensor handelt es sich um einen Polymerfühler. Der Wassergehalt des Materials ist ein Maß für die Luftfeuchte und wird kapazitiv gemessen. Bei einer relativen Luftfeuchte von 100 % hat der Sensor ein Ausgangssignal von 1 V.

Tab. 9.11 Spezifikationen Feuchtesensor MP101A (Rotronic AG)

Feuchtesensor	Hygromer®IN-1
Temperatursensor	Pt 100 1/3 DIN
Ansprechzeit (63%)	12...15 s
Genauigkeit bei 23 °C	±1,5 % rel. Feuchte, 0,3 °C
Höchste Genauigkeit (mit SCS Zertifikat)	±1 % rel. Feuchte, 0,2 °C
Langzeitstabilität	<1 % rel. Feuchte / Jahr
Einsatzbereich	-40...+60 °C, 0...100 %
Versorgungsspannung	4,8...30 V DC

9.3.4 Taupunktspiegel-Hygrometer

Taupunktspiegel gehören zu den ältesten und genauesten Feuchtemessgeräten. Sie messen die Feuchte direkt und absolut.

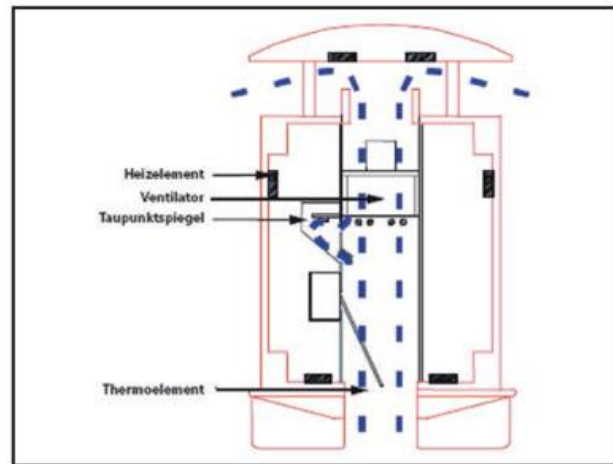
Mit Taupunktspiegeln können Taupunkttemperaturen zwischen -105°C bis $+100^{\circ}\text{C}$ gemessen werden. Zum Teil erfassen diese Geräte auch die Gastemperatur und den Druck, womit dann die Berechnung von vielen Feuchteparametern ($U\%$; ppm ; g/m^3 ; g/kg u. a.) möglich wird.

Thermo-Hygrometer Thygan

Im SwissMetNet (19.6.6) wird ein ventiliertes, geheiztes Thermometer kombiniert mit einem Taupunktspiegelhygrometer THYGAN verwendet. Das Gerät ist von Meteoschweiz in Zusammenarbeit mit der Fa. Meteolabor für den Einsatz im Flachland sowie im Gebirge entwickelt worden. Es wird auch auf dem Erprobungsfeld des DWD auf der Wasserkuppe als Referenzgerät verwendet und ist auch auf der Zugspitze im Einsatz. Es wurde von der WMO als „Working Reference“ empfohlen.

Die Temperatur wird über ein Kupfer-Konstantan-Thermoelement in einem ventilerten Luftkanal und die Feuchte mit Hilfe eines Taupunktspiegels gemessen, indem feuchte Luft über einen kleinen Spiegel geleitet wird. Beginnende Kondensation (Tau- oder Frostbildung) auf der Spiegeloberfläche wird dann über ein optisches System durch die Veränderung der Reflexionseigenschaften des Spiegels erkannt. Beim Messvorgang wird der Spiegel durch ein Peltierelement (siehe 8.2.2) abgekühlt, bis der Taupunkt erreicht ist. In diesem Moment beschlägt der Spiegel mit Wassertröpfchen oder Eiskristallen. Die Luft strömt oben zwischen Gehäuse und Deckel (Abb. 9.23) wieder aus.

Abb. 9.23 Aufbau Thermo-Hygrometer THYGAN, schematisch (Meteolabor)



Über einen Regelkreis wird die Temperatur des Spiegels genau an dem Punkt gehalten, an dem die Kondensation des Wassers aus der feuchten Luft gerade einsetzt. Diese Taupunkttemperatur ist ein Maß für den absoluten Feuchtegehalt der Luft. Liegt diese Temperatur unterhalb von 0°C , kann sich prinzipiell die Tauschicht auf dem Spiegel in eine Reifschicht umwandeln. In diesem Fall spricht man von einer Frostpunkttemperatur. Beide Phänomene reduzieren die Intensität des von einer Infrarotquelle ausgesandten und vom Spiegel reflektierten Lichtstrahls. Die Art des Kondensates – Wassertröpfchen oder Eiskristalle – wird vom System automatisch unterschieden, registriert und bei der Berechnung der relativen Luftfeuchtigkeit entsprechend berücksichtigt.

Da der für die Luftfeuchtemessung verwendete Taupunktspiegel mit einem Durchmesser von nur 2 mm sehr klein ist, wird eine kurze Reaktionszeit auch bei niedrigen Temperaturen und geringem Wasserdampfgehalt der Luft erreicht.

Abb. 9.24 Thermo-Hygrometer VTP 6 (Meteolabor)



Tab. 9.12 Spezifikationen Thermo-Hygrometer VTP 6 (Meteolabor)

Messbereich Temperatur/Taupunkt	-50...+50 °C, -65...+50 °C
Durchmesser des Spiegels	2 mm
Unsicherheitsbereich Temperatur und Taupunkt	±0.15 °C (>-20 °C) ±0.25 °C (<-20 °C)
Relative Feuchtigkeit (berechnet)	0...100 %
Anzahl verwendeter Einzelmessungen für einen ausgegebenen Messwert	1...600 HZ
Messaufösung Temperatur/Taupunkt relative Feuchtigkeit (berechnet)	jeweils 0.01 °C 0.01 %

Resultat der Feuchtigkeitsmessung ist die relative Feuchtigkeit (berechnet) über Wasser oder als Taupunkt/Frostpunkt (umschaltbar). VTP 6 misst alle 10 min während 40 s etwa 10 Einzelwerte der Lufttemperatur und der Taupunkttemperatur. Die Mittelwerte werden übermittelt und mit der Standardabweichung wird die Qualität der Messung kontrolliert.

Für spezielle Versuche kann der Geber auch dauernd messen (umschaltbar). Störeinflüsse durch Nässe (Psychrometereffekt), Strahlung, Vereisung, Wind und elektromagnetische Störfelder (Sender) werden weitgehend unterdrückt.

Das Gehäuse wird, abhängig von der Gehäusetemperatur beheizt. Ferner wird die Ventilationsleistung von der Luftfeuchte abhängig gemacht, z. B. wird während einer Vereisungssituation permanent ventiliert. Der geringe Stromverbrauch erlaubt den Betrieb aus einer Batterie (ohne Heizungen). Automatisch gesteuerte mechanische Reinigung des Taupunktspiegels erübrigt den sonst notwendigen Unterhalt am Taupunktspiegel.

Taupunkthygrometer werden zur Erfassung von Raumfeuchte, Raumtemperatur, Taupunkt und Oberflächentemperatur mittels externen Fühlers oder Infrarotmessung mit internem Speicher und Software verbreitet in der Industrie eingesetzt.

9.3.5 DWD-Normal für Feuchtesensoren

Zur Kalibrierung der Feuchtsensoren werden an den SLS und SLN des DWD Feuchtgeneratoren, die nach dem Zwei-Druck-Verfahren arbeiten, eingesetzt. Sie stellen bei allen nationalen Kalibrieranstalten das nationale Feuchtenormal dar. Auch sind viele Kalibrierlaboratorien innerhalb des Deutschen Kalibrierdienstes (DKD) mit Zwei-Druck-Generatoren ausgestattet. Wegen der hohen Genauigkeit sind sie zur Kalibrierung von Taupunktspiegeln geeignet.

Feuchtgenerator

Die Fa. Thunder Scientific stellt Generatoren zur Generierung der relativen Feuchte im Bereich von 10 % bis 95 %, die Taupunkttemperatur im Bereich -20 °C bis 59 °C und die absolute Feuchte 1200 ppmv bis 130000 ppmv (parts per million by volume = Volumenmischungsverhältnis) her, die nach diesem „Zwei-Druck-Verfahren“ arbeiten.

Dabei wird entsprechend der Formel

$$gRH = \frac{f_s \cdot e_s \cdot p_c}{f_c \cdot e_c \cdot p_s} \cdot 100 \quad (9.21)$$

die Feuchte aus dem Druckverhältnis p_c/p_s mit Korrekturfaktoren für das Realgasverhalten (f) und dem Partialdruckverhältnis e_s/e_c berechnet. Gemessen werden die Drücke p_c und p_s , sowie die Temperatur T_c und T_s zur Berechnung der Partialdrücke und Taupunkttemperatur.

Abb. 9.25 Feuchtgenerator (Thunder Scientific)



Die Messunsicherheit bei der relative Feuchte beträgt ±1 %, bei der Kammertemperatur (variabel regelbar 10 °C bis 60 °C) ±0,05 °C, Temperaturgleichförmigkeit ±0,1 °C.

Das bei SLN und SLS verwendete Modell 2500ST umfasst ca. 44,0 Liter.

DewMaster

Beim DewMaster der Fa. EdgeTech handelt es sich um ein im Feld erprobtes Normal mit Taupunktspiegeltechnologie. Ein-, zwei- oder dreistufige Sensoren sind zur Messung verfügbar und können einfach an der Elektronik getauscht werden. NIST Zertifikat mit jedem Messgerät.

Abb. 9.26 Dew Master (EdgeTech)



Es ermöglicht primär die Taupunktspiegelmessung für Wasserdampf in Gas, Taupunkt, Absolutdruck, ppmv und anderen psychrometrischen Variablen.

Tab. 9.13 Spezifikationen Dew Master (EdgeTech)

Tau-/Frostpunkt (umschaltbar)	-40 to 60°C, S1 & DS1 -50 to 100°C, S2 & DS2 -75 to 100°C, S3
rel. Feuchtebereich	0 to 100%RH 0 to 999,999 PPMv
Abkühlung (ein-, zwei- oder dreistufige Peltier)	45°C, S1 & DS1 65°C, S2 & DS2 95°C, S3
Abkühlungs-geschwindigkeit	1.7 °C/s Maximum, unter 0°C
Messunsicherheit	±0.2°C, 0.15°C, 0.1°C Tau/Frost Punkt ±0.5 % auf FSD
Auflösung	0.1°C 0.01 psia 0.1 PPMv < 1000 PPMv 1 PPMv 1000 PPMv

Sensor Auswahl: S1, S2, S3 sind ein, zwei, und dreistufige Sensoren als Durchfußsensor; DS1, DS2 sind 1 und 2-stufige Sensoren als Einstecksensor (DP) Das Sensor Material ist Chrom Glass, Epoxid und Aluminium.

Vorteile

- Automatische Abgleichsfunktion (ABC),
- Automatische Korrektur von Spiegelbelegungen,
- Automatischer Abgleich der Optik,
- Intervall kann gewählt werden,
- verkürzt eventuelle Fehlmessungen durch Verschmutzung.

9.4 Messunsicherheiten und Fehlerquellen

Psychrometermessung

Folgende Fehlerquellen können bei der Psychrometermessung auftreten

- Salzablagerungen und Wassermangel am Befeuchtungsstrumpf, Feuchttthermometer muss immer sauber gehalten werden
- Wärmeübergang,
- Trägheit,
- Eispanzer (wirkt isolierend),
- Dampfdruck über Eis oder Wasser,

Die Genauigkeit der Psychrometermessung nimmt mit sinkender Temperatur ab. Bei gleicher relativer Feuchte ist die Psychrometerdifferenz bei niedrigen Temperaturen geringer als bei hohen. Wenn also die absolute Messgenauigkeit bei 0,1 K liegt, wird der relative Fehler für die relative Feuchte immer größer je niedriger die Temperatur ist. Entsprechend nimmt der relative Fehler des Dampfdrucks und der absoluten Feuchte zu. Tabelle 9.14 zeigt die Größenordnung des relativen Fehlers für eine Temperaturdifferenz von nur 0,1 K.

Tab. 9.14 Relativer Fehler bei der Psychrometermessung

-30	-20	-10	0	10	20	30	t °C
13	5-6	3	1-2	1	<1	<1	ΔU %

Bis etwa -10°C Lufttemperatur ist die psychrometrische Feuchtemessung relativ genau und anderen Methoden überlegen. Darunter jedoch ist die Hygrometermessung genauer.

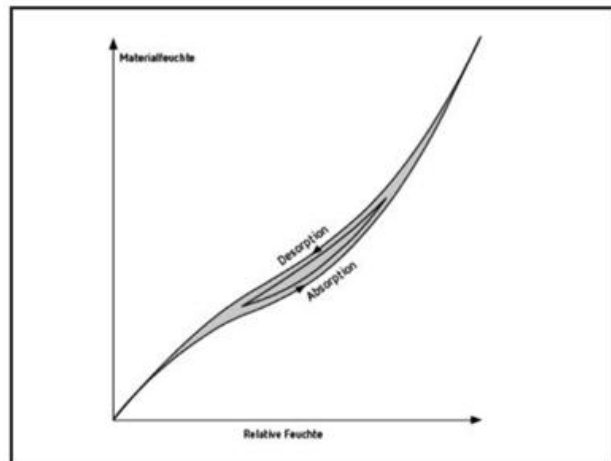
Hinzu kommt, dass bei niedrigen Temperaturen die Verfälschung durch Körper- und Atemwärme des Beobachters größere Auswirkungen hat als bei höheren Temperaturen.

Haarhygrometer

Folgende Fehlerquellen können bei Haarhygrometern auftreten

- Temperatureinfluss
- Verunreinigung
- Überspringen
- Trägheit führt bei schlagartigem Feuchteanstieg oder insbesondere bei Kälte zu Fehlanzeigen
- Nicht-Linearität und abnehmende Empfindlichkeit mit zunehmender relativer Feuchte
- Hygroskopische Hysterese, Kennlinie des Sensors zeigt bei Feuchtabnahme einen anderen Verlauf als bei Feuchtzunahme

Abb. 9.27 Hygroskopische Hysterese



In Abbildung 9.27 liegt zwischen Absorption und Desorption der Messunsicherheitsbereich, d.h. die Gleichgewichtslinie zwischen der relativen Feuchte und der Materialfeuchte ist nicht eindeutig.

- längerer Verbleib im hohen oder sehr niedrigen Temperaturbereich und gleichzeitigem Feuchtebereich <20 % relativer Feuchte lässt die Haare reaktionsunfähig werden.

Kapazitive Polymer-Hygrometer

Bei der Kalibrierung von Polymerhygrometern wird eine sog. Sensorkennlinie ermittelt, die den Zusammenhang zwischen Kapazität und Luftfeuchte ergibt. Abhängig vom verwendeten Dielektrikum lässt sich über einen Großteil des Messbereichs eine annähernd lineare Kapazitätsänderung mit der Luftfeuchte erzielen. Größere Messfehler treten besonders bei Feuchten über 90 % auf.

Das Ansprechverhalten (Sprungantwort) von Feuchtesensoren hängt sowohl von dem verwendeten Polymer wie auch der Filterkappe über dem Sensorelement ab. Bei Untersuchungen des Niederländischen Wetterdienstes (KNMI, vander Meulen

1988) wurde der Einfluss unterschiedlicher Filtermaterialien auf das Sprungantwortverhalten von Feuchtesensoren untersucht und festgestellt, dass ungeeignete Filter zu einer Verzögerung der Sprungantwort führen können.

Der von Vaisala neu entwickelte HMP155 mit Sensorelement HUMICAP180R mit PTFE-Filter (PTFE-Polytetrafluorethylen, Handelsname Teflon) reagiert erheblich langsamer als der alte, nicht mehr produzierte HMP45D mit dem Sensorelement HUMICAP180. Durch die speziell aus PTFE eingesetzten Filter entsteht unter der Filterkappe ein Mikroklima, indem der Sensor dann je nach Filterart anders auf Temperatur- und Feuchteänderungen reagiert. Die PTFE-Sinterfilter scheinen daher für eine meteorologische Anwendung nicht geeignet. Dagegen reagiert die beheizte Version des HMP155 am schnellsten auf eine Feuchteänderung.

Für eine schnelle und korrekte Messung ist daher die Wahl geeigneter, durchlässiger Filter von besonderer Wichtigkeit, da diese zu einer Verkürzung des Sprungantwortverhaltens von Feuchtesensoren führen.

10. MESSUNG DER WOLKENHÖHE UND WOLKENBEDECKUNG

10.1 Allgemeines

Die Wolkenbeobachtung und -Messung ist aus synoptischer wie klimatologischer Sicht von großer Bedeutung. In ihrer Aussage über den Zustand der Atmosphäre liegt die Bedeutung für die Analyse und Vorhersage. Wolken spielen eine bedeutende und komplexe Rolle im Klimasystem. Sie sind Modulator im Strahlungs- und Energiehaushalt sowie wichtiger Bestandteil des hydrologischen Zyklus. Die bessere Erfassung der dreidimensionalen Verteilung der Bewölkung sowie der zugehörigen Wolkenparameter ist von großem Interesse für den Wasserkreislauf. Ein Teil der Wasservorräte der Erde befindet sich in einem stetigen Kreislauf und Wechsel des Aggregatzustands. Von den Meeres- und Landflächen verdunstet das Wasser. Der dadurch entstehende Wasserdampf kondensiert in der Troposphäre durch hebungsbedingte Abkühlung zu Wolken. Die bei diesem Phasenwechsel freigesetzte latente Wärmeenergie wird bis zu 80 % vom Erdboden aus in die Atmosphäre transportiert. Mit dem aus den Wolken ausfallenden Niederschlag schließt sich der für den Energiehaushalt der Erde für das Leben so wichtige Kreislauf des Wassers.

Der Einfluss der Wolken auf den solaren Strahlungsfluss variiert mit dem Einfallswinkel der Strahlung, mit der Wolkengattung, dem Bedeckungsgrad und der Dicke und Dichte von Wolken. Wolken streuen und absorbieren die kurzwellige Sonnenstrahlung und schwächen damit die Globalstrahlung. Ein Teil der in Wolken gestreuten Strahlung wird als diffuse Strahlung in den Weltenraum reflektiert. Der Rest gelangt als diffuse Transmission zur Erdoberfläche. Bei einer geschlossenen Wolkendecke werden im Jahresmittel nur etwa 20 % bis 25 % der an ihrer Obergrenze einfallenden Globalstrahlung hindurch gelassen.

10.1.1 Messgrößen der Wolken

Höhe der Wolkenuntergrenze

Die Kenntnis Höhe der Wolkenuntergrenze trägt neben der Sichtweite in vielfacher Weise wesentlich zur Flugsicherheit bei. Sicht- oder Instrumentenflugregeln in den verschiedenen Lufträumen oder An- und Abflüge werden durch die Höhe der Wolkenuntergrenze und der Sichtweite bestimmt. Die Einstufung im GAFOR-Code und die Festlegung des Colour Code (in der militärischen Fliegerei) erfolgen neben der Sichtweite mit der sog. Hauptwolkenuntergrenze (ceiling). Die Entscheidungshöhe wird ebenfalls durch die ceiling festgelegt. Dabei haben sich die Grenzen in den letzten Jahrzehnten mit verbesserter Technik im Luftverkehr immer weiter nach unten verschoben, wodurch die Anforderungen an die Genauigkeit der Angabe der Wolkenuntergrenze immer größer wurden.

Bedeckungsgrad

Es ist zwar möglich, den Bedeckungsgrad zu messen, aber auch heute noch eine messtechnisch große Herausforderung, die dann nur bedingt brauchbare Informationen liefert, wenn mehrere Wolkenschichten erfasst werden sollten. Dabei werden 180°-Himmelskameras („All-Sky-Kameras“) zur Bestimmung des Wolkenbedeckungsgrades eingesetzt, die durch eine spezielle Optik den gesamten oberen Halbraum fotografieren. Daraus wird dann mit verschiedenen Algorithmen der Wolkenbedeckungsgrad abgeleitet. Im Routinedienst bleibt es wohl auch in naher Zukunft bei einer Schätzung durch den Wetterbeobachter.

Im DWD wird zur automatischen Ermittlung des Wolkenbedeckungsgrades der AWO-Algorithmus eingesetzt. Er basiert auf dem ASOS-Algorithmus des amerikanischen Wetterdienstes und nutzt die Wolkenhöhenmessungen der Ceilometer (siehe 10.3.1) als Input. Der Bedeckungsgrad wird aus den in der vergangenen Stunde am Standort von den Wolkenhöhenmessern detektierten Wolkenschichten abgeleitet. Dadurch wird die räumliche Integration, mit der ein Wetterbeobachter den Bedeckungsgrad ermittelt durch eine zeitliche Integration ersetzt.

Wolkenobergrenze

Alle im Einsatz befindlichen Messgeräte erfassen die Obergrenze nur bedingt, d. h. es gibt kein zufriedenstellendes Ergebnis. Daher muss insbesondere im Flugwetterdienst, wo die Kenntnis dieser Angabe von Bedeutung ist, diese aus anderen Informationen (Satellitendaten, Radardaten, Flugzeugmeldung, Radiosondenaufstiege, Bergstationen) abgeleitet werden.

Art der Bewölkung (Wolkengattung)

Für sie gibt es bis heute keine Messtechnik, daher muss diese nach wie vor durch einen Beobachter bestimmt werden. Mit Hilfe der digitalen Bildverarbeitung ist es allerdings, neben der Erfassung des Bedeckungsgrades möglich, mit statistischen Hilfsmitteln eine automatische Wolkenklassifikation durchzuführen.

10.1.2 Maßeinheiten der Wolkenuntergrenze

Die Wolkenhöhen werden grundsätzlich in der Einheit Meter bestimmt. Im Flugwetterdienst werden die Höhen größtenteils noch in Fuß angegeben. Da die Längeneinheit Fuß von dem angelsächsischen Yard (*yd*) abgeleitet ist, ist diese Maßeinheit in Tabelle 10.1 der Vollständigkeit halber mit angegeben, obwohl sie in der Praxis keine Bedeutung mehr hat.

Tab. 10.1 Umrechnung von Längeneinheiten

	Meter (m)	Fuß (ft)	Yard (yd)
1 Meter	–	3,2808	1,0936
1 Fuß	0,3048	–	0,3333
1 Yard	0,9144	3	–
Faustformel			
1 Fuß	3/10		
1 m		10/3	

10.2 Allgemeine Messprinzipien zur Messung der Wolkenuntergrenze

Bei der Bestimmung der Wolkenuntergrenze unterscheidet man zwischen Schätzung und Messung. Dabei kommt der Schätzung der Wolkenuntergrenze, obwohl sie gewissen subjektiven Einflüssen unterliegt, neben der Messung noch immer eine wichtige Rolle zu, da auch moderne Messgeräte nicht das gesamte Wolkenbild wiedergeben können und so der Wetterbeobachter gefordert ist.

Wird die Untergrenze als die Zone betrachtet, in der die Lichtschwächung durch Streuung und Reflexion an Wassertropfchen oder Eiskristallen erfolgt, so wird klar, dass diese Untergrenze oft nicht eindeutig bestimmt werden kann, weil sie unscharf ist und meist nicht eben (speziell bei tiefen Wolken) auftritt. Das Reflexionsvermögen ist nämlich ein Funktion vieler Faktoren wie Tröpfchengröße und -Anzahl (Wassergehalt), Dicke der Wolke, Richtung vom Messgerät zur Wolke und Wellenlängenabhängigkeit. Zusätzlich unterschiedlich sind die Streu- und Absorptionseigenschaften von Wassertropfen und Eiskristallen und daher unterschiedlich auch die optischen Eigenschaften von Flüssigwasser- und Eiswolkenpartikel.

Die Lichtschwächung durch Streuung und Reflexion betrifft nicht nur die Messung der Wolkenuntergrenze, sondern in unterschiedlicher Weise auch Sichtmessgeräte (siehe 13.3), die Strahlungsmessgeräte (siehe 14.3) und teilweise auch optische Niederschlagssensoren (siehe 11.3.3). Da der Lichtverlust durch Streuung im sichtbaren Bereich im Vergleich mit infrarotem (IR-)Licht deutlich reduziert ist, werden diese Sensoren oftmals mit IR-Sensoren ausgestattet.

Da in den meteorologischen Routinemessnetzen die „Partikel-/Aerosolverteilung“ jedoch nicht erfasst wird, müssen theoretische Überlegungen von Rayleigh und Mie herangezogen werden. In der Atmosphäre kommen Rayleigh- und Mie-Streuung immer gemeinsam vor.

Die **Theorie von RAYLEIGH** (J. W. Rayleigh, 1842–1919) beschreibt die Streuung elektromagnetischer Wellen an kugelförmigen Teilchen, deren Durchmesser wesentlich kleiner als die Wellenlänge λ ist. Diese Bedingung ist bei der Streuung von Licht an Molekülen der Luft erfüllt (bei Eis kann allerdings nicht unbedingt von einer Kugelform ausgegangen werden). Das **Gesetz von RAYLEIGH** lautet (vereinfacht)

$$\alpha_{\lambda} = \frac{1}{\lambda^4} \quad (10.1)$$

mit α_{λ} = Streukoeffizient
 λ = Wellenlänge (μm)

Es besagt, dass die Streufunktion bzw. der Streukoeffizient der 4. Potenz der Wellenlänge umgekehrt proportional ist, d. h. bei der Rayleigh-Streuung werden die kürzeren Wellenlängen stärker gestreut. Die Streuteile für Vorwärts- und Rückwärtsstreuung sind gleich groß. Licht im sichtbaren Bereich und Infrarotlicht unterscheiden sich in ihrer Frequenz und damit auch in ihren Wellenlängen.

Die **Theorie von MIE** (Gustav A.L. Mie, 1868–1957) beschreibt dagegen die Streuung elektromagnetischer Wellen an (kugelförmigen) Wolkenelementen (10 μm bis 100 μm), deren Durchmesser in etwa der Wellenlänge der auftreffenden Strahlung entspricht. Nach der Theorie von Mie ist die Streuung umgekehrt proportional λ^n , wobei den durchschnittlichen Verhältnissen in der Atmosphäre $n = 1,3$ entspricht, d. h. bei der Mie-Streuung besteht im Gegensatz zur Rayleigh-Streuung nur eine schwache Abhängigkeit von der Wellenlänge, dagegen eine starke von den Materialeigenschaften der streuenden Teilchen. Außerdem ist die gestreute Strahlung hauptsächlich noch vorn (Vorwärtsstreuung) gerichtet.

In der Praxis ist die Mie-Streuung deutlich größer. Vor allem nach Naturkatastrophen wie Vulkanausbrüche ist diese zusätzliche Extinktion besonders stark. Bei noch größeren Teilchen, die die Wellenlänge deutlich überschreiten, gibt es überhaupt keine Wellenlängenabhängigkeit mehr.

In den Wetterdiensten werden heutzutage meist die nachfolgend beschriebenen, zwei unterschiedlichen Messprinzipien zur Messung der Höhe der Wolkenuntergrenze genutzt.

10.2.1 Messungen der Laufzeit von Laserimpulsen

Eine Reihe von meteorologischen Messgeräten basieren seit vielen Jahren auf der LASER-Technik (LASER- Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Die Übersetzung bedeutet so viel wie: Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung. Die besonderen Eigenschaften von Laserstrahlen, die sich stark von Licht aus klassischen Lichtquellen unterscheiden sind

- ein sehr enges Frequenzspektrum, d. h. Laserlicht hat nur eine Farbe, ist also monochromatisch, mit hoher Energiedichte,
- Laserstrahlen sind auch über größere Entfernungen fast noch parallele, scharf gebündelte Lichtstrahlen, die sich mit optischen Linsen bündeln lassen und
- große Kohärenzlänge (Lichtwellen eines Strahls schwingen im gleichen Takt).

Es gibt unterschiedliche LASER-Arten, die hauptsächlich nach ihrem aktiven Material kategorisiert und benannt werden. In der meteorologischen Messtechnik sind meist

- Gaslaser, meist Gasgemische bei denen ein Gas das aktive Medium ist,
- Festkörperlaser, die ersten Lasertypen überhaupt, bestehend aus Kristallen oder Gläsern,
- Halbleiter-Laser (Laserdiode).

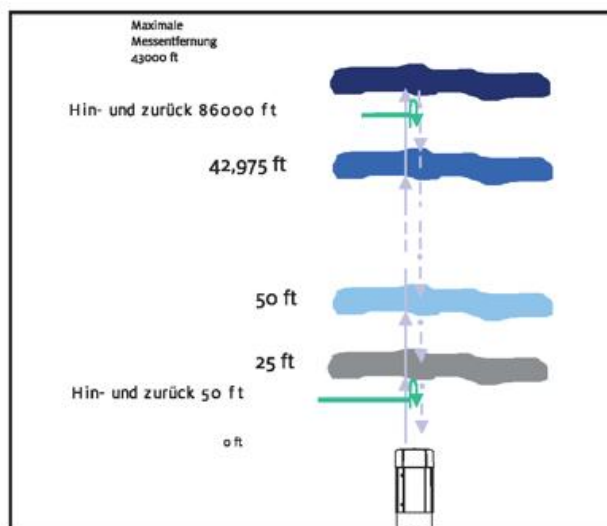
Seit Einstein weiß man, dass es drei Wechselwirkungen zwischen der elektromagnetischen Strahlung und einem Atom gibt, nämlich

- die Absorption von Photonen,
- die spontane und Emission von Elektronen,
- die induzierte Emission von Elektronen [11].

Das Laserprinzip beruht auf der Anregung von Atomen, indem Elektronen auf ein höheres Niveau gehoben werden. Dafür gibt es unterschiedliche Methoden.

Die optische Abstandsmessung in der meteorologischen Messtechnik mittels LIDAR (Light Detection and Ranging), ist eine Weiterentwicklung der Lasertechnik und eine dem Radar verwandte Methode. Dabei wird mit Hilfe kurzer Laserimpulse im nahen Infrarotbereich (NIR-Bereich) die Atmosphäre vom Boden bis in große Höhen vertikal abgetastet. An Aerosolschichten und Wolken(-tröpfchen) wird mehr Licht zurückgestreut als an kleinen Luftmolekülen. Dieser reflektierte Anteil wird vom Empfänger aufgenommen, Laufzeit und Intensität des rückgestreuten Lichtsignals werden analysiert. Aus der Laufzeit werden in einem Mikroprozessor die zurückgelegte Entfernung und damit die Wolkenuntergrenze berechnet.

Abb.10.1 LIDAR-Funktionsprinzip



Die Entfernung zur Wolkenuntergrenze h ergibt sich also aus

$$h = \frac{c \cdot t}{2} \quad (10.2)$$

mit c = Lichtgeschwindigkeit
 t = Zeit zwischen Aussenden und Empfang eines Lichtpulses

Aufgrund der Forderung nach der Augensicherheit des Gerätes darf die Ausgangsleistung von Laserdioden nur sehr klein sein. Die zu detektierenden Impulse sind daher (besonders von hohen Wolken) sehr schwach. So kann das Rauschen des Empfängers stärker sein als eine einzelne Amplitude des Lichtimpulses. Es müssen daher mehrere Impulse addiert werden, bis ein signifikantes Signal den Rauschpegel überragt. Je mehr Impulse addiert werden, desto günstiger wird das Signal-Rausch-Verhältnis.

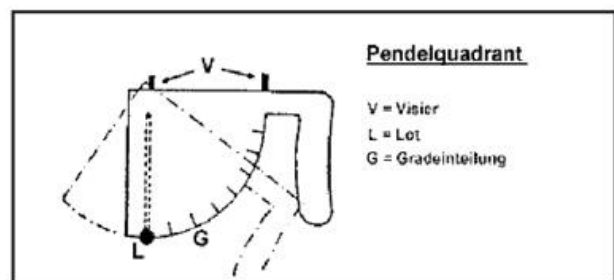
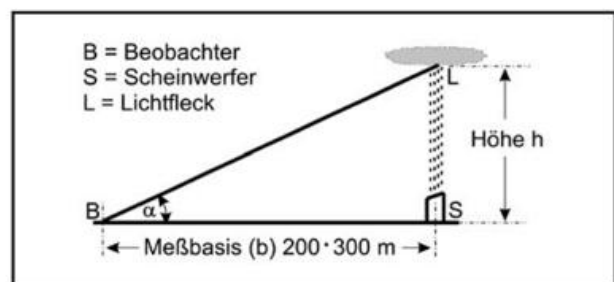
Sicherheitshinweise zum Umgang mit Laser siehe Anhang 6.2.

LIDAR-Systeme wurden ursprünglich zur automatischen Messung der Wolkenhöhe bzw. der Wolkenuntergrenze beschafft und konfiguriert, vor allem zur Messung von Wolken aus Wasser und Eis. Seit vielen Jahren werden LIDAR-Systeme auch in der Wissenschaft zur Erforschung von atmosphärischen Partikeln verwendet. Die Eignung von Ceilometern zur Partikelmessung wird im Rahmen eines Projektes an den Meteorologischen Observatorien des DWD auf dem Hohenpeißenberg (MOHP) und in Lindenberg (MOL) untersucht. Ein Ceilometer ist im Prinzip ein leistungsschwaches, aber kostengünstiges LIDAR, mit einem nach oben gerichteten Lichtstrahl.

10.2.2 Messungen mit dem Nachtwolkenscheinwerfer/Ceilometer

In früheren Zeiten waren Wolkenhöhenmesser starke Scheinwerfer, die einen gebündelten Lichtstrahl senkrecht nach oben abstrahlten, der an der Wolkenuntergrenze einen Lichtfleck erzeugte, der von einer Beobachtungsstation in einer bekannten Entfernung vom Scheinwerfer aus mit einem Pendelquadranten angepeilt wurde.

Abb. 10.2 Messprinzip Nachtwolkenscheinwerfer



Der an der Bodenstation gemessene Winkel zwischen der Horizontalen und der Sichtlinie zum Lichtfleck diente zur Berechnung der Höhe der Wolkenuntergrenze. Mit dem gemessenen Winkel α und der bekannten Basislänge b kann

die Höhe der Wolkenuntergrenze mit Hilfe der trigonometrischen Beziehung

Abb. 10.3 Funktionsprinzip LD 40 (Vaisala)

$$h = b \cdot \tan \alpha \quad (10.3)$$

mit b = Abstand zwischen Sender und Beobachter/Empfänger

berechnet werden. Mit der Formel kann eine Tabelle erstellt werden, aus der mit Hilfe des gemessenen Winkels die Höhe direkt abgelesen werden kann, wenn zwischen dem Standort des Beobachters und dem Nachtwolken Scheinwerfer eine feste Basislänge von *200 m bis 300 m* festgelegt ist. Diese Methode ist, wenn normales Licht verwendet wird nur nachts und am Tag nur bei starker Bewölkung möglich.

Wird anstelle eines einfachen Scheinwerfers Impulslicht oder moduliertes Licht und ein photoelektrischer Empfänger eingesetzt, kann dieses Messprinzip auch tagsüber eingesetzt werden. Impulslicht wird von einem Sender abgestrahlt und der Lichtfleck wird von einem, in einem festgelegten Abstand stehenden Empfänger mit einer Photodiode (siehe 6.3) abgetastet. Auch in diesem Fall ist die trigonometrische Methode (10.3) die Grundlage der Berechnung.

Vorteil dieser Methode ist der geringe Geräteaufwand mit dem Wolkenhöhen bis etwa *3000 m* gemessen werden können. Wolkenhöhenmesser wurden allerdings in der Vergangenheit immer mehr durch das LASER-Prinzip ersetzt.

10.3 Sensoren/Messgeräte

10.3.1 Laserceilometer

LD40 „Tropopauser“

Der LASER – Ceilometer LD40 der Fa. Vaisala ist ein Wolkenhöhenmesser, der nach dem Prinzip der Messung der Laufzeit des Lichtes arbeitet (LIDAR). Bei den im DWD eingesetzten Sensoren sind Sender und Empfänger zusammen in einem Gehäuse untergebracht, wobei die optischen Achsen von Sender und Empfänger parallel verlaufen, durch die Divergenz des Lichtstrahls jedoch sich am Lichtfleck überlappen, da sonst keine Impulse in den Empfänger eingehen würden. Dadurch, dass je eine Achse für emittiertes und empfangenes Licht zur Verfügung steht, ist eine permanente Messung möglich.

Da die Laufgeschwindigkeit des Lichts bekannt ist, kann die Entfernung der Reflexionsfläche (Wolkenuntergrenze) aus der Laufzeit zwischen Aussendung und Empfang der Signale abgeleitet werden. Neben diesen Messdaten sind im Datentelegramm auch Informationen über den maximalen Detektionsbereich, Messwerte zur vertikalen Sichtweite und auch Informationen über die LASER-Leistung und Empfängerempfindlichkeit enthalten.

Tab. 10.3 Spezifikationen Empfänger LD40 (Vaisala)

Empfänger	Si-Avalanche-Photodiode*
Messbereich	25 bis 43.000 ft (5 bis 3.000 m bzw. 15.000 m)
Auflösung/Messgenauigkeit	±25 ft bzw. 7,5 m
Messrate und Datenübertragungsrate	4 pro Minute
Detektion	bis zu 3 Wolkenschichten
Stromversorgung	230 V AC Elektronik 20 W Scheiben- und Linsenheizung 2x100 W Innenheizung 2x100 W Scheibengebläse 80 W

*Avalanche engl. = Lawine => hohe Empfindlichkeit auch bei schwachen Signalen

Funktionsbeschreibung Gesamtgerät:

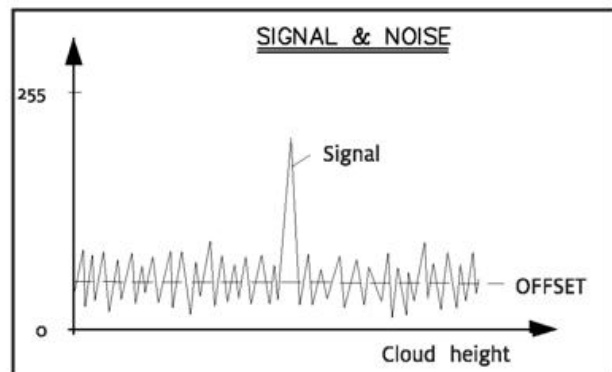
Der Sender startet alle 15 s einen neuen Messalgorithmus. Durch die Photodiode werden 30.000 bis 65.000 reflektierte Signale gesammelt. Die genaue Zahl ist von der Impulsdauer, also von der Rückstredauer abhängig. Bei vielen starken Rückstreusignalen (also aus kurzer Entfernung) ist der Speicher entsprechend schnell voll. Bei vielen schwachen Signalen (also aus großer Entfernung) sind mehr Signale für die Befüllung der 2.048 verschiedenen Speicher (möglichen Höhen) erforderlich und es dauert entsprechend länger. Als Nebeneffekt wird durch die Aufsummierung das Empfängerrauschen auch durch schwache Signale überschritten.

Jeweils nach Abschluss der Messroutine werden die Auswertung der zurück gestreuten Signale und die Bestimmung der Wolkenhöhe durch den Mikroprozessor durchgeführt.

Der maximale Höhenmessbereich (MROD) des LD40 ergibt sich aus den 2.048 Inkrementen, aufgeteilt in zeitlichen Abständen von 50 ns bzw. 25 ft (1 ns entspricht 1 ft bei einfachem Weg = „Lichtfuß“), also 51.200 ft. Da das Rückstreusignal von höheren Wolken aber zu schwach ist, ist der Höhenmessbereich real auf 43.000 ft beschränkt. Jedes Wolkenhöheninkrement entspricht einer bestimmten Lauf- und Durchlasszeit des sich fortpflanzenden Lichts. Über einen Flash-ADC wird nacheinander jedes einzelne Inkrement eines rückgestreuten Signalpakets digitalisiert, nach ihrer Höhe sortiert und jeweils zeitgleiche Signale (der 2.048 möglichen Höhen) durch die Elektronik aufsummiert und in einem Zwischenspeicher abgelegt. Danach erfolgt die Summenbildung gleicher Inkremente der im Zwischenspeicher abgelegten zu den im Hauptspeicher bereits summierten Signalamplituden. Am Ende eines Messzyklus liegen die integrierten Rückstreuamplituden (A) aller Wolkenhöheninkremente als Funktion der Wolkenhöhe (H) $A = f(H)$ vor, die dann für wissenschaftliche Zwecke verfügbar sind.

Die vertikale Sichtweite „VERTI“, sie entspricht näherungsweise dem, was das menschliche Auge erfassen kann. Sie wird durch Wolken, Nebel, Dunst, Regen oder Schnee begrenzt und im Datentelegramm in allen Fällen mitgeteilt, bei denen der maximale Messbereich von 43.000 ft nicht überschritten wird.

Abb. 10.4 Signale des LD40 (Vaisala)



Die Spannung der Signale liegen als Funktion $U = f(t)$ vor, welche dem höhenabhängigen Amplitudenverlauf $A = f(H)$ entspricht.

Die sortierten Signale werden durch die 68.000 CPU (Prozessor) übernommen und die Funktion nach den Kriterien Amplituden, Signalanstiege und Signalabfälle untersucht und daraus die verschiedenen meteorologischen Phänomene im Messbereich ermittelt, und zwar

- jeweilige Eindringtiefe,
- Höhe der Wolkenuntergrenzen (maximal 3),
- vertikale Sichtweite („VERTI“),
- maximaler Messbereich („MROD“),
- fallender Niederschlag ja/nein, Nebel, Dunst

Die CPU erstellt aus den ermittelten Daten das Datentelegramm und sendet dieses an die Hauptschnittstelle.

Findet der Wolkenhöhenalgorithmus Hinweise auf Niederschlag, meldet er eine Zahl zwischen 1= leichter und 3 = starker Niederschlag, 0 = ohne Niederschlag.

Abb. 10.5 Laserceilometer LD40 „Tropopauser“ (Foto:Vaisala)



Bei Niederschlag „Ja“ wird das Scheibengebläse eingeschaltet, um diesen von den Gerätescheiben abzublasen. Ohne Niederschlag ist das Gebläse entweder jeweils 3 min ein- und 4 min ausgeschaltet oder permanent eingeschaltet (je nach Einstellung).

Der Sensor für die Scheibenheizung ist ein temperaturabhängiger Widerstand. Zwischen der oberen Scheibe und der Senderlinse ist (neben der Linsenheizung) noch ein Sensor für die Scheibenrückstreuung – eine Photodiode – ange-

bracht. Mit ihrer Hilfe kann auf den Scheibenverschmutzungsgrad geschlossen werden.

Abb. 10.6 Sende- und Empfangsmodul LD40 (Vaisala)



1 = Heizelement
2 = Temperatursensor, Netz-Ein-Anzeige PCB 1489

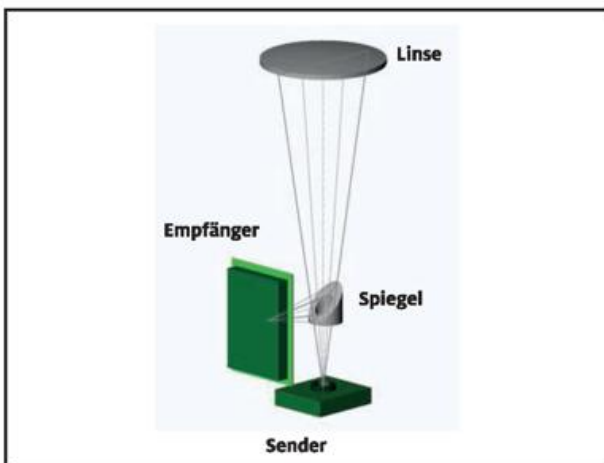
Eine kleine Optik davor sammelt die Lichtimpulse, die von der Scheibe zurückgestreut werden. Während der Wolkenhöhenmessung wird die Laserdiode als Lichtquelle für die Scheibenrückstreuung genutzt.

Das doppelwandige Gehäuse ist mit einer thermostategesteuerten Heizung ausgestattet und erlaubt den Einsatz unter verschiedensten klimatischen Bedingungen.

CL31

Dieses Ceilometer der 2. Generation der Fa. Vaisala hat eine hoch entwickelte Einzellinsenoptik, die auch bei sehr geringen Höhen Messungen ermöglicht. Die Messung startet bei 0 m Höhe. Für die Überlappung sorgt eine Linse, durch die im Innenbereich der Laserstrahl nach außen tritt und im Außenbereich der reflektierte Lichtstrahl herein kommt. Weiterhin reflektiert ein Spiegel mit einem Loch in der Mitte die eingehenden Rückstreusignale zum Empfängerteil (Abb. 10.7).

Abb. 10.7 Sender des CL31 (Foto: Vaisala)



Es können bis zu bis 3 Schichten erfasst werden, wobei auch dünne Wolkenschichten unter dichter Wolkendecke erfassbar sind. Die vertikaler Sichtweite und die Wolkenerfassung sind auch während Niederschlägen zuverlässig messbar.

Abb. 10.8 Laserceilometer CL31 (Foto: Vaisala)



Zusätzlich werden Statusinformationen gemeldet. Zuverlässiger Betrieb ist bei jedem Wetter gewährleistet. Modulares Design vereinfacht Installation und Wartung. Umfassende Selbstdiagnose mit Fehleranalyse.

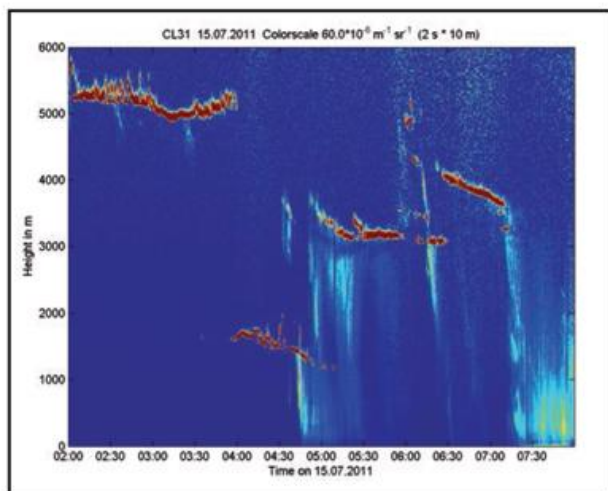
Tab. 10.4 Spezifikationen CL31 (Vaisala)

Laserdiode	InGaAs* Klasse 1M (IEC/EN 60825-1)
Wellenlänge	0,910 µm
Messbereich	0 bis 7,5 km (0 bis 25.000 ft)
Pulsfrequenz	10 kHz
Impulsdauer	100 ns
Auflösung	5 m (10 ft) (Einheiten wählbar)
Messzyklus	programmierbar, 2 bis 120 s
Einsatzbedingungen	-40 bis +60 °C, 0 bis 100 %, ≤55 m s ⁻¹
Versorgungsspannung	100/115/230 V AC
Leistungsaufnahme	max. 310 W einschließlich Heizung

* Indium Gallium Arsenid (Halbleiter-Laser)

Das Laserceilometer CL31 ist im automatischen Beobachtungssystem MIDAS IV/AviMeT (siehe 18.4) und u. a. bei der Deutschen Marine auf 5 Korvetten im Einsatz.

Abb. 10.9 Beispiel Registrierung des CL31 (Foto: Vaisala)



Vergleich von Laserceilometer LD40 und CL31

Im Rahmen der Bewertung der Luftqualität in städtischen Gebieten wurden im Mai 2007 in Augsburg 1 LD40 und 2 CL31 Laserceilometer der Fa. Vaisala zur Beobachtung der vertikalen Aerosolverteilung eingesetzt. Aufgrund unterschiedlicher Technik beider Geräte zeigte sich in den untersten 200 m über Grund, dass das Ein-Linsen-System des CL31 besser die Verteilung des Aerosols erfasst. Weitere Unterschiede in größeren Höhen resultieren aus den unterschiedlichen Wellenlängen der beiden Geräte.

CHM 15k

Die Sensoren Laserceilometer LD40 von Vaisala und CHM 15k von Jenoptik haben nahezu das gleiche Funktionsprinzip. Unterschiede sind u. a. in der Verwendung eines Festkörperlaser beim CHM 15k mit anderer Wellenlänge und einer sehr hohen Leistungsdichte.

Abb. 10.10 Laserceilometer CHM 15k (Foto: Jenoptik)



Aus den erhaltenen Daten der Vertikalsondierung werden die Höhenzuordnung – bis maximal 15 000 m – der Aerosol- oder Wolkenuntergrenzen und die vertikale Sichtweite ermittelt. Weiterhin werden Mischungsschichthöhe, Nebelereignisse und ein einfacher Niederschlagstyp-Index ausgegeben.

Tab. 10.5 Spezifikationen CHM 15k (Jenoptik)

Messprinzip	Optisch (LIDAR)
Lichtquelle	Nd: YAG* Festkörperlaser, Laser-schutzklasse 1M n. DIN EN 60825-1
Wellenlänge	1,064 μm
Messbereich	15 bis 15 000 m (50 bis 50000 ft)
Auflösung	15 m (50 ft)
Genauigkeit	± 5 m (16 ft)
Messzeit (programmierbar)	5 s bis 60 min, typisch 30 s
Bandbreite	0,0001 μm
Pulsdauer	1 bis 5 ns
Pulswiederholrate	5 bis 7 kHz
Strahldurchmesser ($1/e^2$)	aufgeweitet: 90 mm
Laserdivergenz	0,3 mrad
Langzeitstabilität	<10 % über 12 Monate
Einsatzbedingungen	-40 bis +55 °C, 0 bis 100 %
Versorgungsspannung	230/110 V ± 10 %
Leistungsaufnahme	250 W, 800 W (bei max. Heizung)

* Nd: YAG – Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Kristall

Bei der Signalaufnahme im CHM 15k kommt ein Photonen zählender Photodetektor zum Einsatz. Die Vorteile bei diesem Verfahren liegen in der sehr empfindlichen Nachweistechnik gegenüber Analogmessverfahren und können besonders in Bereichen mit geringer Zählrate genutzt werden. Dies betrifft sowohl das Nutzsignal als auch „Rauschsignale“ z. B. des Hintergrundlichtes.

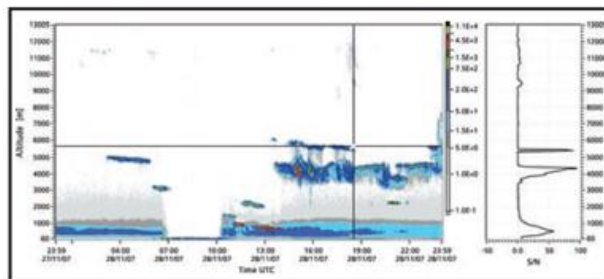
Abb. 10.11 Laserceilometer CHM 15k, Laseraustritt (Foto: Jenoptik)



1 Laseraustritt 2 Gehäusehaube 3 Glasscheiben

Zur Bestimmung der **Wolkenuntergrenze** werden die empfangene und die entfernungskorrigierte Rückstreuleistung betrachtet. Der Algorithmus detektiert eine Wolke, sobald die Kurve einen bestimmten Schwellenwert übersteigt. Dann beginnt eine Durchsuchung unterhalb des Schwellenwertes zur Bestimmung der Wolkenunterkante und oberhalb zur Bestimmung der Extinktion der Wolke.

Abb. 10.12 Mehrere Wolken-schichten, konvertiert RGB (Jenoptik)



Die **Wolkeneindringtiefe** wird als Differenz zwischen dem Überschreiten und dem Unterschreiten des Schwellenwertes durch den Signalverlauf definiert. Beide Werte ergeben die Standardabweichung der Eindringtiefe einer Wolken-schicht.

Der **maximale Detektionsbereich** entspricht der maximalen Entfernung, aus der noch signifikante Signale gemessen werden. Er ergibt sich aus dem Signal/Rauschverhältnis in Abhängigkeit von der Entfernung. In Höhen außerhalb der Grenzschicht werden signifikante Signale nur noch durch Wolken erzeugt. Der maximale Detektionsbereich wird über die Eindringtiefe der höchsten detektierbaren Wolken-schicht bestimmt.

Die Rayleigh-Streuung (siehe 10.2) an Luftmolekülen ist bei einer Wellenlänge von 1,064 μm unbedeutend. Aus dem Signalverlauf stellen sich die Schichten als Signalaus-schläge mit bestimmten Intensitäten dar. Die Entfernung der Aero-

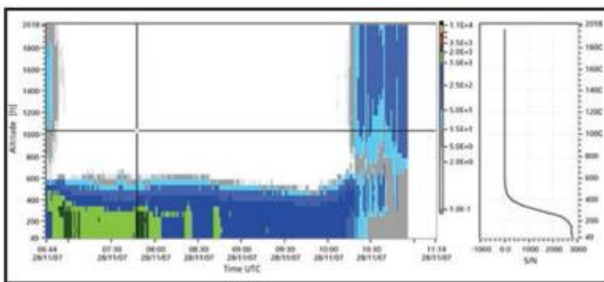
solschichten wird über die Laufzeit des ausgesandten Lichtpulses bestimmt.

Die Bestimmung der **vertikalen Sichtweite** (VOR – Vertical Optical Range) erfolgt gemäß einer VDI. Ausgangspunkt sind die Extinktionswerte α . Die Integration über diese Werte wird bis zu einem Schwellenwert von 3 durchgeführt. Die Entfernung, bei der der Schwellenwert 3 erreicht wird, ist definitionsgemäß die vertikale Sichtweite VOR

$$\int_0^{\text{VOR}} \alpha(r) dr = 3 \quad (10.4)$$

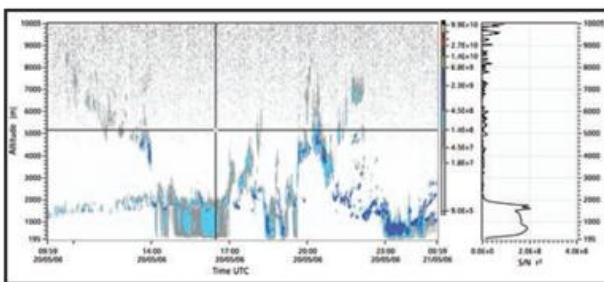
Sowohl **Nebel** als auch **Arten von Niederschlag** werden als Mehrfachstreuung erkannt. Aufgrund eines engen Gesichtsfeldes der Wolkenhöhenmesser werden typischerweise nur Einfachstreuungsprozesse als Signalausgabe betrachtet. Insbesondere in den unteren Höhenschichten, unterhalb von 400 m Höhe werden durch starke atmosphärische Trübungen stärkere Signale gemessen als sie mit Einfachstreuungsprozessen auftreten könnten.

Abb. 10.13 Nebel, konvertiert RGB (Jenoptik)



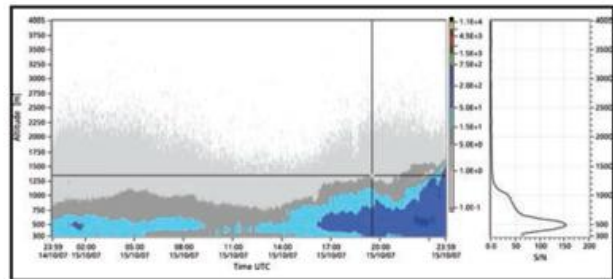
Ein Integral über dem Signal wird in unteren Höhenbereichen zur Auswertung und Unterscheidung von Nebel und Niederschlag genutzt.

Abb. 10.14 Regen, konvertiert RGB (Jenoptik)



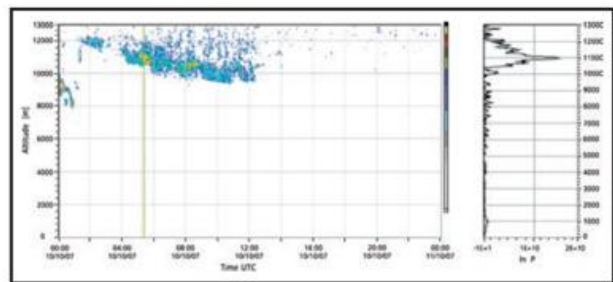
Vom Boden emittierte Abgase verteilen sich abhängig von atmosphärischen Gegebenheiten bis in bestimmte Höhen der Atmosphäre. Die daraus resultierende Aerosolschicht weist eine typische Signatur im Rückstreusignal auf und die Obergrenze wird als **Mischungsschichthöhe** bezeichnet.

Abb. 10.15 Grenzschicht PBL, konvertiert RGB (Jenoptik)



Das Gehäuse des CHM15k besteht aus korrosionsfestem Aluminium und ist zweischalig aufgebaut, kombiniert mit integriertem Lüfter und automatischem Heizsystem. Die Außenschale hat die Aufgabe, die äußeren Einflüsse wie Sonnenstrahlung, Wind, Regen und Schnee auf das die Messenheit tragende Innengehäuse zu dämpfen. Die zwischen Außenschale und Innengehäuse vorhandene Kaminwirkung unterstützt diesen Prozess.

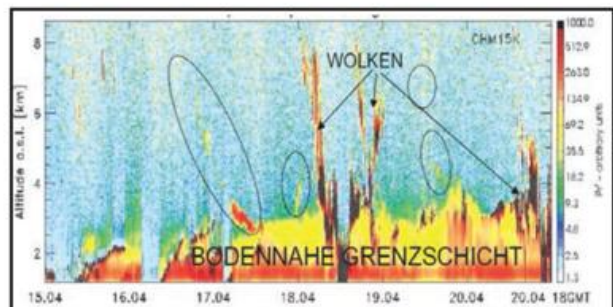
Abb. 10.16 Cirrusbewölkung, konvertiert RGB (Jenoptik)



Die im DWD verbreitet eingesetzten Ceilometer CHM 15k können bei klarem Wetter qualitativ Aerosol- und Staubteilchen bis in einige Kilometer Höhe entdecken. Bei dichten Wolken allerdings werden die Signale stark absorbiert, so dass dann aus dem darüber liegenden Höhenbereich kein Rückstreusignal mehr empfangen werden kann.

Ein weiteres Beispiel, aufgenommen mit dem Laserceilometer CHM 15k am MOHP stammt vom April 2010, als der Vulkan Eyjafjallajökull (1666 m NHN) auf Island ausbrach und die Aschewolke auch über Deutschland zog.

Abb. 10.17 Rückstreuintensität Ceilometer CHM 15k, April 2010 MOHP



Zunächst ist die bodennahe Grenzschicht gut erkennbar, in der sich durch Verkehr, Industrie und anderen Quellen die Abgase konzentrieren. Sie unterscheidet sich deutlich durch rötlich-gelbe Farben von dem darüber liegenden Bereich der Atmosphäre. Einkreist sind die vorbeidriftenden Luftschichten mit stark erhöhter Konzentration an Aerosolen bzw. Partikeln des Island-Vulkans. Besonders am 17.04. erkennt man die vormittags von anfangs etwa 6,5 km auf 2,5 km Höhe absinkenden Partikel. Ursache hierfür war hoher Luftdruck.

Auch Sandstürme sind mit diesem Ceilometer erfassbar. Am MOHP und am Schneefernerhaus (Teil der GAW, Globalstation Zugspitze/Hohenpeißenberg) wurden mit den dort aufgestellten Jenoptik-Ceilometern am 8. Juni 2010 erhöhte Rückstreckoeffizienten in der planetaren Grenzschicht und bis in eine Höhe von 4 km gemessen. Die erhöhte Rückstreuung war auf die Zunahme streuender Teilchen in der Atmosphäre zurückzuführen.

Dies war besonders im Tagesverlauf des 10. Juni zu beobachten. Zwischen 2 km und 4 km Höhe trat vor allem in den Abendstunden eine starke Zunahme der Rückstreuung auf, die unter den gegebenen Bedingungen plausibel mit vorhandenem Saharastaub erklärt werden konnten [24, 2010].

Im DWD werden auf Flughäfen (FWW) und an Wetterstationen (Wst I und II) der LD 40 der Fa. Vaisala und seit 2007 auch der CHM 15k der Fa. Jenoptik Systeme GmbH eingesetzt. Letzteres Gerät wurde 2011 zu CHM 15k-Nimbus umgebaut. Dabei wurde die komplette Windowsplattform gegen eine neue Elektronik umgerüstet und mit einem Linux-Betriebssystem ausgestattet.

Pflege und Kontrolle der Funktionstüchtigkeit

Die Pflege des Gehäuses und die schräggestellten Abdeckglasscheiben beim LD 40 müssen wenigstens ein Mal in der Woche mit Wasser (evtl. mit „Clearshield“ alle 3–4 Monate) und weichem Lappen geputzt werden, auch wenn kein Schmutz zu sehen ist, da schon ein unsichtbarer Schmierfilm die Messung stört. Ölflecken sind mit Alkohol zu entfernen.

Die Kontrolle der Funktion der Heizung kann mit der Hand vorgenommen werden. Ebenso die Belüftung prüfen, die Ventilation ist deutlich zu hören.

Beim CHM 15k können die Abstände der Reinigung der Abdeckscheiben größer sein, da bei flüssigen Niederschlägen durch eine stärkere Neigung der Scheiben eine gewisse Selbstreinigung erfolgt. Bei normaler Luftverunreinigung ist vom Hersteller empfohlen, im Abstand von 3 Monaten die Scheiben mit einem handelsüblichen Glasreiniger und einem weichen fusselfreien Tuch zu reinigen. Die Reinigungsintervalle müssen ansonsten aus der Erfahrung mit anderen Sensoren nach Bedarf festgelegt werden.

Auf der Rückseite des CHM 15k sind Lufteintrittsgitter die von Ablagerungen (Blätter usw.) freigehalten werden müssen. Die Funktionstüchtigkeit wird im Wesentlichen auch mit Hilfe von Augenbeobachtungen überprüft.

In der inneren Tür des CHM 15k ist ein Beutel mit Trockenmittel geklebt. Die Fa. Jenoptik schreibt in ihrer Wartungsanleitung als Empfehlung, den Beutel alle 2 Jahre zu wechseln. Allerdings wird davon ausgegangen, dass die innere Tür bei einer Wartung nicht geöffnet wird. Um den USB-Stick bei der Wartung zu wechseln, muss auch die Tür geöffnet werden, dies bedeutet eine wesentlich schnellere Sättigung des Trockenmittels. Ist die Kapazität des Trockenmittels erschöpft, so wird es weich wie „Pudding“ und muss ausgewechselt werden. Sollte der Beutel nicht gewechselt werden, so tritt irgendwann eine Durchfeuchtung auf, der Beutel wird undicht und leckt. Die austretende Feuchtigkeit tropft genau auf die Heizung und setzt u. U. Dämpfe frei. Die Dämpfe können sich auf Elektronik und der Optik niederschlagen und Schäden anrichten. Um ein Austreten der Feuchtigkeit aus den Beuteln zu verhindern, müssen diese rechtzeitig gewechselt werden. Der Wechselzyklus ist vorläufig auf 1 Jahr festgelegt. Sollte die Erfahrung zeigen, dass dies immer noch zu lang ist, dann ist der Zyklus ggf. nach eigenem Ermessen zu kürzen.

Das Gerät sollte wegen der Heizung immer am Netz bleiben, da es ansonsten feucht wird.

Wird das Gerät für längere Zeit nicht benötigt, sollte es in einem trockenem Raum gelagert werden (Temperatur $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$, maximale relative Feuchte 80 %).

Laserceilograph LD-WH M

Bei der Laser-Familie LD-WH der Fa. Vaisala (Impulsphysik) handelt es sich um kleine, handliche Laserceilographen, die sowohl für den stationären als auch für den mobilen Einsatz geeignet sind. Da die geringfügig unterschiedlich ausgestatteten Geräte vom gleichen Hersteller wie der LD40 stammen, gibt es viele Gemeinsamkeiten.

Die Messung erfolgt in allen Bereichen durch Aufzählen von vielen Einzelimpulsen, also so wie im Hauptbereich des stationären Lasers. Bei Betätigung des Startknopfes werden 4 Messroutinen ausgelöst.

Tab. 10.6 Spezifikationen LD-WH M (Vaisala, Impulsphysik)

Lichtquelle	InGaAs Laserdiode Laser Klasse 1
Wellenlänge	0,905 μm
Messbereich	25 bis 5000 ft
Messschritte / Auflösung	25 ft
Messzyklus	4 pro min
Impulsleistung	20 W
Leistung Linsenheizung Innenheizung	100 W 50 W
Einsatzbedingungen Wind (bei fester Montage)	-40 bis $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$, max. 100 % max. 40 m s^{-1}

Nach jedem Messzyklus erfolgt eine Selbstüberprüfung, Fehlermeldungen werden auf dem internen LC-Display angezeigt. Das Gerät ist ebenfalls mit Sonnenshutter ausgestattet.

Im mobilen Einsatz kann auf Akku-Betrieb umgeschaltet werden. Mit vollen Akkus sind ca. 16 Stunden Dauerbetrieb gewährleistet. Die Ladezeit der Akkus beträgt ca. 24 Stunden. Ist die Batteriespannung zu gering, schaltet sich das Gerät automatisch ab. Im mobilen Einsatz steht keine Heizung zur Verfügung, daher ist es nicht für den Dauerbetrieb ausgelegt. Dagegen ist es für den stationären Einsatz mit einer Heizung ausgestattet, die den Dauerbetrieb im Freien ermöglicht.

Abb. 10.18 LD-WH X 06, Messfeld HH-Sasel



Das Gerät wird beim DWD an einer Reihe von Flughäfen/Flugplätzen als auch an mobilen Messstationen und bei Messzügen des GeoInfoDBw, die nicht mit dem normalen Laser ausgestattet sind, genutzt. Eingesetzt wird das Gerät auch im Bereich der Marine der Bw auf

- zwei Einsatzgruppenversorgern (EGV),
- beim Flottenkommando Abt GeoInfoD, Glücksburg, 2 EA (als Verleihgerät) und
- bei der Marineoperationsschule, Fachbereich Nautik und Naturwissenschaften, Bremerhaven, zu Ausbildungszwecken

Abb. 10.19 Laser Ceilograph LD-WH M 03 (Marine der Bw)



Tab. 10.7 Spezifikationen LD-WH X 06 (Vaisala, Impulsphysik)

Lichtquelle	InGaAs Laserdiode Laser Klasse 1
Wellenlänge	0,905 $\mu\text{m} \pm 0,005 \mu\text{m}$
Impulsdauer	96 ns
Messbereich	25 bis 12000 ft
Messschritte / Auflösung	25 ft
Genauigkeit	$\pm 25 \text{ ft}$
Messzyklus	4 pro min
Impulsleistung	20 W
Leistung Linsenheizung Innenheizung	100 W 50 W
Einsatzbedingungen Wind (bei fester Montage)	-40 bis +55 °C, max. 100 % max. 40 m s ⁻¹
Versorgungsspannung	230 / 110 V $\pm 10 \%$

Pflege und Kontrolle der Funktionstüchtigkeit

Sie beschränkt sich auf das Reinigen der Scheiben mit einem Glasreiniger. Ansonsten muss der entsprechende Wartungsdienst in Anspruch genommen werden. Bei längerer Lagerung müssen die Akkus alle 3 Monate geladen werden.

10.3.2 Nachtwolkenscheinwerfer

Der Nachtwolkenscheinwerfer der Fa. Impulsphysik (Vaisala) ist nur noch vereinzelt zu finden und wird nur noch für Ersatzmessungen bei einem Defekt des Laserceilometers benutzt. Zur Anwendung siehe 10.2 Messprinzip.

Abb. 10.20 Ceilolux Nachtwolkenscheinwerfer (Impulsphysik, Vaisala)



Pflege und Kontrolle der Funktionstüchtigkeit

Die schräge Abdeckscheibe des Scheinwerfers muss regelmäßig gereinigt werden. Dazu eignen sich normalerweise übliche Haushaltsreiniger. Der Parabolspiegel darf nicht vom Beobachter gereinigt werden. Selbst ein weiches Tuch kann die überaus empfindliche Reflexionsschicht beeinflussen und damit zu evtl. Leistungsminderungen führen. Tote Insekten werden mit einer speziellen Pinzette entfernt. Im Winter muss zusätzlich die Heizung überprüft werden.

10.4 Messunsicherheiten und Fehlerquellen

Grundsätzliche Probleme, praktisch aller Messmethoden zur Bestimmung der Wolkenuntergrenze sind

- das Reflexionsvermögen der Wolkenuntergrenze, abhängig von
 - Tröpfchengröße und -Anzahl (Wassergehalt),
 - Dicke der Wolke,
 - Vertikale Eindringtiefe,
- Richtung der Wolken zum Messgerät,
- Höhenfehler, wenn der Lichtstrahl nicht genau senkrecht ausgerichtet ist,
- Ableseungenauigkeiten/Messfehler beim Nachtwolkenscheinwerfer; bei einer Messbasis von 250 m ergibt
 - 1°-Fehler bei 40° Höhenwinkel: – 10 m / 33 ft
 - 1°-Fehler bei 80° Höhenwinkel: – 160 m / 530 ft

11. NIEDERSCHLAGSMESSUNG

11.1. Allgemeines

Unter dem Begriff Niederschlag versteht man in der Meteorologie die Ausscheidung von Wasser aus der Atmosphäre durch Kondensation von Wasserdampf in den flüssigen und/oder durch Sublimation in den festen Aggregatzustand. Er kann dann am Erdboden gemessen oder beobachtet werden. Zu den fallenden Niederschlägen gehören Sprühregen, Regen, gefrierender Regen, gefrierender Sprühregen, Eisregen, Schnee, Schneegriesel, Eisnadeln, Diamantstaub oder Polarschnee, Eiskörner, Reif- und Frostgraupel. Neben den fallenden Niederschlägen wird noch zwischen aufgewirbelten (z. B. Schneetreiben), abgelagerten (z. B. Schneedecke) und abgesetzten (z. B. Reif) Niederschlägen unterschieden.

Der Niederschlag ist eine der wichtigsten hydrometeorologischen Größen im Wasserkreislauf. Dem Niederschlag in seinen unterschiedlichen Aggregatzuständen (flüssig, fest oder beides) auf der Einnahmenseite stehen die Größen Verdunstung und Abfluss auf der Ausgabenseite gegenüber.

Die Anforderungen an die Niederschlagsmessung haben sich in den letzten Jahren erheblich geändert. Zum einen werden Messungen der Niederschlagshöhe in Echtzeit (online) benötigt, wozu die herkömmlichen Geräte nicht in der Lage sind. Zum anderen ist die genaue Bestimmung des Niederschlags und dessen Vorhersage volkswirtschaftlich von großer Bedeutung. Extreme Wettersituationen mit Starkniederschlägen wirken sich z. B. auf die Wasserenergiewirtschaft (Wasserhaushaltsberechnungen, hydrologische Planungen, Speichersteuerung) aus.

Im Rahmen der Hochwasservorhersage und des Katastrophenschutzes werden Starkniederschlagsstatistiken zur Bewertung von Extremereignissen und für Planungszwecke erstellt und den mit wasserwirtschaftlichen Aufgaben betrauten Bundes-, Landes- und kommunalen Behörden und Wasserwirtschaftsverbänden zur Verfügung gestellt. Die Messungen bilden zusammen mit den Niederschlagsvorhersagen eine wichtige Grundlage für die Abflussermittlung (Hochwassernachrichtendienst). Dazu gehören auch

Rasterwerte korrigierter täglicher Niederschlagshöhen zur Kalibrierung von Wasserhaushaltsmodellen. Die quantitative Niederschlagsvorhersage der Wettervorhersagemodelle zeigen darin z. T. noch erhebliche Schwächen.

Die Land- und Forstwirtschaft und das Verkehrswesen erwarten exakte Aussagen zum Niederschlag. Im Straßenwesen geht einerseits um die Organisation des Winterdienstes und andererseits auch um eine automatische Anzeige zur Geschwindigkeitsbegrenzung.

Das im Auftrag der WMO im DWD angesiedelte Weltzentrum für Niederschlagsklimatologie (WZN) analysiert, basierend auf der weltweit größten monatlichen Niederschlagsdatenbank den monatlichen Niederschlag auf den Landflächen der Erde sowie seine langfristigen Variationen und Trends.

11.1.1 Messgrößen des Niederschlages

Zur Charakterisierung der Niederschläge sind außer der Angabe der Niederschlagsart und -form (fest/flüssig) auch die nachstehenden Größen erforderlich

- Menge
- Intensität, auch bei Starkniederschlägen (Tab 11.1)
- Dauer (Beginn und Ende)
- Dichte (= Intensität/Zeiteinheit)

Aufgabe der Niederschlagsmessung ist die Feststellung dieser Größen. Hinzu kommt durch einige Sensoren mit einem ja/nein-Melder die Aussage ob Niederschlag fällt oder nicht. Bei allem wird aus messtechnischen Gründen nur ein kleiner Teil des Beobachtungsgebietes als Messfläche festgelegt und daraus auf die Gesamtfläche geschlossen.

Tab. 11.1 Niederschlagsintensität (Nomenklatur des DWD, VuB 3 BHB)

Ziffer	Bezeichnung	Intensität	
		Regen	Sprühregen
0	leichter Niederschlag	≤ 0,5 mm h ⁻¹	≤ 0,2 mm h ⁻¹
1	mittlerer Niederschlag	> 0,5 bis 4,0 mm h ⁻¹	> 0,2 bis 0,5 mm h ⁻¹
2	starker Niederschlag	> 4,1 mm h ⁻¹	> 0,5 mm h ⁻¹

Abhängig von der Art der Fragestellung sind mit den Messwerten folgenden Berechnungen durchzuführen:

- Einzel- und Summenwerte
- Maximalwerte, Durchschnittswerte, Mittelwerte bestimmter Zeiträumen
- Jahres- und Jahreszeitenwerte
- Tages- und Monatswerte
- Werte des hydrologischen Jahres (1.Nov – 31.Okt)

11.1.2 Maßeinheiten des Niederschlages

Die o.g. Messgrößen werden mit folgenden Maßeinheiten angegeben:

- Menge des Niederschlages (1 mm = 1 l m⁻²),
- Intensität der Niederschlages (mm h⁻¹ oder andere Zeiteinheit),

- Dauer des Niederschlags (min, h oder andere Zeitdauer),
- Örtliche (räumliche) Verteilung und
- Häufigkeit n , Jährlichkeit $T_n = 1/n$

Die kennzeichnenden Größen eines Niederschlagsereignisses sind **Höhe (Menge)** und **Dauer** des Niederschlags sowie die **Intensität** R , die folgendermaßen berechnet werden können.

Für die Niederschlagsmenge

$$V = A \cdot h \quad (11.1)$$

mit V = Volumen (in Liter)
 A = Bezugsfläche (1 m^2)
 h = Höhe des Niederschlags in mm

Da sich die Niederschlagsmenge V auf die Fläche A von 1 m^2 bezieht, entspricht 1 mm Niederschlagshöhe der Niederschlagsmenge von 1 l pro m^2 .

Für die Intensität R gilt

$$R = \frac{\Delta V}{A \Delta t} \quad (11.2)$$

mit ΔV = Volumen des gesammelten Niederschlags
 A = Auffangfläche
 Δt = Messdauer

Die **Niederschlagsintensität** ist definiert als die Niederschlagsmenge der vorhergehenden 60 Sekunden. Die **Menge** des Niederschlags wird durch die in Millimeter gemessene Wasserhöhe angegeben, die der Niederschlag auf einer waagrechten Fläche bilden würde, wenn nichts abfließen, versickern und verdunsten würde. Die **Intensität** und die **Niederschlagsdauer** sind die Folge der Niederschlagsart (z. B. Dauerregen oder Schauer).

Die **Niederschlagsdichte** ergibt sich aus der Division der Monatssumme des Niederschlags durch die Anzahl der Niederschlagstage. Hierbei können Berechnungen auch für andere Zeiträume (z. B. Niederschlagsmenge in 3 Stunden) durchgeführt werden.

11.2 Allgemeine Messprinzipien

Die Erwartungen an die Messprinzipien sind vielfältig. So soll eine Auflösung von $0,01 \text{ mm}$ Niederschlagshöhe möglich sein, um auch Niederschläge sehr geringer Intensität messen zu können. Die Erfassung fester Niederschläge muss gewährleistet sein. Die zeitliche Erfassung des Niederschlags muss auf Grund der großen zeitlichen Streuung im Minutenintervall erfolgen und als Messbereich für die Niederschlagsintensität ist $0 \text{ bis } 10 \text{ mm min}^{-1}$ erforderlich. Welche von diesen Messprinzipien und welche Messgeräte diese Forderungen erfüllen, wird im weiteren Verlauf dargestellt.

Dazu werden folgende Messprinzipien genutzt

- Volumenmessung des Niederschlags,
- Messung des Gewichtes des Niederschlags,
- Erfassung von Niederschlag mittels Widerstandsmessung,
- optisches Messprinzip und
- leitfähigkeitsbasierendes Messprinzip

Die einzelnen Messprinzipien werden im Zusammenhang mit den verschiedenen Messgeräten/Sensoren beschrieben, da sie sich in einigen Teilen voneinander unterscheiden. Es werden zunehmend auch Messgeräte hergestellt, die mehrere Messprinzipien in einem Gerät vereinen, um die Vorteile der einzelnen Messprinzipien miteinander zu kombinieren und um so die Anforderungen an die Niederschlagsmessung erfüllen zu können.

11.3 Sensoren/Messgeräte

Im DWD werden verschiedene Arten von Niederschlagsmessgeräten/-sensoren mit unterschiedlichen Messprinzipien eingesetzt. Um auch andere Messprinzipien vorzustellen, werden darüber hinaus einige Sensoren beschrieben, die an anderen Einrichtungen eingesetzt sind.

Niederschlagsmengen (mm) und Niederschlagsintensitäten (mm/h) werden mit sammelnden Niederschlagsmessern ermittelt. Niederschlagsmelder geben aus, ob momentan Niederschlag fällt (Niederschlag Ja/Nein), woraus sich die Niederschlagsdauer bestimmen lässt. Die Niederschlagsarten werden durch laseroptische Messgeräte, sog. Distrometer, bestimmt.

In Verbindung mit Niederschlagsmessgeräten treten teilweise verschiedene Begriffe auf, die hier kurz erläutert werden:

- **Pluviometer** ist eine alte Bezeichnung für Regenmesser (lat. pluvius = regenspendend). Entsprechend ist ein Pluviograph ein registrierender Regenschreiber,
- **Ombrometer** ist ein Begriff, der aus dem Griechischen stammt und das Messgerät zur Messung der Niederschlagsmenge und -intensität dient,
- **Distrometer** steht als Synonym für **Distribution Droplet Meter** und bedeutet soviel Messgerät zur Messung der Verteilung von Tröpfchengrößen und darüber hinaus die Größe und Fallgeschwindigkeit der einzelnen Niederschlagspartikel erfassen. Im Gegensatz zur deutschen Schreibweise wird der Begriff im Englischen Disdrometer geschrieben. Im weiteren Verlauf wird aus Gründen der Einheitlichkeit immer von Distrometern die Rede sein.

Für die Bestimmung der Niederschlagshöhe (Menge) werden an den Messstellen gemäß WMO-Norm im Normalfall Geräte mit einer Auffangfläche von 200 cm^2 in 1 m Höhe über dem Boden verwendet. Nur in besonderen Fällen werden auch Auffangflächen von 100 cm^2 und – in Höhenlagen oberhalb von 700 m NHN – 500 cm^2 eingesetzt.

11.3.1 Volumenmessung des Niederschlages (Niederschlagssammler)

Niederschlagsmesser n. Hellmann

Der Niederschlagsmesser nach Hellmann wird im DWD an konventionellen Niederschlagsstationen (Nst(k), an Klimareferenzstationen (siehe 19.3) und sonst noch zur Durchführung von Kontrollmessungen eingesetzt. Er erfüllt damit eine wichtige Ergänzungsmessung für die Prüfung von digitalen Aufzeichnungen von Tageswerten und dient zudem dazu, die zeitliche Vergleichbarkeit langer Zeitreihen, insbesondere an Klimareferenzstationen im Hinblick auf mögliche Klimaänderungen aufrecht zu erhalten.

Die Einzelteile des Niederschlagsmessers nach Hellmann (Abb. 11.1) sind: Oberteil mit zylindrischem Auffanggefäß mit konischem Trichter, Unterteil, Sammelkanne, Halter, Schneekreuz, Deckel, Messglas.

Abb. 11.1 Teile des Niederschlagsmessers n. Hellmann



Das Oberteil besteht aus einer metallenen Röhre, an deren obere Öffnung ein konischer, scharfkantiger stabiler Messring angebracht ist. Dieser dient einer erhöhten Formstabilität und bildet eine kreisrunde Auffangfläche von 200 cm^2 (Durchmesser $159,6\text{ mm}$).

Das Oberteil wird auf das Unterteil aufgesetzt, das zu diesem Zweck oben einen etwas geringeren Durchmesser hat. In seiner Mitte steht die Sammelkanne, in die der Trichter des Oberteils das Niederschlagswasser einleitet. Sie hat ein Fassungsvermögen von $1,4\text{ l}$, das einer Niederschlagshöhe von 70 mm entspricht.

Abb. 11.2 Niederschlagsmesser n. Hellmann (Lambrecht)



Für die zentrierte Aufstellung der Sammelkanne sorgt bei älteren Geräten ein Metallring, bei neueren ist für diesen Zweck in den Boden des Unterteils eine entsprechende Vertiefung eingeprägt. Die Sammelkanne ist im Unterteil vor Erwärmung infolge Strahlung geschützt, um die Verdunstung des Niederschlagswassers weitgehend zu vermeiden. Durch die enge Öffnung der Kanne ist auch der Kontakt zu warmer Außenluft stark vermindert.

Wird Schneefall erwartet, wird ein Schneekreuz (Abb. 11.1) in das Oberteil eingesetzt. Es soll verhindern, dass der Wind lockeren trockenen Schnee aus dem Auffanggefäß herauswirbelt. Da seine, im Vergleich zur Innenwand des Oberteils sehr große Blechoberfläche eine vergrößerte Benetzungs- und damit Verdunstungsfläche darstellt, muss es vor erwarteten flüssigen Niederschlag entfernt werden.

Der Deckel dient zwei verschiedenen Zwecken. Fällt während der Terminbeobachtung Niederschlag in fester Form, wird der zum Austausch mit auf das Messfeld gebrachte zweite Niederschlagsmesser nach dem Austausch der bis dahin im Einsatz befindliche mit dem Deckel versehen, damit die in diesem Zeitraum gefallene Niederschlagsmenge nicht doppelt gemessen werden. Lässt man festen Niederschlag im Auffanggefäß schmelzen, dient der Deckel als Verdunstungsschutz.

Der Messzylinder entspricht der Auffangfläche von 200 cm^2 , besteht aus Glas oder durchsichtigem Kunststoff. Glas ist der bessere Werkstoff, da die Innenwand des Kunststoffmesszylinders durch im Niederschlagswasser enthaltene Chemikalien angegriffen und bald rau und trüb wird. Die Skaleneinteilung entspricht einer Niederschlagshöhe von $0,1\text{ mm}$. Der Messzylinder läuft am unteren Ende innen konisch in einer Spitze zusammen, um auch geringe Niederschlagsmengen genau messen zu können. So bedeutet ein Wasserstand bis zur Hälfte des ersten Teilstrichs $<0,1\text{ mm}$.

Pflege und Kontrolle der Funktionstüchtigkeit

Die Pflege und Wartung des Niederschlagsmessers nach Hellmann beschränkt sich auf die Reinigung der Teile und die Überprüfung der Dichtheit einiger Bauteile des Messgerätes.

Täglich sollte mit einem Blick in den Auffangtrichter des Gerätes überprüft werden, ob durch Vogelkot, Insekten oder Pflanzenteile der Abfluss des Niederschlagswassers in die Sammelkanne behindert ist. Der Auffangtrichter kann mit einem weichen Tuch oder Schwamm gereinigt werden.

Die Sammelkanne muss dicht sein. Zeit sich Undichtheit durch Niederschlagswasser im Unterteil des Messgerätes, muss die Sammelkanne ausgetauscht werden. Wichtig ist auch die Dichtheit des Unterteils, da bei extremen Niederschlagshöhen die Sammelkanne überlaufen kann. Dann fließt das Niederschlagswasser in das Unterteil des Gerätes und kann somit noch gemessen werden. Wenn das Unterteil gegen das Licht gehalten wird, sind eventuell undichte Stellen gut sichtbar.

Vorsicht ist bei Frost geboten: wenn das abgetaute Niederschlagswasser wieder in der Sammelkanne gefriert, kann die Naht an der Kanne platzen.

In größeren Zeitabständen muss die Einsatzhöhe von 1,0 m und die waagerechte Aufstellung des Gerätes überprüft werden. Der Präzisionsring am Oberteil darf keine Beschädigung aufweisen, da sonst die Auffangfläche verfälscht wird.

Niederschlagsschreiber n. Hellmann

Der Niederschlagsschreiber nach Hellmann hat ebenfalls eine Auffangfläche von 200 cm² und dient zur Aufzeichnung der Menge, Intensität und Zeit des gefallenen Niederschlags. Er ist als beheiztes Gerät im Einsatz und erlaubt damit eine ganzjährige Registrierung fallender Niederschläge. Die Schreibtrommel ist im Tages- oder Wochenumlauf im Einsatz, sie kann auch als Bandschreiber für Monatsregistrierung ausgelegt sein.

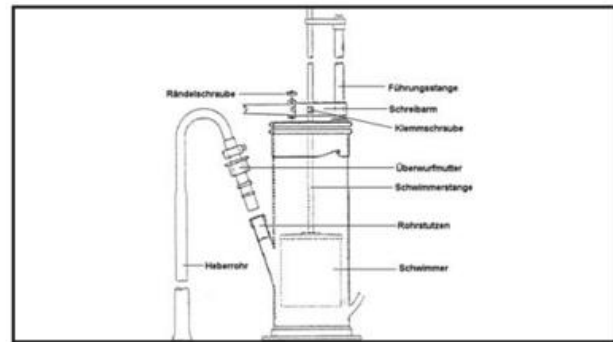
Der Niederschlag wird vom Auffangteil, an dessen Innenwand sich der Temperaturmessfühler der Heizung befindet, über den Trichter und eine zweimal gewundene Rohrleitung in das Schwimmergehäuse weitergeleitet. Da diese Rohrleitung leicht verstopft, haben neuere Niederschlagsschreiber einen Schlauch als Anschlussstück. Im Schwimmergehäuse befindet sich ein Schwimmer (Hohlkörper aus Aluminium), an dessen Oberseite die Schwimmerstange befestigt ist, die ihrerseits oben aus dem Schwimmergehäuse herausragt. Oberhalb von diesem ist an der Schwimmerstange rechtwinklig der Schreibarm angebracht, der zur Stabilisierung an einer Führungsstange gleitet. Er kann mit Hilfe einer Klemmschraube in verschiedener Höhe der Schwimmerstange montiert werden. In der Achse einer kleinen Rändelschraube ist er leicht schräg drehbar gelagert, so dass er nur durch sein Eigengewicht an der Schreibtrommel anliegt. Diese Schraube dient gleichzeitig der Feinjustierung.

Abb. 11.3 Niederschlagsschreiber n. Hellmann (Foto B. Henning)



Etwa 6 cm über dem Boden des Schwimmergehäuses ragt ein Rohrstützen schräg nach oben. Er ist zur Aufnahme des Heberrohres bestimmt, das durch eine Klemmschraube oder eine Überwurfmutter in der gewünschten Höhe festgehalten wird.

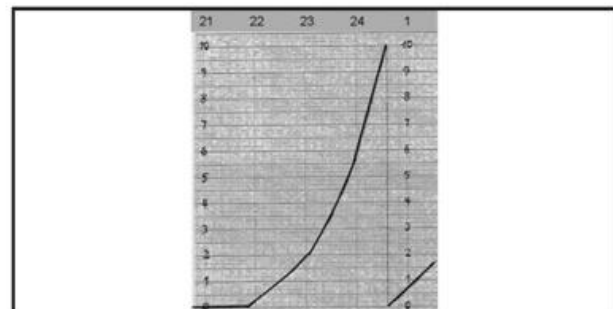
Abb. 11.4 Messfühler Niederschlagsschreiber



Niederschlag, der in das Auffangteil fällt, wird über den Trichter und die Rohre in das Schwimmergehäuse geführt. Der Schreibarm zeichnet daraufhin auf dem Registrierpapier, das auf der Schreibtrommel aufliegt, eine ansteigende Linie. Die Registrierung erlaubt ein Ablesen von Niederschlagshöhen in Zehntel Millimeter.

Hat sich eine Niederschlagshöhe von insgesamt 10,0 mm aufsummiert, steht das Wasser nicht nur im Rohr und im Schwimmergehäuse, sondern auch im Heberrohr so hoch, dass es den Scheitelpunkt des Heberrohres erreicht. In diesem Falle entleert sich das System nach dem Heberprinzip soweit, bis der Wasserstand im Schwimmergehäuse den oberen Ansatz des Rohrstützens erreicht. Es verbleibt im Schwimmergehäuse ein Wasserstand von ca. 3,5 cm bis 4 cm Höhe und der Schwimmer liegt nicht unten auf. Durch diese Konstruktion kann die Registrierung bei wieder einsetzendem Niederschlag sofort beginnen.

Abb. 11.5 Registrierung Niederschlagsschreiber



Pflege und Kontrolle der Funktionstüchtigkeit

Bei hohen Temperaturen mit sehr geringer relativer Luftfeuchte, treten gelegentlich Verdunstungsverluste im Schwimmergehäuse auf, die daran erkennbar sind, dass die Registrierung nicht waagrecht verläuft, sondern leicht abfällt. Sollte dabei die Nulllinie unterschritten werden, darf dies keinesfalls mittels der Feinjustierung korrigiert werden. Es wird nur die entsprechende Fehlmenge im Messglas abgemessen und über den Auffangtrichter eingefüllt. Auf dem Registrierstreifen wird das vermerkt, damit es später nicht als Niederschlag fehl interpretiert wird.

Insekten und Pflanzenteile verursachen manchmal Verstopfungen der Rohrleitungen. Sie sind mit einem langen Draht oder einer sehr schlanken Flaschenbürste zu behe-

ben. Wenn nötig, ist das Schwimmergehäuse zu öffnen. In diesem Fall muss unbedingt eine Nullpunkts- und Abheberungskontrolle vorgenommen werden.

Ist das Knie des Heberrohrs stark verschmutzt, kann bei einem Wasserstand von 10,0 mm Niederschlagshöhe und nur leichtem Niederschlag (z. B. leichter Sprühregen) das Abhebern nicht erfolgen. Es fließt ganz kontinuierlich ebenso viel Wasser durch das Heberrohr ab wie gleichzeitig in den Auffangtrichter fällt. In diesem Fall kann durch eine kleine Erschütterung (Anklopfen an das Schwimmergehäuse) ein „künstliches“ Abhebern veranlasst werden. Sofort nach Niederschlagsende wird das Heberrohr ausgebaut und mit Hilfe einer Flaschenbürste und eines Reinigungsmittels gesäubert. Nach Wiedereinbau muss das Abhebern neu justiert werden.

Undichte Stellen an der Verbindung zwischen Schwimmergefäß und Heberrohr können das Abhebern behindern. In diesem Falle ist ein Austausch des Gummiringes oder des Heberrohres erforderlich, falls ein festeres Anziehen der Verschlusschraube nicht genügt.

Wenn die Abhebungslinie mit den Stundenlinien auf dem Diagrammpapier einen Winkel bildet, während die Aufzeichnung bei Niederschlagsfreiheit oder bei einer „Nullkontrolle“ parallel zu den Regenhöhenlinien verläuft, befinden sich Uhrwerk oder Schwimmergefäß nicht in senkrechter Lage; ihre Achsen laufen also nicht parallel. Dieser Fehler wird behoben, indem die Flügelschraube unterhalb des Schwimmergefäßes bzw. die Mutter am unteren Ende der die Uhrwerkstrommel haltenden Metallstange etwas gelöst und Schwimmergefäß bzw. Uhrwerkstrommel durch Unterlegen dünner Holz- oder Metallstreifen in die senkrechte Lage gebracht werden. Im Allgemeinen wird dies zuerst beim Schwimmergehäuse versucht, da deren Flügelschraube leichter zu betätigen ist.

Das an der Innenwand des Auffangteils montierte elektronische Thermometer setzt bei Unterschreiten einer Temperatur von $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$ die Heizung in Betrieb bzw. schaltet sie bei Überschreiten dieses Wertes wieder ab. Beheizt werden der Trichter, die Platte unter dem Schwimmergehäuse und der Boden unter der Sammelkanne. Gegen Wärmeverlust ist zusätzlich die Innenseite des Gerätes mit einer Isolierung versehen.

Die Heizung wird mit einer Spannung von nur 24 V betrieben. Der Schaltkasten mit dem Transformator 220 V Netz/24 V Heizstrom befindet sich außerhalb des Gerätes. Hier ist dem Beobachter lediglich das Auswechseln einer ausgefallenen Sicherung erlaubt; weitergehende Arbeiten werden den SL-Einheiten des DWD oder dem Elektriker überlassen. Sehr wichtig ist, bei Ausfall der Heizung und negativer Lufttemperatur das Messwerk vollständig auszubauen, da das Schwimmergehäuse vereisen und durch Eisbildung im Schwimmergehäuse der Schwimmer deformiert werden kann.

Vor Winterbeginn muss eine Funktionsprüfung der Heizung stattfinden. Dazu wird der Ablauf des Auffangtrichters verschlossen. Anschließend wird das Auffanggefäß zur

Hälfte mit einem Eis-Wasser-Gemisch gefüllt. Die Heizung muss sich unter diesen Bedingungen einschalten, ansonsten sind die Sicherungen zu prüfen. Sofern diese in Ordnung sind und die Heizung trotzdem nicht arbeitet, muss die zuständige SL-Einheit verständigt werden. Sie muss auch verständigt werden, wenn sich der Heizstrom nicht bei Temperaturen über $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$ abschaltet.

Das Gerät wird stets innen und außen sauber gehalten. Der Auffangtrichter kann mit einem Lappen oder weichem Schwamm gereinigt werden. Sind längere Zeit nur geringe Niederschläge gefallen, ist es angebracht, das Gerät mit sauberem Wasser einfach durchzuspülen. Dazu wird Wasser in den Auffangtrichter gefüllt und mehrmals abgehebert.

Keinesfalls sollte dabei irgendein Reinigungsmittel verwendet werden, da durch die Oberflächenentspannung dieser Mittel das Abhebern nicht mehr funktioniert.

Gebirgsniederschlagsmesser

An ausgewählten Bergstationen (z. B. Brocken im Harz), dort wo größere Mengen Niederschlag erwartet werden, in der Regel oberhalb von 700 m NHN, sind Gebirgsniederschlagsmesser mit einer Auffangfläche von 500 cm^2 im Einsatz. Entgegen der sonstigen Vorgaben für Niederschlagsmessgeräte soll sich hier die Auffangfläche in 2 m Höhe befinden, mindestens jedoch 50 cm über der bisherigen Rekordmarke der Schneehöhe (auf dem Feldberg/Schwarzwald bedeutet dies, dass sich der Niederschlagsmesser in 4 m Höhe befindet). Besonders hier sollte an den Messgeräten ein Windschutz angebracht sein. Dieser traditionelle DWD-Gebirgsniederschlagsmesser verfügt über einen Trichter als Windschutz (siehe Abb. 11.57).

Der Boden des Gebirgsniederschlagsmessers ist wie ein Trichter geformt.

Abb. 11.6 Gebirgsniederschlagsmesser



In Deutschland sind solche Niederschlagsmesser nur noch selten zu finden.

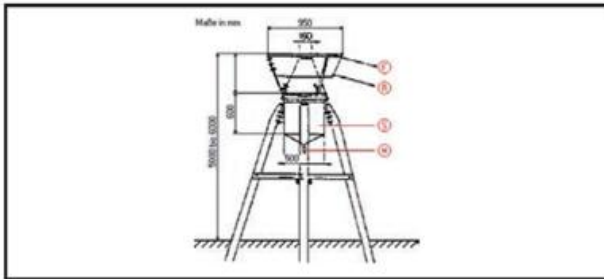
Totalisator

In entlegenen bzw. unwegsamen Gebieten werden Niederschlagsammler mit der üblichen Auffangfläche von 200 cm^2 aufgestellt, die nicht täglich oder wöchentlich abgelesen werden können, die also bis zu 3 Monaten den Niederschlag sammeln können, bevor er abgelesen wird.

Ein Sammelgefäß mit einer geeichten Skala befindet sich im Inneren des Gerätes. Paraffinöl im Sammelgefäß bildet über

der Niederschlagsoberfläche einen Film und verhindert so die Verdunstung. Als Gefrierschutz ist eine bestimmte Menge CaCl_2 -Lösung eingebracht. Dies geht auf Mougins (Frankreich, Savoyen) zurück, der bereits eine CaCl_2 -Lösung benutzt hat.

Abb. 11.7 Totalisator



Im Gegensatz zu den normalen Niederschlagssammlern werden Totalisatoren wegen höherer Schneehöhen in 3 m bis 4 m Höhe aufgestellt, häufig auch hier mit Windschutz (Abb. 11.52), damit die Messung nicht zu stark durch den Wind beeinflusst wird.

Totalisatorenmessungen gibt es seit den 20er Jahren. In Österreich gab es bis 1929 ein Testnetz von 6 Totalisatoren, nicht nur im Gipfelbereich.

Totalisatoren werden in der Schweiz vor allem in schwer zugänglichen Gebieten im Gebirge eingesetzt und erfassen dort die Niederschlagsmenge eines ganzen Jahres. Bei einigen Totalisatoren werden halbjährliche Zwischenmessungen durchgeführt. Gemessen wird die Niederschlagsmenge von Ende September bis Ende September des darauf folgenden Jahres (hydrologisches Jahr). Nach der jährlichen Messung werden die Totalisatoren entleert, gereinigt und mit einer vorgegebenen Menge Wasser, Chlorkalzium und Vaselineöl neu befüllt.

Die im DWD viele Jahre verwendeten Geräte gehen auf eine Konstruktion von Hellmann zurück. Heute erfolgt im DWD kein Einsatz mehr im Routinemessnetz, sondern nur im Bereich „Ökologie und Umweltberatung“.

11.3.2 Gewichtsbestimmung des Niederschlages

Ombrometer HP mit Wippe und Tropfer

Das Ombrometer HP ist aus Entwicklungsarbeiten in den 50er Jahren auf dem Hohenpeißenberg und durch zunehmende Fragen nach Kurzzeit-Niederschlagsintensitäten in den 60er Jahren, entstanden. Ein operationell eingesetztes Gerät ist seit 1972 auf dem Messfeld des MOHP im Einsatz. Weitere Geräte wurden seitdem an Wetterstationen eingerichtet.

Der Niederschlagssensor mit Kippwaage ist zur Messung der Niederschlagshöhe und der Niederschlagsintensität für automatische meteorologische Datenerfassungsanlagen eingesetzt. Die Auffangfläche mit 200 cm^2 entspricht dem Niederschlagsmesser nach Hellmann und wird in 1,0 m Höhe auf einem Stahlrohr aufgestellt. Die Messwertaufnahme erfolgt durch zwei übereinander angeordnete Baugruppen:

Der Tropfer

Über der Durchlaufdüse des Auffangtrichters ist ein Modulator eingesetzt, der den einfallenden Niederschlag in genormte Tropfen mit einem Volumen von $0,1 \text{ cm}^3$ formt, was einer Niederschlagsmenge von $0,005 \text{ mm}$ entspricht. Die Tropfen werden mit Hilfe einer Lichtschranke gezählt und die dabei im Fototransistor entstehenden elektronischen Impulse werden verstärkt und dem Sensorausgang zugeführt.

Bis zu einer Niederschlagsmenge von $0,5 \text{ mm min}^{-1}$ arbeitet der Sensor praktisch linear und erlaubt Messungen bis zu ca. $2,0 \text{ mm min}^{-1}$ (entspricht extrem starkem Regenschauer). Ruft man die Tropfenzahl für eine kürzere Zeiteinheit, z. B. 10 min ab, erhält man die für die Intensitäten leicht, mäßig und stark definierten Niederschlagshöhen (Tab. 11.1). Außerdem lassen sich zusätzlich Niederschlagsbeginn und -Ende bestimmen.

Die Kippwaage

Die schon geformten Tropfen werden von einem Tropfenzerstörer gebremst und gelangen in eine von zwei Wippenschalen. Ist diese mit einer Wassermenge von $0,2 \text{ cm}^3$ gefüllt, entsprechend einer Niederschlagsmenge von $0,1 \text{ mm}$, kippt sie nach unten und entleert sich. Dabei löst sie durch einen an der Wippe befestigten Magneten in Verbindung mit einem Reed-Schalter ein elektrisches Signal aus, das aufbereitet wird und am digitalen Ausgang (Optokoppler) als Impuls ausgegeben. Gleichzeitig wird das Eingangssignal in eine vom gewählten Messbereich abhängige Analogwertänderung umgesetzt und am Analogausgang in einem Stromwert zur Verfügung gestellt. Beim Erreichen des Messbereichsendwertes wird der Analogausgang automatisch auf den Anfangswert gesetzt. Zugleich wird für den weiter fallenden Niederschlag die zweite Schale bereitgestellt, die dann ebenfalls bei einer Füllung von $0,1 \text{ mm}$ kippt. Dieser Prozess wiederholt sich solange Niederschlag fällt. Mit dieser Kippwaage können Niederschlagshöhen bis zu 14 mm min^{-1} gemessen werden.

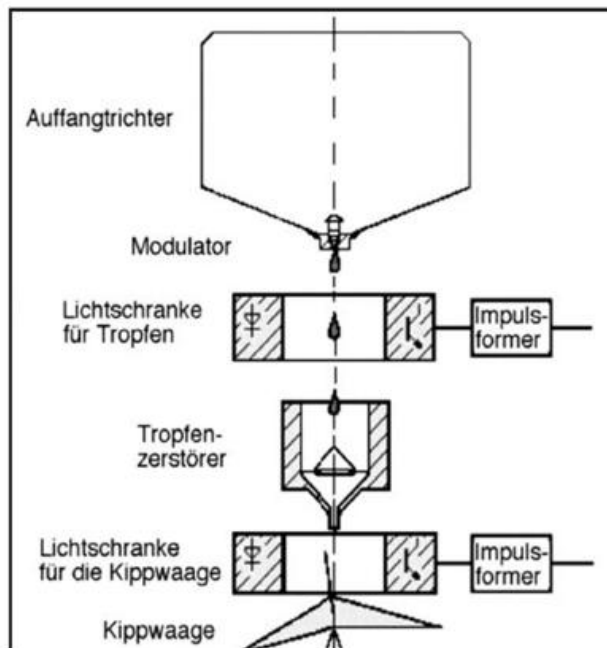
Ein **Reed-Relais** ist ein Relais zum Schalten eines Stromkreises, welches mit einem Reed-Kontakt arbeitet. Reed-Schaltkontakte sind unter Vakuum oder Schutzgas in einen Glaskolben eingeschmolzene Kontaktzungen, die zugleich die Kontaktfeder und den Magnetanker bilden. Die Kontaktzungen werden aus edelmetallbeschichtetem ferromagnetischem Material (z. B. Weicheisen) hergestellt. Die Kontaktbetätigung erfolgt durch ein von außen einwirkendes Magnetfeld, das von einem in die Nähe gebrachten Dauermagneten (Reed-Kontakt) oder in einer zugehörigen Magnetspule elektrisch erzeugt wird (Reed-Relais). Durch das Magnetfeld ziehen sich die beiden Kontaktzungen an und schließen somit die Schaltung. Sobald das Magnetfeld abfällt oder eine bestimmte Feldstärke im Relais unterschritten wird öffnet sich der Kontakt aufgrund der Federwirkung wieder [46].

Reed-Relais werden häufig dort zum Schalten kleiner Spannungen und Ströme eingesetzt, wo es auf Zuverlässigkeit und geringsten Kontakt-Übergangswiderstand ankommt (z. B. zur Signalumschaltung in Messgeräten).

Ein **Optokoppler** ist ein Bauelement der Optoelektronik und dient zur Übertragung eines elektrischen Signals zwischen zwei galvanisch getrennten Stromkreisen. Er besteht aus einem optischen Sender, typischerweise ist dies eine Infrarotleuchtdiode (LED – Light Emitting Diode) und einem Fototransistor als optischen Empfänger, einem Fotthyristor oder Triac (siehe dort), welche beide in einem lichtundurchlässigen Gehäuse untergebracht sind. Mit Optokopplern können sowohl digitale als auch analoge Signale übertragen werden [46].

Mittels einer Thermostat gesteuerten Flächenheizung, die bei $+2^{\circ}\text{C}$ ($\pm 2,8\text{ K}$) ein- und bei $+8^{\circ}\text{C}$ ($\pm 2,2\text{ K}$) ausschaltet, wird das schnelle Schmelzen fester Niederschläge bewirkt und das Gefrieren von Wasser an den Durchlässen (Modulator, Tropfenzerstörer) und in der Wippe verhindert. Die elektronischen Bauelemente sind zum Schutz vor Kondenswasser in Kunststoff eingegossen.

Abb. 11.8 Niederschlagsmesser (Tropfer und Kippwaage) Schemazeichnung



Pflege und Kontrolle der Funktionstüchtigkeit

Die Pflege des Sensors besteht darin, den Durchlass am Modulator von Verunreinigungen (Blüten, Blätter, Insekten) freizuhalten. Wenn erforderlich wird das Gehäuse von außen gereinigt. Die Funktionskontrolle wird täglich durch eine Kontrollmessung mit dem Niederschlagsmesser n. Hellmann (falls noch vorhanden) überprüft. An den Wetterwarten wird auch mit Hilfe von Augenbeobachtungen eine Funktionskontrolle durchgeführt.

Wägesensor PLUVIO

Der Niederschlagssensor PLUVIO der Fa. OTT MESSTECHNIK GmbH & Co. KG, Kempten wird an automatischen und personell besetzten Wetterstationen im Messnetz des DWD betrieben. Er ist u. a. auch im Hessischen Niederschlagsmessnetz (siehe 19.6.1) und in den Messnetzen der Wasserwirtschaft (siehe 19.6.5) zu finden. Er erfüllt sämtliche An-

forderungen der WMO-Richtlinien 306, No 8. An mobilen Messeinheiten des DWD (siehe 19.5.4) wird ein älteres Modell des PLUVIO OTT mit gleichem Messprinzip, aber einer anderen Datenausgabe eingesetzt.

Der PLUVIO OTT dient zur automatischen Ermittlung der Niederschlagshöhe und -intensität und entspricht im Wesentlichen der Bauform n. Hellmann (WMO-Standard). Im Gegensatz zu konventionellen Niederschlagssensoren arbeitet PLUVIO nach dem Wägesprinzip, d. h. jedes Niederschlagsereignis, unabhängig ob Flüssig- oder Festniederschlag wird durch eine Gewichtsbestimmung des Auffangbehälters erkannt, der auf einer elektronischen Waage steht.

Als Sensorelemente dienen hochpräzise, langzeitstabile Dehnungsmessstreifen, die gegen Umwelteinflüsse hermetisch abgedichtet sind. Eine spezielle Querlenkerkonstruktion sorgt für eine spannungsfreie Kraftübertragung auf das Wägemodul. Eine mechanische Überlastsicherung verhindert Beschädigungen der versiegelten Wägezelle durch Überlast.

Dehnungsmessstreifen (DMS) sind Messeinrichtungen zur Erfassung von dehrenden Verformungen. Sie ändern schon bei geringen Verformungen ihren elektrischen Widerstand und werden als Dehnungssensoren eingesetzt. Man klebt sie mit Spezialkleber auf Bauteile, die sich unter Belastung minimal verformen. Diese Verformung (Dehnung) führt dann zur Veränderung des Widerstands des DMS [46].

Abb. 11.9 Wägezelle PLUVIO (OTT MESSTECHNIK)



Über einem Präzisionsverstärker und einem hochauflösenden AD-Wandler wird ein digitales Ausgangssignal mit einer Auflösung von $0,01\text{ mm}$ Niederschlag erzeugt. Auch erfüllt er die Anforderungen hinsichtlich Unterscheidung zwischen flüssigen und festen Niederschlag.

Abb. 11.10 Niederschlagsmesser PLUVIO (OTT MESSTECHNIK)



Der PLUVIO erfasst kontinuierlich im Messzyklus von 1 min das Gewicht des Niederschlages. Zwei Gramm Gewichtszunahme entspricht einem Volumen von 2 cm³ und einem Niederschlagszuwachs von 0,1 mm.

Tab. 11.2 Spezifikationen PLUVIO (OTT MESSTECHNIK)

Auffangfläche	200 cm ²
Auffangmenge	250 mm (= 5 l)
Abfrageintervall	6 ... 60 s
Messbereich	0 ... 250 mm Niederschlagshöhe 0,1 mm h ⁻¹ ... 20 mm min ⁻¹ Niederschlagsintensität*
Auflösung	0,01 mm
Linearität	< ±0,02 mm
Messbereich Pt 100	-40 ... +70 °C, Auflösung 0,1 K, Genauigkeit ≤±0,3 K (-30 ... 45 °C)
Genauigkeit (bei -25 ... +45 °C)	Menge ±0,1 mm oder ±1 % vom Messwert Intensität ±0,1 mm min ⁻¹ , ±6 mm h ⁻¹ oder ±1 % vom Messwert
Einsatzbedingungen	-40 ... +60 °C, 0 ... 100 %
Versorgungsspannung	10 ... 14 V DC
Ringheizung	24 V DC/50 W von -8 ... +5 °C aktiv

* 1 mm min⁻¹ = 20 ml min⁻¹ (0,1 mm = 2 g)

Abb. 11.11 PLUVIO OTT, abgenommener Schutzzyylinder, Auffangbehälter (oben), Querlenkerkonstruktion (Mitte und unten), Elektro- nikenheit (OTT MESSTECHNIK)



Der Niederschlagssensor ermittelt alle 6 s das Gewicht des Auffangbehälters inkl. Inhalt mit einer Auflösung von 0,01 mm = Rohwert. Die Differenz zwischen diesem Messwert und dem Gewicht des leeren Auffangbehälters ergibt den momentanen Behälterinhalt.

Zu jeder vollen Minute berechnet der PLUVIO aus mehreren Rohwerten einen gefilterten Behälterinhalt, ebenfalls mit einer Auflösung von 0,01 mm. Ein spezieller Filteralgorithmus verhindert hierbei eine Verfälschung der Messergebnisse, wie sie bspw. durch Windeinfluss verursacht werden können. Die Differenz aus dem aktuellen und dem vorhergehenden, gefilterten Behälterinhalt ergibt die Niederschlagsintensität in mm min⁻¹. Diese Minutenwerte werden zur „akkumulierten Niederschlagshöhe“ bis zum maximalen Wert von 999,99 mm aufaddiert.

Die Auswertung des Niederschlages beruht auf der Erfassung aller Gewichtszuwächse in einem bestimmten Zeitabschnitt. Gewichtszuwächse oberhalb der Intensitätsansprechwelle werden mit einer Ausgabeverzögerung von 85 s bis 400 s ausgegeben, abhängig von deren Minutenintensität. Langsame Erhöhungen mit sehr geringen Zuwächsen können bis zu 40 min angesammelt werden; bei Erreichen der Intensitätsansprechwelle, die bei 0,03 mm bezogen auf 40 min Sammelzeit liegt, erfolgt dann eine Niederschlagsausgabe. Der erfassbare Feinstniederschlag beträgt somit ≥ 0,045 mm h⁻¹. Zeichnet der PLUVIO in scheinbar trockenen Perioden Feinstniederschläge auf, so ist zu prüfen, ob es sich hierbei um „abgesetzten Niederschlag“ (z. B. Tau, Raureif) handelt. Zudem können PLUVIO in Nebelsituationen (insbesondere bei Dunkelheit), wenn der Beobachter es schwer hat, fallende Niederschläge (nässender Nebel) zu erkennen, Niederschlag detektieren.

Der Auffangbehälter besteht aus Polyethylen und die Behälterauflage aus Polypropylen. Ein Pt 100-Außenfühler an der Bodenplatte (Aluminium) des PLUVIOs dient zur Temperaturkompensation des Wägemechanismus alle 6 s und zur Ermittlung der Umgebungstemperatur für die Steuerung der Auffangringheizung (separate Spannungsversorgung), die bei Schneefall eine Schneehaubenbildung verhindert. Sie ist im Temperaturbereich von -8 °C bis +5 °C aktiv. Außerhalb dieses Temperaturbereichs kommt es erfahrungsgemäß nicht zur Schneehaubenbildung. Aufgrund der mechanischen Kopplung zur Bodenplatte weichen die Temperaturwerte meist von der normalen Lufttemperatur ab.

Um unerwünschte Verdunstungsverluste zu vermeiden, ist nur der eigentliche Auffangring bis zu einer Solltemperatur von +5 °C beheizt. Die Heizungssteuerung verhindert durch eine niedrige und ständig überwachte Auffangringtemperatur einen Kamineffekt. Die Heizung verhindert aber nicht das Einfrieren des Auffangbehälters. Dafür wird in der Frostperiode das Frostschutzmittel POWER COOL DC 924-PXL in den Auffangbehälter eingefüllt, das sowohl die Deformierung des Behälterbodens verhindert als auch das Abtauen des gefallenen Festniederschlags bewirkt.

Sicherheitshinweise zum Umgang mit Frostschutzmitteln siehe Anhang 6.3.

An Wetterwarten mit AMDA I werden keine Frostschutzmittel zugesetzt, sondern der Sammelbehälter rechtzeitig entleert. Bei einer Füllhöhe des Behälters von mehr als 100 mm kann es bei Gefrieren des Niederschlagswassers zur Ausstülpung des Behälterbodens und zu einem Kippen des Auffangbehälters führen, sodass der Auffangbehälter am Rohrgehäuse anliegt. Das führt zu Fehlimpulsen und falschen Messwerten.

Für die Übertragung der ermittelten Messwerte in das DWD-Datenerfassungssystem AMDA (siehe 18.2) wird das vom DWD spezifizierte Daten- und Telegrammformat eingesetzt. Jedes Datentelegramm besteht aus 2 Zeilen mit insgesamt 89 Zeichen. Darin enthalten sind u. a.

- der Behälterinhalt,
- Hinweis, wenn 70 % des Auffangbehälters erreicht sind,

- akkumulierte Niederschlagshöhe in *mm*,
- Niederschlagsintensität in *mm min⁻¹*,
- Umgebungstemperatur in *°C*,
- Neustart nach Systemausfall

Um ein Überlaufen des Behälters zu vermeiden, muss der Behälter regelmäßig manuell geleert werden. Zukünftig soll über ein gekrümmtes Kunststoffrohr ab einer Füllmenge von 88 % ein automatisches Abhebern stattfinden. Es soll die manuelle Entleerung nicht ersetzen, sondern soll lediglich ein unkontrolliertes Überlaufen verhindern, wenn eine manuelle Entleerung nicht möglich war. So könnten die Daten noch gerettet werden. Die Erprobung findet von Seiten des DWD statt.

PLUVIO²

Die Fa. OTT MESSTECHNIK hat ein Nachfolgemodell des PLUVIO entwickelt, mit gleichem Messprinzip, mit vereinfachtem mechanischen Aufbau und einigen technischen Verbesserungen. Daher ist die o.a. Beschreibung für PLUVIO² weitgehend identisch und nur in einigen Punkten gibt es Abweichungen zur neueren Version.

Neu ist, dass die hermetisch abgeriegelte Wägezelle direkt unterhalb des Auffangbehälters liegt, sodass die aufwendigere Querlenkerkonstruktion entfällt. Die Wägezelle misst das auf ihr lastende Gesamtgewicht. Außerdem ist der Sensor dadurch gegen Aufheizung durch Einstrahlung besser abgeschirmt. Da gleichzeitig der Grundträger aus Edelstahl/Aluminium besteht, ist auch eine stärkere Aufheizung auf der Südseite des Gehäuses weitgehend ausgeschaltet.

Tab. 11.3 Spezifikationen PLUVIO² (OTT MESSTECHNIK)

Auffangfläche, Version 200	200 cm ²
Auffangmenge, Version 200	1500 mm m ⁻²
Abfrageintervall (Poll)	1 bis 60 min
Messbereich	o bis 1500 mm Niederschlagshöhe o bis 10 mm min ⁻¹ Niederschlagsintensität*
Auflösung	0,01 mm
Genauigkeit (bei -25 bis +45°C)	Menge ±0,1 mm oder ±1 % vom Messwert, Intensität ±0,1 mm min ⁻¹ , ±6 mm h ⁻¹ oder ±1 % vom Messwert,
Einsatzbedingungen max. Windgeschwindigkeit bei Einhaltung der Genauigkeit ohne Gerätedefekt	-40 bis +60 °C, o bis 100 %, 33 m s ⁻¹ , 50 m s ⁻¹
Versorgungsspannung	9,6 bis 28 V DC

Neu ist auch die erheblich vergrößerte Aufnahmemenge von 1500 mm, die es erlaubt, das Gerät für längere Zeit in unwegsamem Gelände und in den meisten Gebieten Deutschlands über ein Jahr ohne Wartungsaufwand einzusetzen. PLUVIO² gibt es auch mit einer Auffangfläche von 400 cm².

Für Servicezwecke (Einstellen der Betriebsparameter, Genauigkeitstests u.a.) steht bei PLUVIO² eine USB-Schnittstelle zur Verfügung, die keinen separaten Anschluss der Versorgungsspannung benötigt.

PLUVIO² OTT ist u.a. im neuen SwissMetNet eingesetzt. Eine Entscheidung, PLUVIO² im DWD als Ersatz für Pluvio-DWD einzuführen, steht noch aus. Bisher sind im DWD lediglich Testgeräte auf den Wst'en Westermekelsdorf und Wasserkuppe installiert.

Pflege und Kontrolle der Funktionstüchtigkeit (PLUVIO)

Ab einer Füllhöhe von etwa 70 % sowie bei starker Verschmutzung muss der 5 l fassende Sammelbehälter entleert werden, um ein Überlaufen zu vermeiden. Besonders bei Dauerregen und drohendem Überlauf ist eine Entleerung auf jeden Fall vorzunehmen, sofern noch keine technische Einrichtung zur Selbstentleerung vorhanden ist. Die Pflegearbeiten müssen in einer niederschlagsfreien Zeit ausgeführt werden.

Folgende Schritte sind beim Entleeren des Sammelbehälters durchzuführen:

1. Edelstahlrohrgehäuse nach oben abziehen und abstellen. Das Wägesystem auf Verschmutzungen prüfen.
2. Am Grundkörper befindet sich eine Elektronikeinheit bei der durch im 6 s-Takt blinkende LEDs die Betriebsfunktion signalisiert wird. Sollte dies nicht der Fall sein, liegt ein Defekt vor, der umgehend zu melden ist.
3. Im Temperaturbereich von -8°C bis +5°C dürfen keine Ablagerungen von Schnee/Eis/Reif an der oberen Ringheizung vorhanden sein. Dies würde auf einen Defekt der Heizung h hinweisen, der umgehend zu melden ist.
4. Ist der Sammelbehälter stark verschmutzt, ist er zu reinigen. Den leeren Behälter wieder senkrecht auf die Behälterauflage der Waage stellen.
5. Das Edelstahlrohrgehäuse über den Sammelbehälter heben und langsam auf den Grundkörper ablassen. Dabei ist zu beachten, dass der Kabelanschluss am Edelstahlrohrgehäuse in die Position der Ausfräsung am oberen Ring des Grundkörpers angepasst wird, denn nur so ist das Edelstahlrohrgehäuse über den Grundkörper zu schieben.
6. Anschließend wird die Freigängigkeit des Sammelbehälters durch seitliches Antippen am oberen Rand des Behälters nach allen vier Richtungen geprüft; sie muss in jeder Richtung vorhanden sein. (diese Prüfung führt zu keiner Verfälschung der Niederschlagsmenge, denn vor der Durchführung von Wartungsarbeiten muss der Sensor in der AMDA auf Wartung gestellt worden sein!). Bei einigen Sensoren sorgt zusätzlich ein Schalter, der durch das Edelstahlrohrgehäuse des Sensors betätigt wird, für eine Signalunterdrückung. Das bedeutet, dass beim Abziehen des Edelstahlrohrgehäuses die Signalabgabe unterbrochen wird und beim Zusammenbau wieder freigegeben wird.

Insektenschutzinsel

Es wurde beobachtet, dass eine Reihe von Insekten im Auffangbehälter des PLUVIO ertrinkt. Auf Anraten einer Umweltschutzorganisation soll Insekten eine Abflugmöglichkeit geboten werden. Im Sommerbetrieb wird dazu eine bereitgestellte Styrofoamscheibe der Fa. The Dow Chemical

Company in den Auffangbehälter gelegt, die in den Wintermonaten herauszunehmen ist. Die Größe der Scheiben deckt die Wasseroberfläche im Falle von 80 % Behälterinhalt um 69 % ab und bietet Fluginsekten eine Abflugmöglichkeit. Die feinporige Oberflächenstruktur unterstützt ein schnelles Abfließen von angesammeltem Niederschlag und reduziert somit die Verdunstungsverluste, im Vergleich zum PLUVIO ohne Scheibe, um 30 %. In Styrofoam findet keine Kapillaraszension statt, wodurch ebenfalls die Verdunstung reduziert wird. Aus Laborversuchen und Erprobungen der Tageswerte ergab sich, dass sich die Insekenschutzscheibe positiv auf das Dynamikverhalten und die Verdunstungsverluste des Sensors auswirkt.

Niederschlagsmengenmesser

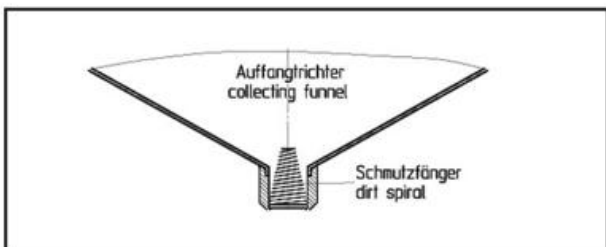
Der Niederschlagsmengenmesser 1518 H wird von der Fa. Lambrecht hergestellt und entspricht den Richtlinien der WMO. Das Gerät ist robust zeichnet sich durch ein einfaches Messprinzip aus, das aus einer Wippenmesssystem-Konstruktion nach Joss-Tognini besteht, d. h. der Niederschlag läuft durch einen Trichter in eine Wippenschale. Ein weiterer Vorteil dieses Gerätes ist die geringe Fehlalarmrate (Fehlimpulse).

Abb. 11.12 Niederschlagsmengenmesser 1518 H offen (Lambrecht)



Zur Reduzierung der Reibungskräfte, die bei einer Wippenkipfung entstehen, bestehen bei dieser Konstruktion die Lager aus abriebfestem Delrin (Handelsname für Polyoxymethylen -POM, ein hochmolekularer thermoplastischer Kunststoff). Sobald die Schale gefüllt ist, kippt die Wippe und es wird ein im Niederschlagssensor eingebauter Reedkontakt (siehe 11.3.2 Kippwaage) geschlossen.

Abb. 11.13 Auffangtrichter 1518 H (Lambrecht)



Durch das Kippen kann das Wasser aus der Schale abfließen und die zweite Wippenchale wird unter den Trichter bewegt. Hat sich auch die zweite Wippenchale gefüllt, kippt die Wippe wieder in ihre Ausgangsposition zurück.

Abb. 11.14 Nahansicht Wippe 1518 H (Lambrecht)



Tab. 11.4 Spezifikationen Niederschlagsmengenmesser 1518 H (Lambrecht)

Wippeninhalt	2 cm ³ (2 g Wasser) Wippenvolumen
Auffangfläche	200 cm ² WMO-Norm
Auflösung	0,1 mm
Genauigkeit	±2 % mit Intensitätskompensation
Einsatzbedingungen	-35 bis +70 °C
Gesamtheizleistung	42 V AC, 235W
Versorgungsspannung	4 bis 30 V DC

Die Impulsabgabe kann elektronisch abgetastet, fernübertragen und registriert werden.

Zum Schutz der Wippenmechanik gegen groben Schmutz muss der Schmutzfänger in den Auffangtrichter (Abb. 11.15) eingesetzt werden. Die Wippe kann ausgetauscht werden, ohne dass der Sensor neu kalibriert werden muss.

Abb. 11.15 Niederschlagsmengenmesser H3 (Lambrecht)



Für Winterbetrieb steht eine Gesamtheizleistung von 235 W, aufgeteilt in drei Heizkreise für Auffangtrichter 100 W, Auffangring 100 W und für Ablaufrohr, Wippe 35 W zur Verfügung. Die vollelektronische Heizungsregelung wird über 2 Temperatursensoren und eine TRIAC-Schaltung gesteuert, welche die elektronischen Schaltpunkte für die Heizung genau ermittelt.

Bei der TRIAC- (= Triode for Alternating Current)Schaltung handelt es sich um ein elektronisches Bauteil mit einer Halbleiterschichtstruktur, das vom Prinzip her eine Antiparallelschaltung von zwei Thyristoren darstellt. Das ermöglicht es, in beide Richtungen Strom zu führen, wohingegen ein einzelner Thyristor nur in einer Richtung leiten kann und somit

im eingeschalteten Zustand wie eine Diode wirkt. Damit für die beiden Thyristoren ein Steueranschluss ausreicht, sind in Triacs zwei Zünd- oder Hilfsthystorenstrecken eingebaut, damit er mit positivem und negativem Steuerimpuls in den niederohmigen Zustand gekippt werden kann [43].

Das Gerät wird im DWD und u. a. an der UFS auf der Zugspitze eingesetzt.

Pflege und Kontrolle der Funktionstüchtigkeit

Der Niederschlagssensor ist praktisch wartungsfrei. Durch Verschmutzungen, z. B. Vogelkot, Staub, Blätter usw. können Messabweichungen auftreten. Er sollte daher, in Abhängigkeit von den örtlichen Gegebenheiten, in regelmäßigen Abständen überprüft und gereinigt werden.

Zum Reinigen ist der Niederschlagssensor gut durchzuspülen. Festsitzende Schmutzteilchen im Sammeltrichter und Ablaufrohr können mit einem Holzspan gelöst werden.

Die Funktionskontrolle des Niederschlagssensors kann mit Hilfe eines künstlichen Niederschlags durchgeführt werden. Dazu ist der Inhalt eines Testgefäßes mit 200 cm^3 bzw. 400 cm^3 (bei Wippe 4 cm^3) Wasser durch eine Düse so in den Auffangtrichter zu leiten, dass die Tropfen neben dem Abfluss in den Trichter laufen. Die Düse des Einfüllbehälters sollte so bemessen sein (ca. $0,6\text{ mm}$ Durchmesser), dass die Wassermenge in $10\text{ min bis }12\text{ min}$ in den Trichter ausgelaufen ist. Danach sollten 100 ± 2 Wippenkippen gezählt worden sein.

Niederschlagssensor mit Kippwaage n. Joss-Tognini

Dieser Niederschlagssensor 15188 H der Fa. Lambrecht ist im SwissMetNet im Einsatz. Er ist dem Niederschlagsmengenmesser 1518 H (Lambrecht) mit Kippwaage sehr ähnlich, besitzt auch ein Wippenmesssystem-Konstruktion nach Joss-Tognini und entspricht ebenfalls den WMO-Richtlinien. Das Wippenvolumen beträgt 2 cm^3 (2 g). Die wiegenden Wippen entleeren sich selbst und registrieren alle Niederschläge. Ein Überlaufen ist dabei nicht möglich.

Tab. 11.5 Spezifikationen Niederschlagssensor 15188 H (Lambrecht)

Messprinzip	Kippwaage
Messelement	Präzisions-Edelstahlwippe n. Joss-Tognini auf Schneidenlagern
Wippeninhalt	$2\text{ cm}^3 = 0,1\text{ mm}$
Messbereich	0 bis 10 mm min^{-1}
Genauigkeit	$\pm 2\%$
Einsatzbereich	Temperaturen 0 bis $+70\text{ }^\circ\text{C}$ · messend -30 bis $+70\text{ }^\circ\text{C}$ mit Heizung nicht vereisend, nicht verwehend
Regeltemperatur	$4\text{ }^\circ\text{C} \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ im Bereich von -20 bis $+4\text{ }^\circ\text{C}$
Heizleistung 170 W	elektr. gesteuertes Zwei-Kreis-Präzisionsheizungssystem 100 W Ablauftrichter · 70 W Ablauf/Wippe
Versorgungsspannung	18 bis 30 V DC

Abb. 11.16 Niederschlagssensor 15188 H (Lambrecht)



Das Gehäuse ist aus eloxiertem Aluminium, das auf einem Sockel steht.

Regenmesser RG13H

Im automatischen Wetterbeobachtungssystem MIDAS IV AWOS (siehe 18.4) wird zur Niederschlagsmessung der Regenmesser RG13H der Fa. Vaisala verwendet. Der Sensor besteht aus einer Kippwaage mit einem Fassungsvermögen von $0,2\text{ mm}$. Bei jedem Kippvorgang schließt ein Magnet den Kontakt eines Reedswitchers (siehe 11.3.2 Kippwaage).

Tab. 11.6 Regenmesser RG13H (Vaisala)

Durchmesser des Behälters	225 mm
Auffangfläche	400 cm^2
Niederschlagskapazität	unbegrenzt
Empfindlichkeit (Regen pro Pulse)	$0,2\text{ mm}$
Heizung	$38\text{ W}/40\text{ V AC}$

Abb. 11.17 Regenmesser RG13 H (Vaisala)



Das Gehäuse und der Aufnahmebehälter bestehen aus einer Aluminiumlegierung. Der äußere Ring um das Aufnahmegefäß garantiert eine Auffangfläche von 400 cm^2 . Eine Heizung im Inneren des Behälters sorgt bei Schneefall für das Schmelzen des Schnees; ein Thermostat schaltet sie automatisch bei $+4\text{ }^\circ\text{C}$ ein.

Wippen sind streng genommen keine Mengengeräte, auch wenn sie von Firmen z. T. so bezeichnet werden. Es

handelt sich dabei um Intensitätsmessgeräte, da sie keine Akkumulation durchführen, sondern die Zeit ermitteln, die benötigt wird, eine bestimmte Niederschlagsmenge zu sammeln.

11.3.3 Optische Niederschlags erfassung – Distrometer

Die bisher beschriebenen Niederschlagsmesssysteme messen die Niederschlagsmenge, die während eines bestimmten Zeitraumes gefallen ist. Sie liefern auch Aussagen zu Beginn und Ende und damit zur Dauer des Niederschlages, z. T. mit sehr hoher zeitlicher Auflösung. Um jedoch Informationen zur Größenverteilung und Geschwindigkeit von Niederschlagselementen und zu deren Art zu erhalten, müssen optische Messmethoden angewandt werden, die von Distrometern (engl. disdrometer) geleistet werden. Dann sind auch generelle Aussagen über Niederschlagsspektren möglich. Die Erfassung der Niederschlagsmenge und deren zeitlichen Verlauf, also die Intensität des Niederschlages ist ebenfalls mit Distrometern möglich. Im Gegensatz zu den altbewährten Messmethoden wird hier jedoch kein Messgefäß benötigt.

Als Lichtquelle wird normalerweise eine Laserdiode eingesetzt, die ein Lichtband als Sensorfläche erzeugt, mit der die Größenverteilung und Geschwindigkeit erfasst werden kann. Problem dabei ist, dass diese Parameter bei den verschiedenen Niederschlagsarten sehr unterschiedlichen groß sind (Tab.11.7) und darauf die Bandbreite des Lichtbandes abgestimmt werden muss.

Tab. 11.7 Größenverteilung und Geschwindigkeiten von Niederschlägen

Niederschlagsart	Tropfendurchmesser mm	Geschwindigkeit m s ⁻¹
Sprühregen	0,1 bis 0,5	0,25 bis 2,0
Regen	0,5 bis 5,0	2,0 bis 9,0
Schneekristalle	1,0 bis 5,0	0,3 bis 0,7
Schneeflocken	> 10,0	1,0 bis 2,0
Schneegriesel	< 1,0	0,3 bis 1,0
Reifgraupel	< 5,0	1,5 bis 4,0
Frostgraupel	1,0 bis 5,0	1,5 bis 5,0
Eiskörner	< 5,0	1,0 bis 2,5
Eisnadeln	sehr kleine Kristalle	0,5
Hagel	5,0 bis 50,0	5,0 bis 30,0

Sicherheitshinweise zum Umgang mit Laser siehe Anhang 6.2.

Optischen Niederschlagsmessgeräte messen mit Lichtstrahlen die Teilcheneigenschaften und umgehen damit das Problem, dass Eis- und Schneeteilchen sehr unterschiedliche Dichten haben und nicht nur über den Impuls die Teilchengeschwindigkeit bzw. Teilchengröße bestimmt werden kann. Da Distrometer eine direkte Messung des Tropfenspektrums, welches durch die Größenverteilung oder spektrale Dichteverteilung (eine Funktion von Tropfenzahl N und Tropfendurchmesser D) $N(D)$ in einem Volumen beschrieben wird, vornehmen, kann das Ergebnis mit

indirekten Radarmessungen verglichen werden. Die Regenmenge, gemessen mit einem Radargerät, wird durch die Messung der Leistung des empfangenen Signals ermittelt. Beeinflusst wird sie u. a. durch

- technische Eigenschaften des Radars
- Empfindlichkeit des Empfängers und
- Gewinn und Strahlbreite der Antenne.

In den vom Radar gelieferten Wert der Radarreflektivität Z fließen alle von ihm erfassten Niederschlagsteilchen mit der sechsten Potenz ihres Durchmessers ein.

$$Z = \frac{1}{\Delta V} \sum_{i \in \Delta V} D_i^6 \quad (11.3)$$

Nur wenn die Anzahl und der Durchmesser der Niederschlagsteilchen bekannt sind, ist eine einigermaßen gute Zuordnung der Regenrate R zur Radarreflektivität Z oder umgekehrt nach folgender empirischer „Z/R-Beziehung“ möglich:

$$Z = a \cdot R^b \quad (mm^6/m^3) \quad (11.4)$$

mit $a, b =$ vom Tropfenspektrum abhängige Konstante (über 70 verschiedene Werte); im DWD wird die Beziehung mit den Werten gerechnet
 $R =$ Regenrate (Niederschlagsmenge) mm

Die Anzahl und die Größenverteilung der Niederschlagstropfen in einem Streuvolumen sind meist unbekannt und hängen von Wetterlage, Jahres- und Tageszeit sowie von orografischen Effekten ab. Deshalb ist die Verwendung eines Distrometers im Zusammenhang mit einem Radar nahezu unerlässlich, um solche Ergebnisse zu erhalten.

Laser-Niederschlagsmonitor (LNM)

Der Laser-Niederschlags-Monitor der Fa. Thies GmbH & Co. KG, Göttingen ist ein optisches Distrometer, welches die Größe, Geschwindigkeit und Anzahl der Partikel misst, die ihn passieren. Der Sensor dient damit der Bestimmung der aktuellen Niederschlagsart als Ersatz für visuelle Beobachtungen an vollautomatischen, hauptamtlichen Stationen.

Berechnet werden Niederschlagsintensitäten zwischen $<0,005 \text{ mm h}^{-1}$ (Sprühregen) bis $>250 \text{ mm h}^{-1}$, -menge, -art (Sprühregen, Regen, gefrierender Sprühregen bzw. Regen, Schnee, Schneegriesel/Eisnadeln, Graupel, Hagel und Eiskörner sowie Mischniederschläge) und die Verteilung der Partikel auf das Partikelspektrum (Durchmesser und Geschwindigkeit). Die Niederschlagsart wird aus dem statistischen Verhältnis aller Partikel bezüglich Durchmesser und Geschwindigkeit bestimmt.

Abb. 11.18 LNM Funktionsprinzip (Thies)



Mittels einer laseroptischen Strahlquelle (Laserdiode und Optik) wird ein paralleles, horizontales Infrarotlichtband erzeugt. Auf der Empfängerseite sitzt eine Photodiode (siehe 6.3) mit integriertem Tageslichtfilter und einer Linse, um durch Umwandlung in ein elektrisches Signal die optische Leistung zu messen. Fällt ein Niederschlagspartikel durch das einstrahlige Lichtband, wird das Empfangssignal durch Extinktion abgeschwächt und gemessen. Simultan wird der Maximalwert (U_{max}) und die Signaldauer (time interval) gemessen.

Abb. 11.19 LNM Funktionsweise (Thies)

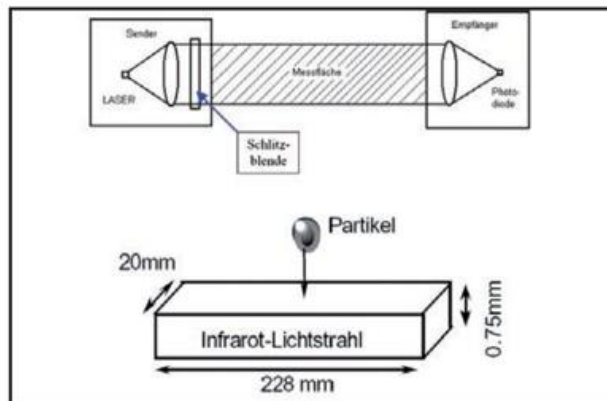


Abb. 11.20 Laser-Niederschlagsmonitor (Thies)



Aus der Amplitude der Abschwächung wird der Durchmesser der Partikel berechnet, wobei Teilchen mit einem Durchmesser von $0,16\text{ mm bis } >8\text{ mm}$ detektiert werden können. Außerdem wird aus der Dauer des Abschwächungssignals die Fallgeschwindigkeit der Partikel ermittelt. Die gemessenen Werte werden mit einem digitalen Signalprozessor (DSP, siehe 4.3) verarbeitet und auf Plausibilität (z. B. Randtreffer) überprüft.

Das System berechnet zusätzlich das Volumen (Wasseräquivalent), die meteorologische Sichtweite (MOR, siehe 13.1.1) im Niederschlag und die Radarreflektivität Z (11.3). Die optischen Komponenten gewährleisten zuverlässige, präzise Messungen und Ergebnisse in Echtzeit.

Zusätzlich wird mit einem an der Unterseite des Gerätes montierten Temperaturfühler die Lufttemperatur als Hilfsgröße zur besseren der Erkennung der Niederschlagsarten verwendet. Bei Temperaturen oberhalb $+9\text{ °C}$ werden die

Niederschläge automatisch als flüssig (Ausnahme: Graupel und Hagel) und unterhalb von -4 °C als fest angenommen. Im Temperaturbereich dazwischen können alle Formen des Niederschlags vorkommen.

Tab. 11.8 Spezifikationen Laser-Niederschlagsmonitor (Thies)

Lichtquelle	Laserdiode, Laser-Klasse 1M	
Wellenlänge	0,785 μm , max 0,5 mW	
Messfläche	45,6 cm^2 (23 x 2,0 cm)	
Klassifizierung	440 Klassen (22 Durchmesser, 20 Geschwindigkeit)	
Partikelgröße	0,16 bis $>8\text{ mm}$	
Partikelfallgeschwindigkeit	0,2 bis 20 m s^{-1}	
Genauigkeit*	Sprühregen $>97\%$ Schnee $>99\%$ Schneegriesel $>60\%$	Regen $>99\%$ Hagel $>95\%$
Auflösung	0,001 mm h^{-1}	
Sichtweite Niederschlag	MOR 0 bis 99,999 m	
Radarreflektivität	$Z = -9,9$ bis 99,9 dBZ	
Einsatzbedingungen	-40 bis $+70\text{ °C}$, 0 bis 100 %	
Versorgungsspannung	24 V AC/DC oder 22 bis 30 V DC	

*Genauigkeit der einzelnen Niederschlagspartikel bezieht sich auf einen Vergleich mit der synoptischen Beobachtung

Obwohl bei diesem Sensor fälschlicherweise oft von einem „Present-Weather-Sensoren“ (PWS) gesprochen wird, gibt es diese Messgeräte streng genommen (noch) gar nicht, da keines in der Lage ist, den gesamten wawa-Code (von 00 bis 99) zu erfassen. So ermittelt der eingesetzte LNM Niederschlagsart und -intensität und gibt diese als wawa-Code aus (Synop: wawa 4680, ww 4677, Metar 4678). Zur vollständigen Beschreibung des Wetterzustandes (wawa-Code 00 bis 99) müssen diese Angaben durch weitere Informationen ergänzt werden. Dies erfolgt durch einen wawa-Algorithmus, der in den AMDA II- und AMDA IE-Systemen implementiert ist. Damit ist die AMDA mit den angeschlossenen Sensoren quasi das „Present-Weather-Messsystem“.

Grundsätzlich ist zu beachten, dass der wa-wa-Code eine ganze Reihe von Wettererscheinungen beinhaltet, die bei gleicher Schlüsselzahl wie im ww-Code eine ganz andere Bedeutung haben und bei der graphischen Darstellung dieser Wettererscheinungen (z. B. in NinJo) auch andere Symbole erscheinen.

Im DWD sind zwei Versionen des Gerätes eingesetzt, die sich nur durch unterschiedlich starke Heizungen unterscheiden.

Pflege und Kontrolle der Funktionstüchtigkeit

Etwa alle 3 Monate sollten prophylaktisch die Glasscheiben des Sensors mit einem handelsübliches Reinigungstuch, wie es z. B. für Brillen verwendet wird gereinigt werden.

Insektenester, Spinnennetze, Pollenflug-Ablagerungen oder ähnliches müssen regelmäßig entfernt werden.

Sollte der Laser-Niederschlagsmonitor die Fehlermeldung „Scheiben verschmutzt“ ausgeben und der Fehler nach Reinigung noch bestehen, ist umgehend die zuständige SL-Einheit zu informieren die auch ausschließlich die Wartung des Gerätes durchführt.

Laser-Distrometer Parsivel®

Das Laser-Distrometer Parsivel® (Parsivel = Particel Size Velocity) der Fa. OTT MESSTECHNIK ist ein auf einem Laser basierendes optisches System zur Messung aller Arten von Niederschlägen. Es wird am MOHP, u. a. am Institut für Meteorologie und Klimaforschung der Universität Karlsruhe und am Schneefernerhaus auf der Zugspitze eingesetzt.

Abb. 11.21 Laser-Distrometer Parsivel® (OTT MESSTECHNIK)



Die Niederschlagspartikel werden differenziert und als Sprühregen, Nieselregen, Regen, Graupel, Hagel, Schnee, Schneeregen oder Schneegriesel klassifiziert. Die Unterscheidung der Niederschlagsarten Sprühregen, Regen, Hagel und Schnee ergibt > 97 % im Vergleich zu einem Wetterbeobachter.

Zur Niederschlagsmessung wird ein laseroptischer Sensor verwendet, dessen Sendeeinheit einen flachen horizontalen Lichtstrahl 1 m oberhalb der Erdoberfläche erzeugt, den die Empfängereinheit in ein elektrisches Signal umwandelt. Das Signal ändert sich, sobald innerhalb des Messbereichs ein Niederschlagspartikel durch den Strahl fällt. Der Grad der Lichtabschattung ist ein Maß für die Größe des Niederschlagsteilchens und in Kombination mit der Signaldauer wird dessen Fallgeschwindigkeit abgeleitet.

Abb. 11.22 Parsivel® OTT auf der Zugspitze (Foto: Löffler)



Die primär ermittelten Daten sind Größe und Geschwindigkeit jedes einzelnen Niederschlagspartikels, woraus das Größenspektrum, die Niederschlagsmenge und -intensität, die Niederschlagsart, die äquivalente Radarreflektivität Z (11.3), die Sichtweite im Niederschlag und die kinetische Niederschlagsenergie abgeleitet werden. Die dabei ermittelten Daten werden von einem digitalen Signalprozessor verarbeitet und gespeichert. Die Ergebnisse können an einen Datensammler oder an einen PC mit serieller Schnittstelle übertragen werden.

Tab. 11.9 Spezifikationen Laser-Distrometer Parsivel® (OTT MESSTECHNIK)

Lichtquelle	Laserdiode, Laser Klasse 1 (21 CFR 1040.10 und 1040.11)
Wellenlänge	0,650 µm
Leistung der Laserdiode	3 mW , durch gepulsten Laser reduziert auf 1mW
Messfläche	54 cm ²
Abmessungen des Lichtbandes	180 x 30 mm
Messbereich Partikelgröße (flüssig/fest)	0.2 bis 25 mm
Partikelgeschwindigkeit	0.2 bis 20 m s ⁻¹
Niederschlagsintensität	0,001 (Sprühregen) bis 1200 mm h ⁻¹
Messintervall	15 s bis 60 min
Verteilung der Niederschlagspartikel	32 Größen- und 32 Geschwindigkeitsklassen, 8 Niederschlagsarten (siehe oben)
Wetter-Code (WMO) Ausgaben	SYNOP: wawa 4680, ww 4677, METAR 4678 und NWS- Tabellen (21 Niederschlagstypen)
Sichtweite im Niederschlag	100 bis 5000 m (MOR) ±10 %
Radarreflektivität Z	-9,9 bis 99 dBz ±20 %
Einsatzbedingungen	-40 bis +70 °C , 0 bis 100 %
Versorgungsspannung	10 bis 36 V DC, 12 V, 600 mA

Die Fa. OTT MESSTECHNIK hat mit **Parsivel®2** ein Nachfolgemodell entwickelt, dass sich vom Messprinzip nicht vom Vorgängermodell unterscheidet, aber einige technische Veränderungen aufweist. Eine wesentliche Veränderung betrifft die Laserdiode. Sie ist mit einem homogenen Lichtstrahl im Infrarotbereich mit einer Wellenlänge von 0,78 µm ausgestattet, mit der die Niederschlagselemente besser differenziert und klassifiziert werden können.

Als weitere Änderung besitzt Parsivel®2 zusätzlich eine Vorwärtsstreulichtdiode, welche die meteorologische Sichtweite (MOR) bis 2000 m auch außerhalb des Niederschlages bestimmt. Damit ist Parsivel®2 ein PWS-Distrometer, d. h. dass es die Eigenschaften eines laseroptischen Distrometers mit der Bestimmung der MOR verbindet.

Niederschlagswächter

Die Niederschlagsdauer wird im DWD mit dem Niederschlagswächter der Fa. Thies GmbH & Co. KG, Göttingen bestimmt. Er dient als Signalgeber zur Ermittlung von Niederschlagsbeginn und -Ende und Niederschlag ja/nein.

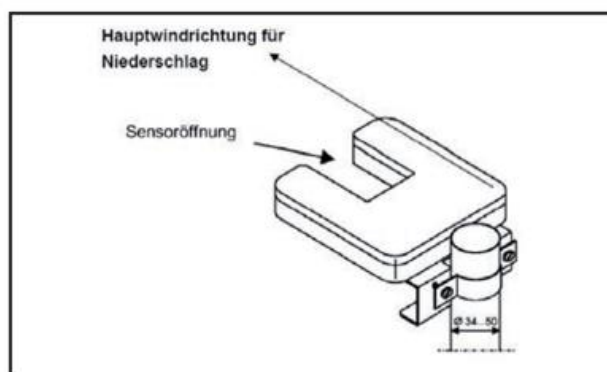
Beim Durchfallen von Niederschlagsteilchen durch das Infrarot-Lichtschrankensystem wird ein Schaltsignal in der nachgeschalteten Elektronik ausgelöst. Gleichzeitig wird auf der Empfängerseite die Verdunkelungszeit und dessen Intensität erfasst, die dann durch ein Relaiskontakt die Niederschlagsart (Sprühregen, Regen, Schnee oder Hagel) ab einer Tropfengröße $\geq 0,2 \text{ mm}$ signalisiert. Damit keine Fehlinterpretationen durch Insekten, fallende Blätter o.ä. entstehen, müssen mindestens 2 Partikel innerhalb von 50 s mit einer bestimmten Geschwindigkeit das Lichtschrankensystem passieren, bevor der Sensor „Niederschlag“ meldet. Wenn 25 s keine weiteren Partikel erkannt werden, wird der Status „Kein Niederschlag“ ausgegeben.

Abb. 11.23 Niederschlagswächter (Thies)



Die Sensoröffnung des U-förmigen Gerätes ist in die Hauptwindrichtung für Niederschläge zu installieren, damit die Niederschlagspartikel möglichst ungehindert durch die Lichtschanke fallen können.

Abb. 11.24 Niederschlagswächter, Schemazeichnung (Thies)



Für extreme Witterungsbedingungen ist das Gerät mit einer Heizung ausgestattet, um das Zuschneien bzw. Einfrieren des Gerätes im Winter zu verhindern.

Tab. 11.10 Spezifikationen Niederschlagswächter (Thies)

Lichtquelle	Infrarotleuchtdiode
Messwert	Niederschlagsstatus (Regen, Schnee, Hagel etc.)
Ausgang	Niederschlag = Relais OFF (auch bei UB = 0); kein Niederschlag = Relais ON
Sensorfläche	25 cm ²
Tropfengröße	$\geq 0,2 \text{ mm}$
Einschaltbedingung	1 bis 15 Ereignisse innerhalb 50 s
Einschaltverzögerung	keine
Ausschaltverzögerung	25 bis 375 s
Kontaktbelastung	max. 230 V AC; 4 A
Umgebungstemperatur	-25 bis 55 °C
Versorgungsspannung	24 V AC/DC $\pm 15 \%$
Betriebsstrom	ca. 70 mA
Heizstrom	max. 1 A

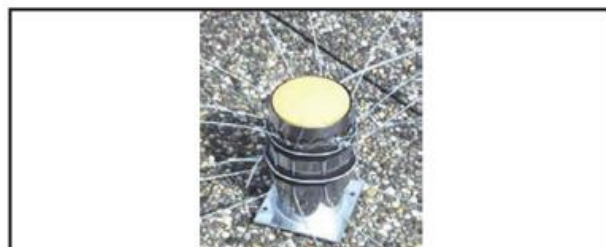
Pflege und Kontrolle der Funktionstüchtigkeit

Die Messfläche innerhalb des „Hufeisens“ muss frei von Reifenlagerungen und Spinnen sein, da sie Fehlimpulse auslösen können. Das Gerät darf keinen starken Erschütterungen oder Vibrationen ausgesetzt sein. Verschmutzungen (z. B. Staub oder Salz) sind unkritisch, d. h. gelegentliche Reinigung mit feuchtem Tuch genügt. Fremdlicht (z. B. Sonne) verursacht keine Störungen.

Joss-Waldvogel-Distrometer RD-80

Dieses Distrometer ist ein von den Schweizern Jürg JOSS und Albert WALDVOGEL entwickeltes und von der Fa. DISTROMET LTD, Basel hergestelltes elektronisches Gerät zur automatischen und kontinuierlichen Messung der Tropfengröße von Niederschlag. Es wird u. a. am Institut für Meteorologie und Klimaforschung der Universität Karlsruhe und an der ETH Zürich eingesetzt.

Abb. 11.25 Joss-Waldvogel-Distrometer RD-80 (DISTROMET LTD)



Das Gerät transformiert den mechanischen Impuls eines fallenden Tropfens, abhängig von der Vertikalgeschwindigkeit in einen elektrischen Impuls, dessen Amplitude eine Funktion der Masse und damit des Tropfendurchmessers ist. Die Analyse der Impulshöhen ergibt die Größenverteilung der Niederschlagstropfen. Die Tropfen jeder Klasse

werden summiert und dargestellt oder in Niederschlagsmengen ($l m^{-2}$) umgewandelt.

Der Zusammenhang zwischen Tropfendurchmesser D und Amplitude des Ausgangssignals ist

$$U = 0,94 \cdot D^{1,47} \quad (11.5)$$

mit U = Spannung (V)
 D = Durchmesser (mm)

Das Distrometer besteht aus einem ca. 30 cm hohen Metallzylinder, dessen obere Deckfläche die Messmembran darstellt, auf die der zu messende Niederschlag fällt und die dem Prozessor für analoge Verarbeitung und Digitalisierung die Sensorsignale zuführt. Die Tropfen werden bezüglich ihres Volumens in sog. Distrometerklassen eingeteilt. Aus der Information wie viele Tropfen welcher Klasse gefallen sind, lässt sich die Niederschlagsmenge berechnen. Gleichzeitig wird die Art des Niederschlags (Sprühregen, Regen, Schauer, Gewitter, etc.) ermittelt.

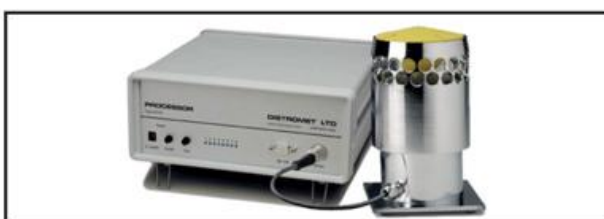
Tab. 11.11 Spezifikationen Joss-Waldvogel-Distrometers RD80 (DISTROMET LTD)

Tropfendurchmesser	0,3 bis 5 mm
Messfläche	50 cm ²
Genauigkeit	±5 % des gemessenen Tropfendurchmessers
Auflösung	127 Größenklassen, mehr od. weniger exponentiell verteilt über das gesamte Spektrum der Tropfendurchmesser
Einsatzbedingungen	0 bis +40 °C für den Prozessor 0 bis +50 °C für den Sensor
Versorgungsspannung	115/230 V AC, 5,5 VA, 50/60 Hz oder 9 bis 18 V DC, 3,3 W

Abb. 11.26 Joss-Waldvogel-Distrometer RD-80, Innenansicht (DISTROMET LTD)



Abb. 11.27 Joss-Waldvogel-Distrometer RD-80 Gesamtgerät (DISTROMET LTD)



11.3.4 Erfassung des Niederschlages mittels Widerstandsmessung

Niederschlagsmelder

Mit dem Niederschlagsmelder der Fa. Kroneis, Wien erfolgt die Erkennung des Niederschlages mittels Widerstandsmessung. Der beheizte Sensorkopf verfügt über mehrere parallel zueinander laufende Leiterbahnen. Fällt Niederschlag auf diese Leiterbahnen, verringert sich der elektrische Widerstand zwischen den Leiterbahnen und ein Relais wird geschaltet. Der Niederschlagsmelder verfügt über einen Schaltausgang (Niederschlag Ja/Nein). Durch eine Beheizung des Sensorkopfes (bis auf ca. 50 °C) werden die Wassertropfen auf der Sensorfläche verdampft und damit das Schaltsignal wieder geöffnet (= kein Niederschlag), sobald die Oberfläche wieder trocken ist. Da das Verdampfen der Wassertropfen eine gewisse Zeit in Anspruch nimmt, zeigt der Sensor nach dem Ende eines Niederschlagsereignisses eine Nachlaufzeit von 3 min bis 5 min. Fallen in der Zwischenzeit weitere Niederschlagspartikel auf die Sensoroberfläche, bleibt das Schaltsignal auf „Niederschlag ja“. Die untere Heizstufe ist auf ca. 20 °C eingestellt und verhindert eine Taubildung und Falschmeldung bei Nebel.

Abb. 11.28 Niederschlagsmelder (Foto: Kroneis)



Der Kunststoffring ermöglicht auch bei Hagel, Graupel oder Schnee eine Erkennung des Niederschlages.

Pflege und Kontrolle der Funktionstüchtigkeit

An Wetterwarten mit Personal wird einmal täglich eine Funktions- und Sichtkontrolle durchgeführt. Bei Unterbrechung der Lichtschranke, z. B. durch schnelles zweimaliges Durchziehen der Finger von oben nach unten, schaltet hörbar ein Relais, das nach ca. 25 s zurück schaltet. Hiermit wird ein Niederschlagsereignis simuliert.

Durch Auflegen der Handfläche auf die relativ warme Geräteoberseite kann die Funktion der Heizung überprüft werden. Im Winter darf sich dort keine Schneehaube bilden.

Weiterhin wird eine Sichtkontrolle mit eventueller anschließender Reinigung des Sensors durchgeführt. Besonders Spinnennetze und andere Fremdkörper sollen aus der Sensoröffnung entfernt werden. Hauptsächlich an Küstenstationen muss auch auf Salzablagerungen geachtet wer-

den. Während der Blütezeit von Pflanzen kann es zu Ablagerungen von Blütenstaub kommen, der zu entfernen ist.

Nach längeren Trockenperioden kann die sensible Sensorenfläche verschmutzen. Auch durch eine benachbarte Baustelle, landwirtschaftliche Bearbeitung des Ackerbodens oder bei Ernteeinbringung können Verschmutzungen des Sensors auftreten. Die Reinigung des gesamten Sensors ist mit warmem Wasser mit einigen Tropfen Spülmittel und einem sauberen, weichen Schwamm oder Tuch (um Kratzer zu vermeiden) durchzuführen. Die Oberflächen des Sensors werden nach der Reinigung abgetrocknet.

11.3.5 Messung abgelagerter Niederschläge, Schneehöhenmessung

Niederschläge, die in fester Form den Erdboden erreichen, lagern sich bei negativen Lufttemperaturen und – schneller noch – bei gleichzeitig negativen Erdbodentemperaturen ab und führen zu Decken aus gefallenem festen Niederschlägen, die als **Schneedecke** sowie als **Decke aus Graupel oder Hagel** bezeichnet werden, wobei unter der Bezeichnung Graupel gemäß DWD VuB 2, Band D Reifgraupel, Frostgraupel, Schneegriesel und Eiskörner zusammengefasst sind. Da Graupel (nicht Schneegriesel und Eiskörner) oder Hagel überwiegend in der warmen Jahreszeit auftreten, werden diese Ablagerungen selten von längerem Bestand sein.

Folgende Schneeparameter werden im Messnetz des DWD erfasst:

- Höhe der Gesamtschneedecke (cm)
- Schneebedeckungsgrad
- Wassergehalt der Schneedecke, sog. Wasseräquivalent (mm)

Die Messung der Schneehöhe wird an personalbesetzten Wetterstationen und im nebenamtlichen Messnetz noch manuell durchgeführt, während an automatischen hauptamtlichen Stationen des DWD Ultraschallsensoren (siehe 11.3.5.2) eingesetzt werden.

Für die Schneemessung gilt, dass bei Vorhandensein einer geschlossenen oder durchbrochenen Schneedecke von mindestens 1 cm Höhe die Messung der Schneedeckenhöhe zum Morgentermin, d.h. um 07.00 Uhr MEZ, erfolgt. „Durchbrochene“ Schneedecke heißt, dass der Erdboden an einzelnen Stellen sichtbar ist und die Schneebedeckung in der Umgebung des Messplatzes $\geq 50\%$ beträgt.

Schneeflecken oder Schneereste bedeutet, dass die Schneedecke in diesen Fällen nur noch an einzelnen, nicht zusammenhängenden Stellen vorhanden ist. Abgesehen davon, dass diese Restflächen nur eine ganz untergeordnete Rolle in der Bilanz (Wasseräquivalent) spielen, sind dabei vielmehr auch subjektive Faktoren bei der Beobachtung und ganz spezifische Standortbesonderheiten als maßgebliche verfälschende Einflüsse zu beachten.

Technisch bedingt ist die Niederschlagsmessung bei Schneefall, der im Regenschirm aufgefangen wird, jedoch erst beim Tauen gemessen wird nicht ganz korrekt. Daher sind die an-

gegebenen Niederschlagsmengen von Schnee mit denen des flüssigen Niederschlags nicht so ohne weiteres vergleichbar.

11.3.5.1 Schneepegel

Die Messung der Neuschneedeckenhöhe, kurz „Neuschneehöhe“ erfolgt zum Morgentermin (06 UTC) auf einem Schneebrett. Auch die Höhe von neu entstandenen Decken aus Hagel oder Graupel wird auf dem Schneebrett durchgeführt. Es ist ein weiß lackiertes Holzbrett mit einer Fläche von 1 m^2 , das sich im Beobachterhaus befindet um Verwitterung zu vermeiden. Im Winterhalbjahr, wenn Niederschläge in fester Form zu erwarten sind, wird es ausgelegt. Das Schneebrett soll nicht in einer Mulde liegen, da dort feste Niederschläge angeweht werden können. In der wärmeren Jahreszeit muss die Höhe von Graupel oder Hagelschichten, sofern diese zu den Terminen auftreten, an einer ebenen Stelle bestimmt werden.

Die Messung der Schneehöhe erfolgt mit dem Schneepegel (Abb. 11.29), einem Metallmessstab mit Markierungen in Zentimeter-Abständen, deren Anfangspunkt an der unteren Kante liegt. Der Schneepegel wird lotrecht bis zur Bodenberührung des Schneebretts oder an mehreren Stellen des Stationsgeländes und in der Umgebung bis zu 100 m Entfernung durch die Ablagerungen gestoßen und die Höhe in ganzen cm an der Skala abgelesen. Die **Schneedeckenhöhe** (kurz „**Schneehöhe**“), aber auch die Höhe der Decken aus Graupel oder Hagel ist dann das Mittel aus allen Messungen.

Abb. 11.29 Schneepegel



Der Schnee ist nach der Messung vom Brett zu entfernen; anschließend ist das Brett auf eine eventuell vorhandene Decke aus Ablagerungen von festen gefallenem Niederschlägen zu legen. Wenn durch Windeinfluss eine Neuschneedecke auf dem Brett nicht bestimmt werden kann, ist zu versuchen, die Messung an anderen geeigneten Stellen durchzuführen.

Ursprünglich sollten im Projekt Messnetz 2000 für alle ca. 1850 nebenamtlichen Stationen des DWD Bretter beschafft werden. Aufgrund der hohen Kosten und der negativen Erfahrungen, die mit dem Schneebrett gemacht wurden, sind wesentlich weniger beschafft worden. Die glatte Oberfläche führt dazu, dass der Schnee u. U. abgeweht wird (mangelnde Schneehaftung). Die Installation ist problematisch, weil bei unebenem Untergrund ein ausreichender Bodenkontakt nicht immer gegeben ist. Dadurch ist der Wärmeübergang

vom Boden auf das Brett gestört und die Oberflächentemperaturen können sich unterscheiden. Zu späte Schneedeckenbildung bzw. zu frühes Abschmelzen kann die Folge sein.

Aufgrund der o.g. ungünstigen Eigenschaften wurden auf der Suche nach anderen Materialien an der AWst Braunlage zwei unterschiedliche, wasserdurchlässige Kunstrasenmatten erprobt. Beide Matten sind aus dem Grundmaterial Polypropylen hergestellt mit den Eigenschaften witterungs- und UV-beständig sowie seewasserfest. Verglichen wurden ein 7–8 mm langer Kunstrasen mit Drainage und ein 40 mm langer Kunstrasen mit 5 mm großen Drainagelöchern.

Die Auswertung erfolgte mit Hilfe des Videokamerasystems WeBoKaN (Abb. 11.30, Bildmitte, am linken Bildrand befindet sich der Schneehöhensensor SR50).

Abb. 11.30 Erprobung von Kunstrasen



Aufgrund der schlechten Handhabung der Kunstrasenmatten bei der Installation (Erdreich vorbereiten, planes und straffes Verlegen, sturmsichere Befestigung) und der aufwendigen Pflege der umgebenden Rasenfläche während der Wachstumsperiode, ergab sich als Fazit, dass Kunstrasenmatten keine Alternative zum Schneebrett darstellen und somit nicht empfehlenswert sind. Eine Lösung könnte darin bestehen, eine witterungsbeständige Kunststoffplatte mit einer Kunstrasenmatte zu bekleben. Dies muss aber noch erprobt werden.

11.3.5.2 Ultraschallsensoren

Da sich innerhalb eines Tages die Schneebedeckung und die Schneemächtigkeit grundlegend ändern können und Winterhochwasser häufig durch Taufluten ausgelöst werden, sind kontinuierliche, automatische Schneemessungen eine wertvolle Informationsquelle.

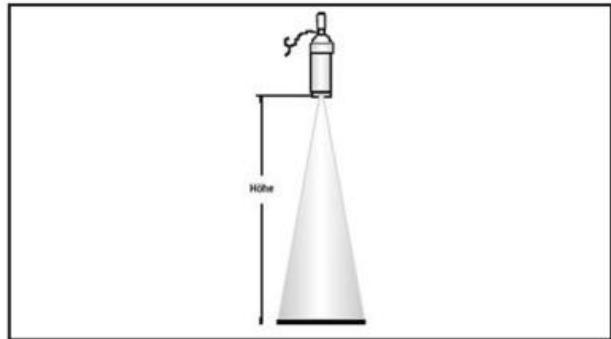
Die Standard-Schneebretter werden im DWD auch als Referenzplatte für Ultraschall-Schneehöhenmessungen eingesetzt und müssen daher einheitlich installiert sein. Vor

dem Auflegen des Schneebrettes sollte der Rasen gemäht sein. In vier ausgehobenen Erdlöchern müssen die Füße des Schneebrettes Platz finden, so dass das Brett eben auf dem Boden aufliegt um guten Kontakt zum Boden zu haben.

Ultraschallschneehöhensensor SR50-G1

Hauptanwendungsbereich des Schneehöhensensors SR50-G1 (Sonic Ranging Sensor) der Fa. Campbell Scientific Ltd. ist die Messung einer Distanz senkrecht zu einem Ziel, in der Meteorologie zur Schneehöhe und zum Wasserstand. Um ein möglichst gut definiertes „Null-Niveau“ bereitzustellen und damit z. B. Fehlmessungen durch wachsendes Gras zu vermeiden, wird im DWD ein Standard-Schneebrett (siehe 11.3.5.1) auf die Messfläche gelegt. Die Höhe des Ultraschallwandlers SR50-G1 über dem Schneebrett beträgt i. d. R. etwa 2,5 m.

Abb. 11.31 Gegenstandsfreier Richtungsstrahl (Campbell Scientific Ltd.)



Der Sensor basiert auf einem kombinierten 50 kHz Ultraschallsignalumwandler der Ultraschallwellen mit einem Öffnungswinkel von ca. 22° sendet und die von der Schneeoberfläche reflektierten Echos im Sensor (Empfänger) interpretiert. Die Zeitspanne zwischen Signalsendung und Empfang des Echos ist die Basis für die Berechnung des Abstands zwischen dem Sensor und der Schneeoberfläche. Nach Differenzbildung zur Installationshöhe (Boden) wird die tatsächliche Schneehöhe bestimmt. Sie ist damit eine Punktmessung über einem Schneebrett.

Abb. 11.32 Ultraschneehöhensensor SR50-G1 (Campbell Scientific Ltd.)



Da die Schallgeschwindigkeit von der Lufttemperatur abhängig ist (siehe 8.2.4), muss der Abstandsmessung eine externe Temperaturkompensation folgen, die zu diesem Zweck auf die ermittelten Schallwerte angewandt wird. Sie wird mit der

in der DWD-Wetterhütte in 2 m Höhe gemessenen Lufttemperatur nach folgender Formel in der AMDA berechnet:

$$\text{Distanz} = \text{Messwert (SR50-G1)} \cdot \sqrt{\frac{T(K)}{273,15}} \quad (11.6)$$

Der SR50-G1 berechnet die Distanz unter Anwendung der Schallgeschwindigkeit von $331,5 \text{ m s}^{-1}$ bei 0°C . Ohne Temperaturkompensation gelten die Distanzwerte also nur für eine Temperatur von 0°C . Um die Schneehöhe zu berechnen, muss die Distanz zur Schneeoberfläche von der Distanz zur Bodenoberfläche subtrahiert werden.

Abb. 11.33 Ultraschallschneehöhensensor SR50-G1, Nahaufnahme (Campbell Scientific Ltd.)



Der SR50-G1 ist in der Lage, kleinste Ziele sowie Ziele mit großer Schallabsorption, wie z. B. Schnee in geringer Dichte zu erfassen. Er kann mehrere Ziele erfassen und erreicht mit Hilfe eines besonderen Algorithmus eine hohe Messzuverlässigkeit. Der SR50-G1 gibt zusätzlich einen Datenwert aus, der die Messqualität widerspiegelt.

Tab. 11.12 Spezifikationen Ultraschallschneehöhensensor SR50-G1 (Campbell Scientific Ltd.)

Messbereich	0,5 bis 10,0 m (max. 1 % des Abstandes Sensor-Ziel)
Messdauer	0,6 s, max. 3,0 s
Messzyklus	1 min (Auto)
Genauigkeit	$\pm 1 \text{ cm}$ oder max. 1 % des Abstands Ziel-Sensor
Einsatzbereich	-50°C bis $+50^\circ\text{C}$
Betriebsspannung	12 V DC

Pflege und Kontrolle der Funktionstüchtigkeit

Die Pflege der Messeinrichtung beschränkt sich auf die äußerliche Reinigung des Sensors mit einem feuchten Tuch und das Entfernen von Spinnweben. Ansonsten ist eine Sichtprüfung der Sensoren und der Verkabelung auf etwaige Schäden vorzunehmen. Bei erkennbaren Schäden ist die zuständige SL-Einheit zu informieren, die ausschließlich für die Wartung des Sensors zuständig ist.

Der Raum unterhalb des Sensors muss ganzjährig frei von Bewuchs (ausgenommen Rasen) und Hindernissen gehalten werden. Die korrekte Lage (Mitte des Brettes senkrecht unter dem Sensor, waagerechte Lage) und die Sauberkeit des Schneebretts sind zu überprüfen; die Lage darf keinesfalls verändert werden.

Zum Austausch des Trockenmittels muss der Sensorkopf abgeschraubt werden. Die Päckchen mit dem Trockenmittel können dann herausgenommen (gegebenenfalls Spitzzange benutzen) und mit frischen Päckchen ausgetauscht werden. Das aufgebrauchte Trockenmittel kann in einem Ofen wieder aufbereitet werden.

Schneehöhensensor SHM30

Die Schneehöhenmessung mit dem Schneehöhensensor SHM30 von Jenoptik basiert auf einem optoelektronischen Laser-Distanzsensor und ermöglicht die Detektion von Schneeoberflächen millimetergenau und innerhalb von Sekunden aus einer Entfernung von bis zu 15 m durch Überschreiten eines Schwellenwertes der Signalstärke.

Abb. 11.34 Schneehöhensensor SHM30 (Foto: Jenoptik)

Abb. 11.35 Schneehöhensensor SHM30, schneebedeckt (Jenoptik)



Das optische Messverfahren ist unabhängig von Temperaturschwankungen und bietet damit einen großen Vorteil gegenüber herkömmlichen Ultraschallsensoren. Der Sensor misst 20° bis 30° gegen die Senkrechte geneigt. Er unterscheidet auch zwischen Schnee und anderen natürlichen Oberflächen (Gras, Stein).

Tab. 11.13 Spezifikationen Schneehöhensensor SHM30 (Jenoptik)

Laserdiode	Laserklasse 2
Messintervall	10 bis 600 s (einstellbar)
Messdauer	0,16 bis 6 s
Messgenauigkeit	$< \pm 5 \text{ mm}$
Messbereich Schneehöhe	0 bis 15 m
Betriebsbereich	-40 bis $+50^\circ\text{C}$, 0 bis 100 %
Stromversorgung	10 bis 30 V DC 15 bis 24 V DC mit Heizung

Vorteile des SHM30 (Jenoptik):

- Einfache Montage, da kein Geräteausleger benötigt wird.
- Keine Verfälschung der Schneehöhe durch herabfallende/abtropfende Schneereste oder Wassertropfen vom Gehäuse, da Schrägmessung.
- Schneebrett nicht notwendig (evtl. Integration eines Nullungsverfahrens in den Sensor).
- Detektiert zuverlässig Schneedecke Ja/Nein,
- Keine Beeinträchtigung der Schneehöhenmessung während eines Niederschlagsereignisses, d.h. 100 % Datenverfügbarkeit auch bei starkem Schneefall.

USH-8 Schneehöhensensor

Dieser Schneehöhensensor mit integrierter Temperatursensoren in selbstbelüftetem Radiationsschild von der Fa. Sommer, Voralberg entwickelt und gebaut, wird bei zentralen europäischen Wetterdiensten, beim Bayerischen Lawinenwarndienst als auch im Hochgebirgseinsatz anderer Lawinenwarndienste eingesetzt.

Durch seine robuste Bauweise und Langlebigkeit ist der USH-8 geeignet, zuverlässige Messungen der Schneehöhe auch unter extremen Umweltbedingungen zu ermöglichen. Die zusätzliche Erfassung der Lufttemperatur ermöglicht eine Messung der Schneehöhe über einen großen Temperaturbereich. Energiereiche Ultraschallimpulse ermöglichen auch bei schwierigsten Reflexionsverhältnissen, wie bei Pulver- oder Neuschneedecken zuverlässige Ergebnisse.

Abb. 11.36 USH-8 Schneehöhensensor (Sommer)



Tab. 11.14 Spezifikationen Schneehöhensensor USH-8 (Sommer)

Messprinzip / Sensor	Ultraschall (Frequenz 50 kHz; Abstrahlwinkel 12°)
Messbereich Schneehöhe	0 bis 8 m
Auflösung	1 mm
Genauigkeit	0,1 % (FS)
Temperaturmessbereich	-40 bis +60 °C, Auflösung 0,1 °C
Nichtlinearität	≤ 0,15 %
Schnittstelle – Analog	Abstand oder Schneepegel Signal: 0/4 bis 20 mA (konfigurierbar) Auflösung: 12 Bit max. Bürde 100 Ohm
Schnittstelle – Digital	Abstand oder Schneepegel und Lufttemperatur Protokoll: verschiedene ASCII-Protokolle
Betriebstemperatur:	-40 bis +60 °C
Versorgung	Versorgungsspannung: 10,5 bis 15 V DC
Energieverbrauch	0,5 Ah / Tag (bei Messintervall 1 min)
Stromaufnahme	max. 200 mA (Messphase, ca. 3 s) 5 mA (Stand by)

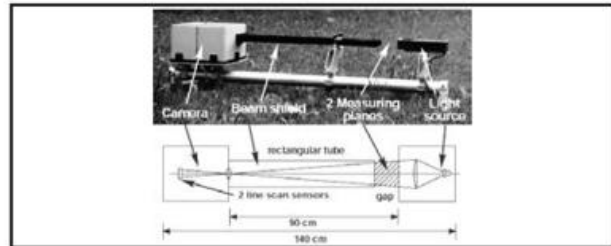
Der Sensor besitzt eine hohe Betriebssicherheit, geringe Energieaufnahme und kann auch mobil eingesetzt werden. Einstellen und Parametrisieren lässt sich der USH-8 per PC oder Laptop mittels Standard-Terminalprogrammen.

Optischer Schneespektrograph

Ein optischer Schneespektrograph ist an der ETH Zürich entwickelt worden. Er dient zur präzisen Messung der

Form- und Bewegungsinformation von Niederschlagsteilchen. Dabei werden die verschiedenen Vorteile der sonst existierenden Geräte miteinander verbunden.

Abb. 11.37 Optischer Schneespektrograph, ETH Zürich



Die Messung basiert auf dem Prinzip des optischen Abscansens. Der Spektrograph ist auf zwei horizontalen Flächen (mit „Gap“ markiert) sensitiv, die einen vertikalen Abstand von 1 cm haben (Abb. 11.37). Im Kameragehäuse befinden sich zwei eindimensionale Arrays von je 512 photosensitiven Elementen, die die Abschattung durch das Teilchen in jeder Fläche messen. Jedes Array scannt das Teilchen dabei zeilenweise ab und in einem Bild werden die Abschattungsinformationen abgespeichert.

Ein Zuordnungsalgorithmus ordnet die beiden korrespondierenden Abbildungen des Teilchens einander zu. Eine Größe, die die Güte einer möglichen Zuordnung beschreibt, wird für jedes Teilchenpaar ausgerechnet und nur die besten möglichen Zuordnungen werden dann tatsächlich ausgewählt. Die Größe errechnet sich sowohl aus Form- und Bewegungsinformationen der Teilchenpartner. Die Forminformation ergibt sich aus einer Reihe von Pixelvergleichen, die Bewegungsinformation daraus, inwiefern die örtliche Verschiebung der beiden verglichenen Abbildungen realistisch ist.

11.3.5.3 Vereisungssensoren

Gemäß ISO-12494 Standard ist die Definition für die Ablagerung von Eis ein Prozess der Eisbildung und Anhäufung von Schnee an einem Objekt an der Erdoberfläche, welches den atmosphärischen Bedingungen ausgesetzt ist, zu verstehen.

Atmosphärische Vereisungsbedingungen können in verschiedene Bildungsprozesse unterteilt werden:

1. Niederschlagsvereisung, entstanden aus gefrierendem Niederschlag oder nassem Schnee,
2. Vereisung in Wolken (einschl. Nebel),
3. Raureif (in diesem Zusammenhang nicht relevant)

Die Vereisung nach 1. und 2. hat die größte Dichte, verursacht durch allmähliche und gleichmäßige Verteilung der Eisablagerung. Sie ist hauptsächlich abhängig von

- Niederschlagsrate,
- Windgeschwindigkeit und
- Lufttemperatur

Die Messung der Eisablagerung wurde in Ostdeutschland während 1965–1990 an insgesamt 40 Stationen, von denen

35 gleichzeitig betrieben wurden, durchgeführt. Seit 1991 sind 6 Stationen des DWD in Betrieb, die alle Standardbeobachtungsmasten dazu nutzen. Die Messhöhen an den einzelnen Standorten sind unterschiedlich (Tab. 11.15).

Abb. 11.38 Kontinuierliche Messung der Eisablagerung seit 1991 bis heute



Tab. 11.15 Überblick der DWD-Stationen mit Eisablagerungsmessungen

Station	Höhe m NHN	Messhöhe m	Messgerät
Arkona	42	2, 5	EAG 200, durchgehend, accumulation and icing pole, intermittent, manual
Chemnitz	418	2, 5	
Zinnwald	877	2, 5	
Kahler Asten	839	10	EAG 200, durchgehend, accumulation
Hohenpeißenberg	977	10	
Lindenberg	73	5, 50, 90	

Vereisungssensor o871LH1

Der Vereisungssensor o871LH1 der Fa. Campbell Scientific Ltd. ist speziell für leichte Vereisung in Bodennähe, hervorgerufen durch gefrierenden Niederschlag konzipiert. Er wird auch als Freezing Rain-Sensor bezeichnet und ist, verglichen mit anderen Vereisungssensoren, die auch mäßige oder starke Vereisungsbedingungen erfassen, ein einfacher, kostengünstiger Sensor, der nur für die Enteisung des Sensors selbst eine Heizung benötigt.

Abb. 11.39 Vereisungssensor o871LH1 (Campbell Scientific Ltd.)



Tab. 11.16 Spezifikationen Vereisungssensor o871LH1 (Campbell Scientific Ltd.)

Messprinzip	Ultraschall Resonator
Frequenz	40 kHz
Ausgangssignale	1 = Eis, 0 = kein Eis
Fehlerstatus	1 = Fehler, 0 = kein Fehler (ok)
Signalauslösung	>0,50 mm ±0,13 mm Eisdicke
Einsatzbedingungen	-55 bis +71 °C
Leistungsaufnahme	15 W max, mit Heizung 50 W max.
Versorgungsspannung	22 bis 29,5 V DC

Ein Ultraschallsensor vibriert mit einer nominalen Resonanzfrequenz von 40 kHz. Als Nachweis des Auftretens von Vereisung bewirkt die zusätzliche Masse eine Abnahme dieser Resonanzfrequenz. Bei einer Frequenzabnahme, die einer Eisdicke von 0,50 mm entspricht, wird das Eissignal für 60 s aktiviert und der Eisdetektor initiiert einen Enteisungszyklus, der den Eisansatz entfernt. Wenn innerhalb von 50 s weiterer Eisansatz festgestellt wird, wird der Signal-Zeitmesser auf Null zurückgesetzt und das Eissignal bleibt für weitere 60 s aktiviert.

Abb. 11.40 Vereisungssensor o871LH1 vereist (Campbell Scientific Ltd.)



Sobald der Messfühler enteist ist, kühlt er innerhalb weniger Sekunden wieder ab und ist für erneute Eisbildung bereit. Wenn sich wieder Eis auf dem Messfühler bildet, sinkt die Frequenz um 130 Hz.

Der Sensor sollte mit einer Neigung von 20° bis 30° in die Hauptwindrichtung montiert werden, um das reibungslose Abfließen des Wassers an der Basis des Sensors zu ermöglichen.

Eisablagerungsgerät EAG

Das EAG 200 ist ein automatisches Vereisungsmessgerät, welches z. Zt. im DWD an einigen Stellen eingesetzt wird. Der Sensor misst das Gewicht der Eisansammlung an einem vertikalen Stab unter Ausnutzung eines elektromechanischen Systems.

Abb. 11.41 Eisablagerungsgerät EAG 200

Abb. 11.42 Eisablagerungsgerät EAG 200, vereist



Der Vergleich der Ergebnisse des EAG200 mit manuell erfassten Werten zeigte die Zuverlässigkeit der Daten des EAG 200. Versuche mit kontinuierlichen Langzeitmessungen zeigten auch, dass das System sogar bei kurzen Vereisungsperioden und nur geringen Mengen von Eisansammlung gut arbeitete.

Tab. 11.17 Spezifikationen EAG 200

Messprinzip	elektromechanische Skala
Messbereich	0 bis 10 kg
Auflösung	1 g
Genauigkeit	±50 g
Stabdurchmesser	0,032 m
-länge	0,5 m
-Material	PVC

Eismonitor

Der Eismonitor der Fa. Combitech AB, Östersund Schweden ist ein Sensor zur Erfassung von Eisablagerungen an einem vertikalen Stab. Er kann als Indikator zur Bewertung von Eisansatz an Masten, Leitungen, Türmen, Skiliften etc. genutzt werden. Er entspricht der ISO-12494 Standard.

Der Sensor arbeitet mit einem Druck-Transducer. Sobald sich an einer Seite des Stabes Eis angesetzt hat, beginnt er durch die Einwirkung des Windes, sich zu drehen.

Abb. 11.43 Eismonitor (Combitech)

Abb. 11.44 Eismonitor, vereist (Combitech)



Tab. 11.18 Spezifikationen Eismonitor (Combitech)

Messprinzip	Druck Transducer
Messbereich	0 bis 100 kg bzw. 0 bis 50 kg
Auflösung	1 g
Genauigkeit	±50 g
Stabdurchmesser	0,03 m
-länge	0,5 m
-Material	rostfreier Stahl
Einsatzbereich	-40 bis +50 °C
Stromversorgung	15 bis 30 V DC

Das Ausgangssignal ist analog, der Sensor ist auch an einen Datenlogger anschließbar.

11.3.6 Bestimmung des Wasseräquivalents

Das Wasseräquivalent einer Schneedecke – SWE (Schnee-Wasser-Äquivalent) ist der Oberbegriff für das absolute und das spezifische Wasseräquivalent einer Schneedecke. Das **absolute Wasseräquivalent** gibt an, welchen Wassergehalt der gesamte ausgestochene Schnee hat. Die Maßeinheit ist wie bei der Niederschlagshöhe mm, wobei 1 mm einem Schmelzwasser von 1 l m⁻² entspricht.

Das **spezifische Wasseräquivalent** gibt an, welchen durchschnittlichen Wassergehalt der ausgestochene Schnee pro cm Schneehöhe hat. Es wird nach folgender Formel berechnet:

$$W_s = \frac{n \cdot 10}{h} \text{ (mm cm}^{-1}\text{)} \quad (11.7)$$

mit W_s = spezifisches Wasseräquivalent
 n = abgelesener Skalenwert
 h = Höhe der ausgestochenen Schneedecke

Absolutes und spezifisches Wasseräquivalent der ausgestochenen Schneedecke werden aus dem abgelesenen Skalenwert (n) und der Höhe (h) berechnet. Das absolute Wasseräquivalent wird durch die Multiplikation des Skalenwertes „ n “ mit „10“ ermittelt und in mm angegeben.

Die **Schneedichte** ist die Masse des gefallenen Schnees bezogen auf die Volumeneinheit in g cm⁻³ im Zustand der natürlichen Lagerung. Die Umrechnung von Schneedichte in spezifisches Wasseräquivalent (und zurück) ist

$$1 \text{ g cm}^{-3} = 10 \text{ mm cm}^{-1}$$

$$1 \text{ mm cm}^{-1} = 0,1 \text{ g cm}^{-3}$$

Tabelle 11.19 zeigt Beispiele für das spezifische Wasseräquivalent einzelner Schneearten.

Tab. 11.19 Spezifisches Wasseräquivalent einzelner Schneearten

Schneeart	spezifisches Wasseräquivalent (mm cm ⁻¹)
Neuschnee	0,5 bis 1,5
Pulverschnee	1,0 bis 2,0
körniger Schnee	1,5 bis 4,5
gelagerter Schnee	3,5 bis 6,0
Firnschnee	5,0 bis 8,5
Gletschereis	7,0 bis 9,0
porenfreies Eis	9,17

Die Übergänge zwischen den einzelnen Schneearten sind nicht genau definiert. Als Anhalt dient:

- Neuschnee: frisch gefallener Schnee, der nicht länger als 3 Tage liegt
- Pulverschnee: trockener Schnee, der auch unter Druck nicht zusammenklebt
- Firnschnee: mind. 1 Jahr alt

Schneeausstecher

Gemessen wird das Wasseräquivalent mit einem Schneeausstecher (nur noch an Klimareferenzstationen) oder einer Schneesonde bei einer Schneehöhe von ≥ 5 cm. Die Messung der genannten Größen erfolgt durch zwei Teilmessungen. Über eine definierte Fläche wird die Schneedecke ausgestochen, die Höhe in cm erfasst und anschließend das Schmelzwasser in mm gemessen bzw. das Gewicht der ausgestochenen Schneeprobe festgestellt und in mm Schmelzwasser umgerechnet.

Schneesonde WS 43

Die Schneesonde WS 43 der Fa. Campbell Scientific Ltd. UK. dient zur Bestimmung des absoluten und spezifischen Wasseräquivalentes der Schneedecke. Dies erfolgt durch Messen der Höhe und Wiegen einer mit dem Gerät ausgestochenen Schneeprobe (Schneesäule). Das Wasseräquivalent ergibt sich aus Gewicht und Höhe der ausgestochenen Schneeprobe und der Ausstechfläche des Gerätes.

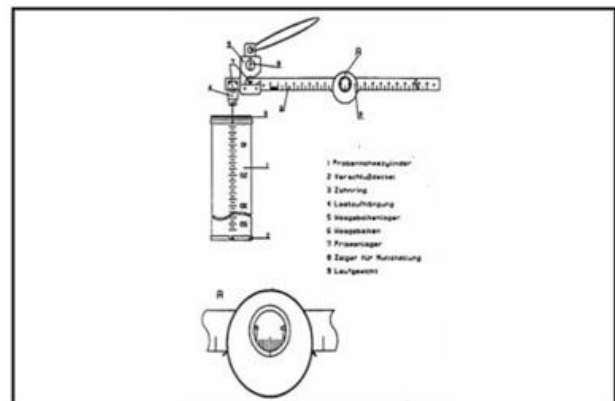
Das Messgerät besteht aus einem Metallzylinder und einer Balkenwaage. Der Metallzylinder (aus Aluminium) ist 70 cm hoch und hat am Ende einen gezahnten Ring.

Abb. 11.45 Schneesonde WS 43 (Campbell Scientific Ltd.)



Zur Messung der Höhe der ausgestochenen Schneesäule ist an der Außenseite des Zylinders eine Skala in cm-Teilung angebracht. Die Balkenwaage besteht aus einem Metallstab, der durch die Waageaufhängung mit Schneide in zwei ungleiche Arme geteilt wird. Dazu gehört eine Schaufel mit einem um ca. 30° abgewinkeltem Griff. Das Gerät besitzt eine Auflösung von 1 g, hohe Mobilität, hohe Zuverlässigkeit, ist einfach zu bedienen und wartungsarm.

Abb. 11.46 Schneesonde WS 43, Schemazeichnung (Campbell Scientific Ltd.)



Von den ca. 600 Stationen, an denen das Wasseräquivalent bestimmt werden soll, sind etwa 495 nebenamtliche Wetterstationen (Wst III) bzw. Niederschlagsstationen. Es werden täglich eine Messung, bzw. bei einigen nebenamtlichen Stationen nur 3 wöchentliche (montags, mittwochs, freitags) Messungen durchgeführt. Zum Einsatz kommt ausschließlich das manuelle SWE-Messverfahren mittels der Schneesonde WS43.

Abb. 11.47 Schneesonde WS 43 im Transportkasten



Pflege und Kontrolle der Funktionstüchtigkeit

Wichtig ist, vor jeder Messung den Nullpunkt der Waage zu bestimmen. Nach jeder Messung wird die Sonde gereinigt, getrocknet und in einem trockenen Raum aufbewahrt. Wird die Sonde längere Zeit nicht benutzt, kommt sie in die vorgesehene Transporthülle oder Transportkasten (Abb. 11.47). Da die Schneesonde ein feinmechanisches Präzisionsgerät ist, muss darauf geachtet werden, dass sie mechanisch nicht belastet wird. Die Funktionstüchtigkeit muss während einer Messung anhand von Erfahrungswerten überprüft werden, da keine Referenzmessung möglich ist. Bei vermuteten Messfehlern kann man sich durch Wiederholungsmessungen Gewissheit verschaffen.

Tschechische Schneesonde

Die tschechische Sonde wird von Rudolf Hancvencl, 468 11 Janov nad Nisou 479 hergestellt. Bei der Messung des Schneewasserwertes wird der Entnahmezylinder mit dem Drehkreuz unter erheblichen Druck und wechselseitiger Rotation eingebohrt. Nach Erreichen der Terrainoberfläche wird die Höhe der Schneedecke abgezogen. Danach wird der Entnahmezylinder hinauf gezogen und optisch das Erreichen der Terrainoberfläche und die Abnahme der ganzen Säule des Schnees kontrolliert. Dann kann die Säule gezogen werden, indem entweder durch Aufhängung auf dem Drehkreuz in vertikaler Lage oder mit der Benutzung der Aufhängung (bei der Länge der Säule mehr als 1m) in Horizontallage.

Abb. 11.48 Bohrloch mit tschechischer Schneesonde



Mit dieser Schneesonde kann bei der Messung des Wasseräquivalents einer Schneedecke eine Schneehöhe von 1m oder 1,5m ausgestochen werden und damit eine größere Schneehöhe als mit der im DWD eingesetzten Schneesonde WS 43.

Das Messgerät besteht aus folgenden Komponenten:

- Entnahmezylinder,
- Aufhängung, Drehkreuz,
- Sondierlatte und Transporthülle.

Der Entnahmezylinder mit der Querschnittfläche 50 cm^2 ist aus Glasfaserschichtstoff und seine Bestandteile sind die Metallkrone, die Längenskala und das Loch für die Eingabe des Drehkreuzes.

Zum Wiegen des ausgestochenen Schnees kann eine mechanische Waage oder eine Digitalwaage benutzt werden. Der Schneewasserwert wird in mm ausgerechnet, indem das Gewicht in kg (ohne Rücksicht auf die Dezimalkommastelle) mit 2 multipliziert wird.

Beispiel: das Netto-Schneegewicht sei 38 kg, der Schneewasserwert ist dann $38 \times 2 = 76 \text{ mm}$.

11.4. Bestimmung des Erdbodenzustandes

Als Erdbodenzustand (EBZ) wird der Zustand der Oberfläche des natürlichen Erdbodens an der Station oder deren unmittelbarer Umgebung bis ca. 100 m bezeichnet. Zu diesem Begriff zählt auch die Beschreibung von Ablagerungen auf dem Erdboden, bestehend aus Niederschlägen, die in fester Form – Eis, Staub oder Sand – gefallen sind.

Im Rahmen der Automatisierung des Messnetzes des DWD soll der Parameter „Erdbodenzustand“ (EBZ) durch ein vollautomatisches Messgerät eindeutig bestimmt werden. Unabhängig davon, ob in naher Zukunft ein Sensor dieser Art eingeführt wird, soll hier kurz auf die Möglichkeiten der Automatisierung dieses Parameters eingegangen werden. Hierfür wurde von der Fa. Sommer (Österreich) in Zusammenarbeit mit dem Forschungszentrum Karlsruhe ein Erdbodenzustandsensor (EBZ-Sensor) entwickelt.

Die Agrarmeteorologische Forschungsstelle Braunschweig (ZAMF) des DWD hat als Anforderungen, die die Landwirtschaft als ein Hauptnutzer an den Parameter EBZ stellt, einerseits die Frosttiefe angegeben, die von den Erdbodenthermometern des DWD bereits gut erfasst wird. Andererseits ist auch ein etwaiger Frostzustand in den obersten Zentimetern der Bodenschicht von besonderem Interesse. Der Grund hierfür ist durch die neue sog. „Gülleverordnung“ gegeben, wonach keine Gülle ausgefahren werden darf, wenn die obersten Zentimeter Bodenschicht gefroren sind. Dieses ist aber schon erlaubt, wenn die oberste Bodenschicht angetaut ist, auch wenn der Boden darunter noch gefroren ist.

Der Zustand des Erdbodens wurde für diese Auswertung anhand der obersten Bodenschicht bis in 3 cm Tiefe beurteilt, was dem räumlichen Messbereich des EBZ-Sensors entspricht. Wichtig ist hierbei, dass der Sensor den Zustand des natürlichen, unbewachsenen Bodens an der Station bewertet.

Abb. 11.49 EBZ-Sensoren. „Matte Ost“ im Vordergrund und „Matte West“ im Hintergrund (Sommer)



Der EBZ-Sensor der Fa. Sommer besteht aus einer Gittermatte, die von Leiterbahnen mäanderförmig durchzogen ist. Durch eine Frequenzanalyse dieser Matte lassen sich die kapazitiven Eigenschaften des Erdbodens ermitteln. Mit Hilfe der Frequency Domain Reflectometry (FDR) und der Low Frequency Impedance Analysis (LFIA) wird die komplexe Dielektrizitätszahl des Mediums in der näheren Umgebung der Matte ($\pm 3 \text{ cm}$) ermittelt. Dabei macht man sich die starken Änderungen der Permittivität für die verschiedenen EBZ zu nutze. So liegt beispielsweise die relative Permittivität von trockener Erde bei $3,9 \text{ F m}^{-1}$, die von feuchter Erde aber bei 29 F m^{-1} .

Ermittelt werden die Parameter Kapazität, Phase und Mattentemperatur. Letztere wird mittels eines in die Matte integrierten Temperatursensors gemessen. Für die Frequenzmessungen werden Messfrequenzen von 10 kHz bis 100 kHz verwendet, wobei lediglich an den drei Stützstellen 10 kHz, 30 kHz und 100 kHz ausgewertet wird. Dabei werden in erster Linie die Differenzen der Kapazitäten und Phasen betrachtet. Das Niveau der Kapazitäten und die Mattentemperatur werden zur Ergänzung hinzugezogen.

Wenn die Kapazität gegen die Frequenz aufgetragen wird, so lassen sich aus den Differenzen zwischen 10 kHz, 30 kHz und 100 kHz, sowie deren Niveaus der Wassergehalt und der Phasenzustand zunächst qualitativ ableiten. Für die Entscheidungsfindung wird ein sog. „Sieb“ verwendet, in dem für die einzelnen EBZ mögliche Bereiche für die Kapazitäts- und Phasendifferenzen, die Absolutwerte und die Mattentemperatur definiert sind.

11.5 Bestimmung des Straßen- und Rollbahnzustandes

Im Automatischen Wetterbeobachtungssystem MIDAS IV AWOS (siehe 18.4) ist für die Bestimmung des Straßen- bzw. Rollbahnzustandes der Messfühler DRS511 der Fa. Vaisala integriert. Es handelt sich dabei um einen Multisensorblock, der nach dem thermisch passiven Prinzip arbeitet, d. h. es gibt keine Einwirkungen auf die Oberfläche durch externe Leistungszuführung (wie sie in beheizten oder gekühlten Systemen verwendet wird).

Der Sensor ermittelt 6 Messwerte und zwar

- Oberflächentemperatur,
- Bodentemperatur in 6 cm Tiefe,
- Oberflächenleitfähigkeit,
- Oberflächenkapazität (monokristallines Eis),
- Elektrochemische Polarisierung und
- Optische Untersuchung der Art der Oberflächenbedeckung.

Die Messtechnologie erlaubt die genaue Analyse des Oberflächenzustands, der Schnee- und Eisdetektion, der Wasserfilmdicke und der vorhandenen Enteisungskemikalie.

Tab. 11.20 Spezifikationen DRS511 (Vaisala)

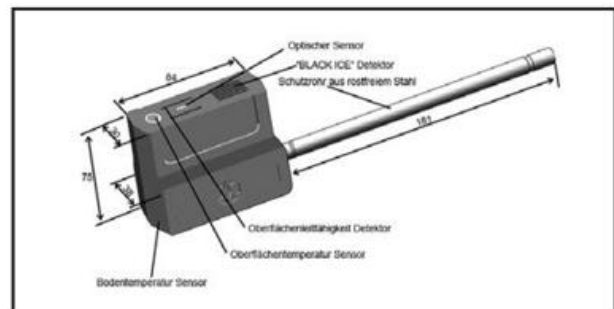
Temperaturbereich	-40 bis +60 °C
Wasserfilm Messbereich Auflösung*	0 bis 8 mm 0 bis 1.0 mm
Sensorelektroden	Kohlefaser in Epoxyd
Optischer Sensor	Optische Fasern auf Acrylbasis
Temperaturfühler	zwei Pt 100-Elemente, 1/3 Klasse B DIN IEC 751

* Die Genauigkeit von 0,1mm ist bei einem gleichmäßigen Wasserfilm definiert. Die Genauigkeit der durchschnittlichen Wasserfilmdicke hängt von der Installation des Sensors, von der Beschaffenheit des Belags und vom Verschmutzungsgrad des Wassers ab.

Der DRS511 Sensor hat eine optische Messeinrichtung, um die Art und Beschaffenheit der Oberflächenbedeckung zu bestimmen. Daraus kann zuverlässig die Dicke des Wasser-

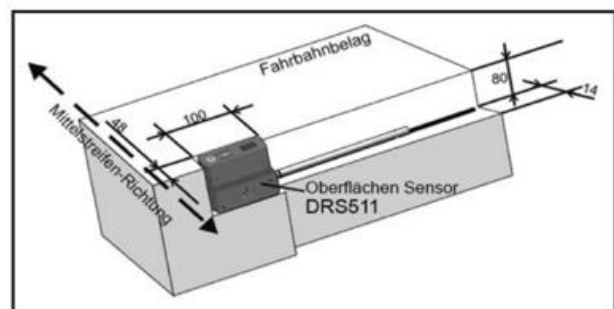
films sowie der Eis- und Schneeschicht abgeleitet werden. Die Oberfläche des Sensors DRS511 liegt 1 mm bis 3 mm tiefer als der Straßenbelag.

Abb. 11.50 Straßen- und Rollbahnsensor DRS511 (Vaisala)



Die elektrische Leitfähigkeit und die elektrochemische Polarisation sind wichtige Faktoren bei der Bestimmung der vorhandenen Enteisungskemikalie. Zusammen mit der Temperatur- und Wasserfilmdickenmessung bestimmt der Sensor die Gefrierpunktttemperatur und das Risiko der Eisformation. Weil sich die Oberflächenleitfähigkeit bei der Bildung von monokristallinem Eis stark reduziert, kann mit dieser Methode genau erfasst werden, wann diese Art von Eisbildung auftritt.

Abb. 11.51 Lage des Sensors DRS511 (Vaisala)



Die Temperaturen werden über eine Vierdrahtleitung (siehe 8.2.2) von einem Pt 100-Messfühler gemessen. Die entsprechenden Messwerte werden zur Vorausbestimmung des Risikos auf kritische Eisbedingungen herangezogen.

Der Sensor ist mit einer Epoxyd-Vergußmasse eingefasst. Die Eigenschaften dieser Masse bezüglich thermischer Abstrahlung und thermischer Leitfähigkeit sind denen der Straße angepasst.

Alle diese Messdaten, zusammen mit Messdaten wie Lufttemperatur, relativer Luftfeuchte, Niederschlag etc. ermöglichen eine umfassende Analysierung der Oberflächenbedingungen von Straßen- und Rollbahnen.

11.6 Messunsicherheiten und Fehlerquellen

Obwohl die Messung des Niederschlages ein scheinbar einfaches und sicheres Verfahren ist, enthält es doch eine ganze Reihe von Fehlermöglichkeiten. Einige davon werden durch konstruktive Maßnahmen bei der Gestaltung

des Messgerätes zu beseitigen versucht, was aber nicht immer gelingt. Problematisch sind die großen Messfehler (20 % bis 100 %) wegen kleiner Referenzfläche, Schneehauben, Benetzungseinfluss (Messung erst ab einem bestimmtem Volumen) und Fehlern im Gefäß.

Grundsätzlich ein großes Problem ist auch die Erfüllung einer repräsentativen Messung des Niederschlags. Hierbei stören kleinräumig Inhomogenitäten in der Umgebung, wie z. B. der Bewuchs (tritt im Laufe der Jahre insbesondere bei nebenamtlichen Stationen auf), städtebauliche Ausdehnung und dergleichen, also zufällige Fehler, die ihre Ursache in der räumlichen und zeitlichen Variabilität des Niederschlags haben.

Großräumig betrachtet spielen orographische Störeinflüsse eine große Rolle, die fast überall auftreten können. Sie sind insbesondere in hügeligen und gebirgigen Regionen durch die meist höheren Windgeschwindigkeiten gravierend. Aufwandeckeffekte durch Gebirgshänge sind abhängig von der Hangneigung, der Richtung des Niederschlags und der Windgeschwindigkeit. Der mittlere prozentuale Messfehler ist an stark geschützten Stationen am geringsten (<10 %), steigt mit abnehmendem Schutz an und erreicht bei Stationen auf freien Flächen seine größten Werte mit etwa 15 %. In allen Fällen ist natürlich der Abstand zu den Hindernissen ausschlaggebend. Niederschlagsstationen in der Nähe von Gebirgen sind daher nicht repräsentativ und können höchstens für klein-klimatische Betrachtungen herangezogen werden.

Durch Luv- und Leeeffekte weist z. B. der Harz sehr hohe jährliche Niederschlagsmengen von ≈ 1500 mm/Jahr auf der Westseite und im Zentralharz auf, während das Trockengebiet östlich des Harzes nur ca. 500 mm/Jahr verzeichnet. Ähnliche Verhältnisse findet man im Oberrheintal mit ca. 550 mm/Jahr und im Hoch-Schwarzwald mit über 1800 mm/Jahr, in den Vogesen sogar bis zu 2500 mm/Jahr. Ein weiterer Effekt von Bergen ist die Windkanalisierung

Weitere allgemein gültige (systematische) Fehlerquellen

Windeinfluss

Auf die enorme Bedeutung des Windfehlers bei der Niederschlagsmessung wurde schon seit Beginn der systematischen Niederschlagsmessungen durch **JEVONS**, 1861 und **KOSCHMIEDER**, 1934 hingewiesen. Jeder Niederschlagsmesser beeinflusst die Luftströmung in seiner Umgebung. Die Umströmung des Messgerätes führt dazu, dass sich die Strömungsgeschwindigkeit insbesondere über der Auffangöffnung erhöht, mit dem Effekt, dass leichte Niederschlagspartikel, die eigentlich in das Sammelgefäß fallen sollten, über die Auffangöffnung hinweg getragen werden. Dieser Sammelverlust macht sich insbesondere bei Schneefall deutlich bemerkbar. Ein WMO-Feldvergleich aus den 1990er Jahren zeigt die schlechte Sammeleffizienz eines Hellmann ohne Windschutz für Schnee. Bereits bei einer Windgeschwindigkeit von 3 m/s beträgt der Sammelverlust etwa 50 % und bei 7 m/s beträgt die Sammeleffizienz nur noch 20 % der Referenz der WMO.

Je stärker der Wind, desto größer der Fehler, der abhängig ist von den aerodynamischen Eigenschaften des Niederschlagsmessers und von der Höhe, in der das Gerät aufgestellt wird. Der nicht-lineare Windfehler ist auch eine Funktion der Zeit, denn die Umgebungsverhältnisse, die klimatischen Verhältnisse können sich im Laufe der Jahre verändern.

Seitdem wurden eine Reihe von Methoden und Windschutzvorrichtungen entwickelt, um die Sammeleffizienz der Messgeräte zu verbessern. Zur Schaffung homogener Windverhältnisse über den Auffanggefäßen müsste der Niederschlagsmesser in den Boden eingelassen werden, so wäre der Windfehler minimiert. Abhilfe ist aber auch durch Windschutzeinrichtungen möglich. Die WMO hat zwei Referenzsysteme definiert:

- a) das „pit gauge“, ein ebenerdig aufgebautes Gerät zur Messung flüssiger Niederschläge und
- b) das DFIR (Double Fence Intercomparison Reference) zur Messung fester Niederschläge (kommt aus Platzgründen oft nicht in Frage)

Eine von einigen Möglichkeiten ist der Windschutzring nach Woelfle (Abb. 11.52), der zum Auffangen von unverwirbeltem Niederschlag bei Wind dient. Er besteht aus einem eisernen Haltering von ca. 1 m Durchmesser, an dem 15 Federstahl-Blechlamellen innen fest aufgehängt sind. Sie sind so gebogen, dass sie nach oben einen offenen Kegelstumpf bilden. Das gesamte System ist auf einem Standpfahl montiert, auf dem auch der Niederschlagsmesser sitzt.

Abb. 11.52 Windschutz n. Woelfle (Thies)



Dieser Windschutz ist passend für Ombrometer und Niederschlagsgeber. Er ist u. a. im Messfeld des MOHP, im SwissMetNet (siehe 19.6.6), im Niederschlagsmessnetz des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie (HLUG) und am Met. Inst. der Universität Hannover zu finden.

Diesem Windschutz sieht der Windschutz der Fa. OTT MESSTECHNIK für den Pluvio OTT, ein kompakter „Einfachzaun“, sehr ähnlich (Abb. 11.53). Mit diesem System kann die Sammeleffizienz gegenüber einem ungeschützten Gerät um etwa 30 % bis 40% für Schnee und um etwa 5% für flüssige Niederschläge gesteigert werden.

Abb. 11.53 PLUVIO mit Windschutz (OTT MESSTECHNIK)



Eine andere Möglichkeit bietet der Windschutz mit dem sog. Nipherschen Ring (Abb. 11.54), der auch nur vereinzelt eingesetzt wird. Dieser trichterförmige Windschutz fällt in die Kategorie der Strömungsleitsysteme und ist äußerst kompakt und so effektiv, dass er mit dem Referenzsystem DFIR der WMO vergleichbare Werte liefert. Allerdings besteht bei diesem System die Gefahr, dass sich Schnee auf der Trichterfläche anhäuft und in das Ombrometer geweht wird.

Abb. 11.54 Canadian Nipher



Eine weitere Möglichkeit eines Windschutzes zeigt ein Bild am ZAMG in Österreich (Abb. 11.55)

Abb. 11.55 Niederschlagsmessgeräte mit Windschutz am ZAMG



An stark windexponierten Lagen ergaben sich Unterschiede bis zu 20 % gegenüber Messgeräten ohne Windschutz. Bei Windexposition von Hängen mit 40 % Neigung kann bis zu 10 % mehr Niederschlag erwartet werden.

Auch der traditionelle Gebirgsniederschlagsmesser des DWD (Abb. 11.56) verfügt über einen Trichter als Windschutz, der jedoch nicht so effizient ist, wie der des Canadian Nipher.

Abb. 11.56 DWD-Gebirgsniederschlagsmesser mit Windschutz



Vor einigen Jahren wurden in der Südschweiz über ein Jahr Niederschlagsmessungen mit drei Pluviometern vorgenommen, die unterschiedlich aufgestellt wurden. Zwei Pluviometer wurden jeweils auf einem 1,50 m hohem Pfosten, eines windgeschützt, das andere ohne Windschutz aufgestellt. Ein drittes Pluviometer wurde im Boden versenkt. Es zeigte sich schon bei schwachen Windverhältnissen, dass der im Boden versenkte Niederschlagsmesser die größte Menge ergab. Dann folgte der windgeschützte, während der ohne Windschutz die geringste Menge aufwies. Diese Ergebnisse stehen in Übereinstimmung mit den Erkenntnissen von Koschmieder (Quelle: Meteo Schweiz).

In einer theoretischen Untersuchung der Universität Leeds wird eine ringförmige Struktur vorgeschlagen, für die der Begriff „Deflektor“ (Strömungsleitsystem) verwendet wird. Diese Ringscheibe ist so aufgebaut, dass zwischen Scheibe und Ombrometer ein größerer Spalt vorhanden ist, so dass auf dem Windschutz abgelagerte feste Niederschläge in den Spalt geweht werden und somit nicht in das Ombrometer gelangen können. Die Veröffentlichung enthält eine Reihe von Simulationen für verschiedene Abmessungen des Deflektors und auch verschiedene Windgeschwindigkeiten. Die Simulationen ergaben, dass bei günstigen Abmessungen die Abhängigkeit der Sammeleffizienz für Windgeschwindigkeiten von 3 m/s bis 10 m/s sehr gering ist.

Diese positiven Eigenschaften haben den DWD veranlasst, einen solchen Deflektor mit 2000 mm Außendurchmesser zu erproben, denn Strömungsleitsysteme von 1 m bis 2 m Durchmesser können die gleiche Sammeleffizienz erzielen wie ein „Zaunsystem“ von mehreren Metern Durchmesser.

Abb. 11.57 Deflektor an der WeWa Feldberg (Foto: DWD)

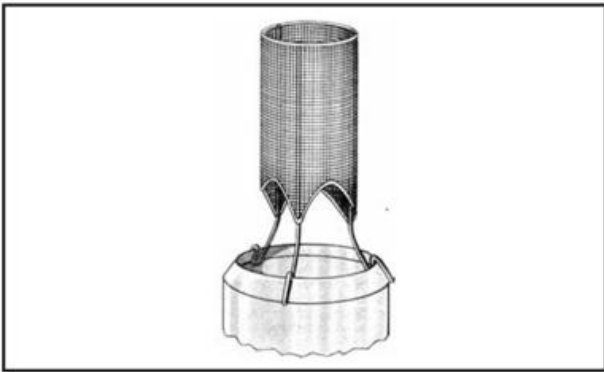


Am Innenkreis dieser Scheibe befindet sich ein Zylinder von 150 mm Höhe, der dafür sorgt, dass die Strömung nach unten umgelenkt wird. Die Oberflächen des Deflektors müssen möglichst glatt und die Ränder scharfkantig sein, damit keine unnötigen Verwirbelungen entstehen.

Die bessere Sammeleffizienz des Deflektors macht sich vor allem bei Schneefall und Sprühregen bemerkbar und erklärt die deutlich höheren und häufigeren Niederschlagsdetektionen bei Verwendung des Deflektors. Im Vergleich zu einem ungeschützten PLUVIO-OTT verbessert der Deflektor die Sammeleffizienz für flüssige Niederschläge um ca. 21 %. Für feste Niederschläge erhöht der Deflektor die Sammeleffizienz an Bergstationen um bis zu 190 %. Die Einführung eines Windschutzes wäre also eine fundamentalere Änderung der Messtechnik als die Einführung eines neuen Ombrometers und würde sich z. B. auf die Klimatologie auswirken.

Ein etwas anderer Grund ist mit der Anwendung des sog. Nebelfängers n. GRUNOW (Abb. 11.58) verbunden. Er besteht aus einem feinen Maschendrahtnetz, das auf den Niederschlagsmesser aufgesetzt wird, die kleinsten Wassertröpfchen einfängt und sie in den Niederschlagsmesser leitet. Damit wird letztlich die Niederschlagsmenge erhöht. Diese Situation ergibt sich insbesondere an Bergstationen, wenn sie in Wolken eingehüllt sind. Dann ist ein nicht geringer Anteil an der Gesamtniederschlagsmenge diesem abgesetzten Niederschlag zuzuordnen.

Abb. 11.58 Nebelfänger n. Grunow



Verdunstungsfehler

Je häufiger der Niederschlag gemessen und das Gefäß geleert wird, desto geringer wird der durch Verdunstung verursachte Fehler. Dieser Fehler ist weiter abhängig vom Querschnitt, der Farbe, vom Material, vom Alter, von der Isolation und der Aufstellhöhe des Messgerätes. Verdunstungsverluste treten auch durch nicht sauberen, lückenlosen Außenanstrich und dadurch verursachte heiße Auffangflächen im Sommer auf. Bei beheizten Niederschlagsgeräten ergeben sich zusätzlich geringere Niederschlagsmengen.

Die mathematische Ermittlung der Verdunstung des aufgefangenen Niederschlages kann mit unterschiedlichen Parametern durchgeführt werden (siehe auch 15.3.1):

- nach **HAUDE** werden die Tageswerte der Verdunstung aus Temperatur und relativer Feuchte
- nach Wendling werden die Stundenwerte der Verdunstung aus Temperatur, relativer Feuchte, Windgeschwindigkeit und Strahlung
- nach **PENMAN-MONTEITH** werden die Tageswerte der Referenzverdunstung aus Temperatur, relativer Feuchte, Windgeschwindigkeit und Strahlung
- nach **RICHTER** werden die Tageswerte der Verdunstung über Wasser aus Windgeschwindigkeit, Wasseroberflächentemperatur, relativer Luftfeuchte und Lufttemperatur

ermittelt. Da in alle Methoden die unterschiedlichsten meteorologischen Parameter eingehen, hängt der Verdunstungsgrad von den jeweiligen meteorologischen Bedingungen ab. Der Testbetrieb auf einem Erprobungsfeld des DWD mit Öl auf der Wasseroberfläche im Sammelbehälter und dadurch eliminiertes Verdunstung hat gezeigt, dass die Sammeleffizienz dadurch um etwa 7 % gesteigert werden kann. Allerdings könnte der Betrieb mit Öl in schnee-reichen Regionen wahrscheinlich problematisch sein. Die Verdunstungsverluste können, auch abhängig vom Messgerät/Sensor, bis zu 10 % betragen.

Haftwasser

An den Wänden des Messgerätes bleibt Wasser haften (Benetzungsfehler), das nicht gemessen wird. Der Haftwasserfehler ist abhängig vom Querschnitt, von der Form, der Größe, dem Material, der Farbe und dem Alter des Messgerätes.

Spritzwasser

Tropfen die von der Umgebung abprallen und in den Messgerät fallen oder von diesem nach außen spritzen, verursachen ebenfalls Messfehler, der abhängig ist von der Niederschlagsintensität, der Windgeschwindigkeit, der Messhöhe und der Installationsart des Gerätes. Bodenebene Geräte haben einen höheren Spritzwasserfehler als Geräte auf einer Messhöhe von z. B. 2 m.

Säuberung des Auffanggefäßes von Laub und anderen Verunreinigungen, die den Ablauf in das Messgefäß verstopfen können, wenn sie nicht regelmäßig durchgeführt wird.

Systematisch auftretende Niederschlagsverluste durch Benetzungs-, Verdunstungs- und Überwehungseffekte werden rechnerisch ausgeglichen. Sie liegen in Deutschland in der Größenordnung von ca. 10 % im Sommer und ca. 20 % im Winter.

Niederschlagswächter (Thies)

Bekannte Probleme sind

- Die Gehäuse werden unter anhaltender UV-Bestrahlung spröde und verfärben sich. In etlichen Geräten sammelt sich Wasser, das letztlich die Elektronik-Platine korrodiert. Die Fa. Thies hat inzwischen die Gehäuse modifiziert um die Dichtigkeit zu verbessern. Wenn das Gehäuse die obigen Mängel aufweist, kann es eingeschickt werden und die Fa. Thies tauscht die Gehäuse aus.
- Um die Dichtigkeit nach einem Öffnen des Gehäuses zu verbessern, sollte Silikonfett auf den Dichtring gegeben werden. Insbesondere in den Kurven im Bereich der Schrauben.
- Die Gehäuseschrauben beim Zusammenschrauben nicht zu fest anziehen, da sich sonst das Gehäuse verzieht und wieder undicht werden kann.

Vergleich der Niederschlagstagesummen zwischen Pluvio-OTT und Hellmann

Die Genauigkeitsanforderung für eine Niederschlagstagesumme liegt nach WMO-Empfehlung (WMO-No. 8, Annex 1B kurz „CIMO-Guide“ genannt) für Werte < 2 mm bei 0,1 mm und für Werte ≥ 2 mm bei 5 %. Bei diesen Werten handelt es sich um erweiterte Messunsicherheiten mit dem Erweiterungsfaktor $k=2$ (zweifache Standardabweichung), d. h. 95,4 % der Messwerte liegen in diesem Bereich.

Wenn beide Messgeräte in diesem Vergleich diese WMO-Anforderungen erfüllen, ergibt sich daraus ein Toleranzbereich von 0,14 mm (< 2 mm) und 7 % (≥ 2 mm), in dem mindestens 95,4 % der Messwerte liegen sollten. Absolute Abweichungen des Pluvio-OTT gegenüber dem Hellmann waren hauptsächlich durch die hohe Anzahl (85 %) der Messwerte im Bereich < 10 mm bestimmt. Hieraus ergibt sich eine zunehmende negative Abweichung bei höheren Tagessummen.

Unter der Annahme, dass beide Messgeräte in diesem Vergleich diese WMO-Anforderungen erfüllen, liegen über 82,1 % (von den geforderten 95,4 %) der Tagessummen des Pluvio-OTT innerhalb des Toleranzbereiches. Im Durchschnitt sammelte der Pluvio 3 % weniger Niederschlag am Tag ein als der Hellmann. Bei einer Anhebung der Mes-

sunsicherheit von 0.1 mm auf 0.2 mm im Messbereich <2 mm ergäbe sich bereits eine durchaus akzeptable Übereinstimmung von 92.1 %. Die Ergebnisse gelten nur für diesen Datensatz der im Zeitraum vom 15. April bis Juli 2009 an 85 DWD-Stationen gewonnen wurden. Für genauere Aussagen müssten längere Zeiträume betrachtet werden.

Im Vergleich zum Kippwaagenprinzip treten beim Pluvio-OTT im Durchschnitt ca. 5 % mehr Niederschläge auf, da bei der Kippwaage die Verdunstungs- und Benetzungsverluste größer sind. Während beim PLUVIO alles in wenigen Sekunden ermittelt wird, muss bei der Kippwaage die Schaufel erst mal gefüllt sein und in dieser Zeit kann das Wasser wieder verdunsten. Der 5 %-Fehler ist natürlich bei geringen Niederschlagsmengen tendenziell größer als bei großen Mengen. Auch das lässt sich leicht mit den bei geringen Mengen größeren Verdunstungsverlusten bei der Kippwaage erklären.

Andererseits beginnt die Abheberfunktion beim Pluviograph der Fa. OTT erst bei einer Füllmenge von 88 % und nicht schon bei 70 %. Der Vorgang des Abhebers dauert ca. 5 min, in denen die Messung des weiterhin fallenden Niederschlags in dieser Zeitspanne gestört ist. Die online-Daten für diese Zeitspanne sind dann nicht verwertbar. Gerade bei extremen Starkniederschlägen wären diese Informationen für die Auswertung wichtig. Diese Abheberfunktion soll nur in Ausnahmefällen wirksam werden, um ein unkontrolliertes Überlaufen des Behälters bei seltenen, extremen Starkniederschlägen zu verhindern.

Zum Vergleich der Ombrometermessungen wurden diese teilweise durch Distrometermessungen (Joss-Waldvogel und PARSIVEL®) am MOHP ergänzt. Ein Anwendungsgebiet war die Ermittlung von Tropfengrößenverteilungen am Boden und die Rekonstruktion ihrer Radarreflektivitäten für mittlere Z/R-Beziehungen (11.4). Ebenso wichtig sind Rückschlüsse auf Verteilungsmode und zugehörige Niederschlagsprozesse.

Fehlerquellen des Niederschlagsmengenmessers 1518H (Lambrecht):

- kann bei hohen Niederschlagsintensitäten zu geringe Mengen anzeigen, da aufgrund der Trägheit der Wippe diese nicht schnell genug umschlägt und somit Niederschlag für die Messung „verloren“ geht.
- mindestens 1 Wippenfüllung notwendig, damit Niederschlag angezeigt werden kann
- Trichter kann verstopfen
- Wippe kann blockieren

Fehlerquellen bei der Erkennung der Niederschlagsart mit dem LNM (Thies):

- Kennlinien Durchmesser/Geschwindigkeit überschneiden sich, z. B. Schneegriesel/Sprühregen und Graupel/feuchter Schnee. Deshalb wird als Hilfsgröße die Umgebungstemperatur zur besseren Unterscheidung von Sprühregen und Schneegriesel sowie als Ausschluss von Schnee bei Temperatur >8 °C (Pollen o.ä.) gemessen,
- Nur für flüssige Niederschläge gibt es eine feste Kennlinie (abhängig nur noch vom Luftdruck)
- Turbulenzen (Wind) verändern die Geschwindigkeit der Hydrometeore.

Fehlerquellen der Ultraschall-Schneehöhenmessung

Die Erfahrungen mit den Schneehöhensensoren haben gezeigt, dass es weiterhin erhebliche Probleme gibt (Nullpunktjustierung, Temperaturabhängigkeit der Ultraschallmessung, Korrosionsschäden bei Sensoren im Küstenbereich, etc.). Aus diesem Grund wird für den Einsatz der Schneehöhensensoren und das Auslegen der Schneebretter im DWD folgende Regelung getroffen:

- **alle Schneehöhensensoren** werden im Zeitraum von Mai bis September im DWD in Zustand „removed“ gesetzt, d. h. es kommen keine Werte mehr von den Sensoren und damit auch keine fehlerhaften Daten,
- Schneehöhensensoren, die an Stationen im Küstenbereich installiert sind, werden Anfang Mai abgebaut und in der letzten Septemberwoche wieder installiert.
- in der letzten Septemberwoche wird die Nullpunktjustierung aller Schneehöhensensoren durchgeführt,
- am letzten Septembertag werden alle Sensoren wieder auf „aktiv“ gesetzt und durch die Routinen geschickt (also als Meldung herausgegeben, qualitätsgeprüft und in Datenbanken abgelegt)
- **die Schneebretter** werden in dem o. g. Zeitraum weggeräumt und vor Witterungseinflüssen geschützt gelagert. Die Schneebretter werden zu Beginn der letzten Septemberwoche wieder an der vorgesehenen Stelle ausgelegt.

Schneehöhensensor SR50

- Der SR50 gibt im Telegramm den Wert „-9999“ aus. Dieser Wert gibt an, dass der Sensor den Abstand nicht ermitteln kann. Mögliche Ursache können z. B. Schnee von extrem niedriger Dichte (schwache Schallreflexion) oder starker Schneefall (Störung der Schallausbreitung) sein. Der Wert „-9999“ wird in der Datenverarbeitung der AMDA herausgefiltert und somit keine Schneehöhe ermittelt. Sollte der beschriebene Fehler auftreten, ist der Sensor 1–2 Tage zu beobachten, bevor man unnötigerweise den Sensor austauscht und mit dem neuen Sensor das gleiche Problem hat.
- An Küstenstationen wird der Ultraschallwandler auf Dauer durch die salzhaltige Luft beschädigt.

Fehlerquellen Schneesonde WS 43

- Bei fehlerhaftem Nullpunkt kann ein Messfehler von ≥ 5 g auftreten.
- Weitere Fehler können bei der Ablesung der Messergebnisse entstehen. Es ist ratsam, jeden Messwert zweimal abzulesen.

12. MESSUNG VON RICHTUNG UND GESCHWINDIGKEIT DES BODENWINDES

12.1 Allgemeines

Die meisten Messgrößen in der Meteorologie sind Skalare. Der Wind ist eine gerichtete Größe, ein Vektor mit einem Betrag (Windgeschwindigkeit) und einer Richtung (Windrichtung), also zwei Größen, die gemessen werden. Zur vollständigen Beschreibung des Windes als dreidimensionale Größe sind eigentlich drei Komponenten oder der Betrag und die (durch zwei Winkel bestimmte) Richtung erforderlich. Da aber die Vertikalkomponente mit Ausnahme an Fronten, in Leewellen und bei starker Konvektion in weiten Bereichen der Atmosphäre im Allgemeinen eine Größenordnung (cm s^{-1}) kleiner gegenüber der horizontalen Windgeschwindigkeit ist, wird unter Windgeschwindigkeit in der Regel nur die Horizontalkomponente verstanden. Zu deren Bestimmung reichen daher zwei Angaben, entweder die beiden Komponenten (N-S, W-E) oder Betrag und Richtung. Unabhängig davon ist der Vertikalwind für das Wetter eine entscheidende Größe.

Der Bodenwind ist die Luftbewegung bis maximal 20 m bis 30 m Höhe über dem Erdboden. Er wird im Wesentlichen durch die Beschaffenheit der Erdoberfläche beeinflusst. Größere Hindernisse (Bäume, Häuser) können hinsichtlich Richtung und auch Geschwindigkeit des Bodenwindes starke Abweichungen verursachen. Die natürliche Windruhe ist ein weiterer Grund, weshalb mit dem Wind keine laminare, sondern eine turbulente Strömung verbunden ist. Die räumliche Variabilität des Windes, insbesondere der Windböen ist wahrscheinlich ähnlich groß wie die des Niederschlages. Allerdings ist das entsprechende Beobachtungsnetz für Windmessungen wesentlich dünner als das für den Niederschlag, was die räumliche Repräsentanz der Windmessung beeinflusst und sich damit erschwerend bspw. bei der Erstellung von Windwarnungen auswirkt.

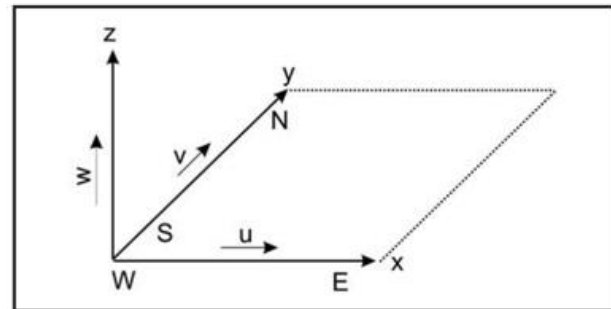
Da der Wind also ein Vektor ist, lässt er sich in verschiedenen Koordinatensystemen darstellen. Sie werden kurz dargestellt, ohne näher darauf einzugehen.

12.1.1 Koordinatensysteme

Kartesisches Koordinatensystem

Ein kartesisches Koordinatensystem ist ein orthogonales Koordinatensystem. Wegen der Orthogonalität schneiden sich die beiden Richtungsachsen im 90° -Winkel, wobei die x-Achse nach Osten, die y-Achse nach Norden und die z-Achse zum Zenit zeigt. Die Achsen stehen senkrecht aufeinander und bilden ein Rechtssystem. Koordinatenlinien sind Geraden in konstantem Abstand voneinander, auch Grids genannt. Die (x, y) – Ebene ist eine Tangentialebene an der Erdoberfläche, damit herrscht in einer Horizontalebene überall die gleiche geographische Breite. Der Ortsvektor beschreibt die Bahnkurve (Trajektorie) im Raum.

Abb. 12.1 Kartesisches Koordinatensystem mit Himmelsrichtungen und Windkomponenten (u, v, w)



$$\vec{v} = (u, v, w)$$

u, v = Horizontalkomponenten des Windes

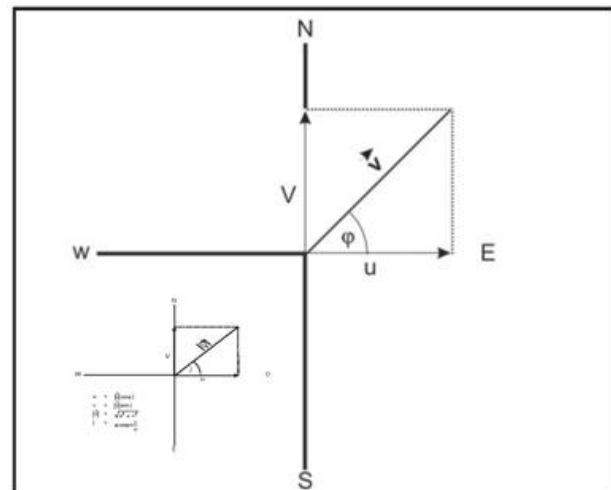
w = Vertikalkomponente des Windes

In der Meteorologie werden überwiegend nur die Horizontalwindkomponenten u und v gemessen. Eine Messung der Vertikalwindkomponente mit herkömmlichen Windmessgeräten ist sehr aufwendig und schwierig. Mit den heute verfügbaren Methoden zur Messung des Bodenwindes mit Ultraschallanemometern können allerdings alle drei Windkomponenten gleichzeitig erfasst werden.

Polarkoordinatendarstellung

In der Mathematik und Geodäsie versteht man unter einem Polarkoordinatensystem ein zweidimensionales Koordinatensystem, in dem jeder Punkt auf einer Ebene durch einen Winkel und einen Abstand definiert werden kann. Im kartesischen Koordinatensystem finden sich derartige Beziehungen in Form trigonometrischer Formulierungen.

Abb. 12.2 Polarkoordinatendarstellung mit Richtung und Betrag

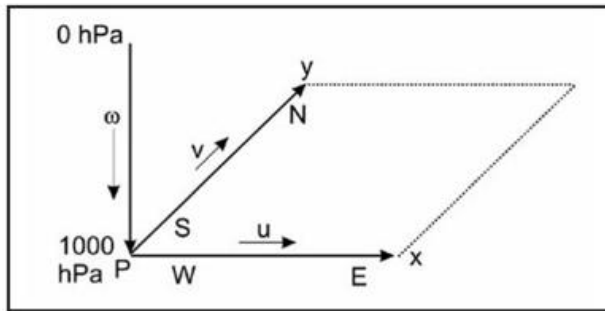


Der 2-dimensionale Horizontalwind $\vec{v} = (u, v)$ wird in der Meteorologie auch häufig in Polarkoordinaten dargestellt. Zur Umrechnung zwischen kartesischen Koordinaten und Polarkoordinaten wird auf die entsprechende Literatur verwiesen.

Druck-Koordinatensystem

In der Meteorologie ist das Druck-Koordinatensystem üblich mit $\vec{v} = (u, v, \omega)$.

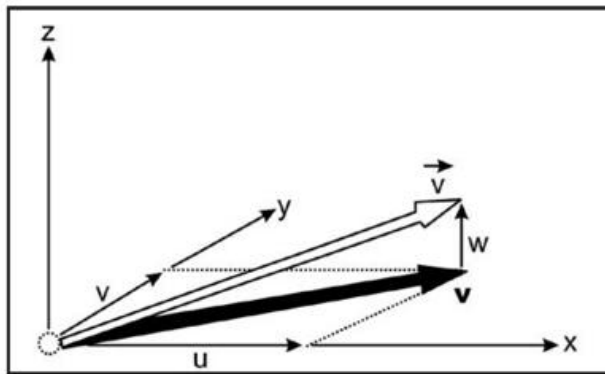
Abb. 12.3 Druck – Koordinatensystem mit Himmelsrichtungen und Windkomponenten



Horizontalwind

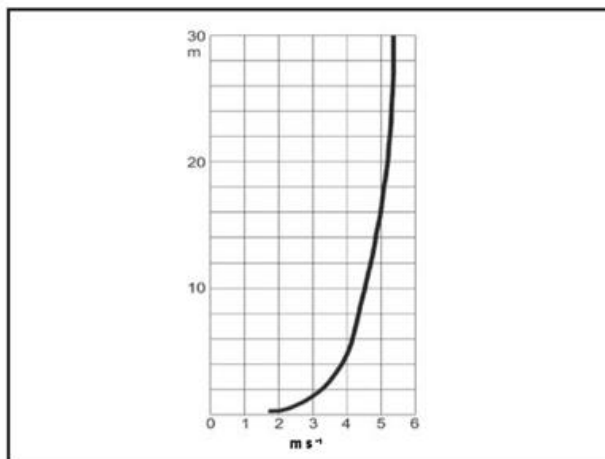
Der 2-dimensionale Horizontalwind $\vec{v} = (u, v)$, (Abb. 12.4) ist die Projektion des 3-dimensionalen Windes $\vec{v} = (u, v, w)$ in die x-y-Ebene.

Abb. 12.4 Komponenten des 3-dimensionalen Windvektors



An ungestörten Strahlungstagen (homogen, adiabatisch, advektionsfreie Verhältnisse) nimmt die bodennahe Windgeschwindigkeit von Null am Erdboden logarithmisch mit der Höhe zu (Abb. 12.5). Um den Bereich der stärksten Änderung in Bodennähe zu vermeiden, wo einer kleinen Höhendifferenz eine große Änderung der Windgeschwindigkeit entspricht, legt die WMO fest, dass die Windgeschwindigkeit 10 m über dem mittleren Geländeniveau oder 6 m über der höchsten Gebäudeerhebung gemessen werden soll.

Abb. 12.5 Logarithmisches Windprofil



12.1.2 Messgrößen des Windes

Windgeschwindigkeit

Unter Windgeschwindigkeit ist die horizontale Verlagerungsgeschwindigkeit der Luftteilchen zu verstehen die durch Messungen ermittelt wird.

Windstärke

Bei einer Schätzung des Windes spricht man von Windstärke. Als Windstärke wird der anhand charakteristischer Auswirkungen des Windes auf die Wasseroberfläche oder auf Gegenstände an Land geschätzte Stärkewert bezeichnet. In der international vereinbarten 13-teiligen **BEAUFORT-Skala** (0 = Windstille bis 12 = Orkan) sind diesen Stärkewerten äquivalente Geschwindigkeiten zugeordnet. Für die praktische Anwendung zur See ist diese Skala völlig ausreichend. Im Unterschied zur Windgeschwindigkeit handelt es sich bei der Windstärke physikalisch betrachtet um eine Klassifizierung des Windstaudrucks auf eine definierte Oberfläche.

Windunruhe / Böigkeit

Richtung und Geschwindigkeit des Bodenwindes sind nie konstant, sie schwanken u. a. wegen der Rauigkeit des Untergrundes ständig. Diese Schwankungen, die bei geringen Geschwindigkeiten auftreten, werden als natürliche Windunruhe bezeichnet. Abgesehen von markanten Richtungsänderungen (Windsprung z.B. bei Frontdurchgängen) bewegen sich diese Richtungsänderungen zumeist um einen bestimmten Mittelwert. Bei höheren Windgeschwindigkeiten wird im Allgemeinen der Begriff Böigkeit verwendet. Hier kann es zu markanten Richtungsänderungen kommen.

Windspitzen

Eine Windspitze ist die Bezeichnung für die höchste momentane Windgeschwindigkeit (höchster 3 s-Mittelwert der Geschwindigkeit) in einem willkürlich festgelegten Zeitraum (z. B. Windspitze des Tages, der letzten Stunde, der letzten 10 min).

Mittelwind

Wegen der Windunruhe und der Böigkeit ist es für die meisten Anwendungen nicht sinnvoll, eine momentane Windrichtung oder Windgeschwindigkeit anzugeben. Es werden stattdessen Mittelwerte gebildet. Da der Wind ein Vektor ist, wird ein vektorielles Mittel gebildet. Die WMO legt hier einen Zeitraum von 10 min zugrunde, der nur in besonderen Fällen unterschritten werden darf. Daraus ergibt sich, dass der Windvektor als Mittelwind \vec{v} und Abweichung \vec{v}' (Böen) dargestellt wird

$$\vec{v} = \vec{v} + \vec{v}'$$

Ausnahmen von dem Grundsatz der 10 min-Mittelbildung sind bei folgenden Verhältnissen gegeben:

- Richtungsänderung (Windsprung): Abrupte, anschließend ≥ 2 min beibehaltene Drehung der Windrichtung um $\geq 30^\circ$ in den letzten zu berücksichtigenden 10 min, wobei vor und/oder nach der Änderung die mittlere Geschwindigkeit mindestens $5,0 \text{ m s}^{-1}$ ($\sim 10 \text{ kn}$) oder mehr betragen muss. In diesen Fällen ist die mittlere Richtung anzugeben, die sich nach der Änderung eingestellt hat. Unter dieser plötzlichen Umstellung der Richtung ist keine gleitende allmähliche Richtungsänderung zu verstehen.

- Geschwindigkeitsänderung (Windsprung): Deutliche, signifikante Änderung der Windgeschwindigkeit in den letzten zu berücksichtigenden 10 min um $\geq \pm 5,0 \text{ m s}^{-1}$. Der geänderte Wert muss mindestens 2 min anhalten. Wie bei der Richtung sind auch hier die Mittelwerte zu melden, die sich nach der Änderung ergeben haben. Ein Windsprung ist demzufolge eine Geschwindigkeits- und/oder Richtungsänderung des Bodenwindes.

Wenn bei einem Windsprung nur die Geschwindigkeit oder nur die Richtung eine markante Änderung gemäß der Grenzwerte erfährt, wird auch die jeweils andere Größe, die keine oder nur eine unwesentliche Änderung erfährt, über den verkürzten Zeitraum gemittelt.

Böe

Als Böe bezeichnet man im Allgemeinen einen kräftigen Windstoß, der oft mit einer plötzlichen Windrichtungsänderung verbunden ist. Wenn der gemessene 10 min-Mittelwert der Windgeschwindigkeit innerhalb weniger Sekunden (höchstens 20, mindestens 3 s anhält) um mindestens $5,0 \text{ m s}^{-1}$ überschritten wird, ist das definitionsgemäß eine Böe. Treten die Böen innerhalb eines linienförmig angeordneten Gebietes auf, so nennt spricht man von einer Böenfront.

markante Böe

Eine markante Böe ist eine plötzliche positive Abweichung vom vorangegangenen 10 min-Mittelwert um mindestens $8,0 \text{ m s}^{-1}$ ($\sim 16 \text{ kn}$), wobei die erhöhte mittlere Windgeschwindigkeit mindestens $10,5 \text{ m s}^{-1}$ ($\sim 21 \text{ kn}$) betragen und 1 min oder mehr andauern muss.

Die Vielzahl der Messgrößen des Windes können nicht alle gemessen werden. Wie anschließend zu sehen ist, sind moderne elektronische Anlagen aber in der Lage neben den reinen Messwerten, die anderen Größen daraus zu berechnen und darzustellen.

12.1.3 Maßeinheiten der Windgeschwindigkeit

Die Windgeschwindigkeit wird durch den in der Zeiteinheit zurück gelegten Weg angegeben. Derzeit sind 3 Maßeinheiten für die Windgeschwindigkeit gebräuchlich:

- Meter pro Sekunde (m s^{-1})
- Seemeile oder nautische Meile pro Stunde ($\text{Knoten} = \text{kn} = \text{NM h}^{-1}$)
- Kilometer pro Stunde (km h^{-1})

Umrechnungen zwischen den Maßeinheiten ergeben sich nach Tabelle 12.1.

Tab. 12.1 Umrechnung von Maßeinheiten des Windes

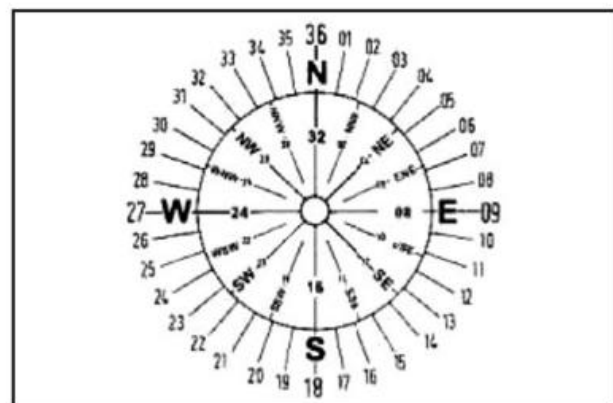
	1 kn	1 m s^{-1}	1 km h^{-1}
1 kn	–	0,5144	1,852
1 m s^{-1}	1,9438	–	3,60
1 km h^{-1}	0,5399	0,277	–

Die Maßeinheit Knoten wird überwiegend in den meteorologischen Diensten, in der Seefahrt und in der Fliegerei ver-

wendet. Die Seemeile kommt aus der Seefahrt und entspricht der Länge einer Bogenminute auf einem Großkreis (Meridian). Diese Maßeinheit wird auch in einigen Wetter-Codes (METAR, TAF) verschlüsselt. Die Maßeinheit m s^{-1} wird in osteuropäischen Ländern und im SYNOP-Code verwendet.

Als Windrichtung wird in der Meteorologie immer die Himmelsrichtung bezeichnet, aus welcher der Wind kommt in einer 360-teiligen Skala (Abb. 12.6) angegeben. Sie wird bestimmt nach dem Polarwinkel (Azimut) und in Grad angegeben, d.h. alle Richtungsangaben in Grad sind rechtweisend (ist im Sinne von „richtigweisend“) auf geographisch Nord bezogen.

Abb. 12.6 Windrose



Im Flugverkehr wird in einigen Gegenden der Erde die Angabe der Richtung in Grad auf magnetisch Nord verlangt, um die Anzeige mit dem Magnetkompass vergleichen zu können. Diese Angabe wird missweisend genannt. In einigen Gebieten der Erde kommt es dabei zu mehr (z. B. in Canada) oder weniger großen Abweichungen zwischen der Windrichtungsangabe und Kompassanzeige.

12.2 Allgemeine Messprinzipien

Zur Messung der Windgeschwindigkeit werden mehrere physikalische Eigenschaften des Windes als Messprinzipien ausgenutzt. Diese sind im Wesentlichen

- der dynamische Winddruck und seine Wirkung auf
 - Druckplatten (Druckplattenanemometer)
 - Rotationskörper (Rotationsanemometer)
 - Manometer (areodynamische Anemometer)
- die thermische (abkühlende) Wirkung des Windes
 - Hitzdrahtanemometer
- die Wirkung des Windes auf die Schallwellenausbreitung (akustische Windmessung)
 - Ultraschallanemometer
- das optoelektrische Prinzip (nur für die Windrichtung)

12.2.1 Dynamischer Druck des Windes

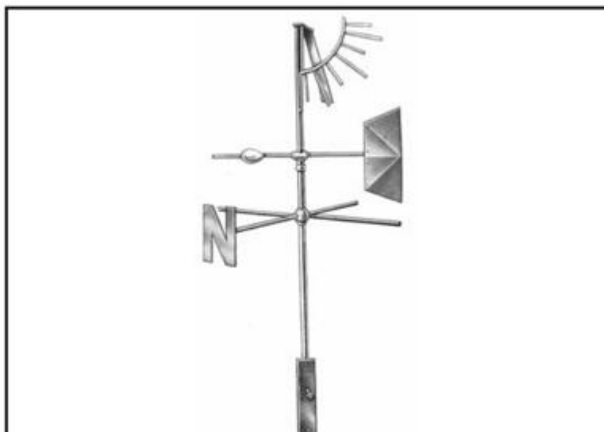
Der **Winddruck** – im Gegensatz zum (statischen) Luftdruck ein dynamischer Druck – entsteht, wenn strömendes Gas (Luft) auf einen Gegenstand trifft. Im umgekehrten Fall wird von **Luftwiderstand** gesprochen, wenn an einem

Gegenstand, der sich durch ruhende Luft bewegt, der gleiche Druck auftritt. Da davon ausgegangen wird, dass sich der Druck gleichmäßig auf der gesamten Anströmfläche verteilt, ist der Winddruck eine rechnerische Größe. In Wirklichkeit stellt sich aber eine Druckverteilung auf dem Gegenstand ein. Das Produkt aus Winddruck und Anströmfläche ergibt die Strömungskraft. Sie ist so groß wie das Flächenintegral über die Druckverteilung auf dem Gegenstand. Somit ist der Winddruck der Mittelwert der Druckverteilung. Der größte auf dem Gegenstand (Anemometer) auftretende Druck ist der Staudruck im Staupunkt, wo die Strömung auf Null abgebremst und die kinetische Energie der strömenden Luft in Druck umgewandelt wird.

Druckplattenanemometer

Ein sehr einfaches Messgerät für Windrichtung und Windstärke ist die WILDSche Windfahne. Sie findet im praktischen Wetterdienst keine Anwendung mehr. Das Messgerät besteht aus einer rechteckigen Blechtafel, die durch eine Windfahne immer senkrecht zum Wind gestellt wird. Je nach Windgeschwindigkeit wird die Blechtafel vom Winddruck verschieden hoch gehoben. An den Stiftmarken des Gradbogens zeigt sie dann die jeweilige Windstärke an. Zwischen den Gradbogenmarken, der Windgeschwindigkeit in m s^{-1} und der Beaufortskala bestehen folgende Beziehungen:

Abb. 12.7 Wildsche Windfahne



Tab. 12.2 Umrechnung von Gradbogenmarke in Windwerte

Gradbogenmarke	1	2	3	4	5	6	7	8
Windgeschwindigkeit	0	2	4	6	8	11	14	20
Beaufort Windstärke	0	2	3	4	5	6	7	9

Die Bestimmung der Windrichtung erfolgt durch Vergleich der Stellung der Windfahne, mit dem die vier Haupthimmelsrichtungen anzeigenden Richtkreuzes, bei welchem die Nordrichtung durch ein „N“ gekennzeichnet ist.

Die Auslenkung der Platten hängt natürlich von ihrem Gewicht ab. Während leichte Platten geringe Windgeschwindigkeiten besser anzeigen, sind schwere Platten für hohe Windgeschwindigkeiten besser. Dennoch kann mit diesem Gerät die Windrichtung und -stärke etwas genauer bestimmt werden, als wenn sie nur geschätzt wird.

Rotationsanemometer (Schalenanemometer)

Die rotierenden Schalenanemometer (Schalenstern-, Schalenkreuzanemometer) beruhen zwar auf der Staudruckwirkung des Windes, sie stellen aber wegen des linearen Zusammenhangs zwischen der primären Messgröße (Umdrehungsfrequenz) und der Windgeschwindigkeit eine eigene Gruppe dar.

Auf einer senkrechten Achse eines Rotationsanemometers sind drei oder vier halbkugelige Schalen angebracht, die in einer Strömung um diese Achse rotieren. Da die Schalen in jedem Moment der Umdrehung des Schalensterns (-kreuzes) in einer anderen Stellung zur Strömung stehen, ist der zeitliche Verlauf des auf sie wirkenden Staudrucks eine komplizierte Funktion.

Zunächst sei ein Anemometer mit 2 gegenüber liegenden Schalen angenommen, deren Arme senkrecht zum Wind stehen. Die Bahngeschwindigkeit u des Schalenmittelpunktes ergibt sich dann mit

$$u = 2\pi \cdot r \cdot \nu \quad (12.1)$$

mit r = Abstand des Schalenmittelpunktes zur Achse
 ν = Windgeschwindigkeit

Da sich die konkave Schale wegen ihres größeren Widerstandsbeiwertes mit dem Wind bewegt, ist die Relativgeschwindigkeit des Windes zur Schale also $v - u$, die konvexe Schale bewegt sich gegen den Wind, die Relativgeschwindigkeit ist dann $v + u$. Hier wirkt eine etwa 4-mal größere Kraft (Tab. 12.3) als an der konvexen Seite der jeweils anderen Schale. Der Staudruck bei beiden Schalen ist gleich dem Quadrat der Relativgeschwindigkeit proportional.

Tab. 12.3 Luftwiderstandsbeiwerte (c_w -Werte)

Form	c_w -Wert
Kreisplatte, Quadratplatte	1,11
Halbkugelschale, konvexe Seite	0,34
Halbkugelschale, konkave Seite	1,33

In dem hier betrachteten stationären Zustand sind die von den beiden gegenüberliegenden Schalen ausgehenden entgegengesetzten gerichteten Drehmomente gleich. Dieses Drehmoment ist jeweils das Produkt aus dem Abstand des Schalenmittelpunktes r und der vom Staudruck bewirkten Kraft auf die Schale, die dem Staudruck proportional ist.

Die Bahngeschwindigkeit u der Schale und damit die Rotationsfrequenz der Achse des Schalenanemometers ist nach (12.1)

$$\nu = \frac{u}{2\pi \cdot r} \quad (12.2)$$

und damit der Windgeschwindigkeit proportional.

Dieses aerodynamisch unterschiedliche Verhalten der Schalen führt dazu, dass das Schalenanemometer unabhängig von der Windrichtung rotiert. Allerdings reagiert es besser auf zu- als auf abnehmende Windgeschwindigkeit.

Am Staupunkt an der Sondenspitze wird der Gesamtdruck p_o gemessen (Pitotrohr), an den seitlichen Öffnungen des Staurohres wirkt dagegen der statische Druck p_i (Drucksonde).

Bringt man in die Strömung einen Körper, so staut sich die Luft an dessen vordersten Punkt. Dort ist $v = 0$ und der dort herrschende statisch gemessene Druck p_i gleich dem Gesamtdruck p_o . An einer Stelle, welche die Strömung tangential streift, hat v den Wert der freien Strömung und der dort gemessene statische Druck ist

$$p_i = p_o - \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (12.3)$$

Die Differenz der beiden Drücke ist der Staudruck, der Gesamtdruck minus statischer Druck. Für ihn gilt dann nach (7.13) und (12.3)

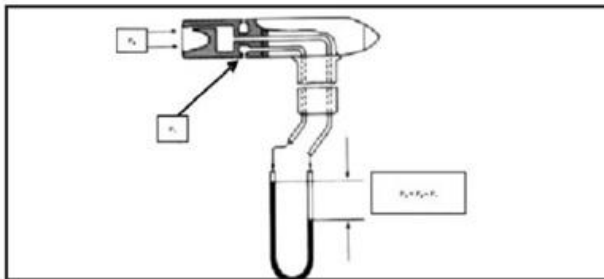
$$\Delta p = p_o - p_i = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (12.4)$$

d. h. der Staudruck ist zum Quadrat der Windgeschwindigkeit proportional. Wenn also p_o gemessen wird, kann aus der Druckdifferenz Δp die Windgeschwindigkeit v durch Umformen von (12.4) direkt berechnet werden:

$$v = \sqrt{2 \frac{\Delta p}{\rho}} \quad (12.5)$$

Da der Staudruck auch von der Luftdichte ρ abhängig ist, verringert sich Δp in größeren Höhen. Zur Windbestimmung muss ρ aus dem Luftdruck und der Lufttemperatur z. B. über die Gaszustandsgleichung (9.2) berechnet werden.

Abb. 12.9 Staudruckprinzip



Die Bernoulli-Gleichung ist in diesem Zusammenhang nur näherungsweise gültig, weil die im Freien strömende Luft eigentlich keine der obigen Eigenschaften hat, da Luft kein ideales, sondern ein kompressibles Medium ist und nicht laminar strömt. Die Gleichung (7.11) kann aber mit hinreichender Genauigkeit auch für strömende Luft angewandt werden.

Das Staurohr hat den Vorteil, dass es bei einer, von Ludwig PRANDTL (1875–1953) angegebene Dimensionierung, eine von Annahmen und Eichung freie Messung erlaubt. Weitere Vorteile sind das verzögerungsfreie Anlaufen bei jeder Geschwindigkeit, keine beweglichen Teile und keine Nach-eichung erforderlich. Der entscheidende Nachteil ist die Richtungsabhängigkeit, was sich insbesondere bei Windböigkeit auswirken kann. Das Gerät muss anhand einer Windfahne immer genau zur Windrichtung ausgerichtet sein. Weitere Nachteile ergeben sich durch die Empfindlichkeit des Messfühlers gegen Verschmutzung, Vereisung

und Niederschlag. Auch der relativ kleine Ausschlag bei geringen Windgeschwindigkeiten ist nachteilig.

Als Messgeräte zu diesem Messprinzip gehören Strömungs-sonde, Venturirohr, Pitotrohr und Prandtl'sches Staurohr. Diese Windmesssysteme dienen meist nur zur Messung der Windgeschwindigkeit in Windkanälen und zur Überprüfung von Windmesssystemen.

12.2.2 Thermische (abkühlende) Wirkung des Windes

Thermische Anemometer

Für thermische Anemometer gilt ebenfalls das Newtonsche Abkühlungsgesetz (8.28), wie es unter 8.4.2 beschrieben ist. Bei thermischen Anemometern wird die Tatsache genutzt, dass der Wärmeübergangskoeffizient α_i , auch Wärmeübergangszahl genannt, eine Funktion der Windgeschwindigkeit v ist

$$\alpha_i = a + b\sqrt{v} \quad (12.6)$$

mit a = Strahlungseinfluss
 b = Gerätekonstante
 v = Windgeschwindigkeit

Wie (12.6) zeigt, hängt die Wärmeübergangszahl auch vom Strahlungseinfluss ab, der bei der Messung unbedingt ausgeschaltet werden muss. Das wird durch die Verwendung von extrem dünnen, hochglanzpolierten Drähten erreicht, die 99 % der auftreffenden Strahlung reflektieren. Wenn bei Totalreflexion der Strahlung $\alpha = 0$ ist, vereinfacht sich die Beziehung zu

$$\alpha_i = b\sqrt{v} \quad (12.7)$$

Durch Messung der elektrischen Größen kann so auf die Strömungsgeschwindigkeit geschlossen werden. Je nach Stärke der vorbei streichenden Luft, wird der Körper mehr oder weniger abgekühlt. Dünne Drähte reduzieren nicht nur den Strahlungseinfluss, damit ist auch die Wärmeübergangszahl größer und das Messgerät wird umso empfindlicher.

Während der Staudruck $\propto v^2$ und die Drehzahl der Schalenwindmesser etwa proportional v ist, ist die Wärmeübergangszahl etwa $\propto \sqrt{v}$. Die primäre Messgröße bei thermischen Windmessern, nämlich die Temperaturdifferenz zwischen Messfühler und Luft ist sogar $\propto \frac{1}{\sqrt{v}}$. Daher eignen sich thermischen Windmesser besonders gut zur Messung kleiner Windgeschwindigkeiten ($< 1 \text{ m s}^{-1}$). Grundsätzlich aber können sie in allen Geschwindigkeitsbereichen (sogar im Überschall) eingesetzt werden.

Thermische Anemometer werden im Westlichen zu Forschungszwecken verwendet. Auch die gefühlte Temperatur, der Windchill kann damit bestimmt werden.

Zu den thermischen Anemometern zählen Hitzdrahtanemometer.

12.2.3 Wirkung des Windes auf die Schallwellenausbreitung

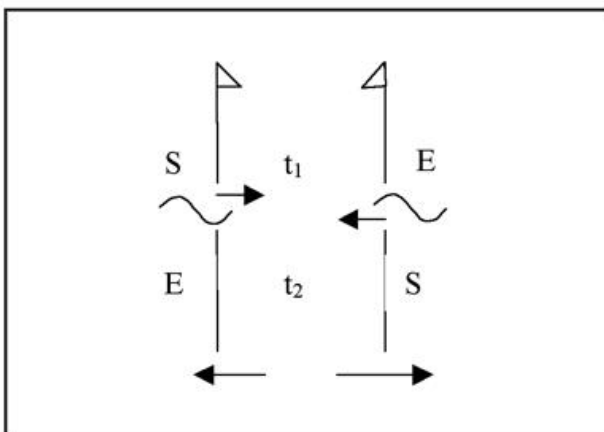
Akustische Anemometer (Ultraschallanemometer)

Bereits unter 8.2.4 „Ultraschallthermometer /-anemometer“ wurde auf die Verwendung von Ultraschallmessgeräten eingegangen. Die Ausführungen zu den Grundlagen sind entsprechend gültig. Schallwellen, die mit einer Frequenz oberhalb der menschlichen Hörschwelle von etwa 15 kHz bis 20 kHz (im Alter wesentlich niedriger) bis etwa 10 GHz (10^{10} Hz) liegen, nennt man Ultraschall. Da die Wellenlänge des Ultraschalls in der Luft kleiner als etwa 1,5 cm ist, kann Ultraschall mit den Gesetzen der geometrischen Optik beschrieben werden. Ultraschallwellen werden anstelle von Schallwellen benutzt, um die Lärmbelästigung gering zu halten.

Bei der Entwicklung von Ultraschallanemometern wurde ursprünglich das Phasendifferenzverfahren eingesetzt. Die durch den Wind veränderte Phasenlage eines von einem Sender ausgehenden Ultraschallsignal wurde an mehreren Empfängern aufgenommen. Das Messprinzip der berührungslosen Windgeschwindigkeits- und Richtungsmessung basiert heute auf der Bestimmung der Laufzeit dieser (Ultra-)Schallwellen in zwei oder allen drei Raumrichtungen. Die ausgesandte Schallwelle kann zeitversetzt beim Empfänger eintreffen, da eine Windgeschwindigkeitskomponente in Ausbreitungsrichtung des Schallimpulses zu einer Erhöhung, entgegen der Ausbreitungsrichtung dagegen zu einer Verringerung der Laufzeit des Schalls über eine feste Messstrecke führt.

Da die Schallausbreitung auch temperaturabhängig ist, wird zusätzlich die Lufttemperatur gemessen. Die Abweichung der (virtuellen) akustischen Temperatur t_{av} von der Lufttemperatur t bei variabler relativer Feuchte steigt bei hoher Temperatur und hoher relativer Feuchte stark an, ähnlich der virtuellen Temperatur (9.16). Bei niedriger Temperatur und Feuchte ist die Abweichung gering.

Abb. 12.10 Messprinzip Ultraschallwindmessung, Schallwandler E, S, Laufzeiten t_1 , t_2



Bei einem Ultraschallanemometer sind ein oder mehrere Paare von Sonotroden (Lautsprecher-Mikrofon-Kombination) in einem konstanten Abstand L montiert. Die Windgeschwindigkeitskomponente v in der Richtung eines Sonodenpaares überlagert sich dem Schallsignal und führt zu

unterschiedlichen Laufzeiten für Hinweg (T_1) und Rückweg (T_2):

$$T_1 = \frac{L}{c+v} \quad \text{und} \quad T_2 = \frac{L}{c-v} \quad (12.8)$$

mit L = Abstand der Sonotrodenpaare
(üblicherweise 10 cm bis 20 cm)
 c = Schallgeschwindigkeit

Diese einfachen Gleichungen zusammengefasst und nach v aufgelöst ergeben

$$v = 0,5 \cdot L \cdot \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \quad (12.9)$$

Die Anordnung zweier senkrecht aufeinander stehender Messstrecken ergibt den Betrag und den Winkel des Windgeschwindigkeitsvektors in Form von rechtwinkligen Geschwindigkeitskomponenten. Nach Messung werden diese in Polarkoordinaten (siehe 12.1.1) umgewandelt und als Betrag der Windgeschwindigkeit und Winkel der Windrichtung ausgegeben. Da jeder Sender auch gleichzeitig Empfänger ist, kann die Laufzeit des Schalls auf jede der Messstrecken in beide Richtungen gemessen und damit der Einfluss der Temperatur auf das Messergebnis beseitigt werden.

Um Störungen des Strömungsflusses durch die Messköpfe und die Gerätehalterung möglichst gering zu halten, müssen die Messstreckenlänge und die Größe der Messköpfe in möglichst großem Verhältnis zueinander stehen.

Seit einigen Jahren werden Anemometer mit um 120° versetzten Messstrecken gebaut, wodurch eine geringere Störung des Strömungsflusses durch das Messgerät selbst erreicht wird. Dazu sind Messwertgeber erforderlich, die aus allen Richtungen angeströmt werden können.

Ultraschallanemometer haben gegenüber herkömmlichen Windgebern, z. B. Windfahne, Schalenstern- oder Propelleranemometer einige Vorteile. Diese sind

- robust und wetterunabhängig, daher auch für Bergstationen geeignet,
- keine mechanische Reibung, daher auch sehr schwacher Wind messbar,
- keine beweglichen Teile, daher praktisch verschleißfrei,
- trägheitsfreie und praktisch strahlungsfreie Messungen bei der Temperaturbestimmung,
- Messung von Windgeschwindigkeit und -Richtung mit nur einem Messsystem
- durch die Eigenschaften der gleichzeitigen hochfrequenten Erfassung von Windfluktuationen und Temperatur in einem Gerät ist es auch ein ideales Turbulenzmessgerät, da es auch den vertikalen Wind misst, was sonst schwierig ist.

Ultraschallanemometer liefern neben den o. a. Werten darüber hinaus gleichzeitig in demselben Messvolumen auch die Schwankungen der Luftdichte, die im Wesentlichen von Schwankungen der Temperatur und in geringerem Maße des Wasserdampfgehaltes bestimmt werden. Ein derart vollständiger Datensatz kann sonst nur durch die Kombination verschiedener Sensoren gewonnen werden.

12.3 Sensoren/Messgeräte

In den Wetterdiensten finden je nach Anforderungen unterschiedliche Messgeräte/Sensoren zur Messung des Bodenwindes praktische Anwendungen. Dabei werden aber auch hier, wie in anderen meteorologischen Messbereichen, nicht alle Messprinzipien ausgenutzt.

12.3.1 Rotationsanemometer

Schalenanemometer mit Windfahne

Diese Sensoren für Windgeschwindigkeit und -richtung verschiedener Hersteller sind die im DWD z.Zt. noch am häufigsten verwendeten Windmesssysteme. Sie sind entweder als einzelne Geräte auf einem gemeinsamen Mast oder als kombiniertes Gerät ausgeführt. Hinsichtlich ihrer Messeigenschaften und im Funktionsprinzip sind die Geräte nahezu identisch. Unterschiede ergeben sich aber in Bezug auf den Einsatzort. Während Schalenanemometer für Flachlandstationen meist aus dünnen Leichtmetallblech bestehen, um durch geringes Gewicht und Masse die Trägheit gering zu halten, besitzen Geräte für Höhenlagen über 600 m NHN eine erheblich stabilere Konstruktion. Außerdem müssen die Anemometer im Gebirge mit einer größeren Heizleistung als im Flachland ausgestattet sein.

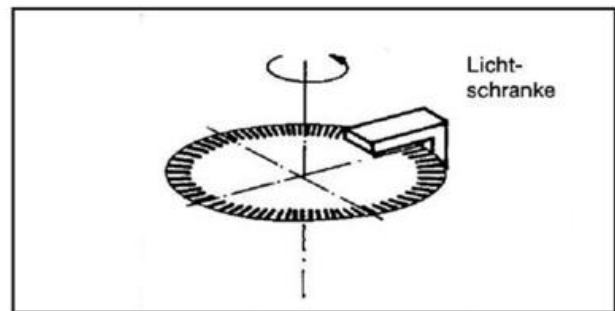
Der Windgeschwindigkeitsgeber der Fa. Thies, Göttingen für Höhenlagen bis 600 m NHN besteht aus einem trägheitsarmen, kugelgelagerten, 3-armigen Schalenstern mit halbkugelförmigen Schalen aus Aluminium, die an horizontalen Armen befestigt sind.

Abb. 12.11 Windgeschwindigkeitsgeber (Thies)



Die Drehzahl des Schalensterns treibt eine Rasterscheibe an, die berührungsfrei optoelektronisch abgetastet wird und einen besonders leichten Anlauf bewirkt. Der Messwert wird in ein rechteckförmiges digitales Signal zur Drehzahl proportionaler Frequenz umgesetzt und ausgegeben.

Abb. 12.12 Prinzip optoelektronische Windgeschwindigkeitsab-tastung mit Lichtschranke



Der Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, dass diese Schalenanemometer nur noch die Lagerreibung besitzen.

Tab. 12.4 Spezifikationen Windgeschwindigkeitsgeber (Thies)

Messbereich	0,3 bis 50 m s ⁻¹
Elektrischer Ausgang	0 bis 1042 Hz (0,3 bis 50 m s ⁻¹)
Genauigkeit	<15 m s ⁻¹ ±0,3 m s ⁻¹ >15 m s ⁻¹ ±2 % vom Messwert
Auflösung	0,05 m Windweg
Anlaufgeschwindigkeit	0,3 m s ⁻¹
Windlast bei 35 m s ⁻¹	10 N
Einsatzbereich	-35 bis +80 °C, max. 60 m s ⁻¹
Spannungsversorgung	3,3 bis 47 V DC
Heizung	24 V AC/DC, 20 W

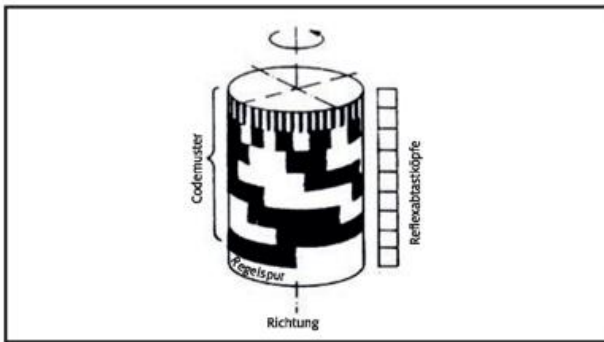
Die elektronisch geregelte Heizung verhindert, dass der Windgeber unter Vereisungsbedingungen nicht blockiert.

Abb. 12.13 Windrichtungsgeber – einfaches Blatt (Thies)



Die Windfahnenstellung wird auf einen Zylinder oder Codescheibe mit einem schwarz-weiß Muster (Gray-Code) übertragen, der optoelektronisch abgetastet wird und damit einen besonders leichten Anlauf gewährleistet und verschleißfrei arbeitet. Die Windrichtung (0 bis 360 °) wird in ein 8-Bit Gray-Code (Thies speziell) umgewandelt und ausgegeben. Die 8 parallelen Signale stellen die Windrichtung mit einer Auflösung von 2,5° (144 Schritte pro Umdrehung) dar. Schritt 0 = 0° = Nord und entspricht dem Sektor 0° bis 2,5°, Schritt 143 = 357,5° entspricht dem Sektor 357,5° bis 0°.

Abb. 12.14 Prinzip optoelektronische Windrichtungsabtastung



Der Gray-Code (nach dem Physiker Frank **GRAY** bezeichnet) ist ein einschrüttiger Binär-Code, beim Wechsel von einem Wert zum nächsten ändert sich jeweils nur ein einziges Datenbit gegenüber dem vorangegangenen bzw. dem nächsten Wert. Der Gray Code wird zur digitalen Bestimmung von Wegstrecken z. B. für die Windrichtung einer Windfahne eingesetzt. Der Code kann mit einer beliebigen Anzahl von Stellen aufgebaut werden, nur abhängig von der gewünschten Auflösungsgenauigkeit.

Tab. 12.5 Spezifikationen Windrichtungsgeber (Thies)

Messbereich	0 bis 360°
Elektrischer Ausgang	0 bis 400 Ohm
Genauigkeit	±1,5°
Anlaufwert	0,5 m s ⁻¹ bei 90°
Auflösung	2,5°
Dämpfungsgrad	0,2 bis 0,3
Temperaturbereich	-35 bis +80°C
Spannungsversorgung	12 V DC, max. 1,5 W
Heizung	24 V AC/DC, max. 20 W

Der Ausgang wird als serielles oder als paralleles digitales Signal zur Verfügung gestellt.

Im Sensor ist eine Regelschaltung eingebaut, die dafür sorgt, dass die Ausgangssignale von Temperaturschwankungen und Alterung der Bauteile unbeeinflusst bleiben.

Abb. 12.15 Beispiel einer Windsensorenanlage auf einer Traverse (Thies)



Windgeschwindigkeitsgeber SK565

Die Windgeber SK565 der Fa. Thies sind speziell für Messungen oberhalb von 600 m NHN ausgelegt. Das Gerät wurde vom DWD (IA München) für extreme klimatische Bedingungen entwickelt und konstruiert. Dazu sind die Anemometerschalen auf beiden Seiten vernietet, die Schalensternhalterung wird durch die konkave Seite der Schale hindurchgeführt.

Die Sensorik muss für solche Höhenlagen mit erweitertem Messbereich bis 80 m s⁻¹ und einer wesentlich verstärkten Heizung an den Schalen, Konus und Schaft ausgelegt sein. Dadurch wird Vereisung an den wesentlichen Funktionsteilen vermieden. Die optoelektronische Abtastung der Umdrehungsfrequenz erfolgt im Bereich von 0 bis 1200 Hz.

Abb. 12.16 Windgeschwindigkeitsgeber SK565 (Thies)



Tab. 12.6 Spezifikationen Windgeschwindigkeitsgeber SK565 (Thies)

Messbereich	0,5 bis 80 m s ⁻¹
Genauigkeit	< 15 m s ⁻¹ : 0,3 m s ⁻¹ > 15 m s ⁻¹ : 2 % vom Messwert
Anlaufwert	0,4 m s ⁻¹
Auflösung	0,1 m s ⁻¹ bei 1 Hz Abtastrate 0,067 m Windweg
Elektrischer Ausgang	0 bis 1200 Hz
Umgebungstemperatur	-40 bis +80°C
Betriebsspannung	12 V DC (9 bis 18 V) 60 mA unbelastet
Heizung	42 V AC, 255 W

Das Gerät misst die horizontale Komponente der Windgeschwindigkeit und gibt den Messwert als digitales Signal aus.

Windrichtungsgeber SK566

Der Windrichtungsgeber der Fa. Thies wurde ebenfalls vom DWD (IA München) für extreme klimatische Bedingungen entwickelt und konstruiert. Hier werden Lager, Leitblech, Konus und Schaft mit einer besonders starken Heizung vor Vereisung geschützt.

Abb. 12.17 Windrichtungsgeber SK566 (Thies)



Tab. 12.7 Spezifikationen Windrichtungsgeber SK566 (Thies)

Messbereich	0 bis 360°, drehend
Auflösung	3,6° für 8-bit Gray-Excess-3 Code 2,5° für 8-bit Gray-Code
Anlaufwert	0,3 m s ⁻¹ bei 90° Auslenkung
Dämpfungsgrad	0,34
Elektrischer Ausgang	Parallelschnittstelle 8 bit Gray-3 Code oder 8 bit Gray-Code
Umgebungstemperatur	-40 bis +80 °C
Betriebsspannung	12 V DC (9 bis 18 V) 300 mA unbelastet
Heizung	42 V AC, ca. 230 W

Wie in Tabelle 12.7 erkennbar, wird dieser Windrichtungsgeber in zwei Ausführungen mit unterschiedlicher Auflösung eingesetzt.

Pflege und Kontrolle der Funktionstüchtigkeit

Die Windsensorik kann nur durch die Mitarbeiter der SL-Einheiten gepflegt und gewartet werden. Das Beobachterpersonal an den Wetterwarten prüft durch Vergleich mit den Augenbeobachtungen und anderer Windmessgeräte die Richtigkeit der ausgegebenen Daten.

Windanzeige

Das zu den Windsensoren gehörige Winddisplay von Thies errechnet die gleitenden Mittelwerte. Die der Windgeschwindigkeit werden aus der Anzahl der Sekundenwerte in einem Speicher gebildet. Der älteste Wert der gleitenden Summe wird subtrahiert und der neue Wert addiert, anschließend durch die Anzahl der Werte dividiert.

Abb. 12.18 Winddisplay LED (Thies)



Der Mittelwert der Windrichtung wird vektoriell errechnet, indem dieser in X- und Y-Komponenten unterteilt wird, da die Windrichtungswerte sich auf einen Kreis (0 bis 359°) beziehen und der „Nordsprung“ (Sprung von 359° auf 0° und umgekehrt) berücksichtigt werden muss.

Die 1 s-Momentanwerte der Windrichtung werden von polaren Koordinaten (Vektoren mit einheitlicher Länge) in kartesische X- und Y-Koordinaten umgewandelt. Die gleitenden Mittelwerte beider Koordinaten werden aus der Anzahl der errechneten Werte gebildet und wie beim gleitenden Mittelwert der Windgeschwindigkeit berechnet. Danach werden die Werte in das Polarkoordinatensystem transformiert. Gleitende Extremwerte werden jede Sekunde für beide Windparameter errechnet. Extremwerte, die kleinsten und höchsten Momentanwerte innerhalb einer Messperiode von 2 oder 10 min, werden ständig aus beiden Messperioden errechnet und können sofort nach Änderung des Darstellungsmodus angezeigt werden.

Wesentliche Bestandteile von Windmessanlagen sind:

- Windmast,
- Anschlusskasten,
- Sensorik für Windgeschwindigkeit und Windrichtung,
- Registriergerät, Drucker, Datenlogger, PC-Systeme zur Datenaufbereitung und Datenverarbeitung,
- elektronische Anzeigesysteme und
- Stromversorgungseinrichtungen.

Kombinierte Windsensoren

Kombinierte Messwertgeber der Fa. Lambrecht werden im SwissMetNet eingesetzt. Jeder Messwertgeber besitzt je ein Messelement für die Messung von Windgeschwindigkeit und Windrichtung für Flachlandstationen.

Abb. 12.19 Kombinierte Windsensoren (Lambrecht)



Bei der Messung der Windgeschwindigkeit gibt es zwei unterschiedliche Ausführungen, die sich wie folgt unterscheiden:

- Ein mit dem Schalenstern gekoppelter Präzisionsgleichstromgenerator wandelt die Anzahl der Umdrehungen des Schalensterns in eine Gleichspannung um, die zu externen Geräten übertragen werden kann,
- Mittels eines induktiven Näherungsschalters wird die Windgeschwindigkeit in Impulse umgewandelt, deren Frequenz proportional zur Windgeschwindigkeit ist.

Bei der Messung der Windrichtung werden zwei Variaten unterschieden:

- Der lineare 1000 Ω Widerstand eines Potenziometers entspricht 0° bis 358° Windrichtung. Das Potenziometer hat in Nordrichtung 2 bis 3 Blindwickelungen.
- Die Windfahne ist mit einem Präzisionsringpotenziometer verbunden. Das Potenziometer ist ein endlos gewickelter, dreifach angezapfter Widerstand, wobei die drei Abgriffe jeweils 120° auseinander liegen.

Der Messwertgeber ist mit einer elektrischen Schaftheizung ausgestattet und kann in einem weiten Temperaturbereich von -35°C bis +70°C betrieben werden. Die Windfahnen- und Schalensternachse sind koaxial gelagert und laufen unabhängig voneinander auf Kugellagern.

Tab. 12.8 Spezifikationen Kombinierte Wind-Sensoren Professional Line Serie (14512)

	Windrichtung	Windgeschwindigkeit
Messelemente	Doppelblatt-Windfahne	3-armiger Schalenstern
Messbereiche	0 bis 360°	0 bis 35 m s ⁻¹
Genauigkeit	±1 %	±2 % FS
Auflösung	0,1°	0,1 m s ⁻¹
Anlaufwerte	1 m s ⁻¹ bezogen auf eine Auslenkung von 90°	1 m s ⁻¹ (I-Variante) 0,2 m s ⁻¹ (II-Variante)
Einsatzbereich	-35 bis +70 °C beheizt, 0 bis 60 m s ⁻¹	

Windsensor für Windrichtung und -Geschwindigkeit

Auf dem Segelschulschiff „Gorch Fock“ der Bundesmarine ist dieser Sensor der Fa. Lambrecht aus Vollmetall im Einsatz. Spritzwasserfallen gegen Schwallwasser und die elektrische Schaftheizung sorgen für optimale Einsatz- und Messbedingungen.

Tab. 12.9 Spezifikationen Kombiniertes Windsensor 1455 (Lambrecht)

Messelemente	Keilwindfahne mit Präzisions-Ringpotenziometer	3-armiger Schalenstern mit Präzisions-Gleichstrom-Mess-generator
Messbereiche	0 bis 360°	1 bis 120 kn (60 m s ⁻¹)
Genauigkeit	±1 %	±2 % FS
Auflösung	0,1°	0,1 m s ⁻¹
Anlaufwerte	0,6 m s ⁻¹	0,6 m s ⁻¹
Einsatzbereich	-35 bis +70 °C beheizt, 0 bis 60 m s ⁻¹	
Ausgang	5,2 mA bei 120 kn, Ra = 4255 Ω	
Versorgungsspannung	Heizung 24 V DC / 35 W bimetalgesteuert	

Abb. 12.20 Kombiniertes Windsensor auf der „Gorch Fock“ (Lambrecht)



Einsatzgebiete des Windsensors (Windgebers) sind neben dem Segelschulschiff „Gorch Fock“ u. a. Küstenüberwachung, Offshore-Windkraftanlagen, Bohrinseln, Bojen und aggressive Umweltbedingungen.

Windschreiber n. Woelfle

Dieser ursprünglich mechanisch arbeitende Windschreiber n. Woelfle wird u. a. von der Fa. Lambrecht und Fa. Friedrichs hergestellt. Er wird bei mobilen Messeinheiten des DWD (siehe 19.5.4) bei horizontalen Profilmessfahrten zur Aufzeichnung von Windweg und Windrichtung eingesetzt. Es handelt sich um einen Bandschreiber mit Handaufzug des Uhrwerks und Wachspapierregistrierung bis zu 31 Tagen.

Abb. 12.21 Windschreiber n. Woelfle (Lambrecht)



Die Messelemente sind aus Leichtmetall, die Windfahne ist abnehmbar und das Stahlblechgehäuse verschließbar, der Schalenstern eloxiert.

Abb. 12.22 Windschreiber n. Woelfle, geöffnet (Lambrecht)



Vorteil dieses Windschreibers ist, dass er keine Hilfsenergie und Schreibttinte benötigt und nahezu wartungsfrei über Monate hinweg arbeiten kann. Er ist daher ideal für den Ganzjahresbetrieb in vielen Klimazonen und in unwegsamen Gebieten einsetzbar.

Tab. 12.10 Spezifikationen Windschreiber n. Woelfle (Lambrecht)

Messbereich	0 bis 60 m s ⁻¹ , 0 bis 10 km Windweg 0 bis 360°
Anlaufwert	0,5 m s ⁻¹
Auflösung	< 0,1 m s ⁻¹
Genauigkeit <15 m s ⁻¹ >15 m s ⁻¹	0,3 m s ⁻¹ ±2 % vom Messwert
Einsatzbereich	-35 bis +60°C nicht vereisend 0 bis 60 m s ⁻¹

Eine neuere Version hat anstelle eines Uhrwerks einen elektrischen Vorschub des Papiers.

Schalenhandanemometer

Anemometer dieser Art gibt es in verschiedenen Ausführungen. Sie sind in zwei Gruppen einzuteilen

- Handwindmesser mit direkter Anzeige der Windgeschwindigkeit
- Handwindmesser zur Bestimmung des Windweges

Bei direkt anzeigenden Geräten wird durch einen auf der Schalensternachse angebrachten permanenten Magneten in einer darunter drehbar angeordneten Metalltrommel ein Wirbelstrom erzeugt, dessen Größe von der Rotationsgeschwindigkeit abhängt und der die Trommel gegen die Kraft einer Spiralfeder verdreht. Ein an der Trommel angebrachter Zeiger gibt auf einer Skala die Windgeschwindigkeit an.

Abb. 12.23 Handanemometer



Windwegmesser arbeiten mit einem Schalenstern dessen Drehzahl der Windgeschwindigkeit nahezu proportional ist. Die Zahl der Umdrehungen wird auf ein mechanisches Zählwerk mit mehreren Stufen (z. B. 1 m bis 100 m, 100 m bis 1000 m, 1000 m bis 10000 m usw.) oder ein mehrstelliges Ziffernzählwerk mit springenden Zahlen übertragen. Bei einzelnen Konstruktionen ist das Zählwerk arretierbar. Manche Instrumente ermöglichen eine Nullstellung der Anzeige vor Beginn der Messung. Zur Bestimmung der Windgeschwindigkeit ist eine Stoppuhr nötig. Der angezeigte Windweg (m) dividiert durch die gemessene Zeit (s) ergibt die Windgeschwindigkeit in $m s^{-1}$.

Handanemometer VT 1204

Im Notmessgeräte-Koffer des DWD (siehe 16.1) ist u. a. dieses Handanemometer der Fa. SIAP, Bologna vorhanden. Es dient zur Bestimmung von Windrichtung und -Geschwindigkeit bei Ausfall der Windmessanlage.

Abb. 12.24 Handanemometer VT 1204 (Foto B. Henning)



Die Windfahne ist mit einer rotierenden Gradeinteilung mechanisch fest verbunden. Sobald das Messgerät mit Hilfe des Dekliometers im Oberteil des Handgriffs eingenordet ist, kann die Windrichtung an der am Gehäuse angebrachten Ablesemarke auf der unteren rotierenden Skala mit einer 360°-Gradeinteilung abgelesen werden.

Tab. 12.11 Spezifikationen des Handanemometers VT 1204 (SIAP)

Messbereich	0,5 bis 30 m s ⁻¹ 0 bis 360°
Messgenauigkeit	±0,5 m s ⁻¹ ±5°
Nachweisgrenze	0,5 m s ⁻¹ 0,5 m s ⁻¹

Durch den Schalenstern wird ein Magnetanker angetrieben, dessen Drehbewegung in einen Zylinder, der den Anker umgibt, Wirbelströme induzieren. Hierdurch wird der mit dem Zylinder fest verbundene Zeiger ausgelenkt und die Windgeschwindigkeit auf der oberen in Kn und $m s^{-1}$ eingeteilten Skala abgelesen. Eine Hilfsskala ermöglicht zusätzlich die Ablesung in $km h^{-1}$. Bei der Messung muss das Messgerät ruhig und soweit wie möglich vom Körper entfernt gehalten werden.

Zum Einnorden muss das Messgerät genau senkrecht gehalten werden, damit sich die Nadel des Dekliometers frei bewegen kann. Sobald durch Drehung des Messgerätes die Mittellinie am Tubusfenster mit der Dekliometernadel in Deckung kommt, ist das Messgerät auf magnetisch Nord ausgerichtet.

Pflege und Wartung

Das mechanisch empfindliche Messgerät darf keinesfalls einem Sturz, Erschütterungen oder Vibrationen ausgesetzt werden. Es bedarf weder einer Schmierung noch einer be-

sonderen Wartung, sondern allenfalls einer äußerlichen Reinigung. Das Ölen des Messgerätes verändert die Kalibrierung des Anemometers.

Propelleranemometer

Ein Beispiel für ein Propelleranemometer ist der Windgeschwindigkeitssensor 05103 der Fa. Young, der beim bayrischen Lawinenwarndienst eingesetzt wird. Es handelt sich dabei um einen Kombinationssensor, der als Aufsatz auf einen Mast mit einem Durchmesser von nur 34 mm erfolgen kann.

Das 4-Blatt Propelleranemometer erzeugt mit den Propellerumdrehungen eine magnetisch induzierte Wechselspannung mit einer Frequenz, die direkt proportional zur Windgeschwindigkeit ist. Pro Umdrehung werden 3 Impulse erzeugt. Die Windrichtung erzeugt eine Analogspannung von einem 10 k Ω -Potenziometer mit einer Linearität von 0,25 %.

Abb. 12.25 Propelleranemometer im Einsatz auf der Zugspitze (Young)



Der Windrichtungssensor ist eine robuste und leichtgewichtige Windfahne mit einer großen Genauigkeit, selbst unter wechselnden Windverhältnissen. Die Windrichtung wird über ein Potenziometer erfasst, das in einem abgedichteten Gehäuse installiert ist. Durch einen Ausrichtungsring kann der Wind-Monitor für Wartungsarbeiten demontiert werden und ohne Verlust der Einnordung erneut installiert werden.

Tab. 12.12 Spezifikationen Propelleranemometer 05103 (Young)

Messelement/-prinzip	Propeller
Messbereich	0 bis 100 m s ⁻¹ , 0 bis 360°,
Genauigkeit	$\pm 0,3$ m s ⁻¹ bzw. 1 % des Messwertes, $\pm 3^\circ$
Anlaufgeschwindigkeit	1,0 m s ⁻¹ , 1,1 m s ⁻¹ bei 10° Auslenkung
Einsatzbereich	-50 bis +50 °C
Ausgang	Frequenz, Potenziometer oder als 4 bis 20 mA
Versorgung	15 V DC
Stromaufnahme	max. 2 mA
Abmessungen	Propeller \varnothing 180 mm; Länge 550 mm

Durch seine hohe zeitliche Auflösung von 5 Hz bis 10 Hz eignet sich das Propelleranemometer auch zu Turbulenzmessungen.

Nachteilig bei Propelleranemometer ist die Richtungsabhängigkeit, d. h. dass bei einem bestimmten Anströmwinkel Messfehler auftreten, die der Kosinusbeziehung folgen und korrigiert werden müssen. Obwohl die angebrachte Windfahne das Anemometer in Windrichtung ausrichtet, treten Fehler insbesondere bei geringem Anströmwinkel auf. So läuft das Anemometer nicht an, wenn die Anströmrichtung $< \pm 2^\circ$ beträgt. Bei 45° Anströmwinkel (durch Trägheit kurzfristig möglich) erreicht der Fehler etwa 15 %.

Flügelradanemometer

Allgemein werden Rotationsanemometer zur Messung der mittleren und momentanen Windgeschwindigkeit verwendet. Mit dem abgebildeten Gerät wird die mittlere Windgeschwindigkeit über einen Zeitraum von 100 s gemessen. Durch die große Anzahl der Flügelräder hat das Anemometer eine geringe Trägheit und eine Anlaufgeschwindigkeit, die kleiner als bei Schalensternanemometern ist.

Es gibt unterschiedliche Ausführungen. Abbildung 12.26 zeigt ein Flügelradanemometer mit Windweganzeige.

Abb. 12.26 Flügelradanemometer mit Windweganzeige



Flügelradanemometer werden insbesondere bei Windkanaluntersuchungen bei kleinen Windgeschwindigkeiten (bis etwa 1 m s⁻¹) eingesetzt, da sie in diesem Bereich ihre Stärke besitzen. Sie werden als Hand-Anemometer u. a. in der Technik für Durchflussmessungen, im Sport als Gegenwind- bzw. Rückenwindmesser benutzt. Auch im operationellen Dienst der Wetterstationen finden sie bisweilen Anwendung.

Nachteilig ist die starke Richtungsabhängigkeit.

12.3.2 Ultraschallanemometer

Grundsätzlich wird zwischen 2- und 3-dimensionalen Ultraschallanemometern (USA) unterschieden. Während mit 2D-USA für die Bestimmung von Windgeschwindigkeit und -Richtung hauptsächlich in der meteorologischen Routine messtechnik eingesetzt werden, kann mit 3D-USA zusätzlich die Vertikalkomponente des Windes bestimmt werden und damit sind Turbulenzmessungen für spezielle Anwendungsbereiche möglich

Ultraschallanemometer 2D

Im DWD werden Ultraschall-Anemometer 2D der Fa. Thies verwendet, die nach und nach die herkömmlichen Windmesssysteme aus Schalenstern und Windfahne an den Wetterstationen/Wetterwarten ersetzen sollen. Da sie robust und pflegeleicht sind, können sie auch auf Bergstationen anstelle von Schalensternanemometern zum Einsatz kommen, wenn sie die speziellen Voraussetzungen für die ext-

remen klimatischen Bedingungen, insbesondere die hohen Windgeschwindigkeiten erfüllen.

Das 2D-Ultraschallanemometer der Fa. Thies dient der 2-dimensionalen Erfassung der horizontalen Komponenten der Windgeschwindigkeit, der Windrichtung sowie der akustischen (virtuellen) Temperatur. Es besteht aus 4 Ultraschallwandlern, von denen sich jeweils 2 im Abstand von 200 mm gegenüberstehen. Die dadurch entstehenden Messstrecken stehen senkrecht zueinander. Die Wandler fungieren sowohl als Schallsender wie auch als Schallempfänger.

Tab. 12.13 Spezifikationen Ultraschallanemometer 2D (Thies)

Messbereich	0 bis 75 m s ⁻¹ , 0 bis 360°
Auflösung	0,1 m s ⁻¹ , 1°
Genauigkeit	±0,1 m s ⁻¹ , ±1°
Virtuelle Temperatur, Auflösung Genauigkeit	-50 bis +70 °C 0,1 K ±0,5 K
Versorgungsspannung	8 bis 42 V DC oder 12 bis 48 V AC, 2,5 W

Die benutzte Schallfrequenz beträgt 40 kHz. Mindestens 100 Schallimpulse pro s werden jeweils zwischen den beiden Kristallen hin- und her gesendet und dabei die Laufzeit des Schalls sowohl in der Hin- als auch in der Rückrichtung gemessen. Aus der Differenz der beiden Laufzeiten kann die Windkomponente entlang der Messlinie mit hoher zeitlicher Auflösung von bis zu 100 Hz bestimmt werden.

Abb. 12.27 Ultrasonic Anemometer 2D (Thies)



Über die Steuerungselektronik werden die jeweilige Messstrecke und deren Messrichtung angewählt. Startet die Messung, läuft eine Sequenz von 4 Einzelmessungen in alle 4 Richtungen der Messstrecken mit maximal möglicher Geschwindigkeit ab. Die Messrichtungen (Schallausbreitungsrichtungen) verlaufen im Uhrzeigersinn rotierend, zuerst von Süd nach Nord, dann von West nach Ost, von Nord nach Süd und anschließend von Ost nach West. Aus den 4 Einzelmessungen werden gleitende Mittelwerte mit einstellbarem Zeitfenster gebildet, die für weitere Berechnungen verwendet werden. Bei maximaler Messgeschwindigkeit werden für einen Messvorgang ca. 2,5 ms bei +20 °C benötigt.

Von über 35 verschiedenen Messwerten, die digital und/oder analog ausgegeben werden, sind u. a. verfügbar:

- Windrichtung
- skalare Windgeschwindigkeit
- akustische virtuelle Temperatur
- Standardabweichung von u. a. Werten
- Windrichtung und -geschwindigkeit der Böe nach WMO

Die rote Markierung an einem Arm (Abb. 12.27) dient zur Nordausrichtung. Ein Dorn und eine Schutzkappe dienen zum Schutz des Ultraschallwandlers gegen das Niederlassen größerer Vögel. Sie werden bei Bedarf auf den Armträger des Ultrasonic-Anemometers in das vorhandene Gewinde geschraubt. Im DWD wird der Dorn nicht eingesetzt. Die Sensorarme werden im Bedarfsfall bei kritischen Umgebungstemperaturen automatisch beheizt. Die Möglichkeit einer Funktionsstörung durch Vereisung wird hierdurch minimiert.

Pflege und Kontrolle der Funktionstüchtigkeit

Durch Niederschläge reinigen sich die Sensorarme selbst. Bei längeren Trockenperioden kann es zu verkrusteten Schmutzansatz kommen, der entfernt werden muss. Diese Arbeiten können nur von den SL-Einheiten durchgeführt werden. Das Personal an den Wetterwarten kann die Funktionstüchtigkeit der Heizung durch Augenbeobachtung überprüfen und regelmäßig die ausgegebenen Daten kritisch prüfen.

Ultraschallanemometer 3D

Dieser Windsensor der Fa. Gill Instruments LTD., UK wird bei Profilmessfahrten der mobilen Messeinheiten des DWD (siehe 19.5.5) eingesetzt. Es handelt sich um ein Dreiaachsen (3D)-Ultraschallanemometer.

Abb. 12.28 Ultraschallanemometer 3D (Gill Instruments LTD.)



Tab. 12.14 Spezifikationen USA 3D (Gill Instruments LTD.)

Messbereich Windgeschwindigkeit Windrichtung	0 bis 65 m s ⁻¹ 0 bis 359° (kein toter Bereich)
Windrichtung, Auflösung	0 bis 359°, 0,1°
Schallgeschwindigkeit, Auflösung	300 bis 370 m s ⁻¹ , 0,01 m s ⁻¹
Schalltemperatur, Auflösung	-40 bis +70 °C, 0,01 °C
Ausgabe	u, v, w-Vektoren, Polarkoord., Schalltemperatur, -geschwindigkeit
Einsatzbedingungen	-40 bis +70 °C, <5 bis 100 %
Datenausgabe	4 pro s
Versorgung	9 bis 30 V DC, 250 mA max mit Heizung

Ultraschallanemometer USA-1

Der Windmesser USA-1 der Fa. METEK GmbH, Elmshorn ermittelt die drei orthogonalen Windkomponenten *u*, *v* und *w* (den sog. 3-dimensionalen Windvektor) und die Temperatur anhand der Laufzeiten von Ultraschallimpulsen. Da die Temperatur direkt aus der Schallgeschwindigkeit berechnet wird, entspricht sie eher der meteorologisch verwendeten virtuellen Temperatur. Alternativ zu den horizontalen Windkomponenten können Windgeschwindigkeit und Windrichtung berechnet und ausgegeben werden.

Abb. 12.29 USA-1 (METEK GmbH)



Das USA-1 besteht aus dem Sensorkopf mit 6 Ultraschallwandlern, die durch die Geometrie des Sensorkopfes so angeordnet sind, dass sich jeweils zwei von ihnen in einem Abstand von ca. 175 mm gegenüberstehen. Jeder Schallwandler wird abwechselnd als Sender und Empfänger verwendet, so dass drei Messstrecken und damit sechs Laufzeiten entstehen. Der eine Messkopf sendet während 5 ms Ultraschall-Impulse mit einer Frequenz von 35 kHz aus, der andere empfängt diese. Die Zeit, die das Signal vom Sender zum Empfänger benötigt (ca. 0,5 m s⁻¹) wird gemessen.

Die Messstrecken bilden gegenüber der Vertikalen jeweils einen Winkel von 45°, gegeneinander sind sie um einen Winkel von jeweils 120° in der Horizontalen versetzt. Die Anordnung der schrägen Messstrecken in omni-direktionaler Bauform, macht dieses Ultraschallanemometer unabhängig von der Anströmrichtung.

Tab. 12.15 Spezifikationen Ultraschallanemometer USA-1 (METEK GmbH)

Messbereich	Windgeschwindigkeit 0 bis 60 m s ⁻¹ Windrichtung 0 bis 360° Windkomponenten -50 bis 50 m s ⁻¹
Messrate	einstellbar 0,01 bis 50 Hz
Mittelungsintervall	einstellbar 1 bis 65535 Messungen
Messauflösung	Windgeschwindigkeit ± 0,01 m s ⁻¹ Windrichtung ± 0,4° u, v, w-Komponenten ± 0,01 m s ⁻¹ Temperatur ± 0,01 K
Genauigkeit	bis 1 m s ⁻¹ ± 10°, ± 10 cm s ⁻¹ bis 4 m s ⁻¹ ± 3°, ± 15 cm s ⁻¹ bis 10 m s ⁻¹ ± 2°, ± 30 cm s ⁻¹ zwischen 20 bis 50 m s ⁻¹ ± 2° bzw. ± 2 %
Einsatzbedingungen	-40 bis +60 °C, 0 bis 60 m s ⁻¹
Versorgungsspannung	9 bis 36 V DC, 2,5 W 24 V DC, max. 55 W mit Heizung

Die Elektronik ist in einem Gehäuse direkt am Sensorkopf oder in einem getrennten Gehäuse untergebracht. Der Messgeber kann anhand der erfassten Daten verschiedene Berechnungen wie Durchschnitt, Richtungsoffset, Formatierung etc. durchführen, bevor er sie übermittelt. Aufgrund der hohen zeitlichen Auflösung von 10 Hz bis 20 Hz werden nicht nur die Mittelwerte, sondern auch die kurzzeitigen Schwankungen erfasst, aus denen dann Turbulenzgrößen abgeleitet werden. Dabei muss beachtet werden, dass die Einschränkung für die Verwendung der mittleren Temperatur (*t* zu *t_m*) für die Turbulenzgrößen nicht gilt, da hier nur die Abweichung vom Mittelwert verwendet wird. Ungenauigkeiten durch mechanische Belastung des Sensorkopfes, wie sie von Schalenkreuzanemometern und Windfahnen bekannt sind, treten nicht auf. Außerdem kann das System auch unter Vereisungsbedingungen betrieben werden, da alle Sensorkopfteile beheizbar sind.

Das USA-1 ist mit über 20 Exemplaren für Forschungszwecke im DWD im Einsatz (u. a. am MOHP, MOL auf einem 100 m-Masten, an mobilen Messeinheiten des DWD und Potsdam) und auf Bergstationen des SwissMetNet installiert. Auch in der Agrarmeteorologie des DWD (siehe 15.) werden zwei 3D-USA der Fa. METEK GmbH (Abb. 15.14) verwendet.

Dieser Windmesser wurde aufgrund der guten Resultate bei der 2006 durchgeführten internationalen Vergleichskampagne gewählt.

Windcap® Ultrasonic WS425

Der Windcap® Ultrasonic WS425 der Fa. Vaisala ist Bestandteil der automatischen Wetterbeobachtungsstation MIDAS IV AWOS (siehe 18.4) der gleichen Firma. Die Funktionen dieses Sensors beinhalten die Geschwindigkeits- und Richtungsmessung und die Übertragung der Messwerte.

Abb. 12.30 Ultrasonic Windcap® WS425 (Vaisala)



Die hohe Messgenauigkeit der Windrichtung ohne tote Winkel und Anzeigefehler resultiert aus der patentierten horizontalen Anordnung der Messwertwandler als gleichseitiges Dreieck (Abb. 12.31) und damit die jeweils 60° versetzten Schallpfade in gleichen Abständen.

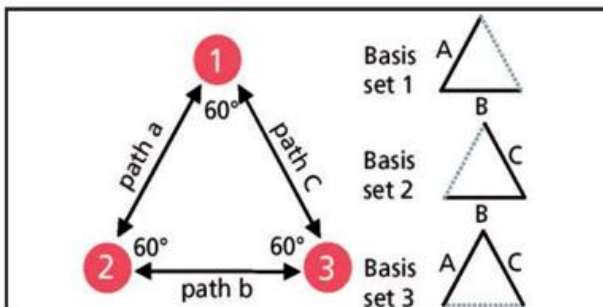
Tab. 12.16 Spezifikationen Windcap® Ultrasonic WS425 (Vaisala)

Messbereich	0 bis 65 m s ⁻¹ , 0 bis 360°
Anlaufwert	praktisch 0
Ansprechzeit	praktisch 0
Auflösung	0,1 m s ⁻¹ , 1°
Genauigkeit	±0,135 m s ⁻¹ , ±2° oder 3% vom Messwert
Einsatzbedingungen	-40 bis +50°C ohne Heizung -55 bis +55°C mit Heizung
Versorgung	10 bis 15 V DC, 12 mA typisch (analog) 36 VDC ±10%, 0,7 A

Diese Anordnung ermöglicht bi-direktionale Messungen entlang der Schallpfade A, B und C (Abb.12.31) zur Bestimmung der Windgeschwindigkeitskomponenten parallel zu den Pfaden. Dadurch werden unerwünschte Nebeneffekte, die durch Aufstellungshöhe, Temperatur und Luftfeuchte verursacht werden eliminiert.

Die Ausrichtung des WS425 erfolgt entlang der Arme des Sensors. Einer der drei Arme ist mit einem "N" gekennzeichnet, wobei dieser **nicht** direkt nach Norden zeigt. Die Laufzeit der Schallwellen wird jeweils in beide Richtungen pro Sensorpaar gemessen.

Abb. 12.31 Anordnung der Schallköpfe als gleichseitiges Dreieck (Vaisala)



Turbulenzmessung mit Ultraschallanemometern

In vielen Bereichen der Umweltmeteorologie benötigt man Informationen über die turbulenten Schwankungen meteorologischer Größen (z. B. Ausbreitung und Verdünnung von Schadstoffwolken, Belastung von Bauwerken durch Windschwankungen). Die Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN veröffentlichte im Oktober 2008 eine neue Richtlinie, die grundlegenden Prinzipien der Messtechnik von Ultraschallanemometern beschreibt. Sie findet Anwendung bei der Messung des Windvektors mit hoher zeitlicher Auflösung und bei der Bestimmung von turbulenten Flüssen (Abschätzung der Ausbreitungssituation, Überwachung von Anlagen, agrar-, forst- und allgemeinen mikrometeorologischen Fragestellungen usw.).

Zur ihrer Messung eignet sich besonders das Ultraschallanemometer. Es ist einerseits so robust, dass es für operationell betriebene Messstationen eingesetzt werden kann und besitzt andererseits ein für Turbulenzmessungen ausreichendes räumliches und zeitliches Auflösungsvermögen [45].

Messsysteme zur Bestimmung der turbulenten Flüsse von Impuls sowie fühlbarer und latenter Wärme (Wasserdampf) nach der Eddy-Kovarianz-Methode

Die am MOL im Einsatz befindlichen Turbulenz-Messkomplexe bestehen aus je einem Ultraschall-Anemometer-Thermometer USA-1 und einem Infrarot-Hygrometer LI7500. Mit diesen Sensoren werden die Fluktuationen der Komponenten des Windvektors (u, v, w), der Temperatur (T) und der absoluten Feuchte der Luft (a) mit einer Abtastrate von 10 Hz bis 20 Hz gemessen und hieraus durch Bildung der Korrelationsprodukte $\langle wu \rangle, \langle wv \rangle, \langle wT \rangle$ und $\langle wa \rangle$ die turbulenten Flüsse von Impuls sowie fühlbarer und latenter Wärme ermittelt. Mehrere dieser Turbulenzmesskomplexe sind in die Datenerfassung der mikrometeorologischen Messstationen des Energiebilanz-Messnetzes integriert. Hier erfolgt eine Vorverarbeitung der Daten unmittelbar in der Steuereinheit des USA-1, so dass keine Rohdaten aufgezeichnet werden. Auf dem GM Falkenberg des DWD wird je ein Turbulenzmesssystem an der Westkante bzw. am Ostrand des Messfeldes betrieben, so dass unabhängig von der Windrichtung jeweils eine Messung die Grasfläche des Messfeldes repräsentiert [DWD MOL].

Im Rahmen von Messkampagnen wurden in den Jahren 1998, 2000, 2002 und 2003 zeitlich befristet Messungen turbulenter Flüsse am 99 m-Mast auf dem GM Falkenberg durchgeführt. Die Instrumentierung des Mastes für kontinuierliche Messungen zur Erfassung der Turbulenzstruktur in der unteren atmosphärischen Grenzschicht ist vorgesehen.

12.3.3 Thermische Anemometer

Beim sog. Hitzdrahtanemometer kommt das thermische Messprinzip zur Anwendung. Zwei Widerstandsdrähte (Platindraht) mit einem Durchmesser von nur 10 µm bis 20 µm werden mittels eines elektrischen Stroms auf eine konstante Temperatur aufgeheizt und die benötigte Heizleistung wird gemessen. Der an den Drähten vorbei streichende Wind führt Wärme ab und bewirkt eine Abkühlung. Die hierbei auftretende Widerstandsänderung ist proportional der Windgeschwindigkeit.

Hitzdrahtanemometer werden zur Messung sehr kleiner Windgeschwindigkeiten verwendet. An einigen Hitzdrahtanemometern kann zwischen zwei Messbereichen gewählt werden, z. B. ein Messbereich von $0,05 \text{ m s}^{-1}$ bis $1,5 \text{ m s}^{-1}$ und von $2,0 \text{ m s}^{-1}$ bis $3,0 \text{ m s}^{-1}$. Die Stromversorgung kann durch eine Batterie von nur $1,5 \text{ V}$ erfolgen.

12.3.4 Aerodynamische Anemometer

Prandtl-Staurohr

Das gebräuchlichste Gerät zur Messung der Windgeschwindigkeit, welches nach dem aerodynamischen Prinzip arbeitet, ist das Prandtl'sche Staurohr, eine Kombination aus Pitotrohr und Drucksonde. Es besteht aus zwei ineinander geschobenen Rohren. Das innere Rohr ist vorne offen (Staudüse) und gegen das äußere abgeschlossen, welches vorne in einer Halbkugel endet, bis zu deren Oberfläche das offene, innere Rohr reicht. Etwas hinter der Staudüse hat das äußere Rohr einen ringförmigen Schlitz (Ringdüse). Sowohl der Druck an der Staudüse p_0 als auch der an der Ringdüse p , werden durch Schlauchleitungen zu einem Mikromanometer geleitet. Wirkt nun p_0 auf der einen Seite der Flüssigkeit und p , auf der anderen Seite des Manometers, so wird die Flüssigkeit in dem Schenkel mit dem niedrigeren Druck solange steigen, bis der durch den Niveauunterschied der Flüssigkeit bewirkte Druckunterschied gleich dem Staudruck nach (12.4) ist.

Der Fahrtmesser in Flugzeugen basiert auf dem Staudruckprinzip. Er gibt den dynamischen Druck und nicht die Geschwindigkeit an. Die angezeigte Geschwindigkeit (IAS) stimmt mit der wahren Geschwindigkeit (TAS) nur dann überein, wenn die gleichen atmosphärischen Verhältnisse (p , t , ρ) herrschen, wie sie bei der Kalibrierung vorausgesetzt worden sind. Wenn die Luftdichte ρ z. B. wegen großer Flughöhe kleiner wird, wird bei gleicher v der Staudruck Δp kleiner und der Fahrtmesser zeigt eine zu geringe Geschwindigkeit an.

Strömungssonde

Die Strömungssonde ist ein dem Prandtl-Staurohr nachgebildetes Hakenrohr. Gegenüber Staurohren weist es aber den Vorteil auf, dass es die Momentanwerte der Strömungsgeschwindigkeit direkt und ohne weiteres Zusatzgerät anzeigt. Bei der Messung wird durch die in der Spitze es doppelwandigen Hakenrohres befindliche Bohrung eine Teilströmung aufgenommen, die nach Passieren des Innenrohres in die Messkammer gelangt. Von dort wird sie anschließend durch die äußere Hakenöffnung zurückgeführt und tritt dann an den seitlichen Öffnungen der Sondenspitze (auf die der statische Druck wirkt) wieder aus.

Abb. 12.32 Strömungssonde (Lambrecht)



Entsprechend dem Stauklappenprinzip ist die Anzeige abhängig von der jeweiligen Luftdichte, die mit einer dem Gerät beigelegten Tabelle berücksichtigt werden muss.

In den vom Hakenrohr aufgenommenen Teilstrom können wahlweise 4 Düsen mit unterschiedlicher Bohrung eingeschaltet werden. Je nach Düsenöffnung wird die in die Messkammer gelangende Strömung mehr oder weniger gedrosselt und so kann auf diese Weise die Empfindlichkeit und damit der Messbereich in 4 Stufen zwischen $0,7 \text{ m s}^{-2}$ bis 50 m s^{-2} verändert werden. Die Genauigkeit beträgt $\pm 2 \%$ vom Skalenwert.

Abweichungen zwischen Strömungsrichtung und Längsachse des Staukopfes gehen in das Messergebnis nicht ein, wenn sie kleiner als $\pm 15^\circ$ sind.

12.3.5 DWD-Normal für Windgeschwindigkeitssensoren

Im DWD wird für die Kalibrierung von Windgeschwindigkeitssensoren die Laser-Doppler-Anemometrie angewandt. Ein Laser-Doppler-Anemometer (LDA) ist ein Instrument zur fluiddynamischen Untersuchungen in Gasen und Flüssigkeiten. Es ist eine optische Technik, die gleichzeitig Informationen über 1D-, 2D- und 3D-Punkt-Messungen von Geschwindigkeit und Turbulenzverteilung mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung ermöglicht.

Die Grundkonfiguration des LDA der Fa. Dantec Dynamics A/S besteht aus:

- Dauerstrichlaser
- Sendeoptik, darunter einen Strahlteiler und eine fokussierende Linse
- Empfangsoptik, bestehend aus einer fokussierenden Linse, einem Filter und einem Photodetektor
- Signalgeber und Signalprozessor.

Eine Bragg-Zelle wird oft als Strahlteiler verwendet. Es handelt sich dabei um ein Glaskristall, an dem ein schwingendes Piezokristall befestigt ist. Die Schwingungen erzeugen akustische Wellen, die wie ein optisches Gitter wirken. Der Ausgang der Bragg-Zelle besteht aus zwei Teilstrahlen gleicher Intensität mit unterschiedlichen Frequenzen.

Die Sonde ist in der Regel nur ein paar Millimeter lang. Die Lichtintensität ist durch Interferenzen zwischen den Laserstrahlen moduliert. Dies führt zu parallelen Ebenen hoher Lichtintensität. Der Streifenabstand ist durch die Wellenlänge des Laserlichts und der Winkel zwischen den Strahlen definiert. Jeder Teilchendurchgang streut das Licht proportional zur lokalen Lichtintensität. Das gestreute Licht enthält eine Dopplerverschiebung, die proportional zur Geschwindigkeit ist.

Das gestreute Licht wird von einer Empfängerlinse gesammelt und auf einen Photodetektor konzentriert. Ein eingebauter Filter führt nur die benötigte Wellenlänge zum Photodetektor, um so das Rauschen aus der Umgebungsluft zu beseitigen.

Vorteile dieser Messtechnik sind

- keine Kalibrierung erforderlich,
- Geschwindigkeitsbereich von 0 bis Überschall,
- Messabstand von Zentimetern bis Metern,
- hohe räumliche und zeitliche Auflösung.

12.4 Messunsicherheiten und Fehlerquellen

Rotationsanemometern

Auf Fehlerquellen bei Schalenstern- und Propelleranemometern wurde bereits bei der Erklärung der Messprinzipien eingegangen. Auf eine weitere Fehlerquelle, die durch gleichzeitigen Niederschlag auftreten kann, hat Dentler [8] hingewiesen. Neben den aerodynamischen Drehmomenten kommen noch die niederschlagserzeugenden Momente hinzu. Der Niederschlagseinfluss lässt sich durch Aufnahme weiterer, durch die Impulsübertragung von den Regentropfen verursachten Drehmomente darstellen. Das entsprechende Drehmoment setzt sich aus zwei Anteilen zusammen. Aus einem Drehmoment, das durch elastische Stöße auf die äußere Oberfläche der Schalen und einem Drehmoment, das durch inelastische Stöße auf die innere Oberfläche der Schalen vom System aufgenommen werden. Um das gesamte, von Regentropfen erzeugte Drehmoment zu berechnen, ist über alle vorkommenden Tropfendurchmesser zu summieren. Weiter ist zu berücksichtigen, dass sowohl die Fallgeschwindigkeit als auch der Auftreffwinkel, der wiederum windgeschwindigkeitsabhängig ist, das gesamte niederschlagserzeugende Drehmoment beeinflussen und die Behandlung des Problems erschweren. Unter Berücksichtigung des Reflexionsgesetzes an Kugeloberflächen ist auch noch die Zahl der Tropfentreffer pro Zeiteinheit schwierig abzuschätzen. In Verbindung mit den Annahmen über die Impulsübertragung und die Tropfenspektren kann eine Maximalabschätzung des Niederschlagsfehlers erfolgen.

Ultraschallanemometer

Auf Fehler durch Störungen des Strömungsflusses wurde unter 12.2.3 bereits hingewiesen. Bei hohen Windgeschwindigkeiten verringert sich das Verhältnis der gemessenen zur realen Windgeschwindigkeit am USA, abhängig vom Anströmwinkel. Dieser Effekt tritt durch Abschattungseffekte und Turbulenzbildung auf. Die verwendete, gemessene Querwindkomponente eines USA mit 90° versetzten Messstrecken ist besonders bei senkrechtem Anströmwinkel zu niedrig, was auch eine zu niedrige akustische virtuelle Temperatur t_{av} zur Folge hat. Abhilfe kann durch Verwendung eines Korrekturfaktors erzielt werden, der abhängig von der Windgeschwindigkeit und dem Anströmwinkel ist.

Hitzdrahtanemometern

Fehlerquellen sind

- auftretender Niederschlag kann zur Verdunstungsabkühlung an den Heizdrähten führen,
- die sehr dünnen Drähte sind leicht zu beschädigen.

Vergleich der Messgenauigkeit von Windmessgeräten

Tab. 12.17 Vergleich von Messgenauigkeiten der Windsysteme

	Messbereich	Messgenauigkeit
Rotationsanemometer	0 bis 30 m s^{-1}	$0,1 \text{ m s}^{-1}$
Thermische Anemometer	0 bis 20 m s^{-1}	$0,01 \text{ m s}^{-1}$
Ultraschallanemometer	0 bis 60 m s^{-1}	$<0,01 \text{ m s}^{-1}$
Windfahnen	0 bis 360°	1 bis 10°

Auf allgemeine Fehlerquellen der Windmessung, die durch Hindernisse auftreten können, wird unter 19.4.2 „Aufstellung der Sensoren“ eingegangen.

13. Messung der Sichtweite

13.1 Allgemeines

Die in der Luft fast immer vorhandenen kleinsten Teilchen in flüssigem oder festem Zustand, deren Gehalt stark schwankt, sind die Ursache für eine verschiedenen starke Trübung der Luft und damit unterschiedlicher Sichtverhältnisse. Sie zu messen ist ein wichtiges Problem in vielen Bereichen. In der Flugwetterberatung geht es um schlechte Sichten bei Nebel als der stärksten Beeinträchtigungen des ständig wachsenden Luftverkehrs, der in hohem Maße von der atmosphärischen Sichtweite abhängig ist. Auch im Straßen- und Schiffsverkehr spielt die Sichtweite eine große Rolle. Durch den zunehmenden Verkehr und den höheren Geschwindigkeiten ist die Reaktionszeit immer kürzer geworden, was sich besonders bei Nebel negativ auswirken kann. Nicht umsonst wurden an bestimmten Streckenabschnitten der Autobahnen Sichtmessgeräte installiert, die mit automatischen Warnanlagen gekoppelt sind.

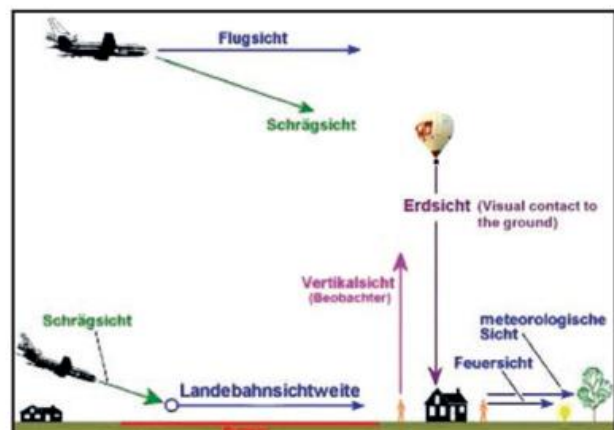
Neben diesen Bereichen ist die Sichtweite auch ein Hilfsmittel in der Analyse- und Vorhersagearbeit, da die Sichtweite eine von mehreren Luftmassenmerkmalen darstellt.

13.1.1 Messgrößen der Sichtweite

Es gibt verschiedene Sichtangaben (Abb. 13.1), die nach dem jeweiligen Verwendungszweck angegeben werden. Folgende Sichtweitenbegriffe sind allgemein in Gebrauch:

- Meteorologische Sichtweite (MOR – meteorological optical range)
- Normsichtweite
- Feuersicht
- Landebahnsichtweite (Pistensichtweite RVR – runway visual range)
- Schrägsicht (slant visibility)
- Flugsicht (flight visibility)
- Vertikalsicht (vertical visibility)

Abb. 13.1 Sichtbegriffe



Die letzten vier Sichtbegriffe sind im Allgemeinen nur für die Luftfahrt von Bedeutung.

Es folgt zunächst eine kurze Darstellung der Sichtbegriffe, wobei im weiteren Verlauf nur noch diejenigen behandelt werden, die im Zusammenhang mit einem Messgerät stehen.

Allgemeines

Die verschiedenen Sichtbegriffe können je nach Sehrichtung in Horizontal-, Schräg- und Vertikalsicht unterteilt werden, je nach Tageszeit wird noch zwischen der Sichtweite am Tag und der Feuersichtweite bei Nacht unterschieden.

Nach den geltenden Theorien kann ein unbeleuchtetes Sichtziel wahrgenommen bzw. erkannt werden, wenn

- am Tag der Kontrast zu seiner Umgebung größer ist als der Schwellenwert, von dem ab das Auge den Kontrast wahrnehmen kann,
- bei Dunkelheit die erzeugte Beleuchtungsstärke größer ist als der Schwellenwert, von dem ab das Auge die Beleuchtungsstärke wahrnehmen kann.

„Geeignete Sichtziele genügender Größe“ sind schwarze oder dunkelfarbige Gegenstände (z. B. Baumgruppen, Gebäude) vor hellem Hintergrund. Wichtig für geeignete Sichtziele ist also guter Kontrast gegenüber der Umgebung. „Ausreichende Helligkeit“ bedeutet, dass das Tageslicht so hell ist, dass z. B. in Wohnräumen die Beleuchtung nicht eingeschaltet werden muss. Weiterhin sollen die Sichtziele eine geeignete Größe besitzen, damit sie auch auf große Entfernungen erkannt werden können. Die scheinbare Größe der Sichtziele soll einem Sehwinkel zwischen $0,5^\circ$ bis 5° entsprechen, da kleinere Objekte bei sonst gleichen Bedingungen vom Auge schlechter wahrgenommen werden, d. h. sie verschwinden bei Sichtverschlechterung früher als größere trotz gleicher Entfernung.

Für die Sicht am Tage gilt nach **KOSCHMIEDER** bei Vorliegen der Voraussetzung „geeignetes Sichtziel genügender Größe“ und „ausreichende Helligkeit“ folgender Zusammenhang mit dem Extinktionskoeffizienten als Maß für die Schwächung der Sonnenstrahlung infolge Absorption und Streuung in der Atmosphäre:

$$V = \frac{1}{\sigma} \cdot \ln \frac{1}{\varepsilon} \quad (13.1)$$

mit V = Sichtweite am Tag (km)
 ε = Kontrastwellenwert (relative Leuchtdichtedifferenz)
 σ = Extinktionskoeffizient der Atmosphäre für sichtbare Strahlung (m^{-1})

Meteorologische Sicht

Als meteorologische Sichtweite bezeichnet man die größte horizontale Entfernung, in der tagsüber entfernte dunkle Gegenstände ausreichender vertikaler Erstreckung vor hellem Hintergrund in ihren Umrissen gerade noch klar gesehen und erkannt werden können. Bei Nacht soll eine ungerichtete Lichtquelle (Fackel, Lampe) noch erkannt werden. Grundlegende Voraussetzung für eine regelgerechte Sichtweitenfeststellung ist die freie Rundumsicht (keine großen

Hindernisse in der unmittelbaren Umgebung). Nur ein Teil des von einem beleuchteten oder selbst leuchtenden Gegenstand ausgehenden Licht gelangt direkt zum Beobachter oder zum Messgerät. Das restliche Licht wird durch Trübungspartikel teilweise absorbiert, reflektiert oder gestreut. Den hierdurch eintretenden Lichtverlust längs des Ausbreitungsweges bezeichnet man als Schwächung (Extinktion).

Für die Sicht am Tage ist es wichtig, dass ein Teil des reflektierten oder gestreuten Lichtes aus einer anderen Richtung als der ursprünglichen zum Auge des Beobachters gelangt, so auch aus der Richtung eines (dunklen) Sichtzieles. Die Folge ist, dass der helle Hintergrund dunkler, das dunkle Sichtziel heller wirkt. Aus diesem Grunde nähert sich für das Auge bei Sichtverschlechterung die Helligkeit eines entfernten Sichtzieles immer mehr der des Hintergrundes, um schließlich mit dieser übereinzustimmen, während die allgemeine Verdunkelung aufgrund der Anpassungsfähigkeit des Auges nicht bewusst wahrgenommen wird.

Für die Messung der meteorologischen Sichtweite (VM) mit der internationale Bezeichnung „**Meteorological Optical Range**“ – MOR gilt folgende Definition:

Die meteorologische Sichtweite ist diejenige horizontale Entfernung von einem geeigneten Sichtziel, in welcher bei horizontal homogen beleuchteter und getrüübter Atmosphäre der Kontrastwellenwert zur Umgebung des Sichtzieles den Wert $\varepsilon = 0,05$ annimmt.

Bei diesem Kontrastwellenwert kann ein geübter, normalsichtiger Beobachter ein geeignetes Sichtziel seiner Form und Art nach gerade noch erkennen (das ist mehr als nur wahrnehmen!). Ein $\varepsilon = 0,05$ bedeutet, dass das Sichtziel nur 95 % der Helligkeit des Hintergrundes hat, es ist also dunkler. Dieser Zahlenwert in (13.1) eingesetzt ergibt folgenden Zusammenhang:

$$V_M = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{1}{0,05} \approx \frac{3}{\sigma} \quad (13.2)$$

Die meteorologische Sichtweite V_M kann nach (13.2) also aus dem Extinktionskoeffizienten σ der Luft für sichtbare Strahlung berechnet werden, wobei σ mit einem Transmissometer, Vorwärtsstreulichtmesser oder Rückwärtsstreulichtmesser bestimmt werden kann. Die meteorologische Sichtweite ist somit ihrer Definition nach eine aus dem Extinktionskoeffizienten berechnete Größe. Das Trübungsmaß der Atmosphäre ist unabhängig von der Beleuchtungsstärke.

Im DWD wird die meteorologische Sichtweite (MOR) an Wetterstationen und Flugwetterwarten ermittelt. Alle Geräte dort sind auf den Kontrastwellenwert $\varepsilon = 0,05$ eingestellt.

Normsichtweite

Ein weiterer Sichtbegriff ist die Normsicht V_N . Sie ist definiert als die horizontale Entfernung über die die Transmission 5 % beträgt und ist damit eine objektive Sichtangabe, die ausschließlich von der Trübung der Atmosphäre (Transmission) abhängt.

Sie wird im GeoInfoDBw verwendet und entspricht der MOR. Bei Nacht entspricht sie ungefähr der Sicht, die ein Wetterbeobachter bei ausreichender Beleuchtung hätte. Deshalb wird sie als Sichtgröße im Beratungsverfahren für Hubschrauber-Nachtflüge mit Sehhilfen (BIV-Brillen) verwendet.

Feuersicht

Im Gegensatz zur meteorologischen Sichtweite und Normsichtweite ist die Feuersichtweite die größte horizontale Entfernung, in der ein Beobachter bei Nacht nach Anpassung der Augen an die Dunkelheit normale weiße, ungerichtete Lampen (Rundstrahler) gerade noch erkennen kann. Es ist zu beachten, dass die Zeit, die das menschliche Auge zur Dunkeladaptation benötigt, stark vom Alter und der Gesundheit des Beobachters abhängt. Eine optimale Anpassung wird erst nach etwa 30 min erreicht. In der Praxis sollte sich der Beobachter aber etwa 5 min bis 10 min in der Dunkelheit aufgehalten haben. Dies gilt eigentlich auch für alle anderen Augenbeobachtungen. Beim Fehlen sonstiger oder natürlicher Lichtquellen würde das vom Auge erfasste Luftvolumen nur von diesen Lichtquellen erhellt. Normalerweise ist der Leuchtdichtekontrast zwischen dem leuchtenden Sichtziel und dessen dunkler Umgebung im Allgemeinen erheblich größer als bei den am Tag herrschenden Verhältnissen. Die Feuersicht kann daher den mehrfachen Betrag der meteorologischen Sicht erreichen.

Für die Feuersicht bei Nacht oder in der Dämmerung ist das „geeignete“ Sichtziel eine punktförmige, rund strahlende weiße Lichtquelle. Bei Vorliegen dieser Voraussetzung gilt nach **ALLARD** folgender Zusammenhang mit dem Extinktionskoeffizienten:

$$2 \cdot \ln F - \sigma \cdot F = \ln I \cdot \ln \beta \quad (13.3)$$

mit F = Feuersicht
 I = Intensität der Lichtquelle
 β = Schwellenwert der Beleuchtungsstärke
 σ = Extinktionskoeffizient der Atmosphäre für sichtbare Strahlung (m^{-1})

Die Lichtstärke der weißen Glühlampen soll wie folgt in einer bestimmten Relation zu ihrem Abstand vom Beobachter stehen (Tab. 13.1):

Tab. 13.1 Glühlampenleistung und Abstand vom Beobachter

Glühlampenleistung (W)	Lichtstärke (candela, cd)	Abstand vom Beobachter (km)
25	ca. 15	ca. 0,7 bis 1,5
40	ca. 30	ca. 1,0 bis 2,0
60	ca. 50	ca. 1,5 bis 2,5
100	ca. 100	ca. 2,0 bis 3,0
200	ca. 240	ca. 3,0 bis 5,0
500	ca. 735	ca. 5,0 bis 7,0

Wenn an Flughäfen nicht genügend weiße Lampen zur Verfügung stehen, kann auch die rote Hindernisbefehung herangezogen werden, allerdings muss berücksichtigt werden, dass dieses Licht eine größere Durchdringtiefe besitzt als weißes Licht.

Landebahnsicht RVR

Die Landebahnsichtweite RVR (runway visual range) ist eine wichtige Größe auf Flugplätzen. Nach der Definition der ICAO ist die Landebahnsichtweite, gelegentlich auch als „Pisten-sichtweite“ bezeichnet, die berechnete größte horizontale Entfernung aus Messwerten der MOR, der Lichtstärke der Landebahnbeleuchtung und der Umfeldleuchtdichte, in der ein Pilot von der Mitte der Landebahn, aus einer mittleren Cockpithöhe von 5 m die Landebahnbeleuchtung erkennen kann.

Die Landebahnbeleuchtung kann im Allgemeinen in verschiedenen Intensitätsstufen geschaltet werden, wobei für die RVR-Berechnung grundsätzlich der Maximalwert (100 %) der Lichtstärke der Landebahnfeuer herangezogen wird, unabhängig von der jeweils aktuell geschalteten Intensitätsstufe. Die RVR entspricht demnach der Feuersichtweite, die unter den praktischen Bedingungen des Flugverkehrs bei schlechten Sichtverhältnissen fast immer die meteorologische Sichtweite übersteigt. Sie hängt außer von meteorologischen und anderen Einflussgrößen auch in sehr starkem Maße von den technischen Gegebenheiten der Landebahnbeleuchtung ab, u. a. von der maximalen Lichtstärke der installierten Feuer und der im Einzelfall eingeschalteten Befehungsstufe (Prozentsatz der maximalen Lichtstärke).

Die Randfeuer sind vertikal um etwa 3° gegen die Horizontale (Landebahn) nach oben geneigt und weisen um etwa denselben Betrag nach innen. Die Mittellinienbeleuchtung ist dagegen nur in der Vertikalen geneigt. Eine Vorschrift der ICAO besagt, dass die Mittellinienbeleuchtung bis etwa 350 m, die Randfeuer bei RVR-Werten oberhalb 600 m zu verwenden sind. In der Übergangzone wird die RVR linear interpoliert. Bei der Bestimmung der RVR wird von der ICAO der Normwert der Kontrastschwelle $\epsilon = 0,05$ zugrunde gelegt, um die vergleichsweise ungünstigen Sehbedingungen des Piloten (z. B. verschmutzte Scheiben der Kanzel, Blendung) zu berücksichtigen.

Flugsicht

Die Flugsicht ist die größte Entfernung in Flugrichtung, in der aus dem Cockpit während des Fluges ein Sichtziel gerade noch erkannt werden kann. Es ist praktisch eine Schätzung der meteorologischen Sicht während des Fluges.

Schrägsicht

Die Schrägsichtweite ist die größte horizontale Entfernung vom Fußpunkt eines höher gelegenen Standortes (Lot vom Beobachter auf die Ebene) oder eines Luftfahrzeuges, in der ein Sichtziel von diesem gerade noch in Umrissen erkannt werden kann. Die Schrägsichtweite wird gelegentlich schon aus Messwerten berechnet. Sie beschreibt dann die berechnete horizontale Entfernung zwischen dem am weitesten entfernten noch sichtbaren Objekt am Boden und dem senkrecht unter einem Luftfahrzeug befindlichen Punkt.

Vertikalsicht

Die Vertikalsichtweite ist die größte Entfernung, in der vom Boden aus in vertikaler Richtung dunkle Objekte von ausreichender Größe vor dem hellen Himmel als Hintergrund gerade noch erkannt werden können. Sie wird ermittelt, wenn eine Wolkenuntergrenze wegen Nebels oder starken Niederschlags nicht bestimmt werden kann. Als Schätz-hilfen können höhere Bauwerke, Berge oder auf Flughäfen

nahe gelegene höhere Sendemasten, Türme sowie landende oder startende Flugzeuge dienen.

Für die Vertikalsicht wird kein Sichtmessgerät im eigentlichen Sinne verwendet, sondern ein Laser-Wolkenhöhenmesser (siehe 10.3.1), mit dem diese Sichtangabe aber nur sehr ungenau bestimmt werden kann. Daher ist sie im DWD z. Zt. nicht zugelassen.

BIV-Sicht

Die sog. **BIV-Sicht** (BIV – Bildverstärker Sicht) ist eine weitere Sichtgröße. Sie setzt die Normsicht V_N voraus und unterstützt insbesondere die Fliegerei bei Nachtflügen bei nicht ausreichender Helligkeit.

Die BIV-Flugsicht ist nicht messbar, sondern wird von folgenden Faktoren bestimmt:

- Lichtverhältnissen (Szenenbeleuchtung),
- Reflektionsverhältnissen des Geländes,
- Transparenz der Atmosphäre/Wetter,
- Streuung, Absorption, Reflexion,
- technische Auslegung der BIV-Brille,
- persönliche Augenleistung,
- persönliche Erfahrung (BIV-Flugstunden, Lerneffekt)

13.1.2 Maßeinheiten der Sichtweite

Alle Sichtweiten werden in Meter (m) bestimmt. In der Fliegerei werden in einigen Ländern noch Sichtweiten in nautische Meilen (NM) angegeben. Die Umrechnung kann gem. Tabelle 13.2 erfolgen. Einzige Ausnahme bildet die Vertikalsicht. Da sie anstelle der Wolkenuntergrenze (wenn diese nicht erkennbar ist) gemeldet wird, ist sie in der gleichen Maßeinheit wie die Wolkenuntergrenze angegeben, d. h. in Meter oder Fuß (Umrechnung siehe Tab. 10.1).

Tab. 13.2 Umrechnung Kilometer – Nautische Meilen

	NM	km
1 NM	–	1,852
1 km	0,5399	–

13.2 Allgemeine Messprinzipien

Die Bestimmung der Sichtweite kann visuell (Schätzung) oder instrumentell (Messung) erfolgen. Sie ist objektiv hauptsächlich von folgenden Faktoren abhängig:

- Anzahl, Größe und Verteilung der Lufttrübungspartikel, die aus Wasser (Feuchteanteil), Eiskristallen, Staub, Ruß oder chemischen Schwebstoffen (Aerosolanteil) bestehen können,
- Atmosphärische Bedingungen wie
 - Bewölkungsverhältnisse
 - Wettererscheinungen (Dunst, Nebel, Schneefall u. a.)
 - Sprunghafte Dichteänderungen in der Atmosphäre als Folge von Mischungsvorgängen oder an Temperaturinversionen
- Beleuchtungsverhältnisse
- Art des Sichtzieles und seines Hintergrundes

Bei der visuellen Erfassung der Sichtweite spielen Lichtver-

hältnisse, optischen Eigenschaften des Objektes und sein Hintergrund, aber auch subjektive Faktoren und physiologische Eigenschaften des Beobachterauges, wie Farbempfindlichkeit (Zäpfchensehen, Schwarz-Weiß-Empfindlichkeit, Stäbchen-Sehen), Reizschwelle, Auflösungsvermögen und Adaptionszustand eine nicht zu unterschätzende Rolle.

Ein Effekt schränkt die Sichtweite auf der Erde in jedem Fall ein: die Krümmung der Erde, wodurch die maximale geometrische Sichtweite begrenzt wird (Tab.13.3).

Tab. 13.3 Maximale geometrische Sichtweiten

Augenhöhe (m)	Sichtweite (km)
2	5
5	8
10	11
15	14
20	16
50	25
100	36
200	50
400	71

Seit vielen Jahren wird versucht, die Sichtbestimmung auf eine sichere physikalische Grundlage zu stellen und frei von der Subjektivität durch den Beobachter zu machen, d. h. dass praktisch nach einem Ersatz für das menschliche Auge gesucht wird. Die heutigen Messgeräte sind zwar kein Ersatz dafür, da sie von den beteiligten Parametern, welche die Sicht beeinflussen nur eine beschränkte Auswahl erfassen. Hinzu kommt, dass das menschliche Auge auf weit mehr Komponenten anspricht, die für die Messgeräte gar nicht erfassbar sind. Dennoch haben sich Sichtmessgeräte seit mehr als 30 Jahren im Einsatz bewährt und stellen eine wertvolle Unterstützung in vielen Bereichen dar. Der entscheidende Vorteil einer Messung gegenüber einer Augenbeobachtung ist die Unabhängigkeit physiologischen Unterschiede einzelner Beobachter. Die Messung objektiviert den Vorgang und subjektive Einflüsse können weitgehend eliminiert werden.

Die direkte Messung der Sichtweite ist bis heute nicht möglich. Vielmehr müssen bei der instrumentellen Erfassung Ersatzgrößen gemessen werden, mit deren Hilfe dann die Sichtweite berechnet werden kann. Die dabei möglichen Messprinzipien basieren auf den physikalischen Effekten von

- Transmission bzw. Extinktion, der Lichtverlust an Trübungsteilchen der Luft und
- Streuung, die Vorwärts- bzw. die Rückwärtsstreuung an Trübungsteilchen der Luft

Bei der Bestimmung der Sichtweite nach den o. a. Messprinzipien ist die Rayleigh-Streuung an Molekülen der Luft der meteorologische Hauptfaktor. Auf das Problem der nicht erfassten „Partikel-/Aerosolverteilung“ ist bereits unter 10.2 hingewiesen worden. Daher gelten hier die Überlegungen hinsichtlich der Nutzung geeigneter Lichtquellen für Sichtmessgeräte ebenfalls.

Mit diesen Messprinzipien lassen sich von den unter 13.1.1 genannten Sichtbegriffen nur drei konkret bestimmen, und zwar

- die meteorologische Sicht V_M (MOR),
- die Normsichtweite V_N und
- die Landbahnsichtweite, eingeschränkt als RVR

Während in den Anfangsjahren Haupteinsatzort von Transmissometer Flugplätze waren, kommen Sichtmessgeräte heute auch an automatischen Stationen und mit Personal besetzten Wetterwarten, auf besonderen Schiffen und auf Messfahrzeugen zum Einsatz.

13.2.1 Messung der Transmission bzw. Extinktion

Hierbei wird der Teil des Lichtes einer Lichtquelle gemessen, der weder absorbiert noch aus dem Lichtstrahl heraus gestreut wurde, nachdem er eine bestimmte Distanz durch die Atmosphäre zurückgelegt hat. Es wird also die Extinktion, der Lichtverlust durch Reflexion, Diffusion und Absorption an Luftmolekülen, Wassertröpfchen und Trübungsteilchen auf einer Strecke, d. h. die Durchlässigkeit der Luft bzw. deren Transmissionsgrad ermittelt.

Dabei wird eine Messstrecke von einem Lichtstrahl mit geeigneter Wellenlänge durchleuchtet. Die Dämpfung des Lichtes auf dieser Messstrecke ist ein Maß für die Konzentration der die Sicht trübenden Teilchen

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (13.4)$$

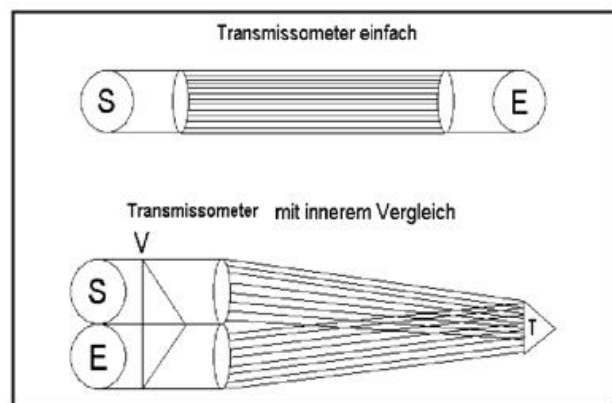
mit T = Transmission
 I_0 = ausgesendetes Licht
 I = empfangenes Licht

Die Transmission kann also nur eine Zahl zwischen 0 und 1 annehmen. Ist $T = 1$, dann ist keine Dämpfung vorhanden. In der Praxis wird die Transmission meist in Prozent angegeben:

$$T = 100 \frac{I}{I_0} (\%) \quad (13.5)$$

Eine geeignete Wellenlänge besitzt weißes Licht. Die WMO empfiehlt für Transmissometer den Einsatz einer (weißen) Lichtquelle mit weitem Spektrum, da Lichtquellen mit schmalen Spektrum (z. B. Laser oder farbige LEDs) bei einigen Wetterverhältnissen Messfehler verursachen. Lichtsender und Lichtempfänger sind entweder an je einem Ende der Messstrecke aufgestellt oder aber an einem Ende zu einem Gerät vereint, während am anderen Ende der Messstrecke ein Umlenkmittel (Tripelspiegel) den Lichtstrahl zum Empfänger zurückwirft. Im ersten Fall durchläuft der Lichtstrahl die Strecke einmal, im zweiten Fall zweimal.

Abb. 13.2 Messprinzipien von Transmissometern



Um das Messlicht vom Tageslicht unterscheiden zu können, wird mit moduliertem oder Impulslicht gearbeitet. Geräte mit Sender und Empfänger an den beiden Enden der Messstrecke sind über einen längeren Zeitraum nicht konstant und erfordern Überwachung und eventuelle Nachkalibrierung. Bei den Geräten mit Sender und Empfänger im gleichen Gehäuse und Umlenkung der Lichtstrahlen durch einen Tripelspiegel ist durch einen inneren Vergleichsweg die elektronische Stabilität der Messanlage gewährleistet. Da die Sichtweite in Abhängigkeit von der Trübung einer Exponentialfunktion folgt, hängt der mit einer gewünschten Messgenauigkeit erfassbare Messbereich von der Länge der Messstrecke ab. Er beträgt etwa das 0,5 bis 40-fache der Messstrecke und ist zu einem gewissen Grad auch vom Gerätetyp und der akzeptierten Messunsicherheit abhängig.

Transmissometer eignen sich auf Grund ihres Messprinzips zur Messung einer Komponente (Transmission) der Sichtweite an Start- und Landebahnen (RVR), aus der sich auch die Normsichtweite ableiten lässt. Zur Berechnung der RVR ist allerdings noch die Umfeldleuchtdichte (Hintergrundhelligkeit), gemessen mit Umfeldhelligkeits-Sensoren (Stilben) und die maximale Intensität der Landebahnbeleuchtung notwendig. Da die moderne Luftfahrt zu immer geringeren Sichtweiten noch Landungen durchführt und die RVR bis zum 4-fachen der meteorologischen Sicht betragen kann, ist es erforderlich, die Messstrecken diesen Anforderungen anzupassen. Dies führt zu Messstrecken von 15 m bis 75 m.

Transmissometer sind optische Messgeräte und eignen sich auch zur Bestimmung einer Staub- oder Gaskonzentration.

13.2.2 Messung des Streulichtes

Im Gegensatz zu Transmissometern wird mit Streulichtsensoren die Normsichtweite zwischen 100 m bis 10 km durch Bestimmung der Lichtstreuung aus einem Luftvolumen ermittelt. Auch bei Streulichtmessern wird wie bei Transmissometern moduliertes oder Impulslicht verwendet.

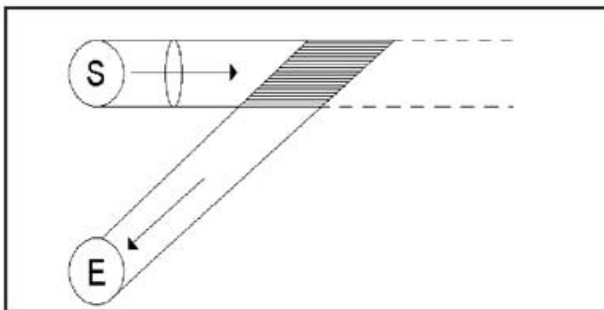
Bei diesem Messverfahren wird der Teil eines ausgesandten Lichtstrahls gemessen, der durch in der Luft befindliche Partikel aus einem definierten Messvolumen heraus in einen bestimmten Raumwinkel gestreut wird. Die Größenordnung der streuenden Partikel liegt im Wellenlängenbereich des sichtba-

ren Lichts. So wie ein Strahlenbündel von einem Scheinwerfer von der Seite her umso besser zu sehen ist, je mehr Licht durch Trübungspartikel gestreut wird, so ist auch hier die Helligkeitszunahme gleichbedeutend mit Sichtabnahme. Die Streuung ist proportional zur Dämpfung des Lichtstrahls und somit ein Maß für die Sicht: je mehr Partikel sich in der Luft befinden, umso größer ist die Streuung. Aus dem gemessenen Wert wird die MOR berechnet. Größere Partikel verhalten sich wie Reflektoren und Refraktoren. Bei diesen Partikeln handelt es sich meist um Niederschlagstropfen.

Man unterscheidet 3 Typen von Streulichtmessern:

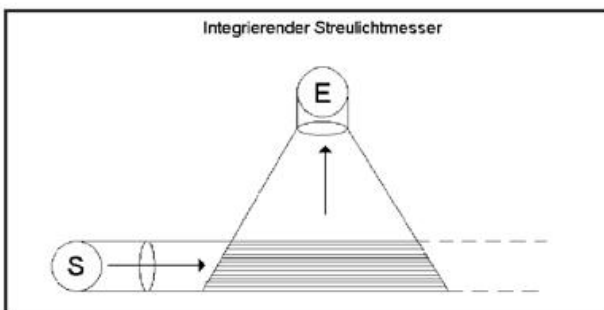
- Backscatter / (Rückwärts-)Streulichtmesser
- Integrierende Streulichtmesser (großer Streuwinkelbereich)
- Foreward Scatter / (Vorwärts-)Streulichtmessgerät

Abb. 13.3 Messprinzip von Backscatter-Streulichtmessern (S = Sender, E = Empfänger)



Ein Vorteil dieses Messprinzips ist, dass durch die fehlende Messbasis ein nur geringer Platzbedarf besteht. Nachteilig wirkt sich der kleinere Abtastraum aus, der nicht repräsentativ für eine größere Umgebung sein muss. Starke kleinräumige Schwankungen der Trübung können so die Messergebnisse verfälschen. Dennoch werden Transmissometer zukünftig auch auf Flugplätzen von (Vorwärts-)Streulichtmessern ersetzt. Vergleichstests an mehreren deutschen Flughäfen ergaben gute Übereinstimmungen zwischen Transmissometer und Vorwärtstreusensoren, insbesondere bei geringen Sichtweiten. Vorwärtstreusensoren sind messtechnisch ebenfalls in der Lage, MOR- bzw. RVR-Werte zu ermitteln.

Abb.13.4 Messprinzip von integrierenden Streulichtmessern



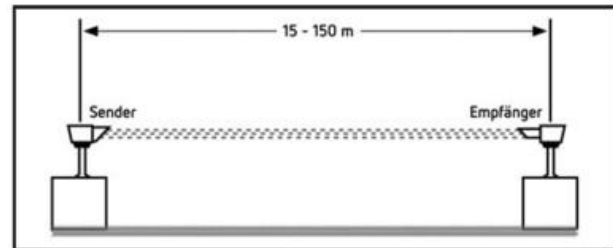
In diesem Zusammenhang sind integrierende Streulichtmesser günstiger, da sie über einen möglichst großen, technisch realisierbaren Winkelbereich messen.

13.3 Sensoren/Messgeräte

13.3.1 Transmissometer

Abbildung 13.3 zeigt den Prinzipaufbau von Transmissometern.

Abb. 13.5 Prinzipaufbau von Transmissometern



Skopograph II (Flamingo)

Der Skopograph II der Fa. Vaisala dient zur Messung der Transmission und dem Lichtverlust durch Trübungspartikel auf einer Messstrecke. Lichtsender und Empfänger sind an je einem Ende der Messstrecke aufgebaut.

Die Sensoren arbeiten mit moduliertem oder Impulslicht. Bei einer Messbasis von 50 m liegt der gültige Messbereich für die MOR zwischen 35 m bis 2000 m. Daraus resultiert ein Messbereich für die RVR von 125 m bis 2000 m. Bei einer Messbasis von 75 m können Sichtweiten von 50 m bis 3000 m gemessen werden, was die Verfolgung der Sichtentwicklung im Nebel ermöglicht. Bei einer längeren Messbasis von 150 m lassen sich Sichtweiten zwischen 100 m bis 50 km relativ exakt bestimmen.

Im **Sender** ist eine Xenon-Gasblitzlampe mit 600 V, die ca. 1 bis 1.2 Funkenentladungen pro Sekunde erzeugt, wobei die Energie so bemessen ist, dass eine Schwärzung der Lampe nicht stattfindet. Es wird ein Strahlungsmaximum im Bereich des blau-weißen Lichtes erreicht, das dem Himmelsblau sehr nahe kommt. Zum Sender gehören darüber hinaus ein optisches System, Wetterschutz und Heizung.

Im **Empfänger** befinden sich eine Photozelle und ein Verstärker, der sich selbst auf die ankommende Impulsspitze einregelt. Im Verstärker werden die elektrischen Signale der Photodiode verstärkt und in einem Komparator ihre Amplitude gemessen. Sie wird mit einem Integrator und einem Gleichspannungsverstärker in einen Messstrom von 0 bis 1 mA umgesetzt. Die Regelspannung, die über 30 Impulse gemittelt wird, wird zur Anzeige oder zum RVR-Rechner gegeben.

Ein **Komparator** bezeichnet im Allgemeinen eine technische Funktionseinheit, welche zwei oder mehr Größen vergleicht und ein daraus gebildetes Ergebnis liefert. Der Begriff wird in verschiedenen Bereichen verwendet. In der Digitaltechnik wird er zum Vergleichen von digitalen Signalen eingesetzt, in der analogen Schaltungstechnik dient ein Komparator (Analogtechnik) zum Vergleichen von elektrischen Spannungen [43].

Der Empfänger ist exakt auf die optische Achse des Senders ausgerichtet. Das Licht des Sendeimpulses gelangt durch ein Wetterschutzrohr und ein Wabensystem aus 160 Röhren zur Photozelle, um so die Aufnahme von Streulicht zu vermeiden.

Zur Vermeidung von Tau, Reif und Beschlagen der optischen Systeme von innen sind beide Geräte mit einer entsprechenden Heizung und Ventilation ausgerüstet. Die schräg gestellten Gerätefenster werden zur Reduzierung von Verschmutzung mit einem Luftstrom angeblasen. Gleichzeitig gelangt dadurch kein Niederschlag auf die Scheiben.

Abb. 13.6 Skopograph II „Flamingo“ (Vaisala)



Doppelbasis-Transmissometer bestehen aus einem Sender und zwei Empfängern, die im DWD mit einer Messbasislänge von 15 m und 75 m aufgestellt sind, was die Bestimmung von RVR-Werten von 10 m bis 3000 m ermöglicht. Die optische Achse des Senders liegt zwischen den optischen Achsen der beiden Empfänger, die so möglichst dicht auf den Sender ausgerichtet sind. Damit und mit dem konstant homogenen Lichtkegel des Senders werden exakte Messungen gewährleistet.

Abb. 13.7 Transmissometer mit Doppelbasis



Je nach Sichtverhältnissen kann durch Umschaltung die jeweils günstigere Messbasis gewählt werden. Die Steuereinheit enthält einen Mikroprozessor, der automatisch die

Messbasis mit den günstigsten Werten für das Registriergerät zuschaltet. Ebenso werden Testfilter von der Steuereinheit zur Prüfung der Anlage automatisch geschaltet.

Transmissometer werden hauptsächlich an Start-/Landebahnen auf Flugplätzen aufgestellt und sind besonders als Doppelbasisgeräte geeignet. Anzahl und Standorte der Transmissometer richten sich nach der Länge der Piste und den Hindernisbegrenzungsflächen. Die Standorte (Abb. 19.21/19.22) sind in den „Richtlinien für den Allwetterflugbetrieb“ (Anhang Literatur- und Quellenverzeichnis) festgelegt. Für jede Landebahnrichtung wird je ein Hintergrundleuchtdichtesensor (LM21) auf oder neben einem Transmissometer montiert.

Die noch vorhandenen Skopographen II werden durch Geräte der neuen Generation der Fa. Vaisala FS 11 (siehe 13.3.2) ersetzt.

Pflege und Kontrolle der Funktionstüchtigkeit

Der Beobachter an der Flugwetterwarte stellt mit Hilfe von Augenbeobachtungen und weiterer Sensorik zur Sichtmessung durch Vergleich fest, ob die Datenqualität noch den Anforderungen entspricht. Die Optik der Transmissometer muss regelmäßig wöchentlich gereinigt werden. Wartungsarbeiten werden von den SL-Einheiten des DWD in regelmäßigen Abständen entsprechend dem festgelegten Wartungsplan (etwa alle 5 Wochen) durchgeführt.

Hintergrundleuchtdichtesensor LM21

Der Hintergrundleuchtdichtesensor LM21 der Fa. Vaisala ist ein Bestandteil zur Bestimmung der RVR an Flughäfen. Der Sensor LM21 ist nur bedingt als eigenständiges Gerät zu betrachten. Er ist ein Präzisionsphotometer mit einer dem menschlichen Auge angepassten spektralen Empfindlichkeit. Der Sensor kann an die Systeme Vaisala LT31 und FS11 angeschlossen werden, die dazu interne Schnittstellen haben.

Abb. 13.8 Hintergrundleuchtdichtesensor LM21 (Foto: Vaisala)



Der Sensor ermittelt die in die Geräteoptik einfallende Lichtmenge. Hierbei wird das unter einem Öffnungswinkel von 6° einfallende Licht mittels einer Linse auf eine Photodiode fokussiert, welche zur Anpassung der spektralen Empfindlichkeit mit einem entsprechenden Farbglasfilter versehen ist.

Der durch die Photodiode erzeugte fotoelektrische Strom wird ermittelt, die gemessenen Werte in die Maßeinheit $cd\ m^{-2}$ umgewandelt und dem integrierten Mikrocontroller, einem Transmissometer oder Vorwärtsstreulichtsensor zugeführt. Das Interface stellt Sichtweite und Hintergrundleuchtdichte zu einer Messung zusammen und sendet diese an den RVR-Rechner.

Tab. 13.4 Spezifikationen Hintergrundleuchtdichtesensor LM21 (Vaisala)

Messbereich	2 bis 40.000 cd m ⁻²
Messgenauigkeit	10 %
Spektrale Empfindlichkeit	0,4 bis 0,7 µm
Gesichtsfeld	6°
Einsatzbereich	-40 bis +65 °C, 0 bis 100 %
Versorgung	10 bis 38 V DC oder 8 bis 28 V AC
Leistungsaufnahme	6 W, 50 W mit Heizung

Der LM21 soll in horizontaler Ebene mit der Messrichtung 45° zur Start-/Landebahn in der Richtung, in der auch der Luftfahrzeugführer bei Benutzung der entsprechenden Landebahnrichtung blickt, ausgerichtet werden. In vertikaler Ebene soll die Messrichtung auf den Horizont ausgerichtet werden. Der LM21 ermittelt und kompensiert den Dämpfungseinfluss durch die Verunreinigung des Gerätefensters. Hierdurch wird die Messgenauigkeit zwischen zwei Reinigungsvorgängen sichergestellt und darüber hinaus das Zeitintervall zwischen den Reinigungsvorgängen verlängert.

Heizelemente befinden sich an der Geräteoptik und Gerätefront. Die Wetterschutzhaube ist mit einer leistungsfähigen Heizfolie nebst Temperatursensor ausgestattet, um Schnee- und Eisansammlungen zu verhindern.

Pflege und Kontrolle der Funktionstüchtigkeit

Wurde im Gerätestatus des LM21 eine Scheibenverschmutzungswarnung angezeigt, ist die Gerätescheibe sorgfältig mit einem weichen, fusselfreien Tuch und Isopropanol-Alkohol zu reinigen. Anschließend abwarten bis die Gerätescheibe vollständig abgetrocknet ist. Die entsprechenden Referenzwerte für eine saubere Scheibe müssen anschließend neu zugewiesen werden. Die Heizfolien sind sehr empfindlich gegen mechanische Beschädigung. Auf keinen Fall sollte Eisansatz oder starker Schmutz entfernt werden, um die Folien nicht zu beschädigen.

Transmissometer LT31

Das Transmissometer LT31 der Fa. Vaisala ist ein Messgerät für die meteorologische Sichtweite (MOR) mit einem optimalen Sichtweitenmessbereich von 10 m bis 10000 m in einer Messhöhe von 2,5 m. Somit ist der geforderte Sichtweitenbereich für RVR (CATI bis CATIIb) sowie für die aeronautische Sichtweite gemäß ICAO vollständig abdeckt. Der gesamte Messbereich kann mit einem System mit nur einer Messbasis realisiert werden.

Im LT31 ist eine weiße Leuchtdiode als Lichtquelle integriert. Das Besondere an diesem Transmissometer ist, dass es über eine automatische Kalibriereinrichtung verfügt, die sowohl die optischen als auch die elektronischen Komponenten optimal nachregelt. Auch die Ausrichtung des LT31 wird fortlaufend automatisch optimiert.

Abb. 13.9 Transmissometer LT31 (Foto: Vaisala)



Zum Schutz gegen windgetriebene Niederschlags- und Staubpartikel verfügt das Gerät über ein leistungsfähiges Gebläse. Es erzeugt einen zum Boden gerichteten Luftvorhang vor den Gerätescheiben. Messfehler durch Einflüsse auf die Messstrecke, wie sie bei traditionellen Gebläsekonstruktionen auftreten können, sind durch diese spezielle Ausführungsform ausgeschlossen. Die Verschmutzung der Gerätescheiben wird durch eine direkte Messung der Scheibentransparenz festgestellt und automatisch kompensiert.

Abb. 13.10 LT31 mit V-förmig angeordneten Scheiben (Foto: Vaisala)



Wenn das LT31 mit einem integriertem Vorwärtsstreu-lichtsensor PWD22 (siehe 13.3.2) gekoppelt ist, können zusätzlich 7 Niederschlagsarten (Regen, gefrierender Regen, Sprühregen, gefrierender Niesel, Schneeregen, Schnee, Hagel) unterschieden werden und 49 verschiedene Wettercodes gemäß WMO-Tabelle 4680 (SYNOP) und 4678 (METAR) gemeldet werden.

Abb.13.11 LT31 mit integriertem Vorwärtsstreusensor PWD22 (Foto: Vaisala)



Tab. 13.5 Spezifikationen LT 31 (Vaisala)

Lichtquelle	Leuchtdiode (LED), weiß
Messbereich	30 m Basislänge (optimal) 10 bis 10.000 m (MOR) 50 m Basislänge 25 bis 10.000 m (MOR) 75 m Basislänge 37,5 bis 10.000 m (MOR)
Genauigkeit	gemäß ICAO- und WMO Anforderungen für RVR und Sichtweite
Einsatzbereich	-40 bis +60 °C, 0 bis 100 %, Wind max. 60 m s ⁻¹
Kalibrierung	automatisch, dank integriertem optischem Vorwärtsstreusensor

Das Gerät ist zusätzlich Bestandteil der automatischen Station MIDAS IV AWOS (siehe 18.4) auf Regionalflughäfen. Es soll künftig als Referenzgerät für die Rückführung der Kalibriermittel (Filterscheiben etc.) anderer Sichtweitenmesser dienen.

13.3.2 Streulichtmesser

Vorwärtsstreulichtmesser DF20+

Der DF20+ ist ein Vorwärtsstreulichtmesser der Fa. Degreane Horizon, Frankreich. Er benutzt das mit 20 Hz amplitudenmodulierte Licht einer weißen Halogenlampe. Das Spektrum der verwendeten Lichtquelle (symmetrisches Weißlicht, polychromatisch) vermindert Fehler aufgrund von selektiver Absorption und garantiert die Leistungsfähigkeit des Gerätes insbesondere bei flüssigen oder festen Niederschlägen. Das Licht wird moduliert und phasenverändert, um den DF20+ gegen Störstrahlungen (50 Hz, 60 Hz, 100 Hz und industrielle Stableuchten) zu schützen und die Messgenauigkeit unter sämtlichen Bedingungen kontinuierlicher Strahlung (Sonnenlicht, Tageslicht) zu garantieren. Er misst den Lichtanteil, der aus dem Streuvolumen von etwa 10 l Größe unter einem Winkel von 20° bis 50° in den Empfänger gestreut wird. Je größer der in den Empfänger gestreute Anteil ist, desto geringer ist die Sichtweite (bei unbegrenzter Sicht würde kein Licht aus dem Messvolumen gestreut, also kein Licht auf den Empfänger fällt).

Abb. 13.12 Funktionsprinzip DF20+ (Degreane Horizon)



Der DF20+ besteht aus einem Lichtsender und einem Empfänger, die unterschiedlich ausgerichtet sind. Das Schnittvolumen der optischen Felder des Senders und des Empfängers entspricht dem zu untersuchenden Luftvolumen. Eine geringe Empfindlichkeit gegenüber der Art der Sichtbeein-

trächtigung (Nebel, Regen, Schnee, Hagel) wird erreicht durch NF-Modulation des Breitspektrumlichtes innerhalb eines großen Analysevolumens. Auf diese Weise werden die Szintillationswirkungen hochfrequenter monochromatischer bzw. impulsmodulierter Lichtquellen (mit dominierender IR- oder UV-Komponente) vermieden.

Der scatter coefficient σ wird, ausgehend von der Messung der Lichtströme (Verhältnis zwischen ausgesendetem und empfangenem Lichtstrom) ermittelt; anschließend wird die Sichtweite (MOR) als Wert der Kontrastsicht errechnet. Die Oberflächen der DF20+-Sensorköpfe werden temperaturabhängig beheizt, um den Ansatz von Schnee und Eis zu verhindern. Die optischen Elemente (z. B. Linsen) von Sender und Empfänger sind ebenfalls beheizt, um Kondensationen zu verhindern. Die schräg nach unten gerichteten Sendee- und Empfängerköpfe vermindern die Schmutzanlagerung auf der Optik. Der Verschmutzungsgrad wird vom Sensor selbst ermittelt und – in gewissen Grenzen – bei der Messung automatisch korrigiert. Kann die Verschmutzung nicht mehr korrigiert werden, wird im Telegramm ein Alarmstatus erzeugt und die Sichtmessung als ungültig gekennzeichnet.

Abb. 13.13 Vorwärtsstreulichtmessgerät DF20+ (Degreane Horizon)



Tab. 13.6 Spezifikationen DF20+ (Degreane Horizon)

Messprinzip	Vorwärtsstreuung, Breitspektrum-Lichtquelle, Modulation 20 Hz mit Phasenänderung
Art der Lichtquelle	weißes Halogenlampe 50-W-Niederspannungshalogenlampe (12 V)
Wellenlängen der Lichtquelle	0,350 bis 0,900 μm
Untersuchtes Luftvolumen	~ 10 l
Höhe des Luftvolumens über dem Boden	~ 2100 mm bzw. 2500 mm
Streuwinkel	20 bis 50°
Erfassungszeit	500 ms
Integrations- und Übertragungszeit scatter coefficient σ	30 s bis 10 min einstellbar
Normsichtweite	5 m bis 70 km, Auflösung 1m

Genauigkeit der Normsichtweite bis 5 km 5 bis 20 km über 20 km	$\pm 10\%$ bei 90 % der Messungen $\pm 15\%$ bei 90 % der Messungen $\pm 25\%$ bei 90 % der Messungen
Einsatzbedingungen	-20 bis +55 °C, 0 bis 100 % -30 bis +55 °C mit optionalem Hochleistungsheizsystem bis 60 m s ⁻¹
Stromversorgung	230 V $\pm 10\%$ 50 Hz 120 VA (280 VA optional mit Hochleistungsheizsystem)

Der DWD erfasst die Sichtweite mit Hilfe von Streulichtmessgeräten DF20+ an Wetterbeobachtungsstellen, an denen keine Pistensichtmessanlage vorhanden und nicht vorgesehen ist. Weiterhin kommt er als Ersatz für die Transmissometer an internationalen Flughäfen in Deutschland in Frage. Es soll dann zusätzlich mit einem Hintergrundleuchtdichtesensor (Abb. 13.8) zur externen Berechnung der Pistensichtweite (RVR) ausgestattet werden.

Pflege und Kontrolle der Funktionstüchtigkeit

Der DF20+ reagiert empfindlich auf Verschmutzung der Optik. Es ist daher eine visuelle Kontrolle der Sensorik auf Schaden, Verschmutzung oder Vereisung durchzuführen, insbesondere nach Sturm, Eisregen etc.

Bei einer anstehenden Reinigung darf keine Leiter bzw. Klaptritt an den Sensor angelegt werden und das Aufsteigen auf Anschalt- und Verteilerkasten ist zu unterlassen, da sonst ein Totalausfall des Gerätes auftreten kann und eine Neukalibrierung erforderlich ist.

Die optischen Elemente (Linsen und Filtergläser) von Sender und Empfänger dürfen nur durch Mitarbeiter der SL-Einheiten gereinigt werden. Wichtig ist, Spinnen bzw. Spinnennetze von den Kapfen zu entfernen und sie gelegentlich mit einem Schwamm mit verdünnter Seifenlauge abzuwischen. Um Spinnen vorzubeugen, sollten – insbesondere bei erhöhtem Aufkommen z. B. im Herbst – die Köpfe mit Insektenspray eingesprüht werden. Dabei unbedingt den Sprühstrahl so ausrichten, dass nicht die optischen Teile (Linsen, Filter etc.) besprüht werden! Windrichtung beachten und keine Personen dem Sprühnebel aussetzen! Der vorgesehene Bereich im Umfeld des Sensors ist von Lichtquellen und Gegenständen (insbesondere solche mit reflektierenden Oberflächen) frei zu halten; das Gras sollte nicht zu hoch wachsen (< ca. 20 cm).

Die Überprüfung der angezeigten Sichtweite kann das Personal an den Wetterwarten durch Vergleiche mit Augenbeobachtungen bei stabilen und homogenen Sichtverhältnissen vornehmen. Dabei sollten nur grobe und länger anhaltende Abweichungen gemeldet werden. Da der DF20+ eine Punktmessung vornimmt, sollten – soweit möglich – zusätzlich Augenbeobachtungen am Standort des DF20+ vorgenommen werden.

Sensoren für Sichtweite und aktuelles Wetter PWD20/22

Die Sichtweitensensoren PWD20/22 der Fa. Vaisala sind optische Sensoren zur Messung der meteorologischen Sicht-

weite (MOR). Sie nutzen dazu das bewährte Messprinzip der Vorwärtsstreuung. Entsprechend der unterschiedlichen Anforderungen bietet die PWD-Serie eine praxisgerechte Kombination aus:

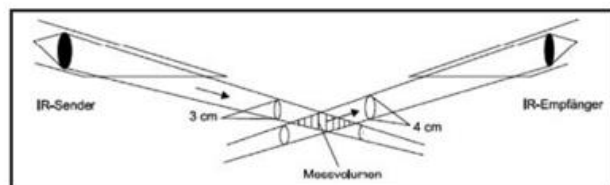
- meteorologischer Sichtweitemessung,
- Charakterisierung reduzierter Sichtweite,
- Bestimmung von 7 Niederschlagsarten, (Regen, Sprühregen, Schnee, Schneeregen, Graupel, gefrierender Regen/Sprühregen),
- Bestimmung von Niederschlagsmenge und -intensität,
- Ausgabedatenformaten nach WMO 4680 (SYNOP) und 4678 (METAR).

Abb. 13.14 Sichtweitensensor PWD20 (Foto: Vaisala)



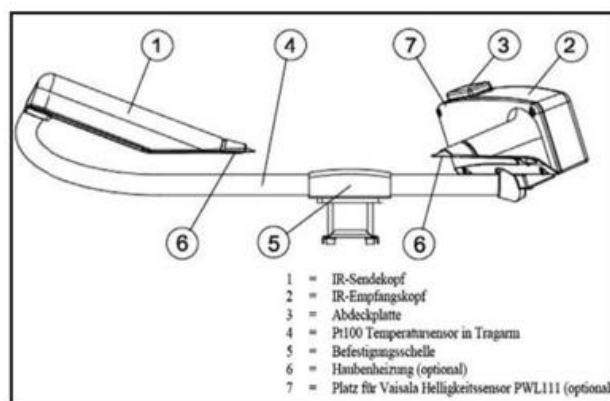
Der PWD20 misst gestreutes Licht im Winkel von 45°. Bei diesem Winkel ist das Ansprechverhalten bei verschiedenen Arten von natürlichem Nebel stabil. Niederschlagstropfen streuen das Licht anders als Nebel, so dass ihre Auswirkung auf die Sichtweite separat analysiert werden muss. Der PWD20 kann Niederschlagstropfen anhand des optischen Signals erkennen, messen und diese Information beim Verarbeiten der Streuergebnisse verwenden. Die Signale selbst kleinster Niederschlagstropfen können ebenfalls erfasst werden.

Abb. 13.15 Sichtweitensensor PWD20, Messprinzip



Dank der optischen Anordnung des PWD20 lassen sich einzelne Tropfen von schnellen Signaländerungen unterscheiden. Das Messvolumen beträgt nur 0,1 l, dadurch können auch bei relativ starken Niederschlägen einzelne Partikel gemessen werden.

Abb. 13.16 Sichtweitensensor PWD20/22, schematisch (Vaisala)



Tab. 13.7 Spezifikationen Sichtweitensensor PWD20/22 (Vaisala)

Funktionsprinzip	optische Vorwärtsstreuung
Größen	Niederschlagsintensität und -menge, Neuschneemenge
Empfindlichkeit der Niederschlags-erkennung	0,05 mm h ⁻¹ oder weniger innerhalb von 10 min
Messbereich (MOR)	10 bis 20.000 m
Genauigkeit	±10 % 10 m bis 10 km ±15 % 10 bis 20 km
Versorgungsspannung	Elektronik 12 bis 50 V DC
Einsatzbedingungen	-40 bis +60 °C, 0 bis 100 %
Leistungsaufnahme	3 W / 6 W (PWD22) bei 12 V DC

Beide Optikeinheiten sind abwärts gerichtet und mit Schutzhauben für die Linsen versehen. Verunreinigungen durch Niederschlag, Spritzwasser und Staub werden so verhindert.

Der Sensor PWD20 wird auf der Bordwetterwarte der FS ME-TEOR (siehe 19.5.6.2) betrieben. Der Sensor PWD22 vereint die Ermittlung der Sichtweite mittels optischer Vorwärtsstreuung und die Bestimmung des aktuellen Wetters. Er wird in Verbindung mit dem Transmissometer LT31 (siehe dort) eingesetzt und unterscheidet sich nur geringfügig vom Sensor PWD20. Sein Einsatz in Verbindung mit dem LT31 dient in erster Linie der Kalibrierung des LT31.

Sichtweitensensor FS11

Der Sichtweitensensor FS11 der Fa. Vaisala ist speziell für RVR-Anwendungen ausgelegt. Er wird an internationalen Flughäfen und an Regionalflughäfen als Sichtweitenmessgerät eingesetzt. Er erfüllt die FAA- und ICAO-Spezifikationen für Sichtweitemessungen und liefert genaue und eindeutig rückführbare Messungen. Das mechanische Konzept und die leistungsfähige Heizung entsprechen den FAA-Richtlinien.

Der Sichtweitensensor FS11 kann zunächst die MOR bestimmen, wird er aber mit einem Hintergrundleuchtdichtesensor LM21 (siehe 13.3.1) ausgestattet, ist auch die Bestimmung der RVR möglich. Damit ist der Sensor für Flugwetter- und SYNOP-Sichtweitemessungen einsetzbar.

Abb. 13.17 Sichtweitensensor FS11 (Foto: Vaisala)



Tab. 13.8 Spezifikationen Sichtweitensensor FS11 (Vaisala)

Funktionsprinzip	optische Vorwärtsstreuung
Lichtquelle	Leuchtdiode, naher IR-Bereich
Messbereich (MOR)	5 bis 75 000 m
Mittelwerte	1, 3 und 10 min
Messgenauigkeit	±10 %, Messbereich 5 bis 10.000 m ±20 %, Messbereich 10.000 bis 75.000 m
Genauigkeit der Streumessung	±3 %
Streuwinkel	42°
Spannungsversorgung	100/115/230 V AC ± 10 %, 50 bis 60 Hz
Leistungsaufnahme	300 VA max. (60 VA + 240 VA Schutzhaubenheizung)
Einsatzbedingungen	-40 bis +65 °C, optional -55 bis +65 °C 0 bis 100 %, bis 60 m s ⁻¹

Die Gerätescheiben sind durch die spezielle Neigung der optischen Köpfe vor praktisch allen, selbst vor horizontal windgetriebenen Partikeln, geschützt. Zusätzlich misst und ermittelt der Sensor mittels optischem Verfahren den Verschmutzungsgrad der Gerätefenster und kann auf dieser Grundlage Messfehler durch Fensterverunreinigungen automatisch korrigieren. Dies stellt sicher, dass die Messgenauigkeit im empfohlenen Zeitintervall zwischen zwei Fensterreinigungen erhalten bleibt und sorgt gleichzeitig für eine erhebliche Verlängerung dieses Intervalls. Darüber hinaus sorgen die umfassenden Überwachungsfunktionen und die modulare Bauform für sehr kurze Wartungszeiten. Die optischen Köpfe sind mit einem leistungsfähigen Schutzhaubenheizsystem ausgestattet, die Temperatur wird unabhängig gesteuert und überwacht.

Dieser Gerätetyp zeichnet sich durch hohe Stabilität, bessere Bedienbarkeit und höhere Messgenauigkeit gegenüber dem Skopograph (siehe 13.3.1), sowie geringeren Serviceaufwand aus.

Pflege und Kontrolle der Funktionstüchtigkeit

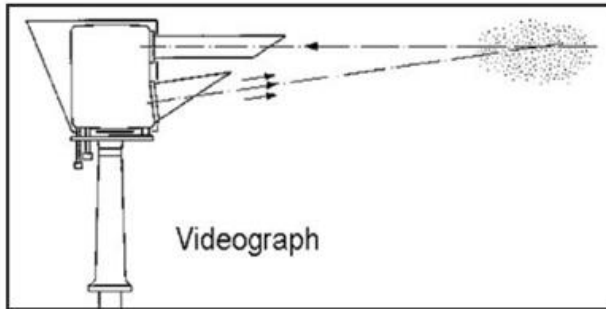
Falls eine Reinigung aller oder einzelner Gerätegehäuse notwendig ist, sollte warmes Wasser, ein milder Haushaltsneutralreiniger und ein weiches Tuch verwendet werden. Die Interfaceeinheit muss bei der Verwendung von Flüssigkeiten zur Reinigung der Gerätegehäuse geschlossen bleiben, damit das Risiko eines Stromschlages ausgeschlossen werden kann.

Rückwärtsstreusensor Videograph

Der Videograph ist ein Rückwärtsstreulichtmesser der Fa. Impulsphysik (Vaisala). Er wurde ursprünglich für den Einsatz auf Leuchttürmen entwickelt, wurde dann auch an automatischen Stationen eingesetzt, ist aber dort inzwischen durch andere Messgeräte ersetzt worden.

Der Sender sendet einen horizontalen Lichtstrahl (Impulslicht) in die Atmosphäre, wobei sich dieser Strahl und die optische Achse des Empfängers in einem Bereich von 5 m bis 30 m vor dem Gerät schneiden. Befinden sich reflektierende Partikel oder Nebeltröpfchen in diesem Bereich, kann die Intensität des zurück gestreuten Lichtes im Empfänger gemessen werden.

Abb. 13.18 Messprinzip des Videographen (Impulsphysik, Vaisala)



Der erfasste Raum, der sich auf die Messgenauigkeit auswirkt, ist bei Streulichtmessgeräten gegenüber Transmissometern grundsätzlich kleiner, beim Videograph aber ist er größer als bei Vorwärtsstreulichtmessern.

Abb. 13.19 Videograph (Impulsphysik, Vaisala)



13.4 Anerkannte Sichtweitensensoren

Gemäß der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift der Bundesregierung, Drucksache 506/04 vom 16.6.2004, „Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Kennzeichnung von Luftfahrthindernissen“ obliegt es dem DWD, eine förmliche Anerkennung von Sichtweitensensoren für den Einsatz an Luftfahrthindernissen auszusprechen. In Anlage 4 „Sichtweitenmessung“ heißt es wörtlich: „Die Sichtweite ist als meteorologische Sichtweite nach DIN 5037 Blatt 2 mittels eines vom Deutschen Wetterdienst anerkannten Gerätes zu bestimmen.“ Bei der Prüfung handelt sich um eine formale Prüfung der Herstellerangaben.

Die nachfolgende Liste enthält alle bereits anerkannten Sichtweitensensoren.

Tab. 13.9 Liste der anerkannten Sichtweitensensoren

Sensor	Antragsteller	Datum der Anerkennung
VAISALA PWD20	VAISALA	05.11.2004
Mierij Meteo Typ Sentry SVS1-X-2-M	Mierij	04.02.2005
BIRAL VPF700 und VF500	GWU	11.02.2005
BIRAL SWS-200	GWU	20.11.2009
SVS1 Sentry DC-MACD-H	Lufft	20.11.2009
SVS1 Sentry	Lanthan	
Skopograph II	VAISALA	
LT31	VAISALA	
FS11	VAISALA	

13.5 Messunsicherheiten und Fehlerquellen

Transmissometer

Die Transmission zeigen oft starke Schwankungen. Dies liegt an der natürlichen Luftunruhe, die für das menschliche Auge nicht sichtbar ist. Die hochempfindliche Photodiode kann diese Inhomogenitäten der Trübung jedoch registrieren.

Weitere Fehlerquellen allgemeiner Art bei Sichtmessgeräten können sein:

- Alterungserscheinungen der Lichtquelle und der Photosensoren
- Beschlagen oder Verschmutzungen der Scheiben des Senders bzw. Empfängers
- Bei Transmissometer mit Tripelspiegel kann es zu Verschiebungen des Messstrahls zwischen Sender und Empfänger als Folge von thermischen Verbiegungen tragender Teile, von Bodenbewegungen durch Frost u. ä. kommen

14. DIE MESSUNG DER SONNENSCHINDAUER UND DER STRAHLUNG

14.1 Allgemeine Grundlagen

Der Energiefluss, der in der Meteorologie durch die Energieübertragung zwischen Sonne, Erde und Atmosphäre in Form von elektromagnetischen Wellen gekennzeichnet ist, bezeichnet man als Strahlung. Die verschiedenen Strahlungsströme in Richtung auf die Erdoberfläche und von ihr weg gehören zu den wichtigsten Größen im Strahlungs- und Wärmehaushalt der Erde als Ganzes und jedes einzelnen Ortes auf der Erde oder in der Atmosphäre.

Strahlungsmessungen sind erforderlich

- zur Untersuchung des Energieumsatzes im System Erde-Atmosphäre und seiner zeitlichen und räumlichen Veränderung,
- zur Untersuchung der Atmosphäre hinsichtlich ihrer Trübung und Bestimmung der Bestandteile wie Staub und Wasserdampf,

- zur Untersuchung der Verteilung und Veränderung von Einstrahlung, Ausstrahlung und Strahlungsbilanz,
- zur Deckung des Bedarfs der Biologie, Medizin, Landwirtschaft, und Bautechnik und Industrie an Strahlungsmesswerten, u. a. für Photovoltaikanlagen

Licht (im erweiterten Sinne Infrarot, sichtbarer Bereich, UV-Bereich), Röntgen- und Gammastrahlung sind unterschiedliche Arten von elektromagnetischen Wellen, die sich in ihrer Frequenz und damit auch in ihren Wellenlängen unterscheiden. Von fundamentaler Bedeutung ist der Wellenlängenbereich von ca. $0,29 \mu\text{m}$ bis $100 \mu\text{m}$. Er wird unterteilt in die von der Sonne ausgehende kurzwellige Strahlung und die langwellige Strahlung der Erde und der Atmosphäre.

Die kurzwellige (solare) Strahlung

Sie stammt primär von der Sonne, macht etwa 98 % der Strahlung aus und liegt im Wellenlängenbereich von ca. $0,29 \mu\text{m}$ bis $4 \mu\text{m}$, mit einem Energiemaximum bei $0,48 \mu\text{m}$ im grün-blauen Bereich des sichtbaren Lichtes.

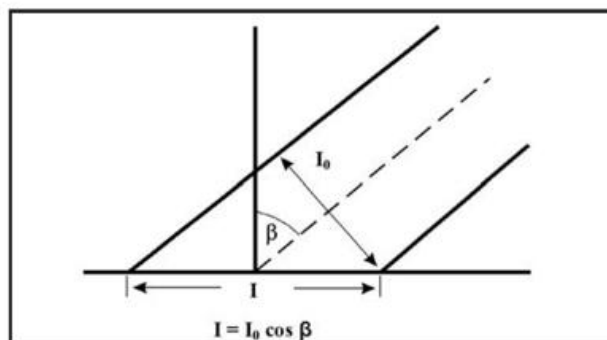
Bei der auf die Erde auftreffenden kurzwelligen Strahlung ist zwischen direkter und indirekter Sonnenstrahlung zu unterscheiden. Letztere wird durch Streuung oder Reflexion an Luftmolekülen und Aerosolen beim Durchgang durch die Atmosphäre hervorgerufen und erreicht die Erde aus allen Himmelsbereichen als diffuse Strahlung. Daraus ergeben sich drei Arten kurzwelliger Strahlungsströme an der Erdoberfläche:

Die **direkte (solare) Einstrahlung I**. Die Sonne steht in Abhängigkeit von der geographischen Breite und der Zeit nicht senkrecht, so dass sich die eintreffende Strahlung auf eine größere Fläche verteilt. Dadurch wird die Strahlungsflussdichte geringer, was sich nach dem **Kosinusetz** von **J. H. LAMBERT** (1728–1777) wie folgt berechnen lässt:

$$I = I_0 \cdot \cos \beta \text{ bzw. } I = I_0 \cdot \sin \gamma \quad (14.1)$$

mit I = direkte solare Bestrahlungsstärke (W m^{-2})
 I_0 = solare Bestrahlungsstärke auf eine senkrecht zur Strahlungsrichtung stehende Fläche (W m^{-2})
 β = Winkel ($^\circ$) zw. der Senkrechten zur einfallenden Strahlung und Empfängerfläche
 γ = Elevationswinkel (Winkel zwischen der Horizontalebene und der Sonnenhöhe über dem Horizont, 90° bei senkrecht stehender Sonne)

Abb. 14.1 Kosinusetz nach Lambert



Die diffuse (Himmels-)Strahlung D ist die kurzwellige Streu- und Reflexstrahlung aus dem oberen Halbraum, vor allem von Luft und Hydrometeoren (Wolken). Der Raumwinkel wird analog zu einem ebenen Winkel definiert: Er ist das Verhältnis aus der Fläche des Kugelsegments, das von einem Kreiskegel aus einer Kugel des Radius r geschnitten wird, und dem Quadrat des Radius r . Da eine Kugel die Oberfläche $4\pi r^2$ besitzt, ist der zugehörige Raumwinkel 4π und der des Halbraums 2π .

Nachts und wenn die Sonne von Wolken verdeckt wird, ist $I = 0$ und der den Erdboden erreichende Anteil der solaren Strahlung besteht nur aus diffuser Himmelsstrahlung D .

Die **Globalstrahlung G**, die Summe aus direkter und (diffuser) gestreuter solarer Strahlung auf eine horizontale Ebene ergibt sich aus

$$G = I + D = I_0 \cdot \sin \gamma + D \quad (14.2)$$

die im globalen Mittel etwa $1,88 \text{ W m}^{-2}$, d. h. nur noch 55 % der extraterrestrischen Strahlung beträgt. Bei Sonnenhöhen von mehr als 50° besteht die Globalstrahlung zu ca. $\frac{3}{4}$ aus direkter Sonnenstrahlung, bei tiefen Sonnenständen (bis etwa 10°) nur noch zu ca. $\frac{1}{3}$. Ihr Tagesgang sowie ihre jahreszeitliche Veränderung erwärmen den Erdboden, der seinerseits entsprechend seiner Temperatur langwellig ausstrahlt.

Die Globalstrahlung drückt aus, wie viel Energie über die kurzwellige Strahlung insgesamt an der Erdoberfläche ankommt. Daher ist sie die Eingangsgröße für die Photovoltaik.

Ermittelt ein Sensor die globale Strahlung G , die diffuse Strahlung D und den Elevationswinkel der Sonne, kann mit (14.1) und (14.2) die direkte solare Strahlung I_0 auf die Horizontale als Differenz aus Global- und diffuser Himmelsstrahlung berechnet werden mit

$$I_0 = \frac{G - D}{\sin \gamma} \quad (14.3)$$

Die **kurzwellige Reflexstrahlung R** ist der an der Erdoberfläche reflektierte Anteil der solaren Strahlung. Die Summe der reflektierten Strahlung beträgt etwa 4 %. Sie lässt sich ausdrücken durch

$$R = (1 - \epsilon_s)(I + D) \quad (14.4)$$

mit $(1 - \epsilon_s)$ = kurzwellige Reflexionszahl r , der Albedo, wobei ϵ_s = mittlerer kurzwellige Absorptionskoeffizient ist.

Unter **Albedo** ist in der Meteorologie der von der Oberfläche des Erdbodens reflektierte Anteil der einfallenden Sonnenstrahlung, in Prozent ausgedrückt, zu verstehen. Sie kann berechnet werden mit

$$r = \frac{R}{G} 100 (\%) \quad (14.5)$$

Mit (14.5) in (14.4) kann dann die kurzwellige Reflexstrahlung R wie folgt berechnet werden:

$$R = (1 + D) \frac{r}{100} = G \frac{r}{100} \quad (14.6)$$

Die Albedo ist auch als Verhältnis von aufwärts- und abwärtsgerichteter Strahlungsflussdichte φ_e (siehe 14.1.1) definiert. Sie ist abhängig vom Sonnenstand, dem Wasserdampfgehalt, der Bewölkung und von der atmosphärischen Trübung. Generell haben helle Oberflächen eine hohe, dunkle eine niedrige Albedo wegen ihrer stärkeren Absorption. Einen besonders hohen Wert hat Neuschnee mit bis zu 95 %. Natürliche Böden haben, abhängig von der Beschaffenheit der Oberfläche wesentlich geringere Werte, teilweise nur etwa 5 %.

Das **WIENSche Verschiebungsgesetz** (Wilhelm Wien, 1864–1928) verknüpft die Oberflächentemperatur eines Körpers mit der Wellenlänge maximaler Strahlungsenergie λ_{\max} . Es besagt, dass sich die Maxima der Strahlungsenergie mit zunehmender Temperatur in den Bereich kleinerer Wellenlängen verschieben, d. h. das Produkt aus der Wellenlänge des Strahlungsmaximums und der absoluten Temperatur eines Hohlraumstrahlers ist konstant, also

$$\lambda_{\max} \cdot T = \text{konst} \tan t \quad (14.7)$$

$$= 2,897 \cdot 10^{-3} \text{ m K (Wiensche Konstante)}$$

mit T = Oberflächentemperatur (K)

d. h. dass die Wellenlänge umgekehrt proportional zur Temperatur ist. Wird die Gleichung nach T aufgelöst, kann die Oberflächentemperatur, bspw. der Sonne (als Hohlraumstrahler) berechnet werden

$$T = \frac{2897}{0,502} = 5771 \text{ K} \quad (14.8)$$

Eine wichtige Folge aus dem Wienschen Verschiebungsgesetz ist die Tatsache, dass sich die solare Strahlung auf den UV-, sichtbaren und nahen IR-Bereich beschränkt, während die Erde und Atmosphäre fast ausschließlich im infraroten Bereich emittieren.

Strahlt ein Körper über das gesamte Spektrum die maximal mögliche Energie ab, nennt man ihn einen „Schwarzer Strahler“. Als solcher kann die Sonne angesehen werden, die über den gesamten Wellenlängenbereich gem. dem Stefan-Boltzmann-Gesetz (8.16) Wärmeenergie abstrahlt, die proportional zur 4. Potenz ihrer Oberflächentemperatur ist.

UV-Strahlung

Im Spektrum der kurzwelligen Sonnenstrahlung ist zwischen ca. 0,20 μm bis 0,38 μm die UV-Strahlung zu finden, im Anschluss an das energiereiche (violette) Ende des sichtbaren Lichts. Sie ist der energiereichste Teil der optischen Strahlung und macht etwa 7 % der extraterrestrischen Sonnenstrahlung aus. Wegen ihrer besonderen Bedeutung wird auch bei den Messprinzipien gesondert darauf eingegangen.

Die UV-Strahlung ist für den Menschen nicht sichtbar und kann auch nicht mit anderen Sinnesorganen wahrgenommen werden. Nach DIN 5031, Teil 7 wird die Strahlung im

ultravioletten Bereich unterteilt in UV-A, UV-B und UV-C (Tab. 14.1). Wegen der Absorption in der Atmosphäre (besonders in der Ozonschicht) dringt jedoch vor allen Dingen UV-A- und wenig UV-B-Strahlung mit einer Wellenlänge oberhalb 0,3 μm bis zur Erdoberfläche vor.

Der UV-B-Anteil der Globalstrahlung wird mit der Empfindlichkeitskurve der Haut (Erythemfunktion definiert nach CIE [Commission Internationale de l'Éclairage, Wien] 1987) gewichtet, so dass aus dem UV-B-Messwert auf die Sonnenbrandwahrscheinlichkeit geschlossen werden kann.

Sehr kurzwelliges UV-C (0,1 bis 0,28 μm) gelangt nicht bis zur Erdoberfläche, es wird in den obersten Luftschichten der Erdatmosphäre absorbiert und wirkt unterhalb etwa 0,2 μm durch Photolyse des atomaren Luftsauerstoffs (O) Ozon generierend mit einer Vielzahl anderer Folgereaktionen. UV-Strahlung mit Wellenlängen unter 0,1 μm kommt im Sonnenlicht nur mit sehr geringer Intensität vor.

Die wichtigste natürliche UV-Strahlenquelle ist die Sonne. Neben der Sonne senden auch andere kosmische Objekte wie Pulsare, hochangeregte Gasmassen sowie die meisten Fixsterne UV-Strahlung aus. Natürliche Quellen sind weiterhin das Polarlicht und natürliche irdische UV-Quellen sind Gewitterblitze und St.-Elms-Feuer. Gewöhnliches Fensterglas (Natron-Kalk-Glas) ist für einen großen Teil der UV-Strahlen unterhalb von 0,32 μm (UV-B und UV-C) undurchlässig. Für UV-A ist Fensterglas jedoch durchlässig. Es gibt auch Spezialglas, das für längere ultraviolette Wellen durchlässig ist. Quarzglas ist für den gesamten natürlich vorkommenden UV-Bereich transparent. Borosilikatglas (Jenaer Glas) lässt dagegen UV-Strahlung bis etwa 0,29 μm passieren. Strahlung unterhalb von 0,29 μm transmittiert z. B. durch natürliche oder synthetische Quarzkristalle und auch Quarzglas (Kieselglas).

UV-Strahlung vermag organische Bindungen zu spalten, aber auch zu schaffen. Es kann die Vernetzung von Monomeren initiieren oder organische Bindungen zerstören. Viele Kunststoffe werden durch UV-Strahlung geschädigt (Trübung, Versprödung, Zerfall). Obwohl die UV-Strahlung die niederenergetischste der ionisierenden Strahlungen ist, kann sie für den Menschen und andere Organismen gefährlich werden. Auch UV-Strahlung mit größerer Wellenlänge vermag bereits chemische Bindungen organischer Moleküle zu zerstören. Daher ist ein verantwortungsvoller Umgang mit Sonnenlicht (Sonnenschutz) angebracht. Auch der übermäßige Besuch von Solarien ist aus diesem Grund umstritten. Die einzige gut untersuchte positive Wirkung der UV-Strahlung besteht darin, dass durch sie in der Haut die Bildung des Vitamins D₃ ausgelöst wird. Für die Bildung der für die menschliche Gesundheit erforderlichen Menge von Vitamin D₃ reicht aber bereits eine geringe Strahlungsmenge aus.

Der am Boden erwartete Tagesspitzenwert der sonnenbrandwirksamen UV-Strahlung wird durch den international einheitlich festgelegten UV-Index (UVI) beschrieben. Er beschreibt die sonnenbrandwirksame solare Bestrahlungsstärke, die von der Sonne während des Tages auf einer horizontalen Fläche hervorgerufen wird und wird stets in

ganzen Zahlen in der Vorhersage und Warnung angegeben. Der UVI hängt vor allem vom Sonnenstand ab; er ändert sich daher am stärksten mit der Jahreszeit und der geographischen Breite. Er variiert auch mit der Höhe über NHN und der Wetterlage.

Unmittelbar an den Bereich der UV-Strahlung schließt sich die **PAR** (Photosynthetically Active Radiation), die photosynthetisch aktive Strahlung im Spektralbereich von 0,38 bis 0,70 μm . Sie deckt sich weitgehend mit dem sichtbaren Licht und ist ein wesentlicher Faktor für das Wachstum von Pflanzen (Chlorophyllbildung) und damit eine wichtige Größe in der Agrarmeteorologie (siehe 15.)

Solarkonstante

Sie ist die Strahlungsleistung bezogen auf eine Empfängerfläche (W m^{-2}) senkrecht zur einfallenden Strahlung am fiktiven „oberen Rand“ der Atmosphäre. Die Solarkonstante beträgt für den mittleren Abstand der Erde-Sonne im langjährigen Mittel 1367 W m^{-2} . Die Erde empfängt diese Strahlungsleistung mit ihrem Querschnitt. Da sich die Erde dreht, verteilt sich die Strahlungsleistung auf die Kugeloberfläche. Das Verhältnis der Oberfläche zur Querschnittsfläche einer Kugel beträgt 4 : 1, somit steht pro m^2 Erdoberfläche nur ein Viertel der Solarkonstanten, d. h. ca. 342 W m^{-2} zur Verfügung.

Der Begriff „Solarkonstante“ ist eine irreführende Bezeichnung. Ihr Zahlenwert ändert sich durch verschiedene Effekte innerhalb unterschiedlicher Zeitskalen, in den Jahreszeiten – abhängig von der Entfernung Erde–Sonne – nach neueren Messungen um $\pm 3,3 \%$ (-1370 W m^{-2} am 21. Juni und -1398 W m^{-2} am 21. Dez.). Da sie auch in Abhängigkeit von der Sonnenaktivität schwankt, korrespondieren damit natürlich bedingte Klimaänderungen verschiedenen Ausmaßes.

Die langwellige Strahlung

Sie befindet sich im Bereich von 3,5 μm bis 100 μm ist vor allem eine terrestrische Strahlung mit einem temperaturabhängigen Maximum bei etwa 10 μm , als Strahlung eines Körpers (Erde und Atmosphäre) mit ca. 300 K. Sie wird auf Grund der Eigen(-temperatur)strahlung der atmosphärischen Bestandteile auch als Wärmestrahlung oder thermische Strahlung bezeichnet. Es werden dabei drei Komponenten unterschieden:

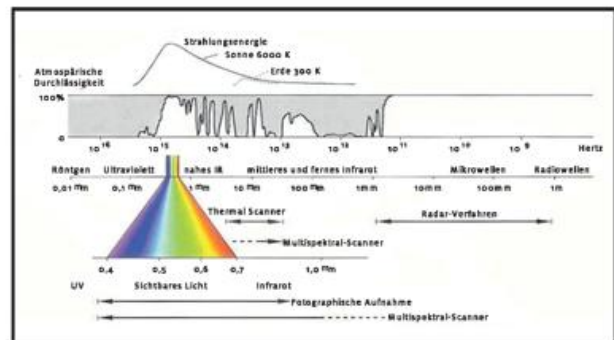
Die atmosphärische **Gegenstrahlung G_s** ist die langwellige Strahlung der Atmosphäre (hauptsächlich durch Emission von Wolken, Wasserdampf und Kohlendioxid), die aus dem oberen Halbraum der Atmosphäre den Erdboden erreicht. Die Größe der Gegenstrahlung variiert räumlich und zeitlich sehr stark, was mit der Wasserdampfkonzentration und dem Bewölkungsgrad in der Troposphäre, insbesondere mit der Wolkenuntergrenze zusammenhängt.

Die **Ausstrahlung A** der Erdoberfläche, die nach den Gesetzen von Stefan-Boltzmann (8.16) und Kirchhoff gegeben ist. Vielfach sieht man die Erdoberfläche im langwelligen Bereich als schwarz an, da bei nichtmetallischen Körpern $\epsilon \approx 1$ ist. Der dadurch auftretende geringe Fehler wird meist durch die gleichzeitige Vernachlässigung der langwelligen Reflexstrahlung R_L kompensiert.

Die langwellige **Reflexstrahlung R_L** bezeichnet somit den Anteil der Gegenstrahlung G_s , der vom Erdboden wieder reflektiert wird

$$R_L = (1 - \epsilon) \cdot G_s \quad (14.9)$$

Abb. 14.2 Wellenlängenbereiche elektromagnetischer Strahlung



Die in der Tabelle 14.1 zusammenfassend aufgeführten Strahlungsarten können durch Messung ermittelt werden. Die **Strahlungsbilanz Q_s** ist die Summe der auf eine Flächeneinheit auftreffenden kurz- und langwelligen Strahlung abzüglich der von dem Flächenelement ausgehenden Strahlung. Dabei ist die Globalstrahlung die bestimmende Größe in der Strahlungsbilanz.

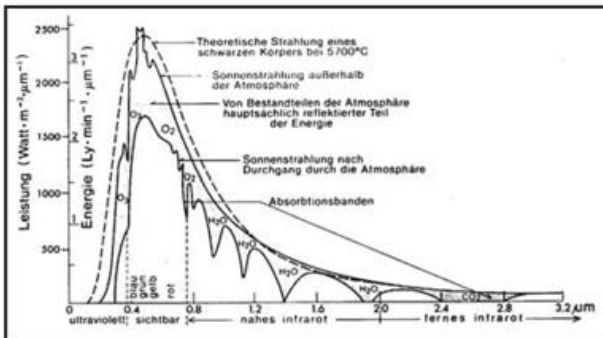
Tab. 14.1 Übersicht der messbaren Strahlungsarten

Bezeichnung	Symbol
Solare (kurzwellige) Strahlung	
Direkte kurzwellige Strahlung einschl. UV-Strahlung	I
Diffuse Himmelsstrahlung	D
Globalstrahlung	$G = I + D$
kurzwellige Reflexstrahlung (Wiese)	R
Strahlungsbilanz	$Q_s = G - R$
Terrestrische Strahlung	
Atmosphärische Gegenstrahlung	G_s
Ausstrahlung der Erdoberfläche	A
langwellige Reflexstrahlung	R_L
langwellige Strahlungsbilanz	$Q_L = G_s - A$
Sonnenscheindauer	SD

Als **Strahlungshaushalt** wird die Bilanz der ein- und ausgehenden Strahlung der Atmosphäre oder des Erdbodens bezeichnet. Für die Atmosphäre ist die Bilanz negativ, d. h. es wird weniger kurzwellige Sonnenstrahlung absorbiert als langwellige Strahlung abgegeben. Die Erdoberfläche dagegen hat eine positive Strahlungsbilanz. Die regionalen Unterschiede im Strahlungshaushalt sind die Folge wechselnder Einstrahlungsverhältnisse und terrestrischer Parameter, die die Strahlungsumsätze beeinflussen. An der Erdoberfläche muss die Summe der zufließenden Energie gleich der Summe der abfließenden sein, da eine Grenzfläche (wie der Erdboden) keine Energie speichern sondern Energieflüsse nur umwandeln kann. Die

Summe aller Energieflüsse an der Erdoberfläche muss daher Null ergeben. Die Umwandlung in Energieflüsse hat als Folge einen Wärmestrom in die Atmosphäre hinein.

Abb. 14.3 Spektrale Verteilung der Sonnenstrahlung



Tab. 14.2 Wellenlängen bei Strahlungsmessungen in der Meteorologie

	Bereich	Wellenlänge (μm)	
kurzwellig	UV-C	0,100 – 0,280	wird durch die Atmosphäre absorbiert und erreicht nicht die Erdoberfläche
	UV-B	0,280 – 0,315	wird durch die Atmosphäre nur teilweise absorbiert; biologisch aktiv; verursacht Sonnenbrand auf der menschlichen Haut
	UV-A	0,315 – 0,380	durchdringt die Atmosphäre, biologisch nicht sehr aktiv
	sichtbar	0,380 – 0,780	von violett bis rot
langwellig (Infrarot)	NIR	0,78 – 1,5	Wärmestrahlung (nahes Infrarot)
	IR	1,5 – 3,0	Wärmestrahlung
	FIR	3,00 – 100,00	Wärmestrahlung, von der Erde und der Atmosphäre abgestrahlt

Die in die Atmosphäre eingehende Strahlung wird durch die gas- und partikelförmigen Stoffe je nach Konzentration mehr oder weniger geschwächt. Diesen Vorgang nennt man **Extinktion**, die aus der Absorption, Streuung und Transmission besteht.

Die **Absorption** ist die wellenlängenabhängige Wechselwirkung zwischen Strahlung und Molekülen, bei welcher Strahlungsenergie in Wärmeenergie überführt wird. Den umgekehrten Vorgang, die **Emission** thermischer Strahlung wird nach dem Gesetz von Stefan-Boltzmann (8.16) beschrieben.

Die Absorption von Sonnenstrahlung an der Erdoberfläche ist Ursache für die unterste Heischicht der Atmosphäre als Energiequelle für alle atmosphärischen Bewegungsvorgänge. Absorption und Streuung bewirken eine Extinktion (Schwächung) solarer Strahlung beim Durchgang durch die

Erdatmosphäre. Neben Aerosolen absorbieren einige Gasbestandteile im Infrarotbereich, z. B. der Wasserdampf erheblich, da in mehreren Absorptionsbanden und das Kohlendioxid wesentlich weniger, wodurch deren meteorologische Bedeutung für den sogenannten Treibhauseffekt erklärt wird. Allerdings zeigt die thermische Gesamtwirkung von Wolken im terrestrischen Spektralbereich, gemittelt über den Globus über das ganze Jahr, dass die solare Abkühlung durch niedrige warme, optisch dicke Wolken wesentlich stärker (bis zu 99 %) ist als die Erwärmung durch optisch dünne und hohe Eiswolken mit nur etwa 16 %.

Die Absorption im UV-Bereich der solaren Strahlung durch Ozon ist Ursache für die Temperaturzunahme mit der Höhe im Bereich der Stratosphäre mit einem Maximum von ca. 0 °C an der Stratopause (ca. 50 km NHN).

Der **Absorptionskoeffizient** stellt ein Maß für die Abnahme der Strahlungsintensität beim Durchgang durch ein absorbierendes Medium, z. B. die Atmosphäre dar. Er hängt neben der Wegstrecke von der Wellenlänge und der chemischen Zusammensetzung des absorbierenden Mediums ab (Absorptionsbanden). Der Absorptionskoeffizient wird häufig auch als Extinktionskoeffizient bezeichnet, wenn die Strahlung beim Durchgang durch die Atmosphäre auch eine Schwächung infolge Streuung erfährt. Diese Extinktion der Sonnenstrahlung wird durch das Gesetz von **LAMBERT-BOUGUER** beschrieben.

Durch die wellenlängenabhängige **Streuung** an Aerosolteilchen, insbesondere Luftmolekülen (0,01 μm bis 10 μm), deren Radius sehr klein gegenüber der Wellenlänge des Lichtes ist, verändert sich die Richtung der Strahlung in einer reinen und trockenen Atmosphäre nach dem Gesetz von Rayleigh (siehe 10.2).

14.1.1 Strahlungsgrößen

Zur Beschreibung der Strahlung werden (verwirrend) viele Strahlungsgrößen verwendet. Die hier aufgeführten und definierten Größen sind im weiteren Verlauf nicht alle relevant. Die Energie- und Strahlungsflüsse werden in der Meteorologie als Energie- und Strahlungsflussdichten dargestellt.

Basis für radiometrische Strahlungsgrößen ist die **Strahlungsenergie Q_e** , eine physikalisch klar definierte Größe. Sie stellt die Menge der emittierten, transmittierten oder absorbierten Strahlungsenergie dar. Die zeitliche Änderung der emittierten, transmittierten oder absorbierten Strahlungsenergie wird als **Strahlungsfluss ϕ_e** bezeichnet. Bezieht man den Strahlungsfluss auf eine beliebig orientierte ebene Empfängerfläche, so ist damit die **Strahlungsflussdichte φ_e** (oft auch Irradianz bezeichnet) festgelegt [45]. Sie wird von diesen Größen am häufigsten verwendet, von manchen Autoren auch als Strahlungsfluss bezeichnet. Sie ergibt sich aus der Globalstrahlung G , diffuser Himmelsstrahlung D und reflektierter Sonnenstrahlung R . Da die **Strahlungsenergie Q_e** , die auf eine bestimmte Fläche A_e auftrifft, betrachtet wird, hängt die Strahlungsflussdichte vom Winkel der einfallenden Strahlung, also vom Kosinus des Einfallswinkels (14.1) ab. Der zusätzliche Bezug auf den

Raumwinkel (in der Einheit Steradian, sr) ergibt die **Strahldichte** L_e (auch Radianz genannt). Die direkte solare **Bestrahlungsstärke** E_e , die momentane Strahlungsintensität D_e ist die Strahlungsenergie, die pro Zeiteinheit auf ein Flächenelement A_E fällt, kann wie folgt berechnet werden

$$E_e = D_e \cdot \cos \alpha = \frac{\Phi_e}{A_E} \text{ (Wm}^{-2}\text{)} \quad (14.9)$$

mit D_e = Strahlungsintensität (W/m²)
 Φ_e = Strahlungsfluss (W)
 A_E = Empfängerfläche (m²)

Umgekehrt kann mit (14.9) die von einer strahlenden Fläche A_E emittierte Strahlungsenergie berechnet werden, die dann als **spezifische Ausstrahlung** R_e bezeichnet wird. Die **Bestrahlung** H_e ist die Summe von Bestrahlungsstärken E_e , auch Strahlungssumme genannt, die in einem bestimmten Zeitraum (je nach Länge des gewählten Zeitintervalls spricht man von Stunden-, Tages- oder Monatssummen) auf ein Flächenelement A_E einfällt.

14.1.2 Maßeinheiten der Strahlung

Tabelle 14.3 beinhaltet die Strahlungsgrößen mit ihren entsprechenden Maßeinheiten.

Tab. 14.3 Zusammenstellung der Strahlungsgrößen

Strahlungsphysikalische Größen	Symbol	Maßeinheit
Strahlungsenergie	Q_e	J = W · s
Strahlungsfluss	Φ_e	W (1 W = 1 J s ⁻¹)
Strahlungsflussdichte	φ_e	W · m ⁻²
Strahldichte	L_e	W · m ⁻² sr ⁻¹
Bestrahlungsstärke	E_e	J s ⁻¹ cm ⁻² , W · m ⁻²
Bestrahlung	H_e	J · m ⁻² , W · s m ⁻²
spezifische Ausstrahlung	M_e	W · m ⁻²
Photometrische Größe		
Beleuchtungsstärke	E_v	lx = 1 lm · m ⁻²

Während die Maßeinheit für die Energie Joule (J = W · s) und für die Leistung Watt (W = J · s⁻¹) ist, wird die Strahlungsflussdichte in W · m⁻² angegeben. Damit hat diese „scheinbar“ keinen Zeitbezug. Die exakte Einheit wäre n. Fokan [6] J · s⁻¹ · m⁻².

In den Definitionen der Strahlungsgrößen wurde keine Rücksicht auf die spektrale Verteilung (Wellenlängenabhängigkeit) der Strahlung genommen. Werden diese Strahlungsgrößen zusätzlich auf ein Wellenlängenintervall normiert, so wird die resultierende Größe spektral bezeichnet. Dem Formelzeichen wird dann der Index λ hinzugefügt. So wird z. B. die **spektrale Strahldichte** $L_{e\lambda}$ in Einheiten von W m⁻² sr nm⁻¹, die **spektrale Strahlungsflussdichte** $\varphi_{e\lambda}$ in Einheiten W m⁻² nm⁻¹ von gemessen [34].

Anstelle der Angaben der energetischen Einheit Bestrahlungsstärke E_e in W m⁻² wird die Beleuchtungsstärke E_v in Lux (lx) angegeben. Sie ist keine strahlungsphysikalische Größe, sondern eine von zahlreichen photometrischen (subjektiven) Größen, die die Empfindlichkeit des menschlichen Auges berücksichtigen, da sie sich auf den sichtbaren Bereich des Strahlenspektrums bezieht. Im Index e unterscheiden sich die allgemeinen strahlungsphysikalischen Größen von den lichttechnischen Größen; Formelzeichen und Definitionen stimmen überein. Der Umrechnungsfaktor zwischen beiden Einheiten – das photometrische Strahlungsäquivalent – ändert sich mit der von der Wellenlänge abhängigen Empfindlichkeit des menschlichen Auges.

Die Angabe der Wellenlängen erfolgt in dieser Beschreibung durchgehend in Mikrometer (µm). Da in der Literatur häufig auch die Angabe Nanometer (nm) verwendet wird, wird auf die Umrechnung nach Tabelle 4.1 verwiesen.

14.2 Allgemeine Messprinzipien

14.2.1 Messprinzipien für die Messung der Sonnenscheindauer

In der Meteorologie ist von Sonnenscheindauer die Rede, wenn die direkte Strahlung senkrecht zur Sonne einen bestimmten Schwellenwert übersteigt. Bei der WMO und auch beim DWD beträgt der Wert 120 W m⁻², bei MeteoSchweiz hingegen 200 W m⁻². Diese Diskrepanz ist historisch bedingt und beruht auf der Tatsache, dass die langjährigen Klimareihen der Sonnenscheindauer mit dem historischen Wert erhalten bleiben sollen.

Wie bereits erwähnt, stellt die Messung der tatsächlichen Sonnenscheindauer keine Strahlungsmessung im eigentlichen Sinn dar. Dennoch können diese Geräte zu den Strahlungsmessgeräten gezählt werden, da ihr Messprinzip auch auf der Wärmewirkung der Strahlung beruht. Die Sonnenscheindauer wird vor allem nach folgenden Prinzipien gemessen:

1. Bündelung der einfallenden Sonnenstrahlung durch eine Glaskugel und Erzeugung einer Brennspur auf einem Papierstreifen. Ermittlung der Sonnenscheindauer aus der Länge der Brennspur.
2. Messung der aus einem schmalen Himmelssektor einfallenden Strahlung durch eine rotierende Schlitzblende. Die direkte Sonnenstrahlung erzeugt dabei eine periodische Folge von Impulsen. Die Ermittlung der Sonnenscheindauer erfolgt durch Zeitzählung, wenn die Impulshöhe einen vorgegebenen Wert überschreitet, bzw. durch Impulszählung bei Überschreitung eines vorgegebenen Wertes bei bekannter und konstanter Rotationsgeschwindigkeit.
3. Messung der direkten Sonnenstrahlung mit einem Pyrheliometer, welches durch Zeitzählung die Sonnenscheindauer ermittelt, wenn der Schwellenwert von 120 W m⁻² überschritten wird. Da ein Pyrheliometer auch ein reines Strahlungsmessgerät ist, ist es unter 14.4.2 beschrieben.

14.2.2 Messprinzipien für die Messung kurz- und langwelliger Strahlung und Globalstrahlung

Die wichtigsten Strahlungsmessgeräte beruhen auf dem Prinzip der Umwandlung der Strahlungsenergie kurz- und langwelliger Strahlungsgrößen in Wärmeenergie. Dabei werden verschiedene Messprinzipien angewandt, die letztlich auf einer thermometrischen Methode oder auf ihrer photoelektrischen Wirksamkeit beruhen, d.h. auf dem Prinzip der strahlungsbedingten Erwärmung und somit Temperaturerhöhung einer Empfängerfläche.

Die Messprinzipien sind

1. Strahlungsmessung durch Verwendung der Wärme eines bestrahlten Körpers zur Phasenumwandlung (schmelzen, verdampfen) einer mit dem Körper verbundenen, thermisch gut leitenden Substanz.
2. Strahlungsmessung durch die auftretende Temperaturdifferenz zwischen einer beschienenen, geschwärzten Thermosäule (Strahlungsempfänger) und einer zweiten Thermosäule oder eines Thermometers, welche der Sonnenstrahlung nicht ausgesetzt ist und auf Lufttemperatur gehalten wird.
3. Strahlungsmessung durch Vergleich der elektrischen Heizleistung die benötigt wird, einen unbestrahlten Vergleichskörper auf dieselbe Temperatur wie die beschienene Thermosäule zu bringen.
4. Strahlungsmessung mittels Photozellen zur Messung der auftreffenden Strahlungsenergie und Berechnung der Strahlungswerte.

Als Strahlungsempfänger (Messfühler) werden bei kalorischen Strahlungsmessgeräten häufig Thermolemente bzw. Thermosäulen (siehe 8.3.2.3) zur Messung der Oberflächentemperatur des Strahlungsempfängers eingesetzt, der aus einer geschwärzten (im physikalischen Sinne ein schwarzen Körper) Metallplatte (Empfangsfläche von aktiven Lötstellen) von nur ca. 1 cm^2 Fläche besteht und die einfallende Strahlungsenergie nahezu unabhängig von der Wellenlänge fast vollständig absorbiert, d.h. in Wärmeenergie umgewandelt. Diese Empfangsfläche steht über ein Material von definierter thermischer Leitfähigkeit im thermischen Kontakt zum Metallgehäuse des Gerätes oder zu einer passiven Lötstellen innerhalb des Gerätes, so dass sich im stationären Fall eine Temperaturdifferenz zwischen Sensorfläche und Gehäuse ausbildet. Durch die dabei auftretende Temperaturdifferenz aufgrund der unterschiedlichen Erwärmung von Messfläche und Gehäuse entstehen Thermospannungen (siehe 8.2.2), die direkt proportional zur empfangenen Bestrahlungsstärke sind.

In neueren Sensoren werden Photozellen zur Messung der Strahlung eingesetzt. Mit diesen wird die photoelektrische bzw. photochemische Wirksamkeit der kurzwelligen Strahlung benutzt. Die Umrechnung der photometrischen Einheiten in energetische ist nur mit beschränkter Genauigkeit möglich, weil in der Photometrie die Wirkung der Strahlungsenergie auf das menschliche Auge gemessen wird, d.h. dass nur der Teil des Spektrums berücksichtigt wird, in dem das Auge empfindlich ist (siehe auch 14.1.2).

Es existieren auch Messgeräte, die nur die direkte und diffuse UV-Strahlung messen. Dabei wird zwischen Breitbandgeräten, die das gesamte UV-Spektrum und Schmalbandgeräten, die nur einen engen Wellenlängenbereich im UV-A oder UV-B erfassen unterschieden.

Interessiert die Strahlung, die von einem Detektor empfangen wird, der unter einem bestimmten Winkel zur strahlenden Oberfläche steht und dabei einen Raumwinkel einnimmt, muss die Winkelverteilung der Strahlung bekannt sein, um den Bruchteil der emittierten Gesamtstrahlung zu berechnen, den der Detektor empfängt.

Grundsätzlich ist die Messung der kurzwelligen Strahlung einfach, da das Messgerät nur in Richtung Sonne ausgerichtet werden muss. Anders ist es bei der Messung der langwelligeren Strahlung, da dabei immer auch die langwellige Eigenstrahlung des Messgerätes berücksichtigt werden muss.

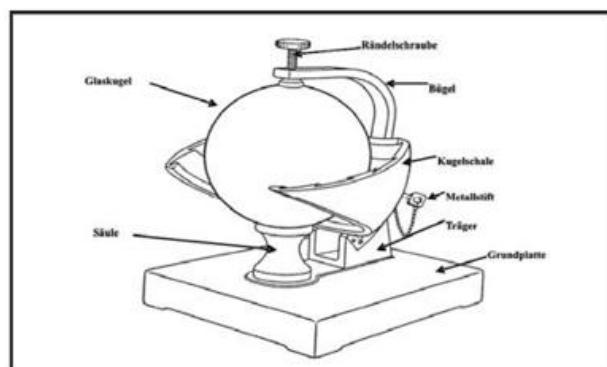
Die Messfühler von Strahlungsmessgeräten müssen sehr genau ausgerichtet sein und es muss eine Kosinuskorrektur angebracht werden, da die Bestrahlungsstärke nicht exakt dem Kosinus der Sonnenhöhe folgt. Ursachen dafür sind die unterschiedlich starken Kalotten und Hauben und die Schichtdicke der Atmosphäre, die von der Strahlung durchdringt wird, die wiederum von der Sonnenhöhe abhängt [6].

14.3 Sensoren / Messgeräte für die Sonnenscheindauer

14.3.1 Sonnenscheinautograph (n. Campbell-Stokes)

Das einfachste Gerät zur Messung der tatsächlichen Sonnenscheindauer eines Tages ist der Sonnenscheinautograph (Heliograph) nach Campbell-Stokes. Eine Glaskugel als Sammellinse ist von einer konzentrischen Kugelschale umgriffen ist, in die Kerben zum Einschieben von Registrierpapierstreifen eingefräst sind. Diese Kugelschale ist genau im Brennpunkt der Kugel montiert, sodass eine Brenn- oder Bräunungsspur auf einem Registrierstreifen, der durch die Erdrotation an der Sonne vorbei geführt wird, erzeugt wird. Durch die Änderung des Einfallswinkels der Sonnenstrahlung im Laufe eines Tages wandert der Brennpunkt auf einer bestimmten Linie und die Länge dieser Spur ist ein Maß für die Sonnenscheindauer. Die im Halbstundenintervall aufgedruckte Zeitskala (in WOZ) erlaubt eine Auswertung mit einer Genauigkeit von 0,1 Stunden.

Abb. 14.4 Sonnenscheinautograph n. Campbell-Stokes (schematisch)

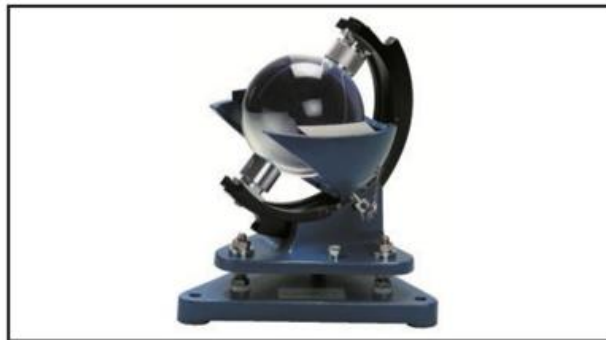


Im Sommer steigt die Sonne höher als im Winter, weshalb für jede Jahreszeit ein anders geformter Streifen benötigt wird (Abb. 14.6). Der Verlauf der Sonnenbahn hängt auch von der geographischen Breite des Messortes ab, daher muss die Kugelschale mit dem Registrierpapier durch Kippen darauf abgestellt werden.

Die Bedienung des Messgerätes besteht im Wesentlichen im täglichen Auswechseln der Registrierstreifen nach Sonnenuntergang. Auch wenn keine Brenns spur zu erkennen ist, muss ein neuer Streifen für den nächsten Tag eingeschoben werden. Hierbei ist zu beachten, dass der 12-Uhr-Strich des Streifens mit der 12 Uhr Markierung der Kugelschale übereinstimmt und der der Jahreszeit entsprechende Streifen

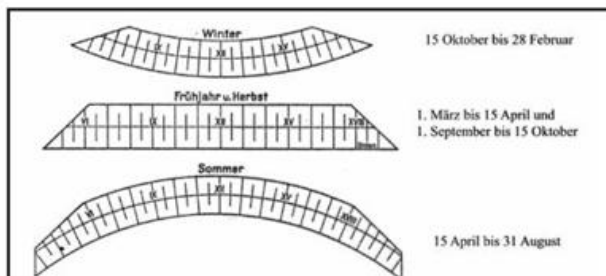
- unten für Sommer vom 15.4.–31.8. (lang und gekrümmt)
 - Mitte für Frühjahr/Herbst vom 1.3.–14.4. und 1.9.–14.10 (gerader Streifen)
 - oben für Winter vom 15.10.–28./29.2. (kurz und gekrümmt)
- aufgelegt wird.

Abb. 14.5 Sonnenscheinautograph n. Campbell-Stokes (Foto: Lambrecht)



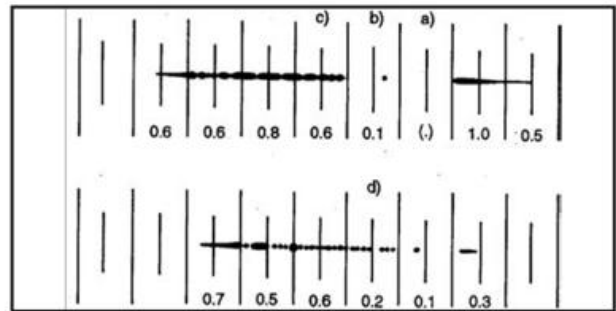
Die Schale ist an der Position für 14 Uhr mit drei Löchern versehen. Durch eines dieser Löcher wird von der Rückseite her der mit einer Kette an das Messgerät angehängte Metallstift soweit eingeführt, dass er auch den Papierstreifen durchsticht und in ihm festsitzt. Hierdurch wird ein Verrücken des Streifens durch starken Wind verhindert, außerdem lässt die Einstichstelle später erkennen, ob der Streifen die vorschriftsmäßige Lage gehabt hat.

Abb. 14.6 Registrierstreifen des Sonnenscheinautographen



Die Brenns pur der Sonne läuft von Westen nach Osten, weshalb auf ein korrektes Einführen der richtigen Streifen zu achten ist. Bei den geraden Streifen ist die richtige Lage durch den Aufdruck „unten“ gekennzeichnet.

Abb. 14.7 Aufzeichnung der Sonnenscheindauer



Pflege und Kontrolle der Funktionstüchtigkeit

Die Pflege des Sonnenscheinautographen beschränkt sich auf die Reinhaltung der Glaskugel. Verschmutzungen durch Staub und Vogelkot müssen umgehend beseitigt werden. Auch starkes Haftwasser nach Niederschlägen muss mit der Hand oder einem elastischen Schaber vorsichtig abgewischt werden. Bei negativen Temperaturen müssen Ablagerungen von Reif, Schnee und Eis beseitigt werden, da feuchtes Registrierpapier den Einbrennvorgang verzögern kann.

Bei Bergstationen ist es ratsam, dem Ansatz festen Niederschläge durch Einreiben der Kugel mit Glysantin o. a. vorzubeugen. Hat sich trotzdem an der Kugel ein Beschlag gebildet, kann dieser erforderlichenfalls auch mit Spiritus entfernt werden.

Die Funktionstüchtigkeit ist gegeben, wenn die Glaskugel sauber ist und der richtige Registrierstreifen eingelegt ist. In den Einschüben für die verschiedenen Registrierstreifen setzt sich Asche ab, die in Verbindung mit Feuchtigkeit zu einer festen Kruste werden kann. Wenn dann beim Einschieben des Streifens ein größerer Widerstand bemerkt wird, müssen die Führungsnuten für die Streifen gereinigt werden.

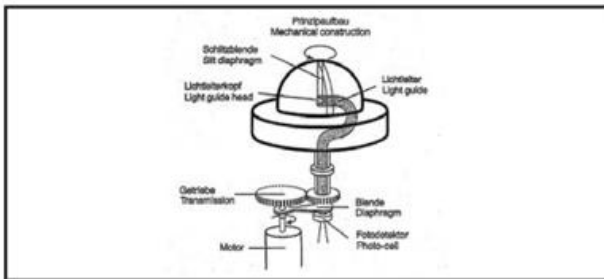
14.3.2 Sensoren für die Sonnenscheindauer

Sonnenscheindauersensor Typ SONIe3

Der DWD setzt zur Messung der Sonnenscheindauer (Angabe in min) den Sensor Pyrheliometer SONIe3 (n. Lindner/Hülsen) ein. Er wurde beim DWD (Hamburg) entwickelt und wird von der Fa. Siggelkow Gerätebau GmbH, Hamburg hergestellt. Das Signal des SONIe3 wird auch zur Bestimmung der direkten solaren Bestrahlungsstärke E_e ($W m^{-2}$) verwendet. Damit ist SONIe3 ein vollautomatisch arbeitendes, elektronisches Sonnenscheindauer- und Sonnenenergiemessgerät.

SONIe3 tastet die direkte Bestrahlungsstärke der Sonne sowie des Himmels durch eine angetriebene, rotierende Schlitzenblende mit einer Umdrehungsdauer von rund 6 s kontinuierlich ab. Durch den in einer halbkugelförmigen Kuppel aus glasfaserverstärktem und wetterbeständigem Kunststoff mit einem Durchmesser von 32,5 mm senkrecht verlaufenden, nur 0,3 mm breiten Schlitz gelangt im Gegensatz zur direkten Sonnenstrahlung, die bei jeder Umdrehung einmal kurzfristig auf das Ende des mitgeführten rotationssymmetrischen Lichtleiters trifft, nur sehr wenig diffuse und reflektierte Strahlung in das Kuppelinnere. Im Zentrum dieser Kuppel befindet sich der Lichtleiterkopf eines gebogenen Lichtleiterstabes aus Plexiglas, der das Licht unabhängig vom Einfallswinkel in den Lichtleiter reflektiert.

Abb. 14.8 Prinzipaufbau SONIe3 (Siggelkow Gerätebau GmbH)



Gegenüber dem unteren Ende des Lichtleiters befindet sich eine Photodiode zur Messung der eingefallenen Strahlung. Dort wird das verstärkte Signal von einem Spitzenwertspeicher übernommen und über einen Schwellenwertschalter als Ja/Nein-Aussage bezüglich der Sonnenscheindauer in Form von 0 bis 4,5 V ausgegeben, aus der die solare Bestrahlungsstärke bestimmt wird. Die Ausgabe der Mittelwerte erfolgt standardmäßig als 10 min-Mittelwerte.

Abb. 14.9 SONIe3 auf der Zugspitze (Foto: Löffler)



Mit einem Öffnungswinkel der Schlitzblende zwischen den Randstrahlen von $1,2^\circ \times 90^\circ$ (Azimut \times Höhe) entfallen jegliche Aufstellungsprobleme, da die Sonne innerhalb einer Rotation in den Schlitz scheinen kann. Daher muss im Gegensatz zu anderen Messgeräten zur Bestimmung der Sonnenscheindauer dieser Sensor nicht nach der Sonne ausgerichtet werden. Er eignet sich deshalb ideal auch für den Einsatz auf Schiffen, da er nicht kardanisch aufgehängt sein muss. So ist er u. a. auch auf der FS METEOR (siehe 19.5.6.2) im Einsatz.

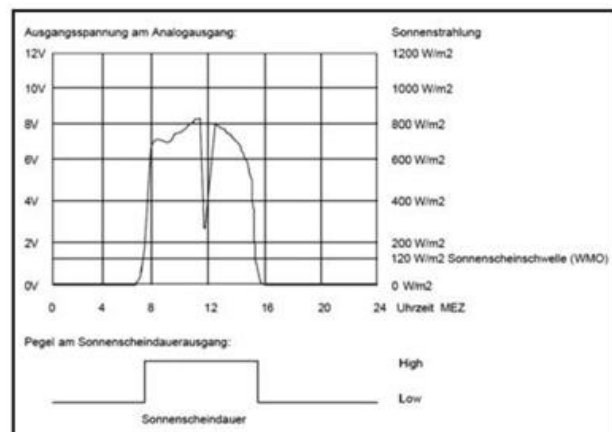
Tab. 14.4 Spezifikationen Sonnenscheindauersensor SONIe3 (Siggelkow Gerätebau GmbH)

Prinzip	optoelektronisch, Messung der direkten Strahlung
Messbereich	0 bis 1200 W m^{-2}
Genauigkeit	$\pm 5 \%$ vom Messbereich
Ansprechschwelle	10 W m^{-2}
Spektraler Bereich	0,4 bis $1,1 \mu\text{m}$
Auflösung	1/100 s

Ausgang Analog	0 bis 12 V DC = 0 bis 1200 W m^{-2}
Ausgang Sonne Ja/Nein	Nein = $< 0,6 \text{ V}$, Ja = 4,5 bis 5 V (Schwelle 120 W m^{-2})
Versorgung	11 bis 28 V DC
Temperaturbereich	-30 bis $+50^\circ\text{C}$
Heizung thermostat-gesteuert	3 W, Schaltpunkt ca. 15 bis 20°C

Abbildung 14.10 zeigt eine Aufzeichnung der Sonnenstrahlung und des Sonnenscheinpegels mit SONIe3.

Abb. 14.10 Grafische Darstellung der Sonnenstrahlung und des Sonnenscheinpegels (Siggelkow Gerätebau GmbH)



Kuppel und Lichtleiter werden durch einen Elektromotor in Rotation um eine senkrechte Achse versetzt, wobei zusätzlich eine Blende zur Überwachung des Nullpunktes bewegt wird. Die Kuppel wird von einer Glashaube überwölbt, die Niederschlag und Schmutz abhalten soll. Zur Vermeidung von Schnee- und Reifbelag ist der Sensor mit einer thermostatgesteuerten Heizung ausgestattet.

Pflege und Kontrolle der Funktionstüchtigkeit

Die Pflege und Wartungsarbeiten beschränken sich auf die Kontrolle der Datenqualität. Im Winter sollte die Funktion der Beheizung kontrolliert werden. Gelegentlich kommt es vor, dass die Schutzhaube aus Glas verschmutzt und dann gereinigt werden muss.

Sonnenscheindauersensor CSD 3

Ein weiterer Sonnenscheindauersensor ist der CSD 3 der Fa. Kipp & Zonen, der für den Dauereinsatz im Freien ausgelegt ist und daher auch an den mobilen Messeinheiten des DWD (siehe 19.5.4) verwendet wurde.

Der Sensor hat keine beweglichen Teile und ist mit 3 Photodioden (siehe 6.3) mit speziell entwickelten Diffusoren (Streuscheiben) ausgestattet, um eine analoge Anzeige von Sonnenschein $\geq 120 \text{ W m}^{-2}$ zu erhalten. Der Sensorausgang schaltet zwischen 1 = high und 0 = low und signalisiert dann „sonnig“ oder „nicht sonnig“. Der aktuelle Wert der direkten Strahlung steht ebenfalls zur Verfügung.

Abb. 14.11 Sensor CSD 3 (Kipp & Zonen)



Tab. 14.5 Spezifikationen Sonnenscheindauersensor CSD 3 (Kipp & Zonen)

Spektralbereich	0,40 bis 1,10 μm
Signal für Sonnenschein	$1 \pm 0,1 \text{ V}$ bei $>120 \text{ W m}^{-2}$
Signal für kein Sonnenschein	$0 \pm 0,1 \text{ V}$ bei $<120 \text{ W m}^{-2}$
Genauigkeit der Sonnenscheindauer	$> 90 \%$ über den ganzen Monat
Analoges Ausgangssignal	$1 \text{ mV pro W m}^{-2}$ direkter Strahlung
Genauigkeit der Direktstrahlung	$>90 \%$ bei klarem Himmel
Stabilitätsabweichung	$<2 \%$ pro Jahr
Temperaturabhängigkeit	$<0,1 \%$ K^{-1}
Ansprechzeit	$<1 \text{ ms}$
Einsatzbereich	-40 bis $+70 \text{ }^\circ\text{C}$, 0 bis 100 %
Heizung Stufe 1 (Betauung verhindern)	$1 \pm 0,1 \text{ W}$ bei 12 V DC
Stufe 2 (Schnee/Eis entfernen)	$10 \pm 0,1 \text{ W}$ bei 12 V DC
Stromversorgung	12 V DC

Ein weiterer Sensor für die Sonnenscheindauer ist das Sonnenscheinpyranometer SPN1 (siehe 14.4.1)

14.4 Sensoren/Messgeräte für die kurzwellige Strahlung und Globalstrahlung

Die Klassifikation von Strahlungsmessgeräten kann hinsichtlich ihrer technischen Möglichkeiten erfolgen, d. h. der Erfassung von kurzwelliger, langwelliger oder beider Strahlungsarten und ob sie nur die Strahlung aus dem oberen Halbraum oder nur aus dem unteren Halbraum erfassen. Messtechnisch besteht aber die Möglichkeit, je nach Aufstellung der Geräte sowohl den oberen als auch den unteren Halbraum gleichzeitig zu erfassen.

Nachfolgend werden die Sensoren/Messgeräte für Strahlungsmessungen beschrieben, die zur Zeit der Bearbeitung des vorliegenden Leitfadens im praktischen Betrieb eingesetzt waren. Für einige Geräte gibt es bereits Nachfolgemodelle, die sich oft nur durch wenige technische Details von

den beschriebenen Geräten unterscheiden. Die Einteilung (Tab. 14.6) soll bei der Vielfalt der Geräte zur Übersichtlichkeit beitragen.

Tab. 14.6 Übersicht über die Strahlungsmessgeräte und ihre Verwendung

Strahlungsart	Messgeräte	Zusätzliche Messung
kurzwellig (0,29–3,0 μm)	Pyranometer	+Globalstrahlung +Sonnenscheindauer
	Aktinometer	
	Pyrheliometer*	auch SONle3
	Albedometer	
langwellig (3,00–10,0 μm)	Pyrgeometer	
	Pyrgeometer-Bilanzmesser	
	IR-Strahlungsbilanzmesser	
kurz- und langwellig	Radiometer	
	Pyrradiometer	
	Strahlungsbilanzmesser	
	SCAPP	+Globalstrahlung +Sonnenscheindauer

* Pyrheliometer sind i.A. Absolutgeräte, alle anderen sind Relativgeräte

Die Bezeichnungen der meisten, nachfolgend beschriebenen meteorologischen Strahlungsmessgeräte leitet sich aus dem Wort Pyrometrie = Strahlungsmessung ab.

Bei einem Gerät für die kurzwellige Strahlung enthält ein (Spezial-) Glasmaterial einen Filter, der alle anderen Wellenlängenbereiche herausfiltert, so dass nur die kurzwellige Strahlung aus dem oberen Halbraum, durch Streuung und Reflexion, auf die geschwärzte Fläche auftrifft.

14.4.1 Pyranometer

Pyranometer messen die Gesamtglobalstrahlung ($G = I+D$) von IR bis UV, also die Summe aus der einfallenden (kurzwelligen) direkten I und der reflektierten diffusen Strahlung D im Bereich von etwa $0,3 \mu\text{m}$ bis $3,0 \mu\text{m}$ aus dem oberen Halbraum. Ein Pyranometer ist also ein Sensor zum Messen der Strahlungsflussdichte φ_e (W m^{-2}) der Sonne auf ebenen, horizontal ausgerichteten Empfangsflächen mit einem Sichtfeld von 180° . Zur Messung der Global- und der diffusen Himmelsstrahlung sind die Strahlungsempfänger zum Himmel und im Fall der Reflexstrahlung R_L zum Erdboden gerichtet.

Die Hauptkomponenten eines Pyranometers sind:

- das thermoelektrische Sensorelement (Thermosäule) als geschwärzte oder auch schwarz-weiße Empfangsfläche,
- eine oder zwei Glashauben, die die Empfangsfläche konzentrisch gegen Konvektion, Regen, Staub und Windeinfluss schützen,
- das Gehäuse, das häufig zusätzlich durch einen ringförmigen Schirm geschützt ist und als thermische Referenz dient

Der Aufbau unterschiedlicher Pyranometer variiert, gleich bleibt jedoch das Messprinzip. Bei der Konstruktion dieser Geräte wird Wert darauf gelegt, dass sie das Kosinusetz (14.1) im Wesentlichen – mit Abweichungen eventuell bei geringen Sonnenhöhen – erfüllen. Wie bereits unter 14.1.2 erläutert, ist für eine Strahlungsflussdichte- oder Irradiationsmessung das Richtungsverhalten proportional zum Kosinus des Einfallswinkels; also maximaler Response, wenn die Strahlung senkrecht auf den Sensor fällt (senkrecht zur Fläche, Sonne im Zenit, 0° Einfallswinkel), null Response bei einem Einfallswinkel von 90° und 0,5 bei 60° . Hieraus folgt, dass ein Pyranometer eine sogenannte „directional response“ oder „cosine response“ haben sollte, der nahe bei der idealen Kosinuscharakteristik liegt. Diese Pyranometer entsprechen dem ISO 9060-Standard, der durch die WMO anerkannt ist. Die ISO 9060 unterscheidet drei (Genauigkeits-) Klassen:

- Sekundärstandard (secondary standard)
- Erste Klasse (first class)
- Zweite Klasse (secondary class)

In dieser internationalen Norm sind die Spezifikationen definiert, die eine Vergleichbarkeit der Messwerte garantieren sollen. Es werden Ausführungen vom wissenschaftlichen Präzisionsmessgerät bis zu Sensoren für Routine-Messaufgaben klassifiziert. Diese Spezifikationen bedeuten auch, dass die geforderten Daten bisher nur durch Einsatz von thermoelektrischen Sensoren mit ihrer gleichmäßigen, unselektiven, spektralen Empfindlichkeit erreicht werden (siehe 14.2.2). Instrumente, die die o.g. Spezifikationen nicht einhalten, sind demnach keine Pyranometer, und müssen demzufolge auch anders bezeichnet werden. Üblich ist hier zum Beispiel die Bezeichnung Silizium-Pyranometer. Bei Silizium-Pyranometer ist eine spezielle Silizium-Fotodiode das Sensorelement. Der erfasste Spektralbereich liegt etwa zwischen $0,35$ bis $1,00 \mu\text{m}$. Silizium-Fotodioden sind Halbleiter-Dioden, die sichtbares Licht, oder auch IR-, UV in elektrischen Strom umwandeln.

Pyranometer CM21/CM22

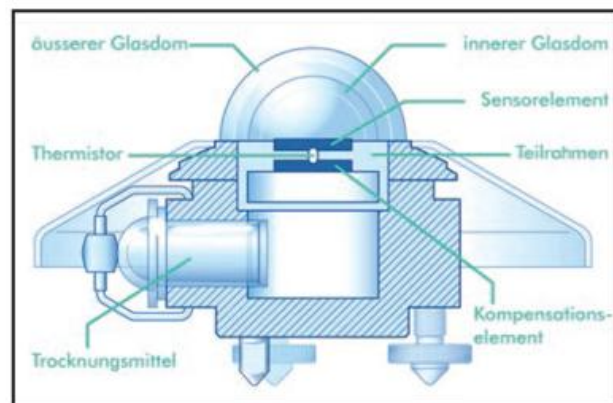
Die Pyranometer der Typenreihe CM und CMP der Fa. Kipp & Zonen entsprechen den Forderungen der ISO 9060, sowie den WMO Richtlinien. Als Sensorelement wird eine Thermosäule verwendet, die je nach Typ aus rotations-symmetrisch angeordneten Thermoelementen besteht, die elektrisch in Serie geschaltet sind. Zwei halbkugelförmige Glashauben (Schott Glas K5, 2 mm dick) schützen gegen Witterungseinflüsse, lassen aber die Strahlung im Bereich von etwa $0,3 \mu\text{m}$ bis $3 \mu\text{m}$ zur geschwärzten Messfläche durch. Die äußere Kalotte soll das Innere vor Verschmutzung und Witterungseinflüssen, die innere Kalotte vor einem Wärmeaustausch zwischen Thermosäule und äußerer Kalotte bei deren plötzlicher Abkühlung z. B. durch Niederschlag schützen. Um ein Beschlagen der Kalotten von innen zu verhindern, werden seitlich in den zylinderförmigen Pyranometerkörper Trockenmittelpatronen eingesetzt.

Abb. 14.12 Pyranometer CM21/CM22 (Kipp & Zonen)



Um ein Erwärmen des Pyranometerkörpers durch Sonnenstrahlung und daraus resultierende Wärmeleitung zum Messfühler zu verhindern ist er mit einem Strahlungsschutzschirm versehen, der von innen nach außen leicht geneigt ist, um ein Abfließen des Regenwassers zu ermöglichen. Zur exakten Horizontausrichtung der Empfängerfläche, die mittels verstellbaren Füßen vorgenommen werden kann, befindet sich eine Libelle am Pyranometer.

Abb. 14.13 Pyranometer CM21 schematisch (Kipp & Zonen)



Tab. 14.7 Spezifikationen Pyranometer CM21/22 (Kipp & Zonen)

	CM21	CM22
ISO Klassifikation	Secondary standard	
Spektralbereich (50% Punkte)	0,305 bis 2,80 μm	0,200 bis 3,60 μm
Impedanz	40 bis 100 Ω	10 bis 100 Ω
Ansprechzeit	<5 s (95 %), 12 s (99 %)	
Nichtlinearität (0 bis 1000 W m^{-2})	< $\pm 0,2$ %	
Sichtfeld	180°	
Thermosäulenausgabebe-reich	-250 bis +250 W m^{-2}	
Temperaturabhängigkeit der Empfindlichkeit	-20 bis +50 $^\circ\text{C} \pm 1$ %	-20 bis +50 $^\circ\text{C} \pm 0,5$ %
Empfindlichkeit $\mu\text{V pro W m}^{-2}$	7 bis 17	7 bis 14
Maximale Strahlungsauf-nahme	4000 W m^{-2}	
Einsatzbereich	-40 bis +80 $^\circ\text{C}$	

Zur Messung der diffusen Himmelstrahlung wird die direkte Sonnenstrahlung mittels eines Schattenringes ausgeblendet. Er ist an zwei sich genau im Osten bzw. Westen des Pyranometers befindende Streben, die gegen die Horizontale um den Betrag der geographischen Breite des Aufstellungsortes geneigt sind, montiert.

Abb. 14.14 Pyranometer CM21 mit Schattenring (Kipp & Zonen)



Die Thermosäule muss sich genau in der Mitte des durch den Schattenring beschriebenen Kreises befinden. Bei präziser Aufstellung ist die gedachte Linie „Thermosäule höchster Punkt des Schattenringes“ exakt Nord-Süd ausgerichtet und die Thermosäule wird während des ganzen Tages vollständig beschattet.

Da ein Teil der diffusen Strahlung auch auf den Schattenring fällt, müssen die Messwerte korrigiert werden. Eine entsprechende Tabelle ist im Lieferumfang des jeweiligen Gerätes enthalten. Wegen der Änderung der Sonnenhöhe zwischen Winter- und Sommersonnenwende um 47° , ist der Schattenring regelmäßig, entsprechend dem Tagbogen (nach WOZ) der Sonne nachzuführen.

Pyranometer CM11

Das Ausgangssignal (mV) dieses Pyranometers der Fa. Kipp & Zonen ist mittels Kalibrierfaktor direkt proportional der Bestrahlungsstärke des angegebenen Spektralbereichs.

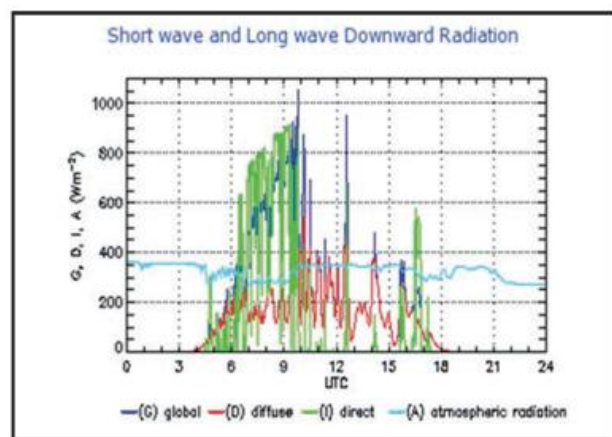
Abb. 14.15 Pyranometer CM11 (Kipp & Zonen)



Tab. 14.8 Spezifikationen Pyranometer CM11 (Kipp & Zonen)

ISO Klassifikation	Secondary Standard
Messbereich	0 bis 1400 W m^{-2}
Spektralbereich	0,305 bis $2,80 \mu\text{m}$
Ansprechzeit	12 s (95 %), 24 s (99 %)
Nichtlinearität < 1000 W m^{-2}	$\pm 0,6 \%$
Impedanz	700 bis 1500Ω
Sichtfeld	180°
Temperaturabhängigkeit der Empfindlichkeit	-10 bis $+40^\circ\text{C}$ $\pm 1 \%$
Empfindlichkeit	4 bis $6 \mu\text{V pro } \text{W m}^{-2}$
Maximale Strahlungsaufnahme	4000 W m^{-2}
Einsatzbereich	-40 bis $+80^\circ\text{C}$

Abb. 14.16 Registrierung eines Pyranometers v. 27.04.2010 am MOL



In der Meteorologie, Klimatologie und der ZAMF Braunschweig werden Pyranometer eingesetzt, aber auch bei der Forschung zur Solarenergie und in der Bauphysik. An 115 Stationen des DWD mit Strahlungsmessungen werden die verschiedenen Typen von Pyranometern CM21, CM22, CM11, CM6b der Firma Kipp & Zonen und PSP, des Herstellers Eppley eingesetzt. Davon messen alle die Globalstrahlung, 113 (9/2011) die diffuse Himmelstrahlung und 9 (9/2011) die atmosphärische Wärmestrahlung. Auf der FS METEOR (siehe 19.5.6.2) wird ebenfalls ein Pyranometer CM21 und **CMP21** eingesetzt. Letzteres entspricht im Wesentlichen dem CM22 (Tab. 14.7), jedoch mit einem Spektralbereich von $0,310$ bis $2,80 \mu\text{m}$. Es wird u. a. auch im SwissMetNet verwendet.

Pflege und Kontrolle der Funktionstüchtigkeit

Strahlungsmessgeräte sind stets sauber zu halten, da Schmutz auf der äußeren Halbkugel den Strahlungseinfall behindert. Reifansatz, der nicht von der Heizung verhindert werden konnte, muss vor Sonnenaufgang beseitigt werden und kann ein Hinweis auf eine defekte Heizung sein. Ebenso müssen Schnee und durch gefrierenden Niederschlag entstehende Eisschicht laufend entfernt werden. Darüber hinaus ist die äußere Glashaube auf Beschädigungen und Verkratzungen, z. B. durch Hagel, zu überprüfen.

Im Winter muss das Drahtgitter (Insektenschutz) am Luft-einsaugstutzen der Belüftung abgenommen werden, da es sich durch Schnee oder Reif zusetzen kann. Die Belüftung ist täglich zu kontrollieren.

Zeigt das als Trockenmittel eingesetzte Blaugel einen Wechsel der Indikatorfärbung nach rosa, ist es nicht mehr fähig, weiteren Wasserdampf aufzunehmen. In einem 2-monatigen Rhythmus ist es auszutauschen. Es sollte nicht solange gewartet werden, bis sich unter den Glashauben Kondenswasser gebildet hat. Ist das Blaugel funktionsfähig, beschlägt aber dennoch die Glashaube von innen, ist möglicherweise der Verbindungsschlauch zum Blaugelbehälter defekt.

Die waagerechte Ausrichtung der Geräte ist mindestens einmal monatlich mit Hilfe der angebauten Dosenlibelle zu überprüfen. Der Horizont der Strahlungsmessgeräte ist vierteljährlich hinsichtlich etwaiger Veränderungen durch Bewuchs oder Bebauung zu überprüfen.

Sonnenscheinpyranometer SPN1

Der Sensor SPN1 der Fa. Delta-T Devices besteht aus 7 Sensoren, die sich auf einer horizontalen Fläche befinden, auf der ein Abschattungselement befestigt und so ausgerichtet ist, dass immer mindestens ein Sensor abgeschattet und ein anderer der Sonne ausgesetzt ist. Durch die Messung der Signale der 7 Sensoren können die Globalstrahlung G und die diffuse Strahlung D ermittelt werden und aus der Differenz der Anteil der direkten solaren Strahlung berechnet werden. Der Sensor beginnt zu messen, wenn G den Wert von 24 W m^{-2} übersteigt und das Verhältnis G/D größer ist als 1.57.

Dieser Sensor misst neben der globalen und diffusen Strahlung auch die Sonnenscheindauer. Der Sonnenscheindauer-Ausgang zeigt an, ob die Bestrahlungsstärke der direkten Strahlung die WMO-Schwelle von 120 W/m^2 überschreitet. Die Strahlungsausgänge sind cosinus-korrigiert.

Abb. 14.17 Sonnenscheinpyranometer SPN1 (Delta-T Devices)



Tab. 14.9 Spezifikationen SPN1 (Delta-T Devices)

Spektralbereich	0,40 bis 2,70 μm
Messbereich direkte und diffuse Strahlung	0 bis 2000 W m^{-2}
Häufigkeit der Werterfassung durch Datenlogger bestimmt	1 Hz
Ungenauigkeit Sonnenscheindauer Globale und diffuse Strahlung	$\pm 10 \%$ $\pm 8 \%$
Einsatzbereich	-20 bis +70 $^{\circ}\text{C}$

Das Gerät ist dank seiner Heizung (20 W) auch bei winterlichen Wetterbedingungen einsetzbar. Zudem befindet es sich unter einer ventilierten Haube, wie sie auch für das Pyranometer CM21 von Kipp & Zonen verwendet wird; dies ermöglicht ein einwandfreies Funktionieren unter fast allen Bedingungen. Da das Instrument keine beweglichen Teile besitzt, kann von einer langen Lebensdauer ausgegangen werden.

Was die Messung der Globalstrahlung anbelangt, ergab ein Vergleich zwischen dem SPN1 und dem CM21, das gegenwärtig im SwissMetNet eingesetzt wird, an der Station Moléson ausgezeichnete Resultate (Regression von 1.02 zwischen den beiden Datenserien, mit einem r^2 von 1.00).

Das Sonnenscheinpyranometer SPN1 wird im neuen meteorologischen Messnetz Swiss MetNet den Sensor Hänni Solar 111B sukzessiv ersetzen, da die Produktion vom Hänni eingestellt wurde. Geräte des Typs SPN1 sind auch am MOL in Erprobung.

Sonnenscheingeber Hänni Solar 111B

Dieser Sensor der Fa. Hänni ist im bisherigen SwissMetNet und u. a. an der Antarktisstation des Alfred Wegener Instituts (AWI) eingesetzt. Die direkte Strahlung wird auf einer ebenen Fläche gemessen, die im rechten Winkel zur Achse des Messgerätes steht.

Abb. 14.18 Sonnenscheingeber Hänni Solar111B



Insgesamt befinden sich mit einem Film beschichtete 6 Solarzellen auf einem Zylinder, dessen Achse parallel zur Rotationsachse der Erde steht. Dadurch beträgt der Winkel δ für praktisch alle Positionen der Sonne immer ungefähr 90° und der Sinus damit 1. Ein rotierender Abschattungstreifen verdeckt die Sonne 24 mal pro s. Durch die Rotation des Abschattungstreifens entsteht ein Zyklus, während dessen die Solarzellen abwechselungsweise beschattet oder der Sonne ausgesetzt sind. Verdeckt der Abschattungstreifen die Sonne, liefert das Total aller Dioden ein zur diffusen Strahlung proportionales Signal. Verdeckt er die Sonne nicht, liefert das Total der Dioden ein zur globalen Strahlung proportionales Signal. Die Differenz zwischen den beiden Werten ergibt dann die gesuchte direkte Strahlung. (R. Philipona, A. Heimo, B. Hoegger, Investigations of solar radiation detectors using a laboratory test facility for solar radiation meteorological instrument, Solar energy, 1993, Vol. 51, 159-163).

Messung der UV-Strahlung

Die solare UV-Strahlung wird mit qualitativ hochwertigen Geräten im Wellenlängenbereich von ca. 0,29 μm bis 0,4 μm , d. h. sowohl im UV-A (0,315 μm bis 0,4 μm) – als auch im UV-B-Bereich (0,280 μm bis 0,315 μm) gemessen. Auf

Grund der geringen Zeitintervalle zwischen aufeinander folgenden Messungen von 6 min Dauer können auch kurzzeitige Veränderungen der UV-Strahlung, z. B. an wechselhaft bewölkten Tagen genau erfasst werden.

UV-Sensor (UVS-AE-T)

Von dem spektralen Pyranometer UVS-AE-T der Fa. Kipp & Zonen, welches u. a. auf der FS METEOR (siehe 19.5.6.2) eingesetzt wird, werden von der aus dem oberen Halbraum auf eine horizontale Empfangsebene einfallenden Globalstrahlung die Summen aus direkter und diffuser Solarstrahlung gemeinsam erfasst. Für die UV-Komponenten UV-A und UV-B werden unterschiedliche Filter eingesetzt, so dass die Spektralbereiche des UV getrennt erfasst werden können.

Abb. 14.19 UV-Sensor UVS-AE-T (Kipp & Zonen)



Die über die Messzelle aufgesetzte feste Quarz-Halbkugel lässt nur die UV-Komponenten der Solarstrahlung zur geschwärzten Messfläche gelangen. Durch die unterschiedliche Erwärmung von Messfläche und Gehäuse entsteht eine Thermospannung, die direkt proportional zur Bestrahlungsstärke der jeweiligen UV-Komponente ist. Das Ausgangssignal (mV) des Sensors ist direkt proportional der Bestrahlungsstärke der o.a. Spektralbereiche. Durch Eingabe der Kalibrierfaktoren – getrennt für den UV-A- und UV-B-Anteil – in die Messwerterfassungsanlage METCO (siehe 19.5.6.2) der FS METEOR erfolgt die Ausgabe der Bestrahlungsstärken für beide Komponenten standardmäßig als 10 min-Mittelwerte in $W m^{-2}$.

14.4.2 Pyrheliometer

Mit einem Pyrheliometer wird die direkte (kurzwellige) Sonnenstrahlung im Spektralbereich von $0,2 \mu m$ bis $4 \mu m$, also die Bestrahlungsstärke E_e (in $W m^{-2}$) und die Strahldichte L_e ($W \cdot m^{-2} sr^{-1}$) gemessen. Mit einem vollen Öffnungswinkel von 5° wird bei einem Pyrheliometer von einer schwarzen Thermosäule oder einem schwarzen Thermometer, bestehend aus einem schwarz gefärbten Metallstreifen oder einem schwarzen Hohlkörper bekannter Wärmekapazität, die Strahlung absorbiert und es erwärmt sich dadurch. Dies wird erreicht durch die Form der Kollimationsröhre, mittels Präzisionsblenden und durch das Detektorelement. Aus der Erwärmung kann dann die Strahlungsflussdichte φ_e berechnet werden. Die Temperatur des erwärmten Thermometers wird mit einem zweiten Thermometer verglichen, das vor der Sonnenstrahlung abgeschattet ist und auf Lufttemperatur gehalten wird. Um eine Abkühlung des durch die Strahlung erwärmten Thermometers durch den Wind zu verhindern,

wird über dem exponierten Thermometer eine durchsichtige Kalotte (Halbkugel) angebracht. Die Genauigkeit der Geräte ist abhängig von der Kalibrierung und liegt im besten Fall bei ca. 3 %. Der Empfänger des Pyrheliometer muss immer senkrecht (normal) zur Einfallrichtung der Sonnenstrahlung ausgerichtet sein. Dazu muss das Gerät automatisch mit einem Trackingsystem (Sonnenfolger) der Sonne nachgeführt werden. Abhängig von der Art der windschützenden Abdeckung kann mit Quarzglas nur der kurzwellige Strahlungsanteil, mit Kunststoff die gesamte Strahlung gemessen werden.

Die Thermosäule CA2 dient der Messung des Strahlungsflusses im Bereich von $0,3 \mu m$ bis $50 \mu m$. Sie besitzt ein abnehmbares Glasfenster, das Sichtfeld beträgt 20° (90 %). Es ist in ein Messinggehäuse eingebaut, da es für den ungeschützten Einsatz im Freien sonst nicht geeignet ist.

Tab. 14.10 Spezifikationen CA2 Thermosäule

Spektralbereich mit Glasfenster	$0,3$ bis $30 \mu m$
ohne Glasfenster	$0,2$ bis $50 \mu m$.
Ansprechzeit	<18 sec (95 %),
Nichtlinearität	<3 %,
Empfindlichkeit	7 bis $20 \mu V$ pro $W m^{-2}$

Pyrheliometer CHP1

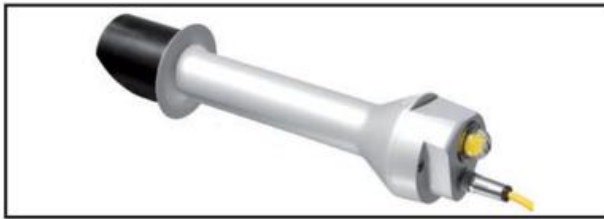
Zur Messung der direkten Strahlung unter normalen Bedingungen wird das Pyrheliometer CHP1 der Fa. Kipp & Zonen eingesetzt. Es ist mit einem integrierten $10 k\Omega$ -Thermistor als auch einem Pt 100-Sensor ausgestattet, so dass das für jedes Gerät individuell dokumentierte Temperaturverhalten berücksichtigt werden kann. Das Gerät muss auf einem Trackingsystem (Zweiachsenverfolger) automatisch der Sonne nachgeführt werden. Die vordere Blendenöffnung mit einem Quarzfenster dient zum Schutz des Gerätes und als Filter, die die solare Strahlung nur im Wellenlängenbereich von $0,20 \mu m$ bis $4 \mu m$ durchlässt. Das CHP1 ist mit einer Regenschutzabdeckung und integrierten Justierhilfen ausgestattet.

Tab. 14.11 Spezifikationen Pyrheliometer CHP1 (Kipp & Zonen)

ISO Klassifikation	First Class
Spektralbereich (50 % Punkte)	$0,20$ bis $4,00 \mu m$
Ansprechzeit (95%)	5 s
Stabilitätsabweichung	$\pm 0,5$ %
Nichtlinearität (0 bis $1000 W m^{-2}$)	$\pm 0,2$ %
Impedanz	10 bis 100Ω
Temperaturabhängigkeit der Empfindlichkeit	$\pm 0,5$ % zw. -20 bis $+50^\circ C$
Empfindlichkeit	7 bis $14 \mu V$ pro $W m^{-2}$
max. Strahlungsaufnahme	$4000 W m^{-2}$
voller Sichtfeldwinkel	$5^\circ \pm 0,2^\circ$
Neigungswinkel	$1^\circ \pm 0,2$
Betriebstemperatur	-40 bis $+80^\circ C$

Da das CHP1 ein enges Gesichtsfeld hat, geht das Ausgangssignal bei bewölktem Himmel gleich auf Null zurück.

Abb. 14.20 Pyrheliometer CHP 1 (Kipp & Zonen)



Jedes CHP 1 wird nach Fertigung kalibriert und ist gelieferter Standard mit einer WRR nachweisbaren Kalibrierungsbescheinigung. Es übertrifft auch die Anforderungen des Baseline Surface Radiation Network – BSRN (siehe 14.8).

Messung der UV-Strahlung mit externem Sensor UVA-UVB-Radiometer UV34

Das UVA-UVB-Radiometer ist ein Gerät zur Messung der UV-Strahlung im Wellenlängenbereich von 0,29 μm bis 0,39 μm . Der UV-Messer ist durch den externen Sensor flexibel bei der Strahlungsmessung einsetzbar.

Tab. 14.12 Spezifikationen UVA-UVB-Radiometer

Lichtsensor	Photodiode mit UV-Korrekturfilter
Wellenlänge	Bandbreite 0,29 bis 0,39 μm
zwei Messbereiche	0,000 bis 1,999 m W cm^{-2} 1,999 bis 19,99 m W cm^{-2}
Auflösung	0,001 m W cm^{-2}
Genauigkeit	$\pm 4\%$ + 2 Stellen
Messrate	0,4 s
Nullstellung	mittels Kalibrierschraube
Speicher	Hold Auto-Power-Off automatisch nach 10 min ohne Betätigung
Einsatzbedingungen	0 bis +50 °C, max. 80 %
Betriebsversorgung	1 x 9 V Block-Batterie (PP3)

Einsatzgebiete dieses Sensors sind: UV-Strahlensterilisation, in Laboratorien, u. a. Virologie und DNA-Forschung. Auch in der Industrie tritt häufig eine zu hohe UV-Strahlung auf (Lichtbogen beim Schweißen), die mit diesem Sensor gemessen werden kann.

PAR Sensor

Die photosynthetisch aktive Strahlung kann z. B. mit einem PAR-(Photosynthetic Activ Radiation)Sensor der Fa. Friedrichs gemessen werden. Die Empfindlichkeit entspricht dem optimalen Wirkungsgrad von Chlorophyll. Die Messergebnisse ermöglichen eine zuverlässige Beurteilung der Entwicklungsbedingungen von Pflanzen. Somit kann auch mit Hilfe des PAR Sensors fotochemische Entwicklungsprozesse von Freiland- und Gewächshauspflanzen optimiert werden.

Das Einsatzgebiet von PAR-Sensoren liegt hauptsächlich im Bereich agrarmeteorologischer Messungen (siehe 15.).

Abb. 14.21 PAR-Sensor (Friedrichs)



Der PAR-Sensor entspricht diesen Vorgaben. Der Dom ist aus PMMA und UV-durchlässig.

Tab. 14.13 Spezifikationen PAR-Sensor (Friedrichs)

Messbereich	0 bis ca. 250 W m^{-2}
spektr. Empfindlichkeit	0,38 bis 0,70 μm
max. spektr. Empf	0,42 μm und 0,60 μm
Linearität	<1 %
Absoluter Fehler	<12 %
Einsatztemperatur	-20 °C bis +60 °C
Signalausgang	0 bis 5 V oder 0/4 bis 20 mA
Energieversorgung	9 bis 30 V DC
Diffusor (Streuscheibe)	PTFE (Teflon)

14.5 Sensoren/Messgeräte für die langwellige Strahlung und Globalstrahlung

Pyrgeometer

Pyrgeometer (Infrarot-Pyranometer) erfassen die langwellige (Wärme-)Strahlung im fernen Infrarot (FIR) im Bereich von ca. 5 μm bis 50 μm aus dem oberen (und unteren) Halbraum auf eine horizontal ausgerichtete Empfangsfläche. Der Sensor erzeugt eine Spannung, die in direkter Relation zur Nettostrahlung im FIR steht. Durch bestimmte Berechnungen kann so die nach unten gerichtete Langwellenstrahlung abgeleitet werden.

Ein Netto-Pyrgeometer besteht aus der Kombination von 2 Pyrgeometern, eines in Richtung Atmosphäre und eines nach unten Richtung Erde gerichtet. Mit dieser Anordnung kann sowohl die abwärts gerichtete als auch die aufwärtsgerichtete langwellige Infrarotstrahlung gemessen werden und damit die Strahlungsbilanz Q_5 berechnet werden.

Pyrgeometer CGR3/CGR4

Je nach Montage eines Sensors CGR3/CGR4 der Fa. Kipp & Zonen misst er entweder die abwärts oder aufwärts gerichtete langwellige Himmelsstrahlung im Messbereich zwi-

schen $4,5 \mu\text{m}$ bis $42 \mu\text{m}$. Die erzeugte Thermospannung ist damit proportional zur Strahlung im FIR-Bereich. Diese Sensoren besitzen ein spezielles Silikonfenster. Im Innenbereich blockiert ein Blindfilter die solare Strahlung.

Abb. 14.22 CGR3 (Kipp & Zonen)



Tab. 14.14 Spezifikationen Pyrgeometer CGR3/CGR4 (Kipp&Zonen)

	CGR3	CGR4
Spektralbereich	4,5 bis 42 μm	
Ansprechzeit	<18 s	
Empfindlichkeit	5 bis 7 μV pro W m^{-2}	
Nichtlinearität	<1 %	
Thermosäulenausgabebereich	-250 bis +250 W m^{-2}	
Temperaturabhängigkeit	-10 bis +40 °C <5 %	-20 bis +50 °C <1 %
Temperaturbereich	-40 bis +80 °C	
Sichtfeld	150 °	180 °

Pyrgeometer CG 4

Im DWD und an der Bordwetterwarte der FS METEOR (siehe 19.5.6.2) werden Pyrgeometer CG 4 der Fa. Kipp & Zonen eingesetzt. Die über die Messzelle aufgesetzte feste kristalline Halbkugel (Dom) hat auf der Innenseite einen Blindfilter, der sämtliche Solarstrahlung blockiert und so nur die langwellige Wärmestrahlung des Spektralbereichs von $4,5 \mu\text{m}$ bis $42 \mu\text{m}$ zur geschwärzten Messfläche gelangen lässt. Durch die unterschiedliche Erwärmung von Messfläche und Gehäuse entsteht eine Thermospannung, die direkt proportional zur Bestrahlungsstärke ist.

Tab. 14.15 Spezifikationen Pyrgeometer CG4 (Kipp&Zonen)

ISO Klassifikation	Secondary Standard
Spektralbereich	4,5 bis 42 μm
Ansprechzeit (63 %)	<8 s
Thermosäulenausgabebereich	-250 bis +250 W m^{-2}
Temperaturabhängigkeit	< \pm 1 % zw. -20 bis +50 °C
Empfindlichkeit	10 μV pro W m^{-2}
Temperaturbereich	-40 bis +80 °C
Sichtfeld	180 °

Da das Pyrgeometer durch die einfallende Strahlung erwärmt wird, wird am Messsignal eine Korrektur bezüglich der Gerätetemperatur angebracht. Die thermische Stabilität des Domes macht Temperaturmessungen am Dom überflüssig, sodass keine weiteren Korrekturen erforderlich sind.

Abb. 14.23 Pyrgeometer CGR 4 (Kipp & Zonen)



Um Schiffsbewegungen auszugleichen, ist das Pyrgeometer auf der FS METEOR kardanisch aufgehängt. Durch Eingabe des Kalibrierfaktors in die Messwerterfassungsanlage METCO (siehe 19.5.6.2) auf der FS METEOR erfolgt die Ausgabe der Bestrahlungsstärke in W m^{-2} , standardmäßig als 10 min-Mittelwert.

Abb. 14.24 Solartracker 2AP (Kipp & Zonen)



Pyrgeometer PIR

Das Messprinzip des Präzisions-Infrarot-Radiometer (PIR) der Fa. Eppley beruht auf der Messung des Austausches der Strahlung zwischen einer horizontalen, geschwärzten Oberfläche als Referenzgröße und einem beobachteten Objekt (z. B. Himmel). Es dient zur Messung der atmosphärischen Gegenstrahlung G_5 (W m^{-2}). Die Messung erfolgt im Gegensatz zum Netto-Radiometer (siehe 14.6.1) getrennt zwischen eingehender (kurzwelliger) Strahlung und ausgehender terrestrischer Strahlung. Die Trennung wird durch eine Silikon-Glaskuppeln erreicht. Im inneren Vakuum befindet sich ein Interferenzfilter mit einer Durchlässigkeit von $3,5 \mu\text{m}$ bis $50 \mu\text{m}$, im Wechsel zwischen maximal durchlässig und undurchlässig.

Die PIR umfasst eine kreisförmige Thermosäule mit 4 Thermistoren, von denen 3 ($10 \text{ k}\Omega$ 25°C) zur Messung der Glaskuppel und einer zur Messung des Messkörpers eingesetzt wird. Zusätzlich ist ein Thermistor zur Strahlungskompensation des Detektors vorhanden.

Abb. 14.25 Präzisions-Infrarot-Pyrgeometer (Eppley)



Tab. 14.16 Spezifikationen PIR(Eppley)

Spektralbereich	3,5 bis 50 μm
Ansprechzeit	<2 s (1/e Signal)
Empfindlichkeit	4 $\mu\text{V pro W m}^{-2}$
Impedanz	Ca. 700 Ω
Temperaturabhängigkeit der Empfindlichkeit	$\pm 1\%$ zw. -20 bis +40 $^{\circ}\text{C}$
Linearität 0 bis 700 W m^{-2}	$\pm 1\%$
Kosinus	besser als 5 %
Impedanz	ca. 700 Ω

Pyranometer und Pyrgeometer werden mit schwach vorgeheizter Luft ventiliert, um Raureifbildung und Nullpunktverschiebungen bei wolkenlosem Himmel und Windstille zu minimieren. Auf zwei unabhängig laufenden aktiven Solartrackern vom Typ 2AP (Abb. 14.24) sind die beschatteten Pyrgeometer, die Pyranometer zur Messung der diffusen Sonnenstrahlung und die Instrumente zur Erfassung der direkten Sonnenstrahlung montiert.

Im DWD werden an 11 Stationen des hochwertigen Strahlungsgrundmessnetzes mit Hilfe verschiedenen Typen von Pyrgeometern der Hersteller Epply (PIR) und Kipp & Zonen (CG4) die langwellige Strahlung gemessen.

14.6 Sensoren/Messgeräte für die kurz- und langwellige Strahlung und Globalstrahlung

14.6.1 Pyrradiometer

Netto-Radiometer CNR1

Pyrradiometer (Effektiv-Pyranometer) messen die einfallende kurz- und reflektierte (terrestrische) langwellige Strahlung (0 bis 30 μm) auf horizontalen Auffangflächen in 2 m Höhe. Dazu sind jeweils ein Messgerät nach oben und eines nach unten gerichtet. Der Empfindlichkeitsbereich liegt etwa zwischen 0,3 μm bis 60 μm .

Abb. 14.26 Netto-Radiometer CNR1 (Kipp & Zonen)



Die Sensoren bestehen aus zwei Blättchen, eines ist weiß und reflektiert das sichtbare Sonnenlicht, das andere ist schwarz und absorbiert die gesamte Sonnenstrahlung. Die Temperaturdifferenz wird mit einem Pt 100 oder einem Thermodetektor gemessen und als Maß für die Strahlungsbilanz (W m^{-2}) verwendet. CNR1 wird zukünftig durch das CNR4 (siehe dort) ersetzt!

Netto-Radiometer NR LITE

Das Netto-Radiometer NR LITE der Fa. Kipp & Zonen ist ein Einkomponenten-Netto-Radiometer mit einem Signalausgang für die Gesamtnettostrahlung. Die von der Erdoberfläche reflektierte und emittierte Strahlung (unterer Sensor) wird automatisch von der solaren Einstrahlung und der langwelligen Gegenstrahlung (oberer Sensor) subtrahiert. Das Ergebnis ist die Nettostrahlung. Der Temperaturfühler misst die der Nettostrahlung proportionale Temperaturdifferenz zwischen oberer und unterer Sensoroberfläche. Sein Thermoäulen-Detektor ist mit konischen Absorbern mit schwarzer Teflonbeschichtung oben und unten versehen. Dies sorgt für einen ausgedehnten spektralen Empfindlichkeitsbereich gegenüber UV-Strahlung bis hin zur fernen Infrarotstrahlung (FIR). Der Signalausgang stellt die Differenz zwischen Sonnen- und Himmelsstrahlung und der Oberflächenstrahlung dar und kann, je nach Wetterlage positiv oder negativ sein.

Abb. 14.27 Netto-Radiometer NR LITE (Kipp & Zonen)



Tab. 14.17 Spezifikationen Netto-Radiometer NR LITE (Kipp & Zonen)

Spektralbereich	0,2 bis 100 μm
Reaktionszeit	<20 s
Nennwiderstand	2,3 Ω
Beobachtungswinkel	180 $^{\circ}$
Signalbereich	-25 bis +25 mV
Sensorasymmetrie	$\pm 20\%$
Sensitivität (nominal)	10 mV pro W m^{-2}
Stabilität	< $\pm 2\%$ pro Jahr
Nichtlinearität	<1 % bis 2000 W m^{-2}
Richtungsfehler	<30 W m^{-2} (0 bis 60 $^{\circ}$, 1000 W m^{-2})
Betriebstemperatur	-30 bis +70 $^{\circ}\text{C}$

Der eine Signalausgang bedeutet, dass die kurzwelligen (0,3 μm bis 3,0 μm), langwelligen (4,5 μm bis 40,0 μm), nach oben und unten gerichteten Strahlungskomponenten

nicht getrennt werden können. Für diesen Zweck gibt es die Zwei- oder Vierkomponenten-Nettoradiometer. Zusammen mit einem Albedometer ist die Berechnung der langwelligen Strahlungsströme möglich.

Netto-Radiometer CNR4

Das CNR 4 Netto-Radiometer der Fa. Kipp & Zonen wird an mobilen Messeinheiten des DWD (siehe 19.5.4) eingesetzt und entspricht dem WMO-Standard. Es kombiniert je zwei Pyranometern und Pyrgeometern, wobei jeweils ein Gerät nach oben und das andere nach unten gerichtet sind. Alle zusammen messen die Energiebilanz zwischen kurzwelliger und langwelliger Strahlung, sowie die Albedo, die aus der nach oben und nach unten gerichteten kurzwelligen Strahlung, durch Subtraktion berechnet werden kann.

Abb. 14.28 Netto-Radiometer CNR 4 (Kipp & Zonen)



Das CNR4 ist mit integriertem 10 K Thermistor und Pt 100 mit 4 Sensoren in einem Gehäuse ausgestattet. Die 4 Sensoren haben unterschiedliche Empfindlichkeiten und werden separat kalibriert. Alle 4 Signale sind nach außen geführt.

Tab. 14.18 Spezifikationen Netto Radiometer CNR4 (Kipp&Zonen)

	Pyranometer	Pyrgeometer
Spektralbereich	0,310 bis 2,80 μm (50 Punkte)	4,5 bis 42 μm (50 Punkte)
Empfindlichkeit	10 bis 20 μV^{-1} pro W m^{-2}	5 bis 15 μV^{-1} pro W m^{-2}
Richtungsfehler	<20 W m^{-2} (80° bei 1000 W m^{-2})	
Sichtfeld	180°	obere 180°, untere 150°
Nichtlinearität	<1 % (Vollbereich)	
Ansprechzeit	<18 s (95 %)	
Temperaturabhängigkeit	-10 bis +40 °C <5 %	
Einsatzbereich	-40 bis +80 °C, 0 bis 100 %	
Stromversorgung	8 bis 13,5 V DC, 5 W/10 W mit Heizung	

Abb. 14.29 Netto-Radiometer CNR 4, Unterseite (Kipp & Zonen)



Das CNR 4 ist ausgesprochen leicht und mit einem integrierten Sonnenschirm versehen, um die Auswirkungen thermischer Effekte auf die Messung zu reduzieren. Der meniskusförmige Dom des oberen Pyrgeometers sorgt für eine verbesserte Messung langwelliger Strahlung. Die optionale Ventilationseinheit CNF 4 verhindert die Anlagerung von Schmutz, Feuchtigkeit, Tau und Frost auf den Sensoren.

14.6.2 SCAPP-Messung der Strahlung und der Sonnenscheindauer

Die abkürzende Bezeichnung SCAPP steht für **SC**Anning **Py**rheliometer/**Py**ranometer. Die Entwicklung des SCAPP wurde 1992 am Meteorologischen Observatorium Hamburg (MOH) begonnen, wobei es sich um eine Weiterentwicklung des am Instrumentenamtes Hamburg entwickelten Sonnenscheindauersensors SONIE handelt. Das Gerät wird von der Fa. Siggelkow Gerätebau, Hamburg hergestellt. Im DWD sind an den meisten Wetterwarten und Wetterstationen und an den Stationen des GeoInfoDBw SCAPP-Sensoren eingesetzt und meist auf einem separaten 6 m hohen Kippmast installiert.

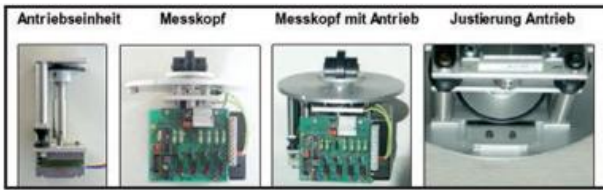
Abb. 14.30 SCAPP Strahlungs- und Sonnenscheindauersensor SCAPP (Siggelkow Gerätebau GmbH)



SCAPP misst sowohl die direkte I als auch die diffuse kurzwellige Sonnenstrahlung D mit einer Siliziumphotozelle und berechnet daraus die Globalstrahlung G und die Sonnenscheindauer SD . Damit ermöglicht SCAPP mit nur einem Gerät, was sonst mit herkömmlicher Sensorik nur mit mindestens zwei Messgeräten möglich ist. Es erfüllt die zugrunde gelegten WMO-Anforderungen.

Der Messeinsatz besteht aus dem Messkopf mit Antriebseinheit, dem Netzteil, der Steuerelektronik, der Prozessorplatine und dem Kammergehäuse mit der Erfassungselektronik.

Abb. 14.31 Aufbau des Messeinsatzes SCAPP (Siggelkow Gerätebau GmbH)



Ein rotierender Messkopf dreht sich unter einer Glaskalotte alle 2 s einmal um 360° . Der Messkopf verfügt über eine tortenförmige Schlitzblende. Unterhalb des Messkopfes ist eine Streuscheibe eingebaut. Das durch den Schlitz einfallende Licht wird über einen Lichtleiter (Glasstab) auf einen Siliziumdetektor geführt. Durch ein vorgesetztes Blaufilter wird ihre Response-Funktion dem natürlichen Strahlungsspektrum besser angepasst.

In jeder Umdrehung des Messkopfes, der den Himmelsraum permanent abscannt, werden 400 Messpunkte erfasst. Aus 18 Messpunkten um den Sonnenpeak werden die direkte I und aus 382 Messpunkten die diffuse Strahlung D bestimmt. Daraus werden die Globalstrahlung (14.2) und die Sonnenscheindauer SD aus $I > 120 \text{ W m}^{-2}$ berechnet. Erkennt das Gerät keinen Peak in Richtung Sonne, werden alle 400 Messwerte der diffusen Strahlung zugeordnet. Das Vorhandensein direkter Strahlung wird erst ab einem Sonnenwinkel von 2° berücksichtigt, darunter wird nur diffuse Strahlung gemessen.

Der Ausgabebereich der Sonnenscheindauer liegt zwischen 0 bis 60 s. Zusätzlich wird die Sonnenscheindauer kompatibel zum SONI-Sensor berechnet. Dabei wird laufend ermittelt, ob das Maximum der Direktstrahlung während einer 6 s -Einheit die Sonnenschwelle überschreitet. Ist das der Fall, wird für diese 6 s der Sonnenschein gewertet. Gleichzeitig wird im Gerät die Berechnung der Sonnenposition und der Messgrößen durchgeführt.

Tab.14.19 Spezifikationen SCAPP (Siggelkow Gerätebau GmbH)

Sensor	Siliziumphotozelle
Messbereich	kurzwellige Strahlung 0,3 bis 1,1 μm)
Kopfumlaufzeit	2 s
Schritte pro Kopfumlauf	400
Leistungsaufnahme	10 bis max. 30 W (inkl. Heizung)
Versorgungsspannung	12 bis 36 V DC oder 24 V AC (+5 % / -20 %)
Einsatzbereich	-30 bis +45 $^\circ\text{C}$
Temperaturschaltpunkte	
Heizung Innengehäuse	+30 $^\circ\text{C}$
Kammergehäuse	+35 $^\circ\text{C}$

Von diesen vier Strahlungskomponenten werden jeweils die letzten 30 der 2 s-Messwerte zur Bildung des gleitenden 1-min-Mittelwertes herangezogen und über eine serielle Schnittstelle wird von der Datenerfassung minütlich ein Telegramm ausgegeben.

Da zur Bestimmung der diffusen und der Globalstrahlung die Messwerte mit Winkelfunktionen rechnerisch auf horizontale Flächen umgerechnet werden müssen, ist bei der Installation des SCAPP die Eingabe des geografischen Standortes notwendig.

Temperatur und Feuchte werden zentral im Gehäuse gemessen. Mit Hilfe der drei Rändelfüße wird der Sensor unter Beobachtung der Nivellier Vorrichtung justiert.

Abb. 14.32 Nivellier Vorrichtung SCAPP (Siggelkow Gerätebau GmbH)



Pflege und Kontrolle der Funktionstüchtigkeit

Soweit der Sensor für das Personal an den Wetterwarten ohne Schwierigkeiten zugänglich ist – der Kippmast lässt sich problemlos kippen – beschränkt sich die Reinhaltung auf die den Messkopf nach oben abschließenden Glaskuppel. Diese kann durch Umwelteinflüsse verschmutzen. Es kommt auch vor, dass Vogelkot die Glashaube verunreinigt. Je nach Bedarf ist die Glaskuppel dann mit einem weichen feuchten Tuch, ggfs. mit Glasreiniger zu reinigen.

Eine Beobachtung der von der AMDA ausgegebenen Messwerte ist für die Überprüfung der ordnungsgemäßen Funktion auch möglich. Das heißt z. B., dass bei wolkenlosem Himmel nachts keine Strahlungswerte angezeigt werden dürfen.

14.7 Messunsicherheiten und Fehlerquellen

Beim **Sonnenscheinautograph** ist die Genauigkeit allein durch das Messprinzip des Einbrennens begrenzt. So wird

- eine Stunde auf einer Breite von 2 cm registriert
- erzeugt schon ein kurzer Sonnenstrahl einen runden Brennfleck, der in seiner Ausdehnung einem Zeitraum von 6 min entspricht
- daher kann durch viele kurze Einbrennlöcher der Eindruck eines dauernden Sonnenscheins entstehen
- durch das Gerät verursachte Fehler sind vernachlässigbar

Der Befall der Glaskugel mit Reif oder Schnee ist schwer zu unterbinden. Bei Schauerwetter liefert der nasse Papierstreifen keine Brenns pur, der täglich erforderliche Wechsel des Streifens verbietet den Einsatz des Instrumentes an unbemannten Stationen.

Beim **SONIe3** können folgende Probleme auftreten:

- Der Antrieb, der die „Belichtungsblende“ dreht kann ausfallen (Verschleißteil). Dadurch ruckelt der Blendenkopf oder dreht sich nur noch ungleichmäßig oder gar nicht mehr,
- Drehzahlüberprüfung: Messdauer 1 min – gezählte Umdrehungen: $>10 \text{ rpm}$, sonst bei $<10 \text{ rpm}$ SONI austauschen,

- Die Glaskuppel des SONI sollte regelmäßig gereinigt werden,
- Es kann vorkommen, dass die Glaskuppel des SONI von innen mit Kondenswasser beschlägt.

SCAPP

Die Erfahrungen beim DWD haben gezeigt, dass das SCAPP mit einer Genauigkeit von nur $\pm 20\%$ arbeitet. Die Geräte haben sich auch als nicht sehr stabil herausgestellt, was nach nur 2 Jahren Gerätlauzeit noch größere Abweichungen ergeben hat.

Die in der Vergangenheit zur Messung der Strahlungsbilanz häufig eingesetzten Radiometer, die sowohl kurz- als auch langwellige Strahlung erfassen, werden zunehmend durch genauere Messgeräte ersetzt, welche die vier Strahlungsbilanzkomponenten direkt messen. Die daraus bestimmten Strahlungsbilanzen sind in der Regel größer als die mit Radiometer gemessenen [6].

14.8 Nationales/Regionales Strahlungszentrum am MOL

Das Meteorologische Observatorium Lindenberg (MOL) ist als Nationales Strahlungszentrum bzw. Nationale Strahlungszentrale im Rahmen des DWD für die Kalibrierung, Standardisierung und Kontrolle der Strahlungsmessinstrumente, die im Messnetz des DWD eingesetzt werden verantwortlich. Zur Sicherung der weltweiten Vergleichbarkeit der im Strahlungsmessnetz gewonnenen Daten wird das zur Kalibrierung benutzte nationale Standardradiometer alle fünf Jahre bei Internationalen Pyrheliometervergleichen (IPC) mit der Weltstandardgruppe verglichen. Diese Vergleiche finden am Weltstrahlungszentrum der WMO am Physikalisch-Meteorologischen Observatorium Davos (PMOD) statt und dienen der direkten „Anbindung“ der nationalen Messungen an die World Radiometric Reference (WRR).

Neben der Aufgabe als Nationales Strahlungszentrum ist das MOL auch eine von 7 regionalen europäischen Strahlungszentralen im Rahmen der WMO (Regional Association – RA VI – Europa), um zusätzliche Vergleiche anderer nationaler Standardradiometer im europäischen Bereich zu ermöglichen. Die Aufgaben und Funktionen der Strahlungszentren auf den verschiedenen Stufen sind in Spezifikationen der WMO geregelt.

Als Standardradiometer Strahlungszentrums dienen im MOL die drei Absolutradiometer PMO6-5, PMO6 81103 und HF 27157. Mit diesen nimmt der DWD seit Mitte der 80-er Jahre an den IPC teil. Diese Standardradiometer, die die direkte Sonnenstrahlung auf die Normalfläche (Fläche, deren Normale zur Sonne gerichtet ist) messen, dienen als Basis für die Kalibrierung der Standardpyranometer, zur Messung der Globalstrahlung. Die Übertragung der WRR von den Absolutradiometern auf die Standardpyranometer (Kalibrierung) erfolgt mittels der Schattenmethode durch Vergleich vor Sonne. Diese Methode kann nur bei wolkenlosem Himmel durchgeführt werden.

Da es viele unterschiedliche Pyranometertypen gibt, wurde am Nationalen Strahlungszentrum ein Satz von Standardpyranometern mittels der Schattenmethode erzeugt. Diese Gruppe besteht aus den im DWD verwendeten und auch

sonst häufig genutzten Geräte vom Typ CM22, CM21, CM11, CM6b der Fa. Kipp & Zonen und PSP des Herstellers Eppley. Diese Geräte werden, soweit das die Wetterbedingungen erlauben, regelmäßig mit den Absolutradiometern kalibriert.

Die Kalibrierung der Feld- oder Messnetzpyranometer wird, um unabhängig vom Wetter zu sein, im Labor vor einer künstlichen Lichtquelle durchgeführt. Dabei dient die Lichtquelle nicht als Referenz. Die Bestimmung der Empfindlichkeit des zu prüfenden Pyranometers wird durch den Vergleich mit dem „vor Sonne“ kalibrierten Standardpyranometer gleichen Typs vorgenommen. Da sich das Sonnenspektrum und das einer künstlichen Lichtquelle unterscheiden, ist dies notwendig, um Fehler zu vermeiden.

SPECTRO 320D

Der SPECTRO 320 ist als Einzel-Monochromator und als Doppel-Monochromator SPECTRO 320D der Fa. Instrument Systems verfügbar. Das Doppelmonochromator-Spektralradiometer des Typs SPECTRO 320D erfasst einmal pro Minute Spektren im Bereich von $0,29\ \mu\text{m}$ bis $0,45\ \mu\text{m}$ mit einer Scan-Zeit von jeweils 23 s. Auf Grund der geringen Messzeit werden kurzzeitige Änderungen der Solarstrahlung als Folge von Bewölkungsänderungen erfasst. Die kürzeren Zeitschritte der Spektralmessungen gewährleisten eine bessere Zuverlässigkeit und zeitliche Repräsentativität der aus den Messungen abgeleiteten klimatologischen Parameter, beispielsweise Stunden- und Tagessummen.

Abb.14.33 SPECTRO 320D (Instrument Systems)



SPECTRO 320 beruht auf einer Fast-Scanning-Technologie, die präzise Messungen bei hoher Signaldynamik und kurzen Messzeiten ermöglicht. Er verfügt zudem über zahlreiche Ausstattungsmerkmale, die ihn zu einem universellen, vielseitig einsetzbaren Spektrometer machen. Den Spektralbereich erfasst er in einem einzigen Scan in der maximalen Ausbaustufe mit 3 Gitter und 3 Detektoren.

Abb. 14.34 Spektren der UV-Globalstrahlung aus Messungen mit Spektralradiometer SPECTRO 320D

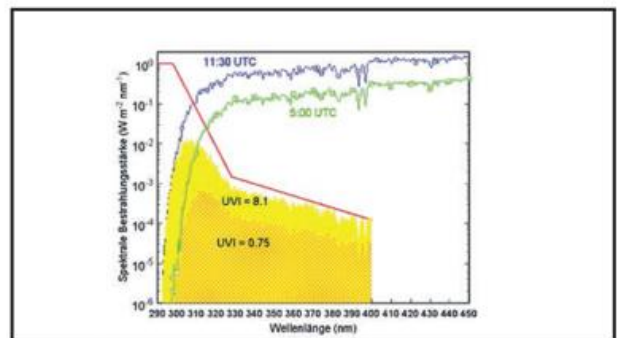


Abbildung 14.34 zeigt Spektren der UV-Globalstrahlung aus Messungen mit einem SPECTRO 320D vom 23. Juni 2005 um 05:00 UTC (grüne Kurve) und 11:30 UTC (blaue Kurve) am MOL. Produkte aus der spektralen Bestrahlungsstärke und dem Erythemwirkungsspektrum (rote Linie) für die zwei Messzeiten schraffiert dargestellt. Die Flächen unter diesen Kurven entsprechen der erythem-wirksamen Strahlung. Der UV-Index beträgt um 05:00 UTC 0.6 und um 11:30 UTC 8.1. Das 40-fache der so bestimmten erythemwirksamen Strahlung wird als UV-Index bezeichnet.

Insbesondere beim SPECTRO 320D kommen die Vorteile des Scanning-Prinzips von Instrument Systems zum Tragen: Die Beugungsgitter der beiden Einzel-Monochromatorstufen sind auf der gleichen Drehachse montiert, so sind Synchronisationsprobleme prinzipbedingt ausgeschlossen und kurze Messzeiten bei hoher Wellenlängengenauigkeit garantiert.

Tab. 14.20 Spezifikationen SPECTRO 320D (Instrument Systems)

Max. Wellenlängenbereich	0,19 bis 5,00 μm (3 Gitter und 3 Detektoren)
Spektralaufösung	0,002(0,07 *HR) bis 0,010 μm ; programmierbares Spaltrad
Datenpunktintervall	0,05 nm (0,01 nm *HR)
Wellenlängen- genauigkeit	$\pm 0,1$ nm; ($\pm 0,03$ nm *HR)
Signalempfindlichkeit	Si-Detektor: $5 \cdot 10^{-11}$ W nm $^{-1}$; PMT: $5 \cdot 10^{-15}$ W nm $^{-1}$
Scan-Zeit	10 bis 100 ms nm $^{-1}$
Streulicht	SPECTR 320 10^{-6} , SPECTRO 320D 10^{-9}

Die bisher gemachten Ausführungen zur Kalibrierung beziehen sich auf die breitbandige kurzwellige Strahlung im Bereich vom 0,3 μm bis 3 μm . Kalibrierungen von Pyrgeometern, die die langwellige Strahlung im Spektralbereich von > 3 μm bis 50 μm messen, werden mittels einer am PMOD kalibrierten Gruppe von vier Pyrgeometern, bestehend aus je zwei Präzisions-Infrarot-Radiometer (PIR) und CG4 (siehe 14.5) durchgeführt.

Die mit dem Bentham-Gerät DTMC300 gemessenen Spektren sind Bestandteil des solaren UV-Monitoring-Netzes in Deutschland (siehe 19.5.7 und Anhang 7.3).

BSRN-Station

Das MOL betreibt seit Oktober 1994 im Rahmen des Baseline Surface Radiation Network (BSRN) eine Strahlungsmessstation. Das BSRN gilt als das globale Referenzmessnetz zur Beobachtung des Strahlungsfeldes der Erdoberfläche. Die Station ist damit eine von etwa 40 Stationen weltweit in diesem Messnetz. Das BSRN dient der hochgenauen und langjährigen Messung der am Boden ankommenden Strahlungsströme, um Änderungen im Strahlungsklima frühzeitig zu erkennen, Satellitendaten zu validieren und Klimamodelle zu überprüfen. Nur mit qualitativ hochwertigen, konsistenten und langjährigen Beobachtungen können Aussagen über weltweite Änderungen der Strahlungsflüsse gemacht werden. Daher kommt deren

systematischen Archivierung eine große Bedeutung zu. Dazu werden die Globalstrahlung, die diffuse Sonnenstrahlung, die direkte Sonnenstrahlung auf die Normalfläche und die Wärmestrahlung der Atmosphäre gemessen. Mittelwerte und deren Standardabweichung sowie Minimum und Maximum der vier Strahlungsgrößen werden für jede Minute aus den mit einer Frequenz von 1 Hz (jede Sekunde) erfassten Messwerten berechnet. In Lindenberg werden alle Größen zur Erhöhung der Sicherheit doppelt erfasst.

Die Messung der Global- und diffusen Sonnenstrahlung erfolgt jeweils mit Pyranometern vom Typ CM22 und CM21 (siehe 14.4.1). Für die Messung der direkten Sonnenstrahlung werden Pyrheliometer vom Typ CH1 (siehe 14.4.2) und besonders präzise Absolutradiometer vom Typ AHF benutzt. Die Messungen mit dem AHF erfolgen jedoch nicht ununterbrochen, da sich diese Geräte zu Beginn jeder halben Stunde für etwa 3 min selbst kalibrieren.

Die Daten stehen im Weltdaten Monitoring Zentrum (WRMC) in Zürich in erster Linie zur Auswertung für die o. g. Aufgaben zur Verfügung. Die aktuellen Daten der BSRN-Station stehen als Grafiken für die kurzwelligen Größen (Global-, diffuse und direkte Sonnenstrahlung) und die langwellige Wärmestrahlung der Atmosphäre zur Verfügung.

14.9 Strahlungsmessungen an der Antarktisstation

Das meteorologische Observatorium an der Georg-von-Neumayer-Station des Alfred-Wegener-Instituts (AWI) liefert seit 1981 für die Klimaforschung relevante Daten und dient als Wettervorhersagezentrum für das gesamte Dronning Maud Land.

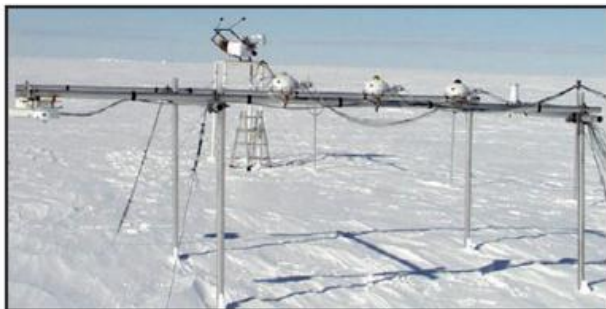
Seit März 1982 werden Strahlungsmessungen durchgeführt. Die Strahlungssignale werden im Minutenintervall über 10 min aufgezeichnet und gespeichert. Sie beinhalten

- Globalstrahlung und reflektierte Sonnenstrahlung mittels Pyranometer CM11 (siehe 14.4.1),
- Nach unten und oben gerichtete Langwellenstrahlung Pyrradiometer Lange,
- Sonnenscheindauer mittels Haenni Solar 111B (siehe 14.4.1)

Im März 1992 wurden die Strahlungsmessungen erweitert, um den Standard der BSRN zu erfüllen. Die Pyrradiometer wurden durch Pyrgeometer (PIR, Eppley, siehe 14.4.1) ersetzt, die Mittelungsperiode wurde auf 5 min-Intervalle reduziert, 1998 auf 5 s-Schritte und 1 min-Intervalle. Zusätzlich werden seitdem die folgenden Parameter gemessen:

- diffuse Himmelsstrahlung mittels Pyranometer CM11 (siehe 14.4.1),
- direkte Sonnenstrahlung mittels NIP, Eppley mounted on a sun tracker,
- OG1 (Global >0,530 μm , Pyranometer CM11, Kipp+Zonen,
- RG8 (Global >0,695 μm , Pyranometer CM11, Kipp+Zonen,
- UV-Strahlung (0,30 μm bis 0,37 μm), TUVR, Eppley.

Abb.14.35 Strahlungsmessgeräte der Georg-von-Neumayer-Station
(Foto: AWI)



Pyranometer und Pyrgeometer werden mit leicht erwärmter Luft ventiliert, um Reifprobleme während wolkenlosen Himmels und Windstille zu minimieren. Die Instrumente arbeiten durchgehend ein Jahr, bevor sie beim World Radiation Center nach den Vorgaben der World Radiometric Reference (WRR) kalibriert werden.

15. AGRARMETEOROLOGISCHE MESSUNGEN

15.1 Allgemeines

Die Agrarmeteorologie ist ein Teilgebiet der Meteorologie. Sie ist die Lehre von den Wechselbeziehungen zwischen Klima, Wetter, Luft, Boden, Pflanzen und Tieren.

Um in der Landwirtschaft optimale Erträge zu erzielen, ist die Kenntnis der Wetterprognose oder der regelmäßig zu erwartenden Witterungsbedingungen von entscheidender Bedeutung. Ausgehend von diesen Vorhersagen lassen sich zum Beispiel Bewässerungsmaßnahmen, Termine für Aussaat und Ernte sowie Pflanzenschutzmaßnahmen sinnvoll planen. Ebenso sind noch rechtzeitig Schutzmaßnahmen zu ergreifen, falls zum Beispiel stärkere Nachfröste oder Hagel- oder Sturmschäden zu erwarten sind.

Darüber hinaus gibt es agrarmeteorologische Messstationen, die Messungen durchführen, die der Erforschung des Einflusses der Erdatmosphäre auf das Wachstum von Pflanzen oder das Verhalten von Tieren, zum Beispiel Schädlingen, dienen. Die Abhängigkeit des Ertragserfolges von der Witterung und das Bestreben der Landwirtschaft, witterungsabhängige Feldarbeiten naturschonend und zum ökonomisch sinnvollsten Zeitpunkt durchzuführen, sind für den DWD als in der Wetterüberwachung und -vorhersage operationell tätigen Dienstleister Motivation, die Landwirtschaft in ihren agrarmeteorologischen Belangen zu unterstützen.

Zuverlässige agrarmeteorologische Vorhersagen des Boden- und Bestandsklimas sowie des Wasserhaushalts, des zu erwartenden Schaderregerpotenzials und der Erntequalität bilden neben den Hinweisen zu speziellen umweltrelevanten Aspekten (Stickstoffdüngung, Ammoniakverluste, Abdrift) die Grundlage für eine standortgerechte und umweltschonende Landbewirtschaftung. Sie sind somit ein wichtiger Beitrag zur Rentabilitätssteigerung der Betriebe.

Zu den agrarmeteorologischen Tätigkeitsfeldern des DWD gehört eine anwendungsorientierte Forschung, die Umweltbeobachtung (Phänologie), das Warnmanagement (z. B. Waldbrandgefahr) sowie ein breit gefächertes Beratungsangebot.

15.2 Messgrößen in der Agrarmeteorologie

15.2.1 Verdunstung

Der Begriff Verdunstung bezeichnet den sich unterhalb des Siedepunktes vollziehenden Übergang des Wassers in den gasförmigen Aggregatzustand zum Wasserdampf. Die zum Verdunsten benötigte Wärmeenergie wird dabei der Flüssigkeit und der Umgebung entzogen, was zur Abkühlung führt (Verdunstungskälte).

Die Verdunstung hat eine große Bedeutung für den Energie- und Wärmehaushalt der Erde. Die für die Verdunstung notwendige Wärmeenergie wird an der Erdoberfläche der Umgebung entzogen. In der Atmosphäre wird die im Wasserdampf latent enthaltene Wärme beim Übergang von Wasserdampf in Wasser (Kondensationsvorgänge wie Wolken- und Nebelbildung) wieder frei. Durch die Verdunstung erfolgt somit nicht nur der Transport von Wasser in die Atmosphäre, sondern gleichzeitig wird auch Energie von der Erdoberfläche in höhere Atmosphärenschichten gebracht. Sie stellt somit eine wichtige Größe im Wasser- und Energiehaushalt der Erde dar. Durch die Verdunstung sind die Umweltmedien Luft, Wasser, Boden und Vegetation mehrfach gekoppelt.

Die Verdunstung wird beeinflusst durch:

- den atmosphärischen Verdunstungsanspruch
- das Energieangebot
- das Wasserangebot
- den Boden
- die Vegetation.

Drei Verdunstungsarten werden unterschieden:

- Evaporation
- Transpiration
- Evapotranspiration.

Evaporation

Die Evaporation ist die allein nach physikalischen Gesetzen erfolgte Verdunstung der unbewachsenen Erdoberfläche (Boden-, Schnee-, Eisverdunstung), des auf Pflanzenoberflächen zurückgehaltenen Niederschlages (Interzeptionsverdunstung) und von freien Wasserflächen (Gewässerverdunstung). Die Messung der Evaporation kann u. a. mit Hilfe von Verdunstungswannen (Abb. 15.4) erfolgen, wobei der abnehmende Wasserstand das Maß für die Verdunstung über der durch den Kesseldurchmesser definierten Wasseroberfläche angibt.

Transpiration

Dieser Begriff (lat. von: trans-spirare = hinaus-atmen) steht für die Abgabe von Wasserdampf durch Pflanzen in die Atmosphäre (Pflanzenverdunstung). Die Transpiration ist nur der Anteil der Pflanzenverdunstung vom Gesamtverdunstungspotenzial, welches durch die Evapotranspiration (Pflanzen- und Bodenoberflächenanteil) beschrieben wird.

Die Transpiration ist die physiologisch regulierte Abgabe von Wasserdampf durch die oberirdischen Organe der Pflanzen an die Atmosphäre. Dabei werden 90–95 % des Wasserdampfes durch die Spaltöffnungen (Stomata) der Blätter abgegeben und nur 5–10 % durch die Kutikula (= wachsartige Schicht an der Oberfläche der Pflanze).

- Die stomatäre Transpiration kann von der Pflanze entsprechen den Umweltbedingungen (z. B. geringer Bodenfeuchte) durch Öffnen und Schließen der Spaltöffnungen aktiv reguliert werden.
- Die Transpiration verhindert eine Überhitzung der Pflanzenorgane bei Sonneneinstrahlung (Kühlwirkung) und sichert den Stofftransport mit Hilfe der Transpirationsströme.

Evapotranspiration

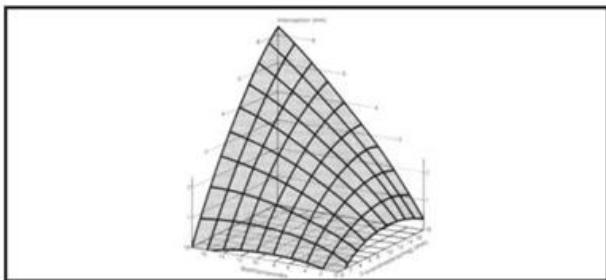
Die Evapotranspiration – aus Evaporation und Transpiration zusammengesetzt – ist die Gesamtverdunstung von einer natürlich bewachsenen Bodenoberfläche. Häufig wird statt Gesamtverdunstung der Begriff reale Verdunstung verwendet. Betrachtet man den atmosphärischen Einfluss ohne begrenzende Wirkung durch die verdunstende Oberfläche, so spricht man von der potenzielle Verdunstung (ETP). Sie gibt die Verdunstung bei gegebenen meteorologischen Bedingungen und unbegrenzt verfügbarem Wasser an. Sie stellt somit den Maximalwert der realen Verdunstung dar (gilt nur, wenn keine lateraler Transport von Wärme erfolgt – Oaseneffekt).

Die Messung der Evapotranspiration erfolgt mit Hilfe sogenannter wägbare Lysimeter (Abb. 15.2/15.3). Durch mikrometeorologische Messverfahren (z. B. Eddykovarianz, 3-dim. Ultraschallanemometer in Kombination mit einem Gasanalysator) kann die Verdunstung von Pflanzenbeständen ebenfalls direkt erfasst werden.

Interzeption

Interzeption ist die Menge des auf der Pflanzendecke zurückgehaltenen Wassers. Sie hängt von der Niederschlagsmenge und dem Blattflächen-Index (LAI = leaf area index) ab. Er gibt die Blattfläche in m^2 pro m^2 Bodenoberfläche an.

Abb. 15.1 Menge des vom Pflanzenbestand zurückgehaltenen Niederschlagswassers in Abhängigkeit von der Niederschlagsmenge und dem Blattflächenindex (LAI) (n. von Hoyningen gen. Huene 1980)



15.2.2 Bodenfeuchte

Der Boden besteht neben der Festsubstanz aus Hohlräumen. Diese sogenannten Poren sind mit Wasser und/oder Bodenluft gefüllt. Es wird zwischen Fein-, Mittel- und Grobporen unter-

schieden. Das Wasser wird in den verschiedenen Poren durch hygroskopische und kapillare Kräfte entgegen der Schwerkraft in den oberen Bodenschichten (0 bis 2 m) festgehalten.

Der Wassergehalt der obersten Bodenschichten (Bodenfeuchte) ist in starkem Maße von der Witterung (Niederschlag, Verdunstung, Strahlung, Temperatur und Wind) abhängig. Die Bodenfeuchte spielt bei allen Wachstumsvorgängen der Pflanzen eine entscheidende Rolle. Eine ausreichende Wasserversorgung kommt außerdem der Nährstoffzufuhr der Pflanze zugute. Die Bodenfeuchte wird in Gewichtsprozent (Gewicht des Bodenwassers in Prozent des Gewichtes der trockenen Bodensubstanz) oder in Volumenprozent (vom Wasser eingenommenes Volumen in Prozent des gesamten Bodenvolumens) angegeben.

Wassersättigung

Sind neben Fein- und Mittelporen auch die Grobporen mit Wasser gefüllt, ist der Zustand der Wassersättigung erreicht. Dieser Zustand dauert nur kurz an (wenige Tage). Aufgrund der schwachen Bindung in den Grobporen, versickert das Wasser relativ rasch in größere Tiefen.

Feldkapazität

Die Feldkapazität (FK) ist der obere Grenzwert für das Wasserspeichervermögen eines jeden Bodens. Dieser Grenzwert (gemessen in Gewichts- oder Volumenprozenten oder in mm Wasserhöhe) stellt sich auf einem grundwasserfernen, gut durchlässigen Standort ca. 2–3 Tage nach völliger Wassersättigung ein, wenn das überschüssige Wasser in den Untergrund versickert ist. Es ist die Menge an Wasser, die entgegen der Schwerkraft im Boden gehalten werden kann. Die Feldkapazität wird unter natürlichen Verhältnissen überwiegend im zeitigen Frühjahr erreicht, wenn der Boden, bedingt durch die Winterniederschläge und geringe Verdunstungsverluste, gut mit Wasser versorgt ist.

Permanenter Welkepunkt

Das Bodenwasser ist in den Bodenporen durch Kohäsions- und Adhäsionskräfte gebunden. Der permanente Welkepunkt (PWK) ist erreicht, wenn die Pflanzen nicht mehr in der Lage sind, diese Kräfte zu überwinden. Die Pflanzen verlieren dann durch die Transpiration Wasser und können dieses nicht mehr aus dem Boden ersetzen. ⇒ Die Pflanzen beginnen irreversibel zu welken.

Nutzbare Feldkapazität

Als nutzbare Feldkapazität (nFK) bezeichnet man die Wassergehaltsdifferenz zwischen Feldkapazität (FK) und permanentem Welkepunkt (PWK). Sie gibt die Menge an Wasser ($mm\ dm^{-1}$) an, die die Pflanzen dem Boden entziehen können.

15.3 Messverfahren / Messgeräte / Sensoren

Im Folgenden werden die wichtigsten, in der Agrarmeteorologie verwendeten Messgeräte/Sensoren kurz beschrieben. Darüber hinaus werden mit meteorologischen Messgeräten auch meteorologische Parameter erfasst und für agrarmeteorologische Untersuchungen ausgewertet. Diese dabei verwendeten Messgeräte/Sensoren sind in Tabelle 15.1 aufgelistet und in den jeweiligen Kapiteln beschrieben.

Tab. 15.1 In der Agrarmeteorologie verwendete meteorologische Messgeräte/Sensoren

Messgeräte/Sensoren	Fundstelle
Erdbodenthermometer	8.3.1.1
Thermograph	8.3.1.2
Thermohygrograph	9.3.2
Psychrometer n. Frankenberger	9.3.1
Minipsychrometer (Eigenbau DWD)	9.3.1
Schalensternanemometer	12.3.1
USA 3D (METEK)	12.3.2
Sonnenscheinautograph	14.3.1
SONle3 (Siggelkow Gerätebau)	14.3.2
PAR-Sensor (Kipp & Zonen)	14.4.2

15.3.1 Verdunstungsmessung

Da die Messung der Verdunstung sehr schwierig ist, sind von den verschiedensten Forschern eine Vielzahl von Messmethoden entwickelt worden. Vielfach wurde die potenzielle Verdunstung mit Hilfe von empirischen Formeln abgeschätzt. Zu diesen gehört auch das **HAUDE**-Verfahren. Es ist ein einfaches, heute nur noch selten genutztes Verfahren zur Berechnung der potenziellen Evapotranspiration von natürlichen Oberflächen und Pflanzenbeständen aus dem Sättigungsdefizit (Differenz zwischen dem Sättigungsdampfdruck und dem Dampfdruck der Luft) und einem empirischen Faktor

$$ETP = f \cdot (E_s - E) \quad (15.1)$$

mit ETP = potenzielle Evapotranspiration
 E_s = Sättigungsdampfdruck (hPa)
 E = Dampfdruck (hPa)
 f = monatlicher variabler HAUDE-Faktor (empirischer, konstanter monatlicher Pflanzenfaktor)

Lysimeter

Das Lysimeter ist ein Gefäß, welches in der Erde eingelassen ist und mit einer ungestörten Bodensäule gefüllt ist. Dabei wird das Lysimeter möglichst mit gleicher Vegetation wie die Umgebung bepflanzt. Es wird täglich herausgenommen und gewogen, so dass man über die Gewichtsverluste- oder -zunahmen auf die verdunstete Wassermenge schließen kann. Manche Messgeräte dieser Art werden nicht herausgenommen, sondern stehen bereits auf einer aufwendigen Waage (diese muss bei einem Gewicht von 3 t noch auf 100 g genau sein).

Das Lysimeter ist eine sehr kostspielige Angelegenheit, zumal es bis zu 15 t wiegen kann und deshalb „schwer“ zu handhaben ist. Die Mindestgröße liegt bei 1 m³. Dafür ist dieses Messgerät zur Bestimmung der aktuellen Verdunstung am verlässlichsten.

Tabelle 15.2 zeigt einige Verdunstungswerte am Beispiel von Eberswalde.

Tab. 15.2 Jahressummen der aktuellen Verdunstung von verschiedenen Böden im Eberswalde

Böden	mm pro Jahr
unbewachsener Boden	178
Rasen	356
kleine Kiefern (tiefwurzelnd)	450
Rasen mit 20cm Grundwassertiefe	706
(offene Wasserschale)	(524)
(Niederschlag)	(615)

Wägbares Großlysimeter

Zur Bestimmung der realen Evapotranspiration stehen an der ZAMF Braunschweig zwei wägbare Großlysimeter zur Verfügung. Diese Anlagen sind in landwirtschaftlichen Versuchsfeldern integriert und haben jeweils eine Fläche von 3 m². In 1,5 m Tiefe befinden sich keramische Saugkerzen, die sowohl die Messung des Sickerwassers als auch des kapillaren Aufstiegs ermöglichen. Mithilfe zusätzlich erfasster meteorologischer Parameter und bestandsspezifischer Größen kann der für den Wasserdampftransport maßgebliche Blattwiderstandskoeffizient ermittelt werden. Dessen Kenntnis ist für die zuverlässige Modellierung der Bodenfeuchte und Verdunstung eine unabdingbare Voraussetzung.

Abb. 15.2 wägbares Großlysimeter, Ansicht von außen (Foto: DWD, ZAMF Braunschweig)



Abb. 15.3 wägbares Großlysimeter, Ansicht im Lysimeterkeller (Foto: DWD, ZAMF Braunschweig)



Wägbare Lysimeter-Anlagen dienen zur Verifikation (d.h. der Überprüfung der gewählten Rechenverfahren) und Kalibrierung (also Modelleichung, d.h. die Schaffung einer Schnittstelle zwischen dem mathematischen Modell und den Feldmessungen) von Modellansätzen zur Bestimmung der aktuellen Evapotranspiration inkl. Abschätzung von Bestandswiderständen.

Verdunstungswanne / Verdunstungskessel

An der UniBw München wird zur Messung der potenziellen Verdunstung eine Verdunstungswanne (Class-A-Pan) eingesetzt. Sie wurde früher routinemäßig in den neuen Bundesländern verwendet.

Abb. 15.4 Verdunstungswanne (Foto: DWD, ZAMF Braunschweig)



Mit einem keramischen Drucksensor erfolgt die kontinuierliche Registrierung. Die Verdunstungswanne hat folgende Abmessungen:

Durchmesser: 1206,5 mm = 47,5"

Höhe: 254 mm = 10"

Material: nichtrostender Edelstahl

Gewicht: 26 kg (Fa. Thies)

Eine Fehlerquelle dieser Geräte ist der Oaseneffekt. Durch die zu kleine Fläche wird Wärme von der Seite herantransportiert. Dies führt zu einem rascheren Wasserumsatz, die potenzielle Verdunstung (ETP) wird überschätzt.

15.3.2 Bodenfeuchtemessung

Gravimetrische Bestimmung der Bodenfeuchte (Bohrstockmethode)

Die Entnahme der Bodenproben erfolgt mit dem Erdbodenbohrstock nach PÜRKHAUER. Auf kurz gehaltenem Gras oder landwirtschaftlichen Flächen werden Bodenproben bis 60 cm Tiefe entnommen. Die Probenahme darf nicht bei Niederschlag erfolgen, da Regentropfen auf dem entnommenen Boden das Ergebnis stark beeinflussen. Die entnommene Bodensäule wird in 10 cm Abschnitten in einzelne Metall Dosen gefüllt und gleich mit einem Deckel verschlossen, um die Verdunstung während des Transportes zu verhindern.

Das Feuchtgewicht des Bodens wird durch Wiegen der Metall Dosen ohne Deckel bestimmt. Die Bodenproben werden dann in einen Trockenschrank bei 105 °C mindestens 8 bis 12 Stunden getrocknet. Beim erneuten Auswiegen der Proben wird das Trockengewicht erfasst. Aus den Werten Feuchtgewicht, Trockengewicht und Dosengewicht wird die Bodenfeuchte in Gewichtsprozent berechnet. Sind die Bodendichten in den einzelnen Bodenschichten bekannt, kann die Bodenfeuchte auch in Volumenprozent angegeben werden.

TDR-Sonde und kapazitive Messsonde

Sowohl beim TDR-Verfahren (TDR- Time Domain Reflectometry) als auch bei der kapazitiven Methode spielt die Dielektrizität des Wassers ($\epsilon_o = 81$) die wesentliche Rolle. Sie ist um fast zwei Größenordnungen größer als die von Luft ($\epsilon_o = 1$). Aber auch die festen Bestandteile des Bodens tragen zur Dielektrizität des Bodens bei (mineralische Partikel $\epsilon_o = 2$ bis 5). Die Bestimmung der Bodenfeuchte erfolgt in zwei Schritten. Im ersten Schritt wird die Dielektrizitätszahl des betrachteten Bodenkörpers und erst im zweiten Schritt die Bodenfeuchte bestimmt. Daher ist bei beiden Methoden eine Kalibrierung am jeweiligen Boden für quantitative Aussagen zum volumetrischen Wassergehalt erforderlich.

Bei der TDR-Messtechnik wird das teilweise Eindringen und Reflektieren elektromagnetischer Impulse oder Hochfrequenzwellen in den Boden ausgewertet. Die Dielektrizitätszahl des Bodens wird durch die Messung der Zeit bestimmt, die ein Spannungsimpuls (10 ps bis 2 ns) zum Durchlaufen eines vom feuchten Boden umgebenen elektrischen Leiters benötigt. Aus der Dielektrizitätszahl lässt sich auf die aktuelle Bodenfeuchte schließen, d. h. sie ist eine Funktion der Bodenfeuchte. Die Geräte vieler Anbieter eignen sich für den stationären Einsatz und können dann kontinuierlich volumetrische Bodenwassergehalte liefern. Wenn absolute Werte erforderlich sind, empfiehlt es sich vergleichende Parallelmessungen durchzuführen.

Abb. 15.5 TDR-SONDE (Fa. IMKO) (Foto: DWD, ZAMF Braunschweig)



Bei der kapazitiven Methode wird die Dielektrizität des Bodens aus der Lade- oder Entladezeit eines Kondensators bestimmt und damit auf den Wassergehalt geschlossen. Das Verfahren wird bevorzugt bei transportablen Geräten eingesetzt.

Tensiometer zur direkten Messung der Bodenwasser-spannung

Alle Wasserbewegungen im Boden sind direkt abhängig von der Bodenwasserspannung (Bodensaugspannung), da sich das Wasser – in Böden wie auch an der Oberfläche – immer von Orten höheren Potentials zu Orten eines niedrigeren Potentials bewegt. Der Großteil der Bodenwasserflüsse findet bei geringen Wasserspannungen statt, die nur mit Tensiometern direkt und genau gemessen werden können.

Abb. 15.6 Tensiometer (Foto: DWD, ZAMF Braunschweig)



Abb. 15.7 Einstich-Tensiometer, Typ T1 (UMS GmbH)



15.3.3 Messung von Lufttemperatur und Luftfeuchte im Bestand

Zur Erfassung der Temperatur- und Feuchteverhältnisse innerhalb eines Pflanzenbestandes werden Minipsychrometer (Eigenbau, DWD) eingesetzt (siehe 9.3.1 und Abb. 15.8).

Abb. 15.8 Minipsychrometer im Einsatz in einem Maisbestand 2007 (Foto: DWD, ZAMF Braunschweig)



Natürlich gelagerte Böden sind heterogen. Dadurch bestimmen nicht nur Niederschlag und Verdunstung die Prozesse, sondern auch die Textur, Korngrößenverteilung, Risse, Verdichtung, Wurzeln und Hohlräume. Tensiometer-Messungen werden von dieser Heterogenität nicht verfälscht. Das Bodenwasser und das Wasser im Tensiometer haben Kontakt über eine poröse Keramik, die wasserdurchlässig ist. Die Bodenwasserspannung überträgt sich direkt auf den Druckaufnehmer, der ein entsprechendes Signal liefert. Der atmosphärische Referenzdruck wird durch das Kabel und eine Membrane am Kabel übertragen – eine praktikable patentierte Methode. Tensiometer messen also die Saugspannung des Wassers im Boden. Diese Kraft nimmt mit abnehmender Bodenfeuchte zu.

Einstich-Tensiometer

Mit einem Einstich-Messkopf und einem Handmessgerät können an einer beliebigen Anzahl von installierten und befüllten Tensiometerschäften sogenannte Stichpunkt-messungen der Bodensaugspannung durchgeführt werden. Das Handmessgerät zeigt die Messwerte in hPa an.

Stichpunkt-messungen: Mit der Hohl-nadel im Messkopf wird die Membran des Tensiometerschaftes durchsto-chen. Nach durchgeführter Messung wird der Messkopf einfach wieder abgezogen. Die Membran (gasdichtes Septum) ver-schließt sich nach Herausziehen der Nadel sofort wieder.

Zu den Vorteilen von Einstich-Tensiometern gehört das einfache Kontrollieren und Nachfüllen der transparenten Tensiometerschäfte. Mit nur einem Messkopf und einem Handmessgerät kann die Bodensaugspannung an beliebig vielen Messpunkten bestimmt werden.

Grenzen der Einsatzbedingungen

- nicht für trockene Böden oder bei Frost geeignet
- kein horizontaler Einbau
- geringere Genauigkeit als herkömmliche Tensiometer

Im Frühjahr werden Kulturen auch unter Folien angebaut. Die kleine und kompakte Bauweise der Minipsychrometer erlaubt den Einsatz auch unter verschiedenen Folien (Abb. 15.9).

Abb. 15.9 oben: Minipsychrometern (Nahaufnahme) unten: Einsatz von Minipsychrometern zur Erfassung der Verhältnisse unter verschiedenen Folientypen (Foto: DWD, ZAMF Braunschweig)



15.3.4 Messung der Blattbenetzung

Blattharfe

Der elektronische Blattnässefühler des DWD (Eigenbau DWD) misst die Blattnässe direkt am Blatt (Abb. 15.10). In ein Plastikrähmchen wird ein Blatt eingespannt, das mit einem feinen Drahtnetz überzogen ist. Die Empfindlichkeit kann über eine Elektronik gesteuert werden. Nach einiger Zeit muss das Blatt jedoch ausgetauscht werden.

Abb. 15.10 Blattharfe (Foto: DWD, ZAMF Braunschweig)

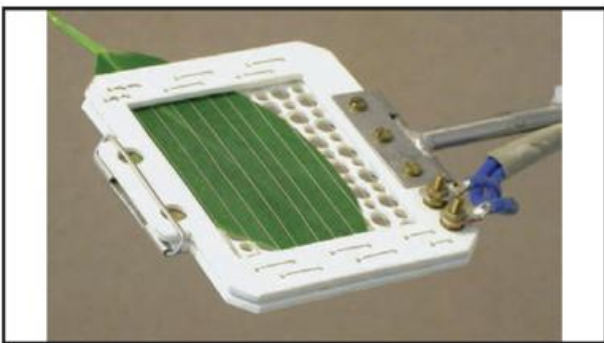


Abb. 15.11 Messung der Blattbenetzung mit der Blattharfe in einem Kartoffelbestand (Foto: DWD, ZAMF Braunschweig)



Blattbenetzungssensor

Bei dem Blattbenetzungssensor (Fa. Hoffmann Messtechnik) handelt es sich um einen kapazitiv messenden Fühler, der schwach auf die relative Luftfeuchte und stark auf kondensierende Nässe reagiert. Der Sensor selbst simuliert ein Blatt und hat, wie man in der Abbildung 15.12 erkennen kann, keinen Kontakt zu einer Pflanze.

Abb. 15.12 Profilmessungen Blattbenetzungssensoren (Hoffmann Messtechnik) mit Minipsychrometern (Foto: DWD, ZAMF Braunschweig)



15.3.5 Messung des fühlbaren Wärmestromes

Die Messung des fühlbaren Wärmestroms H erfolgt mit einem 3D Ultraschallanemometer (Abb. 12.29) der Fa. METEK. Das USA erfasst die Fluktuation der Temperatur T' und der Windkomponenten u, v und w mit einer zeitlichen Auflösung von mindestens 10 Hz. Aus der Kovarianz $\overline{w't'}$ kann dann der fühlbare Wärmestrom wie folgt berechnet werden:

$$H = \rho c_p \overline{w't'} \quad (15.2.)$$

mit ρ = Luftdichte
 c_p = spezifische Wärmekapazität der Luft bei konstantem Druck

Abb. 15.13 USA (METEK GmbH) im Einsatz über einem Maisfeld, 2010 (Foto: DWD, ZAMF Braunschweig)



Wird parallel die Strahlungsbilanz und der Bodenwärmestrom gemessen, kann mit dem fühlbaren Wärmestrom der latente Wärmestrom (Verdunstung) als Restglied aus der Energiebilanz bestimmt werden (Eddykovarianz-Energiebilanz-Methode). Die baugleich aussehenden Schwachwindmessgeräte können nicht in so hoher zeitlicher Auflösung messen und erfassen nur die Mittelwerte der drei Windkomponenten u , v und w .

15.3.6 Messung des Bodenwärmestromes

Zur Bestimmung des Bodenwärmestromes werden sogenannte Wärmestromplatten verwendet. Diese Platten werden in die oberste Bodenschicht in einer Tiefe von 2 cm eingesetzt. Soll der Energiehaushalt einer Fläche untersucht werden, ist die Kenntnis der vom Boden aufgenommenen oder abgegebenen Wärmemenge von Bedeutung.

15.3.7 FRODIT – Messgerät zur Bestimmung der Frosteintrittstiefe

Die Erfassung der Frosteintrittstiefe ist üblicherweise mit hohem technischem Aufwand (vertikal hochauflösende Temperaturmessung) oder mit erheblichen manuellen Aufwand (Bohrstockmessung) verbunden. Zur Reduzierung dieses Aufwandes wurde an der ZAMF Braunschweig das Messgerät FRODIT (elektronisches Frosteintrittstiefenmessgerät) entwickelt (Abb.15.14/15.15).

Abb. 15.14 FRODIT Gesamtansicht (Foto: DWD, ZAMF Braunschweig)

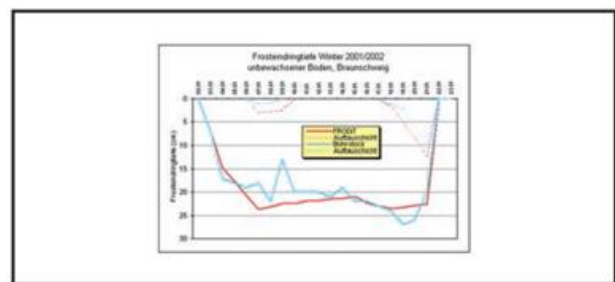


Die Kenntnis der Bodenfrosteintrittstiefe ist im Zusammenhang mit dem Ausbringen von Dünger auf landwirtschaftlichen Flächen von Bedeutung. So ist aus ökologischen Gründen z.B. die Gülleausbringung bei Frosteintrittstiefen von 15 cm

und mehr verboten (siehe noch 11.4). Das Messprinzip macht sich den Gefriervorgang einer vertikal in den Boden eingeführten und von einem Plexiglasrohr umschlossenen Wassersäule zunutze. Erstarrt ein Teil der Wassersäule aufgrund der niedrigen Bodentemperatur zu Eis, so kann das untere Ende und damit die Tiefe des gefrorenen Säulenabschnitts mittels einer Magnet-Relaisanordnung erfasst werden.

Die FRODIT-Messungen werden in den Wintermonaten an der ZAMF Braunschweig mithilfe von Bohrstockmessungen verifiziert. Abbildung 15.15 zeigt einen derartigen Vergleich. Generell variiert die Bodenfrosteintrittstiefe je nach Bodenart, Bodenfeuchte, Bewuchs, Schneedeckenhöhe und den meteorologischen Bedingungen.

Abb. 15.15 FRODIT/Bohrstock, Verifizierungsergebnis aus dem Winter 2002 (Foto: DWD, ZAMF Braunschweig)



15.3.8 Messung mit Splashmetern

Für eine Reihe von Pflanzenkrankheiten spielt Spritzwasser („Splash“) als aufwärts gerichtete Komponente des Niederschlags eine wichtige Rolle, so auch für den Falschen Mehltau der Weinrebe (Rebenperonospora). Regentropfen nehmen beim Auftreffen auf den Boden eines ehemals infizierten Bestandes Sporen aus dem alten, inzwischen sich zersetzenden Falllaub auf, transportieren diese über den Spritzwasserpfad auf gesunde Pflanzenteile und verursachen damit Neuinfektionen. Im Weinbau ist dabei jene Höhe, die Spritzwassertröpfchen maximal erreichen können, von Interesse.

Abb. 15.16 Splashmeter (Eigenbau, DWD) im Rebbestand (Foto: DWD, KU3GH Geisenheim)



Zur Erfassung der vertikalen Spritzwasserverteilung werden sog. Splashmeter eingesetzt, die aus einem ca. 1,1 m hohen Zylinder von 4 cm Durchmesser bestehen, dessen Oberfläche mit Löschpapier belegt ist (Abb. 15.18).

Abb. 15.17 Splashmeter auf einer Freifläche
(Foto: DWD, KU₃GH Geisenheim)

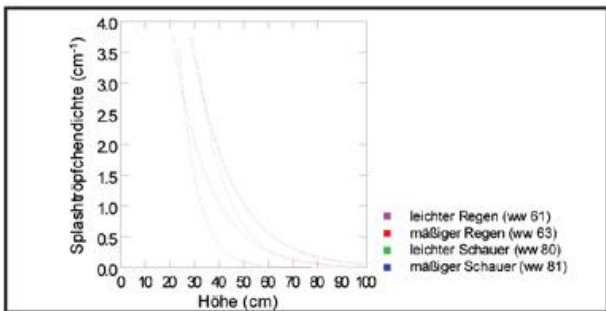


Die unmittelbare Bodenumgebung dieses Zylinders ist eingefärbt. Die dort aufschlagenden Regentropfen nehmen beim Zerplatzen die Färbung auf und schlagen sich als Farbmarkierung auf dem Löschpapier nieder (Abb. 15.18). Auf diese Weise kann die Splashtröpfchendichte als Funktion der Höhe über dem Boden bestimmt werden (Abb. 15.19).

Abb. 15.18 Farbmarkierung auf Löschpapier



Abb. 15.19 Splashtröpfchendichte als Funktion der Höhe über Brache im Freiland für verschiedene Niederschlagstypen (Braunschweig 2003)



15.3.9 Bestimmung der Oberflächentemperatur mit Hilfe einer Thermografiekamera

Zum Verständnis vieler agrarmeteorologischer Prozesse ist es notwendig, die Temperaturverteilung von Oberflächen berührungslos zu erfassen. Hierzu wird eine Thermografiekamera (IR-Kamera) eingesetzt, die im Spektralbereich 7,5 µm bis 13 µm die von Objekten ausgehende langwellige Strahlung in ein Temperatursignal umwandelt. Das grundlegende Messprinzip dazu wurde unter 8.2.3 erläutert.

Abb. 15.20 Thermografiekamera (FLIR)

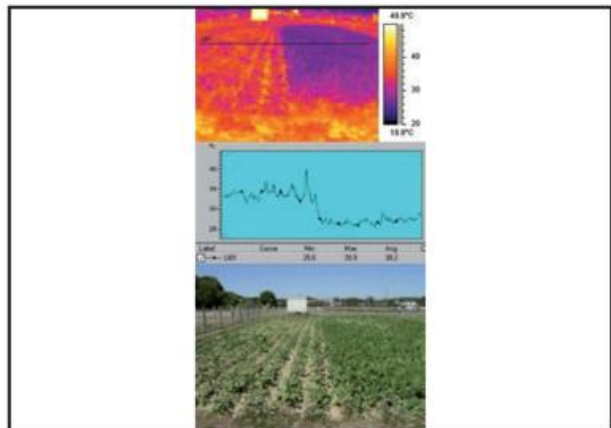


Das Einsatzspektrum der Infrarotthermografie ist breit gefächert und reicht von der Messung der Oberflächentemperatur von Pflanzenbeständen bis hin zur Erfassung der Temperatur von Rauchpartikeln, die bei Flächenbränden erzeugt werden. Ein klassisches Anwendungsfeld ist die Erfassung von Systemgrenzen, wie sie z. B. an der Schnittstelle zwischen beregnetem und unberegnetem Bestand oder zwischen bewachsener und unbewachsener Landfläche auftreten. Die Temperaturdifferenz zwischen beiden Teilflächen wird zu einem wesentlichen Teil von den unterschiedlichen Verdunstungsprozessen bestimmt und ist somit ein Indikator für Wasserstressituationen. Mit Hilfe der IR-Kamera können Stresssymptome an Pflanzen deutlich gemacht werden. So kann man mit der IR-Kamera z. B. Infektionen des Falschen Mehltaus (Rebenperonospora) an Rebenblättern bereits vor Sichtbarwerden der eigentlichen Symptome (Ölfleck) erkennen. Durch die Abgabe von Wasserdampf durch die Spaltöffnungen wird die Oberfläche der Pflanzen gekühlt (Verdunstungskälte). Welche Unterschiede in der Oberflächentemperatur möglich sind, zeigen sehr deutlich zwei Beispiele für Wasserstress aus dem Jahr 2003.

Unterschiede zwischen unberegnetem und beregnetem Bestand

Die Abbildung 15.21 zeigt den Zustand eines Zuckerrübenbestandes im August 2003. In der linken Hälfte des Bildes ist der unberegnete, in der rechten Hälfte der mehrfach beregnete Zuckerrübenbestand zu erkennen. Der obere Teil der Abbildung gibt die entsprechende Infrarotaufnahme wieder. Im mittleren Teil der Abbildung ist das Temperaturprofil entlang der schwarzen Linie (oberer Teil) dargestellt.

Abb. 15.21 Aufnahme eines unberegneten / beregneten Zuckerrübenbestandes, 09.08.2003 – Versuchsflächen der ZAMF Braunschweig

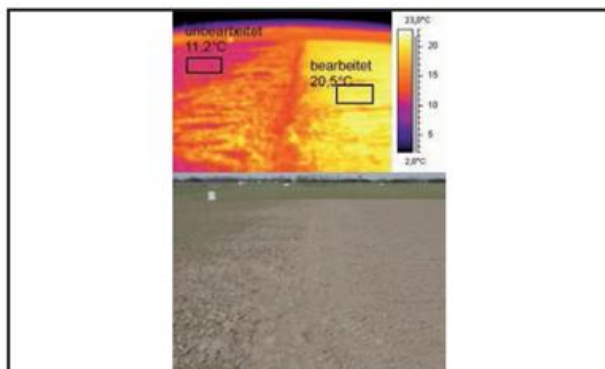


Während im rechten beregneten Teil die Strahlungstemperaturen im Bereich der Lufttemperatur um 27 °C nur geringfügig pendelte, wurden im linken unberegneten Bestand Oberflächentemperaturen von 34 °C mit großer Schwankungsbreite gemessen. Die Bodenfeuchte wurde mit der Bohrstockmethode bestimmt. Unter dem unberegnetem Bestand lag sie am Welkepunkt (hier 20 % nFK), während die Bodenfeuchte unter dem beregneten Bestand Werte von über 60 % nFK aufwies. Die hohen Oberflächentemperaturwerte des Bestandes bei Wasserstress (Fehlen der Verdunstungskälte) verursachten Sonnenbrandschäden an den Rübenblättern, die zu hohen Ertragsverlusten führten.

Unterschiede zwischen bearbeitetem und unbearbeitetem Boden

Wird ein Boden landwirtschaftlich bearbeitet, so führt dies zur Unterbrechung der Bodenkapillaren und damit zur Verringerung des aufwärtsgerichteten Wassertransports. Die sich als Konsequenz einstellende Austrocknung des Oberbodens macht sich optisch durch eine hellere Bodenfarbe bemerkbar. Das Thermalbild vom 1.4.2003 zeigt die Auswirkung auf die Erdoberflächentemperatur, die einen Unterschied von 10 K im bearbeiteten bzw. unbearbeiteten Parzellenteil aufweist (Abb. 15.22).

Abb. 15.22 unbearbeiteter (links) und bearbeiteter Boden (rechts), 1.4.2003 – Versuchsfelder der ZAMF Braunschweig



Auch die Bodentemperaturen knapp unterhalb der Bodenoberfläche werden beeinflusst, weshalb man bei der Interpretation von Bodenklimamessungen (vertikales Temperaturprofil, Bodenwärmestrom) immer den Bearbeitungszustand berücksichtigen muss. Zwischen den beiden Parzellen sorgen die Wendeflächen des Traktors für zusätzliche Inhomogenitäten.

15.3.10 Messung mit der Streuwaage

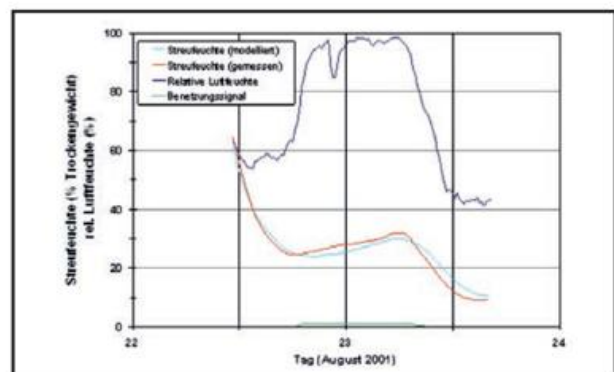
In Deutschland entstehen nahezu alle Waldbrände aus der Zündung des Bodenbelags. Die Simulation der Streufeuchtedynamik ist deshalb ein geeignetes Mittel, um den Zunderfolg und damit die Waldbrandgefahr abzuschätzen. Zur Bestimmung der Streufeuchte wird eine Streuwaage (Abb. 15.23) eingesetzt. Die Waage wird so weit im Boden senkt, dass sie ebenerdig abschließt.

Abb. 15.23 Streuwaage (Foto: DWD, ZAMF Braunschweig)



Abbildung 15.24 zeigt die Messung und Simulation der Feuchtedynamik einer 4 cm mächtigen Streuschicht unter realen atmosphärischen Bedingungen. Die Messdaten wurden vor und während eines Feuerexperimentes bei Cottbus gewonnen, welches im Jahr 2001 durchgeführt wurde.

Abb. 15.24 Vergleich des DWD-Streufeuchtemodells mit Feuchtemessungen einer Streuwaage

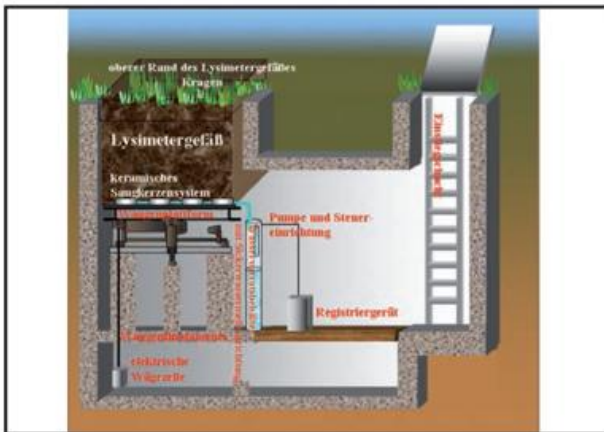


15.4 Versuchseinrichtungen

Für die Durchführung von Feldversuchen zum Zwecke der Modellentwicklung und validierung verfügt die ZAMF Braunschweig über eine ca. 1 ha große Fläche, auf deren Parzellen praxisgerechter landwirtschaftlicher Anbau erfolgt.

Die Auswahl der Zielkulturen richtet sich nach den jeweiligen bodenphysikalischen, bestandsklimatologischen und biologischen Fragestellungen. Unter zwei der Parzellen befindet sich jeweils ein wägbares Unterdrucklysimeter (Fläche 3 m², Tiefe 1,5 m), das mit einer Auflösung von 0,1 mm den vertikalen Wasserfluss (Niederschlag, Verdunstung, Sickerung, kapillarer Aufstieg) misst.

Abb. 15.25 Wägbares Unterdrucklysimeter



Zu den routinemäßig erfassten Standardmessgrößen zählen neben den Bodenwassergehalten die Bodentemperaturen und Bodenfrosteindringtiefen, die Bestandstemperaturen und feuchten sowie Blatttemperaturen und die Blattbenetzung. Ein Teil der hierfür eingesetzten meteorologischen Messsensoren wurde an der ZAMF selbst entwickelt. Während die Bestimmung der bodenphysikalischen Kardinalwerte in einem eigenen Bodenlabor vorgenommen wird, erfolgt im Freiland eine kontinuierliche Überwachung der Kulturen in einer der jeweiligen Fragestellung angemessenen Form (Erfassung der Bestandshöhe, -dichte, des Blattflächenindex und der phänologischen Entwicklung).

Im Jahr 2000 wurde ein Internationaler Phänologischer Garten mit erbgleichen Pflanzen und Gehölzen eingerichtet, der einen Beitrag zur Wirkungsforschung der globalen Erwärmung liefern soll.

16. ERSATZMESSUNGEN

Ersatzmessverfahren sind notwendig, wenn einzelne Geräte bzw. Sensoren ausfallen oder ganze (automatische) Systeme komplett versagen (z. B. durch Stromausfall oder Blitzeinschlag). Dann werden an den Wetterwarten und Klimareferenzstationen des DWD die noch verbliebenen konventionellen Messmittel bzw. der Notmessgeräte-Koffer eingesetzt.

16.1 Notmessgeräte-Koffer

Für den Ausfall von einzelnen oder mehreren Messgeräten/Sensoren ist im DWD ein Notmessgeräte-Koffer an allen mit Personal besetzten Wetterwarten des DWD vorhanden. Der Koffer enthält Messgeräte (Tab. 16.1), die im Einzelnen in den jeweiligen Kapiteln beschrieben sind.

Tab. 16.1 Messgeräte des Notmessgeräte-Koffers

Messgerät	Fundstelle
Handanemometer SIAP VT 1204	12.3.1
Schleuderpsychrometer PTS 30	9.3.1
Präzisions-Aneroidbarometer Fuess 15ps	7.3.2

Eine Benutzeranleitung und eine Psychrometertafel sind im Kofferoberteil untergebracht.

Abb. 16.1 Notmessgeräte-Koffer (Foto: B. Henning)



Die Messgeräte sind durch einen Formschaum-Einsatz im Kofferunterteil und durch einen Noppenschaum-Einsatz im Kofferoberteil gegen Erschütterungen und Vibrationen geschützt.

Zum Schutz gegen Staub und Wasser ist der Geräte-Koffer, dessen Schale aus glasfaserverstärktem Kunststoff besteht, staub- und wasserdicht. Er ist daher mit einem Druckventil ausgestattet, das sich neben dem Tragegriff befindet. Zum Öffnen des Koffers ist das Ventil gegebenenfalls durch Drehen der Ventil-Rändelschraube gegen den Uhrzeigersinn um ca. eine halbe Umdrehung zu öffnen. Das Ventil sollte in der Regel geöffnet sein, um eine Beschädigung des Barometers zu vermeiden und sollte nur unter besonderen Umgebungsbedingungen geschlossen werden.

16.2 Ersatzmessungen der Temperatur, Luftfeuchte, Luftdruck und Wind

Gegenwärtig werden Ersatzmessungen für die Temperatur und Luftfeuchte entweder in der Thermometerhütte mit dem Hüttenpsychrometer, mit dem Aspirationspsychrometer nach Assmann oder mit dem Schleuderpsychrometer (letzteres im Notmessgeräte-Koffer) vorgenommen.

Die beiliegende Psychrometertafel kann für die Bestimmung weiterer Feuchtegrößen natürlich verwendet werden. Wenn möglich, sollte aber die Verwendung der unter 9.1.1 erwähnten Aspirations-Psychrometertafeln (DWD 7. Auflage, 1998) erfolgen, da sie detailliertere Werte beinhaltet.

Luftdruckwerte werden bei Ausfall des Sensors mit Hilfe des Quecksilberbarometers oder des Aneroidbarometers (letzteres im Notmessgeräte-Koffer) ersatzweise gemessen.

Die Windmessung erfolgt mit einem Handanemometer, mit dem schon immer alle Wetterwarten ersatzweise gemessen haben. Im Notmessgeräte-Koffer befindet sich ebenfalls ein solches Gerät.

16.3 Ersatzmessungen des Niederschlages

Ersatzmessverfahren der Niederschlagsmessungen können nur für den Niederschlagsmesser nach Hellmann durch-

geführt werden. Andere meteorologische Größen können nicht ersatzweise gemessen werden. Bei einem Ausfall von Teilen des Standard-Niederschlagsmessers (Hellmann) müssen Behelfsmessungen durchgeführt werden, damit die langen Reihen der Niederschlagsbeobachtungen nicht unterbrochen werden. Das gilt in erster Linie für Niederschlagsmessstellen und Klimareferenzstationen. Dann kann folgendermaßen vorgegangen werden:

Kanne

Jedes Gefäß passender Größe kann anstelle der Kanne verwendet werden. Zu Verhinderung der Verdunstung werden breite Gefäße mit Papp- oder Blechdeckel abgedeckt, der lediglich die Öffnung für die Durchführung der Trichtertülle enthält

Messglas

Der Beobachter sollte jede Termin- und Tagesmessung in gut verschließbaren und mit dem Messtermin gekennzeichneten Flaschen aufbewahren um sie später nach Ersatz des Messglases messen zu können.

Steht ein gewöhnliches, in cm^3 geeichtes Messglas zur Verfügung, wird die Niederschlagsmenge in cm^3 gemessen, durch die Fläche des Auffanggefäßes (200 cm^2) geteilt und erhält damit die Niederschlagsmenge in cm , durch Multiplikation mit 10 die Menge in mm

$$\frac{1 \text{ cm}^3}{200 \text{ cm}^2} \cdot 0,005 \text{ cm} = 0,05 \text{ mm} \quad (16.1)$$

Steht ein solches Messglas auch nicht zur Verfügung, kann der aufgefangene Niederschlag gewogen werden. Da 1 cm^3 Wasser ein Gramm wiegt, gibt das Gewicht in g die Menge in cm^3 an. Die Berechnung erfolgt dann oder (16.2)

$$\frac{\text{g}}{200} \cdot 10 = \text{mm} \quad \text{oder} \quad \frac{\text{g}}{20} = \text{mm}$$

Auffanggefäß

Jedes andere Gefäß mit kreisrundem Querschnitt kann benutzt werden. Die in cm^3 oder in Gramm gemessener Niederschlagsmenge muss wieder durch den Querschnitt des Behelfsgefäßes geteilt werden, um die Niederschlagshöhe in cm (mm) zu berechnen.

Beträgt der Durchmesser des Gefäßes d (cm), so ergibt sich für die Auffangfläche F für den Kreisinhalt:

$$F = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 = d^2 \cdot \frac{\pi}{4} = d^2 \cdot 0,79 \quad (16.3)$$

Anschließend muss die Berechnung wie zuvor durchgeführt werden.

Bei allen Behelfsmessungen wird die Niederschlagshöhe nur in ganzen mm unter Wegfall der Zehntel angegeben.

16.4. Ersatzmessungen nach VuB3 BHB „Havarieplan“

Andere meteorologische Größen können nicht ersatzweise gemessen werden. Sie müssen mit den schon lange üblichen Verfahren ergänzt werden. Dazu enthält VuB 3 BHB (DWD)

einen Havarieplan, aus dem weitere Verfahren bei technischen Havarien im Rahmen des synoptischen Dienstes und des Flugwetterdienstes beschrieben sind.

17. VERGLEICH KONVENTIONELLER MESSTECHNIK MIT MODERNEN SENSOREN

17.1 Allgemeines

Leider ist es nicht immer möglich, Messungen während eines langen Zeitraumes unter gleich bleibenden Bedingungen durchzuführen, obwohl dies für die Aussagekraft von langen Datenreihen sehr wichtig wäre. Häufigste Ursachen sind Stationsverlegungen, der Einsatz neuartiger, technisch verbesserter Messinstrumente oder Veränderungen der Stationsumgebung. Hinzu kommt die Tatsache, dass es zunehmend zu einer Umstellung auf vollautomatischen Betrieb kommt. Die Kontinuität jahrzehntelanger Mess- und Beobachtungsreihen ganzer Regionen leidet, wenn kein Wetterbeobachter mehr da ist, der die Messdaten überprüfen und erforderlichenfalls korrigieren kann.

Natürlich haben sowohl Augenbeobachtungen als auch Messungen mit Geräten/Sensoren jeweils Vor- und Nachteile. Und natürlich kann und soll der technologische Fortschritt auch in der meteorologischen Messtechnik genutzt werden. Es muss nur klar sein, dass mit zunehmender Automatisierung eine neue Qualität von Datenreihen entsteht, die zumindest zum Teil nicht mehr vergleichbar sind mit den bisherigen Reihen und daher Aussagen über Änderungen des einen oder anderen Elementes sehr genau betrachtet werden müssen, von den wenigen Klimareferenzstationen und Wetterwarten an Verkehrsflughäfen abgesehen.

Anschaulich zeigt sich die Problematik bei einer Stationsverlegung, die mit einem Höhenunterschied verbunden ist. Da z. B. der Luftdruck oder die Temperatur im Mittel mit zunehmender Höhe abnehmen, ergibt sich bei einer Verlagerung einer Station mit einem Höhenunterschied eine abrupte Veränderung in der Messreihe, die nicht der tatsächlichen, natürlichen Entwicklung entspricht.

Sie können zu „künstlichen“ Sprüngen und Trends in den Datenreihen führen, die Aussagen zur Klimaentwicklung relativieren oder sogar verfälschen. Nahezu jeder Sensorwechsel birgt die Gefahr, dass die Messreihen durch solche Sprünge nicht mehr homogen sind. Um die Messreihen für die Klimatologie trotzdem verwenden zu können, müssen sie homogenisiert werden. Während dieses Homogenisierungsprozesses werden «künstliche» Veränderungen in den Datenreihen gesucht und korrigiert. Doch ist diese, durchaus machbare Methode kein einfaches Problem. So müssen genügend ähnliche Vergleichsreihen vorhanden sein, an denen sich die Inhomogenitäten korrigieren lassen. Dabei muss darauf geachtet werden, dass diese Vergleichsreihen nicht selbst Inhomogenitäten, bzw. ganz natürliche regionale Unterschiede aufweisen. Der Korrelationskoeffizient ist die mathematisch-statistische Größe und das Maß für die Ähnlichkeit von Messreihen. Er hat den Wert 1, wenn die Messreihen absolut identisch sind, er geht gegen Null,

wenn überhaupt kein Zusammenhang besteht. In der Praxis hat sich der Wert 0,7 als noch akzeptabel ergeben (Böhm, 2010). So werden historische Messwerte an heutige Messbedingungen angepasst und nicht-klimatische Einflüsse aus den Messreihen entfernt.

Etwas anders geht man mit sog. Proxydaten um. Dabei handelt es sich nicht um Messwerte, sondern um indirekte Klimadaten aus der „vorinstrumentellen“ Zeit, die aus Hinweisen auf Wetter und Klima gewonnen werden. Diese Rückschlüsse sind nicht immer eindeutig was die räumliche und noch weniger die zeitliche Abdeckung betrifft.

Die Homogenität langer Zeitreihen ist eine Voraussetzung für die erfolgreiche Untersuchung von Klimaänderungen. Homogenitätsprüfungen sichern, dass Änderungen in den Beobachtungsbedingungen (wie z. B. Stationsverlegungen, Austausch von Messfühlern) bei der Bewertung der statistischen Signale berücksichtigt werden können.

Auch Vergleiche von Messergebnissen zwischen konventionellen Geräten und modernen Sensoren sind in diesem Zusammenhang wichtig und seit einigen Jahren Bestandteil von Routineaufgaben an einer Reihe von Wetterstationen (nicht nur Klimareferenzstationen).

Hinzu kommt, dass beim Austausch von Messdaten in den unterschiedlichsten Messnetzen (siehe 19.6.) die unterschiedlichsten Messmethoden, Messprinzipien und Messgeräte angewendet werden. Einerseits ist der Austausch eine erfreuliche Entwicklung vor allem der letzten Jahre, andererseits aber stellt sich dabei die Frage der Vergleichbarkeit der Messwerte. Auch auf diesem Gebiet hat es erfreuliche Fortschritte gegeben. Beispielsweise hat der DWD mit der Bayerischen Wasserwirtschaft bereits 1999 in einem Kooperationsvertrag ein gemeinsames Niederschlagsmessnetz mit einheitlicher Geräteausstattung vereinbart.

Im Zusammenhang mit der Klimaänderungsdebatte wird überwiegend von der Temperatur (Erwärmung) gesprochen. Dabei ist interessant, ob der Wechsel von Messfühlern sich auf die Messergebnisse auswirkt, wobei die Faktoren Trägheit und Strahlung eine herausragende Rolle spielen.

Die folgenden Beispiele können dieses Problem nur exemplarisch aufzeigen, da es ganz sicher keine Einzelfälle sind, die anschließend beschrieben werden. Wenn von einer Erwärmung von 0,9 K in einem Jahrhundert die Rede ist, geht u. U. ein Teil davon zu Lasten des Gerätewechsels (z. B. Wechsel von Hg-Thermometer zu Pt 100), wenn die Unterschiede vor und nach dem Wechsel einige Zehntelgrad ausmachen. Im Zusammenhang mit dem Klimawandel müssen aus diesen Gründen einige Aussagen relativiert betrachtet werden.

17.2 Vergleich der Messwerte von Flüssigkeitsthermometern mit digitalen Sensoren

Die folgenden Abschnitte sind der Berliner Wetterkarte e.V., Beilage 46/2009, verfasst von Prof. Dr. Wehry, mit seiner freundlichen Genehmigung entnommen und leicht verkürzt wiedergegeben.

Probleme gibt es bei allen Stationen insofern, als fast überall in Europa und auch weltweit Ende der 1980er/Anfang der 1990er Jahre die Temperatur statt mit Quecksilberthermometer nun mit elektronischen Verfahren erfasst wird. Beim Wechsel vom Quecksilberthermometer zu „modernen“ Messmethoden werden viel raschere Änderungen der Temperatur als bisher erfasst. Dabei „profitiert“ vor allem das Maximum, bei dem nun Spitzen im Minuten-, zum Teil im Sekunden-Takt erfasst werden. Dies ergibt Maxima, die oftmals 2 K höher als beim trägeren Quecksilberthermometer liegen. Möglicherweise ist ein kleiner Teil des seit 1990 erfolgten weltweiten Temperaturanstiegs tatsächlich durch eine Änderung der Messmethoden vorgetäuscht – was noch zu untersuchen wäre!

In Mitteleuropa werden die Klimatagesmittel nach der alten „Mannheimer“ Methode

$$\text{Tagesmittel} = \frac{07 + 14 + 2 \cdot 21 \text{ MOZ}}{4}$$
 errechnet, wobei das

Maximum keine Rolle spielt. In vielen Teilen der Erde, z. B. in den USA und in den Tropen werden jedoch die Mittel durch

$$\frac{t_{\max} + t_{\min}}{2}$$
 errechnet.

Auch die Wetterhütten haben je nach Güte des Farbanstrichs durchaus Einfluss auf die Strahlungseigenschaften und damit auf die Temperaturangaben. Zu dieser Problematik merkte Dr. Klaus Müller, Leiter der Gruppe „Stadtmessnetz“ des Instituts für Meteorologie, FU Berlin, an: „Nur ein Beispiel: Tagesmitteltemperatur am 1.1.2009: Große Hütte (Wild): -3,3°C; kleine Hütte (Wild): -3,0°C; Aluminium-Hütte: -3,2°C; natürlich belüftete Kunststoffhütte: -3,0°C; künstlich belüftete Kunststoffhütte: -2,8°C. Gerade die alte Wetterhütte zeigt nach Angaben des DWD unzuverlässige Lufttemperaturmessungen mit Fehlern bis zu 2,5 K. Dies ist einer der Gründe, diesen Hütentyp im synoptischen Messnetz auszumustern. Für eine alte Klimareihe wäre dies eine Katastrophe, so dass auch bei uns (FU Berlin) der alte Wetterhütentyp für die Messungen im Botanischen Garten erhalten bleibt.“

An der Bundeswehr-Station Lechfeld sind von 1998 bis 2006 Parallelmessungen mit elektrischen (Pt 100) und Quecksilberthermometern durchgeführt worden (Hager, Neusäß bei Augsburg). Im Mittel dieser neun Jahre ergab sich für das Maximum eine um 0,93 K **über** und für das Minimum eine um 0,88 K **unter** den Quecksilbermessungen liegende Temperatur. Dies gilt verallgemeinert wahrscheinlich für ganz B. yern. Für andere Gebiete können die Unterschiede durchaus größer sein, insbesondere in Regionen mit hoher Strahlung. Daher sind hierzu weitere Untersuchungen notwendig.

An der privaten Station Horben bei Freiburg werden seit 1998 Quecksilber- und Elektronik-Thermometer genutzt. Letzteres zeigt nach Auskunft des Betreibers im Mittel 0,2 K höhere Maxima und ebenfalls 0,2 K niedrigere Minima an.

17.3 Vergleich der Strahlungsmessungen

Auch der folgende Abschnitt ist der Berliner Wetterkarte e.V., Beilage 46/2009 entnommen.

Auch die Messung der Sonnenscheindauer ist stark betroffen, da meist von der Brennschur-Messung (Gerät nach Campbell-Stokes) zur Messung der Strahlung gewechselt wurde. Letztere kann die Sonnenscheindauer deutlich genauer erfassen, muss jedoch – um mit dem Campbell-Stokes-Gerät kompatibel zu sein – entsprechend eingestellt werden, was erneut zu Ungenauigkeiten führen kann.

Wie bereits unter 14.2.1 erwähnt, wird beim DWD ab 120 Wm^{-2} „Sonnenschein“ erfasst, bei Meteoschweiz jedoch erst ab 200 Wm^{-2} , obwohl die WMO seit 2003 offiziell 120 Wm^{-2} empfiehlt. Hier muss man allerdings bedenken, dass es für das Campbell-Stokes-Gerät unterschiedliches Brennpapier gab. Vermutlich haben Vergleichsmessungen in der Schweiz, wo das widerstandsfähigere Papier benutzt wurde, zu diesem höheren Wert geführt.

Die Dahlem-Messungen des Sonnenscheins können außerdem dadurch verändert sein (eine Zunahme vortäuschen, dies ist jedoch bisher nicht untersucht worden), weil sie jetzt auf dem 24 m hohen Messturm des Instituts für Meteorologie erfolgen, also eine größere freie Rundumsicht als auf der Dachterrasse der früher genutzten Villa zu Grunde liegt.

Auch in Potsdam, Telegrafenberg können andere Einflüsse erfolgt sein, weil bei der Gründung der Station im Jahr 1893, der Berg kaum bewachsen war, heute dort hohe Bäume stehen, was jedoch nach Angaben der Stationsbetreiber keine Rolle spielt [Berliner Wetterkarte e.V., Beilage 46/2009].

17.4 Vergleich von Niederschlagsmesswerten

Die Messung der Schneehöhe erfolgte bisher an mehreren Punkten und die Werte wurden dann gemittelt. Mit der Automation setzt man auf Punktmessungen bei den Schneehöhen. So kommt es, wie etwa an der Wetterstation Boizenburg zu irreführenden Messwerten, weil sich über dem Schneebrett eine Schneewehe festgesetzt hat. Tatsächlich waren es am 18. Januar 15 cm, der Sensor meldete 45 cm. Oder am 1. Februar lagen tatsächlich 28 cm, laut Sensor 44 cm [Berliner Wetterkarte e.V., Beilage 46/2009].

Weitere Beispiele zu Messwerten aus der Niederschlagsmessung ergeben sich aus den Beschreibungen unter 11.6 Messunsicherheiten und Fehlerquellen. Ohne konkrete Beispiele angeben zu können, ist davon auszugehen, dass es im Zusammenhang mit anderen Messungen ebenfalls Probleme mit der Vergleichbarkeit gibt, insbesondere bei einem Wechsel, der mit einem völlig neuen Messprinzip verbunden ist. Man denke nur an die Windmessung mit den relativ trägen Schalenanemometern und den heute vielfach eingesetzten, nahezu trägheitsfreien Ultraschallanemometern.

Weitere Erkenntnisse werden von den Klimareferenzstationen (siehe 19.3) erwartet, an denen im Parallelbetrieb sowohl konventionelle Messtechnik als auch moderne Sensoren im Einsatz über viele Jahrzehnte verglichen werden sollen.

18. AUTOMATISCHE MESSSYSTEME

18.1 Allgemeine Angaben

Automatische Wetterstationen wurden ursprünglich entwickelt, um Messwerte meteorologischer Parameter aus schwer zugängigen oder unbewohnten Gebieten und von unbemannten Leuchttürmen zu bekommen. Sie sollten ohne menschliche Aufsicht über einen längeren Zeitraum in Betrieb sein können. Die ersten Geräte dieser Art wurden bereits im zweiten Weltkrieg eingesetzt.

Im Zusammenhang mit dem Messnetz 2000 des DWD (siehe 19.1) haben automatische Stationen bis hin zu automatischen Messsystemen in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung gewonnen, nicht zuletzt um Personal (-kosten) einzusparen. Andere Wetterdienste und private Wetterfirmen setzen fast nur noch auf die vollautomatische Erfassung der meteorologischen Parameter.

Bei den im DWD eingerichteten automatischen Stationen handelt es sich um Systeme mit hochwertigen Sensoren der neuesten Generation, die eine wertvolle Hilfe bei der Erstellung von Wettermeldungen sind und eine Ergänzung bestehender Beobachtungsstationen darstellen. Dennoch darf diese Entwicklung nicht darüber hinwegtäuschen, dass auch mit den besten Messsystemen die manuellen, von gut ausgebildeten Wetterbeobachtern erstellten Wettermeldungen nicht in vollem Umfang ersetzbar sind und daher eventuell Abstriche in Kauf genommen werden müssen. Was hierbei vertretbar ist und was nicht hängt wesentlich vom Datennutzer ab. So kann eine mit der Automation verbundene Reduzierung des Informationsgehaltes des Datensatzes, insbesondere an Wochenenden und in den Nachtstunden, für die verantwortungsvolle Flugsicherungstätigkeit eines Flugwetterberaters eine Einschränkung bedeuten, die problematisch sein kann. Die Verluste durch die Automation von Augenbeobachtungen an den Wetterstationen können dadurch minimiert werden, dass zumindest ein Teil dieser Ausfälle durch andere räumlich und zeitlich detaillierte Datenquellen, wie Radarinformationen, Satellitenbilder, Blitzortungssysteme und ein dichtes online meldendes Netz von nebenamtlichen Stationen ausgeglichen werden.

Automatische Stationen bieten natürlich viele Vorteile. Sie können ohne Unterbrechung, Tag und Nacht betrieben werden und arbeiten z. B. mit Solarkollektoren autonom. Sie können an unwegsamen Stellen eingerichtet werden und somit auf Ozeanen, z. B. auf Bojen und Schiffen und an Land Daten nehmen. Automatische Stationen sind in aller Regel programmierbar, sodass die Datenaufnahme für beliebige Zeitabschnitte möglich ist. Außerdem kann jeder gewünschte Parameter, der von einem oder mehreren gemessenen Parametern abhängt, direkt nach der Messung am Messort berechnet werden. Die meisten automatischen Wetterstationen enthalten Datenspeicher, die bei Ausfall des Übertragungssystems Daten lokal vorhalten.

Es ist von Seiten des DWD nicht beabsichtigt, alle Stationen zu automatisieren. So sollen folgende Stationen weiterhin personell besetzt bleiben:

- Flugwetterwarten zur meteorologischen Sicherung der Luftfahrt/Flugsicherheit
- Observatorien zur Gewinnung kompletter, komplexer meteorologischer Datensätze
- Nationale Klimareferenzstationen zur langfristigen Überwachung der Auswirkungen auf die Datengewinnung.

Damit ist an diesen Stationen gewährleistet, dass weiterhin auf menschliche Erfahrung gesetzt wird, um das augenblickliche Wetter vollständig erfassen zu können.

Neben den mit Personal besetzten Wetterwarten betreibt der DWD vollautomatische Wetterstationen – ohne Personal im Hauptamtlichen Messnetz. Sie sind mit derselben intelligenten Sensorik ausgerüstet und erfassen sämtliche automatisch erfassbaren meteorologischen Werte vollautomatisch. Das gilt auch für die Werte, die normalerweise an einer bemannten Wetterwarte mittels Augenbeobachtungen erfasst werden, wie Sichtweite, Wolkenhöhe und (in eng begrenztem Umfang) Wetterzustand. Zur Ermittlung des Wetterzustandes sind diese Wetterstationen zusätzlich mit einem Sichtweitenmesser, einem Laserceilometer und einem Laser-Niederschlagsmonitor ausgerüstet. Die Messdaten werden vom Stationsrechner gesammelt und automatisch via ISDN an die Zentrale des DWD übertragen. Darüber hinaus betreibt der DWD ca. 1000 vollautomatische Stationen im Nebenamtlichen Messnetz, die mit einem geringeren Sensorumfang ausgestattet sind.

18.2 AMDA – Automatische Meteorologische Datenerfassungsanlage

Im synoptisch-klimatologischen Messnetz werden 2 Typen von **Wetterwarten** unterschieden:

- **Wst I** ausgerüstet mit AMDA I. An diesen Stationen ist durchgehend ein Wetterbeobachter vor Ort, der den Wetterverlauf überwacht.
- **Wst IE** ausgerüstet mit AMDA I. An diesen Stationen ist von 05:00 – 21:30 gesetzlicher Zeit ein Wetterbeobachter vor Ort, der den Wetterverlauf überwacht. Während der Nichtbesetzungszeiten werden alle relevanten meteorologischen Daten nur vom Automaten erfasst (vollautomatischer Betrieb).

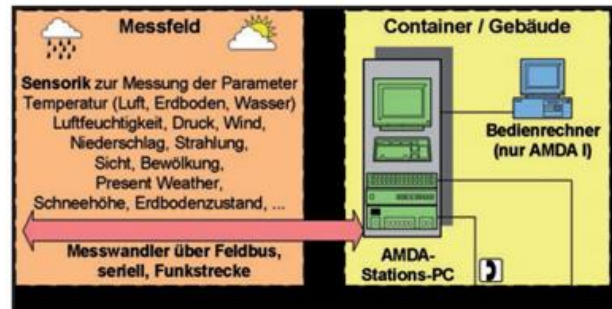
Im synoptisch-klimatologischen Messnetz werden 2 Typen von **Wetterstationen** unterschieden:

- **Wst II** ausgerüstet mit AMDA II
- **Wst III** ausgerüstet mit AMDA III. Diese Stationen werden von ehrenamtlichen Beobachtern betreut.

AMDA I ist für den vollautomatischen wie für den teilautomatischen Betrieb an Wetterwarten im hauptamtlichen Messnetz vorgesehen. Im vollautomatischen Betrieb werden automatisch generierte Datensätze/Meldungen oder daraus automatisch generierte Teile abgesetzt. Das Absetzen erfolgt nach der Generierung und internen Datenprüfung an der AMDA I ohne eine manuelle Freigabe durch einen Beobachter. Im teilautomatischen Betrieb werden alle Datensätze/Meldungen, die für eine Handeingabe durch den Wetterbeobachter vorgesehen sind bzw. die ausschließlich aus Handeingaben bestehen, erst nach Prüfung und Freigabe durch den Beobachter abgesetzt.

AMDA II ist ausschließlich für den vollautomatischen Betrieb an Wetterstationen im hauptamtlichen Messnetz vorgesehen. Es werden somit auch nur automatisch gewonnene Daten abgeliefert. Die Übertragung der erstellten Datensätze/Meldungen wird entsprechend vorgegebener Zeiten nach der internen Datenprüfung automatisch abgesetzt bzw. für den Abruf bereitgehalten.

Abb. 18.1 AMDA I/II



Folgende Parameter werden automatisch an einer AMDA I/II gemessen:

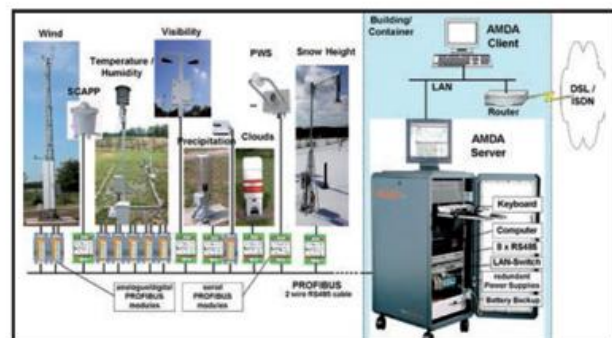
- Lufttemperatur
- Luftdruck
- relative Luftfeuchtigkeit
- Erdbodentemperaturen
- Windrichtung und -geschwindigkeit
- Niederschlag und Niederschlagsdauer
- Sonnenscheindauer
- Wetter (z. B. Schnee, Regen, Nebel mit Laser-Niederschlags-Monitoren, LNM)
- und direkte, diffuse und Globalstrahlung

Die Parameter

- Sicht
- Wolkenart und Höhe der Wolkenuntergrenzen
- Bedeckungsgrad
- Wetter
- und Schneehöhe

werden an mit Personal besetzten Wetterwarten (Wst I) von Beobachtern erfasst. Zur Unterstützung v.a. in den Nachtstunden werden die Sichtweite, die Wolkenart, die Höhe der Wolkenuntergrenzen, der Bedeckungsgrad, die Schneehöhe und das Wetter zusätzlich durch entsprechende Sensorik ermittelt.

Abb. 18.2 AMDA I/II



AMDA I und AMDA II haben die gleiche Software, sodass ohne weiteren Aufwand (ggf. nur Installation weiterer Sensoren) Stationen automatisiert werden können. Somit können nur tagsüber besetzte Stationen leicht zwischen teil- und vollautomatischem Modus wechseln.

AMDA III ist eine automatische Station zur Erfassung von Mess- und Beobachtungsdaten des DWD. Dieses System lässt sich nochmals in die drei verschiedenen Stationstypen unterteilen: S (Standardstation), Nst (Station für Niederschlagsmessungen) und WMst (Stationen für Windmessungen). Abhängig von der Aufgabe der Station ist sie mit unterschiedlicher Sensorik bestückt.

Durch die Online-Anbindung und damit hohe Verfügbarkeit aktueller Messwerte der AMDA III Stationen werden diese neben den hauptamtlichen Stationen auch für synoptische Zwecke genutzt und vollständig in das Nowcasting und das Warnmanagement integriert.

Abb. 18.3 AMDA Server

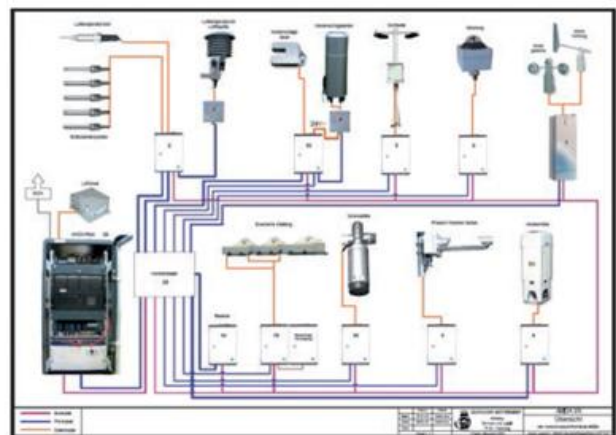


Alle Sensoren und Module werden regelmäßig kontrolliert. Sofern Defekte auftreten wird ein Alarm ausgelöst. Der Einsatz der Sensoren erfolgt gemäß nationalen und internationalen Vorgaben. Die Rekalibrierung der Sensoren und Module ist Bestandteil des Qualitätsmanagement Prozesses. An der AMDA erfolgt bereits eine erste vollautomatische Prüfung der Daten auf

- Vollständigkeit,
- Grenzwerte,
- zeitliche Konsistenz sowie,
- innere Konsistenz im Datensatz.

Die wichtigsten Funktionen der AMDA III-Rechner-Software sind die Datenaufnahme über die Sensorschnittstellen, Datenaustausch mit dem Handeingabeterminal (HET), die Datenverarbeitung wie Mittelwert- und Summenbildung, Qualitätssicherungsroutinen, Alarmgenerierung, Generierung von Fehlermeldungen mittels Fehlermanagement, lokale Speicherung über sechs Wochen und die Kommunikation mit der Zentrale.

Abb. 18.4 Übersicht der Anschlusseinheiten AMDA I/II



Übermittlung der Mess- und Beobachtungswerte

Es stehen verschiedene Datensätze zum Abruf zur Verfügung. Es sind zum Einen die Termindatensätze

- automatisch 1-minütig erzeugte und gespeicherte Daten (Niederschlag)
- automatisch 10-minütig erzeugte Daten (Windgrößen, Sonnenscheindauer, Feuchte und Lufttemperatur: das letzte 1-min-Mittel des 10-min-Intervalles wird gespeichert)
- manuell eingegebene, festen Beobachtungsterminen zugeordnete Daten,

und zum Anderen die Ereignisdatensätze

- automatisch erzeugt und sofort abgesendet: Schwellwertüberschreitungen
- manuell erzeugt und sofort abgesendet: gefährliche Wettererscheinungen
- automatisch erzeugt und sofort abgesendet: Systemstörungen, Fehlerauswertungen

Die Mess- und Beobachtungswerte werden an einer AMDA III 14 Tage gespeichert. Die Vorhaltung der Werte in AMDA I/II Stationen reicht je nach Parameter von einigen Stunden bis hin zu 10 Jahren.

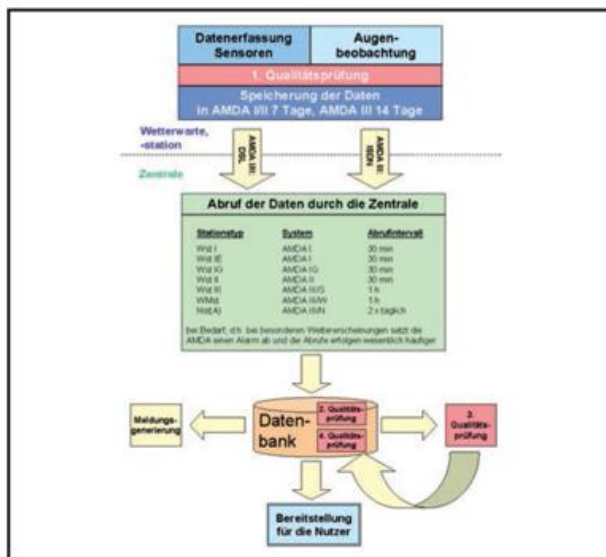
Weitere Datensätze werden für potenzielle lokale Nutzer, die fest mit der Station verbunden sind, bereitgestellt.

Die AMDA kommuniziert über einen Router und ISDN mit der Zentrale des DWD in Offenbach. Die Mess- und Beobachtungswerte einer Wst I und II werden von der Messnetzzentrale in Offenbach, genannt Informationslogistik Messnetze, kurz ILM, zweimal jede Stunde, einer Wst III S und Nst einmal je Stunde und einer WMst zweimal, bei Schwellwertüberschreitungen auch häufiger, abgerufen. Über die ILM erfolgt auch die Administration der Konfigurationen, die Alarmüberwachung und die Verteilung von Software-Updates. Von dort aus werden die Daten an die DWD-Datenbanken, an die Qualitätsprüfung, QualiMET und zur Weiterverbreitung an interne und externe Kunden weitergeleitet.

Datenfluss in der meteorologischen Datengewinnung

In der Grafik (Abb. 18.5) ist der Datenfluss in der meteorologischen Datengewinnung von der Erfassung bzw. Beobachtung der meteorologischen Parameter bis zur Abgabe qualitätsgeprüfter Daten an die Nutzer schematisch dargestellt.

Abb. 18.5 Datenfluss in der meteorologischen Datengewinnung



Der DWD betreibt z. Zt. ca. 1200 AMDA-Systeme, von denen rund 1000 an nebenamtlichen Stationen eingerichtet sind.

Modes III

Modes bezeichnet den gemeinsamen Nachfolger von AMDA I/II und AMDA III. Die Software der AMDA I/II-Systeme wird angepasst, um die Anforderungen von AMDA III erfüllen zu können. Die Software-Entwicklung und Software-Wartung wird langfristig wieder im DWD erfolgen. Im Rahmen des Projektes werden die historisch bedingten unterschiedlichen Vorschriften für die Verschlüsselung und Verarbeitung der Augenbeobachtungen im haupt- und nebenamtlichen Messnetz vereinheitlicht. Die Zusammenführung zu einem einheitlichen Bodenmessnetz vereinfacht die Strukturen und Verfahren und erhöht damit deren Effizienz.

Der DWD erhält vermehrt Anfragen Dritter zum Betrieb einer Messstation analog dem nebenamtlichen Messnetz. Speziell für Waldbrandvorhersagen werden automatische Niederschlagsstationen (AMDA III/N) nachgefragt. Mit Modes III soll ein einfaches und kostengünstiges System entstehen, das langfristig auch für öffentliche Wetterstationen verfügbar ist.

18.3 ASDUV

Der DWD ist vom Gesetzgeber beauftragt, die zur Sicherung des Flugverkehrs an den Verkehrsflughäfen erforderlichen meteorologischen Daten bereitzustellen. Die Datengewinnung erfolgt u. a. durch spezielle Sensoren für Sichtweite, Umfeldleuchtdichte, Windrichtung und -geschwindigkeit sowie für die Wolkenuntergrenze. An einer Start-/Landebahn sind bis zu acht unterschiedliche Messstandorte etabliert. Um die Sensoren an die Verarbeitungseinheiten anbinden zu können, steht dem DWD ein eigenes Kabelnetz mit der entsprechenden Nachrichtentechnik zur Verfügung. Zur Verarbeitung der anfallenden Messdaten wird das System ASDUV (Automatisches System zur Datenerfassung und -Verbreitung) auf allen internationalen Verkehrsflughäfen in Deutschland eingesetzt.

Das System ASDUV ist ein System zum selbsttätigen Erfassen, Verarbeiten, Überprüfen, Darstellen und Verbreiten meteorologischer Messwerte und Beobachtungen an allen internationalen Verkehrsflughäfen zur Sicherung des Flugbetriebes (Start und Landung) in meteorologischer Hinsicht, entsprechend den Anforderungen der ICAO. Es versorgt die Deutschen Flugsicherung (DFS), die Flugwetterwarten und die Luftfahrtberatungszentralen (LBZ) des DWD mit den wichtigen Informationen zur aktuellen Wettersituation mit real-time Wetterdaten.

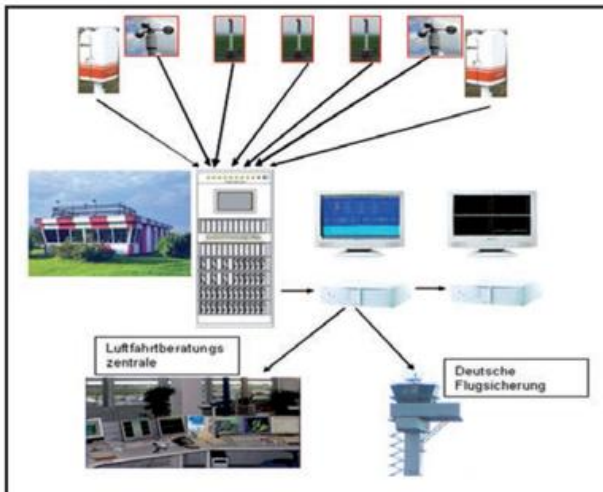
Das derzeitige System besteht aus drei Rechnern, die die Signale einer Anzahl von Sensoren verarbeiten. 1996 wurde das modular aufgebaute System an den internationalen Verkehrsflughäfen in Deutschland eingeführt. Es besteht aus drei Komponenten:

- **Sensoren**
Signalvorverarbeitung (Multi-Purpose-Card)
Rechner 1 im Landebahnhaus auf dem Flugfeld
Parameter: Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Wolkhöhe, Landebahnsichtweite sowie Luftdruck, Lufttemperatur und -feuchte
- **Kommunikation** (Rechner 2):
Datenübernahme vom Rechner 1
Anzeige der Messwerte, Generierung von Meldungen (METAR/SPECI)
Verteilung der Sensorwerte an die DFS und die Flugberatung des DWD
- **Graphik** (Rechner 3):
Im Landebahnhaus und in der Beratungszentrale vorhanden
Darstellung von Zeitreihen der gemessenen Daten in Diagrammen

Zur Erhöhung der Ausfallsicherheit ist der Rechner 2 mit dem Rechner 3 austauschbar.

Nachdem die meteorologischen Werte durch entsprechende messtechnische Geräte aufgenommen und über die Infrastruktur zum Landebahnbeobachterhaus übertragen wurden, müssen die Informationen dort gebündelt, verarbeitet und ausgewertet werden. Dies geschieht im dreistufigen ASDUV-N Datenverarbeitungssystem. Die ankommenden Informationen werden zunächst auf Plausibilität geprüft und der Datentransfer zwischen dem Sensor und dem System abgewickelt. Diese Aufgabe wird in einem 19" Schranksystem von einem Industriecomputer, dem sogenannten Rechner 1 übernommen. Nachdem die meteorologischen Informationen die erste Stufe durchlaufen haben, werden sie an einen Personalcomputer (PC) mit besonders robusten und langlebigen Hardwarekomponenten weitergeleitet (Rechner 2). Er erzeugt alle Datentelegramme für die DFS und für alle weiteren direkt angebundenen Kunden vor Ort. Darüber hinaus wird auf diesem Rechner vom Beobachtungspersonal das SPECI sowie das METAR zur internationalen Verbreitung generiert.

Abb. 18.6 Systemübersicht ASDUV-N



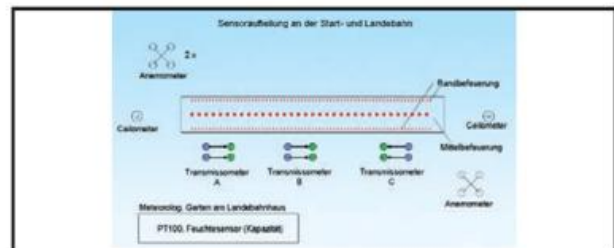
Im Landebahnbeobachterhaus befindet sich ein weiterer PC, welcher von der Hardwareausstattung mit dem Rechner2 identisch ist. Dieser PC (Rechner3) bereitet die meteorologischen Informationen grafisch in Form von übersichtlichen und skalierbaren Diagrammen auf. Ein weiterer Rechner3 befindet sich in der für den jeweiligen Flughafen zuständigen LBZ, damit die Beratung von Kunden stets mit aktuellen und validen Informationen erfolgen kann. In der LBZ wird eine Kurzzeitprognose, ein sogenannter Trend erzeugt und an das Beobachtungspersonal im Landebahnbeobachterhaus zurückgegeben.

Die eingesetzten Sensoren (Tab. 18.1) unterscheiden sich häufig von den Sensoren des synoptischen Messnetzes, da im Luftverkehr spezielle Grenzwerte und Genauigkeitsklassen gelten. Im Unterschied zum Messnetz verfügt das Flughafensystem über eine direkte Kundenschnittstelle zum Kontrollturm der DFS. Die Flughafengelände, insbesondere Rollwege, Vorfelder, Start- und Landebahnen und Umlaufstraßen, dürfen nur von Personal betreten und befahren werden, das speziellen Sicherheitsüberprüfungen unterzogen wurde und eine flughafenspezifische Fahrerlaubnis besitzt. Mit dem Kontrollturm der DFS muss ständig Funkkontakt gehalten werden. Hierfür sind Funkschulungen und die geländetechnische Einweisung eine Voraussetzung.

Tab. 18.1 Eingesetzte Sensorik mit ASDUV

Parameter	Sensoren	Fundstelle
Wetterhütte	Lamellen-Strahlungsschutzhütte LAM630	19.4.2
	Englische Wetterhütte (Stevensonsche Wetterhütte)	19.4.2
Feuchte	HMP45	9.3.3
Luftdruck	Quecksilberbarometer,	7.3.1
	AIR DB-1A und DB-1B, PTB 220	7.3.3
Sichtweite	DF 20 Vorwärtsstreulichtsensor	13.3.2
	Skopograph II („Flamingo“) Transmissometer	13.3.1
	FS11 Vorwärtsstreulichtsensor (auf Flughäfen)	13.3.2
	Videograph nur noch in EDDM, EDVV, EDDG	13.3.2
Sichtweite (veraltet)	Fumosens VI nur noch 4 in EDDM	-
Umfeldleuchtdichte	LM21	13.3.1
	StilbusII	
Windrichtung	Wind_Graycode	12.3.1
Windschwindigkeit	Schalensternanemometer	12.3.1
Wolkenuntergrenze	LD 40	10.3.1
	LD-WHX 05	10.3.1

Abb. 18.7 ASDUV – Sensorverteilung



Der störungsfreie Betrieb dieser Systeme ist für den Flugverkehr von größter Sicherheitsrelevanz. Ausfallzeiten haben bei ungünstigen Wetterverhältnissen eine Einschränkung des Flugverkehrs, im Extremfall die Schließung des Flughafens zur Folge. Aus diesem Grund sind alle relevanten Sensoren und Module gedoppelt. Um Störungen und Ausfallzeiten zu minimieren, werden die Sensoren und Module alle 6 Wochen überprüft und gewartet.

Seit 2006 läuft die Planung für ein Ersatzsystem ASDUV-E (= Ersatz). Das künftige System soll netzwerkfähig sein, damit beispielsweise Konfigurationsänderungen zentral durchgeführt werden können. Jede LBZ des DWD wird künftig einen direkten Zugriff („real time“) auf die Daten aller internationalen Flughäfen in Deutschland bekommen.

Im Juni 2010 wurde der Vertrag zur Herstellung der Systeme vom Auftragnehmer (Televent, Niederlassung Niederlande) unterzeichnet. Damit begann die Feinspezifikationsphase und die Herstellung eines Pilotsystems, welches Ende 2011 am Flughafen Hamburg Fuhlsbüttel in Betrieb gehen soll. Alle weiteren Flughäfen werden mit dem gleichen, nur größenangepassten System ausgestattet [MAZ, Juli 2010]. Die Einführung ist für die Jahre 2011/2012 geplant.

18.4 Automatisches Wetterbeobachtungssystem MIDAS IV AWOS

An einer Reihe von Regionalflughäfen in Deutschland ist das System MIDAS IV AWOS – Meteorological Data Acceleration System (AWOS – Automated Weather Observing System) im Einsatz, heute mit dem Namen **AviMet®** der Fa. Vaisala. Diese Systeme sind von den Flughafenbetreibern beschafft, die Wettermeldungen (METAR) werden im DWD-Messnetz verbreitet. Zudem überprüft der DWD alle 6 Monate die Funktionsweise der Sensoren/Geräte nach festgelegten Prüflaufplänen. Bereits im Jahr 1999 wurde der internationale Flughafen von Dubai als erster Flughafen mit MIDAS IV AWOS ausgerüstet.

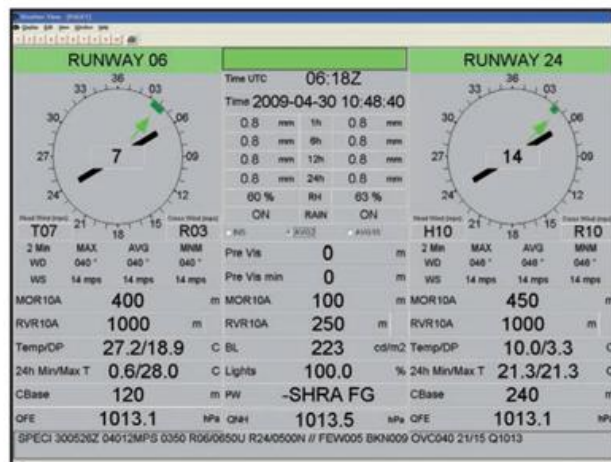
Tabelle 18.2 enthält alle, für die Ausstattung von **AviMet®** vorgesehenen Sensoren. Nicht alle Regionalflughäfen sind mit allen Sensoren ausgestattet. Die Beschreibungen der Sensoren sind in den jeweiligen Abschnitten, die in der Tabelle 18.1 angegeben sind, zu finden.

Tab. 18.2 Messsensoren der MIDAS IV AWOS

Parameter	Sensoren	Fundstelle
Luftdruck	PTB 220	7.3.3
Temperatur extern bzw. integriert	Pt 100	8.3.2.1
Feuchte	HMP45	9.3.3
2 Laser-Ceilometer	CL31	10.3.1
Niederschlag	RG13 H	11.3.2
Straßen- und Rollbahnboden und -tiefensensor	DRS511	11.5
2 Windsensor	WS425	12.3.2
3 Sichtweitenmessgeräte	LT31	13.3.1
Hintergrundleuchtdichte	LM21	13.3.1
Vorwärtsstreulichtsensor	PWD22	13.3.2

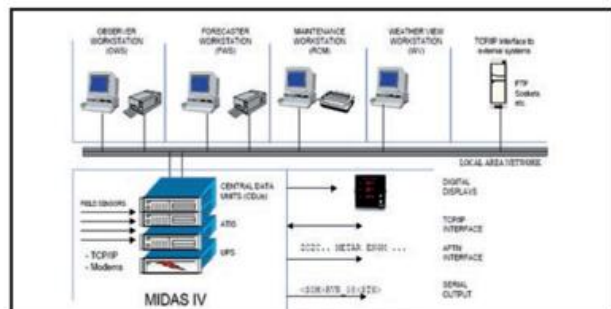
Alle Sensoren/Messgeräte entsprechen den relevanten Anforderungen der ICAO und der WMO zur Messung an Flugplätzen. Darüber hinaus kann das System individuell auch den Zustand der Start- und Landebahn, besondere Wettererscheinungen wie Low-Level-Windshear, Microbursts und Blitze erfassen.

Abb. 18.8 Anzeigesystem MIDAS IV AWOS (Vaisala)



MIDAS IV AWOS ist modular aufgebaut und kann so bei gestiegenen Anforderungen jederzeit erweitert werden. So kann die Grundversion, ausgelegt für einen Regionalflugplatz auf die Bedürfnisse eines internationalen Flughafens angepasst werden, einschließlich der Forderungen der ICAO bis zu CATIIIb.

Abb. 18.9 Verteilung der Displays auf den Flughäfen (Vaisala)

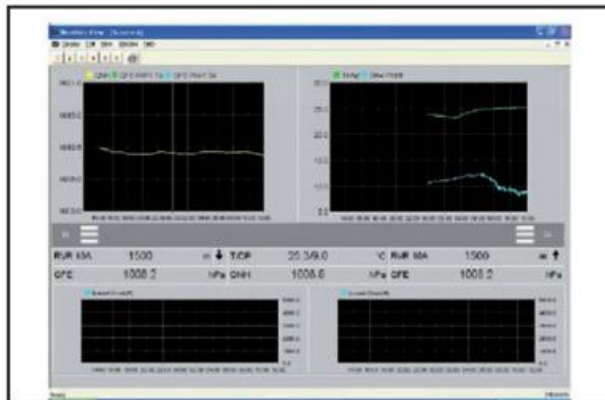


Die Software von MIDAS IV AWOS, auf LINUX oder Windows basierend kann sämtliche ICAO und WMO Dienste unterstützen, wie

- METAR, SPECI und TAF, SYNOP
- SIGMET, AIRMET, GAMET
- AD WRNG, WS WENIG
- SNOWTAM
- CLIMAT

die über mehrere Kommunikationsmittel verbreitet werden können. Meldungen über AFTN und GTS sind ebenfalls möglich. Dabei werden die Messergebnisse praktisch aller Sensoren übermittelt, bzw. auf ATC-Displays digital angezeigt bzw. graphisch dargestellt.

Abb. 18.10 MIDAS IV AWOS Graphik (Vaisala)



Einige Flugplätze mit Regionalverkehr sind z. T. mit einem System der Firmen Combitech, Televent etc. ausgestattet.

19. MESSNETZE IN DEUTSCHLAND, SCHWEIZ UND ÖSTERREICH

19.1 Allgemeines

Ein Stationsnetz ist die Menge aller Standorte, an denen bestimmte Parameter gemessen und/oder beobachtet werden. Die Stationsdichte ist eine Funktion des beobachteten Elementes. Wegen der hohen Variabilität des Niederschlags ist die Stationsdichte für den Niederschlag am größten. Je nach Ausstattung und Betriebsart gibt es unterschiedliche Messnetzkatgorien.

Grundsätzlich unterscheidet man im DWD zwischen

- Synoptischem Messnetz
- Klimamessnetz
- Niederschlagsmessnetz

Weitere Messnetze sind das

- Windmessnetz
- Strahlungsmessnetz
- Aerologisches Messnetz
- Radioaktivitätsmessnetz
- der Radarverbund

Daraus resultieren unterschiedliche Arten von Beobachtungsstationen, die in Tabelle 19.1 zusammengefasst sind. Alle Stationen einer Art werden zu einem der o.g. Netze zusammengefasst. Es gibt auch einzelne Stationen, die mit verschiedenen Aufgaben betraut sind und dann in mehreren Messnetzen gleichzeitig eingebunden sind.

Basierend auf den international von der WMO als zuständige UN-Organisation verbindlich vereinbarten, einheitlichen Verfahren werden systematische Wetterbeobachtungen in einem Netz von festgelegten Stationen zu vorgegebenen Zeiten durchgeführt. Diese internationalen Standards betreffen u. a. Auswahl der Standorte, Messbedingungen, Messinstrumente und deren Genauigkeit, Datenformate, Qualität, Melde- und Datenübertragungsverfahren um die Homogenität und möglichst die Qualität der Wetterdaten weltweit

sicherzustellen. Alle Staaten haben sich verpflichtet, die Verfügbarkeit meteorologischer Daten im Rahmen der globalen Zusammenarbeit im System der Welt-Wetter-Wacht (WWW) der WMO zu garantieren, wobei die nationalen Netze der amtlichen Wetterstationen hierfür das Rückgrat bilden.

Die meteorologische Datenerfassung ist eine internationale Aufgabe, zu der alle Wetterdienste beitragen. Durch die in allen Ländern eingerichteten Stationsnetze, einheitlicher Mess- und Beobachtungsmethoden und einheitlicher Datenformate, wird ein weltweiter Datenaustausch und die zeitgerechte globale Verfügbarkeit der Wetterdaten gewährleistet.

In Deutschland ist die gesetzliche Aufgabe der meteorologischen Datengewinnung als Grundlage für nationale wetterdienstliche Aktivitäten und für Beiträge im internationalen Kontext dem DWD im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung übertragen worden. Die Datengewinnung und die Netzdichte werden neben den Forderungen der WMO durch spezielle Anforderungen bestimmt.

Die Datengewinnungsnetze des DWD umfassen mit Fachpersonal besetzte Wetterwarten mit unterschiedlichen Mess- und Beobachtungsprogrammen und teilweise speziellen Datengewinnungsaufträgen (Radioaktivitätsüberwachung der Atmosphäre, flugwetterdienstliche Mess- und Beobachtungen, Radiosondenmessungen bis 30 km Höhe), vollautomatisch betriebene Wetterstationen, weiterhin nebenamtliche, teilweise automatisierte Wetter- und Niederschlagsstationen sowie Windmessstationen mit ehrenamtlichen Beobachtern bzw. Betreuern und ein Netz von überwiegend ehrenamtlichen phänologischen Beobachtern. Die mit den stationären und mobilen Stationen gewonnenen In-Situ-Messungen werden durch die Daten moderner Fernerkundungssysteme (Wetterradarsysteme, Blitzortungssysteme, vertikal messende Windprofiler-Radarsysteme) ergänzt.

Im Laufe der Zeit hat sich die Messdichte und Instrumentierung geändert. Die Anzahl der Stationen hat in den 90er-Jahren ihr Maximum erreicht. Zugenommen hat seitdem auch die Menge der erhobenen Daten, da mit der Einführung von Automaten die Anzahl der Stationen mit zeitlich hoch aufgelösten Daten deutlich angestiegen ist. An weiteren Stationen erfolgen neben dem Niederschlag zusätzliche Beobachtungen wie z. B. für Temperatur, Feuchte, Wind, Luftdruck, Wolken, Sichtweite, Sonnenscheindauer und andere Wetterelemente.

Messnetz 2000 des DWD

Der DWD hat mit dem Messnetz 2000 die Optimierung auf der Grundlage der fachlichen Anforderungen der Geschäftsbereiche des DWD und des GeoInfoDBw an das Boden- und aerologische Messnetz bezüglich der Qualität, sowie der räumlichen und zeitlichen Dichte der Daten und unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten durchgeführt. Die Ziele des Projektes waren, im Rahmen der erstellten Netzkonfiguration die einzelnen Stationsstandorte hinsichtlich der Messbedingungen neu zu bewerten, einheitliche Mess- und Beobachtungsbedingungen zu schaffen, die Stationen mit neuer automatischer Messtechnik auszurüsten und die Voraussetzungen für einen wirtschaftlicheren Messnetzbetrieb durch weitere Automati-

on und einheitliche automatische Prozesse von Datengewinnung, -Verarbeitung und -Prüfung zu erhalten.

Der (ehrenamtliche) Beobachter bleibt ein wesentlicher Bestandteil des Netzes. Er stellt Niederschlags-Vergleichsmessungen mit dem Hellmann-Sammler an, er beobachtet den kontinuierlichen Wetterverlauf und gibt Daten zum Termin sowie Sondermeldungen ein, wie auch schon früher. Zudem führt er zu einem gewissen Grade die Pflege der Station durch und informiert über Störungen. Neu ist, dass er nicht mehr Papierbögen ausfüllt, sondern die Daten direkt in ein Handterminal eingibt, was eine wesentliche Vereinfachung in der Verarbeitung bedeutet, da die Daten sofort auf dem elektronischen Datenträger sind. Durch die online Anbindung der Stationen im nebenamtlichen Messnetz stehen die Daten dieser Stationen jetzt viel früher zur Verfügung und können daher auch für synoptische Zwecke genutzt werden.

Längst sind nicht mehr nur die meteorologischen Daten gefragt, die am Boden erfasst werden können. Durch den technischen Fortschritt sind neue Datengewinnungsverfahren hinzugekommen, die der DWD anwendet und so einen Beitrag zur Wettervorhersage, der Klimaforschung und dem internationalen Datenaustausch liefert.

Mit dem Aufbau eines weltumspannenden Systems von geostationären und polarumlaufenden Wettersatelliten hat die meteorologische Datengewinnung in den letzten Jahrzehnten erheblich an Quantität, aber auch an Qualität und Homogenität der Daten hinzugewonnen, insbesondere durch die Verfügbarkeit von Daten aus datenarmen Regionen (Ozeane, Polar- und Wüstenregionen) und durch neue Messprogramme zur Überwachung von Umweltparametern (z. B. Ozon).

Alle Daten gelangen zum Rechenzentrum in Offenbach, das mit den Rechenzentren anderer Länder in Verbindung steht. Für die Datenkommunikation hat der DWD eine bundesweite Kommunikationsinfrastruktur, bestehend aus Weitverkehrsnetz (WAN) und lokalen Netzen (LAN's) aufgebaut.

Weitere Messnetze in Deutschland

In Deutschland betreiben einige Ämter, Behörden und Institute eigene Niederschlagsmessnetze, eine Reihe von ihnen auch Messnetze mit einer Auswahl verschiedener Parameter. Hierzu gehören insbesondere

- Umweltbundesamt,
- Wasserwirtschaftsämter, Landeswirtschaftsämter,
- Stadtmessnetze,
- Lawinenwarndienst und
- Institute von Universitäten.

Einige ausgewählte Messnetze werden zusätzlich zu den vom DWD betriebenen Messnetzen vorgestellt. Sie sollen exemplarisch zeigen, dass die Messnetzdichte in Deutschland, insbesondere beim Niederschlag sehr hoch ist. Darüber hinaus werden auch einige ausgewählte Messnetze benachbarter Länder vorgestellt, um die unterschiedliche Bestückung mit Messgeräten/Sensoren aufzuzeigen.

Die angestrebte Verdichtung des DWD-Messnetzes setzt natürlich voraus, dass die Daten zwischen den verschiedenen

Diensten ausgetauscht werden, was in den letzten Jahren verstärkt stattfand. Dabei ist es wichtig, dass die o.a. erwähnten Behörden/Ämter/Institute sicherstellen, dass diese Daten unter ähnlichen Bedingungen und mit gleichhoher Qualität, wie das beim DWD gewährleistet ist, erfasst werden.

Gerade beim Niederschlag ist eine grenzüberschreitende Zusammenarbeit erforderlich. So wird der Rhein, bevor er in den Bodensee fließt, durch Flüsse gespeist, die in der Schweiz und Österreich liegen. Diese Quellregion hat ein sehr großes Einzugsgebiet. Hochwasserprognosen sind also nur in Kenntnis der dort aufgetretenen Niederschläge möglich.

Heute gibt es in vielen Ländern verschiedene meteorologische Mess- und Beobachtungsnetze, die aus Stationen bestehen, deren Standorte nach Repräsentanz und Kontinuität ausgewählt und die möglichst langfristig beibehalten werden sollen. Dabei wird zwischen Bodenbeobachtungsstationen zur Datengewinnung an der Erdoberfläche und aerologischen Stationen unterschieden, die meteorologische Daten bis ca. 30 km Höhe aus der freien Atmosphäre liefern, die für die Betrachtung der dreidimensionalen Struktur des Wetters unerlässlich sind. Mobile Messstationen (z. B. Schiffe, driftende Bojen, Flugzeuge) ergänzen die stationären Messungen.

Seit einigen Jahren haben auch private Wetterdienste mit dem Aufbau eigener Messstationen begonnen.

19.2 Anforderungen an den Standort

Um die Messungen an verschiedenen Standorten miteinander vergleichen zu können, wurden von der WMO exakte Richtlinien definiert, welche Messvorgaben für die unterschiedlichen Parameter beinhalten. Diese Vorgaben sollen einerseits die Vergleichbarkeit der Messungen gewährleisten, andererseits sollen sie aber auch die Messgenauigkeit sicherstellen.

Wesentliches Auswahlkriterium für einen Standort ist seine Repräsentanz für die Umgebung (siehe 19.4.3). Ferner ist darauf zu achten, dass der Standort frei liegt, d. h. möglichst wenig Sichtbeeinträchtigung nach allen Richtungen aufweist. Mindestens bis zu einer Entfernung von 10 km soll die Sichtschtzung mit Hilfe von Sichtzielen möglich sein. Allgemein gelten folgende Anforderungen an den Standort (nicht für Küsten-, Mittel- oder Hochgebirgsstationen):

- Die Station soll nicht auf Kuppen, an Hängen, in Senken oder in unmittelbarer Nähe von Steilhängen liegen
- Die Umgebung muss frei von Hindernissen sein, die die Messungen und Beobachtungen behindern (lockere, flache Bebauung bzw. Bewuchs in der Nähe ist als Windschutz für die Niederschlagsmessung erwünscht)
- Der Höhenunterschied soll im Umkreis von 200 m nicht größer als 30 m sein
- Die freie Exposition der Station gegenüber den meteorologischen Einflussgrößen muss dadurch gewährleistet werden, dass alle die Strahlung und den Wind abschirmenden Hindernisse in Abhängigkeit von ihrer Höhe und Breite einen Mindestabstand vom Messfeld haben müssen.

- Die Station soll nicht in der Nähe von Feuchte-, Wärme- und Staubquellen liegen (z. B. Treibhäuser, Bewässerungs- bzw. Beregnungsanlagen)
- Möglichst geringe Versiegelung des Erdbodens in der unmittelbaren Nähe
- Der Platz für den Beobachter soll die ungehinderte Beobachtung des Himmels und der Umgebung ermöglichen
- Die Station soll nicht in unmittelbarer Nähe elektromagnetischer und elektrischer Quellen bzw. Felder (z. B. Sender, Hochspannungsleitungen) liegen
- Die Umgebungsbedingungen (Bebauung, Bewuchs, Beschaffenheit des Erdbodens) sollen für einen längeren Zeitraum (Richtwert 10 Jahre) unverändert bleiben.

Der Beobachter ist aufgefordert, die sich verändernde Umgebung der Station in Bezug auf Bebauung und Baumwuchs zu beachten. Bei gravierenden Änderungen, die sich auf die Qualität der erhobenen Daten auswirken, sind über die zuständigen Stellen, beim DWD über eine Regionale Messnetz Gruppe (RMG) entsprechende Maßnahmen einzuleiten.

19.3 Stationstypen des DWD und ihre instrumentelle Ausstattung

Der DWD hat sich zum Ziel gesetzt, meteorologische Daten an Bodenstationen in höherer zeitlicher und räumlicher Auflösung bereitzustellen und die Qualität der Daten zu erhöhen, um die neuen Anforderungen der Nutzer und Kunden zu erfüllen.

Die folgende Übersicht stellt alle Arten von Stationstypen dar, die der DWD betreibt bzw. betreut. Im synoptisch-klimatologischen Messnetz werden je 2 Typen von Wetterwarten und Wetterstationen unterschieden.

Tab. 19.1 Übersicht der Stationstypen des DWD

Stationstyp	Bezeichnung	Bemerkungen	Ausstattung
Wetterwarte	Wst I	hauptamtl., mit DWD-Personal durchgehende Beobachtungen;	AMDA I
	Wst IE	bemannt, planmäßig von 05:00 bis 21:30 GZ besetzt, sonst vollautomatischer Betrieb	AMDA I
Wetterstation	Wst II	hauptamtl., unbemannt vollautomatischer Betrieb	AMDA II
	Wst III	ehrenamtliche Beobachter (in Einzelfällen unbemannt)	AMDA III/S
Klimareferenzstation	Wst I REF	z.Zt. 12 Stationen	AMDA I + konventionelle Messtechnik

Flugwetterwarte	FWW	z.Zt. 17 Stationen	AMDA I
Strahlungsmessstation	Nst S		AMDA III/S
Niederschlagsstation	Nst (A)	ehrenamtliche Beobachter, mit Niederschlagssensor	AMDA III/N
	Nst (k)	ehrenamtliche Beobachter, mit konventionellem Niederschlagsmesser	
Windmessstelle	WMst	mit autom. Sensoren (online)	AMDA III/W
Phänologische Beobachtungsstelle	Phän		
Aerologische Aufstiegsstelle	Ae		
Sturmwarnstation	SWN	z.T. in Wst I/Wst II integriert	

Eine **Wetterwarte** (Wst I bzw. Wst IE) ist eine Station (Land-, Küsten- oder Bergstation) des hauptamtlichen Messnetzes des DWD, mit Personal des DWD bzw. des GeoInfoDBW besetzt oder automatisch arbeitend, ausgerüstet mit AMDA I. An diesen Stationen ist während der Besetzzeit ein Wetterbeobachter vor Ort, der den Wetterverlauf überwacht und Handeingaben (Augenbeobachtungen) eingibt. Während der Nichtbesetzzeiten werden alle relevanten meteorologischen Daten vom Automaten erfasst (vollautomatischer Betrieb).

Der DWD erfasst an einer Wetterwarte (Wst I) rund um die Uhr zahlreiche meteorologische Werte mittels moderner Sensoren (siehe AMDA I/II). Daneben sind an konventioneller Messtechnik das Stationsbarometer und der Niederschlagsmesser nach Hellmann vorhanden. Im Einzelnen sind dies unter anderem die Messwerte

mittels Messsensorik

- Lufttemperatur, Temperatur im und am Boden,
- Luftdruck,
- Luftfeuchtigkeit,
- Windrichtung und -Geschwindigkeit,
- Niederschlag, Schneehöhe,
- Sichtweite,
- Höhe der Wolkenuntergrenze und -Bedeckung,
- Strahlungsgrößen, Sonnenscheindauer,
- Radioaktivität in der Luft und im Niederschlag (nur an bestimmten Wetterwarten),
- Wassertemperatur an Küstenstationen der Nord- und Ostsee und
- Wetterzustand.

mittels Augenbeobachtung

- Sichtweite,
- Wolkenart, Höhen der Wolkenuntergrenze und Bedeckungsgrad,

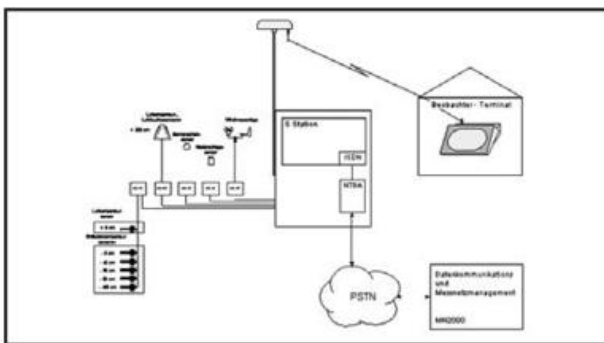
- Wetterzustand (z. B. Schnee, Regen, Nebel, usw) und Wetterverlauf,
- Niederschlag, Schneehöhe
- Erdbodenzustand.

Befindet sich eine Wetterwarte in einer Höhenlage von mehr als 750 m NHN, wird sie als **Bergwetterwarte** bezeichnet.

Die Parameter werden als synoptisch/klimatologische Beobachtungs- und Messdaten halbstündlich als Bodenwettermeldung verschlüsselt und im SYNOP-Code verbreitet. Wetterbeobachtungen auf deutschen Seeschiffen werden zum Teil im Auftrag des DWD durch die Schiffsbesatzungen vorgenommen.

Der Aufbau einer Station des Typs Wst III ist in Abbildung 19.1 skizziert.

Abb. 19.1 Aufbau Stationstyp Wst III des DWD



Die Wst III-Station ist dadurch definiert, dass sie

- Lufttemperatur,
- relative Luftfeuchtigkeit,
- Erdbodentemperaturen,
- Sonnenscheindauer,
- Niederschlag und
- Wind.

oder eine Teilmenge dieser Größen erfasst.

An einer Stationen Nst (A) wird nur der Niederschlag und WMst nur der Wind erfasst. Entsprechend ist Nst (A) mit AMDA III/N und WMst mit AMDA III/W ausgestattet

Flugwetterwarten

Der DWD ist für die meteorologische Beratung und Versorgung an den 16 internationalen Verkehrsflughäfen in Deutschland zuständig. Neben den Wetterwarten betreibt der DWD an diesen Standorten sogenannte Flugwetterwarten (FWW), an denen neben der normalen Wetterbeobachtung zusätzliche Beobachtungen und Messungen durchgeführt werden, die für die Sicherung des Flugverkehrs unerlässlich sind. Sie ist eine mit Personal besetzte Station des hauptamtlichen Messnetzes des DWD und rund um die Uhr für die Bereitstellung meteorologischer Daten zuständig. Das Personal erstellt regelmäßig halbstündliche METAR-Beobachtungen, bei Erreichen, Durchschreiten oder Überschreiten von Grenzwerten auch Sonderwettermeldungen (SPECI). Nach einer Ergänzung mit einer Zustandsentwicklung (TREND) wird die Meldung als Landewettervorhersage

international verbreitet. Zusätzlich werden die üblichen synoptisch-klimatologischen Meldungen wie bei den Wetterwarten und ausgewählten Wetterstationen erstellt.

Flugwetterwarten weisen einige Besonderheiten auf. So sind hier alle Messinstrumente und Messerfassungssysteme doppelt vorhanden, damit bei Ausfall der Flugbetrieb unterbrechungsfrei weitergeht. Weitere Besonderheiten sind, dass mehrere Windmessanlagen an Start- und Landebahn stehen und je nach Länge der Landebahn mehrere Sichtmessgeräte an der Piste stehen. Eine Vorstellung vom Umfang der Ausstattung eines Flughafens gibt die nachfolgende Liste der Sensorik [24, 2011] am Flughafen Frankfurt/M. Dort befinden sich

- 24 Sichtweitensensoren
- 4 Laserceilographen
- 7 Windmasten mit 14 Windrichtungs- und 14 Windgeschwindigkeitssensoren.

Der DWD hat alle für den Start- und Landevorgang wichtigen Wetterelemente im Bereich der Piste bzw. der zugehörigen Anflugsektoren, ggf. an mehreren Punkten entlang der Piste zu bestimmen. Der Standort der Wetterbeobachtung ist dabei so zu wählen, dass eine repräsentative meteorologische Beurteilung des Flugplatzes und insbesondere des Systems der Präzisionspisten gewährleistet ist.

Die für den Start- und Landevorgang wichtigen Wetterelemente sind in der Richtlinie für den Allwetterflugbetrieb besonders hervorgehoben:

- horizontale Bodensichtweite (meteorologische Sicht),
- Pistensichtweite (RVR),
- Wolkenuntergrenze,
- Bodenwind und
- Luftdruck.

An Wetterwarten, Flugwetterwarten und Wetterstationen werden grundsätzlich gleiche Sensoren und Geräte eingesetzt.

Klimareferenzstation

Eine Klimareferenzstation ist eine mit Personal besetzte Station des hauptamtlichen Messnetzes des DWD, die jahrzehntelange und ununterbrochene Klimabeobachtungen vorweisen kann. Der DWD betreibt z. Zt. (9/2011) 12 Klimareferenzstationen, die über einen langen Zeitraum (möglichst in den kommenden 100 Jahren) mit einheitlicher, **überwiegend konventioneller Messtechnik** die Klimaveränderung erfassen sollen. Wegen der bei Klimaänderungen über längere Zeiträume kleinen Änderungen meteorologischer Messgrößen sind nicht nur sehr genaue Messungen, sondern auch sehr stabile Messbedingungen über einen langen Zeitraum hinweg unablässig. Diese Anforderungen erfüllen Klimareferenzstationen. Zu ihnen gehören Wetterwarten, Flugwetterwarten und Bergwetterwarten, die repräsentativ für ihr landschaftliches und klimatologisches Umfeld sind. Die nachfolgenden Standorte hat der DWD als Klimareferenzstation ausgewählt:

Helgoland, Hamburg-Fuhlsbüttel (Flughafen), Schleswig, Potsdam, Görlitz, Lindenberg, Brocken, Aachen, Fichtelberg, Frankfurt am Main (Flughafen), Konstanz, Hohenpeißenberg.

Dabei kommt in der Klimatologie den **Säkularreihen** eine besondere Bedeutung zu. Das sind Messreihen, die über ein Jahrhundert (ein Säkulum) hinweg verlaufen. Teilweise wird mit dem Begriff auch eine lange Zeitreihe verknüpft, die unter weitgehend konstanten Messungs- und Auswertungsbedingungen erstellt wurde und daher frei von Inhomogenitäten sein sollte. So wird an der Station Potsdam neben der normalen Klimamessreihe, die nach wechselnden Beobachtungs- und Auswertungsverfahren erstellt wurde, eine gesonderte Säkularmessreihe archiviert, in der die Mess- und Auswertungsverfahren soweit irgend möglich konstant gehalten wurden.

Die Messungen an Klimareferenzstationen dienen auch dem Vergleich zwischen herkömmlicher, konventioneller Messtechnik und den neuartigen, für die Automation im DWD eingesetzten Sensoren. Das ist wichtig, um die Qualität der klimatologischen Beobachtungsreihen des DWD sicherzustellen und die Auswirkungen neuer Messtechniken auf die Datenreihen genau zu untersuchen und verifizieren zu können, um Fehlinterpretationen der Klimareihen zu vermeiden. Dazu werden vor allem im Hinblick auf klimatologische Fragestellungen für jeden neu eingeführten, klimatologisch relevanten Sensor mindestens zehnjährige Vergleichsmessungen mit konventioneller Sensorik durchgeführt.

An all diesen Stationen werden ganzjährig, rund um die Uhr, die für die Klimaüberwachung zentralen meteorologischen Größen (siehe Wetterwarte) zu den früheren Klimaterminen 07 Uhr, 14 Uhr und 21 Uhr gemessen und beobachtet. Die Wetterbeobachtung durch Menschen ist eine Leistung, auf die trotz modernster Technik und Automatisierung nicht verzichtet werden kann.

Ergänzend zu den meteorologischen Messungen wird an diesen Stationen auch der PM_{2.5}-Feinstaub im ländlichen Hintergrund als Wochenmittel erfasst und im Internet veröffentlicht. Im Gegensatz zu den Immissionsmessnetzen der Länder werden keine Grenzwerte, sondern die ländlichen Hintergrundkonzentrationen des gesundheitsschädlichen PM_{2.5}-Feinstaubes überwacht.

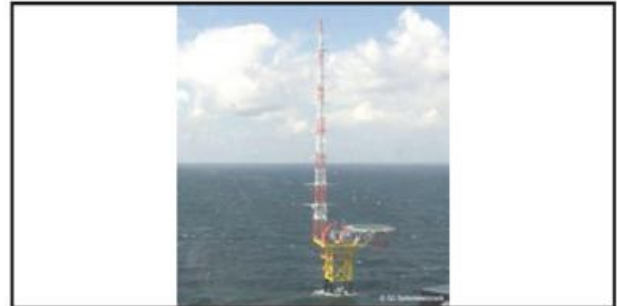
Mit dem System „Klimareferenzstation“ übernimmt der DWD eine Vorreiterrolle. Ziel ist der Aufbau eines europäischen Netzes von Klimareferenzstationen.

Das **nebenamtliche meteorologische Mess- und Beobachtungsnetz** des DWD besteht z. Zt. (Stand: 9/2011) aus ca. 1798 ehrenamtlichen Beobachtern, von denen ca. 840 online-Stationen sind. Von Letzteren sind ca. 20 Stationen reine Automaten, an den Übrigen werden von ehrenamtlichen Beobachtern zusätzlich zu den Sensormessungen auch Augenbeobachtungen durchgeführt. Eine ausführliche Übersicht über alle DWD-Stationen enthält Anhang 7.1 Standardmessnetz DWD.

Auf der **Forschungsplattform FINO 1** (www.fino-offshore.de/) werden seit 2003 mit hoch auflösenden Messsystemen wertvolle hydrographische und meteorologische Daten erhoben und gespeichert. Der DWD erstellt aus den Parametern Luftdruck, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit, Windrichtung,

Luft- und Wassertemperatur, Niederschlag, Globalstrahlung, UV-Einstrahlung, Wellenhöhe und -Periode sowie Sichtweite stündlich FM13-SHIP-Wettermeldungen, die weltweit zur Verfügung stehen.

Abb. 19.2 BMU-Forschungsplattform FINO 1



In den vergangenen Jahren brachte FINO 1 (Nordsee, nördlich von Borkum) zudem unerwartete und bis dahin nicht für wahrscheinlich gehaltene Erkenntnisse über Wellenhöhen in der Deutschen Bucht bei Orkanlagen. Zwei Sturmtiefs mit Windböen bis Orkanstärke lösten einen Seegang mit Wellen von bis zu 18 m aus.

Im Juli 2009 wurde die Forschungsplattform FINO 3 (www.fino3.de) auf See montiert. Damit sind neben FINO 1 jetzt 2 weitere Forschungsplattformen, FINO 2 in der Ostsee (nördlich von Rügen) und FINO 3 ca. 80 km westlich Sylt in der Nordsee errichtet. FINO 3 arbeitet nach Zuschaltung der Generatoren autark, so dass wissenschaftliche Experimente in Betrieb genommen werden können.

Für die Messung der meteorologischen Größen wird auf der Plattform ein Windmessmast mit einer Höhe von 80 m installiert. Damit wird die maximale Messhöhe 100 m über Seekartennull (SKN) betragen (siehe 7.1).

An der **Umweltforschungsstation (UFS)** auf der Zugspitze in 2650 m NHN erfasst der DWD unter fachlicher Leitung des Observatoriums Hohenpeißenberg und mit Personal der Wetterstation Zugspitze u. a. folgende Parameter:

Lufttemperatur, Relative Feuchte, Luftdruck, Windrichtung und -geschwindigkeit, Vertikalgeschwindigkeit, Sichtweite, Niederschlag, Globalstrahlung, direkte Strahlung, Sonnenscheindauer, Wolkenhöhe und Trajektorien.

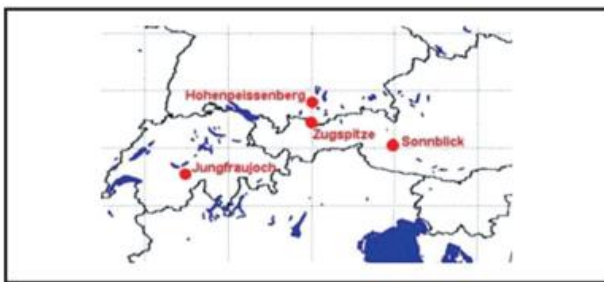
Abb. 19.3 UFS Zugspitze (Foto: H. Löffler)



Die UFS bildet den hochalpinen Teil der **Globalstation Zugspitze/Hohenpeißenberg** von insgesamt 26 Globalstationen im GAW-Programm und ist auch Standort des GAW Trainings- und Ausbildungszentrum (GAWTEC).

Zwischen den Wetterdiensten der Schweiz, Österreichs und Deutschlands wurde eine Kooperation vereinbart, um Messdaten der deutschen Globalstation durch Daten zweier weiterer Alpenstationen zu ergänzen: Jungfraujoch (Schweiz, 3580 m NHN) und Sonnblick/Österreich (3106 m NHN). Dieser sogenannte „DACH“-Verbund soll einen konsistenten Datensatz von globaler Relevanz erzeugen, mit dem Informationen über Trends von Luftbeimengungen und Klimaveränderungen in Mitteleuropa abgeleitet werden können.

Abb. 19.4 Standorte der GAW-Alpenstationen



19.4 Messfeld des DWD und GeoInfoDBw

Eine hauptamtliche Wetterwarte oder eine Wetterstation muss in ihrer Lage und ihrer Ausstattung sehr genau international vereinbarten Vorschriften genügen. Nur so liefert sie standardisierte Messwerte, die weltweit vergleichbar sind.

Wird eine Station eingerichtet, sind die **Stationshöhe** und die Barometerhöhe amtlich zu vermessen. Die Stationshöhe ist die mittlere Höhe der Messfeldfläche über NHN im unmittelbaren Bereich der Thermometerhütte. Die Angabe erfolgt in ganzen Metern. Wenn die Thermometerhütte auf Bauwerken (z. B. an Bergstation) installiert ist, gilt als Stationshöhe die mittlere Höhe des Untergrundes, auf dem das Bauwerk steht.

Mit **Barometerhöhe** wird die Höhe des operationell arbeitenden Drucksensors in m über NHN bezeichnet

19.4.1 Anforderungen an das Messfeld

Das Freigelände, in dem die meisten Geräte aufgestellt werden, trägt die Bezeichnung „**Messfeld**“. Es hat die Idealmasse 25 m x 25 m, wobei die Fläche für die Aufstellung der Geräte selbst 15 m x 15 m beträgt.

Allgemein gelten folgende **Anforderungen an die Beschaffenheit des Messfeldes**:

- Der Erdboden soll in seiner natürlichen, gewachsenen Zusammensetzung erhalten bleiben, bei erforderlichen Planierungen muss die gleiche Bodenart verwendet werden, die Messfelder sind ebenerdig anzulegen,

- Das Messfeld soll sich ohne Stufen- oder Muldenbildung in das Stationsgelände einfügen, es muss mit Ausnahme des Messplatzes für die Erdbodentemperatur und den Erdbodenzustand mit kurz gehaltenem Rasen bedeckt sein,
- Eine gute Durchlüftung des Messfeldes bei gleichzeitigem Schutz vor zu starken Winden für die Niederschlagsmessung (keine geschlossene Hecke > 50 cm Höhe um das Messfeld) muss gewährleistet sein,
- Hindernisse müssen soweit von der Hütte entfernt sein, dass mit Ausnahme der Sonnenauf- und -untergangszeiten (hier Beschattung bis ca. 1 Stunde zulässig) das Messfeld überwiegend von der Sonne beschienen werden kann; nur einzelne kurzzeitige Schattenbildungen im Tagesverlauf (ca. 10 min bis 30 min) sind in Ausnahme in stark strukturiertem Gelände zulässig, d. h. die Hinderniswinkel müssen im Süden – auch im Winter – unterhalb des höchsten Sonnenstandes liegen, in Abhängigkeit von der geographischen Breite also zwischen 12° bis 19°,
- Massive Hindernisse (z. B. Gebäude, Mauern, Container) sollen mindestens 10 m vom Messfeld entfernt sein, um die Reflexion und/oder die Abgabe von Wärmestrahlung zu verhindern,
- Das Messfeld soll vom Beobachter ständig einsehbar sein.

Auf Flugplätzen muss eine ausreichende Entfernung der Messfelder von Roll- oder Standflächen für Flugzeuge und Hubschrauber (als Richtwert gilt ≥ 50 m) eingehalten werden.

Die Fläche des Messfeldes selbst soll eben und mit Rasen bewachsen sein. Der Weg zur Hütte und zu anderen Messgeräten darf höchstens mit Gehwegplatten belegt werden. Der Erdboden soll in seiner natürlichen, gewachsenen Zusammensetzung erhalten bleiben, bei erforderlichen Planierungen muss die gleiche Bodenart verwendet werden, die Messfelder sind ebenerdig anzulegen.

19.4.2 Aufstellung der Sensoren/Messgeräte

Die Beschreibung zur Aufstellung der Sensoren/Messgeräten bezieht sich in erster Linie auf die an Wetterwarten/-stationen des DWD hauptsächlich eingesetzten Sensoren/Messgeräte. Sie sind auf einem normierten Messfeld untergebracht. Die nachfolgend drei erstgenannten Geräte werden normalerweise im Beobachterraum aufgestellt, da sie auch keine direkte Berührung mit der Außenluft haben müssen.

Die **Quecksilberbarometer** werden meist im Beobachterraum aufgehängt. Es gibt keinen vorgeschriebenen Standort, es sind aber einige Bedingungen einzuhalten, um die Messungen exakt durchführen zu können. So sollte das Messgerät in den unteren Etagen eines mehretagigen Gebäudes installiert werden, da in diesen Räumen der Einfluss des dynamischen Winddrucks am geringsten ist. Im Messraum des Barometers sind starke Temperaturschwankungen zu vermeiden. Das Barometer muss vor direkter Wärmestrahlung geschützt werden, deshalb darf es nicht in der Nähe eines Fensters oder einer Heizung angebracht werden. Starke Erschütterungen und Stöße dürfen im Messraum des Barometers nicht vorkommen. Die Skala sollte sich etwa in Augenhöhe befinden, um Parallaxenfehler weitgehend zu vermeiden. Um die ge-

Abb. 19.6 Klimahütte (englische Hütte)



Für den Begriff „Thermometerhütte“ werden auch noch Begriffe wie „Wetterhütte“ oder „Klimahütte“ verwendet. Die Thermometerhütte wurde erst in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts in den meteorologischen Messnetzen eingeführt. Die seit etwa 1850 Standard und weltweit im Einsatz befindliche Thermometerhütte aus Holz ist die „Englische Hütte“, die zu den natürlich ventilerten Wetterhütten (Typ 1) gehört. Sie erfüllt die Forderungen hinsichtlich Strahlungsschutz und Kontakt zur Außenluft mehr oder weniger zufriedenstellend.

Abb. 19.7 Englische Hütte mit konventioneller Instrumentierung

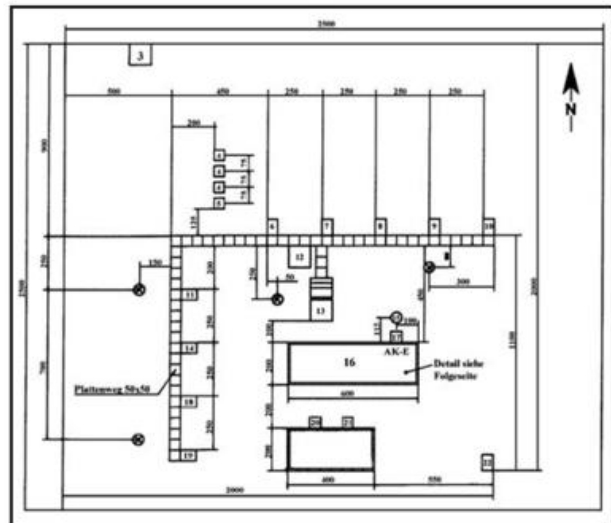


Für die Aufstellung der **Englischen Hütte an Klimareferenzstationen** zur Messung der Lufttemperatur und Luftfeuchte gelten zusätzlich folgende Anforderungen:

- Türöffnung in Richtung Nord, so dass die Messinstrumente bei Öffnen der Hüttenür vor der Sonne geschützt sind,
- Die Gefäße der Psychrometer-Thermometer in der Hütte müssen exakt 2,0 m über Grund installiert werden
- Der dreistufige Tritt mit Handlauf, der dem Beobachter ein sicheres Ablesen der Messwerte ermöglicht, darf nicht am Hüttengestell anliegen

Der Standort ist im Standard-Messfeld einer Klimareferenzstation des DWD festgelegt.

Abb. 19.8 Standard-Messfeldskizze (Maßangaben in cm) Klimareferenzstation DWD (aus VuB 3 THB)



Es bedeuten:

- 3: Standort Wind (FK-Mast)
- 4: Strahlung CM
- 5: Sonne/Strahlung (SCAPP) (ggf. bei 15)
- 6: Blitz (optional) (ggf. mit 7 tauschen)
- 7: Laser-Ceilometer (ggf. mit 6 tauschen)
- 8: Laser-Niederschlagsmonitor (optional) 8 Pollerleuchte, weitere Gehwegplatten und Pollerleuchten nach Bedarf
- 9: Hagelsensor (optional) konv. Thermometer
- 10: Schneehöhensensor (optional 1 = -100 cm, 2 = -50 cm, 3 = -20 cm)
- 11: Niederschlag, Hellmann 4 = -10 cm, 5 = -5 cm, 6 = +5 cm
- 12: Schneebrett Erdbodentemperatursensoren
- 13: Englische Thermometerhütte, konv. Instr 7 = < -100 ... -5 cm > ET
- 14: Niederschlagssensor 8 = Lufttemperatur 5 cm
- 15: Lufttemperatur/-feuchte 2 m (ggf. mit 5) ET: Erdbodentemperatur (Pt100)
- 16: Erdbodentemperatur + EMin konv. AK-E: Anschlusskasten-Erdbodentemperatur
- 17: Erdbodentemperatur + Lufttemperatur (5 cm)
- 18: Niederschlag, Hellmann
- 19: Niederschlagsschreiber
- 20: Erdbodenzustand (Vereisung)
- 21: Erdbodentemperatur (0 cm) + E-Zustand
- 22: Videograph

Bei dieser Wetterhütte bestehen Jalousien aus doppelt ausgelegten, winddurchlässigen Lamellenwänden, die außen weiß angestrichen sind, d. h. an der Außen- und Innenseite, um den Eintritt von Strahlung weiter zu reduzieren, um die Temperaturdaten nicht durch die Sonneneinstrahlung zu verfälschen. Dunkle Wetterhütten würden eine zu hohe Temperatur aufzeichnen und der systematische Fehler wäre zudem in Abhängigkeit von der Witterungsentwicklung unterschiedlich hoch. Dennoch besitzt auch die weiß angestrichene Hütte Fehler, die unter 8.4.3 behandelt sind. Und letztlich sind hohe Kosten und ein großer Wartungsaufwand damit verbunden. Die Hütte befindet sich auf einem Gestell, das mit 4 Zementfüßen im Erdboden verankert ist.

Es ist darauf zu achten, dass Bäume und Büsche trotz Wachstums die Messwerte nicht beeinträchtigen. Das gilt auch für benachbarte Grundstücke und für Bauten, die neu errichtet werden sollen.

In dieser Hütte sind die Psychrometer-Thermometer (Hüttenpsychrometer), Maximum- und Minimumthermometer

untergebracht. Auch Thermograph und Hygrograph bzw. das Kombigerät Thermohygrograph sind hier untergebracht.

Auf Bergstationen ist eine speziell konstruierte Holzhütte im Einsatz.

Eine weitere Wetterschutzhütte ist die Gießener Wetterhütte. Sie ist etwa nur halb so breit wie die Stevensonsche Wetterhütte und verfügt außerdem nur über einfache Jalousien.

Abb. 19.9 Gießener Wetterhütte (geöffnet)



Alternativ zu den konventionellen Wetterhütten werden durch die fortschreitende Automatisierung der meteorologischen Datengewinnung, heute moderne Wetterschutzhütten aus Plastik für automatische bzw. digitale Stationen verwendet. Diese (Strahlungsschutz-) Hütten sind wesentlich kleiner und bestehen aus runden Lamellenwänden. Sie sind zwangsbelüftet, d. h. zusätzlich mit einem strombetriebenen Lüfter ausgestattet, um einen möglichen Wärmestau zu verhindern und eine gute Durchlüftung zu gewährleisten und damit die geringeren Maße des Gehäuses nicht durch Materialerwärmung zu einer Verfälschung der Lufttemperatur führen.

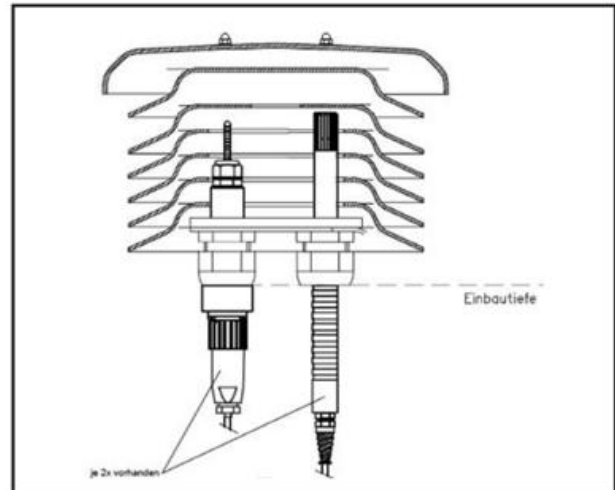
Eine Wetterschutzhütte dieser Art ist die LAM630, die vom DWD entwickelt und erprobt wurde und von der Fa. Eigenbrodt hergestellt wird. In ihr befinden sich der **Temperatursensor Pt 100** und der **Feuchtesensor HMP45D** gedoppelt, um eine hohe Datenverfügbarkeit, Plausibilität und Qualität der Daten zu gewährleisten. Sie löst die „Englische Hütte“ im DWD ab. Klimareferenz- und Bergstationen des DWD behalten jedoch zusätzlich die „Englische Hütte“.

Abb. 19.10 Wetterschutzhütte LAM630 (Eigenbrodt)



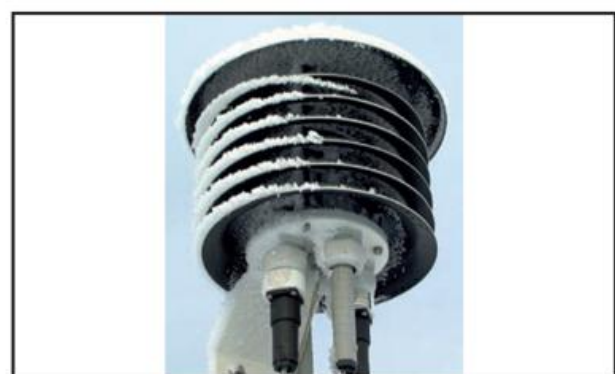
Im Gegensatz zur alten englischen Hütte ist die LAM630 mit natürlicher Ventilation und Unterstützung eines eingebauten 12V DC Lüfters besser durchlüftet und hat einen auf $<1\text{ K}$ reduzierten Strahlungsfehler. Durch die geringe Masse hat sie auch eine geringe Trägheit. Geringere Kosten und ein geringer Wartungsaufwand sind die weiteren Vorteile dieser Hütte.

Abb. 19.11 Lamellenschutzhütte LAM630 (Schnittzeichnung)



Die Form der Schutzhütte entspricht der heute weit verbreiteten Lamellenhütte. Hierbei sind sieben Teller aus ABS-Kunststoff übereinander angeordnet. Die unteren vier Teller bilden den Messraum, der durch den fünften Teller mit eingebautem Lüfter abgeschlossen wird. Der sechste und siebte Teller dienen als Strahlungsschutz, wobei der Durchmesser des oberen Tellers um 50 mm größer ausfällt, so dass durch die Überlappung ein zusätzlicher Strahlungs- und Benetzungsschutz geschaffen wird. Die Lüfterdrehzahl kann von der AMDA ausgelesen werden.

Abb. 19.12 LAM630 vereist (Foto: Eigenbrodt)



Der Standort dieser Hütte ist im Standard-Messfeld des DWD festgelegt.

An einigen Regionalflughäfen ist für den Pt 100-Temperaturfühler noch die Kugelhütte nach Prof. Baumbach der Fa. Friedrichs im Einsatz. Durch besondere Anordnung und aerodynamische Formgebung der Kalotten wird eine Belüftung erreicht, die etwa 70 % der umgebenden Windgeschwindigkeit entspricht. Sie besitzt eine sehr geringe Wärmekapazität,

Kalotten sind von innen geschwärzt; mit eingebautem Messfühler Pt 100 (n. DIN 60751 B 1/3 Toleranz).

Abb. 19.13 Kugelhütte n. Baumbach (Friedrichs)



Das Material besteht aus Aluminium eloxiert, mit Schutzlackierung. Diese Wetterhütte weist insbesondere an windstarken Strahlungstagen Abweichungen von bis zu +2 K auf, da die natürliche Ventilation dieser Wetterhütte unzureichend ist. Da dieser Wert die Toleranzgrenze für die Lufttemperatur (0,5 K) erheblich übersteigt, soll diese Hütte ausgetauscht werden.

Mit Inkrafttreten einer neuen Richtlinie Flugwetterdienste (BMVBS) und einem begleitendem Handbuch des DWD werden nur noch künstlich ventilierte Wetterhütten als Strahlungsschutz durch den DWD zugelassen. Alle natürlich ventilierten Wetterhütten erfüllen bei Strahlungswetter und niedrigen Windgeschwindigkeiten nicht die WMO/ICAO-Anforderungen und sind daher zukünftig auf Flugplätzen nicht mehr zugelassen.

Gemäß Artikel 10 der Verordnung (EG) Nr. 552/2004 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 10. März 2004 (Interoperabilitäts-Verordnung) müssen alle Systeme und Komponenten am Flugplatz die grundlegenden Anforderungen erfüllen. Danach verliert die Kugelhütte (n. Baumbach) endgültig die Betriebsgenehmigung des DWD für die Messung der Lufttemperatur und ggf. Luftfeuchte an Flugplätzen, an denen der DWD für die Flugwetterbetriebsdienste verantwortlich ist.

Gemäß oben erwähnter Richtlinie soll, wie bereits erwähnt, an den Flughäfen nicht die relative Luftfeuchte, sondern die Taupunkttemperatur gemessen werden. In der Regel werden für diese Messung Polymer-Feuchtesensoren eingesetzt, deren interne Messgröße proportional zur relativen Luft-

feuchte ist und somit mittels der Lufttemperatur in eine Taupunkttemperatur umgerechnet werden muss. Diese Lufttemperatur für die Umrechnung muss möglichst nahe am Ort des Polymer-Feuchtesensors gemessen werden. Die meisten Feuchtefühler auf Polymerbasis verfügen deshalb über einen Temperatursensor direkt am Feuchtemesselement, dessen Temperaturmesswert dafür herangezogen werden kann. Einige Feuchtefühler berechnen bereits intern die Taupunkttemperatur und stellen somit eine gute Lösung dar. Bei dieser Vorgehensweise sind keine besonderen Anforderungen an die Wetterhütte des Feuchtefühlers zu stellen. Diese Forderung wird mit der Wetterschutzhütte LAM630 erfüllt.

Eine weitere Art von Wetterschutzhütte wird von der Fa. Kroneis hergestellt und in einigen Messnetzen verwendet. Sie erfüllt die WMO-Norm und die ÖNORM durch die Zwangsbelüftung mit Ventilator.

Abb. 19.14 Wetterschutzhütte Typ 430 (Foto: Kroneis)



Der Temperatursensor befindet sich im unteren Teil von 3 konzentrischen Rohren, die den Sensor gegenüber Strahlung isolieren. Im oberen Teil befindet sich ein bürstenloser DC-Ventilator, der für die Durchlüftung der beiden innersten Rohre sorgt. Die Strömungsgeschwindigkeit ist größer als 2 m s^{-1} . Das äußere Rohr ist aus weiß lackiertem Messing und der Hut aus weiß lackiertem Aluminium. Die beiden inneren Rohre sind aus Kunststoff.

Die Wetterhütte kann auch mit einem Taupunktsensor oder mit einem elektronischen Temperatur-Feuchte-Sensor ausgestattet werden. Verwendung finden NTC-Temperatursensoren mit $\pm 0,1 \text{ K}$ Genauigkeit bezüglich Linearität und Austauschbarkeit

Jeder Wechsel zu einer anderen Art von Strahlungsschutzhütte birgt die Gefahr, dass die Messwerte danach nicht mehr so ohne weiteres vergleichbar mit davor gemessenen Werten sind. Auch die gleichzeitige Verwendung unterschiedlicher Wetterhütten in der Praxis macht die Vergleichbarkeit der Messwerte problematisch.

Das **Erdbodenmessfeld**, dessen Standort im Standardmessfeld des DWD festgelegt ist, soll möglichst ganztags unbeschattet sein, dient neben der Messung von Temperaturen im Erdboden sowie in 5 cm über Grund auch der Ermittlung des Erdboenzustandes, wie z. B. „trocken, feucht, nass und gefroren“.

Das Messfeld hat standardmäßig eine Größe von 2,5 x 4,0 m. Hier stecken die Sonden mit elektrischen Thermometern im Boden. Sie messen die Lufttemperatur in 5 cm über dem Boden, dazu die Temperatur im Erdboden in 5, 10, 20, 50 und 100 cm Tiefe. Der Untergrund soll aus **natürlich gewachsenem** (nicht aufgeschüttetem) **Boden** bestehen, weil die verschiedenen Bodenarten (z. B. Lehm oder Sand) sich nicht nur in ihrem Aufnahmevermögen für Wasser, sondern auch in ihrer Wärmeleitfähigkeit unterscheiden. Die Fläche ist von Bewuchs freizuhalten, muss aber ansonsten unbearbeitet bleiben; abgelagerte Niederschläge dürfen nicht entfernt werden.

Abb. 19.15 Erdbodenmessfeld mit 5 cm Temperatursensor und Erdbodentemperatur (Foto: DWD)



Für die konventionelle Messung werden die Erdbodenthermometer von Ost nach West fortschreitend so in den Boden eingebracht, dass sich die Gefäße in 5 cm, 10 cm, 20 cm, 50 cm und 100 cm Tiefe befinden. Die Quecksilbergefäße bzw. die Sensoren dürfen nicht in das Grundwasser hineinreichen.

Damit die Sonneneinstrahlung die Kapillare der Stockthermometer höchstens unter einem spitzen Winkel trifft, zeigt das Kapselende dieser Glasthermometer (5 cm, 10 cm und 20 cm Tiefe), die untereinander einen Abstand von 10 cm und zum Flächenrand von 1 m haben, nach Süden.

Für die Thermometer der Tiefen 50 cm und 100 cm, evtl. auch 200 cm (Stabthermometer), die zu den Glasthermometern und untereinander einen Abstand von 50 cm und zum Flächenrand von 1 m haben, werden die Löcher mit dem Erdbohrer vorbereitet und Hüllrohre eingesetzt. In diese steckt man dann die entsprechenden Stäbe mit den Thermometern, deren Kapsel Kontakt mit dem Erdboden haben muss. Es ist darauf zu achten, dass das Rohr mit der Abdeckkappe des Stabes abschließt.

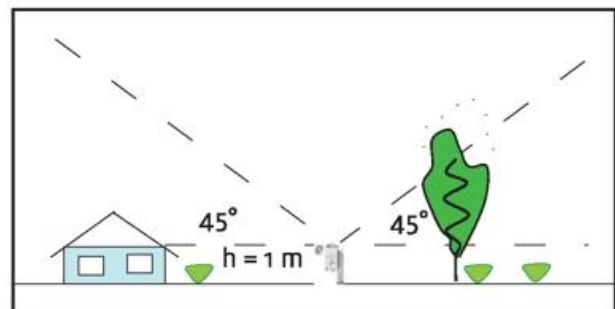
Auf die Erprobung eines Sensors zur Erfassung des **Erdboenzustands** im Messnetz des DWD wurde unter 11.4 ausführlich eingegangen. Es zeigte, dass derzeit verfügbare Geräte noch nicht die Anforderungen des DWD erfüllen.

Für das **Minimumthermometer am Erdboden** dient als Geräteträger ein Metallstab, auf dem die Halterung für das Thermometer stufenlos verschoben werden kann. Der Stab hat eine Länge von 50 cm, an Stationen ≥ 500 m NHN wegen der zu erwartenden größeren Schneehöhen eine Länge von 1 m. Er wird senkrecht in das Erdbodenmessfeld gesteckt und die Halterung so eingestellt, dass das Thermometer sich waagrecht 5 cm über dem unbewachsenen Boden bzw. der Schneedecke befindet. Der Abstand zu den Erdbodenthermometern soll 50 cm betragen.

Die **Erdbodenthermometer** sind auf dem Messfeld für Erdbodentemperaturen installiert. Bei den Stockthermometern muss beachtet werden, dass nach dem Einsetzen in den Erdboden die Skala nach Norden weist und die Thermometerenden nach Süden zeigen.

Standardmäßig sind **Niederschlagssensoren** so aufzustellen, dass sich die Auffangfläche des Sensors waagrecht in 1 m Höhe über Grund befindet. Je nach Windgeschwindigkeit wird ein gewisser Anteil der Niederschlagsteilchen über die Auffangfläche hinweg getrieben. Deshalb ist eine Aufstellung in völlig freiem Gelände sowie unmittelbar im Lee eines Hindernisses zu vermeiden. Zur Aufstellung gut geeignet sind z. B. Gärten, in denen Hecken o.ä. Windschutz vorhanden ist.

Abb. 19.16 Aufstellung von Niederschlagsmessgeräten



Bei der Aufstellung ist gemäß WMO zu beachten:

- bei der Auswahl des Messplatzes muss darauf geachtet werden, dass Hindernisse wenigstens viermal so weit entfernt sind wie ihre Höhe ist. Ist das nicht zu realisieren, muss der Höhenwinkel zum Hindernis $\leq 45^\circ$ sein. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass Bäume und Sträucher im Laufe der Zeit größer werden,
- der Standort darf weder im Luv noch Lee von Gebäuden oder Bäumen sein,
- der Abstand des Niederschlagsmessers von Gegenständen, die niedriger sind als der Sensor soll mindestens doppelt so groß wie deren Höhe sein,
- Standorte auf Hügeln und in Gelände mit starken Neigungen (besonders in vorherrschender Windrichtung) sind zu meiden,
- die Aufstellung auf Dächern oder Terrassen ist nicht gestattet.

Der **Niederschlagsmesser** n. Hellmann soll in einem Abstand zu Hindernissen oder anderen Sensoren aufgestellt werden, der mindestens der 2-fachen, im Idealfall der 4-fa-

chen Hindernis-/Sensorhöhe entspricht. Die Aufstellung erfolgt auf einer ebenen mit Gras bewachsenen Fläche, ggf. auch auf einer Kiesfläche. Schneeverwehungen von Dächern oder Bäumen dürfen auf keinen Fall das Messgerät erreichen. Der Niederschlagsmesser wird an einem Geräteträger befestigt. Im Normalfall ragt der Geräteträger (Metallpfosten) 90 cm aus dem Boden, die Auffangfläche des Messgerätes befindet sich in exakt 1,0 m Höhe.

Im DWD wurde festgelegt, dass wegen zu erwartender größeren Schneehöhen die Höhe der Auffangfläche

bei einer Stationshöhe von >501 bis 800 m NHN in 1,5 m,

bei einer Stationshöhe von >800 m NHN in 2,0 m

über Grund sein sollen.

Für den **Niederschlagsschreiber** (nur an Wst I REF), gelten dieselben Hindernisfreiheiten wie beim Niederschlagsmesser. Er wird auf eine stabile Unterlage (meist flacher Betonsockel) gesetzt, damit der senkrechte Stand gewährleistet ist. Er wird auf einem horizontalen Betonsockel, der nur wenige cm aus dem Boden herausragt installiert, sodass sich die Auffangfläche in 1,2 m über dem Boden befindet.

Niederschlagssensor **PLUVIO OTT**, Niederschlagsmonitor (LNM) und Niederschlagsdauersensor siehe Standardmessfeld des DWD.

Abb. 19.17 Niederschlagsmelder (Niederschlagsdauersensor) auf Mast (Kroneis)



Der **PLUVIO OTT** muss für einen fehlerfreien Betrieb unbedingt erschütterungsfrei und senkrecht aufgestellt sein. Dazu ist er auf einem fertig installierten DWD-Geräteträger auf das Standrohr aufgesetzt. Aufgrund neuer Erkenntnisse zum Temperaturverhalten des PLUVIO sind alle Geräte im Messnetz auf dem Geräteträger so gedreht, dass die Messzelle nach Norden ausgerichtet ist. Hintergrund für diese Maßnahme sind gelegentlich beobachtete Fehlausgaben bei starken Temperaturänderungen. Die Messzelle ist zwar temperaturkompensiert, allerdings wird dafür eine Temperaturmessung zugrunde gelegt, die an der Geräteunterseite gewonnen wird. Bei starker Sonneneinstrahlung heizt sich

die der Sonne zugewandte Seite wesentlich stärker auf als die Schattenseite (und auch die Geräteunterseite). Indem die Messzelle nach Norden ausgerichtet ist, wirkt die eingebaute Temperaturkompensation besser, da auf der Schattenseite geringere Temperaturgradienten auftreten und die Temperaturen an der Nordseite des Gerätes besser mit den an der Unterseite gemessenen Temperaturen korrelieren.

Die Erfassung der **Schneehöhe** ist ein wichtiger Parameter zur Beurteilung der Schneedecke. Deren Ausbildung unterliegt nicht nur starken räumlichen und zeitlichen Schwankungen. Die Entwicklung der Schneedecke steht auch unter dem Einfluss von Lufttemperatur, Wind, Strahlung und der Geländebeschaffenheit, sowie der räumlichen Verteilung der Niederschläge. All diese Faktoren machen es schwierig, eine geeignete Messstelle, die repräsentativ für die Umgebung ist, zu finden. Das zu erfassende Messfeld sollte möglichst flach, windgeschützt und lawinensicher sein. Steile Hänge, Mulden, Geländekanten oder große Felsen in unmittelbarer Nähe zur Messstelle sollten vermieden werden. Eine starke Neigung des Schneefeldes birgt die Gefahr, dass die Schneedecke ins Rutschen kommen kann und damit das Messergebnis verfälscht wird.

Wie bei der Bestimmung der Schneehöhe, muss auch bei der Messung mit der Schneesonde der Messplatz repräsentativ sein. Es muss eine ebene Fläche ausgesucht werden. Befinden sich in der Schneedecke vereiste Schichten, werden diese mit der Verzahnung der Sonde mit leichtem Druck und Drehbewegungen durchschnitten.

Ultraschallschneehöhensensor (SR50 von Campbell) siehe Standardmessfeld des DWD. Um ein möglichst gut definiertes „Null-Niveau“ bereitzustellen und damit z. B. Fehlmessungen durch wachsendes Gras zu vermeiden, wird im DWD ein Standard-Schneebrett aus weißem Holz mit 1m x 1m (Kantenlänge von mindestens 0,4 x Installationshöhe bei 2,5 m Installationshöhe) senkrecht unter der Sensoröffnung auf die Messfläche gelegt. Die einmal festgelegte Lage des Schneebretts darf keinesfalls verändert werden!

Die **Sensoren für Windrichtung und Windgeschwindigkeit** sollen möglichst auf einem frei stehenden, hindernisfreiem Gelände an einem senkrechten Mast idealerweise in 10 m bis 12 m Höhe über Grund aufgestellt werden. Hindernisfrei heißt laut Festlegung, der Abstand zwischen Windmessung und den nächsten Hindernissen soll mindestens die 10-fache Hindernishöhe betragen. Dies ist die meist am schwersten zu erfüllende Forderung bei der Geräteaufstellung. Bei vorhandenen Hindernissen wie Gebäude oder Vegetation müssen die Windsensoren 6 m bis 10 m über dessen durchschnittlicher Höhe angebracht werden. Je nach Lage der Wetterstation oder Wetterwarte können die Sensoren auch in Ausnahmefällen in 12 m bzw. 15 m Höhe betrieben werden. Das richtet sich nach der orographischen und baulichen Umgebung der jeweiligen Station. Der Abstand von Hindernissen wird berechnet unter Beachtung der Maße des Hindernisses. Hier ist die Höhe H und Breite B des Hindernisses entscheidend. Die Berechnung des Abstandes A erfolgt dann nach:

- a) Bei hohen und schmalen Hindernissen ist $A = 0,5 H + 10 B$
- b) Bei Bauwerken mit $H = B$ ist $A = 5(H+B)$
- c) Bei flachen lang gestreckten Hindernissen ($H < B$) ist $A = 0,5 B + 10 H$
- d) Wird der Aufstellungsplatz kreisförmig von Hindernissen umgeben, wird B durch den Kreisumfang $2\pi r$ ersetzt. Dann ist $A = 2\pi r + 10 H$

Abb. 19.18 Störbereich an einem Hindernis (WMO 1981) n. Foken [6]

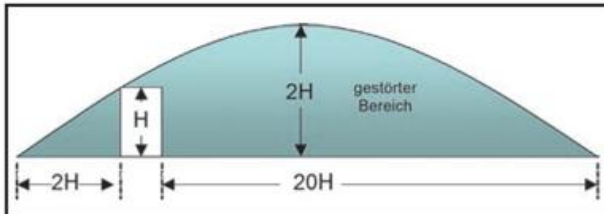


Abbildung 19.18 zeigt, bis zu welcher Höhe und Entfernung der gestörte Bereich durch ein Hindernis sein kann. Bei zwingend notwendigem, zu geringem Abstand vom Hindernis ist in Ausnahmefällen auch eine Überhöhung der Messhöhe möglich. Nach Foken [6] kann folgende Beziehung herangezogen werden

$$h' = \frac{H}{A} \cdot (A - D) \quad (19.1)$$

mit h' = Überhöhung der Messhöhe ($10 \text{ m} + h'$)
 H = Hindernishöhe
 A = Abstand vom Hindernis
 D = geringerer Abstand vom Hindernis

Die Windfahne ist dabei auf die geographische Nordrichtung zu justieren. Am günstigsten ist die Verwendung eines kippbaren Mastes, damit Wartungsarbeiten am Boden ausgeführt werden können.

Die Aufstellung der **Windsensoren** ist im Standard-Messfeld des DWD festgelegt. Die grundsätzlichen Regeln der Aufstellung von Windmesssystemen im Freien müssen dabei beachtet werden.

Auch beim **Ultrasonic Anemometer** (2D-Ultraschall-Anemometer) gelten grundsätzlich die gleichen Regeln zur Aufstellung im Standard-Messfeld des DWD und zur Berechnung des Abstandes zu Hindernissen. Auch dieses Anemometer muss nach Norden ausgerichtet werden. Dabei muss die Ortsmissweisung und evtl. störende Magnetfelder vor Ort beachtet werden. Um Fehlmessungen durch unerwünschte Schallreflexionen an schallreflektierenden Flächen zu vermeiden, muss das Ultrasonic Anemometer ein Abstand von 1 m von Gegenständen in der Messebene eingehalten werden. Um all diesen Forderungen nachzukommen, ist der Windmast zum Teil abgesetzt vom Messfeld aufgestellt. Im Unterschied zu den Wetterstationen/Wetterwarten des DWD, werden auf zivilen Flugplätzen Wind- und Sichtmessanlage in der Regel ohnehin nicht im Klimagarten, sondern in unmittelbarer Nähe der Start-Landebahn aufgestellt (Abb.19.21 und 19.22). Das gilt auch für Flugplätze der Bundeswehr.

Klappmasten sind üblicherweise aus CFK (Kohlenstoff-Faserverbund-Bauweise) hergestellt und verfügen über ein Gelenk in ca. 1 m Höhe, über das sie von der Senkrechten in die Waagerechte befördert werden können. Am unteren Ende des Mastes befindet sich ein Gegengewicht. Wird nun der Sicherungsbolzen am Fuß des Mastes entfernt, kann der Mast von Hand gekippt werden und hält sich dann selbstständig in der Horizontalen. Diese Klappmasten werden üblicherweise auch für Strahlungssensoren eingesetzt.

Der CFK-Windmast wird unter Berücksichtigung der 4 Windzonen in den Typen A, B, C gefertigt (Standardversion, Bergversion) und in 4 Ausführungen hergestellt (Tab. 19.2).

Tab. 19.2 Die 4 Windzonen mit der Gebietseinteilung

Windzone	Gebiet	Masttyp
Zone IV	Inseln der Deutschen Bucht	Standard Typ C
Zone III	Nord- und Ostsee-Küstengebiet	Standard Typ B
Zone II	Norddeutsche Tiefebene	Standard Typ A
Zone I	Übriges Gebiet (H über NHN): Standorte mit Geländehöhe $H \leq 600 \text{ m}$ Standorte mit Geländehöhe $H > 600 \text{ m}$	Standard Typ A
	Mittelgebirge $H > 600$ bis 1000 m	Berg: Typ A
	Mittelgebirge $H > 1000$ bis 1500 m Mittelgebirge $H > 1500 \text{ m}$	Typ B Typ C

Für die im DWD eingesetzten CFK-Windmasten ist bei der nach DIN 4131 standortabhängigen Windgeschwindigkeit eine maximale Auslenkung des Mastkopfes von $\pm 15 \text{ cm}$ zulässig. Der Abstand der Windsensoren soll etwa 1,5 m betragen. Beide Geräte sind vertikal so gegeneinander zu versetzen, dass sich die Unterkante des oberen Gerätes (Windgeschwindigkeitsgeber) 0,1 m bis 0,5 m über der Oberkante des unteren Gerätes (Windrichtungsgeber) befindet. Der Einsatz des entsprechenden Masttyps ist nach örtlichen Bedingungen festzulegen und hängt ab vom Aufstellungsort und den klimatologischen Verhältnissen. Teilbare Masten werden normalerweise nur dort eingesetzt, wo die räumlichen Aufstellungsbedingungen den Transport eines unteilbaren Mastes nicht zulassen.

Abb. 19.19 Hubelement mit Spindel (Foto: DWD)



Es werden auch Klappmasten mit Spindel eingesetzt. Dazu sind eine spezielle Spindel und eine Bohrmaschine (als Antrieb für die Spindel) zum Umklappen erforderlich. Das Gelenk befindet sich direkt in Bodenhöhe. Diese Masten werden üblicherweise für Windsensoren eingesetzt.

Abb. 19.20 Klappmast mit Spindel und Aufzug (Foto: DWD)



Auch Klappmasten mit „Aufzug“ (Abb. 19.20) werden eingesetzt. An diesem Aufzug kann ein Sensor (z. B. SONI) hochgezogen werden, ohne dass der komplette Mast gekippt werden muss.

Der Standort des **Laserceilometers** (Wolkenhöhenensor) ist im Standard-Messfeld des DWD festgelegt. Der **Nachtwolkenscheinwerfer**, sofern noch vorhanden, steht meist außerhalb des Standardmessfeldes, da die relativ große Messbasis eingehalten werden muss. Es muss darauf geachtet werden, dass er waagrecht steht.

Für die **Sichtweitensensoren** ist die Länge der hindernisfreien Messstrecke abhängig vom Sensortyp. Die Abstrahlrichtung darf nicht gegen die Sonne oder in die Hauptwindrichtung weisen. Damit keine störenden Lichtreflexe in das Streuvolumen bzw. den Empfänger gelangen können, ist das Umfeld des **Sensors DF20** gemäß den Installationsvorgaben von Lichtquellen bzw. reflektierenden Gegenständen frei zu halten.

Die **Transmissometer Skopograph II Flamingo** werden an den Flugplätzen jeweils meist gedoppelt parallel an den Aufsetzpunkten der Landebahnen aufgestellt. Ein weiteres Messsystem ist in der Mitte der Landebahn installiert. So sind pro Landebahn allgemein drei Transmissometer nötig um die Landebahnsicht (RVR) zu zuverlässig zu messen.

Sofern noch vorhanden, ist der **Videograph** erschütterungsfrei, mit der Optik des Sensors nach Norden ausgerichtet aufgestellt. Bis etwa 50 m vor seinem Aufstellplatz dürfen keine Hindernisse in der Messstrecke sein.

Die Abbildungen 19.21 und 19.22 zeigen die meteorologische Ausrüstung und Aufstellung an Regionalflughäfen.

Abb. 19.21 Meteorologische Ausrüstung eines Regionalflughafens mit einer Piste bis 2400 m Länge (Quelle: DWD)

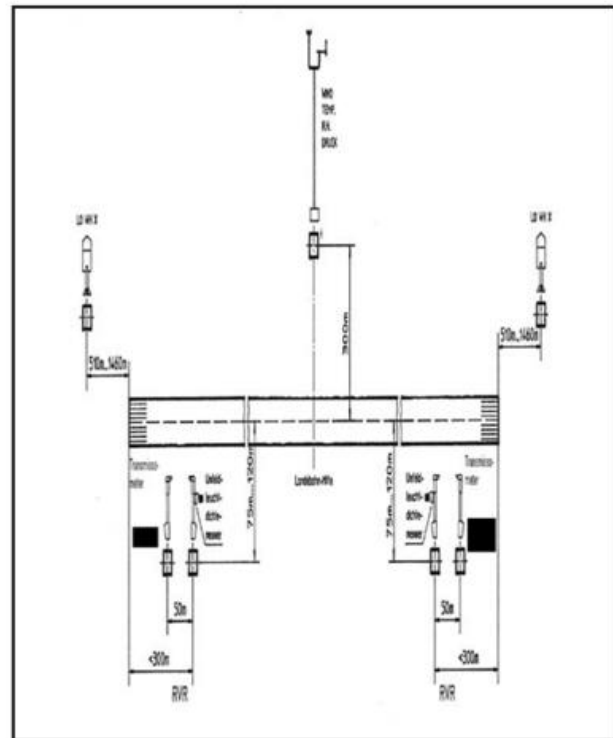
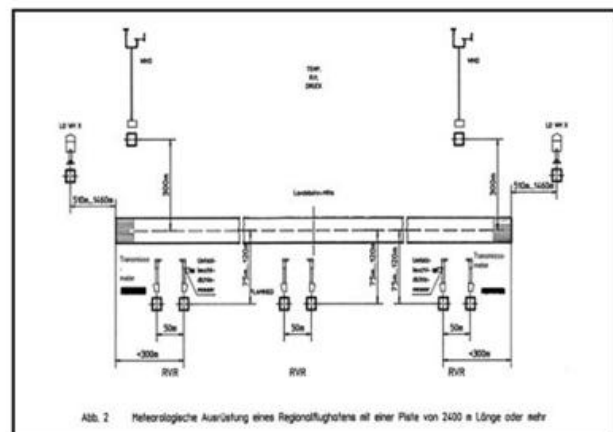


Abb. 19.22 Meteorologische Ausrüstung eines Regionalflughafens mit einer Piste von 2400 m Länge oder mehr (Quelle: DWD)



Die **Geräte zur Messung der Sonnenscheindauer und Strahlungsmessgeräte** müssen zu jeder Jahreszeit beschattungsfrei von Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang von der direkten Sonneneinstrahlung getroffen werden können und der täglichen Pflege und Wartung zugänglich sein. In den Sonnenauf- und Untergangssektoren muss die Horizontfreiheit $\geq 3^\circ$ gewährleistet sein. Hindernisse müssen im Südsektor eine geringere Höhe als die tiefste Sonnenstandskurve haben (ausgenommen schlanke Objekte mit einer Breite von $\leq 1^\circ$, z. B. Antennen).

Für Strahlungsmessgeräte dürfen Hindernisse auch im Nordsektor nicht über einen Winkel von $\geq 5^\circ$ hinausragen, sie dürfen dem Sensor nicht zu nahe sein und es darf keine Reflexstrahlung an den Sensor gelangen. Wenn möglich, sind die Sensoren an einem Mast in 2 m Höhe (maximal 6 m) anzubringen.

Die Aufstellung des **Sonnenscheinautographs** richtet sich nach der Horizontfreiheit. Während der maximal möglichen Sonnenscheindauer am Messort darf das Messgerät keine Beschattung haben. Am Südhorizont dürfen daher keine Erhebungen vorhanden sein die einen Horizontwinkel $>11^\circ$ haben. Im Bereich zwischen Nordost bis Südost darf ein Höhenwinkel von 3° nicht überschritten werden. Im Nordsektor spielt die Hindernishöhe für den Sonnenscheinautograph keine Rolle. Er wird auf eine stabile Unterlage montiert, die nicht in sich arbeitet. Die Grundplatte muss waagrecht eingestellt werden. Die Kugelschale, welche die Registrierstreifen aufnimmt, wird mittels einer Skala an der Halterung auf die geographische Breite des Ortes eingestellt.

Der Standort des Sonnenscheinautographen an Klimareferenzstationen ist im Standardmessfeld für Klimareferenzstationen festgelegt (Abb. 19.8).

Zuletzt erfolgt das Einstellen auf die exakte Südrichtung. Dies geschieht unter Verwendung der WOZ (wahre Ortszeit), die durch Addition der Zeitgleichung zur MOZ (mittlere Ortszeit) bestimmt wird. Hat man den Zeitpunkt des tatsächlichen Sonnenhöchststandes (12.00 WOZ) nach gesetzlicher Zeit errechnet, muss zu diesem die Brennspur, die die Sonne erzeugt, genau auf der 12-Uhr-Marke des Registrierstreifens stehen.

Strahlungsmessgeräte, die nur die Strahlung aus dem oberen Halbraum empfangen (Pyranometer, Pyrgeometer, SCAPP(Scanning Pyrheliometer/Pyranometer)), können auch auf Dächern installiert werden, wenn die anderen Bedingungen erfüllt sind, da keine Messhöhe vorgeschrieben ist.

Strahlungsbilanzmesser sowie Geräte, die die Strahlung nur aus dem unteren Halbraum empfangen, werden in 2 m Höhe über einer ebenen Grasfläche installiert. Die zuvor formulierten Bedingungen gelten auch hier.

Der Standort des **Pyranometers** und der Strahlungssensoren ist im Standardmessfeld des DWD festgelegt. Meist werden die Sensoren auf Plattformen oder Sockeln montiert.

SCAPP wird normalerweise auf einen 6 m hohen Kippmast der Fa. Pfeleiderer aufgestellt. Es handelt sich dabei um ein zur Spitze hin verjüngendes Kunststoffrohr mit einem Drehpunkt in einer Höhe von ca. 1,5 m. Wichtig ist die Horizontfreiheit und horizontale Ausrichtung von SCAPP mit einer Toleranz von $\pm 1^\circ$. Einzelne Einflussgrößen, wie Windeinfluss (bis 13 m s^{-1}), Strahlungseinfluss und Reproduzierbarkeit nach Kippen liegen innerhalb der Toleranz und sind daher vernachlässigbar. Den größten Einfluss hat dabei die Verbiegung des Mastes durch einseitiges Aufheizen der Mastoberfläche an Strahlungstagen. Zur Aufstellung SCAPP siehe Standard-Messfeldskizze DWD (Abb. 19.5).

Abb. 19.23 SCAPP auf 6m-Mast (Pfleiderer)



Der Aufstellungsort des Sonnenscheinsensors **SONIE3** ist im Standard-Messfeld festgelegt. Er muss frei von Abschattungen sein und eine gute Horizontsicht bieten. Der Sensor bedarf keiner Einnordung oder Nivellierung.

Erprobungsmessfelder

Aufgrund von Nutzeranforderungen und im Rahmen einer kontinuierlichen Markterkundung führt das Referat TI 23 (Messsysteme) des DWD Sensorerprobungen mit wechselnden Schwerpunkten durch. Dazu stehen Erprobungsmessfelder in unterschiedlichen klimatischen Bereichen zur Verfügung. Unter anderem sind Erprobungsmessfelder vorhanden in Hamburg-Sasel, Wewa Fehmarn (Abb. 19.24), Wewa Wasserkuppe (Abb. 19.24), Kahler Asten, Falkenberg und Hohenpeißenberg

Abb. 19.24 Erprobungsmessfeld WeWa Fehmarn, WeWa Wasserkuppe, mit neuer Sensorik für Automatische Stationen (Foto: DWD)



19.4.3 Repräsentanz von meteorologischen Messungen

Der Repräsentanzbegriff beschreibt, inwieweit Messungen/Beobachtungen an einem Punkt (an einer Station) innerhalb angenommener Schwankungsbreiten für das umliegende Gebiet vergleichbar sind. Die nachfolgenden Ausführungen sollen zeigen, wie wichtig bei der Auswahl des Standortes und der Aufstellung der Messgeräte/Sensoren die Beachtung der Vorgaben ist.

Neben der Qualität und Vergleichbarkeit spielt bei meteorologischen Messungen die Repräsentanz für die entsprechende Umgebung eine wichtige Rolle. Eine Messung sollte aus meteorologischer Sicht die Umgebung des Standortes möglichst gut charakterisieren. Dies soll das folgende Beispiel verdeutlichen:

Wird die Lufttemperatur unmittelbar in der Nähe eines Gewässers gemessen, wird sie deutlich von diesem beeinflusst, da Wasser als Wärmespeicher wirkt. Die Messung ist prinzipiell nicht falsch, die gemessene Lufttemperatur ist korrekt, jedoch nicht repräsentativ für die Umgebung.

In einem Land mit ausgeprägter Topographie wie z. B. der Schweiz werden mehr Stationen benötigt als in einem ausgedehnten Steppengebiet. Da es aber zu aufwändig und kostspielig ist, in jedem Tal eine eigene meteorologische Bodenstation zu betreiben, werden verschiedene Strategien verfolgt, um möglichst gute Eingangsdaten für die Wettervorhersage zu erhalten.

Bei der Auswahl repräsentativer Stationen des Bodennetzwerkes werden die Stationen unter anderem auch als charakteristisch für eine bestimmte Gegend, Lage etc. ausgewählt. Dabei spielt die Höhe eine wichtige Rolle, da das Wetter ein dreidimensionaler Vorgang ist. Je „weiter weg von der Oberfläche“ eine meteorologische Information stammt, desto repräsentativer ist sie für ein größeres Gebiet. Gezielt wird deshalb die dritte Dimension ausgebaut: zusätzliche Windprofiler, insbesondere für hoch aufgelöste meteorologische Modelle (7 km, 4 km und 2 km), Ausnützen der GPS Netzwerke, um Profile der atmosphärischen Feuchte zu erhalten, Ableiten von Windinformationen aus dem Niederschlagsradar.

Für eine synoptisch-klimatologische Station ist es erforderlich, dass die Beobachtungen hinsichtlich der auftretenden Wetterelemente, hier insbesondere Bodenwind, Temperatur und Luftfeuchte repräsentativ für ein größeres Gebiet sind, d. h. dass die Daten zum Beispiel bei Gutachten, aber auch bei der Beratung der Luftfahrt für möglichst viele Orte in der Umgebung herangezogen werden können. Ein solches Gebiet hat im Mittelgebirgs- oder Alpenraum eine andere (geringere) räumliche Ausdehnung als z. B. in der Norddeutschen Tiefebene.

Neben der räumlichen wird in der Meteorologie auch nach der zeitlichen Repräsentanz gefragt. Die

- **räumlicher Repräsentanz** ist der horizontale Gültigkeitsbereich oder Umkreis der Werte innerhalb festgesetzter Abweichungsgrenzen zu ein und demselben Zeitpunkt,
- **zeitlicher Repräsentanz** beinhaltet die Gültigkeitsdauer der Werte bestimmter meteorologischer Daten innerhalb vorgegebener Grenzen bzw. Schwankungsbreite an ein und demselben Ort. Die Kenntnis der zeitlichen Repräsentanz erlaubt die Beurteilung der Aussagekraft auch kürzerer Datenreihen.

Die Repräsentanz ist nicht direkt abhängig von der Messgenauigkeit, sondern von der zeitlichen und/oder räumlichen Variabilität.

Es muss betont werden, dass die Repräsentanz für die verschiedenen meteorologischen Größen unterschiedlich sein kann. Ein optimales Stationsnetz kann es daher nicht geben, es muss stets ein Kompromiss gefunden werden. Im Folgenden sollen nur die Repräsentanzprobleme erörtert werden, die in direktem Zusammenhang mit Messungen stehen.

Die gemessenen und beobachteten Größen an einem Punkt enthalten Anteile durch die großräumigen atmosphärischen Zustände (Makroklima, synoptische Situation), deren regionale Einflüsse (Mesoklima, synoptische Besonderheiten) und durch lokale Einflüsse (Mikroklima) gegeben sind. Bei Wetterlagen, die durch Advektion und höhere Windgeschwindigkeiten geprägt werden, sind die räumlichen Unterschiede zahlreicher meteorologischer Größen gering.

Die Repräsentanz ist abhängig von

- der Oberflächenstruktur, ob Meer oder Land, Ebene oder Orographie
- dem Messniveau, ob freie Atmosphäre oder planetarische Grenzschicht
- Messparameter, ob Luftfeuchte, Luftdruck, Lufttemperatur, Wind, Sicht, oder Wolkenuntergrenze

Es existieren mehrere Verfahren, die die Repräsentanz der Messungen und Beobachtungen quantitativ bestimmen, z. B. durch eine Korrelationsanalyse. Aus diesen folgt, dass die Repräsentanz einer Station je nach betrachteter meteorologischer Größe unterschiedlich zu bewerten ist. So fällt z. B. das Repräsentationsgebiet für die Niederschlagshöhe in der Regel kleiner aus als für die Lufttemperatur.

Repräsentanz des synoptischen Beobachtungsnetzes

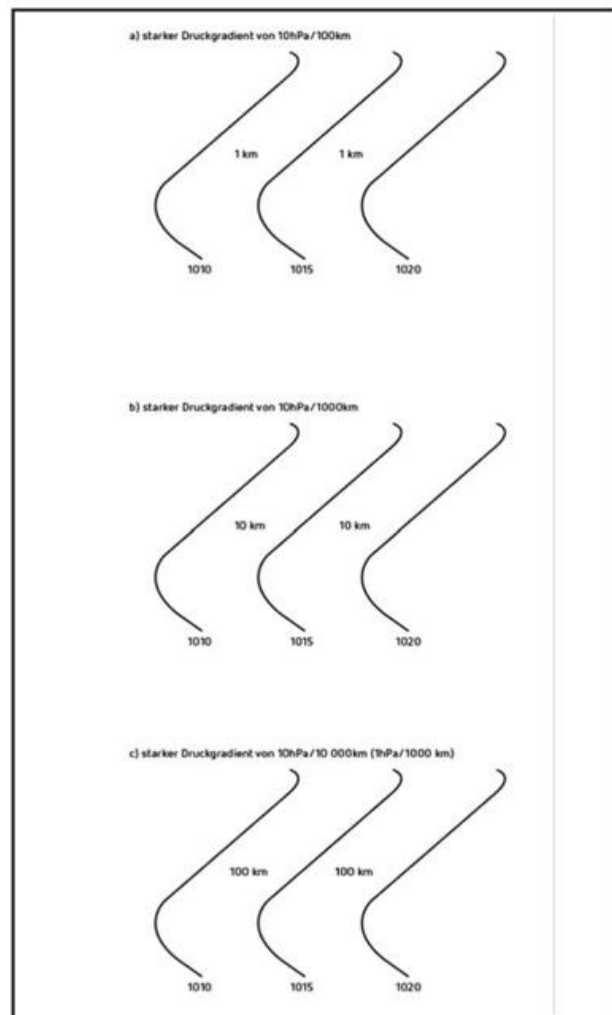
Bei der Analyse von Bodenwetterkarten können sich Repräsentanzprobleme ergeben, die unterschiedliche Ursachen haben können. Zunächst müssen heraus fallende Meldungen gewissenhaft überprüft werden. Dann folgen mögliche Ursachen durch

- Beobachtung/Messung und offizielle Beobachtungszeit
Der Beginn der Beobachtung kann bis zu einer viertel Stunde vor der offiziellen Beobachtungszeit liegen. In dieser Zeitspanne kann sich die Lufttemperatur schon um 1–2 K geändert haben.
Bis eine Stationseintragungskarte vor Ort verfügbar ist, verstreicht eine geraume Zeit (bis zu 2 Stunden). Bis sie dann noch analysiert ist, ist sie meist nicht mehr repräsentativ für das Gebiet. Hier empfiehlt sich durch die PC-Unterstützung (NinJo) auf die selbst definierte Eintragungskarte zurückzugreifen.
- geringe Dichte des synoptischen Stationsnetzes
Eine Wetteranalyse muss nach den Angaben einer mehr oder weniger verhältnismäßig kleinen Anzahl von Stationen durchgeführt werden und ist damit mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Insbesondere in den Nachtstunden und an Wochenenden sind die bemannten Stationsmeldungen sehr ausgedünnt. Besonders kleinräumige Erscheinungen wie Nebel, Gewitter, Schauer werden nur lückenhaft erfasst.
- Lokale Einflüsse
Bodenbeschaffenheit und -bedeckung und Geländeform spielen eine große Rolle bei der Ausprägung der einzelnen Parameter
- Einflüsse der Tageszeit
- Einflüsse der Wetterlage

Die Repräsentanz kann sich auch in einer synoptischen Bodenkarte widerspiegeln. Dabei kann sie sich auch mit der Wetterlage ändern, z. B. werden bei Starkwindlagen durch Stau- und Sogeffekte Luftdruckfehler erzeugt. Wie wichtig z. B. eine genaue Luftdruckmessung ist, soll anhand eines Beispiels einer Eintragung in einer Bodenwetterkarte gezeigt werden:

Annahme: Genauigkeit der Luftdruckmessung $\pm 0,1$ hPa
Vorgabe: QFF 1015,0 hPa, Maßstab der Karte 1:5 Mio
(1 mm = 5 km)

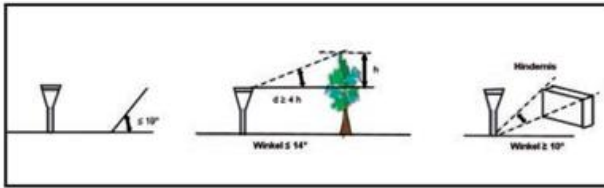
Abb. 19.25 Druckgradient und Genauigkeit der Luftdruckmessung



Da der Niederschlag eine besonders hohe räumliche und zeitliche Variabilität aufweist, sind damit eine hohe Dichte an Niederschlagsstationen und langer Beobachtungsraum notwendig. Mit Hilfe der beschriebenen Niederschlagsmessgeräte können lediglich Punktmessungen durchgeführt werden. Die räumliche Repräsentanz der Messungen hängt von der Art des Niederschlages (und damit von der Wetterlage) sowie von der Geländeform, Bebauung und dem Bewuchs des Geländes ab. So kann eine Punktmessung bei einer typischen sommerlichen Schauerwetterlage für eine Fläche von bis zu $20 \text{ km}^2 \approx 4,5 \text{ km} \times 4,5 \text{ km}$, bei einem winterlichem Dauerregen oder Schneefall durchaus für eine Fläche von mehr als $200 \text{ km}^2 \approx 15 \text{ km} \times 15 \text{ km}$ repräsentativ sein.

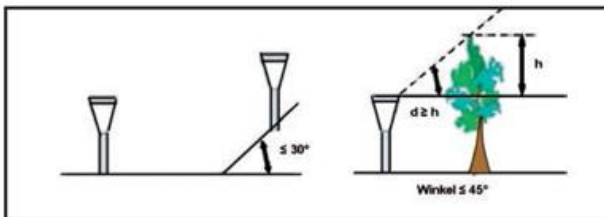
In Anlehnung an die Richtlinien der WMO hat Météo-France (Note technique n° 35, Classification d'un site, 1999) strikte Güteklassen (1–5) für die Messgrößen Temperatur/Feuchte, Niederschlag, Strahlung und Wind festgelegt. Abbildung 19.26 zeigt die Bedingungen, die erfüllt sein müssen, damit eine Niederschlagsmessung in die «Klasse 1» fällt. Das Instrument muss auf einer Fläche stehen und darf nicht in der Nähe eines Hanges positioniert sein, dessen Neigung 19° übersteigt. Zusätzlich muss die Distanz zu einem Hindernis mindestens 4x die Höhe (gemessen über der Messhöhe) betragen. Als Hindernisse gelten alle Objekte deren Winkelbreite mehr als 10° beträgt.

Abb. 19.26 Vorgaben für eine Niederschlagsmessung der Klasse 1 (aus Note technique n° 35, Classification d'un site, 1999)



Die Vorgaben für eine Niederschlagsmessung der „Klasse 3“ sind im Vergleich dazu deutlich weniger restriktiv. Der Geber kann an einem Hang positioniert werden, sofern die Neigung geringer als 30° ist. Ebenfalls beträgt die minimale Distanz zu einem Hindernis nur noch die Höhe des Hindernisses selbst. Eine Messung der „Klasse 5“ würde z.B. bedeuten, dass der Niederschlag unter einem Hindernis gemessen würde (Baum, Hausdach). Dementsprechend sind Messungen der höheren Klassen mit einem Fehler behaftet (im Vergleich zur repräsentativen Umgebung). Gemäß Météo-France betragen diese Fehler für die „Klassen 5“ mehr als 40 % für die Windmessung, 50 % oder mehr für die Niederschlagsmessung und eine Abweichung von bis zu 5 K für die Temperatur. Dies zeigt, welche Bedeutung eine sorgfältige und gut geplante Standortwahl hat.

Abb. 19.27 Niederschlagsmessung der Klasse 3 (aus Note technique n° 35, Classification d'un site, 1999)



19.4.4 Genauigkeitsforderungen der WMO und ICAO

Wie genau gemessen werden soll, dazu macht die WMO genaue Angaben. Die folgenden Ausführungen stellen nur Beispiele dar.

Die Genauigkeitsanforderung für eine Niederschlagstagesumme liegt nach WMO-Empfehlung (s. WMO-No. 8, Annex 1B kurz „CIMO-Guide“ genannt) für
Werte < 2 mm bei 0,1 mm und für
Werte ≥ 2 mm bei 5 %.

Bei diesen Werten handelt es sich um erweiterte Messunsicherheiten mit dem Erweiterungsfaktor $k=2$ (2-fache Standardabweichung), d. h. 95,4 % der Messwerte liegen in diesem Bereich. Wenn beide Messgeräte in diesem Vergleich diese WMO-Anforderungen erfüllen, ergibt sich daraus gemäß GAUSSscher Fehlerfortpflanzung

$$(0,1^2 + 0,1^2)^{1/2}, \text{ bzw. } (5\%^2 + 5\%^2)^{1/2}$$

ein Toleranzbereich von 0,14 mm (< 2 mm) und 7 % (≥ 2 mm), in dem mindestens 95,4 % der Messwerte liegen sollten.

Die folgenden Daten sind einer Veröffentlichung des Federal Meteorological Handbook No1 [31] entnommen.

Erforderliche Genauigkeit bei der Messung der Runway Visual Range (RVR)

Tab. 19.3 Genauigkeitsforderung zur Messung der RVR

Runway Visual Range (feet)	Accuracy
<1300	± 30 feet
1300 bis 2600	± 80 feet
>2,600	± 10 %

Erforderliche Genauigkeit des automatischen Sichtsenors (Tab. 19.4)

Tab. 19.4 Genauigkeitsforderung zur Messung der Sichtweite

Sichtweite des Standard-sensors	Percentage of Data Within or Exceeding Given Range		
	At least 80% Within	No more than 18% Exceed	No more than 2% Exceed
0 bis 1 ¼	±¼	±½	±1
1 ½ bis 1 ¾	±¼, -½	±½, -¾	±1
2 bis 2 ½	±½	± 1	±1
3	+½, -1	±1	±1
4 bis 10	±1 RV*	±2 RV*	±2 RV*

*RV = gemeldeter Wert, alle anderen Werte in Meilen.

Die folgenden Angaben zu den Genauigkeitsforderungen sind der „Durchführung meteorologischer Dienste an Verkehrsflughäfen und Verkehrslandeplätzen für Regionalluftverkehre mit Flugplatzkontrolldienst sowie an unkontrollierten Flugplätzen mit Luftraum „F“ (Ausgabe DWD Januar 2007)“ entnommen.

Die im Folgenden aufgelisteten Systemfehler setzen sich zusammen aus den Messunsicherheiten der Sensoren sowie aus den Fehlern bei der Digitalisierung und Berechnung im Datenerfassungssystem.

Allgemeine Umgebungsbedingungen der Sensoren:

- Einsatztemperaturbereich: -35 °C bis +45 °C
- Einsatzfeuchtebereich: rel. Feuchte von 10 % bis kondensierend
- Strahlung: max. 1 kW m⁻²

(Siehe Tabelle Seite 198)

Kalibrierzyklen der DWD-Sensorik

Die Einhaltung der WMO-Forderungen an die Sensorik erfordern regelmäßige Kalibrierungen der Sensoren. Nachfolgende Tabelle 19.6 enthält die Kalibrierzyklen in Monaten, wie sie im DWD festgelegt sind.

Tab. 19.5 Messgrößen und abgeleitete Größen, Toleranzen, Algorithmen; Basisprüfung der Sensoren und der Messanlage

	Messbereich	Messunsicherheit	Abtastrate	Genauigkeit der Berechnung	Systemfehler
Windrichtung	1 bis 360 °	±5 °	≥2 s ⁻¹	±1 °	≤±10 °
Windgeschwindigkeit	1 kt bis 100 kt	1 kt im Bereich von 1 kt bis 10 kt, 10 % über 10 kt	≥2 s ⁻¹	±0,5 kt	entspricht der Messunsicherheit
MOR Meteorologische Sichtweite	Unkontr. Flugplätze mit Luftraum „F“: 100 m bis 10.000 m				
MOR Meteorologische Sichtweite Zugrunde gelegter Kontrastschwellenwert 0,05	Verkehrsflughäfen oder -landeplätze für Regionalluftverkehr m. Flugplatzkontrolldienst 100 m bis 2000 m bei BS I, II 50 m bis 2000 m bei BS I, II, IIIa 10 m bis 2000 m bei BS I, II, IIIa, IIIb, IIIc	≤20 % des Messwertes Transmissometer unter 2000 m: ≤10 % des Messwertes	≥6 min ⁻¹ , 90%-Zeit: ≤30 s		entspricht der Messunsicherheit
Umfeldleuchtdichte	4 bis 50 000 cd m ⁻² ,	≤10 % des Messwertes	≥1 min ⁻¹ , 90%-Zeit: ≥30 s, ≤6 min		
Pistensichtweite (RVR)	300 m bis 2000 m bei BS I und II, 200 m bis 2000 m bei BS I, II, IIIa, 50 m bis 2000 m bei BS I, II, IIIa, IIIb,				≤±1 Stufe (s. a. Stufung der RVR)
Wolkenhöhe	50 ft bis 10-000 ft	25 ft oder 10% des Messwertes	≥2 min ⁻¹ Messwertzwischen- speicherung: Registrierung der Einzelwerte		
Lufttemperatur	-40 °C bis +45 °C	±0,5 K	≥6 min ⁻¹	±0,05 K	≤ ±0,5 K
Taupunkttemperatur	-30 °C bis +45 °C	±0,5 K	≥6/min	±0,1 K	≤ ± 0,5 K
Luftdruck	Langjähriger Mittelwert in Orthshöhe ±50 hPa	±0,25 hPa	≥6 min ⁻¹	±0,05 hPa	≤ ±0,3 hPa

Tab. 19.6 Kalibrierzyklen der DWD-Sensorik

Sensoren	Monate
Temperatur	
Assmann-Thermometer	24
Schleuder-Thermometer Thermohygrograph 252	36
Minimum-Thermometer (Alkohol) Pt100-Fühler	60
Erdboden-Pt100-Fühler Erdboden-(Winkel)Thermometer 50mm Erdboden-(Winkel)Thermometer 100mm Erdboden-(Winkel)Thermometer 200mm Erdboden-Tiefenthermometer 500mm Erdboden-Tiefenthermometer 1000mm Maximum-Thermometer Thermometer 280 für Psychrometer Thermometer 370 für Psychrometer Wasserthermometer	120
Feuchte	
Feuchtefühler ROTRONIC MP101A Feuchtefühler ROTRONIC MP300 Feuchtefühler VAISALA HMP45D	18
Druck	
Druckmessumformer AIR-DB-1A Druckmessumformer VAISALA PTB220A	18
Druckmessumformer AIR-DB sonstige	12
Aneroid-Barometer FUESS Barograph FUESS 78a Barograph FUESS 79 Barograph LAMBRECHT 290	36
Hg-Barometer LAMBRECHT 610 Hg-Barometer THIES 3.1550.xx.xxx	60
Niederschlag	
Ombrometer PLUVIO-OTT	48
Wind	
Schalenstern-Anemometer (IAM/THIES) SK-565 Windrichtungsgeber (IAM/THIES) SK-566	12
Schalenstern-Anemometer THIES 4.3303 Windrichtungsgeber THIES 4.3121 Ultraschall-Anemometer GILL Ultraschall-Anemometer THIES Woelfle Windschreiber	24
Strahlung	
Sonnenenergiesensor SONIe2 Sonnenenergiesensor SONIe3	24
Pyranometer Pyrgeometer Pyrheliometer Strahlungssensor SCAPP	30
Notmessgerätekoffer	36

19.5 Übersicht über Mess- und Beobachtungsnetze

19.5.1 DWD-Mess- und Beobachtungsnetz einschließlich GeInfoDBw (Anhang 7.1)

Um eine Vorstellung vom Umfang der Messnetze zu haben, sei mit Anhang 7.1 zunächst das hauptamtliche Netz dargestellt (Stand: 09/2011), auch wenn sich im Laufe der Zeit die eine oder andere Zahl ändert.

In der folgenden Übersicht (Tab. 19.5) sind alle hoch aufgelösten Messnetzarten (im PDF-Format) aufgelistet, die alle Stationen zeigen, von denen im DWD Daten vorliegen. Das bedeutet auch, dass nicht alle eingetragenen Stationen derzeit noch in Betrieb sind.

Tab. 19.7 Übersicht der als Download vorhandenen Messnetzgrafiken des DWD

Messnetz-Übersicht	Zugehörige Kollektiv-Beschreibung
Messnetz AE	Stationen mit aerologischen Beobachtungen
Messnetz EB	Stationen mit täglichen Daten der Erdbodentemperatur
Messnetz FF	Stationen mit stündlichen Winddaten
Messnetz KL	Stationen mit stündlichen Klimadaten
Messnetz MI	Stationen mit automatischen Messungen (10-Minuten-Auflösung)
Messnetz PE	Stationen mit phänologischen Beobachtungen
Messnetz RR	Stationen mit täglichen Niederschlagsdaten
Messnetz SO	Stationen mit stündlichen Daten der Sonnenscheindauer
Messnetz SY	Stationen mit stündlichen, automatischen Messungen (teilweise ergänzt mit Augenbeobachtungen, Einführung der Automaten nur Augenbeobachtungen vor)
Messnetz_TU	Stationen mit stündlichen Daten der Temperatur und der relativen Feuchte

19.5.2 WeBoKaN – Wetterbeobachtungskamera-Netzwerk des DWD

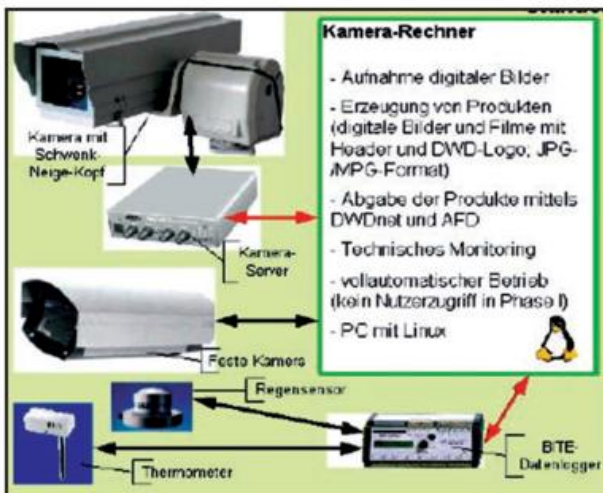
Der DWD betreibt verschiedene meteorologische Messnetze. Damit wird der Zustand der Atmosphäre mit unterschiedlichen Verfahren erfasst. Nach wie vor ist neben diesen physikalischen Parametern wie Temperatur, Feuchte und Wassergehalt auch das optische Bild von großer Bedeutung für den Vorhersagedienst, lässt sich aber nur schwer mit automatischen Sensoren erfassen.

Abb. 19.28 Wetter-Beobachtungs-Kamera (Foto: DWD)



Das **Wetter-Beobachtungs-Kamera-Netzwerk**, kurz WeBoKaN hat mehrere Ziele, unter anderem die vollautomatische Bereitstellung von digitalen Bildern und Filmen aus verschiedenen Richtungen sowie die Ansicht der Produkte mit einem handelsüblichen Internet-Browser. Die Produkte sind also überall verfügbar.

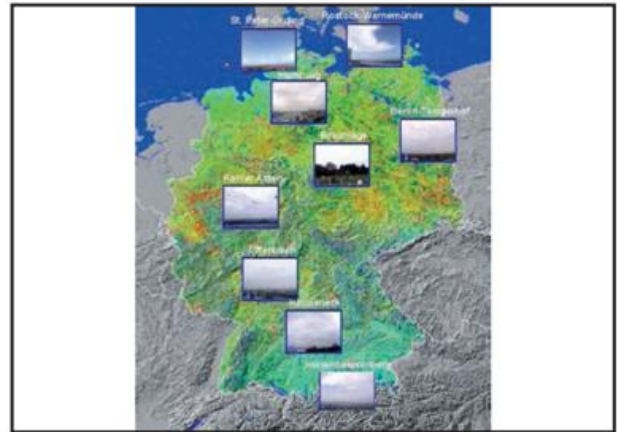
Abb. 19.29 System Wetter-Beobachtungs-Kamera (DWD)



Das System besteht im Wesentlichen aus je einer schwenkbaren und einer festen Kamera, einigen Sensoren und einem Server, der für die Steuerung und die Erstellung der Produkte verantwortlich ist. Die Daten werden über ISDN-Leitungen nach Offenbach übertragen und von dort aus zur Verfügung gestellt.

Über die kleine Standortkarte (Abb. 19.30) können die Standorte angezeigt werden.

Abb. 19.30 Standorte der Wetter-Beobachtungs-Kameras (DWD)



Über das eigentliche WeBoKaN hinaus gibt es eine Vielzahl von Kamerastandorten, die über das Internet aufgerufen werden können und insbesondere dem in der Flugwetterberatung tätigen Berater eine wertvolle Ergänzung bieten können.

19.5.3 Stationsnetz im Rahmen von KLIWA (Anhang 7.2)

Das Forschungsprogramm KLIWA (Auswirkungen des **Kli**mawandels auf **W**asserstraßen und **S**chifffahrt) wird von vier Ressortforschungseinrichtungen des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) gemeinsam durchgeführt. Beteiligt sind der DWD, das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) und die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW).

Die Abteilung Hydrometeorologie im DWD steht darin in Abstimmung mit den Kooperationspartnern, der Landesanstalt für Umweltschutz B.den-Württemberg und dem Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft und seit 01.01.2007 das Land Rheinland-Pfalz in Verbindung.

Aus dem Untersuchungsraum von Baden-Württemberg und Bayern liegen Messreihen der Lufttemperatur von insgesamt 354 Stationen vor, welche die regionale Temperaturverteilung repräsentativ erfassen. Grundlage für die Berechnung von Niederschlagsreihen bilden Niederschlagsbeobachtungen von 1815 Messstellen des Niederschlags allein für Baden-Württemberg und Bayern.

19.5.4 Mobile Messeinheiten des DWD

Eine Mobile Messeinheit (MME) des DWD ist ein Spezialfahrzeug, das mit meteorologischen Instrumenten und speziellen Mess- und Auswerteeinrichtungen ausgestattet ist. Die mobilen Messeinheiten des DWD (z. Zt. 3 Einheiten) werden hauptsächlich zur Untersuchung der meteorologischen Feinstruktur der bodennahen Atmosphäre im Rahmen von Planungsgutachten eingesetzt. Wenn notwendig werden komplette Wetterstationen aufgestellt um damit Messungen über längere Zeit durchführen zu können. So werden die letzten Datenlücken geschlossen.

Abb. 19.31 Mobile Messeinheit des DWD



Mobile Messungen dienen dazu, das lokale Klima vor Ort möglichst genau zu kennen. Auf dieser soliden Basis können verlässliche Entscheidungen getroffen werden. Lokale Messungen sind oftmals unverzichtbar, z. B.

- im Rahmen von Umweltverträglichkeitsprüfungen
- bei Untersuchungen zum lokalen Klima, z. B. zum Stadtklima
- bei der Beurteilung des Klimas in Kurorten und Heilbädern
- zur Erstellung von Bebauungsplänen
- bei der Planung von konventionellen Kraftwerken, Windkraftanlagen und anderen Industrieanlagen
- bei der Planung von Verkehrswegen (Autobahnen, Ortsumgehungen, Bahnstrecken, usw.)
- bei der Planung von Deponien und bei der Sanierung von Tagebauflächen
- bei der Beurteilung von Frostgefährdungen (z. B. im Weinbau)
- bei der Erhaltung von Frischluftschneisen, die das Klima in Städten und Gemeinden verbessern
- und vieles andere mehr ...

Zur Erfassung von horizontalen Temperatur- und Feuchteprofilen werden Profilmessfahrten durchgeführt, bei denen während der Fahrt über bestimmte Strecken permanent Lufttemperatur und Luftfeuchte gemessen werden. Dazu wird das Psychrometer nach Frankenberger (siehe 9.3.1) wegen seiner schnellen Ansprechzeit genutzt.

Abb. 19.32 Profilmessfahrten



Über parallel durchgeführte Druckmessungen kann ein Gelände- Höhenprofil zugeordnet werden. Als Sondermessung ist die Ermittlung der Fahrbahntemperatur mit Hilfe einer Infrarotkamera möglich.

Die Messungen werden an den mobilen Messeinheiten mit Akku-Betrieb (mit zusätzlicher Solarzelle für die Aufladung) durchgeführt, d. h. dass die Sensoren an diese Stromversorgung angepasst sein müssen. Hieraus ergeben sich einige Unterschiede zur Stationsensorik. Tabelle 19.8 beinhaltet alle eingesetzten Sensoren.

Tab.19.8 Sensorübersicht an mobilen Messeinheiten des DWD

Parameter	Sensoren	Fundstelle	
Lufttemperatur	LTS2000	Pt 100	8.3.2.1
Luftfeuchte- und Temperatur	HMT337		9.3.3
Luftfeuchte	HMP 45D		9.3.3
Luftfeuchte	Psychrometer n. Frankenberger (12 V)		9.3.1
Wind	USA 3D		12.3.2
Niederschlag	PLUVIO-OTT (älteres Modell)		11.3.2
Strahlung	CNR4		14.6.1

Alle Sensoren sind an den COMBILOG Datenlogger 1020 der Fa. Friedrichs (siehe 4.4.1) angeschlossen. Die Daten können über ein zusätzliches GPRS-Modem (online) abgerufen werden.

19.5.5 Temporäre Stationsmessungen

Temporäre Stationen zeichnen kontinuierlich Messdaten auf und speichern sie auf Datenloggern ab. Art, Umfang und Zeitraum des Messprogramms bestimmen die Kunden.

Abb.19.33 Temporäre Stationsmessungen



Der DWD kann mit den ca. 50 temporären Stationen eine Vielzahl von Parametern erfassen, z. B.

- Wind
- Lufttemperatur
- Strahlung (kurz- und langwellige Komponenten)
- Schwachwind
- Niederschlag
- Sonnenscheindauer

Die Daten werden mit einer leistungsfähigen Software aufbereitet, statistisch ausgewertet und graphisch bzw. tabellarisch dargestellt.

19.5.6 Maritimes Messnetz DWD

Die Datengewinnung in der Meteorologie beschränkt sich nicht nur auf Messungen am Boden. Bis auf Schneehöhe und Erdbodentemperaturen werden entsprechende Größen auch auf See gemessen und beobachtet. Neben aufwendigen Messeinrichtungen auf Forschungsschiffen und Fischereischutzbooten gibt es auch einfachere Messverfahren auf einer Vielzahl von Handelsschiffen.

Im Rahmen seiner Verpflichtungen im internationalen maritimen Datenmanagement betreibt der DWD am Standort Hamburg das Global Collecting Centre (GCC). In enger Zusammenarbeit mit dem GCC in Edinburgh werden hier die an Bord von Schiffen bei ihren Reisen auf allen Weltmeeren erhobenen Wetterbeobachtungen zusammengeführt, einer Qualitätskontrolle unterzogen und verschiedenen Daten- und Überwachungszentren verfügbar gemacht. Der DWD archiviert diese Beobachtungen im Globalen Zentrum für Schiffswettermeldungen (GZS), in dem auch Bojen- und Plattformdaten gespeichert werden.

Im Gegensatz zum engmaschigen Netz von Wetterstationen auf den Kontinenten, die in regelmäßigen Abständen Wettermeldungen erzeugen, gibt es aus dem Bereich der Ozeane, die zwei Drittel der Erdoberfläche bedecken, nur relativ wenige meteorologische Informationen. Um diese Datenlücke zu füllen wird von der WMO das Programm VOS (Voluntary Observing Ship) durchgeführt. Damit soll die Handelsschiffahrt motiviert werden, freiwillig Wetterbeobachtungen während der Schiffsreisen durchzuführen. Mehrere Tausend Schiffe sind bereits registriert, die an dem Programm teilnehmen.

Der DWD nimmt an diesem Programm ebenfalls teil und hat dafür inzwischen etwa 850 Schiffe gewonnen. Weiterhin betreibt der DWD ein autonomes maritimes Netzwerk (S-AWS – Shipborne Automatic Weather Station) mit etwa 17 Stationen (die meisten in der Nordsee und im Nordatlantik), das erste dieser Art, auch in Kooperation mit führenden Forschungseinrichtungen und nationale meteorologische Dienste (NMS). Da es solche Systeme auf dem Markt noch nicht gibt, wurde es vom DWD in Kooperation mit Forschungseinrichtungen entwickelt. Das Ergebnis dieser Kooperation ist das SCAWS (Scaleable Automatic Weather Station), die derzeit modernste S-AWS. Sie kann völlig unabhängig, abgesehen von der Stromversorgung arbeiten und basiert auf langzeitgetesteten Hardware und Software,

die beim AWI und beim DWD eingesetzt wird. Als Hardware kommt ein Datenlogger CR1000 der Fa. Campbell Scientific zum Einsatz. Die Software des Datenloggers basiert auf der Software der bisherigen DWD im S-AWS sowie auf vom AWI verwendeter Software.

Tab. 19.9 Sensorenübersicht an SCAWS

Parameter	Sensoren	Fundstelle
Luftdruck	PTB220	7.3.3
Luft- u. Wassertemp.LTS2000	Pt 100	8.3.2.1
Luftfeuchte	MP101	9.3.3
Wind	USA 2D	12.3.2
Strahlung Pyranometer	CMP21	14.4.1
Pyrgeometer	CGR4	14.5

Pro Sekunde wird ein kompletter Datensatz zur Nutzung vor Ort erzeugt. Zusätzlich wird jede Stunde eine Wettermeldung (FM-13 SHIP) erzeugt und über Satellit abgesetzt.

Die Beobachtungen werden unter den meteorologischen Diensten ausgetauscht und über das GTS verbreitet. Mehr und mehr Länder setzen dabei automatische Wetterstationen ein, die von einfach ausgestatteten bis hin zu komplexen Stationstypen variieren, abhängig von den Anforderungen der Länder. Die gewonnenen Daten werden nicht nur in Wetterdiensten genutzt, sondern auch für Forschungszwecke und andere Nutzer zur Verfügung gestellt.

Für manuelle Messungen an Bord der „VOS“ sollen zukünftig elektronische Handmessgeräte sowie digitale Barometer als Ersatz für die Schleuderpsychrometer, Barometer und Barographen eingesetzt werden.

Abb. 19.34 Die festen Stationen des maritimen Messnetzes des DWD



Die MILOS wird im Maritimen Messnetz eingesetzt. Verschiedene Typen der MILOS sind

- FS Schiffe (Forschungsschiffe)
- UFS Unbemannte Feuerschiffe GW/Ems und G-Bight
- LT Leuchttürme (Kiel und Alte Weser)
- NSB – Nordsee-Bojen (II, III und Fehmarn Belt)

Das maritime Messnetz des DWD umfasst ergänzende maritimmeteorologische Stationen (Stand 1/2012):

- **2** Bordwetterwarten (Forschungsschiffe Polarstern und Meteor mit DWD-Personal)
- **17** automatische Bordwetterstationen auf Handels- und Behördenschiffen
- **844** Wettermeldestellen auf Handelsschiffen

Hinzu kommen noch 3 Forschungsplattformen (siehe 19.3) und zusätzliche Stationen des maritimen Messnetzes des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrologie (BSH) in der Ostsee (siehe 19.6.3).

19.5.6.1 Meteorologischer Hafendienst

Zur Betreuung der deutschen Handelsschiffe und deren Besatzungen, die auf freiwilliger Basis und unentgeltlich Wetterbeobachtungen für den DWD durchführen ist ein meteorologischer Hafendienst an den Standorten Hamburg, Bremerhaven und Rostock eingerichtet. Die Mitarbeiter des Hafendienstes sind in das weltweite Netzwerk des VOS integriert und installieren auf jedem teilnehmenden Schiff eine Standardausrüstung von geeichten meteorologischen Instrumenten, bestehend aus Barometer, Barograph, Schleuderpsychrometer und Wasserschöpfer. Die Wettermeldungen werden unverzüglich über Satellit an die nationalen Wetterdienste weitergeleitet. Pro Tag erhält der DWD ca. 250.000 Wettermeldungen von deutschen Schiffen.

Abb. 19.35 Instrumente des Hafendienstes



Ergänzt werden die von den Beobachtern erstellten sog. „Augenbeobachtungen“ durch automatische Messsysteme (sog. Automatische Bordwetterstationen), die auf einigen Handels- und Forschungsschiffen eingesetzt werden und stündlich die Messwerte per Satellit absetzen. Wetterbeobachtungen von Schiffen beziehen sich in der Regel auf die bodennahe Luftschicht (Höhe der Brücke). Für eine umfassende Beschreibung des Wettergeschehens sind jedoch die physikalischen Abläufe in der unteren Atmosphäre über den Meeren bis zu einer Höhe von 10 km bis 15 km für die Meteorologie von großer Bedeutung. Der DWD beteiligt sich seit den 80er Jahren an dem internationalen ASAP-Programm (Automated Shipboard Aerological Programme) zur Gewinnung von Messdaten aus der Atmosphäre.

Der DWD honoriert die freiwillige Zusammenarbeit in Form von Sachprämien, die in Abhängigkeit von der Anzahl der durchgeführten Beobachtungen und dem Zeitraum der freiwilligen Zusammenarbeit vergeben werden.

19.5.6.2 Bordwetterwarte auf FS METEOR

Die Bordwetterwarte auf dem Forschungsschiff METEOR II – eine Dienststelle des DWD – ist eine feste Einrichtung auf diesem Schiff. Sie befindet sich im 2. Aufbaudeck auf Backbordseite („grünes Deck“). Auf Forschungsreisen ist sie permanent mit einem

Abb. 19.36 FS METEOR



Wetterfunktechniker und bei Bedarf zusätzlich mit einem qualifizierten Meteorologen des DWD besetzt. Beide sind kompetent in Fragen der maritimen Meteorologie und der Interpretation meteorologischer Daten.

Abb. 19.37 Arbeitsplatz des Bordmeteorologen (links) und des Wetterfunktechnikers (rechts) auf FS METEOR



Das meteorologische Messsystem auf FS METEOR dient der Erfassung meteorologischer Parameter, die von einem zentralen Meteorologierechner in der Bordwetterwarte erfasst und an verschiedenen Stellen des Schiffes (z. B. Brücke, Maschinenkontrollraum) als Datensatz oder zur Anzeige weitergeleitet werden. Die Lage der Messwertgeber kann auf der Übersichtsskizze des Mastes eingesehen werden (Abb. 19.38).

Folgende Messwerte werden auf der METEOR bereitgestellt:

Tab. 19.10 Messwerte auf FS METEOR

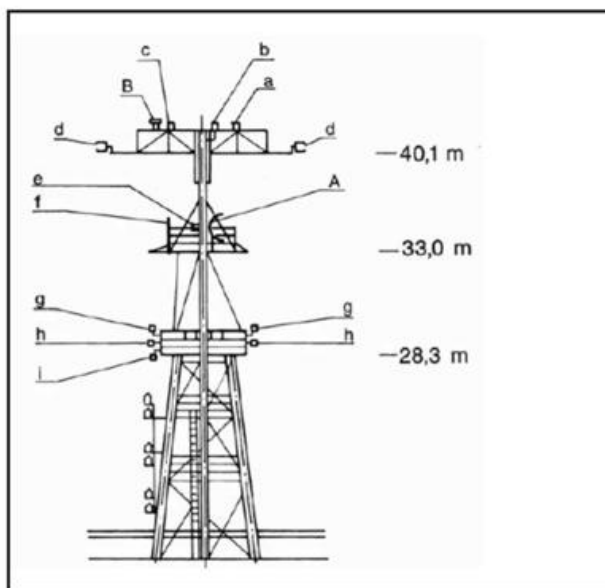
Parameter	Messgeräte/Sensoren	Fundstelle
Luftdruck	PTB220	7-3-3
Luft- und Wassertemperatur	Pt 100 (1/3 DIN mit Kennlinie)	8-3-2
Relative Feuchte Taupunkt als Rechengröße	HMP45 DL	9-3-3
Niederschlag	Regenmessgerät (n. Prof. Dr. L. Hasse) Niederschlagsmelder	9-3-3

Relative Windrichtung und -Geschwindigkeit	USA 2D Einblattwindfahne Schalensternanemometer	12.3.2 12.3.1
Wahrer Wind (Rechengröße aus relativem Wind)		
Horizontalsichtweite	PWD20	13.3.2
Strahlung langwellige Strahlung Globalstrahlung 2 UV-Komponenten der Globalstrahlung (UV-A, extrem wirksamer UV-B-Anteil) Sonnenscheindauer, -intensität	Pyranometer CM21/CMP21 Pyrgeometer CG 4 UVS-AE-T SON1e2/3	14.4.1 14.5 14.4.1 14.3.2

Da sich bei einem fahrenden Schiff Schiffsgeschwindigkeit und wahrer Wind vektoriell addieren, kann in diesem Fall nur der relative Wind gemessen werden. Unter Berücksichtigung von wahrer Schiffsgeschwindigkeit und wahrem Schiffskurs kann aus dem relativen Wind der wahre Wind errechnet werden.

Um Schiffsbewegungen auszugleichen, müssen einige Messgeräte (u. a. Pyranometer, UV-Sensor (UVS-AE-T) kardanisch aufgehängt sein.

Abb. 19.38 Lage der Sensoren auf FS METEOR



Im Zusammenhang mit der Niederschlagsmessung auf See ist zu beachten, dass das Messergebnis durch bestimmte Faktoren beeinträchtigt werden kann. Bei Starkwind oder Sturm zum Beispiel können Gischt bzw. Spritzwasser über sämtliche Aufbauten des Schiffes verdriftet werden und somit den Messort trotz seiner relativ großen Höhe erreichen. Das System unterscheidet nicht zwischen Gischt und tatsächlichem Niederschlag. Des Weiteren sollte bei der Interpretation von Niederschlagssummen berücksichtigt werden, dass die Daten auf einer mobilen Station gemessen werden. So kann die Dauer eines Niederschlagsereignisses,

bedingt durch die Fahrt des Schiffes, entsprechend verkürzt oder verlängert werden.

Anmerkung:

In den nationalen Wetterdiensten ist es üblich, Messgrößen von der Höhe der Messwertgeber auf eine von der WMO vorgegebene Standardhöhe zu reduzieren (z. B. gemessene Luftdruckwerte auf Meereshöhe. Dies erfolgt mit den an Bord gewonnenen Grundgrößen ausschließlich beim Luftdruck (Digitalbarometer 10,6 m über Wasser).

Die Teilnahme am internationalen Wetterbeobachtungsdienst ist eine weitere wichtige Aufgabe der Bordwetterwarte. Mit der ABWSt (Automatische Bordwetterstation) und einem angeschlossenen Verarbeitungsprogramm werden stündlich rund um die Uhr verschlüsselte automatische Messwerte wie Position, Sichtweite, Windrichtung und -Geschwindigkeit, Lufttemperatur, Taupunkt, Luftdruck, Wassertemperatur bereitgestellt. Sie werden tagsüber zu den sogenannten synoptischen Haupt- und Zwischenterminen durch das Personal der Bordwetterwarte mit visuellen Beobachtungen vervollständigt. Diese Augenbeobachtungen enthalten Angaben über:

- Bedeckungsgrad des Himmels
- Art und Höhe der Wolken
- Signifikante meteorologische Erscheinungen wie z. B. Niederschlag, Nebel usw
- Höhe, Richtung und Periode von Seegang und Dünung
- ggf. Eisbedeckung oder Angaben zu Eisbergen und Eisbergstücken

Messwerterfassungsanlage (METCO III)

Die meteorologischen Daten werden vom Messwerterfassungssystem (METCO III) der Bordwetterwarte über eine serielle Schnittstelle in das Datenverteilungssystem (DVS) übertragen und auf verschiedenen Monitoren und Anzeigegeräten im Schiff ausgegeben. Zusätzlich werden die meteorologischen Daten innerhalb der METCO III für jede Reise archiviert.

Der in der Bordwetterwarte zum Einsatz kommende Meteorologie-Computer (METCO) basiert auf einem industrietauglichen PC mit PentiumIV-CPU und TFT-Monitor mit Betriebssystem Windows XP-prof. unter Verwendung von industrietauglichen Peripheriebaugruppen. Das Verarbeitungsprogramm der erfassten Daten wird mit der Programmiersprache Pascal realisiert.

Die Abtastung der genannten Messwertgeber erfolgt einmal pro Sekunde, die der Windwerte dagegen alle 0,5 s. Daraus werden die Grundgrößen sowie die Folgegrößen (z. B. wahre Windgeschwindigkeit und Taupunkttemperatur) berechnet.

Die Erfassung aller Messdaten im PC erfolgt je nach Art des Parameters auf eine der folgenden Arten:

- Messung analoger Eingangssignale 0 bis 20 mA. Die Sensoren sind hierbei an Messumformer angeschlossen, durch die der Messbereich festgelegt ist. Die Erfassung im PC erfolgt mit einer AD-Wandler-Baugruppe

- Erfassung von Messdaten vom Datenerfassungsmodul COMBILOG der Fa. Friedrichs (siehe 4.4). Die Übertragung der Messdaten erfolgt über eine RS485-Schnittstelle. Der Messbereich wird durch die Konfiguration der COMBILOGs festgelegt
- Direkt im PC wird über eine RS232-Schnittstelle nur das Sensorsignal des Luftdrucksensors und der Sichtweite erfasst

Abb. 19.39 Visualisierung der erfassten und verarbeiteten Daten, erkennbar die Unterteilung in Anzeigen nach Back- und Steuerbordsensoren.



Ein Teil dieser Messdaten wird während der Reise nach internationalem Standard im Rahmen des GOS (Global Observing System) der WMO in den weltweiten Datenaustausch des GTS vom ABWST-Rechner 3-stündlich automatisch zu einer INMARSAT-C-Anlage transferiert und eingespeist. Die Daten sind Eingangsgrößen für numerische Wettervorhersagemodelle. Sie sind von besonderem Wert in entlegenen Seegebieten.

19.5.6.3 Bordwetterwarte auf FS Polarstern

FS Polarstern ist sowohl für meteorologische Forschung als auch für meteorologische Dienstleistungen gut ausgestattet. Die Bordwetterwarte ist ständig mit einem Wettertechniker/-beobachter des DWD besetzt, der alle drei Stunden synoptische

Abb. 19.40 FS Polarstern



Beobachtungen macht und die täglichen Radiosondenaufstiege durchführt. Die Messdaten aller meteorologischen Messgeräte werden kontinuierlich vom DSHIP-System erfasst.

Abb. 19.41 Bordwetterwarte auf FS Polarstern (2 Abbildungen)



Der Meteorologe der Polarstern ist dafür verantwortlich, den Kapitän des Schiffes sowie die Helikopterpiloten und die Wissenschaftler in allen wetterbezogenen Fragen zu beraten. Er wird unterstützt vom Wettertechniker, der den Satellitenbildempfang und die einkommenden Daten regelt. Die gewonnenen Daten lassen sich in folgende drei Bereiche einteilen:

- Synoptische Beobachtungen,
- Radiosondenaufstiege,
- Kontinuierliche Oberflächenmessungen (PODAS/DSHIP)

Das Schiff ist mit einem am Bug ausfahrbaren Mast (TMS) ausgerüstet, an dem Geräte zur Messung atmosphärischer Turbulenz angebracht sind. Dieses Messsystem wurde mehrfach während Sommer-Campagnen in der zentralen Arktis eingesetzt, um Luftströmungen über Eisrücken und Eisrinnen zu untersuchen.

Alle Daten werden im MISAWI – dem Meteorologischen Informationssystem des Alfred-Wegener-Instituts (AWI) archiviert, welches interaktiven Zugriff bietet. Außerdem sind alle Daten über das Publishing Network for Geoscientific & Environmental Data PANGAEA erreichbar.

19.5.7 Solares UV-Messnetz in Deutschland (Anhang 7.3)

Nicht zuletzt wegen der Vorgänge in der Ozonschicht der Atmosphäre ist die solare UV-Strahlung ein wichtiger Umweltparameter geworden, der weltweit ständig überwacht wird.

Das Bundesamt für Strahlenschutz (Bfs) betreibt zusammen mit dem Umweltbundesamt (UBA), dem DWD und weiteren assoziierten Institutionen ein bundesweites UV-Messnetz zur Bestimmung des UV-Index. Aktuelle Messwerte und Prognosen können im Sommerhalbjahr täglich abgerufen werden. Weitere Informationen zum UV-Index stehen hier zur Verfügung.

Im Rahmen des UV-Messnetzes wird an verschiedenen Orten in der Bundesrepublik Deutschland die einfallende UV-Strahlung, aufgelöst in kleine Wellenlängenbereiche, kontinuierlich gemessen (Anhang Messnetze). Aus diesen UV-Spektren wird die biologische Wirksamkeit berechnet, die in Form des UV-Indexes veröffentlicht wird. Im Jahr 1993 haben Bfs und UBA den Betrieb an den 4 Stationen des UV-Messnetzes in Zingst (Ostseeküste), Langen (Rheingraben bei Frankfurt), Schauinsland (Südschwarzwald) und Neuherberg (Stadttrand von München) aufgenommen. In den Folgejahren wurde das Messnetz zusammen mit dem DWD und weiteren assoziierten Institutionen zu einem bundesweiten UV-Messnetz ausgebaut. Assoziierte Institutionen sind die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin in Dortmund (BAuA), die Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (CAU) mit der Station in Westerland/Sylt, das MOL Lindenberg des DWD, das Bayerische Landesamt für Umwelt mit der Messstation in Kulmbach (LfU Bayern) und die Niedersächsische Gewerbeaufsicht mit den Messstationen in Rinteln und auf der Insel Norderney. Bei der Auswahl der Messstationen wurden insbesondere die in Deutschland vorhandenen Unterschiede hinsichtlich der geographischen Breite, der Höhenlagen, des Klimas und der Lufttrübung berücksichtigt.

In Neuherberg befindet sich die Messnetzzentrale, die zusätzlich zum UV-Monitoring in einem eigenen UV-Kalibrierlabor die Qualitätssicherung durchführt und die gesundheitliche Bewertung und Speicherung der gesamten Messdaten übernimmt.

Für die tägliche Berichterstattung ruft die Messzentrale jeweils um die Mittagszeit aktuelle UV-Daten von allen Stationen ab und stellt sie in Form von UV-Indizes der Öffentlichkeit im Internet zur Verfügung. Von April bis September werden darüber hinaus täglich für die 10 wichtigsten Vorhersagegebiete in Deutschland 3-Tages-UV-Vorhersagen erstellt und im Internet veröffentlicht. Komplette Datensätze werden am Ende eines jeden Tages abgerufen, auf Plausibilität geprüft, gesundheitlich bewertet, für die weitere Öffentlichkeitsarbeit aufbereitet und anschließend im Zentralrechner gespeichert. Aktuelle Informationen werden in Form von Pressemitteilungen weitergegeben.

19.6 Übersicht über weitere Mess- und Beobachtungsnetze

Die nachfolgenden Darstellungen der Messnetze (Anhang Messnetze) sollen exemplarisch zeigen, wer und wo noch neben dem Messnetz des DWD in Deutschland misst. Obwohl es in den letzten Jahren zu einer erfreulichen Zusammenarbeit bzw. Austausch gekommen ist, stehen noch nicht alle Daten jedem jederzeit zur Verfügung. Zusätzlich sind zur Information die Messnetze der Nachbarstaaten Schweiz und Österreich dargestellt. Hierzu sind in den entsprechenden Kapiteln einzelne Geräte/Sensoren beschrieben, die nicht im DWD eingeführt sind.

19.6.1 Hessisches Niederschlagsmessnetz (Anhang 7.4)

Niederschlagsverteilung und -intensität sind notwendig für die Berechnung mit Niederschlag-Abfluss-Modellen, Ermittlung der Grundwasserneubildung für die Wasserversorgung, Hochwasservorsorgemaßnahmen, Hochwasservorhersagen und Berechnungen in der Stadthydrologie (Kanalnetzberechnungen, Regenrückhaltebecken in Kanalnetzen). Daher kommt der Messung der Niederschläge eine große Bedeutung zu.

Um Auskünfte über Dauer und Intensität der Niederschläge zu erhalten, werden kontinuierliche Messungen mit automatisierten Niederschlagsmessstationen mit Datenfernübertragung (Ombrometer) und vereinzelt noch mit Niederschlagschreibern durchgeführt. Parallel dazu werden Tageswerte mit einfachen Niederschlagsmessern nach Hellmann ermittelt.

Derzeit werden ca. 45 Ombrometer (PLUVIO) mit Datenfernübertragung und ca. 60 Messgeräte an ca. 75 Messstellen im Rahmen des landeseigenen, hydrologisch ausgerichteten Messnetzes betrieben. Zuständig für Bau und Betrieb der Messstationen sind die Regierungspräsidien. Die aktuellen Messwerte sowie die Stammdaten der Ombrometer sind in der Internetpräsentation zu finden. Bei der Messnetzmodernisierung und -optimierung wurden die Messstandorte des Landes Hessen und des DWD auf der Grundlage einer Rahmenvereinbarung zwischen dem DWD und Hessen aufeinander abgestimmt. In diesem Zusammenhang wurden die Niederschlagsschreiber zum größten Teil abgebaut.

19.6.2 Stadtmessnetz. B.rlin und Messnetz der TU Berlin (Anhang 7.5)

Das Stadtmessnetz. B.rlin umfasst 9 Stationen. Gemessen werden im allgemeinen Lufttemperatur, Luftfeuchte, Niederschlag, Erdoberflächen- und Erdbodentemperatur. An einigen Stationen zusätzlich Windrichtung und Windgeschwindigkeit, Sonnenschein- und Niederschlagsdauer, sowie Luftdruck und Strahlungsgrößen.

Der Messtakt beträgt 1 Minute, sodass pro Tag ca. 100.000 Messwerte an die Zentrale im Institut für Meteorologie auf dem Fichtenberg gemeldet werden. In Berlin-Dahlem ergänzen die Augenbeobachtungen „rund-um-die-Uhr“ das Datenangebot.

Das Fachgebiet Klimatologie der TU Berlin betreibt seit Ende der 1980er Jahre ein weiteres Stadtklima-Messnetz in Berlin. Es besteht aus automatischen Wetterstationen, mit denen Lufttemperatur und Luftfeuchte sowie an ausgewählten Standorten weitere meteorologische Größen mit einer zeitlichen Auflösung von 5 min aufgezeichnet werden.

Schwarze Punkte repräsentieren Stationen, die langjährige Daten erhoben haben, deren Betrieb aber inzwischen eingestellt wurde. Beispiel der Messstation Berlin Rothenburgstraße (Geographische Breite: 52° 27' 26", Geographische Länge: 13° 18' 57"). Die Messgrößen sind: Temperatur 2 m ü. G., Bodentemperatur, Windrichtung und Windgeschwindigkeit, Strahlungsbilanz, Globalstrahlung, relative Feuchte 2 m ü.G. und Niederschlag.

19.6.3 Messnetz des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie – BSH (Anhang 7.6)

Das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) in Hamburg betreibt ein eigenes Marines Umweltmessnetz – MAR-NET – in Nord- und Ostsee. Tabelle 19.9 gibt die Sensorbestückung (Soll-Zustand) der einzelnen Stationen wieder. Aufgrund technischer und logistischer Probleme kann es vorkommen, dass einzelne Variablen aktuell nicht gemessen werden.

Tab. 19.11 Sensorbestückung der Stationen im Messnetz BSH

Stationen in der Nordsee	
Nordseeboje II	Temperatur, Salzgehalt, Sauerstoff, Pegel, Lufttemperatur, Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Luftdruck
Nordseeboje III	Temperatur, Salzgehalt, Sauerstoff, Lufttemperatur, Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Pegel, Luftdruck, Bruttogammastrahlung
Deutsche Bucht	Temperatur, Salzgehalt, Sauerstoff, Pegel, Bruttogammastrahlung, Phosphat, Silikat, Nitrit/Nitrat
Ems	Temperatur, Salzgehalt, Sauerstoff, Lufttemperatur, Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Pegel, Luftdruck, Bruttogammastrahlung
FINO	Temperatur, Salzgehalt, Sauerstoff, Pegel, Lufttemperatur, Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Luftdruck, Strömungsrichtung, Strömungsgeschwindigkeit
Stationen in der Ostsee	
Kiel	Temperatur, Salzgehalt, Lufttemperatur, Bruttogammastrahlung
Fehmarn Belt	Temperatur, Salzgehalt, Sauerstoff, Lufttemperatur, Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Bruttogammastrahlung, Phosphat, Silikat, Nitrit/Nitrat
Darßer Schwelle	Temperatur, Salzgehalt, Sauerstoff, Lufttemperatur, Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Luftdruck, Bruttogammastrahlung, Strömungsrichtung, Strömungsgeschwindigkeit
Arkona Becken	Temperatur, Salzgehalt, Sauerstoff, Lufttemperatur, Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Luftdruck, Bruttogammastrahlung, Strömungsrichtung, Strömungsgeschwindigkeit
Oder Bank	Temperatur, Salzgehalt, Sauerstoff, Lufttemperatur, Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Luftdruck

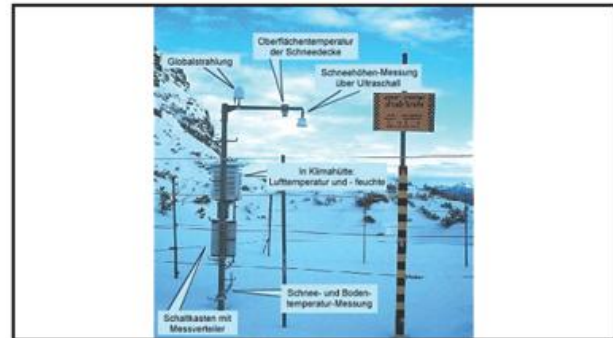
Diese Stationen werden vom Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW) für das BSH betreut.

Die meteorologischen Variablen sind an den verschiedenen Stationen unterschiedlich: Höhenangabe der Station, Temperatursensoren in unterschiedlicher Tiefen: z. B. in 4 m, 6 m, 10 m, 15 m, 20 m, 25 m, 30 m, 35 m, Leitfähigkeitssensoren in verschiedenen Tiefen: z. B. 6 m, 35 m, Sauerstoffsensoren in verschiedenen Tiefen: z. B.: 6 m, 35 m, Radioaktivität: 6 m Tiefe, Nährstoffe: 6 m Tiefe. Z.T werden auch aktuelle stündliche, meteorologische Messwerte (Rohdaten) gemeldet

19.6.4 Messnetz der Lawinenwarnzentrale Bayern (Anhang 7.7)

Der Lawinenwarndienst hat verschiedene automatische Messstellen im Einsatz und auch die Bayerische Wasserwirtschaft errichtet an ausgewählten Niederschlagsmessstellen zusätzliche automatische Schneemessensorik.

Abb. 19.42 Messstation des bayerischen Lawinenwarndienstes



Die automatischen Messstationen im bayerischen Lawinenwarndienst (Abb. 19.43) sind jeweils den örtlichen Gegebenheiten angepasst und deshalb unterschiedlich von der Fa. Sommer, Voralberg ausgestattet.

Des Weiteren wird ein Schneetemperatur-Profilsensor eingesetzt (Abb. 19.44), aufgebaut auf Balken mit 3 Temperatursensoren in PVDF-Standrohr (10 cm, 40 cm, 60 cm) und 1 Bodentemperatursensor und ein Windmessgerät (ohne Abb.).

Abb. 19.43 Schneetemperatur Profilsensor (Sommer)



19.6.5 Messnetz der Bayerischen Wasserwirtschaft (Anhang 7.8)

Im Jahr 1999 wurde eine Kooperationsvereinbarung mit dem DWD zur Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Hydrometeorologie und zum Aufbau eines gemeinsamen Niederschlagsmessnetzes geschlossen. In den Folgejahren wurden die automatisierten Niederschlagsmessstellen mit einheitlichem Gerätestandard (Messnetz 2000) errichtet, das Aufbauziel ist weitgehend erreicht und die Messdaten werden im operativen Betrieb im Stundentakt abgerufen.

Folgende Schneeparameter werden wie im Messnetz des DWD auch im Messnetz der Bayerischen Wasserwirtschaft durch manuelle Beobachtermessungen erfasst:

- Höhe der Gesamtschneedecke (cm)
- Schneebedeckungsgrad
- Wassergehalt der Schneedecke, sog. Wasseräquivalent (mm)

Alle neuen automatischen Niederschlagsstationen der Bayerischen Wasserwirtschaft wurden mit Schneesonden ausgestattet und bei Schneebedeckung werden die Schneeparameter täglich gemessen (Bestimmung des Wasseräquivalents erst ab 5 cm Schneehöhe).

Derzeit verfügbare hochauflösende Niederschlagsmessstationen in Bayern (Anhang Messnetze). Aktuell (9/2011) ist der DWD mit ca. 216 und die Bayerische Wasserwirtschaft mit ca. 110 Stationen mit automatisch registrierenden Niederschlagsmessgeräten (Pluviometer) ausgestattet. Die Standorte der Messstellen wurden so ausgewählt, dass sie Bayern relativ gleichmäßig abdecken, sich zur Aneicherung des Wetterradarverbundes des DWD eignen und auch zur Speichersteuerung vorhandener Speicher genutzt werden können.

Daneben stehen weitere hoch aufgelöste Niederschlagsdaten aus dem Nahbereich der benachbarten Länder (z. B. Landesanstalt für Landwirtschaft, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik in Österreich) und die Registrierungen von ca. 300 bayerischen Tagesniederschlagsstationen des DWD zur Verfügung und werden auch dem LfU für wasserwirtschaftliche Auswertungen zur Verfügung gestellt (ca. 370 Stationen).

19.6.6 Messnetz des Schweizer Wetterdienstes – MeteoSchweiz (Anhang 7.9)

Das Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie der Schweiz – MeteoSchweiz – hat den gesetzlichen Auftrag, kontinuierliche und flächendeckende Messungen von meteorologischen Größen in der Schweiz durchzuführen. MeteoSchweiz gehört zum Eidgenössischen Departement des Innern (EDI). Als nationaler Wetter- und Klimadienst unterhält MeteoSchweiz seit 1864 ein klimatologisches Messnetz. Die gesammelten Daten werden archiviert und stehen für verschiedenste Anwendungen zur Verfügung. Langjährige Datenreihen werden zur Beschreibung und Analyse des vergangenen Klimas verwendet und sind ein wichtiges Hilfsmittel zur Beantwortung von Fragen zur Klimaveränderung und deren Auswirkung. 1981 wurde das automatische Messnetz (ANETZ) mit 60 Messstationen in der Schweiz in Betrieb genommen.

Momentan werden noch mehrere Bodenmessnetze parallel betrieben: das ANETZ (72 Stationen mit hoher Verfügbarkeit für den Grundbedarf), das ENET (Ergänzungsnetz von 44 Stationen vor allem für die Wind- und Lawinenwarnung), das KLIMA konv. (konventionelles Klimanetz von 25 Stationen mit 3 Handablesungen sowie 3 Augenbeobachtungen pro Tag) und das AERO Netz (spezielle Augenbeobachtungen an 17 Stationen insbesondere für die Aviatik).

Die bestehenden Messnetze sind baulich und technologisch veraltet. Der heterogene Aufbau der verschiedenen Netze macht zudem den Unterhalt zeit- und kostenintensiv. Ein modernes, standardisiertes Bodenmessnetz ist unabdingbar für aktuelle und zukünftige meteorologische und klimatologische Fragestellungen, wie beispielsweise regionalisierte oder saisonale Prognosen und das langfristige Klimamonitoring. Aus diesem Grund wurde im Jahre 2005 mit dem Bau des neuen meteorologischen Messnetzes SwissMetNet (SMN) begonnen.

Im Projekt **SwissMetNet** wird versucht, die neue Messstation aus klimatologischen Gründen wenn immer möglich am selben Standort wie die alte Station aufzubauen. Dort, wo genügend Platz vorhanden ist, kann die neue Station neben der alten aufgebaut werden. Die reine Bauzeit für die neue Station beträgt ca. 1,5 Monate. Die alte Station läuft so lange weiter, bis die neue Station nach einer technischen und meteorologischen Abnahme in den operationellen Betrieb übergegangen ist. Falls es sich um eine lange klimatologische Messreihe handelt, wird die alte Station noch bis zu 3 Jahre parallel betrieben, damit eine Homogenisierung dieser Messreihe gewährleistet ist.

Ende 2008 wurde die erste Bauphase abgeschlossen und sämtliche ANETZ-Stationen erneuert. Zur Zeit laufen parallel dazu die Vorbereitungen für Bauphase II, in welcher ab dem Jahr 2009 die ENET und die KLIMA-Stationen abgelöst werden.

Das Swiss NBCN

Das Swiss National Basic Climatological Network (Swiss NBCN) fasst die klimatologisch wichtigsten Stationen innerhalb des Messnetzes der MeteoSchweiz zusammen (Begert et al. 2007). Es besteht derzeit aus 29 Klimastationen, an denen verschiedene Messgrößen registriert werden, und 46 Niederschlagsstationen. Die Messreihen von Temperatur, Niederschlag und Sonnenscheindauer der Swiss NBCN-Stationen reichen teilweise bis Mitte 19. Jh. zurück und werden im Rahmen des Vorhabens DigiHom, vollständig digitalisiert und homogenisiert.

Die Auswahl der Bodenmessstationen des Swiss NBCN wurde unter anderem nach folgenden Kriterien getroffen:

- zeitlich lange Datenreihen verschiedener Klimamessgrößen
- räumlich sinnvolle Verteilung der Standorte
- Einbettung in internationale Messnetze

Folgende Stationstypen sind derzeit im Swiss NBCN vertreten

- Klimastationen: 29 Stationen, an welchen die fünf Messgrößen Temperatur (mittlere, minimale, maximale), Niederschlag und Sonnenscheindauer zur Verfügung stehen (Abb. 3). Lange Datenreihen aller fünf Parameter sind vorwiegend an Stationen unterhalb von 1000 m ü. NN. vorhanden. Höher gelegene Stationen bieten in den meisten Fällen nur lange Reihen der mittleren Temperatur und des Niederschlags.
- Niederschlagsstationen: 46 Stationen, die nur Niederschlag messen und die Klimastationen des Swiss NBCN aufgrund der großen räumlichen Variabilität dieses Parameters ergänzen. Die Auswahl der ergänzenden Niederschlagsstationen wurden auf objektiver Basis mittels einer Clusteranalyse bestimmt (Begert, 2008).

In das Swiss NBCN eingebettet sind Messstationen folgender internationaler Klima-Referenzmessnetze:

GSN: Das GCOS Surface Network dient der globalen Klimabeobachtung und beinhaltet 980 Stationen aus allen Teilen der Welt. Es wurde 1997 vom Global Climate Observing System (GCOS) Programm der WMO definiert.

RBCN: Das Regional Basic Climatological Network umfasst

weltweit rund 2600 Bodenmessstationen in sechs WMO Regionen und dient der kontinentalen Klimabeobachtung. 8 Stationen des Swiss NBCN sind Teil des RBCN. Per Definition sind alle GSN Stationen auch RBCN Stationen.

Neben dem SwissMetNet gibt es noch eine Reihe von Partner-Messnetzen in der Schweiz. Dazu gehört ein Niederschlagsmessnetz des Amtes für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL).

Kamerastandorte des SwissMetNet

Das Kameranetz besteht momentan (MeteoSchweiz, 2010) aus 27 Standorten und steht weiterhin nur internen Zwecken zur Verfügung. Da für den Augenbeobachtungsstandort Yverdon als Ersatz für Neuchâtel kein Beobachter gefunden wurde, aber Informationen zu den Wetterverhältnissen über dem Neuenburgersee weiterhin von Interesse sind, wurde in Yverdon eine Kamera installiert.

19.6.8 Messnetz des Österreichischen Wetterdienstes (Anhang 7.10)

Eine der zentralen Aufgaben der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG), des nationalen und geophysikalischen Dienstes von Österreich ist es das Klima in Österreich zu beobachten und zu erforschen. Dazu wurde im Laufe der Jahre ein Netz von 250 teilautomatischen Wetterstationen (TAWES) über Österreich gelegt. Mit fremd betriebenen Wetterstationen (z. B. Flughäfen, Ö3 und Austrocontrol) sind es sogar 263. Zusätzlich sind noch 130 phänologische Stationen in diesem Netz integriert.

Meteorologische Parameter wie Luftdruck, Temperatur, Luftfeuchte, Wind, Niederschlag, Strahlung usw. werden vom Bodensee bis zum Neusiedlersee, aber auch vom Flachland bis hinauf in die Berge (Sonnblick Observatorium, 3106 m NN) aufgenommen und kontrolliert. Dieser Datenschatz ist die Grundlage für jede Klimaforschung und ist speziell für das Verständnis des laufenden Klimawandels von großer Bedeutung.

1. GESCHICHTLICHER RÜCKBLICK AUF DIE ENTWICKLUNG METEOROLOGISCHER MESSGERÄTE

Zur Zeit der Naturphilosophie von Aristoteles (384–322 v. Chr.), ein Schüler Platons wurden Erklärungen für physikalische Erscheinungen nicht aus Experimenten, sondern aus Annahmen über die Welt und aus dem Allgemeinwissen der Gelehrten abgeleitet. Seine Begriffsbildung dient noch heute der Wissenschaft. Das entsprechende Weltbild der Griechen hielt sich fast 2000 Jahre. Auch hier gab es noch keine Experimente, die die Vorstellungen der alten Griechen hätten widerlegen können. Erst Galileo Galilei (1564–1642) machte mit seinen klassischen Experimenten zur Bewegung deutlich, wie wichtig experimentelle Beobachtungsmethoden in der Physik sind.

Mit Beginn des Zeitalters der Renaissance erfolgte nicht nur die Wiedergeburt antiken Wissens, sondern eine regelrechte wissenschaftliche Revolution mit einer Flut von neuen Erkenntnissen. Im 17. Jahrhundert wurden grundlegende Naturgesetze der Physik erkannt, aber auch so wichtige Instrumente wie Teleskop, Mikroskop, Barometer und Thermometer erfunden. Dies wiederum gab den Anstoß zu einer rapiden Entwicklung der experimentellen Wissenschaften. Die Meteorologie als exakte Wissenschaft war geboren. Da es aber zu jener Zeit die Meteorologie als selbstständige Disziplin noch nicht gab, waren an der Entwicklung meteorologischer Instrumente und der Erforschung der Gesetze der Atmosphäre hauptsächlich Physiker, Astronomen, Naturforscher, aber auch Mathematiker und Ärzte beteiligt.

Ende des 19. Jahrhunderts existierten grundlegende Gesetze von Maxwell, Joule, Carnot und Andere zur Beschreibung der Thermodynamik und anderen Gebieten der Physik, wie Mechanik, Licht, Schall, Elektrizität und Magnetismus mit denen sich Mach und Hertz vorrangig beschäftigten. Diese Gebiete werden üblicherweise als die klassische Physik bezeichnet.

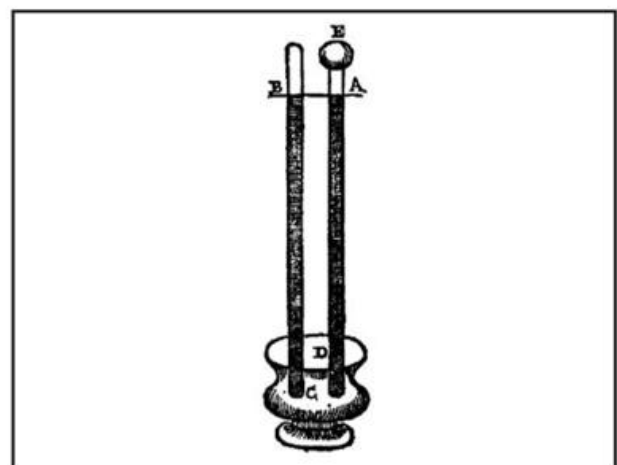
Einen weiter gehenden, kurzer geschichtlicher Rückblick bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts folgt nun für jedes Kapitel des Leitfadens eine kurze Beschreibung der Messung meteorologischer Elemente, die sich im Wesentlichen auf die Erfassung der „klassischen“ meteorologischen Messgrößen und der Entwicklung meteorologischer Messmethoden von Luftdruck, Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Niederschlag, Wind, Wolkenuntergrenze und Strahlung beschränkt. Sie enthält nur die wichtigsten Daten in Stichworten, chronologisch geordnet und erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Zu 7. Kurzer geschichtlicher Rückblick zur Luftdruckmessung

Da die Luftdruckänderungen im Gegensatz zu anderen Wetterelementen wie Wind, Temperatur, Feuchtigkeit etc. nicht wirklich spürbar sind, wurden Luftdruckmessgeräte erst relativ spät – ab dem 17. Jahrhundert – entwickelt.

- 1631 Pierre VERNIER: Erfinder des Nonius, jedoch nach dem Portugiesen Pedro Nunez (1492–1577) benannt. Ein verschiebbarer Hilfsmaßstab an Messgeräten (z. B. am Barometer), dessen Länge neun Einheiten des Messgerätes beträgt und der seinerseits in zehn Teile unterteilt ist. Der Nonius ermöglicht damit das exakte Ablesen von Zehnteleinheiten.
- 1640 1. Versuch einer Luftdruckmessung durch Berti, ein Schüler Galileis, mit einem selbst hergestellten Wasserbarometer
- 1643 Evangelista TORRICELLI (1608–1647) war ebenfalls ein Schüler Galileis. VIVIANI führt auf Veranlassung Torricellis das berühmte Experiment aus. Eine zunächst vollständig mit Quecksilber gefüllte, unten mit dem Finger verschlossene Glasröhre von 80 bis 100 cm Länge, wird in eine mit Quecksilber gefüllte Wanne gestellt und geöffnet. Ein Teil des Quecksilbers strömt aus und oben in der Röhre entsteht ein Vakuum. Die Hg-Höhe ist abhängig vom äußeren Luftdruck.

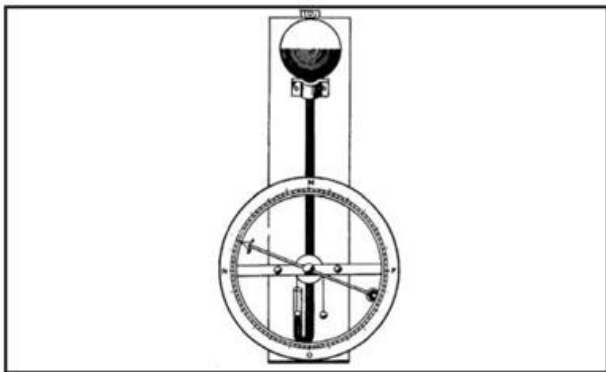
Abb. 7.1 Erstes Barometer n. Torricelli



- 1648 René DESCARTES (1596–1650) vermutete, dass der Luftdruck abnehmen müsse, je höher man in die Atmosphäre steige. Auf Anregung von **Blaise Pascal** (1623–1662) wurde das von dessen Schwager am Puy de Dome geprüft. Es zeigte sich, dass die Luft auf dem 1500m hohen Berg deutlich messbar weniger Druck auf das Quecksilberbarometer ausübte, als in der Ebene.
- 1650 Otto von GUERICKE (1602–1686): Erfinder der Luftpumpe
- 1653 GUERICKE: Konstruktion eines Demonstrationsbarometers mit Luftdruckanzeige durch ein „Wettermännchen“
- 1660 GUERICKE: Sturmvorhersage (2 Std. vorher) am 6.12.1660 bei festgestelltem Fallen des Luftdrucks
- 1663 GUERICKE: Nachweis des Luftdruckes mit den „Magdeburger Halbkugeln“

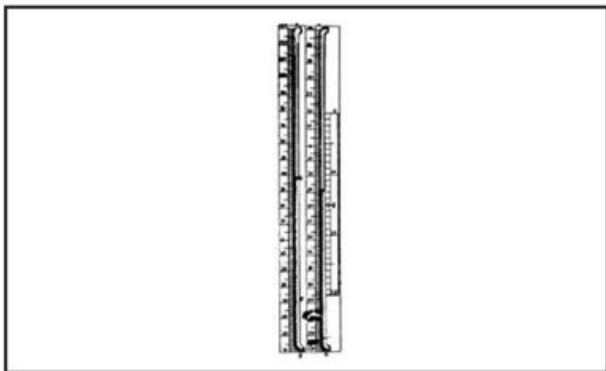
1665 Robert HOOKE (1635–1703): Konstruktion des Radbarometers. Die Bewegung des Hg-Flüssigkeitsspiegels wurde mit Hilfe eines Schwimmkörpers, der über einen Bindfaden mit einer Rolle verbunden war, auf einen Zeiger übertragen. Dadurch konnten relativ kleine Luftdruckänderungen sichtbar gemacht werden. Einteilung der Skala in 0,5 engl. inch und Zuordnung zu verschiedenen Wetterzuständen, z.B. 29,5 inch = „veränderlich“.

Abb 7.2 Radbarometer n. Hooke (1665)



1667 HOOKE: Konstruktion eines Schiffsbarometers. Messung kleiner Druckdifferenzen durch die Abweichung eines Alkoholthermometers gegenüber einem (vom Luftdruck abhängigen) Luftthermometer.

Abb 7.3 Schiffsbarometer n. Hooke



1668 HOOKE: Wesentliche Verbesserung des empfindlichen Zweiflüssigkeits-Barometers von DESCARTES mit Quecksilber und Wasser (Ablese bei D.)

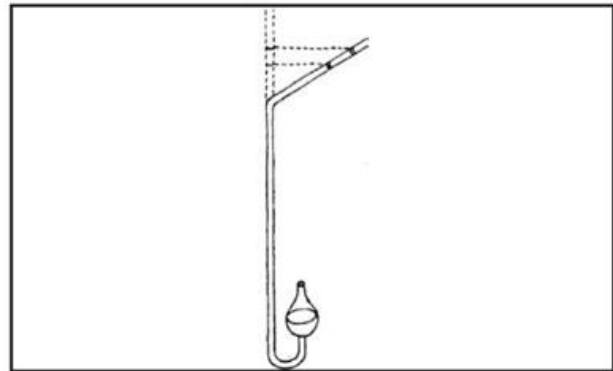
Abb 7.4 Zweiflüssigkeits-Barometer n. Hooke



1675 Sir Samuel MORLAND: Konstruktion eines Waagebarometers bei dem das Gewicht der Quecksilbersäule quasi an einem Waagebalken hängt.

1688 MORLAND: Diagonalbarometer mit starker Neigung des oberen Teiles des Quecksilberrohres zur Erhöhung der Empfindlichkeit.

Abb 7.5 Diagonalbarometer n. Morland (1688)



1693 HALLEY: Entdeckung der Temperaturabhängigkeit der Hg-Säulenlänge beim Barometer. (Erste Korrektur durch AMONTONS 1704).

1694 Robert BOYLE (16237–1691): Konstruktion eines transportablen Siphon-Barometers.

1702 G.W.LEIBNIZ: Forderung nach einem Druckmessinstrument, bestehend aus einer evakuierten Leder- bzw. Metalldose, die durch Stützfedern auseinander gehalten wird.

1724 Daniel Gabriel FAHRENHEIT (1686–1736): (Quantitative) Nutzung der Abhängigkeit des Siedepunktes vom äußeren Luftdruck (erstes Hypsometer, mit Tabellen von MAYER, 1751) Hersteller physikalischer und meteorologischer Instrumente.

1740 CASSINI/LEMMONIER: Beseitigung einer wesentlichen Fehlerquelle beim Quecksilberbarometer durch vorheriges Kochen des Quecksilbers. (Physikalische Begründung durch DE LUC 1772)

1770 DE LUC: Konstruktion eines für den Transport geeigneten Heberbarometers

1787 SAUSSURE: Erste Messungen mit selbst konstruierten Hypsometern auf dem Mont Blanc.

1806 ENGLEFIELD: Forderung nach einer reduzierten Skala.

1820 Daniell: Entdeckung der Kapillardepression bei Hg-Messgeräten

1844 Lucien VIDIE (1805–1866): Verwirklichung des ersten Aneroidbarometers (Vidie-Dose) nach Plänen von LEIBNIZ aus dem Jahre 1702

1849 BOURDON: dünnwandige, kreisförmig gebogene Röhre, bei der sich die beiden Enden bei Luftdruckänderungen aufeinander zu

1876 RÉDIER: Konstruktion eines Barographen

1884 Inbetriebnahme eines Normalbarometers an der Deutschen Seewarte in Hamburg

1880 Siedebarometer

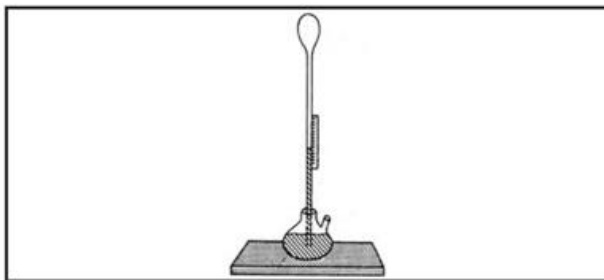
1904 HERGESELL/KLEINSCHMIDT: Temperatureinfluss auf Aneroide

1952 neues Normalbarometer beim Instrumentenamt des DWD in Hamburg

Zu 8. Kurzer geschichtlicher Rückblick zur Temperaturmessung

- 230 v.Chr. Philon von Byzanz: erstes (Wasser-) Thermoskop: Wasser dehnt sich bei Sonneneinstrahlung in einem Glasrohr aus und zieht sich bei Abkühlung zusammen.
- 1593–97 Galileo GALILEI (1564–1642): Erfindung des Thermometers, „Thermoskop“, genannt. Es bestand aus einem Glasröhrchen, dessen geschlossenes Ende sich in einer kugelförmigen Ausbuchtung erweiterte, während das offene Ende in ein Gefäß mit Wasser getaucht war. Der Wasserspiegel in dem Rohr zeigte bei Expansion beziehungsweise Kontraktion der Luft in der Kugel einen Anstieg beziehungsweise Abfall der Temperatur an. Dieses Gerät hatte noch keine Skala und einen erheblichen Fehler wegen seiner Luftdruckabhängigkeit. Es sollte daher besser Thermobaroskop genannt werden. Galilei formulierte Gesetze des freien Falls, Entdecker der Jupitermonde. Er hielt Vorlesungen und machte Versuche in Padua.

Abb. 8.1 Erstes Thermometer von Galileo Galilei (1597)



- 1604 Cornelius DREBBEL (1572–1634): Versuch eines Quecksilber-Thermoskops unabhängig von Galilei
- 1611 GALILEI: Konstruktion eines ersten Flüssigkeitsthermometers mit Weingeistfüllung
- 1612 SANTORIO: „Fieberthermometer“ (in Padua)
- 1631 REY: Verwendung von Wasser als thermometrischer Flüssigkeit an Stelle von Luft im damals viel benutzten Thermoskop von Galilei. Diese Verbesserung war natürlich nur unter Inkaufnahme einer wesentlich geringeren Empfindlichkeit möglich.
- 1641 FERDINAND II. v. TOSCANA (1641–57): Einführung der Weingeistfüllung für die Vorläufer der „Florentiner Thermometer“ die mit einer Skala versehen waren. Die Skala bestand i. a. aus 50 oder 100 willkürlichen Skalenteilen.

Abb. 8.2 Thermometer nach Ferdinand II. v. Toscana



- 1657 FERDINAND II. v. TOSCANA, Accademia del Cimento: Älteste meteorologische Lufttemperaturmessung mit hermetisch verschlossenen Florentiner Thermometern, so dass die Luftdruckabhängigkeit beseitigt war. Allerdings konnte von einer Vergleichbarkeit der nicht genormten Thermometer noch keine Rede sein, da die Fixpunkte der Skala nach der „höchsten Temperatur in sommerlichem Sonnenschein“ (ca. 55 °C) bzw. nach den „tiefsten Wintertemperaturen“ (ca. –20 °C) orientiert wurden.
- 1658 Erste Temperaturmessung in Frankreich
- 1659 BOULLIAU: Erstmalige Verwendung von Quecksilber in einem Thermometer
- 1660 GUERICKE: Alkoholthermometer mit Anzeigeeinrichtung durch eine kleine Figur (sog. Engelthermometer), indem die Bewegungen des Alkoholspiegels über Schwimmer, Faden und Umlenkrolle auf diese Figur übertragen wurden.

Abb. 8.3 Thermometer von Otto von Guericke

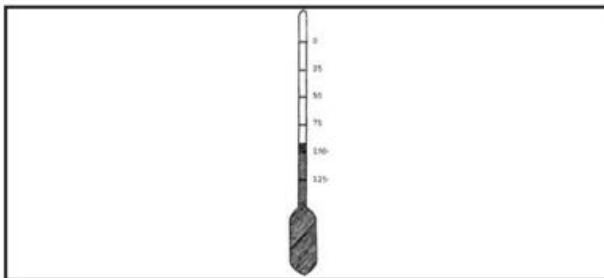


- 1665 Christian HUYGENS (1629–1695): Vorschlag von Gefrier- und Siedepunkt des Wassers als Fixpunkte der Thermometerskala, Wellentheorie des Lichtes
- 1670 Edme MARIOTTE (1620–1684): Älteste Beobachtung von Bodentemperaturen im 28 m tiefen Keller der Pariser Sternwarte
- 1672 Otto von GUERICKE stellte ein Thermoskop (sog. Engelthermometer) mit luftleer gefüllter Kupferkugel her, mit angesetztem U-förmigen, am freien Ende offenes Rohr, das zur Hälfte mit Wasser oder Weingeist gefüllt wurde. Bei Temperaturerhöhung dehnt sich die Luft in der Kugel aus, wodurch der Flüssigkeitsspiegel im offenen Schenkel des U-Rohres steigt und umgekehrt. Auf dem Flüssigkeitsspiegel befindet sich ein Schwimmer, dessen Bewegungen über eine Schnurrolle auf einer Engelfigur übertragen werden.
- 1709 Gabriel Daniel FAHRENHEIT (1686–1736): Eine wesentliche Verbesserung stellt die Herstellung gut untereinander vergleichbarer Alkohol-Thermometer mit Weingeist dar
- 1714 FAHRENHEIT: Einführung der Fahrenheit-Skala zur Messung der Temperatur. Er wollte, dass alle messbaren Temperaturwerte positiv sind. Als untersten Fixpunkt wählte er die tiefste Temperatur (–17,8 °C), die er mit einer Salmiak-Schnee-Mischung herstellen konnte (später 32 °F). Der Normaltemperatur des Menschen wies er den Wert 96 °F, weil diese Zahl durch viele kleinere Zahlen ohne Rest teilbar ist. Das Intervall zwischen Eis- und Siedepunkt des Wassers teilte er in 180 gleiche Teile ein. Erste Konstruktion

eines Quecksilberthermometers.

- 1721 FAHRENHEIT entdeckte, dass Wasser erheblich unter seinen Frostpunkt abgekühlt werden konnte, ohne zu gefrieren.
- 1724 FAHRENHEIT: Eichung seiner Quecksilberthermometer mit Hilfe von drei Fixpunkten und zwar -90°F (später 0°F) entsprechend einer Mischung aus Schnee und Salz, 0°F (später 32°F) entsprechend einer Wasser-Eismischung und $+90^{\circ}\text{F}$ (später 96°F) entsprechend der Temperatur des menschlichen Körpers
- 1724 HALES: Erste Messung mit Erdbodenthermometern.
- 1730 R.A.F. de REAUMUR (1683-1757): Eichung eines Alkoholthermometers mit Hilfe eines Fixpunktes, des Gefrierpunktes des Wassers: 0°R) und der linear angenommenen Volumenausdehnung von Alkohol – bezogen auf das Volumen beim Fixpunkt.
- 1736 Anders
- 1770 internationale Einführung der 80-teiligen Reaumur-Skala für Quecksilberthermometer. Sie blieb bis zum Ende des 19. Jahrhunderts die maßgebende Skala.
- 1742 Anders CELSIUS (1701–1744): Neue Thermometerskala mit Centigradeinteilung d.h. 100-Grad-Einteilung zwischen Gefrier- und Siedepunkt des Wassers. Anfangs wählte Celsius 100° als Gefrierpunkt, um negative Temperaturen zu vermeiden.
- 1742 Carl von Linné (1707–1778): Landsmann von Celsius kehrte die Skala 1742 um und so ist sie noch heute in Gebrauch.

Abb. 8.4 Erstes Quecksilberthermometer n. A. Celsius (1742)



Der Name „Celsiusgrad“ ergab sich zufällig, da auch „Centigrad“ dieselbe Abkürzung ($^{\circ}\text{C}$) hat. Erst seit Celsius ist eine einwandfreie, wissenschaftlich fundierte Temperaturmessung möglich. Dennoch entwickelten sich im Laufe der Zeit noch etwa 60 verschiedene Thermometerskalen ab 19. Jh. Temperaturmessung in Strahlungsschutzhütten an der Nordseite von Gebäuden. (Der Strahlungsfehler dieser Messungen erweist sich nur im gemäßigten, ozeanischen Klima als noch tragbar)

- 1817 Brequet: Bimetall-Thermometer
- 1821 Thomas Johann SEEBECK: Entdeckung des thermoelektrischen Effektes
- 1829 LIBRI: Erster Thermometervergleich – zwischen der 50-teiligen Skala eines Florentiner Thermometers und der Reaumur-Skala ($50^{\circ}\text{flor} = 44^{\circ}\text{R}$; $13,5^{\circ}\text{flor} = 0^{\circ}\text{R}$).
- 1830 Das größte Thermometer in Deutschland am Deutschen Museum in München

Abb. 8.5 Das größte Thermometer in Deutschland am Turm des Deutschen Museums in München

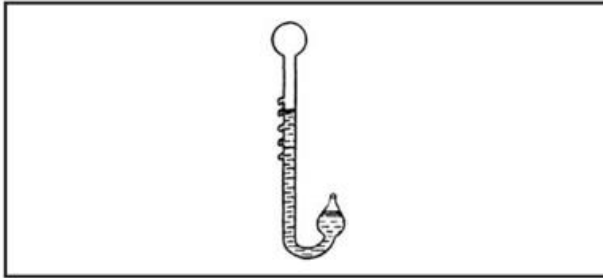


- 1831 MAGNUS (1802–1870): Konstruktion eines Gasthermometers
- 1834 Jean Charles Athanase PELTIER (1785–1845) entdeckte, dass die Lötstellen zweier verschiedener Metalle bei Stromdurchfluss eine unterschiedliche Temperatur aufweisen
- 1841 ARAGO (1786–1853): Darstellung der Bedeutung des Strahlungsschutzes im Freiballon
- 1845 SCHINZ/BOURDON: Benutzung eines gasgefüllten, ringförmigen Gefäßes zur Messung der Temperatur (Bourdon-Thermometer)
- 1854 WELSH: Konstruktion der ersten „Englischen Hütte“ als Strahlungsschutz für meteorologische Instrumente
- 1864 Thomas STEVENSON (1818–1887): Vorschlag zur Aufstellung einer Hütte für die Temperaturmessung (englischen Hütte), Verbesserung durch Jalousiewände
- 1870 Russische Hütte mit Jalousiewänden und Zinkbehälter im Innern als zusätzlichem Schutz für das Thermometer, das vor der Ablesung einige Minuten mit Hilfe eines Ventilators zu belüften war.
- 1874 JOLLY: Konstruktion eines Gasthermometers zur Überprüfung von Flüssigkeitsthermometern. Die Temperaturmessung wird dabei auf eine Druckmessung bei konstante Volumen zurückgeführt.
- 1877 FUESS: Angaben einer Patentbefestigung der Skala
- 1881 FRERES: Konstruktion eines Thermographen
- 1892 William THOMPSON (1824–1907), schottischer Physiker, bekannt als LORD KELVIN: Vorschlag für eine Temperaturskala mit absolutem Nullpunkt bei -273°C , Skaleneinteilung nach Celsiusgraden. Skala auf Grund von vorarbeiten von Amonton (1663–1705), Charles (1746–1823) und Guy-Lussac (1778–1850)
- 1924 Internationale Festlegung einer thermodynamischen Skala
- 1948 Internationale Temperaturskala

Extremthermometer

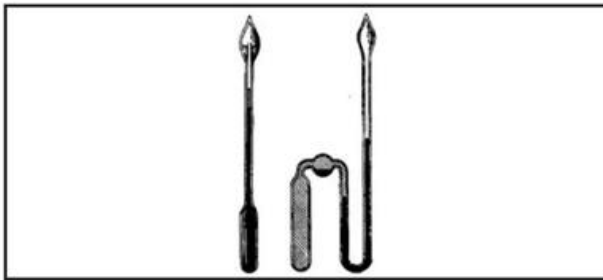
- 1698–1740 BERNOULLI: Idee zu einem Luftthermometer mit Anzeige des Minimumwertes. 1740 wurde ein ähnliches Instrument von KRAFFT konstruiert. Es bestand aus einem normalen Luftthermometer nach Galilei, wobei entlang des Glasrohres eine Anzahl von kleinen Ausbuchtungen angebracht war, in denen entsprechend der Höhe des Wasserstandes ein wenig Wasser zurückgehalten wurde. Der höchste angezeigte Wasserstand entsprach dann der tiefsten Temperatur im Beobachtungszeitraum.

Abb. 8.6 Erstes Minimumthermometer nach A. Krafft (1740)



1757 Charles CAVENDISH: Erfindung eines praktikablen Extremthermometer. In einem Quecksilberthermometer (Abb. 8.7 links) befand sich in der Kapillare oberhalb des Quecksilbers Alkohol. Bei Temperaturanstieg floss etwas Alkohol in einen speziellen Behälter an der Spitze des Glasrohres, so dass nach späterem Temperaturfall die Länge des leeren Rohres zwischen den beiden Alkoholspiegeln gerade die Differenz zwischen aktueller und maximaler Temperatur anzeigte.

Abb. 8.7 Maximum- und Minimumthermometer von Cavendish (1757)



Das Minimumthermometer funktionierte ähnlich. Es bestand jedoch aus einem Alkoholthermometer mit doppelt umgebogenem Rohr und einem Quecksilberfaden oberhalb des Alkohols. Bei Abkühlung floss etwas Quecksilber in die Ausbuchtung der ersten Biegung des Rohres über. Bei späterem Temperaturanstieg war die Höhendifferenz zwischen dem (unteren) Quecksilberfadenende in dem linken Schenkel und dem Quecksilberspiegel in der Ausbuchtung ein Maß für die Minimumtemperatur (Abb. 3.2.6).

1782 SIX: Konstruktion des „Thermometrographen“ – heute Six-Thermometer genannt. Dies stellt praktisch eine Zusammenfassung der Instrumente von Cavendish in der U-Form dar, wobei die Anzeige der Extremwerte durch Eisenstifte erreicht wird, die von dem jeweiligen Ende des U-förmigen Quecksilberfadens mitgenommen werden.

1794 RUTHERFORD: Durch Teilung des Six-Extremthermometers entstand wieder ein Maximum- und ein Minimumthermometer. Das Minimumthermometer erhielt jedoch wie unser heutige: eine reine Alkoholfüllung mit einem Glasstift, der von dem Alkoholmeniskus bei Abkühlung mitgenommen wurde.

1851 NEGRETTI/ZAMBRA: Erfindung des heute noch verwendeten Maximumthermometers

1912 HILL: Katathermometer (Schwülebestimmung)
Zu 9. Kurzer geschichtlicher Rückblick zur Luftfeuchtigkeitsmessung

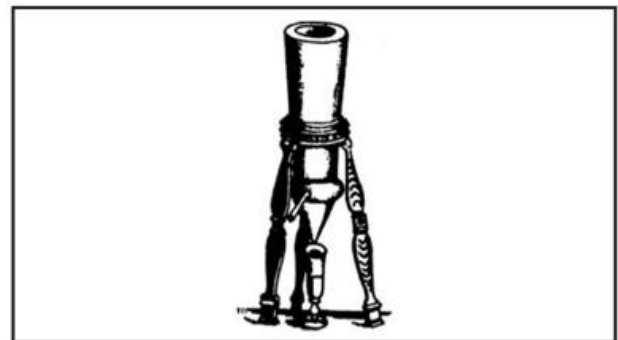
1400 Holz absorbiert Feuchtigkeit („hygroskopisch“) und ändert bei Feuchtigkeitsaufnahme seine Eigenschaften (z.B. Volumen, Länge, Gewicht, Farbe) ca. 1450 NICOLAUS v. CUSA, ein deutscher Kardinal konstruiert das erste Hygrometer. Experimente zur Luftfeuchtigkeitsbestimmung durch Wägung von befeuchteten und wieder getrockneten Wollballen.

1483 LEONARDO da VINCI: Benutzung von Baumwolle als hygroskopische Substanz.

1626 SANTORIO: Konstruktion eines Darmsaiten-Hygrometers

1640–60 FERDINAND II. v. TOSCANA: Erfindung eines Kondensations-Hygrometers. Ein Gestell trug einen konischen Behälter mit der Spitze nach unten. Der Behälter wurde von innen mit Eis gekühlt, so dass die Luftfeuchtigkeit an seiner äußeren Oberfläche kondensierte. Dieses „Kondenswasser“ wurde in einem Messglas aufgefangen. Dieses Hygrometer ist damit ein Vorläufer heutiger Absolutinstrumente

Abb. 9.1 Hygrometer der Academia del Cimonte n. Ferdinand II. von Toscana (1660)



1670 R. HOOKE: Torsionshygrometer aus einem Bündel von Hafergrannen

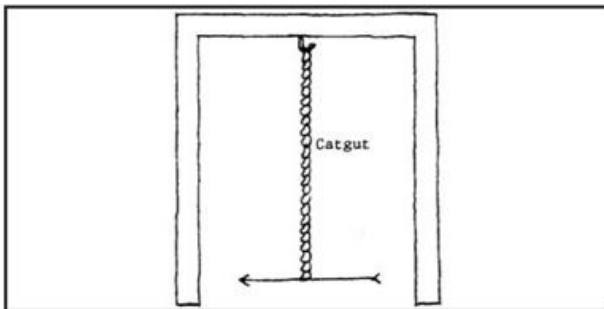
1688 D'ALENCÉ: Ausnutzung der Quelleigenschaften von Holz als Hygrometer

Abb. 9.2 Hygrometer von Dalencé (1688)



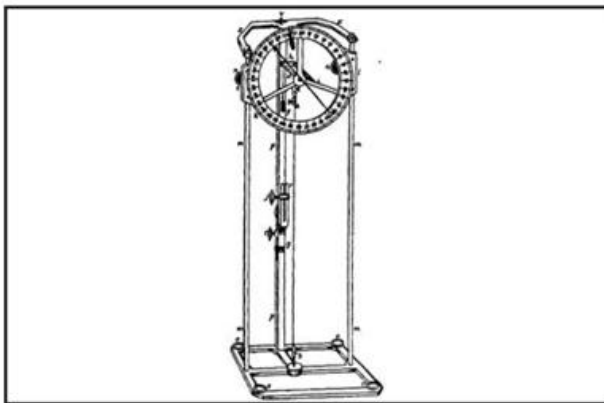
- 1755 LE ROY: Erste Versuche zur Bestimmung des Taupunktes. Ein mit Wasser gefülltes Glas wurde abgekühlt und die Wassertemperatur beim Auftreten eines Beschlages auf dem Glas gemessen.
- 1768 Johann Heinrich LAMBERT (1728–1777): Katzen-darm-„Hygrometer“. Bis zur Mitte des 18. Jahrhunderts fehlte eine genaue Vorstellung über die Natur der Luftfeuchtigkeit und folglich über das, was die Hygrometer wirklich maßen, d.h. über die Feuchtemessgrößen. Erst DE SAUSSURES Studien über die Luftfeuchtigkeit ermöglichten hier einen entscheidenden Durchbruch

Abb. 9.3 Hygrometer nach Johann Lambert (1768)



- 1769 LAMBERT: Hygrometrie-Studien, Strahlungslehre
- 1773 de LUCE: Hygrometer aus einem Hg-Thermometer mit Elfenbeingefäß, das bei Feuchteänderung eine Volumenänderung erfährt, die in der Kapillare angezeigt wird. Später nahm er als Messfühler Fischbein.
- 1775–83 Horace Benedict de SAUSSURE (1740–1799): Versuche mit verschiedenen Feuchtemessfühlern, entdeckte das (blonde) Menschenhaar dafür. Benutzung einer Feuchteskala mit 100 Einheiten und den Extremwerten für den „Punkt höchstmöglicher Feuchtigkeit“ und den Punkt „extremer Trockenheit“. Untersuchungen zum Einfluss der Temperatur auf die Feuchtemessung.

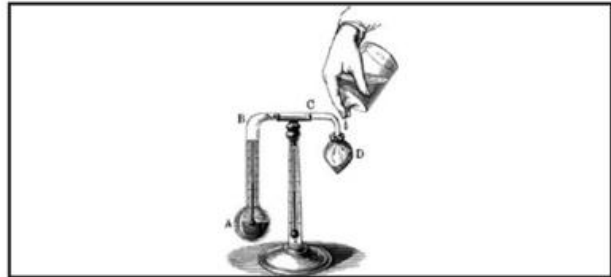
Abb. 9.4 Erstes Haarhygrometer v. de Saussure (1783)



- 1792 HUTTON/LESLIE: Erfindung des Thermohygrometers – Vergleich der Temperaturen eines trockenen und eines nassen Thermometers.

- 1816 WILSON: Patent auf ein Gefäßhygroskop, dessen Gefäß aus einer Rattenblase gebildet wurde
- 1820 John Frederic DANIELL (1790–1845), brit. Chemiker: Konstruktion eines Kondensationshygrometers. Ein Spiegel wird durch eine Kältemischung solange abgekühlt, bis ein Beschlag auf dem Spiegel die Kondensation des Wasserdampfes der Luft anzeigt. Die Temperatur in diesem Moment ist die Taupunkttemperatur

Abb. 9.5 Taupunkthygrometer n. Daniell



- 1822 Josef Louis GUY-LUSSAC (1778–1850): erste Dampfdruckformel
- 1825 AUGUST: Verwendung der Abkühlung bei der Verdunstung zur Messung der Luftfeuchtigkeit mit einem „Psychrometer“ erstmals mit der Beziehung $t-t'$. Erste Psychrometerformel. Prägt den Namen Psychrometer (von psychro = feucht/kalt)
- 1831 BELLI: Künstliche Ventilation für Psychrometer vorgeschlagen
- 1834 B. CLAPEYRON (1799–1864), französischer Physiker stellt die Gleichung für die Temperaturabhängigkeit des Gleichgewichtsdruckes bei Phasengleichgewicht auf
- 1850 Rudolf. J. CLAUSIUS (1822–1888), deutscher Physiker begründet die Gleichung von Clapeyron
- 1844 H.G.MAGNUS (1802–1870), deutscher Physiker und Chemiker entwickelte die empirische Formel zur Berechnung des Sättigungsdampfdruckes
- 1852 WELSH: Erkennt die Notwendigkeit aspirierter Thermometer und Psychrometer für aerologische Messungen und führt entsprechende Versuche durch.
- 1877 KOPPE: Konstruktion eines justierbaren Haarhygrometers
- 1878 SCHWACKHÖFER: Vorschlag eines Absolutinstruments zur Dampfdruckmessung. Messung der Druckabnahme in einem abgeschlossenen Luftvolumen – während dessen der Luft die Feuchtigkeit mit Hilfe eines Absorptionsmittels entzogen wird
- 1888 SPRUNG: Entwicklung der Sprungschen Formel
- 1890 Richard ASSMANN (1845–1918): Konstruktion des (belüfteten) Aspirationspsychrometers
- 1897 SCHUBERT: Konstruktion des Schleuderpsychrometers
- 1892 ASSMANN: Hüttenpsychrometer mit Federmotor belüftet
- 1925 Der Schweizer R. Billwiller erfand den Nipherschen Windschutz (Metallring).
- 1929 SETH u.a., Kohlefilmhygrometer
- 1944 FRANKENBERGER: erstmals gewalztes Menschenhaar-Hygrometer

Zu 10. Kurzer geschichtlicher Rückblick zur Messung der Wolkenhöhe

- 1640 VARENIUS: Bestimmung von Wolkenhöhen in Verbindung mit Bergen bekannter Höhe.
- 1672 RICCIOLI: Geometrische Bestimmung von Wolkenhöhen
- 1826 PEYTIER: Benutzung eines Theodoliten zur Bestimmung der Wolkenuntergrenze
- 1872 Ernst ABBE, deutscher Physiker: Messung von Wolkenuntergrenzen mit Hilfe von künstlichen Lichtquellen
- 1882 EKHOLM/HAGSTRÖM: Erste genaue Messungen mit Basislinie und zwei Theodoliten
- 1888 PICKERING: Konstruktion eines Apparates zur Bestimmung des nächtlichen Bewölkungsganges
- 1958 TOWNES entdeckte das Laserprinzip (erhielt 1964 den Nobelpreis mit zwei russ. Physikern)
- 1960 Theodor H. MAIMAN, Amerikaner, bestrahlte einen Rubinstab mit einer Blitzlampe, gepulster Laser
- 1961 MAIMAN, Helium-Neon-Laser
- 1962 Halbleiter-Laser

Zu 11. Kurzer geschichtlicher Rückblick zur Niederschlagsmessung

Die Niederschlagsmessung dürfte die älteste meteorologische Messung sein. Bekannt sind aus der Literatur Regenmessungen von KAUTILYA in Athasatra, Indien aus dem Jahre 400 v.Chr. Ab 1533 sind auch Niederschlagsmessungen aus Chile bekannt. Die ersten genaueren Messungen, zumindest aus dem europäischen Bereich sind erst für das Jahr 1677 in Lancashire, England belegt. Aus dem 17. Jh. ist bekannt, dass in China und Korea Messungen ähnlich wie heute angestellt wurden.

3000–2000 Jahre v. Chr.:

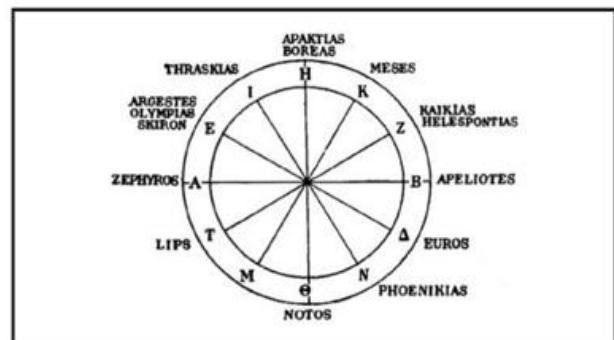
- Niederschlagsmessungen in China, Indien und Palästina
- 4. Jh. v. Chr. Regelmäßige Niederschlagsmessungen in Indien
- 1. Jh. v. Chr. Bestimmung der Niederschlagshöhe in Palästina mit Hilfe spezieller Behälter
- 11. bis 17. Jh. Umfangreiches Niederschlagsmessnetz in China/Korea mit regelmäßigen Messungen in Auffanggefäßen von genau bekannter Größe
- 1634 Robert HOOK, Messung über das Gewicht
- 1639 CASTELLI: Konstruktion eines ersten „modernen“ Regenmessers aus einem Glaszylinder
- 1661 Christoph WREN (1632–1723), erster registrierender Regenmesser mit Uhrwerk betriebenen, bei dem kleine Kästchen den Stundenniederschlag aufnahmen
- 1670 HOOKE: Einführung der Begriffe Ombrometer und Ombrograph – erste Niederschlagsregistrierungen
- 1677 TOWNLEY: Nutzung des Wippenprinzips zur Intensitätsmessung
- 1697 längste Niederschlagsmessreihe der Welt aus Kew bei London bis heute ununterbrochen fortgeführt.
- 1716 MAIRAN: Messung des Wasserwertes von Schnee

- 1722 HORSLEY: Bau und Beschreibung eines viel benutzten Regenmessers
- 1725 Padua: älteste Niederschlagsreihe
- 1811 HOWARD: Untersuchungen zum Windeinfluss auf Niederschlagsmessungen
- 1877 WILD: Windschutzkreuz in Niederschlagsmessern
- 1879 NIPHER: Konstruktion eines wirksamen Schuttrichters zur Verringerung des Windeinflusses
- 1884 RUNG: Konstruktion eines Niederschlagsschreibers nach dem Waageprinzip
- 1886 Prof. Gustav HELLMANN (1854–1939) Konstruktion eines Regenmessers
- 1925 R. BILLWILLER: Metallring als Nipherschen Windschutz

Zu 12. Kurzer geschichtlicher Rückblick zur Messung des Windes

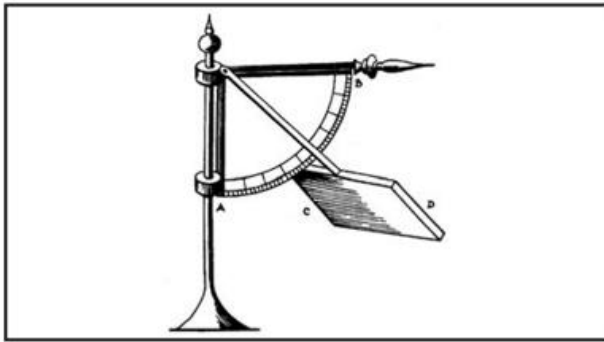
4. Jh. v.Chr. Griechische Windrose

Abb. 12.1 Griechische Windrose (4. Jh.v.Chr.)



- 2. Jh. v. Chr. Nutzung von Drachen zur Windbestimmung in China und Japan
- 1. Jh. v. Chr. Der griechische Astronom Andronikos erbaut in Athen den „Turm der Winde“, an dessen Spitze eine bronzene Fahne die Windrichtung anzeigt.
- Jh. v. Chr. Windfahnen in Ägypten und Griechenland mit 12 Namen für verschiedene Windrichtungen
- um 800 ALCUIN: Benutzung einer 12-teiligen Windrose
- 1375 Erste 8-teilige Windrose auf der Catalanischen Seekarte
- 1450 ALBERTI: Beschreibung eines Pendelanemometers
- 1483 Leonardo da VINCI: Entwurf einer durchgehenden Windfahne
- 1578 DANTI: Erste wissenschaftliche Windrichtungsmessungen mit einem „Anemoskop“ (Bannerähnliche Windfahne auf einer sehr langen Achse, die eine Anzeige auch im Haus gestattete).
- 17. Jh. Royal Society London und Mannheimer Gesellschaft; Verwendung einer Skala mit 4 Intensitätsstufen nach sichtbaren, indirekten Auswirkungen des Windes.
- 1667 Robert HOOKE/CROUNE: Konstruktion des Pendelanemometers

Abb. 12.2 Pendelanemometer n. Hooke



17. u. 18. Jh. Benutzung kleiner Windmühlen als „Anemometer“ mit Schalenkreuz als Nachfolgemodelle der Gebetsmühlen im Orient – besonders in Tibet.
- Um 1700 D'ONS-EN-BRAY: Anzeige der Windgeschwindigkeit durch ein Hämmerchen, das alle 400 Umdrehungen eine Marke auf ein Papier drückte.
- 1723 HUET: Vorschlag eines Staurohres zur Windgeschwindigkeitsmessung, Verwirklichung durch LIND 1775.
- 1732 PITOT: Konstruktion eines Windstaurohres SCHÖBER: Erste Beschreibung eines Flügelradanemometers
- 1769 Erstmalige Erwähnung einer 12-teiligen Windstärkeskala in England
- 1790 WOLTMANN: Konstruktion des ersten brauchbaren Schalenanemometers
- 1797 ENGELHARDT/PARROT: Windfahne aus zwei gegeneinander geneigten Blechen
- 1806 Admiral Sir Francis BEAUFORT (1774–1857) in englischen Diensten erstellte eine detaillierte Beschreibung einer Windstärkeskala
- 1822–46 ROBINSON: Konstruktion eines geeichten Schalenkreuzanemometers
- 1839 OSLER: Konstruktion eines registrierenden Anemometers
- 1841 WHEWELL: Konstruktion eines Windrichtungsschreibers
- 1861 WILD: Angabe einer Windstärketafel bei Pendelanemometern. Etwa zur gleichen Zeit erfand T.R. Robinson das Schalenkreuzanemometer. Trotz der Kenntnis weit genauerer Messmethoden zur Windbestimmung setzte sich die WILD'sche Windfahne mit ihrem Pendelanemometer international durch – der Grund lag in ihrer Einfachheit und Robustheit
- 1874 Internationale Einführung der BEAUFORT Skala für Schiffsmeldungen
- 1883 STANLEY: Konstruktion eines Komponentenintegrators zur Bestimmung der Richtungskomponenten des Windes mittels eines Rotationsanemometers
- 1890 DINES: Konstruktion eines funktionstüchtigen Staudüsenanemographen
- 1943 BARROTH legt nach Messungen die Seemeile mit $1852,276 \pm 0,014$ m fest.

Zu 14. Kurzer geschichtlicher Rückblick zur Strahlungsmessung

- 1775 SAUSSURE: Heliothermometer (Intensität der Sonnenstrahlung)
- 1800 HERSHEY: Entdeckung der Infrarotstrahlung
- 1801 Johann Wilhelm RITTER: deutscher Physiker, machte die Beobachtung, dass Strahlen jenseits des violetten Lichtes unglaublich effektiv im Schwärzen von Silberchloridpapier war. Bis ins 19. Jahrhundert wurde UV-Strahlung als chemische Strahlung betrachtet.
- 1820 DANIELL: Strahlungsmessungen mit besonnten und beschatteten Thermometern mit spiegelnden und geschwärzten Kugeln;
- 1835 BELLANI: Kugelpyranometer
- 1838 POUILLET: Pyrheliometer
- 1853 CAMPBELL/STOKES: Sonnenscheinautograph
- 1866 Samuel Pierpont LANGLEY (1834–1887): amerikanischer Astrophysiker und Flugpionier untersuchte den Infrarotanteil der Solarstrahlung im Sonnenspektrum. Langley entwickelte unter anderem ein Bolometer; d.h. einen Strahlungssensor für schwache elektromagnetische Strahlung.
- 1879 STEFAN, Josef findet empirisch den Zusammenhang der abgestrahlten Leistung einer Oberfläche zu seiner Temperatur
- 1884 BOLTZMANN, Ludwig begründet diesen von Stefan gefundenen Zusammenhang theoretisch
- 1893 ÅNGSTRÖM: Kompensationspyrheliometer
- 1902 Gustav KAISER: österreichischer Arzt macht einen Selbstversuch mit UV-Glühlampe an einer nicht heilen wollenden Wunde. Eine schwer erkrankte tuberkulöse Patientin soll mittels des „blauen Lichtes“ in 4 Wochen geheilt worden sein.
- 1923 MICHELSON: Herstellung eines Strahlungsbilanzmessers, bestehend aus zwei schwarzen Metallblechen, von denen das eine nach oben und das andere nach unten gerichtet ist.
- 1938 Carl Friedrich v. WEIZÄCKER (1912–2007) entdeckte und beschrieb die durch Massendefizit bei der Verschmelzung von leichten und schweren Atomkernen in der Sonne freigesetzte Strahlung. Hans Albert BETHE (1906–2005) entdeckte unabhängig von v. Weizäcker die dabei freigesetzte Strahlung zur gleichen Zeit.

Zu 19. Kurzer geschichtlicher Rückblick auf die Entwicklung meteorologischer Messnetze

4. Jh. V. Chr.: Meteorologica (systematische Darstellung der Meteorologie) von Aristoteles.

Mit der Erfindung des Thermometer im Jahr 1592 und der weiteren Entwicklung von meteorologischen Instrumenten im 17. und 18. Jh., darunter des ersten Barometers im Jahr 1643 gewannen die Forscher ein tieferes Wissen über die Vorgänge in der Atmosphäre und sie erkannten allmählich, dass das Wetter von großräumigen atmosphärischen Prozessen beeinflusst wird. Um sie genauer untersuchen zu können, mussten ausgedehnte Beobachtungsnetze aufgebaut werden. 1654 richtete der toskanische Adelige Großherzog Ferdinand II. ein solches Netz von Wetterstationen ein, das bis 1670 in Betrieb war.

Auch in Deutschland gab es mehrere Anläufe. 1780 begann die Pfälzische Meteorologische Gesellschaft, die sich zeitgemäß *Societas Meteorologica Palatina* nannte, mit dem Aufbau eines Beobachtungsnetzes, das zum Vorbild aller modernen Netze wurde. Unter der Schirmherrschaft des Kurfürsten Karl Theodor von der Pfalz und Bayern wurden ab 1781 bis 1795 an 39 Wetterstationen, u.a. ab 1781 an der Wetterstation auf dem Hohenpeißenberg nach einheitlichen Verfahren, mit den gleichen Instrumenten und zu festgelegten Zeiten (07, 14 und 21 Uhr Ortszeit), den „Mannheimer Stunden“ Wetterdaten erhoben. Diese Zeiten werden noch heute für klimatologische Betrachtungen herangezogen. Die Stationen verteilten sich rund um den Globus von Nordamerika über Grönland, Nord- und Mitteleuropa bis nach Russland.

1823 wurde im Rahmen der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft (SNG) ein Beobachtungsnetzes mit 12 Stationen gebildet. Dem Beobachtungsnetz war kein Erfolg beschied, es wurde auf privater und kantonaler Ebene weitergeführt.

1855 wird in Frankreich der nationale Wetterdienst gegründet, der erstmals die Daten internationaler Wetterstationen zusammenträgt und von 1863 an täglich synoptische

Wetterkarten veröffentlicht. Auslöser war ein Sturm am 14. November 1854, bei dem im Krimkrieg die Flotte der Franzosen, Engländer und Türken vor Sewastopol zerstört wurde.

1873 war der Gründungskongress der „Internationalen Meteorologischen Organisation“. Dieser beschließt einen internationalen Standard für meteorologische Kartensymbole. Ende des 19. Jh. wurde der systematische Aufbau von Stationsnetzen in Deutschland betrieben.

Solch ein weltumspannendes Beobachtungsnetz war der erste Schritt zur modernen Meteorologie. Ein möglichst aktuelles Bild der großräumigen Wetterlage kann es aber erst liefern, wenn es die Daten der einzelnen Stationen zuverlässig und schnell in eine Zentrale Auswertestelle übermitteln kann. Damals mussten die Meteorologen ihre Depeschen noch per Schiff und mit kurfürstlichen Postreitern nach Mannheim schicken, wo sie erst nach Wochen oder Monaten eingingen. So erlaubten sie zwar den Aufbau eines ersten globalen Klimaarchivs, von einer aktuellen Wetterkarte oder gar einer zuverlässigen Wettervorhersage konnten die Meteorologen damals nur träumen. Erst die Erfindung des Morsetelegraphen im Jahr 1832 ermöglichte die erste zeitnahe Datenübermittlung auch über große Strecken.

2. LITERATUR- UND QUELLENVERZEICHNIS

- | | |
|---|---|
| (1) Friesinger, H.H. | The History of Meteorology to 1800, Science Hist. Publ., N.Y. (1977) |
| (2) Khrgian, A. Kh. | Meteorology – a historical survey – Isr. Progr. F. Scient. Transl., Jerusalem (1970) |
| (3) Linke, F., Baur, F. | Meteorologisches Taschenbuch, Akadem. Verl. Ges., Leipzig (1962) |
| (4) Mc-Intyre, D.P. | Meteorological Challenges: A History Ottawa (1972) |
| (5) Schneider-Carius, K | Wetterkunde, Wetterforschung, Verl. K. Alber Freiburg/München (1955) |
| (6) Foken, Thomas, | Angewandte Meteorologie (2. Aufl. 2006), Springer Verlag |
| (7) Klose, Brigitte | Meteorologie (2008), Springer Verlag |
| (8) Dentler, Frank-Ulrich | Niederschlagseinfluss auf Messungen des turbulenten Windfeldes über der See mit Schalenkreuzanemometer (1977) |
| (9) Häckel, Hans, | Meteorologie (6. Auflage, 2008), Ulmer Verlag |
| (10) Wehry, Werner | Beiträge zur Berliner Wetterkarte 46/09 vom 08.07.2009 |
| (11) Hering et.al. | Physik für Ingenieure, 10.Auflage (2007), Springer Verlag |
| (12) Möller, Fritz | Einführung in die Meteorologie, Bd. 1 , B.I.-Hochschultaschenbücher |
| (13) Böhm, Reinhard | Heiße Luft nach Kopenhagen (2010), Edition VA bENE |
| (14) Meyers kleines Lexikon
Meteorologie | Bibliographisches Institut & F.A. Brockhaus (1987) |

Deutscher Wetterdienst, Unterlagen/Richtlinien, Berichte

- (15) Vorschriften und Betriebsunterlagen DWD Nr. 3 (VuB 3) Beobachterhandbuch (BHB) (2009–01)
Technikhandbuch (THB) 4. (August 2008)
- (16) Vorschriften und Betriebsunterlagen DWD Nr. 8 (VuB 8)
- (17) Vorschriften und Betriebsunterlagen DWD Nr. 11 (VuB 11)
- (18) Empfehlungen für die Technische Wartung der Sensorik im Bodenmessnetz des DWD (Sept 2009)
- (19) Psychrometer-Tafeln des Deutschen Wetterdienstes 7. Auflage (1998)
- (20) Richtlinie für Automatische Klimastationen des DWD (Feb 2001)
- (21) Richtlinie für Flugwetterwarten des DWD
- (22) Durchführung meteorologischer Dienste an Verkehrsflughäfen und Verkehrslandeplätzen für Regionalluftverkehr mit Flugplatzkontrolldienst sowie an unkontrollierten Flugplätzen mit Luftraum "F", (Januar 2007)
- (23) Empfehlungen für die Technische Wartung der Sensorik im Bodenmessnetz des DWD (2007)
- (24) MAZ Mitarbeiterzeitung des DWD
- (25) DWD-Bericht: Bordwetterwarte FS METEOR
- (26) Richtlinien für den Allwetterflugbetrieb
- (27) WIKI-System des DWD diverse Gerätebeschreibungen
- (28) www.dwd.de diverse Artikel, Berichte

WMO, Unterlagen/Richtlinien

- | | |
|---|---|
| (29) WMO-No. 488, Third edition, 2007 | Guide to the Global Observing System |
| (30) WMO-No 8, Seventh edition, 2008 | Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation |
| (31) Federal Meteorological Handbook No.1
SENSOR STANDARDS | APPENDIX C, Sept 2005 |
| (32) WMO/TD-No. 1504 2009 | INSTRUMENTS AND OBSERVING METHODS REPORT No. 99 |
| (33) ICAO Doc 9328 AN/908
Third Edition – 2005 | Manual of Runway Visual Range Observing and Reporting Practices |

Sonstige Unterlagen

- | | |
|--|--|
| (34) Promet Heft 3/4 Jahrgang 36 | M. Wendisch, A. Ehrlich: Bodengebundene und flugzeuggetragene passive Fernerkundung von Wolken mit Hilfe von solaren Strahlungsmessungen |
| (35) Henning, Bernd | Skripte für die Ausbildung am BTZ des DWD |
| (36) Löffler, Hans | Kompendien des Ausbildungs- und Schulungszentrums (ASZ) des GeoInfoDBw |
| (37) Institut für Meteorologie und Klimatologie, Uni Hannover, | Leitfaden zum meteorologischen Instrumenten-Praktikum (März 2002) |
| (38) Kottmeier, Christoph Institut für Meteorologie und Klimaforschung Universität Karlsruhe | Meteorologische Messmethoden (April 2002) |
| (39) BTU Cottbus | Begleitmaterial zum meteorologischen Instrumentenpraktikum (2009) |
| (40) Meteorologisches Institut Universität München | Meteorologisches Instrumentenpraktikum (2004) |
| (41) C.-G. Oertel | TU Dresden, Fachrichtung Physik (02/2003) |
| (42) Pelster, Rolf, Universität Saarland | Thermospannungen –viel genutzt und fast immer falsch erklärt! (2005) |
| (43) Jäckle, J., Universität Konstanz | Über die Ursache der Thermospannung (1998) |
| (44) DIN 1319 | Begriffe zur Messtechnik |
| (45) VDI | 3786 Blatt 12 |
| (46) Wikipedia 2010 | verschiedene Artikel |

Diverse Firmenunterlagen / Beschreibungen

Wilh.Lambrecht GmbH Friedländer Weg 65–67 D-37085 Göttingen	Combitech AB, Ljungadalsgatan 2 Växjö, SE-351 80, Schweden	DR. ALFRED MÜLLER Meteorologische Instrumente KG, Königs Wusterhausen
G.K.W.Eigenbrodt GmbH & Co. KG Baurat-Wiese-Strasse 68 D-21255 Königsmoor	EdgeTech Moisture & Humidity 19 Brigham Street Unit 8 Marlborough, MA 01752	Kroneis GmbH Messtechnik für Umwelt-Meteorologie Iglaseegasse 30–32 A-1190 Wien
Vaisala Oyj Vanha Nurmijärventie 21 FI-01670 Vantaa, Finnland	Dantec Dynamics A/S Tonsbakken 16–18 P.O. Box 121 DK-2740 Skovlunde	Campbell Scientific Ltd. Fahrenheitstraße 13 D-28359 Bremen
JENOPTIK AG Carl-Zeiss-Strasse 1 D-07739 Jena	Adolf Thies GmbH & Co. KG Hauptstrasse 76 D-37083 Göttingen	Kipp & Zonen Delftechpark 36 2628 XH Delft, The Netherlands Generalvertretung für Deutschland und Schweiz
OTT Hydromet GmbH Ludwigstrasse 16 D-87437 Kempten	Theodor Friedrichs & Co. Meteorologische Geräte und Systeme GmbH, Borgfelde 6 D-22869 Schenefeld	R. Gengenbach Messtechnik Heinrich-Otto-Str. 3 D-73262 Reichenbach/Fils
SIGGELKOW GERÄTEBAU GmbH Eschelsweg 4 D-22767 Hamburg	Rotronic Messgeräte GmbH Einsteinstrasse 17–23 D-76275 Ettlingen	Fluke Corporation 6920 Seaway Boulevard Everett, WA, 98203, USA
Gill Instruments LTD. Saltmarsh Park Lymington Hampshire, UK	METEK Meteorologische Messtechnik GmbH, Firtz-Straßmann-Strasse 4 D-25337 Elmshorn	Thunder Scientific Corporation 623 Wyoming Blvd. SE, Albuquerque, New Mexico 87123-3198, USA
Sommer Mess-Systemtechnik Straßenhäuser 27 A-6842 Koblach, Voralberg	K. Fischer GmbH Venusberger Str. 24 D-09430 Drehbach	

3. ABBILDUNGSVERZEICHNIS

4. Datenerfassung im Rahmen meteorologischer Messtechnik

- Abb. 4.1 Grundstruktur und Grundfunktionen einer Messeinrichtung
Abb. 4.2 Aufbau eines digitalen Messgerätes
Abb. 4.3 Beispiel einer analogen Anzeige
Abb. 4.4 Beispiel einer digitalen Anzeige
Abb. 4.5 COMBILOG Datenlogger 1020 (Friedrichs)
Abb. 4.6 Datenlogger SYNMET-NAV (Lambrecht)
Abb. 4.7 Beispiel eines Flüssigkeitsdruckthermometers

6. Elektrische/Elektronische Grundlagen und Begriffe

- Abb. 6.1 Schematische Darstellung eines Plattenkondensator
Abb. 6.2 Empfindlichkeit einer Silizium-Photodiode, abhängig von der Wellenlänge des einfallenden Lichts

7. Luftdruckmessung

- Abb. 7.1 Zusammenhang zwischen ellipsoidischer Höhe, Normalhöhe und Quasigeoidhöhe (Wikipedia)
Abb. 7.2 Reduktion des Luftdrucks auf NHN
Abb. 7.3 Prinzip der verschiedenen Flüssigkeitsbarometer
Abb. 7.4 Typen von Aneroidosen
Abb. 7.5 Sättigungsdampfdruckkurve
Abb. 7.6 Hypsometer (schematisch)
Abb. 7.7 Stationsbarometer
Abb. 7.8 Nonius am Stationsbarometer
Abb. 7.9 Aneroid Messeinheit
Abb. 7.10 Aneroidbarometer 15ps (Müller, R. Fuess)
Abb. 7.11 Schemazeichnung Barograph
Abb. 7.12 Barograph-Aufzeichnung (Ausschnitt)
Abb. 7.13 Barograph (Foto: Lambrecht)
Abb. 7.14 Barometrischer Höhenmesser
Abb. 7.15 Luftdrucksensor AIR DB 1-A (Air Cooperation, USA)
Abb. 7.16 Luftdrucksensor PTB220A (Vaisala)
Abb. 7.17 PTB220A Innenansicht (Vaisala)
Abb. 7.18 Kapazitiver Drucksensor
Abb. 7.19 Barocap®-Sensor PTB330 (Vaisala), Version mit Display
Abb. 7.20 Mobiles Digitalbarometer DPI 740 (Lambrecht)
Abb. 7.21 Drehkolbenmanometer DHI PG7601 (DH Instruments, Fluke Company)
Abb. 7.22 Hysterese

8. Temperaturmessung

- Abb. 8.1 Prinzip des Bimetalls
Abb. 8.2 Vierleiterschaltung
Abb. 8.3 Widerstandsänderungen im Vergleich
Abb. 8.4 Messprinzip Thermolement
Abb. 8.5 Thermosäule
Abb. 8.6 Aufbau Einschlussthermometer
Abb. 8.7 Flüssigkeitsthermometer im DWD
Abb. 8.8 Psychrometer-Thermometer
Abb. 8.9 Funktionsweise Maximumthermometer
Abb. 8.10 Minimumthermometer
Abb. 8.11 Ablesung am Minimumthermometer
Abb. 8.12 Sensorhalter Lufttemperatur 5 cm (Eigenbrodt)
Abb. 8.13 Stockthermometer mit Halterung
Abb. 8.14 Erdbodentiefenthermometer
Abb. 8.15 Bimetallfühler beim Thermograph
Abb. 8.16 Thermograph (Lambrecht)
Abb. 8.17 Widerstandsthermometer Pt 100 ohne Gehäuse
Abb. 8.18 Widerstandsthermometer Pt 100 (schematisch)
Abb. 8.19 Messelement Pt 100 (Ketterer)
Abb. 8.20 Marinepütz (Friedrichs)
Abb. 8.21 Kapazitiver Sensor (Vaisala)
Abb. 8.22 Oberflächen-Temperatursensor IR-T/C.5 (Sommer)
Abb. 8.23 Temperaturanzeige am Thermometer

9. Feuchtemessung

- Abb. 9.1 Sättigungsdampfdruckkurve
Abb. 9.2 Funktionsweise eines Taupunktspiegels
Abb. 9.3 Lyman-Alpha-Hygrometer (rechts neben Ultraschallanemometer)
Abb. 9.4 Psychrometer Gesamtansicht
Abb. 9.5 Psychrometer Detailansicht
Abb. 9.6 Aspirationspsychrometer n. Assmann
Abb. 9.7 Schleuderspsychrometer PTS 30 (Eigenbrodt)
Abb. 9.8 Psychrometer n. Frankenberger (Friedrichs)
Abb. 9.9 Dauerbefeuchtung aus Vorratsbehälter (Friedrichs)
Abb. 9.10 Psychrometer n. Frankenberger über gefrorenem Boden (Foto: DWD ZAMF, Braunschweig)
Abb. 9.11 Minipsychrometer (Eigenbau DWD)
Abb. 9.12 Haarhygrometer (Fischer)
Abb. 9.13 Polymer (Friedrichs)
Abb. 9.14 Hygrograph, schematisch (Lambrecht)
Abb. 9.15 Hygrograph (Lambrecht)
Abb. 9.16 Thermohygrograph (Lambrecht) (Foto: B. Henning)
Abb. 9.17 Registrierung eines Thermohygrograph (Ausschnitt)
Abb. 9.18 Feuchtesensor HUMICAP® HMP45D ohne Sensorschutzkappe (Vaisala)
Abb. 9.19 Feuchtesensor HUMICAP® HMP45D mit Membranfilter (Vaisala)
Abb. 9.20 Feuchtesensor HUMICAP® HMP155, rechts mit zusätzlicher Pt 100-Sonde (Vaisala)

Abb. 9.21 Darstellung der Genauigkeit des HMP155 (Vaisala)
 Abb. 9.22 Polymer-Feuchtesensor MP101A (Rotronic AG)
 Abb. 9.23 Aufbau Thermo-Hygrometers THYGAN, schematisch (Meteolabor)
 Abb. 9.24 Thermo-Hygrometer VTP 6 (Meteolabor)
 Abb. 9.25 Feuchtegenerator (Thunder Scientific)
 Abb. 9.26 Dew Master (EdgeTech)
 Abb. 9.27 Hygroskopische Hysterese

10. Messung der Wolkenhöhe und Wolkenbedeckung

Abb. 10.1 LIDAR-Funktionsprinzip
 Abb. 10.2 Messprinzip Nachtwolkenscheinwerfer
 Abb. 10.3 Funktionsprinzip LD 40
 Abb. 10.4 Signale des LD40 (Vaisala)
 Abb. 10.5 Laserceilometer LD40 „Tropopausen“ (Vaisala)
 Abb. 10.6 Sende- und Empfangsmodul LD40 (Vaisala)
 Abb. 10.7 Sender des CL31 (Vaisala)
 Abb. 10.8 Laserceilometer CL31 (Foto: Vaisala)
 Abb. 10.9 Beispiel einer Registrierung des CL31 (Foto: Vaisala)
 Abb. 10.10 Laserceilometer CHM 15k (Foto: Jenoptik)
 Abb. 10.11 Laserceilometer CHM 15k, Laseraustritt (Foto: Jenoptik)
 Abb. 10.12 Mehrere Wolkenschichten, konvertiert RGB (Jenoptik)
 Abb. 10.13 Nebel, konvertiert RGB (Jenoptik)
 Abb. 10.14 Regen, konvertiert RGB (Jenoptik)
 Abb. 10.15 Grenzschicht PBL, konvertiert RGB (Jenoptik)
 Abb. 10.16 Cirrusbewölkung, konvertiert RGB (Jenoptik)
 Abb. 10.17 Rückstreuintensität des Ceilometers CHM 15k, April 2010 MOP HP
 Abb. 10.18 LD-WH X 06 auf Messfeld HH-Sasel
 Abb. 10.19 Laser Ceilograph LD-WH M 03 (Marine der BW)
 Abb. 10.20 Ceilolux Nachtwolkenscheinwerfer (Impulsphysik, Vaisala)

11. Niederschlagsmessung

Abb. 11.1 Teile des Niederschlagsmessers n. Hellmann
 Abb. 11.2 Niederschlagsmesser n. Hellmann (Lambrecht)
 Abb. 11.3 Niederschlagsschreiber n. Hellmann (Foto: B. Henning)
 Abb. 11.4 Messfühler Niederschlagsschreiber
 Abb. 11.5 Registrierung eines Niederschlagsschreibers
 Abb. 11.6 Gebirgsniederschlagsmesser
 Abb. 11.7 Totalisator
 Abb. 11.8 Elektrischer Niederschlagsmesser (Tropfer und Kippwaage)
 Abb. 11.9 Wägezelle PLUVIO (OTT MESSTECHNIK)
 Abb. 11.10 Niederschlagsmesser PLUVIO (OTT MESSTECHNIK)
 Abb. 11.11 PLUVIO OTT, abgenommener Schutzzylinder, Auffangbehälter (oben), Querlenkerkonstruktion (Mitte und unten), Elektronikeinheit
 Abb. 11.12 Niederschlagsmengenmesser 1518 H3, offen (Lambrecht)
 Abb. 11.13 Auffangtrichter 1518 H (Lambrecht)
 Abb. 11.14 Nahansicht Wippe 1518 H3 (Lambrecht)

Abb. 11.15 Niederschlagsmengenmesser 1518 H3 (Lambrecht)
 Abb. 11.16 Niederschlagssensor 15188 H (Lambrecht)
 Abb. 11.17 Regenmesser RG13H (Vaisala)
 Abb. 11.18 LNM Funktionsprinzip (Thies)
 Abb. 11.19 LNM Funktionsweise (Thies)
 Abb. 11.20 Laser-Niederschlagsmonitor (Thies)
 Abb. 11.21 Laser-Distrometer Parsivel® (OTT MESSTECHNIK)
 Abb. 11.22 Parsivel® OTT auf der Zugspitze (Foto: H. Löffler)
 Abb. 11.23 Niederschlagswächter (Thies)
 Abb. 11.24 Niederschlagswächter Schemazeichnung (Thies)
 Abb. 11.25 Joss-Waldvogel-Distrometer RD-80 (Distrometer LTD)
 Abb. 11.26 Joss-Waldvogel-Distrometer RD-80, Innenansicht (Distrometer LTD)
 Abb. 11.27 Joss-Waldvogel-Distrometer RD-80, Gesamtansicht
 Abb. 11.28 Niederschlagsmelder (Kroneis)
 Abb. 11.29 Schneepegel
 Abb. 11.30 Erprobung von Kunstrasen
 Abb. 11.31 Gegenstandsfreier Richtungsstrahl (Campbell Scientific Ltd.)
 Abb. 11.32 Ultraschneehöhensensor SR50-G1 (Campbell Scientific Ltd.)
 Abb. 11.33 Ultraschallschneehöhensensor SR50-G1, Nahaufnahme (Campbell Scientific Ltd.)
 Abb. 11.34 Schneehöhensensor SHM30 (Foto: Jenoptik)
 Abb. 11.35 Schneehöhensensor SHM30, schneebedeckt (Jenoptik)
 Abb. 11.36 USH-8 Schneehöhensensor (Sommer)
 Abb. 11.37 Optischer Schneespektrograph, ETH Zürich
 Abb. 11.38 Kontinuierliche Messung der Eisablagerung seit 1991 bis heute
 Abb. 11.39 Vereisungssensor 0871LH1 (Campbell Scientific Ltd.)
 Abb. 11.40 Vereisungssensor 0871LH1, vereist (Campbell Scientific Ltd.)
 Abb. 11.41 Eisablagerungsgerät EAG 200
 Abb. 11.42 Eisablagerungsgerät EAG 200, vereist
 Abb. 11.43 Eismonitor (Combitech)
 Abb. 11.44 Eismonitor, vereist (Combitech)
 Abb. 11.45 Schneesonde WS-43 (Campbell Scientific Ltd.)
 Abb. 11.46 Schneesonde WS-43 Schemazeichnung (Campbell Scientific Ltd.)
 Abb. 11.47 Schneesonde im Transportkasten
 Abb. 11.48 Bohrloch mit tschechischer Schneesonde
 Abb. 11.49 EBZ-Sensoren. „Matte Ost“ im Vordergrund und „Matte West“ im Hintergrund (Sommer)
 Abb. 11.50 Straßen- und Rollbahnsensor DRS511 (Vaisala)
 Abb. 11.51 Lage des Sensors DRS511 (Vaisala)
 Abb. 11.52 Windschutz n. Woelfle (Thies)
 Abb. 11.53 Pluvio mit Windschutz (OTT MESSTECHNIK)
 Abb. 11.54 Canadian Nipher
 Abb. 11.55 Niederschlagsmessgeräte mit Windschutz am ZAMG
 Abb. 11.56 DWD-Gebirgsniederschlagsmesser mit Windschutz
 Abb. 11.57 Deflektor an der WeWa Feldberg (Foto: DWD)
 Abb. 11.58 Nebelfänger n. Grunow

12. Windmessung

- Abb. 12.1 Kartesisches Koordinatensystem mit Himmelsrichtungen und Windkomponenten (u, v, w)
- Abb. 12.2 Polarkoordinatendarstellung mit Richtung und Betrag
- Abb. 12.3 Druck-Koordinatensystem mit Himmelsrichtungen und Windkomponenten
- Abb. 12.4 Komponenten des 3-dimensionalen Windvektors \vec{v}
- Abb. 12.5 Logarithmisches Windprofil
- Abb. 12.6 Windrose
- Abb. 12.7 Wildsche Windfahne
- Abb. 12.8 verschiedene Windfahnen
- Abb. 12.9 Staudruckprinzip
- Abb. 12.10 Messprinzip Ultraschallwindmessung, Schallwandler E, S, Laufzeiten t_1, t_2
- Abb. 12.11 Windgeschwindigkeitsgeber (Thies)
- Abb. 12.12 Prinzip optoelektronische Windgeschwindigkeitsabastung mit Lichtschranke
- Abb. 12.13 Windrichtungsgeber – einfaches Blatt (Thies)
- Abb. 12.14 Prinzip optoelektronische Windrichtungsabastung
- Abb. 12.15 Beispiel einer Windsensorenanlage auf einer Traverse (Thies)
- Abb. 12.16 Windgeschwindigkeitsgeber SK565 (Thies)
- Abb. 12.17 Windrichtungsgeber SK566 (Thies)
- Abb. 12.18 Windanzeige LED (Thies)
- Abb. 12.19 Kombinierte Windsensoren (Lambrecht)
- Abb. 12.20 Kombiniertes Windsensor auf der „Gorch Fock“ (Lambrecht)
- Abb. 12.21 Windschreiber n. Woelfle (Lambrecht)
- Abb. 12.22 Windschreiber n. Woelfle, geöffnet (Lambrecht)
- Abb. 12.23 Handanemometer
- Abb. 12.24 Handanemometer VT 1204 (Foto: B. Henning)
- Abb. 12.25 Propelleranemometer im Einsatz auf der Zugspitze (Young)
- Abb. 12.26 Flügelradanemometer mit Windweganzeige
- Abb. 12.27 Ultrasonic Anemometer 2D (Thies)
- Abb. 12.28 Ultraschallanemometer 3D (Gill Instruments LTD.)
- Abb. 12.29 USA-1 (METEK GmbH)
- Abb. 12.30 Ultrasonic Windcap® WS425 (Vaisala)
- Abb. 12.31 Anordnung der Schallköpfe als gleichseitiges Dreieck (Vaisala)
- Abb. 12.32 Strömungssonde (Lambrecht)

13. Messung der Sichtweite

- Abb. 13.1 Sichtbegriffe
- Abb. 13.2 Messprinzipien von Transmissometern
- Abb. 13.3 Messprinzip von Backscatter-Streulichtmessern (S = Sender, E = Empfänger)
- Abb. 13.4 Messprinzip von integrierenden Streulichtmessern
- Abb. 13.5 Prinzipaufbau von Transmissometern
- Abb. 13.6 Skopograph II „Flamingo“ (Vaisala)
- Abb. 13.7 Transmissometer mit Doppelbasis
- Abb. 13.8 Hintergrundleuchtdichtesensor LM21 (Foto: Vaisala)
- Abb. 13.9 Transmissometer LT31 (Foto: Vaisala)
- Abb. 13.10 LT31 mit V-förmig angeordneten Scheiben (Foto: Vaisala)
- Abb. 13.11 LT31 mit integriertem Vorwärtsstreusensor PWD22 (Foto: Vaisala)
- Abb. 13.12 Funktionsprinzip DF20+ (Degreane Horizon)
- Abb. 13.13 Vorwärtsstreulichtmessgerät DF20+ (Degreane Horizon)
- Abb. 13.14 Sichtweitensensor PWD20 (Foto: Vaisala)
- Abb. 13.15 Sichtweitensensor PWD20 Messprinzip
- Abb. 13.16 Sichtweitensensor PWD10/20 schematisch (Vaisala)
- Abb. 13.17 Sichtweitensensor FS11 (Foto: Vaisala)
- Abb. 13.18 Messprinzip des Videographen (Impulsphysik, Vaisala)
- Abb. 13.19 Videograph (Impulsphysik, Vaisala)

14. Die Messung der Sonnenscheindauer und der Strahlung

- Abb. 14.1 Kosinusetz nach Lambert
- Abb. 14.2 Wellenlängenbereiche elektromagnetischer Strahlung
- Abb. 14.3 Spektrale Verteilung der Sonnenstrahlung
- Abb. 14.4 Pyranometer CM21 mit Schattenring (Kipp & Zonen)
- Abb. 14.5 Sonnenscheinautograph n. Campbell-Stokes (Foto: Lambrecht)
- Abb. 14.6 Registrierstreifen des Sonnenscheinautographen
- Abb. 14.7 Aufzeichnung der Sonnenscheindauer
- Abb. 14.8 Prinzipaufbau SONIe3 (Siggelkow Gerätebau GmbH)
- Abb. 14.9 SONIe3 auf der Zugspitze (Foto: Löffler)
- Abb. 14.10 Grafische Darstellung der Sonnenstrahlung und des Sonnenscheinpegels (Siggelkow Gerätebau GmbH)
- Abb. 14.11 Sensor CSD 3 (Kipp & Zonen)
- Abb. 14.12 Pyranometer CM21 (Kipp & Zonen)
- Abb. 14.13 Pyranometer CM21 schematisch (Kipp & Zonen)
- Abb. 14.14 Pyranometer CM21 (Kipp & Zonen) mit Schattenring CM21 (Kipp & Zonen)
- Abb. 14.15 Pyranometer CM11 (Kipp & Zonen)
- Abb. 14.16 Registrierung eines Pyranometers v. 27.04.2010 am MOL
- Abb. 14.17 Sonnenscheinpyranometer SPN1 (Delta-T Devices)

- Abb. 14.18 Sonnenscheingeber Hänni Solar111B
 Abb. 14.19 UV-Sensor (UVS-AE-T) (Kipp & Zonen)
 Abb. 14.20 Pyrheliometer CHP 1 (Kipp & Zonen)
 Abb. 14.21 PAR-Sensor (Friedrichs)
 Abb. 14.22 CGR3 (Kipp & Zonen)
 Abb. 14.23 Pyrgeometer CGR 4 (Kipp & Zonen)
 Abb. 14.24 Solartracker 2AP (Kipp & Zonen)
 Abb. 14.25 Präzisions-Infrarot-Pyrgeometer (Eppley)
 Abb. 14.26 Netto-Radiometer CNR1 (Kipp&Zonen)
 Abb. 14.27 Netto Radiometer NR LITE (Kipp & Zonen)
 Abb. 14.28 Netto-Radiometer CNR 4 (Kipp & Zonen)
 Abb. 14.29 Netto-Radiometer CNR 4, Unterseite (Kipp & Zonen)
 Abb. 14.30 Strahlungs- und Sonnenscheindauersensor SCAPP (Siggelkow Gerätebau GmbH)
 Abb. 14.31 Aufbau des Messeinsatzes ScaPP (Siggelkow Gerätebau GmbH)
 Abb. 14.32 Nivelliervorrichtung SCAPP (Siggelkow Gerätebau GmbH)
 Abb. 14.33 SPECTRO 320D (Instrument Systems)
 Abb. 14.34 Spektren der UV-Globalstrahlung aus Messungen mit Spektralradiometer SPECTRO 320D
 Abb. 14.35 Strahlungsmessgeräte der Georg-von-Neu-mayer-Station (Foto: AWI)

- Abb. 15.14 FRODIT Gesamtansicht (Foto: DWD, ZAMF Braunschweig)
 Abb. 15.15 FRODIT/Bohrstock, Frosteindringtiefe, Winter 2001/2002 (Foto: DWD, ZAMF Braunschweig)
 Abb. 15.16 Splashmeter (Eigenbau, DWD) im Rebbestand (Foto: DWD, KU3GH Geisenheim)
 Abb. 15.17 Splashmeter auf einer Freifläche (Foto: DWD, KU3GH Geisenheim)
 Abb. 15.18 Farbmarkierung auf Löschpapier
 Abb. 15.19 Splashtröpfchendichte als Funktion der Höhe über Brache im Freiland für verschiedene Niederschlagstypen (Braunschweig 2003)
 Abb. 15.20 Thermographiekamera (FLIR)
 Abb. 15.21 Aufnahme eines unberegneten/beregneten Zuckerrübenbestandes, 9.8.2003 – Versuchsflächen der ZAMF Braunschweig unbearbeiteter (links) und bearbeiteter Boden (rechts), 1.4.2003 – Versuchsflächen der ZAMF Braunschweig
 Abb. 15.22 Streuwaage (Foto: DWD, ZAMF Braunschweig)
 Abb. 15.24 Vergleich des DWD-Streufeuchtemodells mit Feuchtemessungen einer Streuwaage
 Abb. 15.25 Wägbares Unterdrucklysimeter

15. Agrarmeteorologische Messungen

- Abb. 15.1 Menge des vom Pflanzenbestand zurückgehaltenen Niederschlagswassers in Abhängigkeit von der Niederschlagsmenge und dem Blattflächenindex (LAI) (n. von Hoyningen gen. Huene 1980)
 Abb. 15.2 Wägbares Großlysimeter, Ansicht von außen (Foto: DWD, ZAMF Braunschweig)
 Abb. 15.3 Wägbares Großlysimeter, Ansicht im Lysimeterkeller (Foto: DWD, ZAMF Braunschweig)
 Abb. 15.4 Verdunstungswanne (Foto: DWD, ZAMF Braunschweig)
 Abb. 15.5 TDR-SONDE (Fa. IMKO) (Foto: DWD, ZAMF Braunschweig)
 Abb. 15.6 Tensiometer (Foto: DWD, ZAMF Braunschweig)
 Abb. 15.7 Einstich-Tensiometer, Typ T1 (UMS GmbH)
 Abb. 15.8 Minipsychrometer im Einsatz in einem Maisbestand 2007, (Foto: DWD, ZAMF Braunschweig)
 Abb. 15.9 oben: Minipsychrometern (Nahaufnahme)
 unten: Einsatz von Minipsychrometern zur Erfassung der Verhältnisse unter verschiedenen Folientypen (Foto: DWD, ZAMF Braunschweig)
 Abb. 15.10 Blattharfe (Foto: DWD, ZAMF Braunschweig)
 Abb. 15.11 Messung der Blattbenetzung mit der Blattharfe in einem Kartoffelbestand (Foto: DWD, ZAMF Braunschweig)
 Abb. 15.12 Profilmessungen Blattbenetzungssensoren (Hoffmann Messtechnik) mit Minipsychrometern (Foto: DWD, ZAMF Braunschweig)
 Abb. 15.13 USA (METEK GmbH) im Einsatz über einem Maisfeld, 2010 (Foto: DWD, ZAMF Braunschweig)

16. Ersatzmessungen

- Abb. 16.1 Notmessgeräte-Koffer (Foto: B. Henning)

17. Vergleich

–

18. Automatische Messsysteme

- Abb. 18.1 AMDA I/II
 Abb. 18.2 AMDA I/II
 Abb. 18.3 AMDA Server
 Abb. 18.4 Übersicht der Anschlusseinheiten AMDA I/II
 Abb. 18.5 Datenfluss in der meteorologischen Datengewinnung
 Abb. 18.6 Systemübersicht ASDUV-N
 Abb. 18.7 ASDUV-Sensorverteilung
 Abb. 18.8 Anzeigesystem MIDAS IV AWOS (Vaisala)
 Abb. 18.9 Verteilung der Displays auf den Flughäfen (Vaisala)
 Abb. 18.10 MIDAS IV AWOS Graphik (Vaisala)

19. Messnetze

- Abb. 19.1 Aufbau Stationstyp Wst III des DWD
 Abb. 19.2 BMU-Forschungsplattform FINO 1
 Abb. 19.3 UFS Zugspitze (Foto: H. Löffler)
 Abb. 19.4 Standorte der GAW-Alpenstationen
 Abb. 19.5 Standard-Messfeldskizze DWD
 Abb. 19.6 Klimahütte (englische Hütte)

Abb. 19.7	Englische Hütte mit konventioneller Instrumentierung	Abb. 19.26	Vorgaben für eine Niederschlagsmessung der Klasse 1 (aus Note technique n° 35, Classification d'un site, 1999)
Abb. 19.8	Standard-Messfeldskizze (Maßangaben in cm) Klimareferenzstation DWD (aus VuB 3 THB)	Abb. 19.27	Niederschlagsmessung der Klasse 3 (aus Note technique n° 35, Classification d'un site, 1999)
Abb. 19.9	Gießener Wetterhütte (geöffnet)	Abb. 19.28	Wetter-Beobachtungs-Kamera (Foto: DWD)
Abb. 19.10	Wetterschutzhütte LAM630 (Eigenbrodt)	Abb. 19.29	System Wetter-Beobachtungs-Kamera (DWD)
Abb. 19.11	Lamellenschutzhütte LAM630 (Schnittzeichnung)	Abb. 19.30	Standorte der Wetter-Beobachtungs-Kameras (DWD)
Abb. 19.12	LAM630 vereist (Foto: Eigenbrodt)	Abb. 19.31	Mobile Messeinheit des DWD
Abb. 19.13	Kugelhütte n. Baumbach (Friedrichs)	Abb. 19.32	Profilmessfahrten
Abb. 19.14	Wetterhütte Typ 430 (Foto: Kroneis)	Abb. 19.33	Temporäre Stationsmessungen
Abb. 19.15	Erdbodenmessfeld mit 5 cm Temperatursensor (Foto: DWD)	Abb. 19.34	Die festen Stationen des maritimen Messnetzes des DWD
Abb. 19.16	Aufstellung von Niederschlagsmessgeräten	Abb. 19.35	Instrumente des Hafendienstes
Abb. 19.17	Niederschlagsmelder auf Mast (Kroneis)	Abb. 19.36	FS METEOR
Abb. 19.18	Störbereich an einem Hindernis (WMO 1981) n. Foken, 2006	Abb. 19.37	Arbeitsplatz des Bordmeteorologen (links) und des Wetterfunktechnikers (rechts) auf FS METEOR
Abb. 19.19	Hubelement mit Spindel (Foto: DWD)	Abb. 19.38	Lage der Sensoren auf FS METEOR
Abb. 19.20	Klappmast mit Spindel und Aufzug (Foto: DWD)	Abb. 19.39	Visualisierung der erfassten und verarbeiteten Daten, erkennbar die Unterteilung in Anzeigen nach Back- und Steuerbordsensoren.
Abb. 19.21	Meteorologische Ausrüstung eines Regionalflughafens mit einer Piste bis 2400 m Länge (Quelle: DWD)	Abb. 19.40	FS Polarstern
Abb. 19.22	Meteorologische Ausrüstung eines Regionalflughafens mit einer Piste von 2400 m Länge oder mehr (Quelle: DWD)	Abb. 19.41	Bordwetterwarte auf FS Polarstern
Abb. 19.23	SCAPP auf 6m-Mast (Pfleiderer)	Abb. 19.42	2 Abbildungen
Abb. 19.24	Erprobungsmessfeld WeWa Fehmarn, (Foto: DWD), WeWa Wasserkuppe, mit neuer Sensorik für Automatische Stationen (Foto: DWD) 2 Abbildungen		Messstation des bayerischen Lawinenwarnendienstes
Abb. 19.25	Druckgradient und Genauigkeit der Luftdruckmessung 3 Abbildungen		

4. TABELLENVERZEICHNIS

3. Grundsätzliches zu Messmethoden

Tab. 3.1	SI-Basiseinheiten und abgeleitete Einheiten
Tab. 3.2	Weitere abgeleitete Einheiten
Tab. 3.3	Vielfache oder Teile von SI-Einheiten
Tab. 3.4	Physikalische Größen und Konstanten

4. Datenerfassung im Rahmen meteorologischer Messtechnik

Tab. 4.1	Spezifikationen COMBILOG Datenlogger 1020 (Friedrichs)
Tab. 4.2	Spezifikationen Datenlogger SYNMET_NAV (Lambrecht)

7. Luftdruckmessung

Tab. 7.1	Umrechnung von Luftdruckeinheiten
Tab. 7.2	Weitere (veraltete) Maßeinheiten des Luftdrucks
Tab. 7.3	Siedetemperatur des Wasser in Abhängigkeit vom Luftdruck
Tab. 7.4	Spezifikationen Hg-Barometer (Thies)

Tab. 7.5	Spezifikationen Aneroidbarometer 15ps (Müller, R Fuess)
Tab. 7.6	Spezifikationen Barograph (Lambrecht)
Tab. 7.7	Spezifikationen „Großer“ Barograph (Lambrecht)
Tab. 7.8	Spezifikationen Barocap® PTB220A (Vaisala)
Tab. 7.9	Spezifikationen Barocap® PTB330 (Vaisala)
Tab. 7.10	Spezifikationen DPI 740 (Lambrecht)
Tab. 7.11	Spezifikationen Drehkolbenmanometer DHI PG7601 (DH Instruments, Fluke Company)

8. Temperaturmessung

Tab. 8.1	Fixpunkte der Temperaturskalen
Tab. 8.2	Volumenausdehnungskoeffizient verschiedener Stoffe
Tab. 8.3	Einige Zentriwinkel und ihr Einfluss auf den Ausschlag
Tab. 8.4	Differenzielle Thermospannungen gebräuchlicher Metall-Legierungen
Tab. 8.5	Temperaturabhängige Schallgeschwindigkeiten
Tab. 8.6	Spezifische Wärmekapazität einiger Flüssigkeiten bei 20 °C
Tab. 8.7	Vergleich von Quecksilber und Alkohol (Ethanol)

- Tab. 8.8 Oberflächen-Temperatursensor IR-T/C.5 (Sommer)
 Tab. 8.9 Wärmeübergangszahlen in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit

9. Feuchtemessung

- Tab. 9.1 Relative Feuchte in Abhängigkeit von Temperatur und Spread von 5 K
 Tab. 9.2 Sättigungsdampfdruck über Wasser und Eis für verschiedene Temperaturen
 Tab. 9.3 Luftfeuchtegrößen, ihre Messung bzw. Bestimmung
 Tab. 9.4 Feuchttemperatur über Wasser bzw. Eis in Abhängigkeit von t und U
 Tab. 9.5 Vergleich der Werte t_d und U über Wasser und Eis
 Tab. 9.6 Spezifikationen Psychrometer n. Frankenberger (Friedrichs)
 Tab. 9.7 Spezifikationen Feuchtsensor Polymer (Friedrichs)
 Tab. 9.8 Spezifikationen Feuchtsensor HMP 45D (Vaisala)
 Tab. 9.9 Feuchtesensor HUMICAP® HMP155 (Vaisala)
 Tab. 9.10 Feuchte- und Temperaturmesswertgeber HMT337 (Vaisala)
 Tab. 9.11 Spezifikationen Feuchtesensor MP101A (Rotronic AG)
 Tab. 9.12 Spezifikationen Thermo-Hygrometer VTP 6 (Meteolabor)
 Tab. 9.13 Spezifikationen Dew Master (EdgeTech)
 Tab. 9.14 Relativer Fehler bei der Psychrometermessung

10. Wolkenhöhenmessung

- Tab. 10.1 Umrechnung von Längeneinheiten
 Tab. 10.2 Spezifikationen Sender LD40 (Vaisala)
 Tab. 10.3 Spezifikationen Empfänger LD40 (Vaisala)
 Tab. 10.4 Spezifikationen CL31 (Vaisala)
 Tab. 10.5 Spezifikationen CHM 15k (Jenoptik)
 Tab. 10.6 Spezifikationen LD-WH M (Vaisala, Impulsphysik)
 Tab. 10.7 Spezifikationen LD-WH X 06 (Vaisala, Impulsphysik)

11. Niederschlagsmessung

- Tab. 11.1 Niederschlagsintensität (Nomenklatur des DWD, VuB 3 BHB)
 Tab. 11.2 Spezifikationen PLUVIO (OTT MESSTECHNIK)
 Tab. 11.3 Spezifikationen PLUVIO2 (OTT MESSTECHNIK)
 Tab. 11.4 Spezifikationen Niederschlagsmengenmesser 1518 H (Lambrecht)
 Tab. 11.5 Spezifikationen Niederschlagssensor 15188 H (Lambrecht)
 Tab. 11.6 Regenmesser RG13H (Vaisala)
 Tab. 11.7 Größenverteilung und Geschwindigkeiten von Niederschlägen
 Tab. 11.8 Spezifikationen Laser-Niederschlagsmonitor (Thies)
 Tab. 11.9 Spezifikationen Laser-Distrometer Parsivel® (OTT MESSTECHNIK)

- Tab. 11.10 Spezifikationen Niederschlagswächter (Thies)
 Tab. 11.11 Spezifikationen Joss-Waldvogel Distrometers RD80 (DISTROMET LTD)
 Tab. 11.12 Spezifikationen Ultraschallschneehöhensensor SR50-G1 (Campbell Scientific Ltd.)
 Tab. 11.13 Spezifikationen Schneehöhensensor SHM30 (Jenoptik)
 Tab. 11.14 Spezifikationen Schneehöhensensor USH-8 (Sommer)
 Tab. 11.15 Überblick der DWD-Stationen mit Eisablagerungsmessungen
 Tab. 11.16 Spezifikationen Vereisungssensor o871LH1 (Campbell Scientific Ltd.)
 Tab. 11.17 Spezifikationen EAG 200
 Tab. 11.18 Spezifikationen Eismonitor (Combitech)
 Tab. 11.19 Spezifisches Wasseräquivalent einzelner Schneearten
 Tab. 11.20 Spezifikationen DRS511 (Vaisala)

12. Windmessung

- Tab. 12.1 Umrechnung von Maßeinheiten des Windes
 Tab. 12.2 Umrechnung von Gradbogenmarke in Windwerte
 Tab. 12.3 Luftwiderstandsbeiwerte (cw-Werte)
 Tab. 12.4 Spezifikationen Windgeschwindigkeitsgeber (Thies)
 Tab. 12.5 Spezifikationen Windrichtungsgeber (Thies)
 Tab. 12.6 Spezifikationen Windgeschwindigkeitsgeber SK565 (Thies)
 Tab. 12.7 Spezifikationen Windrichtungsgeber SK566 (Thies)
 Tab. 12.8 Spezifikationen Kombinierte Wind-Sensoren Professional Line Serie (14512)
 Tab. 12.9 Spezifikationen Kombiniertes Windsensor 1455 (Lambrecht)
 Tab. 12.10 Spezifikationen Windschreiber n. Woelfle (Lambrecht)
 Tab. 12.11 Spezifikationen des Handanemometers VT 1204 (SIAP)
 Tab. 12.12 Spezifikationen Propelleranemometer 05103 (Young)
 Tab. 12.13 Spezifikationen Ultraschallanemometer 2D (Thies)
 Tab. 12.14 Spezifikationen USA 3D (Gill Instruments LTD.)
 Tab. 12.15 Spezifikationen Ultraschall-Anemometer USA-1 (Metek GmbH)
 Tab. 12.16 Spezifikationen Ultrasonic Windsensor WS425 (Vaisala)
 Tab. 12.17 Vergleich von Messgenauigkeiten der Windsysteme

13. Messung der Sichtweite

- Tab. 13.1 Glühlampenleistung und Abstand vom Beobachter
 Tab. 13.2 Umrechnung Kilometer – Nautische Meilen
 Tab. 13.3 Maximale geometrische Sichtweiten
 Tab. 13.4 Spezifikationen Hintergrundleuchtdichtesensor LM21 (Vaisala)

Tab. 13.5	Spezifikationen LT 31 (Vaisala)
Tab. 13.6	Spezifikationen Degreane DF20+ (Degreane Horizon)
Tab. 13.7	Spezifikationen Sichtweitensensor PWD20/22 (Vaisala)
Tab. 13.8	Spezifikationen Sichtweitensensor FS11 (Vaisala)
Tab. 13.9	Liste der anerkannten Sichtweitensensoren

14. Messung der Sonnenscheindauer und der Strahlung

Tab. 14.1	Übersicht der messbaren Strahlungsarten
Tab. 14.2	Wellenlängen bei Strahlungsmessungen in der Meteorologie
Tab. 14.3	Zusammenstellung von Strahlungsgrößen
Tab. 14.4	Spezifikationen Sonnenscheindauersensor SONle3 (Siggelkow Gerätebau GmbH)
Tab. 14.5	Spezifikationen Sonnenscheindauersensor CSD 3 (Kipp & Zonen)
Tab. 14.6	Übersicht über die Strahlungsmessgeräte und ihre Verwendung
Tab. 14.7	Spezifikationen Pyranometer CM21 (Kipp&Zonen)
Tab. 14.8	Spezifikationen Pyranometer CM11 (Kipp & Zonen)
Tab. 14.9	Spezifikationen SPN1 (Delta-T Devices)
Tab. 14.10	Spezifikationen CA2 Thermosäule
Tab. 14.11	Spezifikationen Pyrheliometer CHP1 (Kipp & Zonen)
Tab. 14.12	Spezifikationen UVA-UVB-Radiometer
Tab. 14.13	Spezifikationen PAR-Sensor (Friedrichs)
Tab. 14.14	Spezifikationen Pyrgeometer CGR3/CGR4 (Kipp&Zonen)
Tab. 14.15	Spezifikationen Pyrgeometer CG4 (Kipp&Zonen)
Tab. 14.16	Spezifikationen PIR (Eppley)
Tab. 14.17	Spezifikationen Netto-Radiometer NR LITE (Kipp & Zonen)
Tab. 14.18	Spezifikationen Netto Radiometer CNR4 (Kipp&Zonen)
Tab. 14.19	Spezifikationen SCAPP (Siggelkow Gerätebau GmbH)
Tab. 14.20	Spezifikationen SPECTRO 320 D (Instrument Systems)

5. ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AMDAR	Aircraft Meteorological Data Relay	CGPM	Conference Generale des Poids et Mesures (Generalkonferenz für Maße und Gewicht)
AMDA	Automatische Meteorologische Datenerfassungsanlage	CPU	Control Processing Unit
AUTOKLIM	Automatische Klimastation	CGS	Centimetre Gram Second-System (Einheitensystem)
ASDUV(E)	Automatisches System zur Datenerfassung und -verbreitung	DFIR	Double Fence Intercomparison Reference (Referenzsystem zur Niederschlagsmessung)
ABWSt	Automatische Bordwetterstation	DIN	Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin
ANS	Automatische Niederschlagsmessstelle	DDP	Deskriptives Daten-Protokoll
ASAP	Automated Shipboard Aerological Programme	DFS	Deutsche Flugsicherung
BSRN	Baseline Surface Radiation Network	DKD	Deutscher Kalibrierdienst

15. Agrarmeteorologische Messungen

Tab. 15.1	In der Agrarmeteorologie verwendete meteorologische Messgeräte/Sensoren
Tab. 15.2	Jahressummen der aktuellen Verdunstung von verschiedenen Böden im Eberswalde

16. Ersatzmessungen

Tab. 16.1	Messgeräte des Notmessgeräte-Koffers
-----------	--------------------------------------

18. Automatische Messsysteme

Tab. 18.1	Eingesetzte Sensorik mit ASDUV
Tab. 18.2	Messsensoren der MIDAS IV AWOS

19. Messnetze

Tab. 19.1	Übersicht der Stationstypen des DWD
Tab. 19.2	Die 4 Windzonen mit der Gebietseinteilung
Tab. 19.3	Genauigkeitsforderungen zur Messung der RVR
Tab. 19.4	Genauigkeitsforderungen zur Messung der Sichtweite
Tab. 19.5	Messgrößen und abgeleitete Größen, Toleranzen, Algorithmen; Basisprüfung der Sensoren und der Messanlage
Tab. 19.6	Kalibrierzyklen der DWD-Sensorik
Tab. 19.7	Übersicht und Download der vorhandenen Messnetzgrafiken des DWD
Tab. 19.8	Sensorübersicht an mobilen Messeinheiten des DWD
Tab. 19.9	Sensorenübersicht an SCAWS
Tab. 19.10	Messwerte auf FS METEOR
Tab. 19.11	Sensorbestückung der Stationen im Messnetz BSH

ESAU	Einheitliches Satzformat für Automaten (Datenformat)	PWK	permanenter Welkepunkt (Agrarmeteorologie)
ETP	potenzielle Verdunstung	PWS	Present Weather Sensor
FAA	Federal Aviation Administration	RMG	Regionale Messnetz Gruppe (DWD)
FTP	File Transfer Protocol	RVR	Runway Visual Range
FS	Feuerschiff	S-AWS	Shipborne Automatic Weather Station
GAW	Global Atmosphere Watch	SCAPP	SCAnning Pyrheliometer / Pyranometer
GAWTEC	GAW Trainings- und Ausbildungszentrum	SCAWS	Scaleable Automatic Weather Station
GCC	Global Collecting Centre	SMN	SwissMetNet
GOS	Global Observing System (WWW/WMO)	SNMP	Simple Network Management Protocol
GPPC	Global Precipitation Climatology Centre	SWE	Schnee-Wasser-Äquivalent
GPS	Global Positioning System	TAWES	Teilautomatische Wetterstation (in Österreich)
GTS	Global Telecommunication System (WWW/WMO)	TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
GUM		UDA	Universeller Datensatz AMDA
GZS	Globales Zentrum für Schiffswettermeldungen (DWD Hamburg)	UELN	United European Levelling Net
Hg	Hydragyrum (Quecksilber)	UFS	Unbemanntes Feuerschiff
IA	Instrumentenamt (frühere Bezeichnung der DWD-Service- und Logistik Einheiten)	VAC	Wechselspannung
ICAO	International Civil Aviation Organisation	VDC	Gleichspannung
IPC	International Pyrheliometer Comparison	VDI	Verein Deutscher Ingenieure
ISA	ICAO Standard Atmosphere	VOS	Voluntary Observing Ships
ISDN	Integrated Services Digital Network	VOR	Vertical Optical Range
ITS	International Temperature Scale	VuB BHB	Vorschriften und Betriebsunterlagen Betriebshandbuch (DWD)
KLIWA	Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft.	VuB THB	Vorschriften und Betriebsunterlagen Technikhandbuch (DWD)
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation	WeBoKaN	Wetterbeobachtungskamera-Netzwerk (DWD)
LAM	Lamellenhütte	WWW	World Weather Watch (WMO)
LT	Leuchttürme	WRR	World Radiometric Reference
MARNET	Marines Umweltmessnetz	WRC	World Radiation Center
MAZ	Mitarbeiterzeitung des DWD	WRMC	World Radiation Monitoring Center
MCH	MeteoSchweiz	WZN	Weltzentrum für Niederschlagsklimatologie (im DWD)
METCO	Meteorologie-Computer	Behörden/Ämter/Dienststellen	
MISAWI	Meteorologisches Informationssystem des AWI	ASZ	Ausbildungs- und Schulungszentrum (des GeoInfoDBw)
MILOS		AWI	Alfred-Wegener-Institut (Bremerhaven)
MME	Mobile Messeinheit (des DWD)	AWEL	Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (Schweiz)
MOZ	Mittlere Ortszeit	BAuA	Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin in Dortmund
MOR	Meteorological Optical Range	BEV	Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (Österreich)
NBCN	National Basic Climatological Network (MeteoSchweiz)	Bfs	Bundesamt für Strahlenschutz
NMS	National Meteorological Service	BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration (USA)	BSh	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (Hamburg)
NKDZ	Nationales Klimadatenzentrum (DWD)	BTZ	Bildungs- und Tagungszentrum (des DWD)
ÖNORM	Österreich-Norm	Bw	Bundeswehr
PAR	Photosynthetically Active Radiation		
PBL	Prandtl Boundary Layer		
PIR	Precision Infrared Pyrgeometer		
PTFE	Polytetrafluorethylen (Handelsname Teflon)		

CAU	Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (mit der Station in Westerland/Sylt)	ÖMG	Österreichische Gesellschaft für Meteorologie
DFS	Deutsche Flugsicherung	PMOD	Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos
DWD	Deutscher Wetterdienst	PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Braunschweig)
ECMWF	European Centre for Medium Range Weather Forecasts	SLS	Service und Logistikstützpunkt (DWD)
EDI	Eidgenössische Departement des Inneren	SL-Einheiten	Zusammenfassung (für diesen Leitfaden) der regionalen Service und Logistik-Einheiten des DWD von
EDUCE	European UV Data Evaluation and Climatology		SLO-Service und Logistik Potsdam mit SSP Leipzig
ETHZ	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich		SLS-Service und Logistik Oberschleißheim mit SSP Stuttgart
EUMETSAT	European Meteorological Satellite Organization		SLW-Service und Logistik Offenbach
EZMW	Europäisches Zentrum für mittelfristige Wettervorhersagen		SLN-Service und Logistik Hamburg-Sasel mit SSP Essen
GeoInfoDBw	Geoinformationsdienst der Bundeswehr		SSP-Service Stützpunkt der Abteilung Service und Logistik
HLUG	Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie	UBA	Umweltbundesamt
ICAO	International Civil Aviation Organization	UFS	Umweltforschungsstation (Zugspitze)
IOW	Institut für Ostseeforschung Warnemünde	WMO	World Meteorological Organization
LBZ	Luftfahrtberatungszentrale (DWD)	WOZ	Wahre Ortszeit
LfU	Landesamt für Umwelt (Bayern)	ZAMF	Zentrum für agrarmeteorologische Forschung (Braunschweig, DWD)
LUBW	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden- Württemberg (http://www2.lubw.baden-wuerttemberg.de)	ZAMG	Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (Wien)
MeteoSchweiz	Bundesanstalt für Meteorologie und Klimatologie		
METAS	Bundesamt für Metrologie und Akkreditierung (Schweiz)		
MOL-RAO	Meteorologisches Observatorium Lindenberg – Richard-Aßmann-Observatorium		
MOHP	Meteorologisches Observatorium Hohenpeißenberg		

6. SICHERHEITSBESTIMMUNGEN UND SCHUTZVORSCHRIFTEN BEIM UMGANG MIT METEOROLOGISCHEN GERÄTEN/SENSOREN

Die nachfolgenden Hinweise zu Sicherheitsbestimmungen und Schutzvorschriften beziehen sich ausschließlich auf den Umgang mit meteorologischen Geräten/Sensoren. Dabei geht es in erster Linie nicht um einen direkten Kontakt mit Stoffen, sondern vielmehr um die Vermeidung des Kontaktes mit sicherheitsrelevanten Stoffen.

Der Umgang mit folgenden Stoffen ist dabei gemeint

- elektrische/elektronische Geräte,
- Laserstrahlung,
- Frostschutzmittel
- Quecksilber,

6.1 Gefahren des elektrischen Stroms für den Menschen

Die Gefährdung des Menschen durch den elektrischen Strom hängt nicht – wie oft angenommen – von der Höhe der elektrischen Spannung (Volt) ab, sondern von der Stromstärke (Ampere) ab. Schon bei geringer Spannung von einigen Volt

kann sich ein Unfall ereignen, wenn große Stromstärken wirksam werden.

Die Stromeinwirkung ist auch von der Stromart – Gleich- oder Wechselstrom (Frequenz des Wechselstromes)– und von dem elektrischen Widerstand (R) des Körpers, gemessen in Ohm abhängig. Der Widerstand ist sehr unterschiedlich, je nach Berührungsfläche, dem Strom durch verschiedene Glieder, der Beschaffenheit der Haut und Kleidung, dem Übergangswiderstand (trockene, feuchte Haut). Im Körper ist die Leitfähigkeit sehr verschieden, bspw. Im Blut, in Gewebeflüssigkeit oder Knochen. Der Widerstand des menschlichen Körpers wird im Mittel mit 1300 Ω angenommen.

Wenn ein Fehlerstrom parallel zu Menschen über einen sehr kleinen Widerstand zur Erde abgeleitet wird, fließt nur ein Teilstrom durch den Menschen. Darauf beruhen eine Reihe von Schutzmaßnahmen. Ist der Mensch der alleinige Ableiter der vollen Stromstärke, dann besteht meist Lebensgefahr.

Vier **physiologische Einwirkungsbereiche** sind nach Untersuchungen von Dr. Koeppen anzunehmen:

Stromstärke (mA) bei		Physiologische Reaktion des Menschen
Gleichstrom	Wechselstrom 50Hz	
bis 80	bis 25	bis 5 mA nur geringe Einwirkung 5 bis 15 mA Loslassen noch möglich, Krampfgefühl 15 bis 25 mA selbstständiges Loslassen des Kontakts nicht mehr möglich
80 bis 300	25 bis 80	25 bis 80 noch ertragbare Stromstärke, Blutdrucksteigerung, Herz-unregelmäßigkeit, Herzstillstände mit Wiedereinsätzen der Herzrhythmus 50 bis 80 Bewusstlosigkeit
300 bis 3 A	80 bis 3 A	Herkammerflimmern, tot, bei kürzerer Einwirkung als 0,3 ms meist noch kein Herzkammerflimmern
> 3 A	> 3 A	Meist Lungenblähung und Bewusstlosigkeit, jedoch mit steigender Stromstärke stärkere Verbrennungen



Physikalische Einwirkungen des elektrischen Stromes

- Wärmeentwicklung, innere und äußere Verbrennungen
- Größere Stromstärken
Zerstörung des Eiweißes und damit kann der Körper giftige Verbrennungsprodukte nicht mehr abbauen; Tod durch Vergiftung nach einigen Tagen

Maßnahmen bei Unfällen mit elektrischen Strom

Sofortiges Abschalten des elektrischen Stromes im Unfallbereich.

6.2 Umgang mit Lasergeräten, Laserklassen

Laser können aufgrund ihrer Strahlungseigenschaften und aufgrund ihrer extrem konzentrierten elektromagnetischen Leistung biologische Schäden verursachen. Daher sind Laser je nach Laser-Klasse mit genormten Warnhinweisen zu versehen. Dabei werden Bereiche der Wellenlängen und Einwirkzeiten unterschieden, die zu charakteristischen Verletzungen und Verletzungs-Schwellwerten der Leistungs- oder Energiedichte führen.

Anwender und Anlagenbauer müssen direkte, indirekte (unbeabsichtigt gerichtet reflektierte) und Streustrahlung (unbeabsichtigt diffus reflektierte) hinsichtlich dieser Grenzwerte berücksichtigen.

Klassifizierung nach EN 60825-1

Entsprechend der Gefährlichkeit für den Menschen sind die LASER in Geräteklassen eingeteilt. Die Klassifizierung nach EN 60825-1 erfolgt vom Hersteller. Die alte Klassifizierung nach DIN VDE 0837 darf für neue Laser nicht mehr verwendet werden.

Klasse	Leistung	Wellenlänge	Beschreibung
1	< 25 µW	400 bis 700 nm	Die zugängliche Laserstrahlung ist ungefährlich. (CD-Player)
1M	< 25 µW	302,5 bis 4000 nm	Die zugängliche Laserstrahlung ist ungefährlich, solange keine optischen Instrumente, wie Lupen oder Ferngläser verwendet werden.
2	≤ 1 mW	400 bis 700 nm	Die zugängliche Laserstrahlung liegt nur im sichtbaren Spektralbereich (400 nm bis 700 nm). Sie ist bei kurzzeitiger Bestrahlungsdauer (bis 0,25 s) auch für das Auge ungefährlich. Eine längere Bestrahlung wird durch den natürlichen Lidschlussreflex verhindert.
2M	≤ 1 mW	400 bis 700 nm	Wie Klasse 2, solange keine optischen Instrumente, wie Lupen oder Ferngläser, verwendet werden.
3R	1 bis 5 mW	302,5 bis 10 ⁶ nm	Die zugängliche Laserstrahlung ist gefährlich für das Auge.
3B	5 bis 500 mW	302,5 bis 10 ⁶ nm	Die zugängliche Laserstrahlung ist gefährlich für das Auge und in besonderen Fällen auch für die Haut. Diffuses Streulicht ist in der Regel ungefährlich. (Laser von CD-/DVD-Brennern; Laserstrahlung allerdings nicht direkt zugänglich)
4	> 500mW	302,5 bis 10 ⁶ nm	Die zugängliche Laserstrahlung ist sehr gefährlich für das Auge und gefährlich für die Haut. Auch diffus gestreute Strahlung kann gefährlich sein. Beim Einsatz dieser Laserstrahlung besteht Brand- oder Explosionsgefahr. (Materialbearbeitung, Forschungslaser)

Erst bei Benutzung eines Lasers der Klasse 3R, 3B oder 4 (nach Unfallverhütungsvorschrift „Laserstrahlung“ BGV B2) muss ein **Laserschutzbeauftragter** schriftlich bestellt werden.

Sicherheit:

Das Ceilometer LD40, CL31 und CHM15k ist ein augensicheres Laserprodukt der Klasse 1M. Klasse 1M bedeutet: Direkter Blick in den Strahl mit optischen Hilfsmitteln kann gefährlich sein. Eine korrekte Installation des LD40 mit senkrechter oder nahezu senkrechter Messrichtung verhindert allerdings ein unabsichtliches Betrachten des Laserstrahls.

Einzuhaltende Vorsichtsmaßnahmen:

- Kein Blick in den Strahl mit vergrößernden optischen Hilfsmitteln
- Kein öffentlicher Zutritt zum Ceilometer

- Vor dem Entfernen des Sendermoduls aus seiner Position in der Optik muss das Gerät vollständig vom Netz getrennt werden
- Prüf- und Instandsetzungsarbeiten nur durch qualifiziertes und eingewiesenes Personal

Arbeiten am Gerät sollten mit äußerster Vorsicht durchgeführt werden.

- Vor der Inbetriebnahme ist die korrekte Spannungseinstellung und elektrische Erdung des Geräts zu überprüfen. Das Gerät darf nicht in einer explosionsgefährdeten Umgebung betrieben werden.
- Den Warnhinweisen aller am Gerät angebrachten sicherheitsrelevanten Aufkleber ist Folge zu leisten (Laserstrahl, Elektrische Spannung):



6.3 Einsatz von Frostschutzmitteln bei Niederschlagsmessgeräten

POWER COOL DC 924-PXL der Fa. Thermochema GmbH, A-4460 Losenstein DWD, Abteilung Messnetze und Daten

Beurteilung der Gefährdung und Belastung bei der Verwendung von DC 924-PXL (Chemischer Name: Monopropylenglykol).

Angaben zur Kontaminierung

Das POWERCOOL Frostschutz-Konzentrat wird in 5 Liter Plastikbehälter angeliefert und aufbewahrt. Sollte das Mittel unbeabsichtigt verschüttet werden sein, besteht Rutschgefahr und es wird empfohlen Granulat auszustreuen.

Kontaminierte Feststoffe sind in geeignete Entsorgungsbehälter zu entsorgen, wässriger Müll ist biologisch abbaubar. Das Öffnen und die Befüllung des PLUVIO-OTT-Auffangbehälters findet je nach Standort in der Regel zweimal pro Jahr jeweils im Freien statt.

Bei der Befüllung des PLUVIO-OTT-Auffangbehälters muss eine Schutzbrille getragen werden, um Augenkontakt zu vermeiden. Falls dennoch ein Augenkontakt vorliegt, ist das Sinnesorgan sofort mit klarem Wasser mindestens 15 Minuten lang auszuspülen. Es ist ein Arzt aufzusuchen, wenn Schmerzen, Blinzeln, Tränen oder Rötung andauern. Die Gefahr des Verschluckens von POWERCOOL ist unwahrscheinlich, falls es dennoch dazu kommt ist ein Arzt aufzusuchen.

Grundsätzlich sollen nach dem Gebrauch des POWERCOOL die Hände mit milder Seife gewaschen werden. Um mögliche Gefahren vorzubeugen, stehen die jeweiligen Leiter der hauptamtlichen Wetterstationen in der Pflicht, die mit der Aufgabe betreuten Mitarbeiter einmal im Jahr auf die in der Betriebsanweisung aufgelisteten Punkte hinzuweisen.

Angaben zur Toxikologie:

Bezeichnung: Kühlmittelkonzentrat EXSC 50

Toxikologische Angaben: LD 50 > 2000 MG/KG/BW. Leicht augenreizend.

Allgemeines: Es sind keine speziellen Gesundheitswarnungen bekannt.

Verschlucken: Toxische Wirkungen sind bei kleinen unabsichtlich verschluckten Mengen nicht zu erwarten.

Dadurch entfallen Lagervorschriften und gesetzlich vorgeschriebene Belehrungen beim Verkauf. Darüber hinaus sind die Produkte für Lebensmittelbetriebe, Solaranlagen und Wärmepumpen, Kühlanlagen und Kompressoren geeignet.

- Frostschutzkonzentrat:
- 10 Jahre Korrosionsschutz gemäß unseren Garantiebestimmungen
- keine krebserregenden oder erbgutschädigenden Inhaltsstoffe
- enthält kein Silikat, Phosphat, Amin, Nitrit, Benzotriazol, Molybdän
- ist gemäß EU-Richtlinie 677/548/ECC nicht als gefährlich eingestuft
- in den öffentlichen Kanal einleitbar

Sicherheitshinweis: Beim Arbeiten mit Frostschutzmittel müssen die Schutzbrille und Sicherheitshandschuhe getragen werden! Kontaktlinsen dürfen nicht verwendet werden. Alle nachfolgend beschriebene Maßnahmen sind im Freien durchzuführen!

- Zu Beginn der Frostperiode ist der Auffangbehälter vollständig zu entleeren.
- Es wird eine Frostschutzlösung im Verhältnis 1 l Frostschutzmittel zu 0,1 l Wasser nach folgendem Prinzip hergestellt: zunächst bis zu 6 cm Füllstand, entsprechend 1 l Frostschutzmittel in den Auffangbehälter geben.
- Danach ist Wasser bis zu einem Gesamtfüllstand von 7 cm nachzufüllen (entsprechend 0,1 l Wasser).
- Frostschutz nur als wässrige Lösung einfüllen! Niemals in unverdünnter Form verwenden!

Die Frostschutzlösung darf in verdünntem Zustand in die öffentliche Kanalisation entsorgt werden. Hierzu ist der Inhalt eines Auffangbehälters mit mindestens 20 l Wasser zu vermischen.

6.4 Umgang mit Quecksilber

Herkömmliche Thermometer und Barometer besitzen als Messflüssigkeit Quecksilber, das normalerweise in eine Kapillare eingeschlossen ist, von dem keine Gefährdung ausgeht. Wenn jedoch die Kapillare zu Bruch geht und Quecksilber auslaufen kann, bildet sich bereits bei Zimmertemperatur Quecksilberdampf, der geruchlos, aber sehr giftig ist.

Die dabei auftretenden Wirkungen, verursacht durch Einatmen, können vielfältig sein. Übelkeit, Magenschmerzen, Kopfschmerzen, Haarausfall und Zahnlockerungen sind mögliche Erscheinungen.

Die maximale Arbeitsplatzkonzentration (MAK) beträgt 0,01 ppm oder 0,1 mg m⁻³.

7. MESSNETZE

7.1 Übersicht über das Mess- und Beobachtungsnetz des DWD am 1.1.2012

Das Hauptamtliche Netz besteht aus:

- 181 hauptamtliche Wetterwarten und Wetterstationen
41 davon 24-stündig mit Personal besetzte Wetterwarten, darunter 16 Flugwetterwarten an internationalen Verkehrsflughäfen
29 davon zeitweise mit Personal besetzte Wetterwarten
111 davon vollautomatische hauptamtliche Wetterstationen incl. fünf maritime Wetterstationen

Einige Wetterwarten und Wetterstationen haben zusätzliche Sonderfunktionen:

- 9 mit aerologische Aufstiege
4 davon vollautomatisch (Autolauncher)
2 davon mit Ozonmessaufstiegen
- 117 Stationen mit Strahlungsmessungen
117 davon mit Globalstrahlung
115 davon diffuse Himmelsstrahlung
9 davon atmosphärische Wärmestrahlung
- 48 Stationen mit Radioaktivitätsmessungen
- 17 Wetterradarstandorte, davon 1 Qualitätssicherungsradar

Daneben unterhält der Geoinformationsdienst der Bundeswehr:

- 35 Bodenwetterstationen, die in einem gemeinsamen Netz integriert sind.

Das nebenamtliche Mess- und Beobachtungsnetz des DWD mit ehrenamtlichen Beobachtern besteht aus:

- 1795 ehrenamtlich betreuten Wetterstationen, davon melden 842 Stationen online

Der DWD betreibt außerdem ein Phänologisches Beobachtungsnetz, bestehend aus:

- 1293 phänologischen Beobachtungsstellen
1288 davon phänologische Basismeldestellen
396 davon Sofortmeldestellen
38 davon Rebenmeldestellen

Mit diesen Netzen verfügt der DWD einschließlich der 35 Stationen des Geoinformationsdienstes der Bundeswehr auf dem Land unter anderem über insgesamt:

- 514 Stationen mit Temperatur- und Feuchtemessung
- 214 Stationen mit Messung des Luftdruckes
- 1909 Stationen mit Niederschlagsmessung
- 295 Stationen mit Windmessung (68 davon sind in das Sturmwarnnetz integriert)
- 303 Stationen mit Messung der Sonnenscheindauer (An weit über 500 Stationen werden mindestens 2 Parameter gemessen.)

Das Maritime Messnetz umfasst ergänzende maritim-meteorologische Stationen:

- 2 Bordwetterwarten (Forschungsschiffe Polarstern und Meteor mit DWD-Personal)
- 17 automatische Bordwetterstationen auf Handels- und Behördenschiffen
- 844 Wettermeldestellen auf Handelsschiffen

Die o.a. Übersicht entspricht dem derzeitigen Messnetz des DWD. Die Planung des zukünftigen Messnetzes beinhaltet erhebliche Veränderungen bei den Wetterwarten/Wetterstationen hin zu mehr automatischen Stationen ohne Personal.

Standortkarte

Die Karte (nicht maßstabsgetreu) zeigt das hauptamtliche Wetterstationsnetz und die Niederlassungen des DWD. Hinzu kommen rund 2000 nebenamtliche Stationen in ganz Deutschland. Damit verfügt der DWD über eines der größten und dichtesten Messnetze weltweit.



7.2 Stationsnetz im Rahmen von KLIWA in den Bundesländern Bayern und Baden-Württemberg



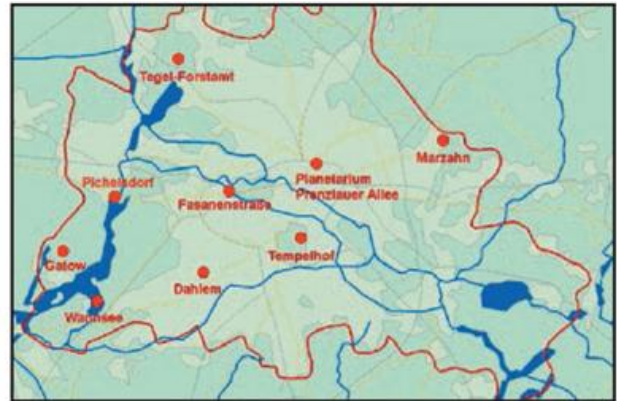
Quelle: DWD Jahresbericht 2008

7.3 Solares UV-Monitoring in Deutschland

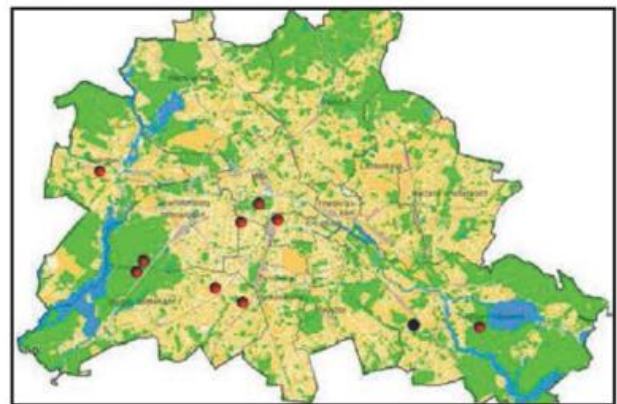


- München: Bundesamt für Strahlenschutz (BfS)
- Zingst/Langen/Schauinsland: Umweltbundesamt (UBA)
- Lindenberg: Deutscher Wetterdienst (DWD)
- Westerland Sylt: Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (CAU)
- Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA)
- Kulmbach: Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)
- Rinteln/Norderney: Staatliches Gewerbeaufsichtsamt Hildesheim (GAA-Hi)

7.5 Stadtmessnetz Berlin und Messnetz der TU Berlin, Fachgebiet Klimatologie

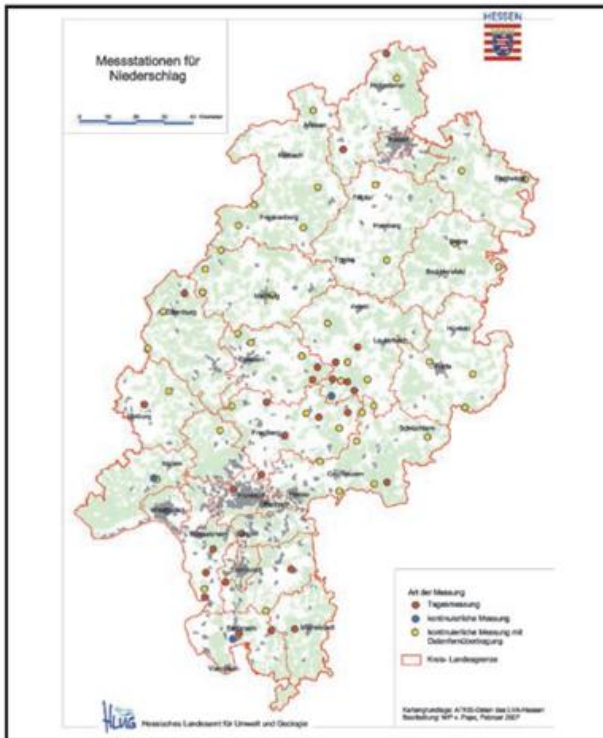


Messnetz der TU Berlin, Fachgebiet Klimatologie

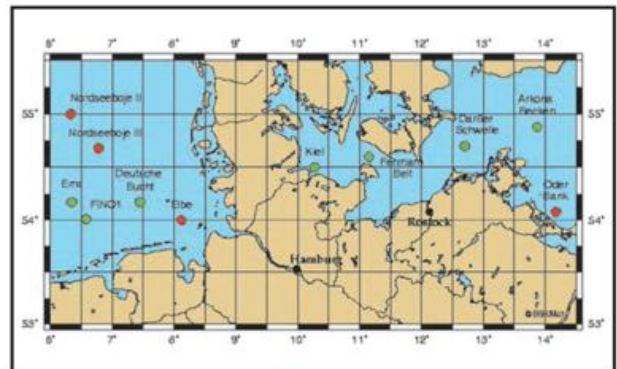


Messnetz Stadt Berlin

7.4 Hessisches Niederschlagsmessnetz des HULG

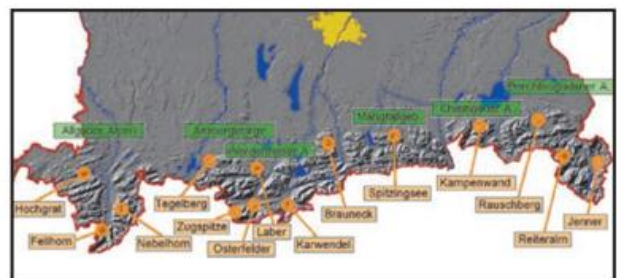


7.6 Messnetz des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie – BSH

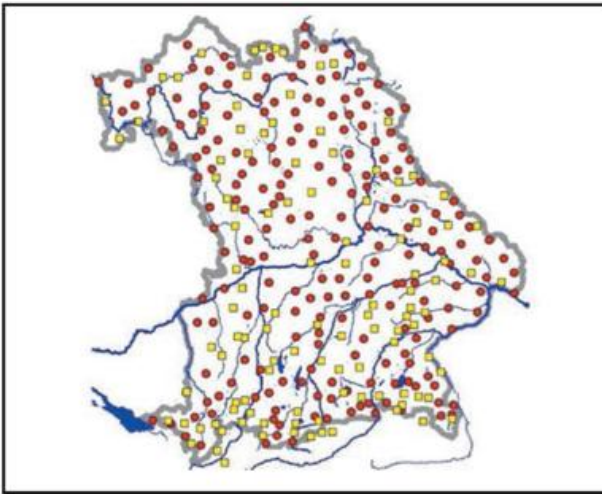


● Messnetzstation in Betrieb ● Messnetzstation außer Betrieb

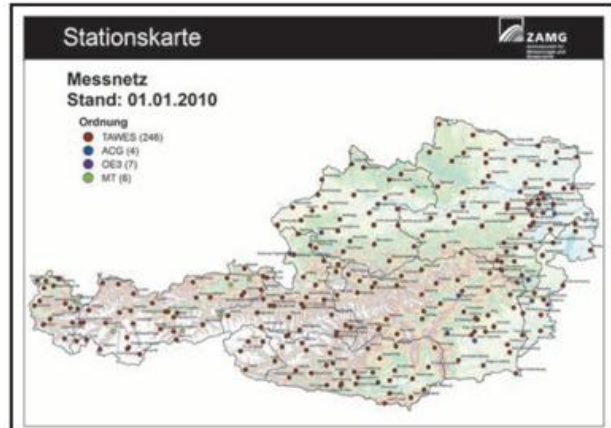
7.7 Messnetz Lawinenwarnzentrale Bayern



7.8 Neues automatisches Niederschlagsmessnetz (DWD und Bayerische Wasserwirtschaft)



7.10 TAWES-Messnetz des Österreichischen Wetterdienstes



7.9 Messnetz des Schweizer Wetterdienstes – MeteoSchweiz



TAWES – Teilautomatisches-Wetter-Erfassungssystem

8. DANKSAGUNG

Nach mehr als einem Jahr ist der vorliegende Leitfaden fertig gestellt. Eine Unterlage für die Ausbildung als Schwerpunkt war immer in meinem Blickfeld. Nachdem der alte Leitfaden von 1973 kaum noch Anknüpfungspunkte bot, musste ich mich nach anderen Unterlagen umsehen. Dabei konnte ich auf das WIKI-System Messtechnik des DWD zurückgreifen, in dem ich wertvolle Gerätebeschreibungen und Abbildungen fand. Für diese Möglichkeit bedanke ich mich ganz herzlich. Darüber hinaus erhielt ich von fast allen Firmen, die meteorologische Messgeräte in ihrer Produktpalette anbieten, sehr schnell und unbürokratisch Unterstützung in Form von Gerätebeschreibungen/Abbildungen und sonstigen Unterlagen.

Daneben möchte ich aber aus dem Bereich des DWD die Damen und Herren und aus dem GeoInfoDBw viele (ehemalige) Kolleginnen/Kollegen erwähnen, die mich in unterschiedlichster Weise bei der Erstellung des neuen Leitfadens unterstützten. Ohne festgelegte Rangfolge und Wertigkeit der Unterstützung möchte ich sie namentlich nennen und mich noch mal recht herzlich bedanken, und zwar bei

Frau Dr. Frühauf, DWD, die mir den fast kompletten Text zum Kapitel 15. Agrarmeteorologie lieferte und mir damit die Arbeit abnahm, mich in die Materie intensiver einarbeiten zu müssen. **Frau Walendie**, DWD und **Andrea Mitscherling**, Augsburg, die mir einige Skizzen anfertigten.

Herr Zankl, DWD, der mir während der gesamten Zeit als Ansprechpartner zur Verfügung stand, mich dabei immer wieder unterstützte, auch als Lektor wertvolle Ratschläge gab und in seinem Auftrag **Herr Freese** eine Version Korrektur las.

Herr Dr. Lanzinger, DWD, dem ich etliche technische Details verdanke und der im Rahmen der Korrekturlese noch viele wertvolle Hinweise und Ergänzungen gab. Ich danke ebenso **Herrn Enskat**, DWD, der mir einen ganzen Nachmittag zur Verfügung stand, ebenso **Herrn Pech** vom SL-Süd für die zugesandten Unterlagen. **Herr Doerschel**, DWD, der mir den Beitrag zu den Drehkolbenmanometern lieferte. **Herr Buchwald**, DWD, der mir die ersten Hinweise und Unterlagen zur Agrarmeteorologie übermittelte. **Bernd Henning**, DWD, der mir seine Unterrichtsunterlagen zur Messtechnik zur Verfügung stellte und die letzte Version des Leitfadens Korrektur las. **Klaus Hager**, ehemals GeoInfoDBw, der meine ersten Entwürfe kritisch durchlas und mir Unterlagen aus seinem Archiv zur Verfügung stellte. **Markus Zygmuntowski**, ASZ GeoInfoDBw, der das fast fertige Werk begutachtete und mir Ratschläge zu wesentlichen Punkten gab. **Herr Schädel**, der mir die erforderlichen Informationen und Unterlagen zur Marine der BW zukommen lies.

Mein Dank gilt auch Frau P. Kaufmann der Fa. pksatz, Kronberg, die das Layout erstellte und dabei mit viel Geduld und hilfreichen Hinweisen viele Abbildungen erneut in den Text einarbeitete.

Abschließend möchte ich auch meiner Frau Ingeborg danken, die immer sehr geduldig gewartet hat, bis ich mich vom PC loslösen konnte um dann der Familie zur Verfügung zu stehen.