



Berichte des Deutschen Wetterdienstes

208

Komponenten automatischer meteorologischer Meßsysteme

von
Werner Höhne



Zitationsvorschlag:

Höhne, Werner: Komponenten automatischer meteorologischer Meßsysteme. - Offenbach am Main: Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, 2000.
(Berichte des Deutschen Wetterdienstes ; 208)

ISSN der Onlineausgabe: 2194-5969

ISSN der Druckausgabe: 0072-4130

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.

Herausgeber und Verlag: :

Deutscher Wetterdienst
Frankfurter Straße 135
D- 63067 Offenbach am Main

Internet: www.dwd.de

Mail: bibliothek@dwd.de

Deutscher Wetterdienst



Berichte des Deutschen Wetterdienstes

208

**Komponenten automatischer
meteorologischer Meßsysteme**

von
Werner Höhne

Zur Herstellung dieses Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

ISSN 0072-4130
ISBN 3-88148-357-8

Alle Rechte vorbehalten. Nachdruck, auch auszugsweise, verboten. Kein Teil dieses Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Deutschen Wetterdienstes in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm, oder ein anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden. Für den Inhalt ist der Autor verantwortlich.

Herausgeber und Verlag:

Deutscher Wetterdienst
Frankfurter Str. 135
63067 Offenbach am Main

Anschrift des Autors:

Dr. habil. Werner Höhne
Stillerzeile 5
12587 Berlin

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Zusammenfassung/Summary	5
1 Einleitung	7
2 Geber für automatische Stationen	7
2.1 Allgemeine Anforderungen an die Geber	8
2.2 Die wichtigsten Geber für häufig zu erfassende meteorologische Größen	9
2.2.1 Temperaturgeber	10
2.2.2 Feuchtegeber	12
2.2.3 Druckgeber	14
2.2.4 Windgeber	18
2.2.5 Niederschlagsgeber	20
2.2.5.1 Niederschlagsmessung	21
2.2.5.2 Bestimmung der Niederschlagsart	24
2.2.5.3 Bestimmung der Schneehöhe	26
2.2.6 Geber für Gewitteraktivitäten	27
2.2.7 Geber für Sonnenschein und Strahlung	29
2.2.7.1 Sonnenscheingeber	30
2.2.7.2 Strahlungsgeber	30
2.2.8 Geber für Wolkenhöhe	32
2.2.9 Sichtgeber	35
2.2.10 Geber für Wettererscheinungen und Erdbodenzustand	38
2.3 Die wichtigsten Geber für gasförmige Immissionen (Leitkomponenten)	39
2.3.1 Elektrochemische Verfahren	41
2.3.2 Konduktometrie	43
2.3.3 Photometrie und Kolorimetrie	44
2.3.4 Chemilumineszenz-Verfahren	48
2.3.5 Ionisationstrom-Gasanalyse	49
2.3.6 Chromatographie	50
2.4 Die wichtigsten Geber für Massenkonzentrationen von Partikeln in Luft	53
2.5 Entwicklung moderner Geber	55
2.5.1 Unifizierte Geber	56
2.5.2 Intelligente Geber	57
2.5.3 Geber mit neuen Sensoren	59
3 Schnittstellen und Netze	61
3.1 Geberinterfaces	63
3.1.1 Interfaces für Digital- und Binärsignale	64
3.1.2 Interfaces für frequenzanalogue Signale und Impulsfolgen	66
3.1.3 Interfaces für amplitudenanalogue Signale	67
3.1.4 Interfaces für auszugebende Signale	70
3.2 Interfaces für Bedien- und Speicherperipherie	70

4	Nutzerinterfaces	71
4.1	Ein- und Ausgabegeräte	71
4.2	Leitungsgebundene Übertragungssysteme	73
4.3	Drahtlose Übertragungssysteme	76
5	Datenspeicherung	81
5.1	Datenspeicherung an der Station	81
5.2	Datenverwaltung und -archivierung an Zentralstellen	83
6	Zeitabhängige Funktionseinheiten	84
6.1	Echtzeituhren	84
6.2	Programmsteuerungen	87
7	Meßdatenerfassung	88
8	Meßwertaufbereitung und -vorverarbeitung an automatischen Stationen	89
8.1	Datenaufbereitungen	90
8.2	Datenverdichtungen und -reduktionen	93
8.3	Datenvorverarbeitungen	95
8.4	Datenformatierungen	97
9	Energieversorgung automatischer Meßsysteme	98
9.1	Netzstromversorgung	98
9.2	Batteriestromversorgung	100
9.3	Andere Energiequellen	101
10	Gehäuseformen automatischer Stationen	102
	Literaturverzeichnis	105

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit gibt einen Überblick über Komponenten, die für automatische meteorologische Meßsysteme moderner Bauart gebraucht werden. Dabei werden sowohl Hardware als auch Softwarerealisierungen berücksichtigt. Die Vor- und Nachteile unterschiedlicher Lösungen werden diskutiert. Auf sich abzeichnende Entwicklungstrends wird hingewiesen. Im einzelnen werden folgende Komponenten angesprochen:

Geber für die wichtigsten meteorologischen Größen (Temperatur, Luftfeuchte, Druck, Wind, Niederschlag, Gewitteraktivitäten, Sonnenschein, Strahlung, Wolkenhöhe, Sichtweite sowie Wettererscheinungen und Erdbodenzustand), die Leitkomponenten der Spurengase (SO_2 , NO , NO_2 , O_3 , C_mH_n und CO_2) und das atmosphärische Aerosol liefern die Meßsignale. Derzeit an Immissionsmeßstationen verwendete Analysenmeßverfahren werden beschrieben. Als Trends der Geberentwicklung werden Vereinheitlichung der Ausgangssignale, Einbeziehung von Rechentechnik in die Geber, Schaffung integrierter Geberschaltungen und Nutzung neuer Sensorprinzipien hervorgehoben.

Schnittstellen und Netze sind für die Kopplung verschiedener Systemkomponenten von Bedeutung. Eingegangen wird sowohl auf Interfaceschaltungen für Ein- und Ausgabeeinheiten mit unterschiedlichen Signalformen sowie Anschlußsteuerungen für Geräte der Bedien- und Speicherperipherie.

Als periphere Einheiten des Nutzerinterfaces automatischer meteorologischer Meßsysteme werden Ein- und Ausgabegeräte (Tastaturen, Bildschirmgeräte, Drucker und Plotter), leitungsgebundene Übertragungssysteme unter Nutzung von Telefon- und Fernschreibverbindungen sowie Datennetzen und drahtlose Übertragungssysteme mit Richtfunkverbindungen und Satelliten als Relaisstationen einschließlich ihrer Eigenschaften besprochen.

Summary

The paper presented takes a survey of components needed for automatic meteorological measuring systems of modern style. In this context hardware as well as software solutions are considered. Advantages and drawbacks of different solutions are discussed. Significant trends are referred to. In detail the following components are addressed:

Sensors for the most important meteorological quantities (temperature, humidity, pressure, wind, precipitation, thunderstorm activities, sunshine, radiation, cloud height, visibility, and also present weather and state of ground), analysers for important trace gases (SO_2 , NO , NO_2 , O_3 , C_mH_n and CO_2) and for atmospheric aerosol produce the measuring signals. Analytical measuring techniques used at present in air quality stations are described. To following trends in the development of sensors are called special attention: standardizing of output signals, application of computer-aided sensors, design of integrated sensor circuits, and usage of new sensor principles.

Interfaces and networks are significant for the connection of different system components. Input and output interface units for different signals as well as interfaces for operator manipulations and memories are treated.

Reviewed are the features of *peripheral units of the user interface* of automatic meteorological measuring systems like keyboards, display units, printers, and plotters, line communication systems using telephone, telegraphy, and data networks and wireless

Fragen der Datenspeicherung sowohl an automatischen Stationen als auch an zentralen Sammel- und Auswertestellen und *zeitabhängigen Funktionseinheiten* wie Echtzeituhren und Programmsteuerungen werden diskutiert.

Weitere Ausführungen beziehen sich auf Funktionen, die heute bevorzugt mit Hilfe der Software realisiert werden. Hierzu zählen neben der Meßwerterfassung die Meßwertvorverarbeitung an den Stationen. Bei der *rechnergestützten Meßwerterfassung* bieten sich neben dem Pollingverfahren, die unterbrechungsgesteuerte Meßdatenabfrage und der direkte Speicherzugriff an. Zur *Vorverarbeitung* gehören rechnergestützte Prozesse wie Datenaufbereitung, Datenverdichtung und -reduktion, Verknüpfungen, Transformationen und Formatierungen von Dateien und Meldungen.

Fragen der Energieversorgung haben für automatische Meßsysteme eine besondere Bedeutung. In dicht besiedelten Gebieten wird das Energienetz bevorzugt, wobei Batterien in Verbindung mit Wechselrichtergeräten für eine Stromversorgung bei Netzausfall herangezogen werden können. In entlegenen Gebieten kommen hauptsächlich Akkumulatoren zum Einsatz. Möglichkeiten zur Gewinnung elektrischer Energie am Einsatzort zur Batterieaufladung werden besprochen.

Abschließend wird auf *Gehäuseformen* eingegangen, die teils für den Stationskern, teils für die im Freien aufzustellenden Geber und für sonstige Hilfseinrichtungen gebraucht werden. Ihre konstruktive Gestaltung hängt stark von den Umgebungsbedingungen und den evtl. erforderlichen Bedienvorgängen ab.

communication systems like radio relay and satellite transmission systems.

Problems of *data storage* both at automatic stations and at collecting and processing centres are discussed. The realization of time dependent sub-assemblies like real-time clocks and programme control units is shown.

Further outlines refer to functions, today realized preferentially by means of software. To this functions belongs besides of *data acquisition* the *data pre-processing* at the stations. Computer-based data acquisition may be executed by the polling method, the interrupt-controlled data input, and the direct memory access. The pre-processing comprehends computer-aided processes like data preparation, data compression and reduction, data linkage, transformations, and formatting of files and messages.

Problems of *power supply* are of eminent significance for automatic measuring systems. In dense populated areas the mains power supply is preferred. Batteries may be used here in conjunction with inverters only in cases of mains circuit cutting out. In remote areas accumulators are chiefly used. Possibilities for generating electrical energy at this sites for battery charging are discussed.

Finally the *shape of boxes* are treated, needed partly for the station kernel, for the sensors installed in open field, and for other ancillary equipment. Their construction is mainly determined by environmental conditions and eventually necessary attendances.

1 Einleitung

Jeder Meßvorgang kann als eine Kette von Signalumsetzungen betrachtet werden (vgl. Van Den ENDEN & MULLER [1995]). Dies gilt auch für automatische Meßsysteme, die in Form automatischer Stationen sowie komplexer Meß- und Fernmeßsysteme in den letzten Jahrzehnten auch in die meteorologische Meßtechnik verbreitet Eingang gefunden haben. Hauptglieder dieser Kette sind gemäß Abb. 1:

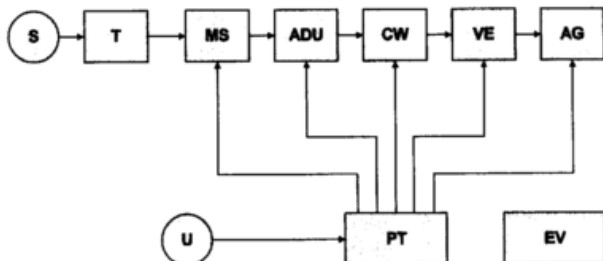


Abb. 1: Hauptglieder der Kette der Signalwandlungen in automatisierten Meßsystemen

S: Sensor	VE: Verarbeitungseinheit(en)
T: Transmitter	AG: Ausgabegerät
MS: Meßschaltung	PT: Programmsteuerung
ADU: Analog-Digital-Umsetzer	EV: Energieversorgung
CW: Codewandler	U: Uhr

- Sensoren S, die die primären Meßsignale liefern und Bestandteile von Gebern sind
- Transmitter T, die aus dem primären Meßsignal ein für die Übertragung oder Digitalisierung geeignetes Signal erzeugen und zu diesem Zweck Verstärker und/oder Signalumformer enthalten
- Meßschaltungen MS, die bei mehreren zu erfassenden Meßsignalen jeweils eine Meßstelle auswählen und – wie beispielsweise Brückenschaltungen oder Frequenzmesser – ein Signal erzeugen, das als sekundäre Meßgröße angesehen und digitalisiert werden kann
- Analog-Digital-Umsetzer ADU, die den Meßwert durch ein digitales Signal darstellen
- Codewandler CW zur Wandlung des Codes in eine für die Ausgabe, Weiterverarbeitung oder Speicherung geeignete Form (was auch eine Parallel-Serien-Wandlung einschließen kann)
- Verarbeitungseinheit VE, welche die erforderlichen Verarbeitungsvorgänge (z.B. Umrechnungen, Verknüpfungen, Datenverdichtungen bzw. -reduktionen, Verschlüsselungen) durchführt
- Ausgabegeräte AG, die die Ergebnisse anzeigen, ausdrucken, speichern oder fernübertragen.

Das zeitgerechte Zusammenwirken der verschiedenen Glieder der Meßkette muß bei automatisierten Meßsystemen durch ein Programmteil PS gesteuert werden, das seinerseits durch eine Uhr U mit Taktsignalen versorgt wird. Die für den Betrieb des Systems erforderlichen Versorgungsspannungen werden durch eine weitere Einheit, die Energieversorgung EV, bereitgestellt, wobei die Energie sowohl aus dem Netz, als auch aus Batterien entnommen werden kann.

Bei einem rechnergeführten Meßsystem können die Aufgaben bestimmter aufeinanderfolgender Hauptglieder dieser Kette, wie Codewandler und Verarbeitungseinheiten, durch den Computer

übernommen werden. Den Hauptgliedern entsprechen in diesem Falle keine selbständigen Schaltungen sondern Programmbausteine.

Bei allen automatischen meteorologischen Stationen lassen sich unabhängig von der Generation *charakteristische Komponenten* unterscheiden, in denen die aufgezählten Funktionen der Meßkette ausgeführt oder gesteuert werden. Dies sind die Funktionsgruppen

- * Geber
- * Meßschaltungen
- * Codiereinheit
- * Sende- bzw. Speichereinheit
- * Programmsteuerung mit Uhr
- * Energieversorgung.

Hier sind in einigen Funktionsgruppen mehrere Hauptglieder der Meßkette enthalten. So umfaßt die Funktionsgruppe Meßschaltungen auch die Transmitter und die Funktionsgruppe Codiereinheit sowohl Analog-Digital-Umsetzer als auch Codewandler. Besondere Bedingungen ergeben sich bei den hier zu betrachtenden automatischen Stationen insofern, als bestimmte Komponenten – wie insbesondere die Geber, manchmal auch die Meßschaltungen sowie die Codiereinheit – in ihren Gehäusen zwangsläufig dem Wetter ausgesetzt werden müssen. Im folgenden wird auf die Funktionsgruppen automatischer Stationen speziell eingegangen, wobei der Schwerpunkt auf rechnergeführte Systeme gelegt wird, wie sie sich im letzten Jahrzehnt durchgesetzt haben.

2 Geber für automatische Stationen

Als Geber werden die Funktionsgruppen automatischer Stationen bezeichnet, in denen die primären Meßsignale durch Meßfühler (Sensoren) gebildet werden. In den Sensoren finden die Umformungen bzw. Umsetzungen statt, die geeignet sind, am Ausgang ein elektrisches Signal bereitzustellen, das sich über die erforderliche Strecke zum Ort der Meßwerterfassung möglichst unverfälscht übertragen läßt, ein direktes Maß der zu messenden meteorologischen Größe ist und von anderen (den sog. Einflußgrößen) möglichst wenig beeinflusst werden soll. Wie Van Den ENDEN & MULLER [1985] gezeigt haben, sind hierfür häufig mehrere nacheinander ablaufende Umformungen notwendig. Die Begriffe Geber und Sensor sind jedoch nicht identisch. Geber enthalten außer den Sensoren im engeren Sinne

- Konstruktionselemente zum Schutz der Sensoren gegen Witterungseinflüsse, wie sie durch Niederschläge, Wind, Staub, Strahlung verursacht werden, und gegen andere störende Einwirkungen
- Hilfseinrichtungen, die entweder den Kontakt zwischen dem Sensor und dem Meßmedium trotz der Schutzfunktionen zu gewährleisten haben oder wie Heizungen und Belüftungen für eine ordnungsgemäße Funktion des Gebers, die Ausschaltung von Einflußgrößen sowie für eine störungsfreie Übertragbarkeit des Abbildungssignals erforderlich sind.

Häufig wird im Geber das Sensorausgangssignal mittels eines Meßwandlers in ein anderes, für eine Übertragung zum Erfassungssystem besser geeignetes Signal umgeformt. In diesem Falle ist auch der dazu verwendete Transmitter zum Geber zu zählen.

Wie vom Verfasser bereits 1986 hervorgehoben, können Geber in Form von

- * *aktiven oder passiven Meßfühlern* (wie z.B. Thermosäulen, Widerstandsthermometer oder Kontaktanemometer) in Verbindung mit einem geeigneten Schutzgehäuse
- * *Meßschaltungen* mit Meßwandlern, die einen oder mehrere Meßfühler enthalten und mit Hilfe von speziellen Schaltungen und eines Signalwandlers (z.B. eines Spannungs-Frequenz-Wandlers) ein für die Übertragung günstigeres unifiziertes Abbildungssignal bilden
- * *komplexen Meßeinrichtungen*, die für die Bestimmung mancher Meßgrößen (wie Sicht, Wolkenhöhe und vor allem der Spurengaskonzentrationen) erforderlich sind, die sich nicht mit einem Meßfühler in ein geeignetes Meßsignal überführen lassen

realisiert werden.

2.1 Allgemeine Anforderungen an die Geber

Die wichtigsten Anforderungen, die an Geber für automatische Wetterstationen zu stellen sind, wurden im Kapitel 22 des "Guide to Meteorological Instruments and Observing Practices" der WMO sowie in der "Guidance Specification for a General Purpose Automatic Weather Station" [1997] zusammengefaßt. In der letztgenannten Publikation wird auch auf den notwendigen Schutz gegen Blitze und Störspannungen und den Schutz gegen Witterung, Vandalismus sowie Fauna und Flora am Aufstellungs-ort hingewiesen. LUDBROOK [1974] hob Genauigkeit, Robustheit, minimale Leistungsaufnahme, Langzeitstabilität und die Verfügbarkeit eines leicht digitalisierbaren Ausgangssignals als die wichtigsten Eigenschaften von Gebern für automatische Stationen hervor. SIMIDCHIEV [1980] unterschied funktionelle Gebereigenschaften und Eigenschaften, welche die Kopplung der Geber mit automatischen Meßsystemen betreffen. Zu den ersteren wollte er (in der Reihenfolge ihrer Bedeutung) gerechnet wissen: Genauigkeit, Stabilität der Eichkurve, spezifische Empfindlichkeit für die Meßgröße und Lebensdauer. Bei den Koppel-eigenschaften hielt er für bedeutungsvoll: Linearität der Eichkurve, Austauschbarkeit der Geber, geringen Wartungsaufwand und geringe Leistungsaufnahme. Daneben wurden die Sen-sorkosten als wesentlich angesehen.

Für viele Anwendungen automatischer Stationen ist aber die Funktionssicherheit wichtiger als die Meßgenauigkeit, solange der Meßfehler bestimmte Grenzwerte nicht überschreitet. Andere Eigenschaften, wie die Linearität der Eichkurve und die Unempfindlichkeit gegenüber Einflußgrößen, spielen heute bei rechnergeführten Systemen eine untergeordnete Rolle, da sie sich leicht rechnerisch korrigieren lassen. Eine hohe Leistungsaufnahme ist bei einigen Gebern weniger durch den Meßvorgang als durch Hilfsprozesse bedingt, die bei bestimmten Umgebungsbedingungen notwendig werden. Hierzu gehört z.B. die Geberheizung unter winterlichen Bedingungen. Ein Verzicht auf diese Maßnahmen ist zwar möglich, kann aber dann zu einem Ausfall unter bestimmten Witterungsbedingungen führen.

Als Gebereigenschaften, die für automatische Stationen auch heute noch wichtig sind, können die folgenden angesehen werden:

- *Funktionsfähigkeit* unter allen Umweltbedingungen am Einsatzort

- *geringer Wartungsaufwand* bzw. wartungsfreier Betrieb über vorgegebene Zeiträume
- *Langzeitstabilität der Eichkurve*
- *Austauschbarkeit* der Geber möglichst ohne Abgleicharbeiten an der Station oder Änderungen im Programm bzw. in Parameterlisten
- *Meßgenauigkeit*, d.h. Meßfehler unter vorgegebenen Grenzwerten
- *Störungsfreie Übertragbarkeit des Ausgangssignals* des Gebers.

Geber, die dem gegenwärtigen Stand der Technik entsprechen, sollen über Möglichkeiten zur Bereitstellung von *Statussignalen* verfügen. Mit diesen werden sowohl unterschiedliche Betriebszustände als auch das Auftreten von Störungen signalisiert. Statussignale lassen sich zur Erkennung und Lokalisierung auftretender Störungen in Baugruppen der Geber nutzen und können damit bei der Fehlerdiagnostik wertvolle Unterstützung leisten. Für entlegene Stationen kommt es darüber hinaus auf eine möglichst geringe Leistungsaufnahme der Geber an. Der von SIMIDCHIEV [1980] angegebene Prioritätsindex, der nach dem damaligen Stand der Häufigkeit bei Sensoranwendungen bestimmt wurde, ist vom Stand der Technik abhängig. Seine Zuordnung der gebräuchlichen meteorologischen Geber zu den Indexwerten muß daher heute teilweise als überholt angesehen werden.

Auch für Geber gilt uneingeschränkt die Forderung nach einer hohen Betriebssicherheit. Da bei meteorologischen Messungen die meisten im Freien aufgestellt werden müssen, wo zumindest die Gehäuseteile voll der Witterung ausgesetzt sind, verlangt dies eine entsprechende Robustheit in Bezug auf Mechanik und Elektrik. Bereits CUNNINGHAM [1979] hat auf die wachsende Bedeutung von Geberentwicklungen für automatische Stationen hingewiesen, nachdem sich der Aufwand für die Entwicklung der Systeme zur Meßwerterfassung und -verarbeitung durch die industrielle Bereitstellung hochintegrierter Schaltungen sowie kostengünstiger Mikrorechner mit Betriebssoftware deutlich vermindert hat.

Mechanische Robustheit läßt sich durch einen Verzicht auf bestimmte Konstruktionselemente erzielen. Obwohl sich Schalenanemometer und Windfahnen außer in arktischen Gebieten und in Gebirgen durchaus bewährt haben, sollten wegen des ständigen Verschleißes mechanisch bewegte Teile vermieden werden. Auf jeden Fall unterlassen sollte man den Einsatz von Sensoren mit bewegten Teilen, die nur sehr kleine Stellkräfte aufbringen können.

Ebenso wichtig ist die *elektrische Robustheit*. Hierunter versteht man die Unempfindlichkeit gegenüber elektrischen und elektronischen Einflüssen, wie sie durch luftelektrische Erscheinungen (starke elektrostatische Felder, Blitzentladungen, starke erdmagnetische Variationen) aber auch technisch bedingte Phänomene (Ströme im Erdboden, Wechselfelder mit kapazitiver bzw. induktiver Kopplung zur Meßeinrichtung, elektromagnetische Felder unterschiedlicher Frequenz in der Atmosphäre) verursacht werden können. Durch zweckmäßige Erdung, Abschirmung von empfindlichen Schaltungsteilen und Zuleitungen gegen elektrische und magnetische Felder, eine zweckmäßige Leitungsverlegung, Einsatz von Blitzableitern in Verbindung mit Schutzschaltungen gegen Überspannungen gelingt es weitgehend, eine Beschädigung von exponierten Gebern oder anderen Teilen des Meßsystems durch Überspannungen sowie länger anhaltende Störungen der Meßsignale zu verhindern.

Eine wichtige Eigenschaft für automatische Stationen ist die *Langzeitkonstanz* der Geber, da Nacheichungen der Gebercharakteristiken zwar möglich und notwendig sind, aber oft nur in längeren Zeitabständen erfolgen können. Meßprinzipien, die nicht ohne tägliche Wartung auskommen, eignen sich höchstens für Geber an teilautomatischen Stationen.

Automatische Meßeinrichtungen, bei denen die Meßsignale zwischen Meßort und dem Ort der Meßwerterfassung größere Entfernungen zu überbrücken haben, sollten mit Gebern ausgerüstet werden, die *Ausgangssignale* liefern, welche sich ungestört über die erforderlichen Entfernungen übertragen lassen. Ungeeignet sind hier Kleinspannungen im Mikrovolt- oder Millivoltbereich. Günstiger als Spannungen sind eingeprägte Ströme; sie erfordern lediglich eine Doppelleitung mit hinreichendem Isolationswiderstand. Hinsichtlich der Übertragungssicherheit am günstigsten sind frequenzanaloge Signale, Impulsfolgen oder serialisierte Digitalsignale. Parallel anstehende Digitalsignale bringen hingegen einen hohen Aufwand mit sich, da jedes Bit eine Leitung erfordert, falls nicht im Frequenzmultiplexbetrieb gearbeitet wird, der aber im Geber einen relativ hohen Schaltungsaufwand bedingt. Aus Kostengründen ist ferner eine Vereinheitlichung der Geberausgangssignale anzustreben. Zu bevorzugen sind Geber, die am Ausgang eine der folgenden *Signalformen* bereitstellen:

- amplitudenanaloge Signale in Form von Gleichspannungen im Voltbereich oder eingepägten Gleichströmen
- frequenzanaloge Signale und Impulssignale (Impulsfolgen)
- serialisierte digitale Signale.

Die Beschränkung auf nur eine Signalform ist wiederholt vorgeschlagen worden (vgl. LUDBROCK [1974] und AANDERAA [1985]); doch hat sich dieser Weg unter Berücksichtigung der Gesamtheit der Anforderungen bisher nicht strikt verwirklichen lassen. Es überwiegt nach wie vor trotz mancher Nachteile die Nutzung von Gebern mit amplitudenanalogen Eingangssignalen. Der Grund ist wohl vor allem in dem Umstand zu sehen, daß in der Vergangenheit mit Rücksicht auf einen bequemen Anschluß an Registriergeräte Sensoren mit solchen Ausgangssignalen bevorzugt wurden.

Eine besondere Stellung nehmen bei den Ausgangssignalen der Geber die impulsförmigen Signale ein, die sich ohne Gefahr einer Verfälschung vom Aufstellungsort des Gebers zum Stationskern übertragen und ohne hohen Aufwand in einen Digitalwert umsetzen lassen. RINGENBACH [1970] wies darauf hin, daß bei der amerikanischen automatischen Station vom Typ AMOS III-70 nur Geber zur Anwendung kamen, die entweder Impulssignale mit Pulsdauer oder Impulszahl als Informationsparameter oder binäre Signale (bei ja/nein-Entscheidungen) lieferten.

Insbesondere bei klimatologischen Anwendungen ist man auf homogene Meßreihen angewiesen. Das erfordert, daß die *Meßfehler und Einflußgrößen* der Geber bekannt sind; nur dann ist eine Vergleichbarkeit der Meßergebnisse automatischer Stationen mit denen konventioneller Verfahren gewährleistet. Die Eigenschaften der Geber können nicht allein durch Eichungen ermittelt werden, da hierbei die unter Aufstellungsbedingungen wirksamen Einflußgrößen weitgehend unterdrückt werden. Zusätzlich sind *Gerätevergleiche* unter den üblichen Einsatzbedingungen der Geber erforderlich, bei denen mehrere Geber für die gleiche meteorologische Größe benachbart aufgestellt und den gleichen meteorologischen Bedingungen ausgesetzt werden. Solche Vergleiche sind in den letzten Jahrzehnten mit den unter-

schiedlichsten Gebern sowohl national als auch international durchgeführt worden.

In ihrer Anleitung für automatische Wetterstationen hat die australische "Observation and Engineering Branch" Spezifikationen für die wichtigsten meteorologischen AWS-Geber zusammengestellt. Es muß jedoch darauf hingewiesen werden, daß Forderungen zu den Meßbereichen von den klimatischen Bedingungen am Einsatzort abhängen, während Parameter wie die Meßunsicherheit oder die Einstellzeit hauptsächlich von den Aufgaben bestimmt werden, deren Lösung mit den vorliegenden Meßsystemen angestrebt wird.

In den folgenden Abschnitten wird auf die wichtigsten Geber für die Erfassung häufig erfaßter meteorologischer Größen und der Konzentrationen von Spurenstoffen in der Atmosphäre unter dem Gesichtspunkt einer Automatisierung dieser Messungen eingegangen. Das Ziel kann hier nicht in einem umfassenden Überblick über die prinzipiell einsetzbaren Meßprinzipien bestehen. Diskutiert werden vielmehr Meßprinzipien und Geberkonstruktionen, die für automatische Stationen besonders geeignet erscheinen.

2.2 Die wichtigsten Geber für häufig zu erfassende meteorologische Größen

Die Geberbestückung automatischer meteorologischer Stationen weist in Abhängigkeit vom jeweiligen Verwendungszweck und den Umweltbedingungen am Einsatzort große Unterschiede sowohl hinsichtlich der zu erfassenden Größen als auch hinsichtlich der einzusetzenden Geber auf. Es ist daher praktisch nicht möglich, von einer Standardbestückung auszugehen. Die Behandlung aller in Verbindung mit automatischen Meßsystemen zum Einsatz gekommenen Geber würde den Rahmen dieses Aufsatzes sprengen. Im folgenden soll daher auf die Prinzipien der wichtigsten an synoptischen und klimatologischen Stationen zum Einsatz kommenden Geber eingegangen werden, die dem heutigen Stand der Technik entsprechen und für die Erfassung der fast überall gemessenen Größen

- * Luft-, Boden- und Wassertemperaturen
- * Luftfeuchte
- * Luftdruck und -tendenz
- * Wind
- * Niederschlag
- * Sonnenschein

gebraucht werden. Daneben existieren noch einige weitere meteorologische Größen, die teils für die Synoptik, teils für die Klimatologie von besonderer Bedeutung sind, aber nur mit Gebern erfaßt werden können, die nicht nur komplexer sondern auch teurer sind und darüber hinaus mehr Wartung erfordern. Deshalb werden sie in automatischen Netzen nicht an allen Stationen eingesetzt. Zu dieser Gruppe gehören z.B. Geber für

- * Wolkenhöhe
- * Sichtweite
- * Blitzzahl
- * Globalstrahlung.

Die Praxis zeigt immer wieder, daß Geber trotz aller Schutzmaßnahmen infolge unvermeidlicher Witterungseinflüsse und

von außen einwirkender elektromagnetischer Störungen in der Regel das schwächste Glied in der Kette der Informationsgewinnung und -verarbeitung sind. Als die beiden Hauptprobleme führte TREUSSART [1984] an:

- die beschränkte Fähigkeit von Gebern, bisher subjektiv durch Beobachtung gewonnene Informationen zu ersetzen und
- das Verhalten traditioneller Geber in Verbindung mit automatischen Wetterstationen.

Im Vergleich zu den Anlagen der Meßwerterfassung muß das Tempo bei der Entwicklungen meteorologischer Geber in den letzten Jahrzehnten nach MAGNUSSON [1980] als weniger beeindruckend bezeichnet werden. Die dabei erreichten Fortschritte halten sich im allgemeinen in Grenzen. Einer zweckmäßige Auswahl bei industriell hergestellten Gebern bzw. eine Entwicklung unter Berücksichtigung der spezifischen Anforderungen automatischer Systeme kommt daher eine erhöhte Bedeutung zu. Nicht immer besteht jedoch Übereinstimmung hinsichtlich der Bewertung verschiedener Gebereigenschaften.

Automatische Stationen für speziellere Anwendungen erfordern weitere oder andere Geber. So sind etwa für agrarmeteorologischen Stationen Meßfühler für die Benetzungszeit von Interesse, die in Verbindung mit anderen meteorologischen Informationen wichtige Hinweise für das Auftreten bestimmter Pflanzenkrankheiten geben kann. Für technische Zwecke spielt dagegen in der kalten Jahreszeit die Menge von Nebelfrostablagerungen eine wichtige Rolle, die zu Schäden an Überlandleitungen und technischen Bauwerken im Freien führen können. Die Hydrologie braucht Wasserstandsangaben, die sich sowohl auf offene Gewässer wie Flüsse und Seen, als auch auf das Grundwasser beziehen müssen. Auf diese speziellen Sensoren soll hier nicht im einzelnen eingegangen werden. Aus den Hinweisen zu den zu behandelnden meteorologischen Gebern lassen sich jedoch Richtlinien für die Konstruktion und Schaltung von Spezialgebern ableiten.

Von den genannten meteorologischen Gebern können nur die für den Luftdruck im Gebäude aufgestellt werden; alle übrigen müssen im Freien der Witterung ausgesetzt werden. Um die in ihnen enthaltenen Sensoren vor witterungsbedingtem Verschleiß zu schützen und den Einfluß von Störgrößen zu minimieren, sind – je nach Geberart – zwei Wege gangbar:

- die Unterbringung der Geber in einer englischen Hütte oder
- der Einbau der Sensoren in ein spezielles Gebergehäuse.

In beiden Fällen wird der Luftaustausch mit der Umgebung nur wenig behindert; aber die Geber sind gegenüber direkter Sonnenbestrahlung, Niederschlag und starkem Wind geschützt. Die Unterbringung von Temperatur- und Feuchtegebern in einer englischen Hütte hat bei automatischen Klimastationen den Vorteil, daß die Aufstellung weitgehend der an konventionellen benannten Stationen entspricht, was den Forderungen nach einer guten Vergleichbarkeit sowie der Homogenität der Meßreihen entgegenkommt, obwohl die letztere nicht allein von der Geberaufstellung sondern auch von den speziellen Bedingungen der Meßwerterfassung und -verdichtung abhängt. Spezielle Gebergehäuse ermöglichen in Verbindung mit zusätzlichen Maßnahmen, die Wirkungen der Einflußgrößen gegenüber denen in den üblichen Hüttenkonstruktionen deutlich zu verringern. Die Meßergebnisse sind dann aber nicht mehr mit denen unmittelbar vergleichbar, die in Hütten gewonnen werden. Da die Art des

Strahlungsschutzes die Häufigkeitsverteilungen meteorologischer Meßwerte mitbestimmt, sind Meßfühler und Gehäuse als Gebereinheit zu betrachten.

Da meteorologische Geber vorwiegend in Freien auf einem Meßfeld aufgestellt werden, muß der zu ihrem Betrieb erforderliche Strom über Leitungen herangeführt werden. Die Geber sollten so ausgelegt sein, daß sie mit Kleinspannungen betrieben werden können. Nur so läßt sich eine Gefährdung des Personals bei notwendigen Arbeiten an geöffneten Gebern sicher ausschließen. Eine Vereinheitlichung der zur Stromversorgung der Geber erforderlichen Spannungen kann darüber hinaus zu einer Vereinfachung der Verkabelung des Meßfelds beitragen.

Meteorologische Geber sprechen im allgemeinen nicht nur auf die gewünschte Größe an, sondern besitzen Einflußgrößen, auf die sie in mehr oder weniger starkem Maße reagieren. Die durch diese Einflußgrößen bedingten Meßfehler können bei automatisch arbeitenden Meßsystemen leicht übersehen werden. Mit Hilfe von Laboruntersuchungen der Geber lassen sich diese Fehler im allgemeinen nicht ermitteln. Bereits bei der Entwicklung der Geber sind daher sowohl theoretische Untersuchungen als auch experimentelle Vergleiche von im Freien aufgestellten Geräten notwendig, um zumindest die Größenordnung der Fehler durch Einflußgrößen abzuschätzen und erforderlichenfalls weitere Maßnahmen zu ihrer Verminderung einzuleiten. HOLMES [1975] hat über Ergebnisse solcher Untersuchungen an Luftdruck- und Lufttemperaturgebern für den Einsatz auf Meßbojen berichtet, bei denen z.T. unerwartete Effekte auftraten.

Freilandversuche sind nach Einschätzung von STEWART et al. [1975] das geeignete Mittel zur Selektion der zweckmäßig einzusetzenden Geber bzw. zur Überprüfung von Entwicklungsmustern. Um solche Arbeiten rationell durchführen zu können, werden flexibel anpaßbare Datenlogger zur Erfassung der oft umfangreichen Meßreihen sowie Rechner für deren Auswertung entsprechend der vorgegebenen Aufgabenstellung gebraucht. Die genannten Autoren demonstrieren dies am Beispiel des Vergleichs verschiedener Wolkenhöhenmesser und Feuchtefühler sowie der Auswahl des günstigsten Strahlungsschirmes aus einer Reihe verfügbarer Einrichtungen.

2.2.1 Temperaturgeber

Als Meßfühler für Temperatur werden bei automatischen Meßsystemen am häufigsten *Widerstandsthermometer* eingesetzt.

Halbleiterwiderstände besitzen zwar im Vergleich zu denen aus Metallen einen deutlich höheren Temperaturkoeffizienten, lassen sich jedoch nicht mit einer innerhalb enger Toleranzen übereinstimmenden Charakteristik herstellen, so daß sie in Meßschaltungen nicht einfach austauschbar sind. Weitere Nachteile sind die stärkere Krümmung der Widerstands-Temperatur-Abhängigkeit und manchmal auch noch eine Alterung im Laufe der Einsatzzeit.

Metall-Widerstandsthermometer werden als Drahtwicklungen oder dünne Metallschichten hergestellt. Der Temperaturkoeffizient dünner Metallschichten kann sich selbst bei Verwendung des gleichen reinen Metalls von dem der Metalldrahtwiderstände unterscheiden. Für technische Anwendungen werden heute genormte Widerstandsthermometer hergestellt, bei denen bestimmte Metalle wie Nickel und vor allem *Platin* bevorzugt werden. Die dünnen Drähte werden bifilar und spannungsfrei auf einen Trägerstab aus Glas oder Keramik aufgewickelt und durch

einen dünnen Glasurüberzug fixiert und geschützt. Meist werden diese Meßeinsätze auf einen Bezugswert von 100,0 Ω bei 0°C abgeglichen, wobei die Toleranz des Bezugswertes nur wenige Hundertstel Ohm beträgt. Für meteorologische Belange, bei denen der Meßbereich 100 K kaum überschreitet, kann die Widerstands-Temperatur-Charakteristik mit hinreichender Genauigkeit durch einen Ansatz der Form

$$R(T) = R_0 (1 + \alpha \cdot T + \beta \cdot T^2) \quad (1)$$

wiedergegeben werden, in den die Temperatur T in Celsiusgraden einzusetzen, R_0 auf den Nennwert von 100,00 Ω abgeglichen ist und die beiden Koeffizienten α und β die Nennwerte

$$\alpha = 3,9155 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\beta = -6,55 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$$

besitzen. Mit $-\beta/\alpha = 1,67 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$ ist die Abweichung von einem linearen Zusammenhang relativ gering, sollte aber auch bei meteorologischen Temperaturmessungen beachtet werden, wenn Zehntelgrade interessieren. Die beiden Koeffizienten sind von der Reinheit, Vorbehandlung und Schichtdicke des verwendeten Metalls abhängig. Bei Drähten, die aus Material der gleichen Schmelze gezogen wurden, kann man von übereinstimmenden Werten α und β ausgehen. Abweichungen des Bezugswertes $R(0^\circ)$ vom Nennwert R_0 bewirken nicht allein eine Verschiebung, sondern auch eine Änderung der Steigung der Charakteristik. Der durch Unsicherheiten beim Abgleich der Meßelemente bedingte Fehler ist somit temperaturabhängig. Solange jedoch

$$\Delta R_0 = R(0^\circ) - R_0 \quad (2)$$

genügend klein gehalten werden kann, gilt für die Abweichung gegenüber der Beziehung (1)

$$\Delta R(T) \approx \Delta R_0 [1 + \alpha T] \quad (3)$$

Daraus bestimmt sich der Temperaturmeßfehler ΔT zu

$$\Delta T \approx \frac{\Delta R}{\alpha \cdot R_0} \quad (4)$$

Mit $\Delta R_0 = 0,04 \text{ } \Omega$ ergibt sich bei $T = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ ein Fehler von ca. 0,10 $^\circ\text{C}$; bei $T = 50 \text{ } ^\circ\text{C}$ erhöht sich die Abweichung $\Delta R(50^\circ)$ auf 0,48 Ω , was einem Fehler von $\Delta T \approx 0,12 \text{ } ^\circ\text{C}$ entspricht. Solange die Toleranz des Nennwertes hinreichend gering bleibt, kann demnach von einem nahezu gleichbleibenden Fehler im Meßbereich ausgegangen werden. Die Einhaltung vorgegebener Toleranzen sollte nach ULLNER [1978] vor ihrem Einsatz geprüft werden. Platin-Widerstandsthermometer wurden an automatischen Stationen am häufigsten als Temperaturfühler verwendet und haben sich dabei bewährt (vgl. ANTONIK & GEITHNER [1971] sowie ANGERMANN [1978]).

Wenn zwischen dem Meßort und dem Ort der Meßwerterfassung größere Entfernungen zu überbrücken sind, sollten nach Möglichkeit Platin-Widerstandsthermometer mit einem höheren Nennwert von z.B. 500 bzw. 1000 Ω gewählt werden. So benutzte USOL'CEV [1970a] für alle Temperaturmessungen Widerstandsthermometer mit einem Bezugswert von 500 Ω . Der Belastungsstrom muß so gering gewählt werden, daß selbst unter ungünstigsten Verhältnissen die durch JOULEsche Wärme bedingte Erwärmung des Meßfühlers unter dem zu gewährleistenden Meßfehler bleibt. Der maximal zulässige Strom hängt von den Abmessungen des Sensors, vom Wärmeübergang am Tem-

peraturfühler und damit auch von dessen Einbau ab. Erfahrungsgemäß kann bei üblichen Einbauformen davon ausgegangen werden, daß bei einem Belastungsstrom $\leq 1 \text{ mA}$ der Fehler infolge von Eigenerwärmung sicher unter 0,1 K gehalten werden kann. Dieser Fehler läßt sich in ruhender Luft nahezu konstanter Temperatur durch abwechselndes Messen des Ohmwertes des Meßfühlers bei zwei verschiedenen Belastungsströmen leicht ermitteln.

Bei größeren Entfernungen zwischen Meßort und Ort der Meßwerterfassung kann der Leitungswiderstand gegenüber dem des Widerstandsthermometers nicht mehr vernachlässigt werden. Durch Wahl einer Drei- oder Vierleiterschaltung besteht die Möglichkeit, vom Zuleitungswiderstand unabhängig zu werden.

Für Spezialzwecke sind in automatisch arbeitenden Systemen auch temperaturabhängige Halbleiterwiderstände, sog. Thermistore, erfolgreich zum Einsatz gekommen. Ihre Eichkonstanz hängt vom Fertigungsverfahren, dem Sensoreinbau sowie den Umweltbedingungen ab. In automatischen Stationen für den Routinebetrieb, bei denen an die Meßgenauigkeit höhere Anforderungen gestellt werden müssen, werden Thermistore kaum noch genutzt.

Thermoelemente werden an automatischen Stationen wegen ihrer geringeren Empfindlichkeit vermieden. Es sind daher nur wenige Anwendungsfälle, wie dem von VAN ASSELT et al. [1989] beschriebenen, bekannt geworden, bei denen Thermoelemente z.B. als schnell ansprechende Temperaturfühler in automatischen Systemen benutzt worden sind. Dagegen werden *Thermosäulen* für *Temperaturdifferenzmessungen* zwischen benachbarten Orten häufiger eingesetzt. Sie bilden die Sensoren für eine Reihe sogenannter thermischer Meßverfahren anderer Meßgrößen.

Quarzthermometer nutzen die Temperaturabhängigkeit der Frequenz von Schwingquarzen bei bestimmten Schnitten des Quarzkristalls relativ zu dessen Kristallachsen. Da der Temperatureinfluß auf die Schwingfrequenz nur gering ist, wird meist mit zwei Quarzoszillatoren gearbeitet, die bei einer Bezugstemperatur außerhalb des Meßbereiches die gleiche Schwingfrequenz aufweisen und von denen der eine Quarzkristall einen möglichst hohen und der zweite einen sehr geringen Temperaturkoeffizient besitzt. Beide Ausgangssignale werden gemischt und damit die Differenzfrequenz als eigentliches frequenzanaloges Meßsignal gewonnen, das sich leicht digitalisieren läßt. Über die Entwicklung von Quarzthermometern für automatische Wetterstationen hat LUDBROOK [1974] berichtet. Er setzte dabei Kristalle mit LC-Schnitt als temperaturempfindliche und mit AT-Schnitt als Referenzquarze ein.

Seit etwa 2 Jahrzehnten sind *elektronische Temperaturfühler* in Form integrierter Schaltungen auf dem Markt. Den eigentlichen Meßeffect bildet dabei meist die Temperaturabhängigkeit an einem pn-Übergang in Durchlaßrichtung bei konstantem Strom, der bereits zuvor in Form des *Diodenthermometers* vielfach genutzt worden ist. BARRY & BURCH [1980] verwendeten in ihrer digitalen Temperaturmeßeinrichtung noch Si-Dioden als Temperaturfühler. Integrierte Schaltungen vom Typ AD 590, wie sie u.a. von NANTOU & SUZUKI [1981] eingesetzt wurden, liefern am Ausgang einen eingepprägten Strom, der sich mit der Temperatur nahezu linear um 1 $\mu\text{A/K}$ ändert. Der eingepprägte Strom stellt an die Übergangswiderstände von Meßstellenschaltern keine extremen Anforderungen. Da der Belastungswiderstand ohne Beeinflussung der Charakteristik bis zu 20 000 Ω

gewählt werden kann, sind mit diesem Temperatursensor Spannungsänderungen von 2 mV/K und mehr erreichbar. Die am Belastungswiderstand abgegriffene Spannung kann ohne vorherige Verstärkung direkt einem Analog-Digital-Wandler zugeführt werden. Damit lassen sich Temperaturmeßsysteme aus wenigen Bauelementen aufbauen. Der eigentliche temperaturempfindliche Bereich konzentriert sich innerhalb der integrierten Schaltung auf die nahezu punktförmigen pn-Übergänge, die sich beim Stromdurchgang erwärmen. Hinzu kommt, daß das Chipgehäuse oft einen nicht zu vernachlässigenden Wärmewiderstand darstellt. Mit einem Fehler durch Eigenerwärmung ist gerade bei diesem Temperaturfühler zu rechnen. Über die Langzeitkonstanz der Eichkurven liegen nur unzureichende Erfahrungen vor. Bei vielen Anwendungen bereitet der Einbau der Sensoren Probleme, da das Chipgehäuse nicht immer die günstigste Form aufweist. Trotzdem sind diese Temperatursensoren bereits in einigen Fällen bei automatischen Systemen zum Einsatz gekommen, wo bewußt einfache Lösungen angestrebt wurden.

Handelsübliche Temperaturfühler müssen hermetisch umhüllt werden, um Witterungs- und andere Einflüsse von ihnen fernzuhalten. Bei Pt-Meßeinsätzen, die mit ihrer Glasur eine ausreichende Isolierung aufweisen, genügt bei der Messung der Lufttemperatur eine Halterung, die nur das hintere Ende mit den Anschlußdrähten und die Lötverbindungen der Zuleitungen dicht einschließt. Die Verbindung zur Oberfläche des Sensors und der Anschlußleitung kann durch Klebung erfolgen, wobei wasserfeste Kleber verwendet werden müssen, die mit den zu verbindenden Materialien eine dichte und wetterfeste Verbindung eingehen. Für Boden- und Wasserthermometer haben sich das Einvulkanisieren der Temperaturfühler mit Zuleitung in Gummi oder ein hermetisch dichter Kunststoffüberzug bewährt.

Lufttemperaturfühler brauchen bei genaueren Messungen einen effektiven *Strahlungsschutz*. Sie werden deshalb mit ihrem dünnwandigen Metallgehäuse in einer natürlich belüfteten Kleinhütte oder einem künstlich ventilierten Gehäuse montiert. McKAY & McTAGGART-COWAN [1977] haben verschiedene nicht ventilerte und künstlich belüftete Strahlungsabschirmungen hinsichtlich ihrer Eignung für den Einsatz an automatischen Stationen untersucht und dabei in der Regel die Überlegenheit künstlich ventilierter Typen bestätigt. Aber auch unter den nicht belüfteten Abschirmungen konnten einige gefunden werden, die trotz einfacher Konstruktion hinsichtlich des Strahlungsschutzes den ventilerten nahekommen. De BRICHAMBAUT & LEROY [1995] gingen bei ihren Untersuchungen zum Strahlungsschutz von den unterschiedlichen Wegen aus, auf denen ein Körper mit seiner Umgebung Wärme austauscht, und leiteten daraus Anforderungen für einen wirksamen Strahlungsschirm ab. Als Ergebnis ihrer Untersuchungen schlugen sie einen neuen vereinfachten vor, der sich aus fünf Ebenen, außen weißen Kunststoffwänden zusammensetzt, die innen mit einer 30 mm starken Polystyrolschaumschicht überzogen sind. Diese einfache Konstruktion besitzt Öffnungen für eine natürliche Belüftung und erfüllt die Mehrzahl der zu stellenden Anforderungen hinsichtlich eines Schutzes gegen Strahlung und Befeuchtung durch Niederschläge. Beim Einbau eines Ventilators, der durch Solarelemente mit dem erforderlichen Strom versorgt wird, läßt sich tagsüber der Strahlungsfehler weiter verringern.

Um Fehlmessungen bei Befeuchtung oder Eisansatz zu vermeiden, werden die mit einem Strahlungsschutz versehenen Thermistoren nach GUTERMANN [1978] an den häufig im Gebirge

gelegenen Stationen des schweizer ANETZ vor der eigentlichen Messung beheizt und anschließend ventiliert.

2.2.2 Feuchtegeber

Als Luftfeuchte wird die Konzentration des Wasserdampfs in der Atmosphäre bezeichnet. Obwohl die Luftfeuchte für die Thermodynamik von besonderem Interesse ist und Messungen dieser Größe seit langem vorgenommen werden, ist eine automatische Erfassung dieser Meßgröße (wie übrigens auch der Konzentrationen anderer Luftkomponenten) noch immer problematisch. Darauf wies auch TREUSSART [1984] hin.

Die Luftfeuchte kann durch verschiedene Maße ausgedrückt werden, die sich jedoch bei Kenntnis der Lufttemperatur und des Luftdrucks ineinander umrechnen lassen. In welcher Form die Luftfeuchte an automatischen Stationen erfaßt wird, ist demnach gleichgültig, da an modernen automatischen Stationen sowohl die rechentechnischen Voraussetzungen für eine Umrechnung in die gewünschten Maßzahlen als auch die erforderlichen Informationen vorliegen.

Die für den Einsatz an automatischen Stationen bereits verwendeten bzw. in Betracht kommenden Meßverfahren sind u. a. von VITON [1966], MULLER & BEEKMAN [1987] sowie SONNTAG [1994] diskutiert und teilweise geprüft worden. HUOVILA [1980] wies auf die Schwierigkeiten insbesondere bei Feuchtemessungen an automatischen Wetterstationen hin, die durch Verschlechterung der Eigenschaften elektrischer Hygrometer infolge von Luftverunreinigungen und aus anderen Gründen entstehen. Er leitete daraus die Forderung zur Durchführung von Langzeit-Vergleichsmessungen von Feuchtesensoren ab. SKAAR & HEGG [1989] gaben einen zusammenfassenden Überblick zu den Ergebnissen des internationalen Hygrometervergleichs, der in den Jahren 1987 - 1989 in Norwegen durchgeführt wurde. Im folgenden sollen die wichtigsten bisher eingesetzten Feuchtefühler mit Rücksicht auf ihre Eignung für den Einsatz an automatischen Stationen betrachtet werden.

Hygrometer zur Messung der relativen Luftfeuchte stellen sehr einfache und preisgünstige Feuchtefühler dar. Bei älteren automatischen Stationen sind häufig Hygrometer mit Materialien wie Haaren oder organischen Substanzen, die unter dem Einfluß der Luftfeuchte Längenänderungen unterliegen, in Verbindung mit einem Wandler eingesetzt worden, der die Längenänderung in ein elektrisches Signal umsetzt (vgl. MAGNUSSON [1980]). Die geringen Stellkräfte der Sensoren und die doppelte Meßgrößenumformung bringen zusätzliche Meßfehler mit sich. Heute muß man Haarhygrometer und ähnliche Sensoren als Feuchtefühler für automatische Meßsysteme als überholt ansehen. In den letzten Jahrzehnten sind eine Reihe von Feuchtesensoren mit hygroskopischen Schichten oder feuchteempfindlichen Polymeren entwickelt worden. Primäres Meßsignal ist bei diesen entweder eine Änderung des elektrischen Widerstands (vgl. WÄHRN & KOSTAMO [1975], RAAB [1981], HIJIKIGAWA et al. [1983], KITAGAWA [1986] sowie YUAN-CHANG & TSENG [1989]), oder der Kapazität (siehe LUDBROOK [1974], HEBEKER et al. [1980], KRAMP [1982], KAWANO et al. [1982], LÜDER et al. [1982], WARD [1983], HUANG [1988], POWERS & HULL [1988], VOIGT et al. [1988], NOGUCHI et al. [1989], ABADIE [1989] sowie in Vaisala News No. 82 [1979]) in Abhängigkeit von der relativen Feuchte. In jüngster Zeit sind die *kapazitiven Feuchtesensoren* häufiger eingesetzt worden, da sie sich in einigen Eigenschaften gegenüber den widerstandselektrischen als

überlegen erwiesen haben. Durch Einfügen eines solchen Sensors in eine integrierte Schaltung lassen sich Feuchtesensoren mit unterschiedlichem Ausgangssignal (z.B. frequenzanalogem Signal) erzeugen. Alle Hygrometer dieser Art weisen Hysteresefehler auf, d.h. die Anzeige ist davon abhängig, ob die Luftfeuchte steigt oder fällt. Kürzlich haben PANG et al. [1996] eine relativ einfache Methode angegeben, nach dem sich Hystereseeffekte deutlich vermindern lassen. Sie beruht darauf, daß mittels einer Infrarot-Diode im Bereich einer starken Rotations-schwingungenbande des Wassers dem Sensor definiert Energie zugeführt wird, die imstande ist, die Wasserstoffbindungen zwischen den Wassermolekülen und dem Polymer aufzubrechen, die als Ursache der Hystereseerscheinungen angesehen werden. Das Verfahren erhöht den Preis eines kapazitiven Feuchtesensors nur unwesentlich und bringt noch weitere Verbesserungen der Sensor-eigenschaften. Inwieweit es sich beim praktischen Langzeiteinsatz bewährt, kann erst die Zukunft zeigen. Wie DeCHENG [1989] gezeigt hat, hängt das Ausgangssignal der Sensoren in vielen Fällen zusätzlich von der Temperatur ab. HUOVILA [1980] wies auf die Verschlechterung der Eigenschaften elektrischer Hygrometer durch Luftverunreinigungen hin. Nur ein Teil dieser Sensoren besitzt die für einen Einsatz in Verbindung mit automatischen Stationen erforderliche Langzeitkonstanz. Die Gewährleistung einer Meßgenauigkeit von $\pm 2\%$ ist nach SPICHIGER [1989] nicht trivial. Auch Eichvorrichtungen sind nicht frei von Einflußgrößen. Schwierigkeiten ergeben sich bei manchen Typen bei hohen relativen Feuchtwerten nahe 100%. Die geringen Kosten dieser Meßfühler bei noch vertretbarer Meßgenauigkeit – insbesondere bei niedrigen Temperaturen weit unter dem Gefrierpunkt – lassen vor allem kapazitive Polymerhygrometer als Feuchtefühler für automatisch arbeitende Meßsysteme interessant erscheinen. WÄHRN & KOSTAMO [1975] testeten Sensoren des Typs Humicap (Fa. Vaisala, Helsinki) hinsichtlich ihres Temperaturverhaltens im Bereich $-5\text{ °C} \dots +40\text{ °C}$ und stellten einen etwas höheren Temperatureinfluß bei niedrigen Temperaturen fest. Der Hysteresefehler hielt sich mit Maximalwerten entsprechend 3,1% relativer Feuchte in durchaus tragbaren Grenzen. Ein dünner Überzug zum Schutz des Sensors gegen Schmutzansatz kann dessen Zeitverhalten beeinflussen, erhöht aber dessen Langzeitkonstanz. Bei Stabilitätstests in einer englischen Hütte über 6 Monate änderte sich die Eichkurve lediglich um Beträge in der Größenordnung von 2% relativer Feuchte. Bereits 1984 berichtete MICHELENA über die Erprobung solcher Feuchtesensoren auf Bojen in den nord-amerikanischen Great Lakes. Über die Weiterentwicklungen, die zum kapazitiven Feuchtefühler des Typs Intercap führten, informierte MESIÄ [1994]. Dieser Sensor ist im gesamten meteorologisch erforderlichen Bereich einsetzbar; seine Charakteristik wird durch Verunreinigungen kaum beeinflusst, arbeitet stabil und wartungsarm und läßt sich ohne Nacheichung austauschen, was für seine Anwendung in automatischen Stationen einen wesentlichen Vorteil darstellt. Zweifel bestehen noch bezüglich der Einsetzbarkeit solcher Feuchtefühler in kalten Klimaten. Nach Ansicht von MAKKONEN [1996] sind unbeheizte Festkörper-Feuchtesensoren im Gegensatz zu den Aussagen anderer Autoren bei Temperaturen deutlich unter 0 °C nicht anwendbar.

Elektrische Aspirationspsychrometer sind Meßfühler, die einen guten Entwicklungsstand erreicht haben und bei der erforderlichen Wartung, zu der vor allem das rechtzeitige Nachfüllen von destilliertem Wasser in das Vorratsgefäß und das periodische Reinigen und Wechseln des Befeuchtungsstrumpfes gehören, zuverlässige Luftfeuchtwerte liefern, solange die Wasserzufüh-

rung zum feuchten Thermometer einwandfrei funktioniert. Auch an automatischen Stationen sind Psychrometer eingesetzt worden, obwohl sie in den gemäßigten und kalten Klimagebieten, wo zumindest im Winter die Nullgradgrenze häufig unterschritten wird, wenig geeignet erscheinen. Abgesehen davon, daß das Wasser im Vorratsgefäß bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt leicht einfriert und dadurch der Wassertransport im Befeuchtungsstrumpf beeinträchtigt wird, ist es schwierig, den Aggregatzustand des Wassers am feuchten Thermometer selbsttätig zu bestimmen. Außerdem wird die psychrometrische Differenz mit sinkenden Temperaturen kleiner und daher die Meßgenauigkeit geringer. In den meisten Fällen muß das Psychrometer bei Temperaturen, die deutlich unter den Gefrierpunkt absinken, außer Betrieb genommen werden. ANGERMANN et al. [1980] und SONNTAG [1978] haben elektrische Aspirationspsychrometer beschrieben, die an automatischen Stationen auf See bzw. an Land zum Einsatz gekommen sind. Solche Geber können in Verbindung mit anderen Feuchteühlern als Mittel zur Kontrolle wertvolle Dienste leisten. Um sie auch bei niedrigen Temperaturen einsetzen zu können, müßten die Psychrometer beheizt werden. Die dem trockenen und feuchten Thermometer zugeführte Luft ist dabei auf eine annähernd konstante Temperatur über dem Gefrierpunkt zu erwärmen. Bei Nebel verdunsten dann die in der Luft suspendierten Wassertröpfchen bzw. Eisteilchen, so daß nicht die Luftfeuchte im eigentlichen Sinne sondern der Gesamtwassergehalt erfaßt wird.

Taupunkthygrometer stellen eine weitere Form der Feuchtefühler dar. Damit sich ein definierter Beschlag bilden kann, erfordern sie eine geregelte Kühlung, wofür bei automatisch arbeitenden Systemen wohl am zweckmäßigsten eine PELTIER-Kühlung in Betracht kommt. Bei Messungen in großen Höhen reicht u.U. die PELTIER-Kühlung nicht aus, so daß auf Kühlsysteme mit flüssigem Stickstoff zurückgegriffen werden muß. Ein solches Taupunkthygrometer für den Einsatz an Bord des DLR-Forschungsflugzeugs Falcon beschrieben BUSEN & BUCK [1995]. Die Ausbildung bzw. Veränderung des Beschlags auf der gekühlten Fläche kann nach verschiedenen Methoden nachgewiesen werden. Häufig eingesetzt wurde die optische Methode, bei der die Änderung des Taubeschlags durch Erfassung der Streustrahlung einer Lichtquelle mit Hilfe von Photozellen erfaßt wird. Ein automatisch arbeitendes, miniaturisiertes Taupunkthygrometer mit optischer Erfassung des Beschlags, PELTIER-Element zur periodischen Kühlung und Heizung sowie einer automatisch arbeitenden Vorrichtung zur Reinigung des Tauspiegels bei Verschmutzung wurde von RUPPERT [1981] angegeben. Zum Nachweis von Beschlagsänderungen eignet sich auch eine Methode, bei der die Strahlenabsorption von Betastrahlen im Beschlag detektiert wird. Im letzten Jahrzehnt sind auch akustische Oberflächenwellen zum Nachweis des Beschlags herangezogen worden, wie die Arbeiten von RENARD [1988] sowie FRÜHAUF & HEINZE [1990] belegen. Verunreinigungen, die sich im Laufe der Zeit auf dem Tauspiegel ablagern, müssen sich durch eine automatisch arbeitende Wischeinrichtung beseitigen lassen. Für die Steuerung der Kühleinrichtung ist eine elektronische Regelschaltung erforderlich. Als eigentliche Meßgröße wird die Oberflächentemperatur des betauten Spiegels gemessen. Das Taupunktverfahren erfordert einen nicht unbeträchtlichen Aufwand, liefert jedoch bei zweckmäßiger Konstruktion des Gebers zuverlässige Taupunktwerte, die einfach in den Dampfdruck oder ein anderes Feuchtemaß umgerechnet werden können. In der Schweiz wurde nach Angaben von HOEGGER et al. [1985] unter der Bezeichnung THYGAN

eine durch Mikroprozessor gesteuerter Geber als Kombination von Thermometer und Taupunkthygrometer speziell für den Einsatz an automatischen Stationen im Flachland und Gebirge entwickelt, der auch unter Vereisungsbedingungen arbeitsfähig bleibt. MOTSCHKA & RUDEL [1989] berichteten über Erfahrungen, die beim Einsatz eines in Österreich entwickelten Taupunkthygrometers an automatischen Wetterstationen gesammelt wurden. GALLAGHER [1989] beschrieb die Wirkungsweise des im ASOS in den USA eingesetzten Taupunkthygrometers mit photoelektrischer Detektion des Beschlags auf dem Taupunktspiegel.

Das *LiCl-Taupunkthygrometer* mit Direktbeheizung stellt ein Verfahren dar, bei dem mit einem relativ einfachen Fühleraufbau die Luftfeuchte erfaßt werden kann. Primär gemessen wird hier anstelle des Taupunkts über einer Wasserfläche die Gleichgewichtstemperatur über einer gesättigten LiCl-Lösung. Sie liegt bei einer relativen Luftfeuchte > 20% über der Lufttemperatur. An die Stelle der Kühlung beim Taupunktverfahren tritt hier eine Heizung, was jedoch durch einen Verzicht auf die Meßbarkeit sehr niedriger Feuchtwerte erkauft werden muß, die jedoch in der bodennahen Atmosphäre nur selten auftreten. BAUMGART & HÖHNE [1969] sowie SANDS & TONKINSON [1975] haben gezeigt, daß sich innerhalb des meteorologisch interessierenden Bereiches die Gleichgewichtstemperatur des LiCl-Taupunktfühlers durch eine Beschaltung des Feuchtefühlers mit Festwiderständen mit befriedigender Näherung in die Taupunkttemperatur umsetzen läßt.

Es hat sich erwiesen, daß das LiCl in Abhängigkeit von der Temperatur in verschiedenen Hydratationsstufen vorliegt. Die Umwandlung erfolgt nicht exakt bei gleichen Temperaturen; während der Umwandlung liefert der Feuchtefühler u.U. verfälschte Meßwerte. Am kritischsten ist unter mitteleuropäischen Klimaverhältnissen der Umwandlungspunkt bei -18 °C Taupunkt. Die gemessene Gleichgewichtstemperatur kann bei Kenntnis des am Fühler vorhandenen Hydrats unter stationären Bedingungen in den Taupunkt umgerechnet werden. USOL'CEV [1970b] wies darauf hin, daß durch Einsatz eines LiCl-Feuchtefühlers mit vorgetrocknetem kleinem Meßelement der Übergang von einer Hydratform in eine andere weitgehend verhindert werden kann. Es hat sich jedoch herausgestellt, daß streng genommen die gemessene Temperatur des beheizten Fühlers nicht allein vom Taupunkt abhängt, sondern die relative Feuchte dabei als Einflußgröße auftritt, weshalb in die Umrechnung neben der Gleichgewichtstemperatur auch die Lufttemperatur eingeht (siehe SOMMER & HEINZE [1980] sowie HÖHNE [1991]). Die Temperatur des Meßfühlers führt ständig kleine Regelschwingungen aus; daher sollten bei der Messung die Temperaturen gemittelt werden. Eine Beeinflussung des Meßsignals durch den Wind ist durch ein ausreichend groß dimensioniertes topfförmiges Gefäß auszuschließen. Auch dieser Meßfühler arbeitet nicht wartungsfrei. Er muß in regelmäßigen Zeitabständen – abhängig vom Staubgehalt der Luft – ausgewaschen und neu getränkt werden. Das LiCl-Taupunkthygrometer ist als ein einfacher Geber anzusehen, der Feuchtwerte zwar nur mäßiger Genauigkeit liefert, aber bei der erforderlichen Betreuung als ein zuverlässiger Geber für automatische Stationen genutzt werden kann. Verhindert werden muß ein Abtropfen von Lösung infolge Ausfalls der Sensorheizung. Das kann durch eine Hilfsstromquelle mit Transverter (vgl. BAUMGART & HÖHNE [1969]) oder nach USOL'CEV [1970a, b] durch Einbau des Sensors in ein nur während der Messungen ventiliertes, sonst jedoch luftdicht abgeschlossenes Gehäuse er-

reicht werden. Während der Meßpausen ist die Meßkammer mit einer weiteren Kammer verbunden, die mit einem Trockenmittel gefüllt ist. HENNING [1970, 1980] hat über Erfahrungen beim Einsatz dieses Feuchtemeßfühlers berichtet. Er kam zu dem Ergebnis, daß eine Meßgenauigkeit von günstigstenfalls $\pm 0,4$ K im Taupunkttemperaturbereich -18...+20°C erreicht werden kann. Die Einsatzdauer von LiCl-Taupunktfühlern lag an Stationen des Meßnetzes zwischen 0,9 und 2,3 Jahren. Danach war eine Regeneration der Fühler erforderlich.

Geringer sind die Meßfehler bei Sensoren mit indirekter Beheizung des LiCl-Elements, wie dem von BACHEM et al. [1967] und TIEFENAU [1984] beschriebenen Meßfühler. Bei diesen Sensoren befindet sich eine kleine, thermisch gut isolierte LiCl-Probe in einer Meßkammer, deren Innenluft elektrisch beheizt und durchmischt wird. Die von außen zugeführte Heizleistung wird in Abhängigkeit des Leitwerts über einen Verstärker gesteuert. Meßfehler infolge Wärmeableitung von der LiCl-Lösung zur Umgebung, wegen ortsabhängiger Konzentration des LiCl auf dem Sensorelement und durch Vorhandensein einer ungesättigten Elektrolytlösung sind hier deutlich kleiner. Auch der Einfluß der Lufttemperatur bzw. der relativen Luftfeuchte auf das Meßsignal entfällt weitgehend.

In den letzten Jahrzehnten sind in Form der Infrarot- bzw. der LYMAN-Alpha-Hygrometer *optische Feuchtemeßverfahren* entwickelt worden, die u.U. auch an automatischen Stationen als Feuchtegeber in Betracht kommen. Voraussetzung ist dabei, daß die Änderungen des Strahlungsstroms der Lichtquellen kompensiert werden und die Verschmutzung optischer Teile beherrscht werden kann. Optische Hygrometer gelten im allgemeinen als äußerst trägheitsarme Feuchtefühler; eine Eigenschaft, die nur bei wenigen Einsatzfällen automatischer Meßsysteme von essentieller Bedeutung ist, sonst eher stört. Über das Langzeitverhalten dieser relativ neuen Feuchtefühler und die im Dauereinsatz erzielbaren Genauigkeiten lassen sich heute noch keine abschließenden Aussagen machen.

Wegen der Bedeutung, die der Erfassung von Temperatur und Luftfeuchte bei vielen Messungen im Bereich der angewandten Meteorologie zukommt, haben DUSEK et al. [1993] eine Bewertung verschiedener kommerziell angebotener Sensoren für Temperatur bzw. relative Luftfeuchte hinsichtlich ihrer Eignung bei einem Einsatz an automatischen Stationen vorgenommen.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß zwar eine gewisse Auswahl von Feuchtesensoren existiert; jedes Meßverfahren weist aber im automatischen Betrieb Stärken und Schwächen auf. Das läßt im konkreten Fall die Auswahl als schwierig erscheinen. Nicht selten sind aus diesem Grunde bei automatisch arbeitenden Meßsystemen mehrere Feuchtegeber eingesetzt worden, die nach unterschiedlichen Prinzipien arbeiten. Der Vergleich ihrer Meßergebnisse läßt dann nach HÖHNE [1987] Störungen an einem der Sensoren leichter erkennen und ausmerzen.

2.2.3 Druckgeber

Der Luftdruck wird einerseits von der großräumigen Verteilung der Hoch- und Tiefdruckgebiete, andererseits von der Höhe der Station über dem Meeresspiegel beeinflusst. Bezogen auf eine konstante Höhe ändert sich der Luftdruck unter dem Einfluß des Wetters maximal um etwa 10% des Durchschnittswertes. Es ist daher zweckmäßig, wenn der Luftdrucksensor ein Signal liefert, das nicht den vollen Bereich von Null bis zum höchstmöglichen Druckwert umfaßt, sondern nur den Bereich der durch Druckän-

derungen tatsächlich überstrichen wird. Da die meteorologischen Stationen je nach dem Gelände in unterschiedlicher Höhe über dem Meeresspiegel liegen, sind Sensoren mit unterschiedlichen Meßbereichen erforderlich. So können im Flachland Drucksensoren eingesetzt werden, die auf einen Meßbereich von 900...1050 hPa abgestimmt sind. Mit steigender Höhenlage sind Drucksensoren mit einem abgestuften Meßbereich von 850...1000 hPa, 800...950 hPa usw. vorzusehen. Bei einem auf 150 hPa festgelegten Meßbereichsumfang kommt man in einem Meßnetz mit einer beschränkten Zahl unterschiedlicher Meßbereiche aus, da innerhalb des 150 hPa-Bereichs sowohl wetterbedingte Änderungen als auch kleine Abweichungen von der Nennhöhe der Station berücksichtigt werden können.

Zur Erfassung des Luftdrucks sind an automatischen Stationen in der Vergangenheit bevorzugt *Aneroidbarometer* mit VIDIE-Dosen eingesetzt worden, obwohl es sich bei diesen um Meßwandler handelt, die den Druck durch eine Längenänderung abbilden. Um diese Sensoren in Verbindung mit automatischen Meßsystemen einsetzen zu können, ist ein weiterer Wandler erforderlich, der die Längenänderung in ein elektrisches Signal überführt. Gebräuchlich sind Transmitter, die als elektrisches Signal eine Spannung, eine Kapazitätsänderung oder eine Frequenz erzeugen. Zur Umsetzung der Auslenkung in eine Spannung wurden häufig Differentialtransformatoren mit verschiebbarem Kern (siehe SANDS & TONKINSON [1975] und MAGNUSSON [1980]) eingesetzt. Druckwandler mit einer Kapazitätsänderung als Ausgangssignal beschrieben LUDBROOK [1974] und ANTIKAINEN et al. [1981]. Beim Geber der letztgenannten Autoren waren die Kondensatorplatten innerhalb der Kapsel angeordnet. Ein ähnlicher Drucksensor wurde von PIKE & RINEHART [1983] angegeben. Bei diesem nutzte man die Abstandsänderung zwischen dem Diafragma der Druckkapsel und einer im Doseninnern fest angebrachten, isolierten Elektrode für den Meßeffect. Ein solcher Druckwandler besitzt eine Charakteristik, die sich mathematisch nach dem physikalisch begründeten Modell in der Form

$$p = A_0 + \frac{A_1}{C} + A_2 \cdot T + \frac{A_3 T}{C} \quad (5)$$

schreiben läßt, wobei p den Luftdruck, C die Kapazität des Sensors, T die Temperatur des Drucksensors und A_0 , A_1 , A_2 sowie A_3 konstante Koeffizienten bezeichnen, die bei der Eichung nach der Methode der kleinsten quadratischen Abweichungen bestimmt werden müssen. TESTA [1985] beschrieb eine Vorrichtung, bei der die Auslenkung der Vidiedose auf ein Invarband übertragen wurde, dessen Spannung sich mit dem Luftdruck änderte und damit die Eigenfrequenz der Schwingungen beeinflusste. Das Band wurde über Spulen zu Schwingungen angeregt. Für die Abhängigkeit der Schwingungsfrequenz f vom Luftdruck p ergab sich eine Beziehung der Form

$$f = a\sqrt{p-p_0} \quad (6)$$

Aneroidbarometer erreichen infolge mehrerer Einflußgrößen und Fehlermöglichkeiten nicht die Meßgenauigkeit der Quecksilberbarometer. Der Temperatureinfluß läßt sich sowohl durch Kompensation als auch durch Thermostatisierung des Sensors (vgl. GARRAT et al. [1986]) wesentlich verringern. Kaum zu beseitigen sind hingegen Drift-, Vibrations- und Hystereseeffekte. SANDS & TONKINSON [1975] stellten fest, das der mit Vidiedosen erfaßte Luftdruck im Vergleich zu anderen meteorologischen Variablen die einzige Größe ist, bei der die mittlere monatliche Abweichung die mittlere Streuung übersteigt. Fehler durch Langzeitdrift kann man nach GARRAT et al. korrigieren, wenn regelmäßig Kontrollmessungen z.B. mit Quecksilberbarometern durchgeführt werden. Störungen durch Vibration lassen sich bei ortsfester Aufstellung vermeiden. Bei Simulationsversuchen mit Präzisionsaneroidbarometern der Fa. Negretti & Zambra fand YOUNG [1984a] eine Änderung des Indexfehlers in den ersten Stunden. Der Betrag der Änderung schien mit der Dauer und dem Unterdruck während des simulierten Lufttransports zuzunehmen, ging jedoch innerhalb von wenigen Stunden wieder zurück.

Ein *Präzisionsbarometer mit Zylinderresonator* ist in Japan entwickelt und dort in Verbindung mit automatischen Wetterstationen eingesetzt worden. Konstruktion und Wirkungsweise des Sensors wurden von TANABE & NUMASAKI [1985] beschrieben. Der Aufbau des Drucksensors, der aus einer geeigneten Metallegierung hergestellt wird, geht aus Abb. 2 hervor. Die dünne zylindrische Innenwand, auf die der Luftdruck wirkt, dient als Resonator. Im unteren Teil des Sensors befinden sich vier jeweils um 90° versetzte Bohrungen, die Piezokristalle aufnehmen. Je zwei benachbarte dienen zur Anregung der mechanischen Schwingungen, die beiden anderen als Schwingungsdetektoren. Die Detektorsignale werden addiert und subtrahiert, die beiden so erzeugten Signale je einem Verstärker zugeführt und die Ausgangssignale der beiden Verstärker ebenfalls addiert und subtrahiert, womit Signale erzeugt werden die die Treiber Elemente ansteuern. Der Resonator ist damit in der Lage, in je einer Axial- und Umfangsmode gleichzeitig zu schwingen. Der Luftdruck erzeugt mechanische Spannungen im Resonator, welche die Resonanzfrequenzen modifizieren. Die Resonanzfrequenzen werden aber nicht nur vom Luftdruck, sondern auch von der Temperatur des Sensors und den Verunreinigungen der Sensoroberfläche beeinflusst. Wird jedoch das Verhältnis der beiden Resonanzfrequenzen gemessen, so heben sich die beiden letztgenannten Einflüsse weitgehend heraus, während der Luftdruckeinfluß erhalten bleibt, solange die Druckempfindlichkeit der beiden Schwingungsmoden sich deutlich unterscheiden. Resonator und Verstärker bilden zusammen den Geber. Die Berechnung des Luftdrucks aus den beiden Resonanzfrequenzen sowie des auf Meeressniveau reduzierten Luftdrucks und der dreistündigen Druckänderung erfolgt in einem Datenprozessor.

Das Präzisionsbarometer mit Zylinderresonator weist einen Fehler < 0,1 hPa im Meßbereich 850...1050 hPa auf. Der Temperaturfehler ist dem Betrage nach < 0,1 hPa, solange die Barometertemperatur um nicht mehr als 10 K vom Bezugswert (23 °C) abweicht. Der Betrag des Linearitätsfehlers wird < 0,2 hPa, der des Altersungsfehlers < 0,1 hPa angegeben.

Die Hauptnachteile des Aneroidbarometers, die durch Langzeitdrift und Hystereseeffekten verursacht werden, sind im wesentlichen durch das Material bedingt, aus denen die Vidiedosen gefertigt werden. Verwendet werden hierzu spezielle Metallegierungen. Metalle besitzen ein kristallines Gefüge, das sich aus sehr kleinen Kristallen zusammensetzt. Beim Auftreten mechanischer Spannungen im Material kommt es zu teilweise irreversiblen Verschiebungen der Kristallite gegeneinander und dies führt offenbar zu den Hysterese- und Drifterscheinungen. Eine weitere Fehlerquelle bildet die Serienschaltung zweier getrennter Wandler: der Druckkapsel, die eine Druckänderung in eine axiale Längenänderung umformt, und des Transmitters, der die Längenänderung in ein elektrisches Ausgangssignal überführt.

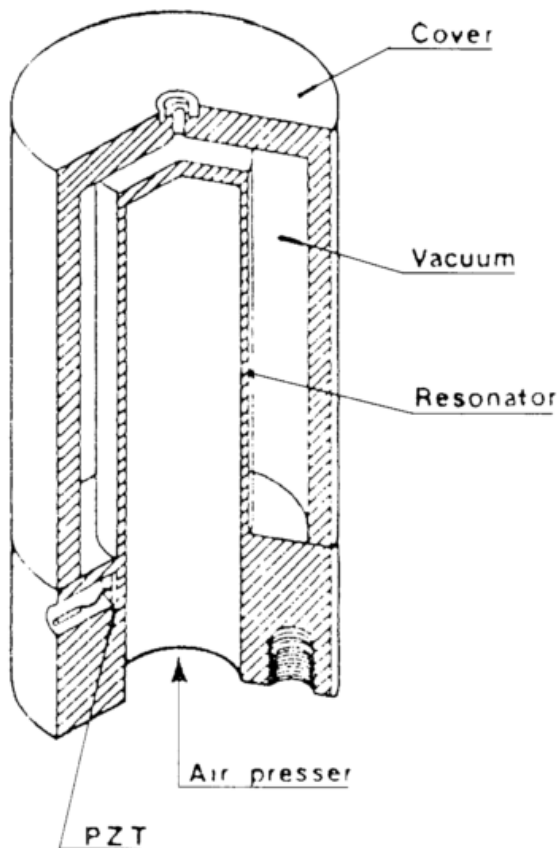


Abb. 2: Mechanischer Aufbau des Luftdrucksensors mit Zylinderresonator (aus: TANABE & NUMASAKI [1985])

In den piezoresistiven und piezokapazitiven Drucksensoren wird als druckempfindliche Membran eine sehr dünne einkristalline Siliciumschicht verwendet. Bei einer mechanischen Belastung der Si-Membran können hier nur elastische Effekte auftreten. Die in das Si-Chip integrierte Schaltung erzeugt zugleich das elektrische Ausgangssignal des Drucksensors. Ein gesonderter Transmitter wird daher hier nicht gebraucht.

Der den *piezoresistiven Drucksensoren* zugrunde liegende piezoresistive Effekt in Halbleitermaterialien wurde bereits von SMITH [1954] an n- und p-leitendem Germanium und Silicium untersucht. Er bestimmte auch die Tensoren der Piezoresistivität für die genannten Materialien.

Der Aufbau eines auf diesem Effekt basierenden Drucksensors wird am Beispiel eines Absolutdruckwandlers der Fa. Honey-

well anhand der Abb. 3 beschrieben, in der der Sensor schematisch im Querschnitt dargestellt ist. Bei der Herstellung werden nach WILD [1981] und WERTHSCHÜTZKY [1989] mikro-mechanische Verfahren eingesetzt. Jeder Drucksensor wird aus einer kleinen monokristallinen Siliciumscheibe von wenigen Millimetern Kantenlänge hergestellt. Im Zentralteil dieser Scheibe wird einseitig das Silicium herausgeätzt, so daß dort am Ende eine dünne Membran von ca. 10 µm Stärke übrigbleibt. Die Stärke der Membran bestimmt letzten Endes den Umfang des Druckmeßbereichs. Auf die Membranoberfläche werden durch Ionenimplantation vier Widerstände so in die Oberfläche gebracht, daß bei einer mechanischen Belastung der Membran zwei von ihnen gedehnt und zwei gestaucht werden. Infolge des piezoresistiven Effektes, der nach SCHWAIER [1979] weniger auf der Veränderung der geometrischen Abmessungen der Widerstände als vielmehr ihres spezifischen Widerstands durch die mechanischen Beanspruchungen beruht, verändern die zu einer Brücke zusammengeschalteten Widerstände ihre Ohmwerte. Dies führt bei einem konstanten Brückenspeisestrom in der Brückendiagonale zu einer Spannungsänderung, die ein Maß für die mechanische Beanspruchung darstellt. Der Siliciumkristall wird einseitig in ein isolierendes Substrat gasdicht eingebracht und der dabei entstehende Hohlraum evakuiert.

Die Randpartien des Einkristalls, die durch Krafteinwirkungen kaum beeinflusst werden, können übrigens für weitere in den Chip aufzunehmende Schaltungen genutzt werden, wie sie für die Konstanzhaltung des Brückenspeisestroms, die Temperaturkompensation, die Linearisierung der Eichkurve und die Verstärkung des Ausgangssignals usw. gebraucht werden. HENCKE [1981] erläuterte aktive Temperaturkompensationsverfahren. SCHOLZ [1987] hat gezeigt, wie durch Einfügen zusätzlicher Widerstände in die Brückenschaltung und deren Abgleich eine Temperaturkompensation bei Silicium-Drucksensoren erreicht werden kann. Der nachträgliche Abgleich der Widerstände in der Kompensationsschaltung ist bei dem in der Abb. 3 gezeigten Aufbau nach dem Verkapseln des Drucksensors durch die Glas-scheibe hindurch mittels eines Lasers möglich. Auf die Theorie des piezoresistiven Druckaufnehmers sind GIELES & SOMERS [1973/74] sowie THEDEN et al. [1982] eingegangen. Dabei wurde neben den Grundlagen des piezoresistiven Effektes die einzusetzenden Technologien und die Berechnungsgrundlagen behandelt. GERLACH et al. [1996] haben an nicht gekapselten Sensoren die zufälligen Fehler untersucht, die durch Eigenstörungen des Sensors, durch den Meßgrößeneinfluß infolge von Wechselbelastungen und durch Störgrößen bei wechselnden Temperatur- und Luftfeuchtebelastungen hervorgerufen werden.

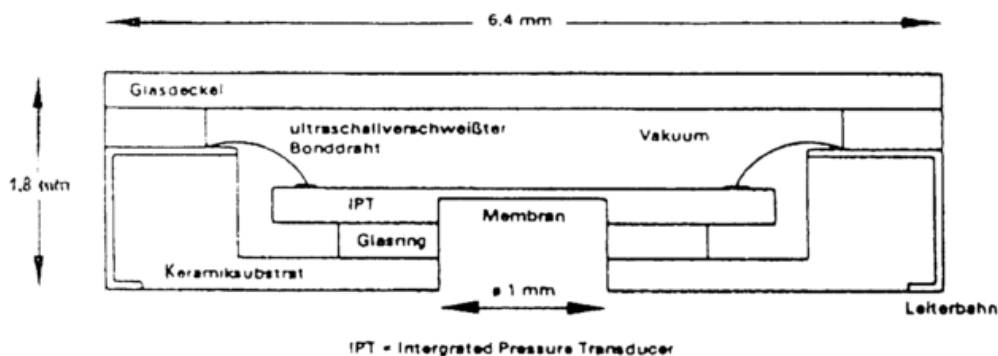


Abb. 3: Querschnitt durch einen piezoresistiven Absolutdrucksensor der Fa. Honeywell GmbH (aus: WILD [1981])

Sie begrenzen die Reproduzierbarkeit des Sensors. Die Fehleranteile der Eigenstörungen waren nahezu vernachlässigbar. Der durch Adsorptions-, Absorptions- und Desorptionsvorgänge feuchtebedingte Fehler lag etwa in der gleichen Größe wie der temperaturbedingte. Diese durch Störgrößen bedingten Fehler lassen sich in erster Linie über Maßnahmen zur Primär- und Sekundärpassivierung beeinflussen. So war die Reproduzierbarkeit eines Sensors mit Siliciumoxid-nitrid-Doppelschichten zum Schutz der Widerstands- und Leiterbahnbereiche etwa um den Faktor 4,5 besser als die eines Sensors mit SiO₂-Einzelschicht. Die Verfasser erwarten durch komplexe Passivierungskonzepte (leitende Abschirmungen, vergrabene Widerstände) weitere Genauigkeitsverbesserungen bei piezoresistiven Sensoren.

Beim *piezokapazitiven Sensor* wird die Durchbiegung der Siliciummembran nach KALFASS & MAINKA [1986] mit einem Kondensator erfaßt. Dessen eine Elektrode kann durch die Innenseite der p-dotierten Membran und dessen zweite Elektrode durch eine auf dem Substrat aufgedampfte Metallschicht gebildet werden, wobei beide Elektroden einen Abstand von wenigen Mikrometern besitzen. Eine Abstandsänderung durch Veränderung des äußeren Luftdrucks führt hier zu einer Kapazitätsänderung. Im Vergleich zum piezoresistiven Sensor wird hier eine höhere Empfindlichkeit bei besserer Stabilität der Kenngrößen des Sensors erzielt. Die Kapazität läßt sich leicht in eine Frequenzänderung umformen. Die dazu notwendige Schaltung kann auch hier in den Si-Chip des Drucksensors integriert werden. MAGNUSON [1980] berichtete über den Einsatz piezokapazitiver Sensoren der Firma Setra zur Luftdruckmessung an Flugplatzstationen. PRABHU DESAI et al. [1992] erprobten in einer automatischen Seewetterstation Drucksensoren sowohl nach dem piezoresistiven als auch nach dem piezokapazitiven Prinzip. Die letztgenannten erwiesen sich dabei als zuverlässiger und genauer. Die Eigenschaften der piezokapazitiven Drucksensoren vom Typ Barocap behandelte RYHÄNEN [1994]. Sie sind für den Druckbereich 50...1300 hPa ausgelegt. Hysterese und Reproduzierbarkeit werden mit ± 2 Pa angegeben. Die Temperaturabhängigkeit liegt bei 1000 hPa im Bereich -5...+5 Pa/K. Als Langzeitstabilität nach einer Alterung von 1 Jahr wird ein Wert von nur +0,1 hPa/a angegeben.

Durch Kombination solcher Präzisionssensoren mit weiteren Schaltungen, wie Analog-Digital-Wandlern und Einchip-Mikrocomputern, sind *Digitalbarometer* aufgebaut worden, welche die gemessenen Druckwerte nicht nur digital anzeigen, sondern auch über geeignete Schnittstellen verfügen, um den Digitalwert an anschließbare Meßwerterfassungssysteme weitergeben zu können. Digitalbarometer sind teils auf Netzanschluß angewiesen, teils lassen sie sich mit Batteriespannungen versorgen. FENZEL & KNAUER [1981] haben gezeigt, wie ein digital anzeigendes Barometer mit relativ wenigen Bauelementen realisiert werden kann. Viele der industriell gefertigten Geräte verfügen über recht genaue Kompensationsschaltungen, um die Wirkung von Einflußgrößen zu eliminieren. Sie werden für unterschiedliche Meßbereiche und Meßgenauigkeiten ausgelegt. Bei modernen Digitalbarometern kommen zunehmend Mikroprozessoren zur Anwendung, die bei der Abfrage und Aufbereitung der Meßsignale Steuerungs- und Rechenaufgaben übernehmen (vgl. GÖTZ & ENTLEUTNER [1986]).

Die beschriebenen Si-Drucksensoren werden heute in Massenfertigung für technische Anwendungen hergestellt, bei denen die Anforderungen an die Meßgenauigkeit sich oft in Grenzen halten. Bei den relativ hohen Ansprüchen an meteorologische Luft-

druckmessungen können hier nur *Präzisionsdrucksensoren* zum Einsatz kommen wie z.B. der Absolutdruckwandler CZ9149 der Fa. Schlumberger, der speziell für die Messung des Luftdrucks ausgelegt ist und im Gehäuse neben dem Drucksensor Schaltungen zur Signalaufbereitung enthält. Er bildet den Druckmeßsensor in mehreren französischen automatischen Wetterstationen. Auch diese Absolutdrucksensoren weisen noch eine Reihe von Fehlermöglichkeiten auf. Zu den wichtigsten gehören:

- Fehler durch Langzeitdrift
- trotz Kompensation verbleibender Temperatureinfluß und
- Linearitätsfehler.

LYYRA [1994] beschrieb die Eigenschaften der Drucktransmitter der PTB 100-Serie der Fa. Vaisala, die mit unterschiedlichen Meßbereichen (mit unterdrücktem Nullpunkt) lieferbar sind. Für den Typ PTB 100A mit dem Meßbereich 800...1060 hPa werden eine Genauigkeit bei Zimmertemperatur von $\pm 0,3$ hPa und eine Langzeitstabilität von $\pm 0,1$ hPa/a angegeben. Das Ausgangssignal dieses Drucktransmitters liegt im Bereich 0...5 V. Die Versorgungsspannung darf im Gleichspannungsbereich 10...30 V liegen.

BOWMAN & Van CAUWENBERGHE [1985] wiesen auf die Langzeitdrift des elektronischen Druckwandlers hin, der an der kanadischen automatischen Station vom Typ READAC zum Einsatz kam. Der gleiche Effekt wurde auch bei den im schweizer ANETZ eingesetzten Barometern festgestellt. Durch Vergleich der an den automatischen Stationen gewonnenen Druckmeßergebnisse mit denen ihrer Nachbarstationen und mit denen von Quecksilberbarometern sowie durch andere Maßnahmen wird versucht, die Meßwerte zu korrigieren und in Zukunft korrekte Werte ausgeben zu können. PAYNE [1995] untersuchte die Langzeitstabilität der Drucksensoren von sieben Herstellern über einen Zeitraum von einigen Jahren unter Laborbedingungen. Dabei wurden die höchsten Genauigkeitswerte in der Größe von ca. 0,1 hPa bei einer Langzeitstabilität über mehrere Jahre von den Sensoren 215-AT der Fa. Paroscientific, 1201FIB der Fa. Rosemount und 270 der Fa. Setra erreicht. Beim Einsatz im Freien wird der Meßfehler hier durch die Effektivität der Vorrichtung zur Druckzuführung bestimmt, die dynamische windbedingte Fehler weitgehend ausschließen soll. Im allgemeinen erwiesen sich die teuersten Sensoren als die mit der höchsten Genauigkeit. Bei weiter steigender Qualität der Billigsensoren deutet sich die Möglichkeit an, Barometer mit ausreichender Genauigkeit selbst zu fertigen.

Hysteresefehler mit Werten von wenigen Pascal sind bei diesen Drucksensoren oft kaum nachweisbar. Drifterscheinungen werden offenbar weitgehend durch Strukturveränderungen in den Sensoren verursacht. Sie sind umso geringer, je besser die Herstellungstechnologie beherrscht wird. Van Der MEULEN [1989] konnte bei Vergleichsversuchen mit automatischen Digitalbarometern zeigen, daß bereits Barometertypen existieren, die eine Langzeitdrift $< 0,05$ hPa/a besitzen. Beim Einsatz solcher Drucksensoren an automatischen Landstationen in zugänglichen Gebieten genügt es, die Langzeitdrift durch periodisch durchzuführende Vergleichsmessungen zu verfolgen und ggf. durch Eingabe neuer Korrektionswerte zu berücksichtigen. Kritisch ist häufig die Temperatur als Einflußgröße. Trotz Maßnahmen zur Kompensation des Temperatureinflusses verbleibt oft ein Restfehler in der Größenordnung von einigen Zehntel Hektopascal. Durch Thermostatisierung des Drucksensors kann dieser Fehler

leicht $< 0,1$ hPa gehalten werden. Moderne Absolutdrucksensoren arbeiten an sich in einem Bereich, der beim Druckwert null beginnt und bis zu einem Maximalwert reicht, der von der Auslegung des Sensors abhängig ist. Bei Meßeinrichtungen für den Luftdruck am Boden werden barometrische Meßumformer gebraucht, deren Meßbereich erst bei 80 bis 90% des Meßbereichsendwertes beginnt. Eine so starke Unterdrückung des Nullpunktes bringt in dem verbleibenden Meßbereich zwar geringere Linearitätsfehler, ist aber zwangsläufig mit einer Verringerung der Meßgenauigkeit verbunden, wenn der Abgleich nicht mit höchster Präzision erfolgt.

Über den Einsatz piezoresistiver und piezokapazitiver Drucksensoren bzw. Digitalbarometer an automatischen Stationen zur Luftdruckmessung ist bereits mehrfach berichtet worden, so u.a. von VITON [1977], HÖHNE et al. [1986a] und GALLAGHER [1989]. Man kann davon ausgehen, daß diese Sensoren, an deren Herstellung und Weiterentwicklung schon seit mehr als 20 Jahren gearbeitet wird, in Zukunft bei meteorologischen Anwendungen noch an Bedeutung gewinnen werden. Die Drucksensoren haben hier nicht nur die Meßwerte für den Luftdruck an der Station zu liefern, sondern auch für Betrag und Art der dreistündigen Luftdruckänderung. Beide Informationen lassen sich aus stündlichen Luftdruckmessungen ableiten. An synoptischen Stationen wird darüber hinaus der auf das Meeresniveau reduzierte Luftdruck (oder bei Bergstationen die Höhe einer vorgegebenen Hauptisobarenfläche) gefordert. Auch diese Angaben lassen sich berechnen, wenn zugleich Informationen über die Lufttemperatur und die Erdbeschleunigung zur Verfügung stehen.

Luftdruckmessungen werden generell durch Luftströmungen beeinflusst. Der windbedingte Fehler wird durch eine Beziehung der Form

$$\Delta p = C_p \cdot \frac{\rho u^2}{2} \quad (7)$$

beschrieben, in der u die Windgeschwindigkeit im Niveau des Druckmessers und C_p den sog. Druckkoeffizienten angibt, der von der Aufstellung des Druckgebers und die Orientierung einer eventuell vorhandenen Luftdruckaufnahme relativ zur Luftströmung abhängt. Sieht man von speziellen Anwendungen ab, erfolgt an Wetterstationen die Luftdruckmessung gewöhnlich in einem Gebäude. Sofern das Gebäude an allen Außenwänden gleichmäßig verteilte Öffnungen aufweist, ist $C_p \approx -0,5$. Bei Aufstellung des Druckgebers im Freien können sich nach AKYÜZ et al. [1991] je nach Ausführung der Luftdruckaufnahme und ihrer Orientierung relativ zum Wind für C_p sowohl positive als auch negative Werte ergeben.

Schwieriger ist die Luftdruckmessung auf Bojen, da hier der Meßkopf wegen der Bojenbewegungen aus unterschiedlichen Inklinationswinkeln angeströmt werden kann und der Sensor gegen eventuell eindringendes Seewasser geschützt werden muß. JESSON & McKENZIE [1975] haben eine Vorrichtung angegeben, die dem Luftdruck Zugang zum Drucksensor gestattet, Wasser hingegen fernhält. Die Luft hatte hierbei von unten Zutritt. Die Sperrvorrichtung bestand aus drei Sperren, die sich aus dünnen Rohren und darüber befindlichen Hohlräumen zusammensetzten, sowie einem zylinderförmigen "Filter" aus Sinterbronze mit 19% Porenvolumen und 2 μ m Porenweite. Diese Vorrichtung wurde von unten her wasserdicht in das Instrumentengehäuse der Boje eingesetzt. Selbst wenn ein Wassereintritt eintreten sollte, würde davon nur der Drucksensor, aber nicht andere Meßein-

richtungen betroffen. Über Experimente mit verschiedenen nichtrotierenden statischen Druckmeßköpfen haben OSMOND & PAINTING [1984] berichtet. Der Meßkopf war als oben verschlossener Zylinder ausgeführt, der gleichmäßig auf dem Umfang verteilt 8 Bohrungen von 3 mm Durchmesser aufwies. Diese Öffnungen waren durch einen Kragen überdeckt, der in 4 mm Abstand angeordnet und oben verschlossen war. Die Überdeckungslänge des Kragens konnte variiert und damit das Verhalten des Meßkopfes optimiert werden. Bei den Messungen im Windkanal zeigte es sich, daß auch die Montage des Meßkopfes Einfluß auf den Druckmeßfehler bzw. die Optimierung des Meßkopfes hatte.

2.2.4 Windgeber

Im Gegensatz zu den bisher behandelten meteorologischen Größen handelt es sich beim Wind nicht um eine skalare Größe sondern einen Vektor, der durch seine drei Komponenten bestimmt ist. An den meisten automatischen Stationen beschränkt man sich auf die Erfassung des Horizontalwindes. Der Geber hat hierbei entweder den Betrag der *horizontalen Windgeschwindigkeit* und die *Windrichtung* oder die beiden *Komponenten des Horizontalwinds* zu erfassen.

Um Winddaten von verschiedenen Meßorten vergleichen zu können, ist die Festlegung einer *definierten Meßhöhe* erforderlich. Für synoptische Zwecke wird nach WMO-Festlegungen über einer freien Fläche eine Aufstellungshöhe von 10 m vorgegeben. Als offen wird ein Gelände dann angesehen, wenn die Entfernung zu Hindernissen mindestens der zehnfachen Höhe der Hindernisse entspricht. Da solche Aufstellungsbedingungen nur selten zu finden sind, wird empfohlen, die Windgeber in einer Höhe aufzustellen, die weitgehend die gleichen Meßwerte liefert, die sich bei Messung in 10 m Höhe beim Fehlen der Hindernisse ergeben würden. WIERINGA [1977] hat ein Verfahren beschrieben, nach dem sich diese Aufstellungshöhe bestimmen läßt, falls Windregistrierungen vorliegen, aus denen sich der Böenfaktor und die mittlere Windgeschwindigkeit für vorgegebene Windrichtungssektoren und höhere Windgeschwindigkeiten entnehmen lassen und die das Verhalten des Anemometers und des Schreibers charakterisierenden Parameter bekannt sind. Zugleich gab WIERINGA Formeln an, nach denen sich Winddaten in einer abweichenden Meßhöhe auf eine Referenzhöhe reduzieren lassen.

Trotz der generellen Vorbehalte gegenüber Sensoren mit bewegten Teilen werden an automatischen meteorologischen Stationen auch heute noch zur Bestimmung des Horizontalwinds meist *Schalen- oder Propelleranemometer* und zur Bestimmung der Windrichtung *aerodynamisch oder durch Propeller gesteuerte Windfahnen* eingesetzt, sofern keine erschwerten Bedingungen hinsichtlich der Vereisungsgefahr vorliegen. Propellergesteuerte Windfahnen besitzen zwei Propeller mit entgegengesetztem Drehsinn auf einer horizontalen Achse senkrecht zu der der Windfahne. Die Drehung dieser Achse wird über ein Getriebe auf die Windfahnenachse übertragen und diese dadurch in die mittlere Windrichtung gestellt. Derartige Windrichtungsgeber besitzen daher eine deutlich längere Einstellzeit als mechanische Windfahnen (vgl. KODAIRA et al. [1975]). Dieser Umstand wurde insbesondere bei automatisch arbeitenden Meßsystemen genutzt, solange die Verarbeitung der Winddaten noch mit hohem Aufwand verbunden war. Windfahne und Anemometer lassen sich auch in einem Geber vereinigen. Robuste Konstruktionen haben sich in automatischen Meßsystemen be-

währt, sofern die genannten Voraussetzungen erfüllt sind. Anemometer sollen aber trotzdem eine möglichst niedrige und konstante Anlaufschwelle besitzen. Schalenanemometer zeigen bei böigen Wind einen gegenüber dem exakten Mittel erhöhten Wert an. HINZPETER [1975] hat gezeigt, wie sich dieser Effekt durch geeignete Maßnahmen weitgehend unterdrücken läßt.

Anemometer liefern als Ausgangssignal eine Drehzahl, Windfahnen eine Winkelstellung. Diese mechanischen Größen müssen zum Zwecke der Fernübertragung und der automatischen Erfassung in je ein elektrisches Signal umgeformt werden. Drehzahlen lassen sich leicht in Frequenzen oder Spannungen umsetzen, die ein Maß für die zu erfassende Windgeschwindigkeit bilden. Dazu werden entweder Impulsgeber (als magnetisch betätigte, in mit Schutzgas gefüllte Glasgefäße eingeschmolzener Kontakte bzw. als Kombination von Lichtquelle, Abschattungsvorrichtung und Photozelle bzw. Phototransistor) oder elektromagnetische Generatoren verwendet.

Zur Wandlung der Windfahnenstellung in ein elektrisches Signal kommen Endlospotentiometer, Drehfeldsysteme, Kontaktgeber und Codescheiben mit einschrittigem Code (z.B. GRAY-Code) in Betracht. Potentiometer, deren Abgreifer mit einer sich fast ständig bewegenden Windfahne gekoppelt sind, unterliegen jedoch einem Verschleiß. Drehfeldsysteme dienen zur Fernübertragung einer Drehbewegung und erfordern zur Verbindung des Gebers mit dem Empfänger eine fünfadrigte Leitung. Kontaktsysteme lassen meist nur die Auflösung einer begrenzten Zahl von Windrichtungen zu. Bei der Codiervorrichtung sind Codescheiben mit mindestens 6 Spuren erforderlich, was bei der Parallelübertragung der Bits zumindest 7 Adern erfordert. Der Codescheibe wird daher in der Regel ein Parallel-Serien-Wandler nachgeschaltet, so daß die Bits des Digitalsignals auf zwei Adern einer Leitung übertragen werden können.

Windrichtung und -geschwindigkeit gehören zu den Größen, die kurzperiodischen Schwankungen großer Amplitude unterliegen. Momentanwerte sind daher nur wenig aussagekräftig. Einen höheren Informationsgehalt besitzen Mittel- und Extremwerte über vorgegebene Zeitintervalle. Die Mittelbildung kann entweder für Windgeschwindigkeit und -richtung skalar erfolgen oder es wird der Mittelwert des Windvektors bestimmt. Der Betrag des mittleren Windvektors kann vom skalaren Mittel der Windgeschwindigkeit nach MECHOVIČ et al. [1978] um bis zu 15% abweichen. In der Vergangenheit sind an meteorologischen Stationen die Mittelwerte des Windes skalar gebildet worden. Im Interesse der Homogenität der Meßreihen wird man dieses Verfahren auch bei automatischen Klimastationen beibehalten. Das vektorielle Windmittel ist hingegen aussagekräftiger, wenn die Meßwerte für die Abschätzung von Transportvorgängen (z. B. beim Schadstofftransport in der Atmosphäre) genutzt werden sollen.

Sowohl für die skalare als auch die vektorielle Mittelung sind geeignete Verfahren entwickelt worden. So haben MECHOVIČ et al. [1978] ein Verfahren beschrieben, mit dem aus den Ausgangssignalen des Windgebers M-63 M das vektorielle Mittel gebildet werden kann. Bei der Bestimmung der mittleren Windrichtung stößt die Anwendung der üblichen Mittelungsverfahren jedoch insofern auf Schwierigkeiten, als hier das Ende des Meßbereichs unmittelbar in dessen Anfang übergeht. Deshalb sind hier bereits bei Registrierungen besondere Verfahren herangezogen worden, die z.T. Auswirkungen auf die konstruktive Gestaltung und Schaltung des Windrichtungsgebers haben. Umgehen läßt sich

die Unstetigkeitsstelle nach SMITH [1959] durch ein Getriebe mit einer Untersetzung des Drehwinkels im Verhältnis 2:1 und Einsatz eines Umlaufpotentiometers mit zwei um je 180° versetzt angeordneten Abgreifern, von denen über eine Schalteinrichtung jeweils nur einer mit dem Anzeigeinstrument verbunden wird. Eine ähnliche, aber weitgehend elektronisch arbeitende Methode wurde von HÖHNE [1970c] bei der automatischen meteorologischen Station AFMS-1 eingesetzt. Dabei wurde die Drehung der Windfahne über ein Drehfeldsystem und ein Untersetzungsgetriebe im Verhältnis 4:1 auf das Abgreiferpaar eines Umlaufpotentiometers übertragen, das in Winkelabständen von je 90° vier feste Anzapfungen besaß. Mittels einer durch Schaltnocken auf der Getriebeabtriebswelle gesteuerten Schaltung wurde jeweils zu Beginn jedes 10 min-Mittelungszeitraums die Anzapfungen zur Zu- bzw. Abführung des konstanten Brückenspeisestroms sowie zur Abnahme des Meßsignals so gewählt, daß die am Umlaufpotentiometer abgegriffene Spannung im mittleren Bereich des linear ansteigenden Ausgangssignals lag. Dieser lineare Bereich entsprach einer Drehung der Windfahne um 720°. Damit wies der Arbeitsbereich innerhalb des 10 min-Intervalls praktisch keine Unstetigkeit auf.

Die Auswahl geeigneter Windmesser ist insbesondere in solchen automatisierten Netzen schwierig, die neben Flachland- auch Gebirgsstationen umfassen. Eine begründete Entscheidung kann wohl nur nach Vergleichsversuchen mit mehreren Anemometertypen getroffen werden, wie sie z.B. von HOEGGER et al. [1989a] in der Schweiz durchgeführt wurden. Schalenanemometer müssen an Gebirgsstationen beheizbar sein, um einen Eisansatz verhindern zu können. Bei den üblichen Schalensternkonstruktionen bereitet die Zuführung der erforderlichen Heizleistung Schwierigkeiten. Maßnahmen zur Verhinderung von Schäden an Gebern und verfälschten Meßwerten durch Eisansatz beschrieb PATRICHI [1984]. Danach sollen Propelleranemometer gegenüber Nebelfrostablagerungen weniger störanfällig sein als Schalenanemometer. Als weitere Maßnahmen wurden empfohlen: Gewährleistung eines großen Drehmoments rotierender Teile durch konstruktive Maßnahmen, Einsatz eines Schutzkonus an den drehbaren Achsen, dunkler Teflonüberzug der Geber zur Förderung der Absorption von Sonnenstrahlung, Einfetten der beweglichen Teile mit Siliconfett in der kalten Jahreszeit und Entfernen des Eisansatzes durch Vibrationen. HARTLEY [1978] beschrieb ein beheiztes Anemometer mit einem kompakten Rotor. An bemannten Gebirgsstationen wurden früher Staudruckgeräte verwendet, deren Öffnung durch eine Windfahne in die Windrichtung ausgerichtet wurde und sich bei Vereisungsgefahr durch eine elektrische Beheizung der Öffnungsumgebung eisfrei halten ließ. Zur Vermeidung eines längeren Rohres zur Übertragung des Staudrucks besteht heute die Möglichkeit, in das Staurohr einen Differenzdrucksensor einzubauen und damit ein vom Staudruck abhängiges Signal direkt im Geber zu bilden. Ein solches Anemometer für Stationen an abgelegenen Orten wurde bereits 1970 in der Zeitschrift *Electronic Design* beschrieben. Es war speziell für nicht ortsfeste automatische Wetterstationen entwickelt worden und besaß einen Schalenstern mit drei Schalen, wobei ein Schalenarm als Konzentrador für den magnetischen Fluß diente, den das erdmagnetische Feld erzeugt. Dieser Fluß wurde mittels einer Magnetodiode – einem auf Änderungen der magnetischen Feldstärke ansprechenden Sensor – in eine Wechselfrequenz umgewandelt, deren Frequenz als Maß für die Windgeschwindigkeit genutzt werden kann. Der Schalenstern rotierte mit dem oberen Gehäuseteil des Gebers, das seitlich eine Bohrung aufwies, über die bei direkter

Anströmung der Staudruck auf einen druckempfindlichen Transistor wirkte. Dessen impulsförmiges Ausgangssignal wurde verstärkt und geformt. Die Phasendifferenz der durch das Erdmagnetfeld bedingten Wechsellspannung gegenüber dem Druckimpuls lieferte ein Maß für die Windrichtung.

Bei Windmessungen von Bojen aus sind sowohl Schalen- als auch Propelleranemometer zum Einsatz gekommen und haben sich bei Messungen in tropischen Gewässern nach FREITAG et al. [1989] als gleichwertig erwiesen. Da auch verankerte Bojen gewisse Drehbewegungen ausführen können, ist zur Bestimmung der Windrichtung ein Kompaß notwendig. Für diese Zwecke kommen je nach Genauigkeitsanforderungen sowohl Magnet- als auch Kreiselkompass zur Anwendung.

Rotierende Teile sind gegenüber Vereisung besonders gefährdet, sofern sie nicht beheizt werden. Die Übertragung einer hinreichenden Heizleistung auf die drehbaren Teile ist jedoch technisch aufwendig, sofern die dynamischen Eigenschaften des Windmessers nicht beeinträchtigt werden sollen. Vereinzelt sind auch *Anemometer ohne rotierende Teile* angegeben worden. Über die Konstruktion eines kältefesten und nicht vereisungsanfälligen Windmessers berichtete GELBKE [1949]. In seiner Arbeit sind bereits die wichtigsten Prinzipien erwähnt, die für Windmesser in vereisungsgefährdeten Lagen herangezogen werden können:

- Winddruckwirkung auf elastische Gebilde,
- Schwingungserzeugung eines elastischen Drahtes,
- Abkühlung eines beheizten Körpers und
- Nutzung von Ultraschallwellen.

Das von GELBKE genutzte Prinzip beruht auf dem erstgenannten Wirkungsprinzip. Als Druckkörper diente eine Hohlkugel, deren Befestigung so ausgeführt wurde, daß sie dem windbedingten Staudruck etwas nachgeben kann. Die dadurch bedingte Auslenkung der Kugel wurde mit widerstandelektrischen, photoelektrischen oder induktiven Wandlern erfaßt, die im Kugelinern untergebracht waren. Sie erzeugten Signale für die beiden Komponenten des Horizontalwindes, die sich bis zu einem Auswertegerät übertragen ließen.

Ein von LUDBROOK [1974] behandelte Staudruck-Windgeber besaß einen zylindrischen perforierten Druckkörper, dessen Achse mit einem Gegengewicht versehen und kardanisch aufgehängt war. Für eine vertikale Achsausrichtung bei fehlendem Staudruck sorgte eine durch eine Feder erzeugte Rückstellkraft. Schwingungen des beweglichen Organs wurden durch eine Silikonölfüllung gedämpft. Die Achsauslenkung wurde mittels zweier um 90° versetzter kapazitiver Meßwandler erfaßt. Sie lieferten Meßsignale für die Komponenten des horizontalen Windvektors.

Die Erprobung eines beheizbaren Staudrucksensors ohne bewegliche Teile an Gebirgsstationen beschrieben JONES & PAINTING [1984]. Der Meßkopf besaß in Ost-West- und in Nord-Süd-Richtung Bohrungen, in denen Differenzdrucksensoren eingesetzt waren. Aus den damit erfaßten Windkomponenten ließ sich sowohl die Windgeschwindigkeit als auch die -richtung bestimmen.

TIEFENAU [1988] berichtete über einen Windgeber in Kugel- oder Zylinderform, der ohne bewegliche Teile auskam und mit dem sich Geschwindigkeit und Richtung des Windes auf Grund der Winkelabhängigkeit des Staudrucks erfassen ließen. Er besaß

auf seinem Umfang 9 Bohrungen, in denen Miniatur-Staudruck-Sensoren untergebracht waren. Mit einem weiteren Sensor wurde der Absolutdruck erfaßt. Die Bestimmung der Winddaten erfolgte mittels eines im Geber enthaltenen Mikrorechners.

MAGNUSSON [1980] erwähnte, daß ein pneumatischer Windsensor in Verbindung mit einem Druckwandler sich auch unter erschwerten Vereisungsbedingungen bewährte, bei denen Schalenanemometer unzuverlässig arbeiteten.

Andere Anemometer für entlegene, vereisungsgefährdete Stationen arbeiten nach dem *Hitzkörperprinzip*. Das von LANG & LEUNING [1981] beschriebene Gerät ohne bewegte Teile beruht auf der Geschwindigkeitsänderung der Tangentialumströmung einer Kugel. Als Sensoren kamen hierbei Heißfoliensensoren zum Einsatz. Bei dem von PAHOR et al. [1989] beschriebenen Gerät wurde ein zylinderförmiger beheizter Körper eingesetzt und die Temperaturverteilung auf der Oberfläche erfaßt. Bei konstanter Heizleistung lieferte die mittlere Temperaturdifferenz des Hitzkörpers gegenüber seiner Umgebung ein Maß für die Windgeschwindigkeit. Wird hingegen die Temperaturdifferenz konstant gehalten, gibt die erforderliche Heizleistung oder -spannung ein Maß der Windgeschwindigkeit. Diese Betriebsart, für die ein durch Mikrorechner gesteuerter Regler entwickelt wurde, ist bei größerem Meßbereich günstiger. Aus den Temperaturunterschieden auf dem Umfang des Zylinders ließ sich die Windrichtung ableiten. Ein von Van OUDHEUSDEN & HUIJ-SING [1989, 1991] beschriebenes thermisches Anemometer benutzte als Hitzkörper eine horizontale runde Keramikplatte, unter deren Mitte ein integrierter Sensorchip mit vier Heizwiderständen, vier Si-Transistoren als Temperaturfühler und vier elfgliedrigen Si-Al-Thermosäulen angebracht war. Die jeweils parallel liegenden Thermosäulen waren gegeneinander geschaltet und maßen die Temperaturdifferenz. Die Sensorplatte wurde in ein Gebergehäuse mit zwei parallelen Platten über und unter der Sensorplatte sowie einem den Sensor umgebenden Drahtkäfig montiert. Im Gegensatz zu dem zuvor beschriebenen Hitzkörperanemometer nutzte dieses Anemometer das Prinzip der indirekten Wärmeübertragung, wobei der Sensorchip auf eine mittlere Temperatur aufgeheizt wurde, die um einen vorgegebenen Betrag über der der umgebenden Luft lag. Der Sensor erfaßte mit den integrierten Thermosäulen Temperaturdifferenzen zwischen zwei entgegengesetzten Enden der Sensorfläche, aus denen die beiden Komponenten des Horizontalwindes bestimmt werden konnten. Der Quotient aus beiden Thermospannungen liefert ein Signal für die Windrichtung.

In den letzten Jahren sind für Spezialzwecke auch Ultraschall-Anemometer eingesetzt worden. Sie kommen ohne bewegte Teile aus, benötigen jedoch unter Vereisungsbedingungen eine Beheizung der Schallgeber und -detektoren.

2.2.5 Niederschlagsgeber

An synoptischen und Klimastationen sowie Niederschlagsmeßstellen für den operativen Einsatz ist die Erfassung folgender Niederschlagsgrößen ausreichend:

- * Niederschlagsmenge
- * Niederschlagsintensität
- * Beginn und Ende der Niederschlagsereignisse
- * Niederschlagsart
- * Höhe der Schneedecke.

2.2.5.1 Niederschlagsmessung

Zur Erfassung der Niederschlagsmenge werden an automatischen Landstationen meist *volumetrische Meßprinzipien* angewandt, bei denen bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt besondere Vorkehrungen getroffen werden müssen. Verschiedene Maßnahmen zur Sicherung eines winterfesten Betriebs bei Regenschreibern, teils mittels Gefrierschutzmitteln, teils mittels Gasheizungen, haben bereits ZOBEL & REINECKE [1956] beschrieben. Bei modernen automatisch arbeitenden Systemen werden Auffanggefäß und Meßsystem bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt elektrisch beheizt. Da durch die Heizung die Verdunstungsverluste steigen, ist eine geregelte Beheizung vorzusehen, die die Temperatur des Auffangtrichters und anderer frostempfindlicher Teile des Gebers bei einer annähernd konstanten Temperatur wenige Grade über dem Gefrierpunkt hält.

Bevor aus dem Auffanggefäß Wasser an das Meßsystem abgegeben wird, muß dessen Oberfläche weitgehend benetzt sein. Das macht sich insbesondere bei geringen oder intensitätsschwachen Niederschlägen negativ bemerkbar. Als Sensoren für die Wassermenge kommen meist *Regenwippen* (auch als Kippwaagen bezeichnet) zum Einsatz, die bei Erreichen einer bestimmten Wassermenge in der einen Hälfte eine Kippbewegung ausführen, dabei das aufgefangene Wasser entleeren und einen elektrischen Impuls erzeugen. ATTMANNSPACHER [1978] sowie LI MING-GIN & AN WU-ZHENG [1988] haben die Arbeitsweise hochauflösender Regenwippen theoretisch und experimentell untersucht und sind in diesem Zusammenhang auf Einflüsse eingegangen, die das Ansprechverhalten beim Kippvorgang beeinflussen. Da der Kippvorgang eine endliche Zeit beansprucht und darüber hinaus durch störende Momente verzögert werden kann, während der das Niederschlagswasser insbesondere bei höheren Niederschlagsintensitäten noch in die an sich gefüllte Hälfte der Wippe fließt, weisen diese Sensoren nur eine begrenzte Meßgenauigkeit und bei höheren Regenintensitäten eine nichtlineare Eichkurve auf (vgl. LANG [1982], WILLIAMS & ERDMAN [1987]). Durch zweckmäßige Wahl der Empfängerfläche des Niederschlagsmessers und der Abmessungen der Regenwippe kann die Auflösung den jeweiligen Erfordernissen angepaßt werden. ATTMANNSPACHER verwendete im Ombrometer HP eine Wippenkonstruktion, die bis zu einer Regenintensität von 7 mm/min eine lineare Eichkurve aufwies. HANNA [1995] diskutierte Fehlermöglichkeiten von Regenwippen anhand der in zahlreicher Literaturangaben dargestellten Ergebnisse. Er kam zu der Schlußfolgerung, daß die durch Windeinflüsse bedingten Fehler alle instrumentellen Unzulänglichkeiten dominieren und empfahl Maßnahmen zur Verringerung der Wirkung dieser Einflußgröße.

Verbesserte volumetrische Sensoren, wie sie KLEMM [1970], KLEMM et al. [1978] und BATTISTA et al. [1990] beschrieben, arbeiten mit Hohlzylindern und elektrisch steuerbaren Ventilen, die während der Entleerung des Meßgefäßes den Zufluß aus dem Auffanggefäß nach Abb. 4 vorübergehend unterbrechen, so daß das in dieser Zeit anfallende Wasser erst nach den Verschuß des Ablaufventils in das Meßgefäß gelangt. Die Ventilbetätigung wird bei den von KLEMM beschriebenen Niederschlagsmessern durch elektrische Kontaktgabe zwischen dem im Meßzylinder gesammelten Wasser und einer justierbaren Kontaktspitze ausgelöst. Die Nichtlinearität des Ausgangssignals kann bei diesem Prinzip deutlich geringer gehalten werden als bei Kippwaagen. Damit solche Niederschlagsmesser auch im Winter eingesetzt werden können, müssen sie beheizt werden. Durch die Heizung

können jedoch die Verdunstungs- und andere Verluste unvermeidbar stark ansteigen. Dies zeigten nach GOODISON et al. [1998] auch Vergleichsmessungen, die in Kanada, Finnland und Deutschland durchgeführt wurden. KLEMM et al. [1977] beschreiben zwei Ausführungen einer regelbaren Heizung des Niederschlagsgebers, mit der sich die Verluste in engen Grenzen halten lassen.

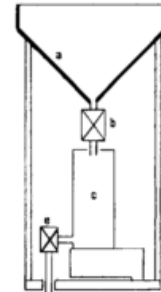


Abb. 4: Prinzip eines Niederschlagsmessers mit Magnetventilen
a) Auffangtrichter e) Auslaufventil
b) Einlaßventil für Meßgefäß f) Gehäuse
c) Meßgefäß
(aus: BATTISTA et al. [1990])

Alle Geber für Niederschlagsmessungen nach dem volumetrischen Prinzip sind mehr oder weniger verschmutzungsempfindlich. Störungen in der korrekten Arbeitsweise können durch alle Arten von Verunreinigungen wie Staub, abfallende Vegetations- teile aber auch durch Ausscheidungen von Vögeln verursacht werden. Die letztgenannte Art von Verunreinigungen läßt sich durch einen Drahtring deutlich verringern, der in der Höhe der Auffangfläche und in ausreichendem Abstand von deren Rand anzubringen ist und auf den sich die Vögel setzen können, ohne daß Kot in das Innere des Auffanggefäßes gelangen kann.

Ein anderes Prinzip zur Niederschlagsmessung beruht auf dem Prinzip der *Formung künstlicher Tropfen* annähernd gleicher Größe mit anschließender *Zählung der Tropfenzahl*. Da das Zählvolumen hierbei deutlich kleiner gewählt werden kann als bei der Regenwippe, ist eine bessere Auflösung erreichbar. Das Problem liegt hier jedoch in der Erzielung gleichgroßer Tropfen. In der Praxis kann das Tropfenvolumen von der Niederschlagsintensität, der Umgebungstemperatur sowie möglichen Verschmutzungen im Auffanggefäß beeinflusst werden. Bei hohen Regenintensitäten ist der Tropfenformer nicht mehr in der Lage, diskrete Tropfen zu erzeugen. Stattdessen fließt dann ein feiner Strahl aus der Düse. ATTMANNSPACHER [1977, 1978] berichtete über Erfahrungen mit dem Ombrometer HP, das in sich das Prinzip der Tropfenformung und -zählung mit dem Wippenprinzip kombinierte und damit sowohl für Niederschläge geringer als auch hoher Intensität geeignet war. Ein künstlich erzeugter Tropfen entsprach dabei einer Niederschlagsmenge von 0,005 mm; die Linearität war bei diesem Meßprinzip nur bis zu einer Regenintensität von 1,5 mm/min zu gewährleisten. Bei sorgfältiger Wartung konnte die erforderliche Genauigkeit über mehrere Jahre gehalten werden. Sofern eine Niederschlagswippe hinreichender Konstanz zur Verfügung steht, läßt sich mit den heute verfügbaren Möglichkeiten der Rechentechnik das Tropfenvolumen an Hand der Kippbewegungen aneichen.

Auch der Einsatz von volumetrischen *Niederschlagsgebern nach dem Schwimmerprinzip* ist versucht worden. LI MING-GIN & AN WU-ZHENG [1988] haben einen solchen Niederschlagsmesser beschrieben, der für Regen und Schnee geeignet war. Das eigentliche Auffanggefäß schwamm dabei in einer mit Frostschutzmittel

versehene Flüssigkeit und wurde im Hauptbehälter zentriert. Der Hauptbehälter kommunizierte über ein horizontales Rohr mit einem Meßzylinder, in dem ein Auftriebskörper schwamm. Bei Niederschlag tauchte das Sammelgefäß tiefer in den Hauptbehälter ein und verdrängte einen Teil der Flüssigkeit in den Meßbehälter. Dadurch stieg der Auftriebskörper und schloß mit der an seiner Oberfläche aufgefüllten elektrisch leitenden Flüssigkeit und der von oben in den Meßzylinder eingeführten Meßspitze einen Kontakt. Hierauf wurde die Meßspitze schrittweise um einen bestimmten Betrag angehoben. Die Zahl der Kontaktgaben diente als Maß für den gefallen Niederschlag.

Die Erfassung der Niederschlagsmenge und -intensität läßt sich auf eine *Massebestimmung* zurückführen. Davon wurde bei den fernmessenden Regenmessern Gebrauch gemacht, die von WARCHOL et al. [1961], BATTISTA et al. [1990] sowie der Fa. General Telephone of Iowa (Control Engrng. [1967]) beschrieben wurden. Diese Meßeinrichtungen kommen teilweise ohne Heizung aus und werden daher in kühleren Klimaten bevorzugt. In der kanadischen READAC-Station kam nach DOCKENDORFF & Van CAUWENBERGHE [1984] ein durch Mikrorechner gesteuerter Niederschlagsgeber mit einer Federwaage und einer optischen Codiervorrichtung zur Anwendung. Zu den Niederschlagsmessern nach dem Wägeprinzip müssen auch die von MOLYNEUX [1984] sowie URIMOTO et al. [1984] angeführten Geber gerechnet werden. MOLYNEUX ging von einem Gerät nach dem Prinzip der Niederschlagswippe aus und ergänzte diesen Geber durch ein vibrierenden Draht, dessen Frequenz sich mit der Masse der Niederschlagswippe änderte. Dadurch war es möglich, die in der Wippe enthaltene Wassermenge alle 10 s durch einen Zählvorgang zu erfassen und für jede Minute die Masseänderung zu bestimmen. Auf diese Weise und unter Berücksichtigung der Kippvorgänge war eine empfindliche und präzise Bestimmung der Niederschlagsintensität möglich. URIMOTO et al. sammelten den aufgefangenen Niederschlag in einem Gefäß, dessen Fassungsvermögen einer Niederschlagshöhe von etwa 500 mm entsprach. Das Gefäß stand auf einem Kraftsensor, mit dem das Gewicht des Sammelgefäßes bestimmt werden konnte. Der Kraftsensor enthielt zwei Quarzplatten, von denen eine auf Zug und die andere auf Druck beansprucht wurde. Die Schwingfrequenzen beider Platten änderten sich daher bei Belastung gegensinnig. Als Meßsignal wurde die Differenz beider Schwingfrequenzen erfaßt, so daß auch hier die Bestimmung der Niederschlagsmenge auf eine Frequenzmessung zurückgeführt wurde. Im unteren Teil des Auffanggefäßes sowie im Ablaufrohr des Auffangtrichters war je ein Magnetventil angeordnet, damit das Sammelgefäß vor dem Überlaufen kontrolliert entleert werden konnte, ohne daß der während dieser Zeit fallende Niederschlag unberücksichtigt blieb. Beide Meßeinrichtungen arbeiteten mit Mikrorechnern, die neben der Steuerung auch Verarbeitungsaufgaben übernahmen.

Nach Ansicht von GOODISON et al. [1998] ist die Niederschlagsmessung nach dem Wägeprinzip die günstigste Methode zur Erfassung der Winterniederschläge an automatischen Stationen. Aber auch bei deren Anwendung können Probleme z.B. durch feuchten Schnee entstehen, der sich an der Innenseite des Auffangrings ansetzt, ohne kurzfristig in das Wägegefäß zu fallen. Dieser Nachteil läßt sich nur durch eine Beheizung des Auffangrings beseitigen. Durch böigen Wind kann das Wägegefäß in Schwingungen geraten, die bei der Massebestimmung eine mehrfache Wiederholung der Messung und Mittelung der Meßdaten erfordert.

Niederschlagsgeber stellen für die natürliche Luftströmung ein Hindernis dar, das umströmt werden muß. Dabei werden auch die in der Luft enthaltenen Niederschlagsteilchen mehr oder weniger mitgeführt, so daß nicht alle Tropfen oder Teilchen ins Auffanggefäß gelangen. Dieser Fehler nimmt mit wachsender Windgeschwindigkeit zu. Bei festen Niederschlägen kann ein weiterer windbedingter Fehler hinzukommen, wenn Schneeflocken vor dem Schmelzen aus dem Auffanggefäß wieder herausgeweht werden. Deutlich verringern lassen sich die windbedingten Fehler durch einen Windschutz direkt am Geber (wie z.B. einem NIPHER-Trichter) oder einem Windschutzzaun, der den Niederschlagsgeber umgibt. Über die Ergebnisse der Vergleiche verschiedener Niederschlagsmesser in Finnland, die sich insbesondere auf feste Niederschläge bezogen, haben ELOMAA et al. [1989] berichtet. Der Windeinfluß verursacht zwar nur einen der bei der Niederschlagsmessung auftretenden Fehler. In vielen Fällen handelt es sich jedoch um die wichtigste Einflußgröße, zumal andere wie Benetzung und Verdunstung bei Niederschlagsgebern für automatisch arbeitende Meßsysteme nur sehr eingeschränkt wirksam werden. Da für die Verdunstungsverluste nach SEVRUK [1984] die für die Evaporation verfügbare Zeitdauer maßgeblich ist und die Erfassung bei Niederschlagsgebern für automatisierte Meßsysteme meist unmittelbar nach dem Abtropfen aus dem Auffanggefäß erfolgt, können sich Verdunstungsverluste hier selbst bei hohem Sättigungsdefizit und hoher Windgeschwindigkeit kaum bemerkbar machen.

Die Sammeleffizienz kann bei Niederschlagsgebern für automatische Stationen durch einen wirksamen Windschutz wesentlich gesteigert werden. Nur so lassen sich die Meßfehler bei starken Winden und festen Niederschlägen deutlich reduzieren. GOODISON et al. [1998] forderten, daß an automatischen Stationen die Windgeschwindigkeit zusätzlich in Höhe der Auffangöffnung des Niederschlagsgebers gemessen wird, um insbesondere den stark ausgeprägten Windeinfluß bei festen Niederschlägen zuverlässiger korrigieren zu können.

Sind die bei Niederschlagsgebern für automatische Stationen auftretenden systematischen Fehler bekannt, so lassen sich die Niederschlagssummen korrigieren, wie dies SEVRUK [1981] für die Monatssummen der mit dem Regenmesser nach HELLAMNN in der Schweiz gemessenen Werte gezeigt hat.

Schwierigkeiten bereitet neben der Erfassung fester Niederschläge noch immer die Niederschlagsmessung von beweglichen Plattformen aus, insbesondere die auf Schiffen und Bojen, infolge der schwankenden Unterlage und des Auftretens von Brechern und Gischt. Für solche Anwendungen sind Meßverfahren in Erprobung, die ohne Sammelgefäße auskommen. Hierzu können die Regenmesser nach optischen und akustischen Prinzipien gezählt werden, die von NYSTUEN et al. [1996] beschrieben wurden. Sie eignen sich jedoch gegenwärtig nur für die Erfassung flüssigen Niederschlags. Es lassen sich aber damit virtuelle Auffangflächen realisieren, die um ein Vielfaches größer sein können als die der konventionellen Niederschlagsmesser mit Auffanggefäß. Bei *in-situ*-Messungen von maritimen Niederschlagsspektren setzten GROSSKLAUS et al. [1998] das optische Disdrometer des Instituts für Meereskunde, Kiel ein. Dieser Geber erfaßt Tropfen ab 0,05 mm Durchmesser und erreicht bei der Bestimmung der Regenintensität eine typische Meßgenauigkeit von 5%.

Bei der *optischen Messung* wird der IR-Strahl einer LED-Lichtquelle über eine horizontale Strecke konstanter Länge zu einem optischen Empfänger mit Detektor geschickt. Regentropfen, die

den Strahl passieren, verursachen Änderungen der Lichtintensität, die von der Tropfengröße, der Fallgeschwindigkeit, der optischen Geometrie und der Kohärenz der Lichtquelle abhängig sind, unter bestimmten Voraussetzungen jedoch ein Maß der Regenintensität liefern. Die in kurzen Abständen abgetasteten Meßsignale müssen in einem Prozessor verarbeitet werden.

Akustische Regenmesser basieren auf der Erfassung des Schalls unter der Wasseroberfläche, der von Regentropfen erzeugt wird, die auf diese auftreffen. Hierzu wird in einer vorgegebenen Wassertiefe ein Hydrophon als Schalldetektor befestigt. Da sich das akustische Signal von Regentropfen deutlich von dem anderer aus See vorkommender potentieller Schallquellen unterscheidet und von der Tropfengröße abhängt, läßt es sich für die Bestimmung der Tropfengrößenverteilung ausnutzen, aus der sich sowohl die Regenintensität als auch die Niederschlagshöhe ableiten lassen. Auch hierzu sind Prozessorschaltungen erforderlich.

Erfolgen die Niederschlagsmessungen in kurzen Zeitabständen von 5 oder 10 min, lassen sich aus den Meßwerten *mittlere Niederschlagsintensitäten* ableiten, sofern bei volumetrischen Meßverfahren die einem Impuls entsprechende Niederschlagsmenge hinreichend gering ist. Ein gesonderter Geber für die Niederschlagsintensität ist dann nicht mehr erforderlich. LANE [1985] sowie WILLIAMS & ERDMAN [1987] haben Regenmesser mit Mikrocomputer beschrieben, die bei jedem Wippenimpuls die Echtzeituhr abfragten und die Zeitangaben im RAM-Speicher für eine nachträgliche Auswertung ablegten. Sind Intensitätswerte im Minutenbereich erforderlich, wird häufig auf eine Tropfenzählung zurückgegriffen, die in besonders konstruierten Tropfeinrichtungen geformt werden, wie sie z.B. von ATTMANNSPACHER [1977] sowie HOSKING et al. [1986] angegeben wurden und in Abb. 5 gezeigt werden. VITON [1980] hat ein preisgünstiges Gerät zur Registrierung der Regenintensität beschrieben. Es besaß ein Auffanggefäß mit 1000 cm² Empfängerfläche. Das im Auffangtrichter gesammelte Wasser floß über ein Magnetventil in ein zylindrisches Gefäß, das unten von einem Differenzdrucksensor abgeschlossen wurde. Der damit erfaßte Differenzdruck war der jeweiligen Höhe des Wasserstands im Zylinder proportional. Das elektrische Ausgangssignal dieses Wandler wurde einem Registriergerät zugeführt. Am unteren Ende des Zylindergefäßes war seitlich ein weiteres Magnetventil zur Entleerung angeflanscht. Eine elektronische Schaltung erzeugte die Zeitimpulse zur Steuerung der beiden Magnetventile. Jede Minute wurde für 12 s das obere Ventil verschlossen und das ablaufende Wasser damit im Auffangtrichter zurückgehalten, während das Entleerungsventil geöffnet war und das Zylindergefäß damit entleerte. Ein solcher Sensor könnte mit geringen Än-

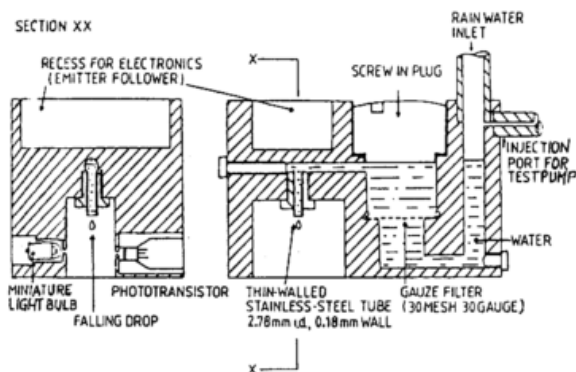


Abb. 5: Querschnitt durch einen Tropfenzähler nach NORBURY & WHITE (aus: HOSKING et al. [1986])

derungen an der elektronischen Steuerung auch als Geber für automatische Wetterstationen genutzt werden. Über einen noch in Entwicklung befindlichen intelligenten Regenmesser zur gleichzeitigen Bestimmung der Niederschlagsintensität und -summe berichteten PETTIFER et al. [1980]. Er arbeitete nach dem Wägeprinzip und war für einen späteren Einsatz als Niederschlagsgeber an automatischen Stationen vorgesehen. Bei diesem spannte das Gewicht einer Niederschlagswippe mit dem in ihr enthaltenen Niederschlagswasser einen Draht und änderte dadurch die Resonanzfrequenz des Drahtes. Der Draht befand sich im Luftspalt zwischen den Polen eines Permanentmagneten und wurde von einem Wechselstrom durchflossen, dessen Frequenz durch eine Oszillatorschaltung auf die Resonanzfrequenz abgestimmt war. Bei konstanter Masse der Niederschlagswippe war die Frequenz somit ein Maß des in der Wippe enthaltenen Wassers. Die Frequenzmessung erfolgte mit einem durch Mikrorechner gesteuerten Digitalzähler. Die zeitliche Frequenzänderung war damit ein Maß für die Regenintensität. Durch zeitliche Integration der Regenintensität wurde die Regenmenge über konstante Zeitintervalle bestimmt. Vom Kippvorgang der Wippe ausgelöste Impulse wurden zunächst nur dazu genutzt, die Frequenzdifferenzen im Zeitraum, der den Kippvorgang einschließt, nicht für die Intensitätsbestimmung zu nutzen. Später ist vorgesehen, diese Impulse bei der Berechnung der Niederschlagsmengen durch zeitliche Integration heranzuziehen.

Angaben zur Niederschlagsintensität haben nur dann Sinn, wenn zugleich die der Messung zugrunde liegende Zeitbasis mit angegeben wird. BREUER [1977] konnte zeigen, daß die Maximalwerte der Regenintensität bei höheren Intensitäten bei einer Zeitbasis von 5 s um mehr als 100% höher sein können als bei einer Zeitbasis von 1 min.

Für die Erfassung des Beginns und Endes von Niederschlagsereignissen, die einerseits bei synoptischen und klimatologischen Beobachtungen, andererseits zur Steuerung der Öffnungs- und Schließbewegungen von Niederschlagssammlern für nasse Depositionen gebraucht werden, können *Niederschlagsdetektoren* eingesetzt werden. Bei dem von KLEMM [1970] beschriebenen Regengeber ist eine Elektrodenanordnung unter dem Ablaufrohr des Auffangtrichters angebracht. Dieser Sensor kann erst dann ansprechen, wenn die Oberfläche des Auffanggefäßes benetzt ist. Sowohl der Beginn als auch das Ende eines Niederschlagsereignisses werden damit verzögert erfaßt. Wichtig ist aber, daß der Detektor auch bei geringen Intensitäten auf beginnenden Regen, Schneefall und andere Arten fallenden Niederschlags sowie auf das Ende eines Niederschlagsereignisses rasch anspricht. KODAIRA et al. [1975] verwendeten einen Niederschlagsdetektor, bei dem parallel angeordnete Drähte im Abstand von 0,5 mm zu den Mantellinien eines Zylinders ausgespannt waren und die eine Elektrode darstellten. Die zweite Elektrode wurde durch die metallische Zylinderfläche gebildet. Als Kriterium für Niederschlag diente ein Schwellenwert des Widerstands. Der zwischen den Elektroden fließende Strom wurde verstärkt und schaltete ein Relais. Nach Angaben von ATTMANNSPACHER [1978] kam in Verbindung mit dem Ombrometer HP ein ähnlicher Geber für die Niederschlagsdauer zum Einsatz. Um eine exakte Bestimmung des Beginns und des Endes eines Niederschlagsereignisses zu gewährleisten, wurden hier auf dem Umfang eines im Innern eines Gehäuses befindlichen Zylinders 6 getrennte Elektroden-systeme angeordnet, von denen jeweils nur ein System für 30 s dem Niederschlag exponiert wurde. Die übrigen Elektroden-systeme wurden von einer thermostatisierten Heizung im Gehäuseinnern

erwärmt, so daß sie völlig abgetrocknet waren, wenn sie nach 2,5 min wieder dem Regen ausgesetzt wurden. Nach RIEDL & PLÖRER [1997] funktioniert dieser Niederschlagsdetektor von Nieselregen über Schneefall bis Starkregen; er spricht jedoch auch auf Schneetreiben an, so daß dieses Ereignis nicht von echtem Niederschlag unterscheidbar ist. Benutzt werden heute oft pyramidenförmige Sensoren mit geneigten Isolierstoffplatten, die zum Nachweis einer durch Wassertropfen verursachten Widerstandsänderung auf der Außenseite korrosionsfeste Elektrodenanordnungen mit geringem Leiterabstand und auf der Innenseite Heizleitungen besitzen. Sie sind oft in der Lage, bereits auf einzelne Tropfen zu reagieren. Als Elektrodenmaterial ist nach WINKLER [1993a] Gold, Kupfer oder Zinn zu bevorzugen. Wassertropfen lassen sich jedoch auch mit einem kapazitiven Sensor nachweisen, bei dem die Elektroden von einer dünnen isolierenden Schicht überzogen sein müssen. Die Neigung der Sensorplatten und eine leichte Heizung des Systems verhindern, daß nach Aufhören des Niederschlags eine Oberfläche längere Zeit feucht bleibt und der Sensor auf Tau anspricht. WINKLER et al. [1993] haben abgeschätzt, welcher Schwellenwert der Regenintensität für den Nachweis von Niederschlagsereignissen sowie für zuverlässige Messungen der nassen Deposition erforderlich sind. Sie kamen zu Werten von 0,03...0,05 mm/h. Der Elektrodenabstand der Niederschlagssensoren muß nach WINKLER [1993a] so klein sein, daß der Spalt durch Tropfen von 0,3 mm Durchmesser überbrückt wird. Um auch bei Niederschlägen, die mit geringen Intensitäten beginnen, rechtzeitig ein Signal auszulösen, darf die Elektrodenfläche des Detektors nicht zu klein sein. Eine Fläche von etwa 50 cm² scheint jedoch auszureichen. Damit der Sensor auch auf das Ende eines Niederschlagsereignisses kurzzeitig anspricht, muß die Detektoroberfläche beheizt werden. Um auch bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt sowie bei hohen Lufttemperaturen ein einwandfreies Verhalten zu gewährleisten, ist nach WINKLER [1993a] eine thermostatisierte Heizung zu bevorzugen, die die Temperatur des Elektrodensystems etwa auf 40°C konstant hält. Da der Niederschlagssensor bei schwachem Regen kein kontinuierliches Signal erzeugt, ist eine Verzögerungsschaltung erforderlich, die das Niederschlagssignal noch etwa 2...5 min nach dem letzten Tropfenfall aufrechterhält. WINKLER [1987, 1988, 1989, 1993b] hat darüber hinaus verschiedene Niederschlagssensoren untersucht und mit den Daten eines Disdro-meters verglichen. Er stellte dabei z.T. beachtliche Unterschiede in ihrem Ansprechen am Beginn und Ende eines Niederschlagsereignisses fest. Die Auswertungen lassen erkennen, daß die Meldedauer bei einigen Geräten deutlich von der Lufttemperatur sowie von einer Reihe technischer Parameter wie dem Elektrodenabstand, der Benetzbarkeit der Elektrodenfläche, der Größe und Orientierung der Elektrodenfläche und der Art der angelegten Elektrodenspannung (Gleich- oder Wechselspannung) abhängt.

Voraussetzung für die Ermittlung vergleichbarer Angaben zur Niederschlagsdauer ist eine verbindliche Definition des Beginns und Endes eines Niederschlagsereignisses, wie dies KREUELS & BREUER [1977] forderten. Danach muß die Funktionsweise der Niederschlagsdetektoren möglichst eng an die zu schaffende Definition angepaßt werden.

2.2.5.2 Bestimmung der Niederschlagsart

An konventionellen meteorologischen Stationen wurden Angaben zur *Niederschlagsart* in der Vergangenheit durch visuelle Beobachtungen gewonnen. Eine meßtechnische Erfassung dieses Parameters ist relativ kompliziert und nicht immer eindeutig möglich.

Bereits 1966 berichteten PECK et al. über einen Niederschlagsindikator für automatische Wetterstationen. Der zu diesem Zweck einzusetzende Geber enthielt 4 Sensoren:

- einen unbeheizten kapazitiven Sensor, der bereits auf geringen Flüssigkeitsansatz durch Tau und Regen anspricht,
- einen Temperaturschalter, der bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt einen Kontakt schließt und vorwiegend zur Unterscheidung von Niederschlägen in fester und flüssiger Form diente,
- einen beheizten kapazitiven Sensor, der unabhängig vom Aggregatzustand auf alle stärkeren Niederschläge anspricht und
- einen unbeheizten resistiven Sensor, der nur auf flüssige Niederschläge einschließlich starkem Taubeschlags anspricht.

Die verstärkten Ausgangssignale der Einzelsensoren wurden je einem Relais zugeführt, deren Kontaktstellungen mit hoher Wahrscheinlichkeit die Niederschlagsarten

- leichter Taubeschlag
- starker Taubeschlag
- Reif
- Schnee sowie
- gefrierender Regen bzw. schmelzender Schnee

zu unterscheiden erlaubten. Der zeitliche Verlauf der Ausgangssignale ließ im letztgenannten Fall eine Differenzierung zwischen gefrierendem Regen und tauendem Schnee zu. Der Niederschlagsindikator wurde an zwei automatischen Stationen vom Typ AMOS-V versuchsweise betrieben. Gelegentlich wurden dabei mehrdeutige Signale festgestellt, die jedoch nur kurzzeitig anhielten. In Verbindung mit anderen Meßgrößen der automatischen Wetterstation ließ sich in solchen Fällen die Niederschlagsart eindeutig bestimmen.

Über selektive Niederschlagsindikatoren, die für den Nachweis von Niederschlagsereignissen mit Gefährdungspotential geeignet sind und nach verschiedenen Prinzipien arbeiteten, hat HILL [1975] einen Überblick gegeben. Neben den Sensoren vom kapazitiven Typ wurden auch andere beschrieben, bei denen durch Masseansatz eine Veränderung der Resonanzfrequenz eintritt und die daher besonders zur Erfassung der Vereisungsgefahr geeignet erschienen. Im Detail eingegangen wurde auf Sensoren mit rotierenden Zylindern, die auf dem Mt. Washington versuchsweise zum Nachweis von Vereisungsbedingungen erprobt wurden. Außerdem ging HILL auf die Erfassung von Hagel ein. Dazu wurden Meßverfahren eingesetzt, die entweder den beim Aufschlag von Hagelkörnern freigesetzten Impuls erfaßten, oder elektro-optische Systeme mit parallelen Lichtstrahlbündeln, die den Querschnitt der Hagelkörner auf linear angeordneten Photodektoren abbildeten, so daß die Größe der Hagelkörner direkt erfaßt werden konnte. Beide Systeme sprachen nicht auf flüssige Niederschläge an. Auf in Entwicklung befindliche Sensoren, die Regen, Schnee und Nebel zu unterscheiden gestatten und auf Wechselwirkungen eines parallel gerichteten kohärenten Laserstrahls mit den Hydrometeoren beruhen, hat ACHESON [1980] hingewiesen. Mit einigen Modifikationen sollte sich die Größe von Regentropfen und Hagelkörnern sowie die Niederschlagsintensität erfassen lassen und die Unterscheidung von Hagel, Regen, Schnee, Regen und Schnee gemischt, Nebel sowie Regen bei zugleich vorhandenem Nebel möglich werden.

SHEPPARD & WU [1985] wiesen auf die Möglichkeit der Unterscheidung verschiedener Niederschlagsformen durch Messungen mit einem kleinen bistatischen DOPPLER-Radargerät (mit getrenntem Sender und Empfänger) hin, deren Achsen jeweils um 20° gegen die Vertikale geneigt waren, so daß die Empfangsantenne nach Abb. 6 Signale aufnahm, die in einem Volumen über der Fernmeßeinrichtung gestreut wurden. Beide Antennen waren gegeneinander abgeschirmt und durch Kunststofffolien abgedeckt. Der Sender strahlte 100 mW bei 10,252 GHz ab. Die mit der Empfangsantenne aufgenommene, mit der Sendefrequenz gemischte und verstärkte Demodulationsspannung wurde mit einer Frequenz von 2048 kHz digitalisiert und gespeichert. Mittels eines Mikroprozessorsystems ließ sich durch eine schnelle FOURIER-Transformation das DOPPLER-Spektrum gewinnen. Je 50 solcher Leistungsdichtespektren wurden gemittelt. Der Algorithmus zur Bestimmung der Niederschlagsart ging von der Vertikalgeschwindigkeit der Niederschlagsteilchen und ihrer Standardabweichung aus, die aus den DOPPLER-Spektren entnommen werden konnten. Relativ sicher unterscheidbar waren Schnee, Regen und Hagel. Zusätzlich ließ sich durch Aufsummierung der Tropfenvolumina über vorgegebene Zeitspannen der Massenfluß (die Regenintensität) und aus der Differenz zwischen dem gemittelten Spektrum und dem Rauschspektrum (ohne Niederschlag) die Niederschlagsmenge bestimmen. SHEPPARD [1990] konnte zeigen, daß sich aus den gemessenen DOPPLER-Leistungsspektren auch die Tropfengrößenverteilungen hinreichend genau nach einer iterativen Inversionsmethode bestimmen läßt, wenn bei der Abtastung bestimmte Bedingungen eingehalten werden.

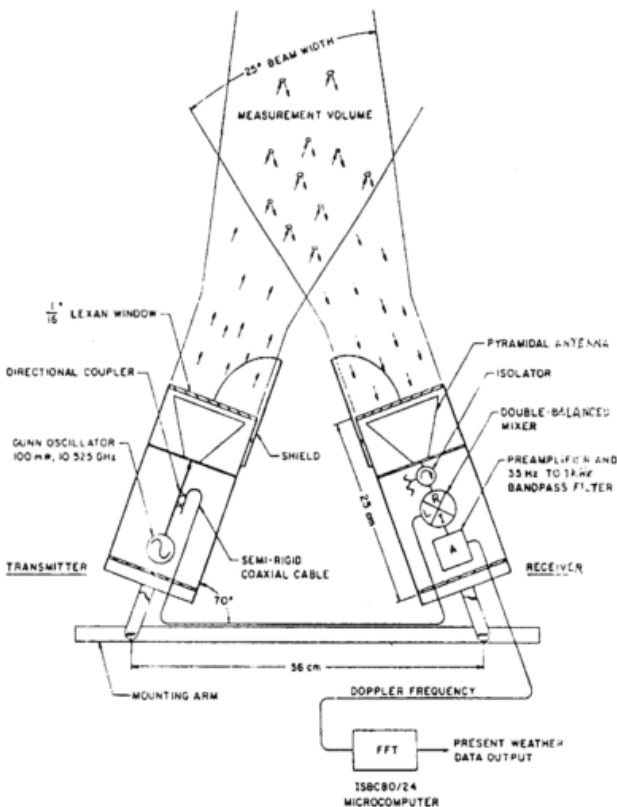


Abb. 6: Prinzip des Radar-Niederschlagsgebers (aus: SHEPPARD & WU [1985])

DUVERNOY & GAUMET [1996] gingen auf Vergleichsmessungen in Frankreich ein, bei denen zwei kleine DOPPLER-Radargeräte, die ursprünglich für die Fernmessung von Fahrzeuggeschwindigkeiten entwickelt worden waren, einbezogen wurden. Beide arbeiteten mit Gundiolen-Mikrowellengeneratoren mit Ausgangsleistungen im Milliwattbereich. Die Meßbedingungen unterschieden sich jedoch wesentlich. Das in monostatischer Konfiguration arbeitende Gerät strahlte die Energie über ein mit einem Radom abgedeckten Parabolspiegel senkrecht nach oben ab. Die gleiche Antenne diente auch zum Empfang der rückgestreuten Signale. Dadurch war das Sammelvolumen nicht eindeutig abgegrenzt. Auf das Radom auftreffende Niederschlagsteilchen konnten außerdem Störungen im DOPPLER-Spektrum verursachen. Das zweite Gerät besaß eine bistatische Konfiguration mit getrennter Sende- und Empfangsantenne, die beide um 45° geneigt waren und damit das Sammelvolumen außerhalb des Nahbereichs eindeutig festlegten. Für die Unterscheidung der Niederschlagsarten Regen, Nieselregen und Schnee wurde außer der mittleren Fallgeschwindigkeit der Niederschlagsteilchen zusätzlich die mittlere Streuung sowie der Maximalwert der Fallgeschwindigkeiten herangezogen, die sich aus den akkumulierten DOPPLER-Spektren entnehmen lassen. Bei Gerätevergleichen erwies sich das bistabile Gerät für die Unterscheidung der genannten Niederschlagsarten als besser geeignet. Es wurde deshalb für eine Einführung als Geber zur Unterscheidung der genannten Niederschlagsarten im französischen meteorologischen Netz empfohlen.

Die Regenintensität läßt sich beim Radarverfahren übrigens nicht nur aus der Rückstreuung sondern auch aus der Dämpfung der abgestrahlten Leistung ermitteln. RUF et al. [1996] benutzten ein bistatisches 35 GHz-Radar, bei dem Sender und Empfänger mit ihren Antennen unmittelbar nebeneinander in einem Gehäuse untergebracht waren und die Radarpulse durch einen Eckreflektor (Tripelspiegel) in einer Entfernung von einigen hundert Metern zurückgeworfen wurden. Niederschlagsmessungen erfolgen damit nicht punktuell sondern über eine Meßstrecke, deren Länge zwischen 100 und 1000 m liegen kann. Die Pulswiederholfrequenz betrug 2200 Hz, wobei abwechselnd horizontal und vertikal polarisierte Pulse abgestrahlt wurden. Die Verfasser zeigten, daß das Differentialverfahren, bei dem die Quotienten zwischen den empfangenen Leistungen beider Polarisationssebenen bestimmt werden, weniger von den Änderungen instrumenteller Parameter beeinflusst wird und damit bessere Stabilität aufweist. Zwischen der über 5 s gemittelten differentiellen Dämpfung $\Delta P = A_{PH} - A_{PV}$ gemessen in der Einheit [dB/km], und der Regenintensität P_R in der Einheit [mm/h] besteht eine von der Tropfenform weitgehend unabhängige Relation. Nach vorläufigen Meßergebnissen scheint der Zusammenhang zwischen ΔP und P_R jedoch nichtlinear zu sein, wie dies frühere Autoren angaben.

Über einen neueren Sensor zur Unterscheidung von Regen- und Schneefällen unterschiedlicher Intensitäten, der im Automatic Surface Observation System (ASOS) in den USA eingesetzt wird, hat GALLAGHER [1989] berichtet. NADOLSKI & GIFFORD [1995] beschrieben die in Verbindung mit dem Sensor einzusetzenden Algorithmen, um die erforderlichen Aussagen abzuleiten. Der als Light Emitter Diode Weather Identifier (LED-WI) bezeichnete Sensor erzeugt mit Hilfe einer LED und eines optischen Systems einen horizontalen Infrarotstrahl mit einem Querschnitt von 50 mm^2 und einer Länge von etwa 80 cm, der mit einer Frequenz von 50 kHz moduliert ist. Durch den Strahl

fallender Niederschlag erzeugt Szintillationen oder Frequenzänderungen. Durch Analyse des Leistungsspektrums des Empfangssignals werden Art und Intensität der Niederschläge erfaßt. Der intelligente Geber besitzt Diagnosefunktionen, mit denen Fehler in der Stromversorgung und Unterbrechungen des Lichtstrahls erkannt werden können. Er arbeitet wartungsarm. Neben einer gelegentlichen Reinigung der Fenster des optischen Systems ist jährlich eine Eichung erforderlich. Per Programm läuft jede Minute das Identifizierungsprogramm einmal. Dabei werden das Auftreten von Niederschlag (ja/nein-Entscheidung), die Niederschlagsart (Regen oder Schnee) und die Intensität (leicht, mittel stark) bestimmt. In den Entscheidungsvorgang werden die gültigen Meßdaten der letzten 10 min einbezogen. Falls die Minutenwerte voneinander abweichen, wird nach zweckmäßig vorgegebenen Algorithmen entschieden. Zur Bestimmung der Intensität von Schneefällen werden zusätzlich Meßwerte des Sichtmessers herangezogen. Der Geber, der von der Fa. Scient. Technology Incorporation gefertigt wird, kann zwischen 8 Niederschlagstypen unterscheiden, die in Tabelle 1 zusammen mit dem Ausgabesymbol aufgeführt sind.

NIEDERSCHLAGSTYP	SYMBOL
kein Niederschlag	Blank o.NOP
Typ unbestimmt	P
leichter Regen	R-
mittlerer Regen	R
starker Regen	R+
leichter Schnee	S-
mittlerer Schnee	S
starker Schnee	S+

Tabelle 1: Vom ASOS-Geber LEDWI unterscheidbare Niederschlagstypen (nach NADOLSKI & GIFFORD [1995])

Ebenfalls nach optischen Prinzipien arbeitete ein von LUNDBERG & JOHANSSON [1994] behandelter Geber, der das Auftreten und die Intensitäten von Niederschlägen erfaßte und die Niederschlagsarten Regen, Schnee und Graupel zu unterscheiden gestattete. Er war für die Beratung des schwedischen Straßenwetterdienstes bestimmt und erforderte daher keine hohe Genauigkeit bei der Bestimmung der Niederschlagsintensität. Das optische System erfaßte zum einen die Dämpfung des Lichts und zum anderen die Zeit, welche die Niederschlagsteilchen zum Passieren des parallelen Lichtbündels benötigten. Daraus wurden die bereits genannten Informationen abgeleitet. Bei Schneefall erwiesen sich Korrekturen des windbedingten Einflusses auf die Passagezeiten als unumgänglich.

2.2.5.3 Bestimmung der Schneehöhe

Gefallener Schnee bleibt bei Temperaturen $< 0^{\circ}\text{C}$ auf der Bodenoberfläche liegen, sofern er nicht durch starken Wind verweht wird. Die Schneedecke speichert das in ihr enthaltene Wasser. Die Höhe der Schneedecke bzw. ihr Wassergehalt sind für eine Reihe von Anwendungen wie Wintersport, Winterstraßenwetterberatung und Abflußschätzung bei Tauwetter für hydrologische Zwecke von Interesse und werden daher an meteorologischen und speziell an hydrometeorologischen Stationen erfaßt. Für automatisch arbeitende Stationen sind daher Meßeinrichtungen zur Erfassung der Schneehöhe bzw. des Wassergehaltes erwünscht.

Fernmessende Schneehöhenmesser sind vor allem in Japan entwickelt und eingesetzt worden. So berichteten OTSUKA &

SADAKATA [1957] über eine Fernmeßeinrichtung mit Funkübertragung, welche die äquivalente Wasserhöhe der Schneeschicht mit Hilfe radioaktiver Isotope maß. Dazu wurde in den Boden ein Cobalt-60-Gammastrahlenquelle eingebaut und in einer vorgegebenen Höhe senkrecht darüber der Strahlungsdetektor mit GM-Zählrohr mit Glimmerfenster angebracht. Um Änderungen der Zählrate durch Einflußgrößen ausschalten zu können, wurde neben dem Zählrohr eine Betastrahlenquelle mit einer rotierenden Beschattungsvorrichtung angebracht. Das verstärkte Ausgangssignal des Detektors modulierte einen Sender. An der Empfangsstelle wurde das übertragene Signal demoduliert und einem Zählratenmesser zugeführt. HENNING [1964] benutzte zur Bestimmung des Wassergehalts der Schneedecke im Gebirge das sowjetische Gerät M-31-M, das ebenfalls mit einer Gammastrahlenquelle arbeitete und für die Bestimmung großer Schneehöhen entwickelt worden war. Infolge von Störeffekten, die durch die Breite des Gammastrahls und die Bildung sekundärer Gammaquanten in der Nähe der Strahlenquelle bedingt waren, konnte bei der Bestimmung des Wassergehalts der Schneedecke insbesondere bei geringen Schneehöhen nicht mit einem konstanten Wert des Massenkoeffizienten der Extinktion gearbeitet werden. Durch Anbringen einer Korrektur ließ sich jedoch der wahre Wassergehalt bestimmen.

Einem unbeaufsichtigten Betrieb von Meßeinrichtungen mit radioaktiven Strahlenquellen steht man heute kritischer gegenüber. Deshalb wurde nach anderen Prinzipien gesucht, die ohne radioaktive Strahlenquellen auskommen und als automatisch arbeitende Meßeinrichtungen betrieben werden können.

TSUDA & UOTSU [1975] berichteten über Versuche mit optischen Schneehöhenmessern mit zwei Säulen in einem Abstand von 3,60 m. Beide Säulen wiesen schlitzförmige lichtdurchlässige Fenster auf. Die eine Säule enthielt als Lichtquelle eine Xenon-Entladungslampe, die andere als Detektor eine Solarzelle. Beide wurden bei der Messung synchron von unten nach oben bewegt, bis der Detektor die Lichtblitze empfing. Die dann erreichte Höhe entsprach der maximalen Schneehöhe zwischen den Säulen. Bei einer modifizierten Ausführung wurde auf mechanische Bewegungen verzichtet und stattdessen 38 Xenonlampen in der einen Säule sowie 152 Solarzellen in der anderen in gleichmäßigen Abständen übereinander angeordnet, so daß jeweils 4 Photoelemente von einer Blitzlichtlampe beleuchtet werden konnten. Solarzellen und Lampen wurden nacheinander umgeschaltet, bis die erste Solarzelle auf Blitzlicht ansprach. Die Zahl der Umschaltungen der Photodetektoren gab ein Maß für die maximale Schneehöhe zwischen den Säulen. Mit beiden Modellen wurde eine Auflösung von ± 1 cm erreicht. Als Einflußgrößen wirkte sich zum einen der Wind aus, der im Luv der Säulen gegenüber der Leeseite zu höheren Schneeablagerungen führte, und zum anderen Strahlung und Erwärmung in der Abschmelzphase, die um die Säulen den Schnee schneller wegtauen ließen.

KODAMA et al. [1977] führten Versuche zur Messung des Wassergehalts mit Neutronen durch, die aus der natürlichen Höhenstrahlung stammten. Im Gegensatz zu Gammastrahlen durchdringen schnelle Neutronen auch Schneeschichten mit höherem Wassergehalt in ausreichendem Maße. Bei den Versuchen wurden BF_3 -Neutronenzählrohre benutzt, die mit unterschiedlichen Schichten aus Paraffin, Blei und Cadmium überzogen waren. Nachdem die Strahlenschwächung durch Wasser in Vorversuchen bestimmt worden war, wurden die Detektoren vor Einbruch des Winters an der Erdoberfläche an zwei Orten installiert und Vergleichsmessungen über je eine Schneesaison durchgeführt,

die relativ gute Übereinstimmungen ergaben. Als Einflußgrößen wurden der Luftdruckeffekt und der Einfluß der Bodenfeuchte diskutiert. Der erstgenannte Effekt läßt sich bei Kenntnis des Luftdrucks korrigieren. Der zuletzt genannte Effekt machte sich vor allem unmittelbar nach der Schneeschmelze negativ bemerkbar. Durch eine bessere Cd-Ummantelung des Strahlungsdetektors hofft man jedoch, diese Störung deutlich reduzieren zu können.

Bei der japanischen Firma KAIJO DENKI Co., Ltd. liefen nach MORITA [1981] seit 1964 Versuche zur Entwicklung von Ultraschall-Schneehöhenmessern. Sie führten 1977 zu einem Gerät mit der Typenbezeichnung JMA-79, das in Verbindung mit der japanischen automatischen Station AMEDAS eingesetzt wurde. Schallsender und -empfänger befanden sich an einem Gestell in 6 m Höhe und waren nach unten gerichtet. Der Ultraschallsender strahlte 6,7mal pro Sekunde 40 kHz-Impulse senkrecht nach unten ab, die an der Erd- bzw. der Schneeoberfläche teils absorbiert oder gestreut, teils reflektiert wurden. Die reflektierte Ultraschallwelle gelangte zum Empfänger zurück. Der Kehrwert der Laufzeit t , den der Ultraschallimpuls vom Sender bis zur Rückkehr zum Empfänger braucht, diente als Meßsignal für den Abstand l der reflektierenden Unterlage vom Meßkopf gemäß der Beziehung

$$l = \frac{1}{2c_s \cdot t} \quad (8)$$

in der c_s die Schallgeschwindigkeit bezeichnet, die von der Temperatur, dem Dampfdruck und dem Luftdruck abhängig ist. Die beiden letztgenannten Einflußgrößen können vernachlässigt werden. Die Schneehöhe wurde nach der Beziehung

$$z_s = l_o - l \quad (9)$$

bestimmt, in der l_o den Abstand des Meßkopfes von der schneefreien Erdoberfläche bezeichnet. Der Temperatureinfluß auf die Schallgeschwindigkeit ließ sich berücksichtigen, indem die Lufttemperatur in der Höhe des Meßkopfes gemessen und mittels eines Spannungs/Frequenz-Wandlers in eine temperaturabhängige Pulsfrequenz umgesetzt wurde, die als Zählfrequenz für die Bestimmung der Zeitdauer t diente und so abzugleichen war, daß sie den Temperatureinfluß bei der Schallgeschwindigkeit kompensiert. Der so erhaltene Zählwert war von einem konstanten aber einstellbaren Zahlenwert abzuziehen, der dem Abstand des Meßkopfes von der schneefreien Erdoberfläche l_o entspricht. Die Laufzeit des Ultraschallimpulses konnte ferner durch den Wind beeinflußt werden. Der Wind in Bodennähe ist aber gegenüber der Schallgeschwindigkeit stets so klein, daß dieser Fehler vernachlässigt werden kann. Rauschquellen, die die Erfassung der Schalllaufzeit stören könnten, wurden durch konstruktive Maßnahmen weitgehend unwirksam gemacht. YASUSHI [1981] berichtete über den Einsatz dieses Schneehöhenmessers als Geber an automatischen Stationen des Typs AMEDAS und beschrieb das Ausgabeformat der Schneehöhenmeldung. Bis zum Berichtsjahr waren solche Meßsysteme an 62 automatischen Stationen im Einsatz; bei vollem Ausbau des Netzes sollen damit 200 Stationen ausgerüstet sein. Die Meßsysteme arbeiteten sehr zuverlässig. Der Meßfehler konnte in der Einsatzzeit von ± 3 cm auf ± 2 cm verringert werden. Um Meßfehler zu erkennen, wird eine automatische Prüfung der Datenqualität durchgeführt. Die Meßergebnisse wurden in den Vorhersagezentren hauptsächlich für Beratungen und Warnungen bei winterlichen Wetterlagen genutzt.

GOODISON et al. [1985b, 1988] berichteten über die Entwicklung eines kostengünstigen Ultraschall-Schneehöhenmessers in Kanada, der nach einem ähnlichen Prinzip arbeitet, wie das japanische Gerät. Die Temperaturkompensation erfolgt jedoch hier mit Hilfe der Software in Echtzeit. Dazu wurde ein als Microcontroller bezeichneter Mikrorechner in die Meßeinrichtung integriert. Um bei den Rechenvorgängen Zeit zu sparen wird der Korrektionsfaktor als Funktion der gemessenen Temperatur einer im Rechner gespeicherten Tabelle entnommen. Der Abstand zwischen dem Geber und der Erdoberfläche kann von Hand in den Mikrorechner eingegeben werden. Als Ausgangssignal wird die Schneehöhe als Impulszahl (in mm) bereitgestellt. Bei diesem Schneehöhenmesser wurde bei einer Auflösung von 1 mm eine mittlere Meßgenauigkeit von 2,5 cm erreicht, wobei jedoch bei Schneefall und Schneetreiben deutlich größere Fehler auftreten können. Weitere Ausführungen betrafen praktische Einsatzerfahrungen mit dem akustischen Schneehöhensensor.

Auch in den Vereinigten Staaten sind automatisch arbeitende Schneehöhenmesser entwickelt worden. MARRON & DAVIS [1982] berichteten über deren Einsatz am Mt. St. Helens, wo nach der Eruption im Mai 1980 wichtige Daten über Änderungen der Schneehöhe gewonnen wurden. Sie leiteten daraus die Forderung nach einer Weiterentwicklung für den Einsatz als Geber im Rahmen des Snow Telemetry System (SNOWTEL) ab.

YAMAGUCHI et al. [1994] prüften, inwieweit es mit einem frequenzmodulierten cw-Radar nach dem Synthetic-Aperture-Verfahren (SAR) möglich ist, Gegenstände nachzuweisen, die unter einer natürlichen Schneedecke verborgen sind. Die Reichweite des Verfahrens hing vom Wassergehalt der Schneedecke sowie den dielektrischen Eigenschaften des zu detektierenden Gegenstands ab und betrug 1,5...2,7 m. Die dargestellten Ergebnisse belegen, daß sich das Verfahren auch zur Bestimmung der Schneehöhe eignet und darüber hinaus Informationen über deren Strukturen, wie insbesondere Höhe der Neuschneedecke und Bereiche mit Wassereinschlüssen, liefert.

2.2.6 Geber für Gewitteraktivitäten

Gewitter beanspruchen wegen der mit ihrem Auftreten häufig verbundenen Risiken bei Wettervorhersagen und -beratungen ein besonderes Interesse. Schäden können insbesondere durch

- Starkregen,
- hohe Windgeschwindigkeiten und Böen,
- Blitzeinschläge in Gebäude, Energieübertragungssysteme, Geräte und Anlagen,
- statische Aufladungen von explosionsgefährdeten Gütern

verursacht werden. Dies dürfte einer der Gründe sein, weshalb an bemannten Wetterstationen der Beobachtung von Nah- und Ferngewittern besondere Bedeutung beigemessen wurde. Auch für die Flugberatung haben nach NEUMANN & HISCOX [1989] Gewitteraktivitäten einen hohen Stellenwert, da Blitzeinschläge in Flugobjekte auch bei modernen Flugzeugen noch ein nicht unerhebliches Risiko darstellen.

Bereits in den 60er Jahren wurde nach Möglichkeiten zur Erfassung von Gewitteraktivitäten an automatischen Stationen gesucht. Dabei standen Verfahren zum Nachweis von Blitzen im Vordergrund. Prinzipiell geeignet sind hierzu alle Effekte, die mit der Entstehung und Ausbreitung von Blitzen verbunden sind, wie

- die Erfassung von Potentialgradienten und ihrer Änderungen mit Feldmühlen bzw. Potentialsonden
- der Nachweis der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen, die von elektrischen Entladungen ausgehen, mit Hilfe geeigneter Antennen- und Empfangseinrichtungen
- die Erfassung von Lichterscheinungen der Blitze
- der akustische Nachweis des Donners.

Nach SULLIVAN & WELLS [1957] sowie KAISER & SCHULZE [1960] setzt sich die Feldstärke E , die durch eine Blitzentladung in einer Entfernung r erzeugt wird aus drei Komponenten zusammen:

- * der elektrostatischen Komponente E_s , die der elektrischen Ladung Q direkt und der 3. Potenz der Entfernung r^3 umgekehrt proportional ist,
- * der Induktionskomponente E_i , die der zeitlichen Ladungsänderung dQ/dt direkt und dem Quadrat der Entfernung r^2 umgekehrt proportional ist sowie
- * der Strahlungskomponente E_r , die d^2Q/dt^2 direkt und r umgekehrt proportional ist.

Bei Entfernungen bis 100 km überwiegt bei Blitzentladungen E_s und bei Entfernungen über 200 km E_r . Die beiden wesentlichen Entladungsarten bei Gewittern sind Wolken- und Erdblitz. Nach PIERCE [1956] können sie bei einer meßtechnischen Blitzzählung getrennt werden, da sie sich hinsichtlich des bevorzugten Frequenzbereichs, der vorherrschenden Polarität der elektrischen Felder und der mittleren Feldstärke in einer vorgegebenen Entfernung deutlich unterscheiden.

Um an den automatischen Stationen Ergebnisse zu erzielen, die sich an die bisherige Beobachtungspraxis anlehnen, sollten die *Blitzzähler* nur auf atmosphärische Entladungen in der Umgebung der Station ansprechen. Dazu sind die Blitzzähler auf einheitliche Frequenzbereiche ausulegen. Wie bereits SULLIVAN & WELLS [1957] hervorhoben ist der VLF-Bereich am günstigsten, weil sich in diesem die von Erdblitz abgestrahlte Energie konzentriert und kaum Störungen durch Rundfunksender zu erwarten sind. Die Empfindlichkeiten der Blitzzähler müssen einstellbar sein, so daß sich die Geber auf einheitliche Entfernungsbereiche abstimmen lassen. Die Empfindlichkeitskonstanz muß sich prüfen lassen. In der Regel wird die Blitzzahl über ein festes Zeitintervall (von z.B. 1 h) erfaßt. Nach LLOYD [1966] wurden bei den automatischen Wetterstationen in Südafrika zwei Blitzzähler benutzt, von denen der eine die Gesamtzahl der Blitze und der andere nur die Erdblitz zählte.

COORAY [1986] hat einen Überblick zur Entwicklung und Standardisierung von Blitzzählern gegeben. Er untersuchte theoretisch unter Nutzung neuerer Erkenntnisse bezüglich der Änderungen des elektrischen Feldes durch Blitzentladungen einige von internationalen Organisationen empfohlene Blitzzähler hinsichtlich ihrer mittleren Reichweite. Der Aufsatz zeigt, in welchem starkem Maße Blitzzähler in ihrem Verhalten sowohl von der Gerätetechnik (Wahl und Aufstellung der Antenne, Filterauslegung, Ansprechschwelle des Zählers) als auch durch wolkenphysikalische Effekte (Ladungsverteilung in der Wolke, Wolken- und Erdblitz, Länge des Blitzkanals, geographische Lage des Gewitters, elektromagnetisches Strahlungsfeld und elektrostatisches Feld) beeinflußt werden. Es läßt sich daher nur auf statistischer Grundlage eine mittlere Reichweite bei Einbeziehung

vieler Gewitter und Blitzentladungen festlegen. Die Vergleichbarkeit der Meßergebnisse verschiedener Stationen eines Netzes erfordert die Verwendung gleicher Blitzzählertypen an allen Stationen und die Justierung der Ansprechempfindlichkeit auf annähernd gleiche Reichweite.

Erste Nachweisgeräte für Blitze wurden in den 50er Jahren gebaut. Der von SULLIVAN & WELLS [1957] angegebene Blitzzähler mit Vertikalantenne und einem Frequenzbereich von 1...20 kHz wurde mit einigen Modifikationen 1959 von der WMO als Standard empfohlen. Bei der Messung des sich langsam ändernden statischen elektrischen Feldes kamen zur Erfassung des Potentialgradienten nach ANDERSON [1977] noch Geräte mit relativ hoher Trägheit zur Anwendung, die zwar Hinweise auf die Gewitteraktivität gaben, aber noch nicht eine Bestimmung der Blitzzahl erlaubten. Auch das in der Zeitschrift *Elektron. Design* [1975] sowie von SHURTLEFF [1975] beschriebene Frühwarnsystem benutzte an mehreren Meßstellen Potentialgradientsonden, die eine geringe Menge radioaktives Material (z.B. radioaktives Tritium) enthielten, das in der Sondenumgebung die Luft ionisierte. Das Sondenausgangssignal wurde in einem Elektrometervverstärker mit FET-Eingangsstufen verstärkt und lieferte eine vom Potentialgradienten abhängige Meßspannung. Mittels eines Spannungs-Frequenz-Umsetzers wurde das Meßsignal für die Übertragung zur rechnergeführten Hauptstation über Telefonleitungen bzw. Funk in ein Tonfrequenzsignal umgeformt. An der Hauptstation wurde das frequenzanaloge Signal in ein digitales Signal umgesetzt und in einem Minirechner verarbeitet. PETROCCHI & DICKSON [1977] berichteten über das Blitzwarnsystem AN/GMH-7 der US Air Force, das sowohl den Potentialgradienten mit Hilfe einer Feldmühle, als auch die durch Blitze bedingten schnelleren Feldänderungen mittels einer kapazitiven Plattenantenne erfaßte. Während man den Verlauf des Potentialgradienten analog aufzeichnete, wurden das zweite Meßsignal nach Filterung und Verstärkung einem Vierkanal-Amplitudenanalysator zugeführt, dessen Schaltschwellen so eingestellt waren, daß sie annähernd Blitzentfernungen von 5, 10, 20 und 40 nautischen Meilen entsprachen. Die am Ausgang des Vierkanalanalysators anfallenden Impulssignale wurden vom gleichen Registriergerät in 4 Ereignisspuren aufgezeichnet.

Einen photoelektrischen Blitzdetektor beschrieb OLIVIERI [1977b]. Als Sensoren dienten hierbei vier in Reihe geschaltete Silicium-Photoelemente, die in Form einer vierseitigen Pyramide zusammengefügt waren, um von der Einfallsrichtung der Blitzstrahlung möglichst unabhängig arbeiten zu können. Die Pyramidenanordnung wurde von einer Glaskalotte abgedeckt. Unter ihr befand sich in einem Gehäuse ein Impulsverstärker mit zwei CMOS-Stufen sowie ein Univibrator als Impulsformer. Die Anordnung besaß ausreichende Empfindlichkeit, um auch am Tage auf Blitze im Sichtbarkeitsbereich anzusprechen. Da durch Störsignale bisweilen einzelne Impulse ausgelöst wurden, denen keine Blitzentladung entsprach, empfahl der Verfasser, zwei identische Blitzdetektoren im Abstand von einigen Dekametern aufzustellen und deren Ausgangssignale einer Schaltung zuzuführen, die nur beim simultanen Ansprechen beider Detektoren einen Ausgangsimpuls abgibt.

Für die Gewitterüberwachung aussichtsreicher erschienen jedoch Verfahren, die auf der Ausbreitung der durch elektrische Entladungen erzeugten elektromagnetischer Wellen beruhen. Vervollkommnete Blitzzähler standen in den 60 Jahren zur Verfügung. Besondere Beachtung fand dabei das Prinzip von

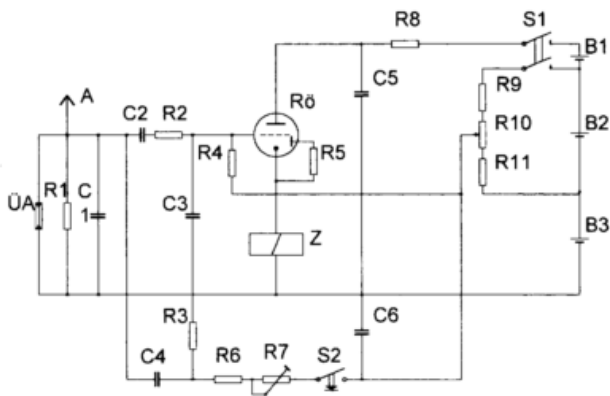


Abb. 7: Schaltung des Blitzzählers der TH Darmstadt (nach: FRÜHAUF [1965] - verändert)

PIERCE & GOLDE (siehe PIERCE [1956], FRÜHAUF [1965], GOLDE [1966]).

Abb. 7 zeigt die Schaltung eines Blitzzählers der TH Darmstadt, die von FRÜHAUF [1965] angegeben wurde. Er arbeitet mit einer Kaltkathodenröhre. Heute ist es auch möglich, solche Schaltungen mit Halbleiterbauelementen aufzubauen. Der zwischen Antenne und Erde liegende Überspannungsableiter ÜA dient zur Ableitung höherer Spannungen im Falle eines Blitzeinschlags in die Antenne. Durch Verwendung eines RC-Filters hinter der Antenne wird der Frequenzbereich des Blitzzählers auf den von Erdblitzen abgestrahlten Frequenzbereich abgestimmt. Das gefilterte Empfangssignal wird an das Gitter der Kaltkathodenröhre gelegt. Es führt bei hinreichender Amplitude zur Zündung der Röhre, die solange anhält, bis der Kondensator C5 entladen ist. Dabei fließt der Kathodenstrom zugleich durch den elektromagnetischen Zähler Z, der die Zahl der Blitzentladungen erfaßt. Nach Löschung der Kaltkathodenröhre lädt sich der Kondensator C5 wieder auf. Da während dieser Zeit keine Erfassung eines weiteren Blitzes möglich ist, darf die Aufladung nicht zu lange dauern. Eine gewisse Totzeit ist aber erwünscht, um die Mehrfachzählung einer Entladung auszuschließen. Für automatische Stationen werden Geräte gebraucht, die möglichst nur auf Erdblitze im Nahbereich innerhalb eines vorgegebenen Radius um den Stationsort ansprechen. Eine Abstimmung der Ansprechempfindlichkeit des Blitzzählers kann mit dem Potentiometer R10 erfolgen. Schalter S1 dient zur Inbetriebnahme des Blitzzählers, Schalter S2, mit dem ein Zählimpuls getriggert werden kann, zur Überprüfung der Funktion der Schaltung.

Trotz der Möglichkeit zur Empfindlichkeitseinstellung bei Blitzzählern ist die Abstimmung auf einen bestimmten Entfernungsbereich problematisch. Die Gründe liegen u.a. in der unterschiedlichen Energieabstrahlung von Blitzen, der Richtungsabhängigkeit der Antennenempfindlichkeit, und dem Fehlen eines Feldstärke-Standards (vgl. NEUMANN et al. [1988]), das bei den Justiervorgängen herangezogen werden könnte. Im bevorzugten Frequenzbereich von Erdblitzen (2 ... 15 kHz) werden für eine günstige Antennenanpassung sehr lange Antennen gebraucht, für die an meteorologischen Stationen bei vertretbarem Aufwand kaum Vorrichtungen für eine vertikale Aufstellung geschaffen werden können. In der Regel kommen daher horizontal ausgespannte Mehrdrahtantennen mit einer richtungsabhängigen Charakteristik zum Einsatz. CONNORS [1968] wies auf die Wetterabhängigkeit der Antennen-Ableitkapazität und deren Einfluß auf die Ansprechempfindlichkeit des Blitzzählers

hin. Bereits 1965 hatte FRITSCH die Voraussetzungen für die Einführung eines international genormten Verfahrens zur Blitzzählung ins Blickfeld gerückt. COORAY [1986] hob die unterschiedlichen Eigenschaften verschiedener Blitzzähler hervor. Ein ernstes Hindernis für den Einsatz derartiger Geber an unbemannten Stationen ist nach wie vor die leichte Beeinflussbarkeit von Blitzzählern durch Funkenstörungen, wie sie z.B. durch fehlerhafte Entstörung von Zündanlagen in Kraftfahrzeugen verursacht werden können. Diesem Problem kann man nur durch Meßeinrichtungen begegnen, die unterschiedliche Nachweistechniken nutzen. So sind Blitzzähler vorgeschlagen worden, die nicht nur auf Feldstärkeänderungen sondern auch auf optische oder akustische Blitzphänomene ansprechen und demzufolge komplizierter und kostenaufwendiger sein müssen.

In den letzten Jahrzehnten sind bedeutende Fortschritte bei den Systemen zur Gewitterortung erzielt worden, nachdem bereits nach Einführung des Wetterradars gezeigt werden konnte, daß sich damit auch Blitzentladungen nachweisen und lokalisieren lassen (vgl. LIGDA [1959]). Moderne Systeme zur Blitzortung sind in der Lage, die Gewitteraktivitäten in einem größeren Gebiet zu überwachen, das den Bereich eines automatischen Stationsnetzes überschreiten kann.

2.2.7 Geber für Sonnenschein und Strahlung

Zur vollständigen Beschreibung der Strahlungsverhältnisse an einem Ort müssen mehrere Strahlungsströme im kurz- und langwelligen Bereich erfaßt werden. Die dafür erforderlichen Geräte benötigen im Vergleich zu anderen meteorologischen Gebern relativ häufige Wartung, um unter allen Wetterbedingungen einwandfreie Meßwerte zu gewährleisten. Dazu gehört das Freihalten der Glas- oder Kunststoffkalotten oder -fenster über den Empfängerflächen von Tau- und Reif, Schnee, Eis- und Staubverunreinigungen. Die dazu notwendigen Arbeiten erschweren einen automatischen Betrieb von Strahlungsmeßgeräten. Es hat daher nicht an Versuchen gefehlt, deren Umfang einzuschränken. Kalotten lassen sich durch künstliche Ventilation und z.T. auch durch Beheizung von Tau- und Reifansatz freihalten; flüssiger Niederschlag und Schnee können hierdurch nach dem Ende des Niederschlagsereignisses relativ rasch entfernt werden. Das Beheizen der Kalotten mittels symmetrischer Wärmezuführung durch Strahlung bzw. Wärmeleitung wurde bei Strahlungsbilanzmessern bereits von FUNK [1959] und FRITSCHEN [1963] realisiert. Der letztgenannte Autor stellte dabei aber relativ große Meßfehler infolge des Heizens fest, welche die durch Taubeschlag verursachten bei weitem übertrafen. MCGINN et al. [1989] beschrieben ein Verfahren, bei dem die Wärme über die Halterung durch Wärmeleitung relativ gleichförmig beiden Kalotten zugeführt werden kann. Zwar treten hierbei ebenfalls kleine Unterschiede auf, die zu geringen Meßfehlern führen; sie lassen sich jedoch bereits bei der Eichung berücksichtigen. Ein Belüftungssystem für Pyranometer hat SONNTAG [1976] beschrieben. Für die Entfernung von Staubansatz haben sich mechanisch arbeitende Wischer bewährt, deren zeitweiliger Betrieb auch automatisiert werden kann. Sofern keine automatisch arbeitenden Vorrichtungen vorgesehen sind, muß das Stationspersonal u.U. mehrmals am Tage Eingriffe vornehmen. Da die meisten Strahlungsgeber bei Niederschlag keine zuverlässigen Meßsignale liefern, sollten die Niederschlagszeiten an automatisch arbeitenden Strahlungsmeßsystemen miterfaßt werden.

Die meisten Strahlungssensoren liefern nur Spannungen im Millivoltbereich und müssen daher über langzeitstabile Meßverstär-

ker an die Analog-Digital-Umsetzer oder über Spannungs-/Frequenz-Umsetzer an Zählschaltungen der automatischen Stationen angeschlossen werden. Eine besondere Bedeutung hat bei den Strahlungsgrößen die zeitliche Integration.

2.2.7.1 Sonnenscheingeber

Wegen des hohen Aufwands wird an konventionellen meteorologischen Stationen auf Strahlungsmessungen im engeren Sinne häufig verzichtet und stattdessen nur die *Sonnenscheindauer* erfaßt. Das Verhältnis zwischen der tatsächlichen Sonnenscheindauer und der astronomisch möglichen wird in erster Linie durch den Bewölkungsgrad bestimmt. Es bestehen jedoch auch stochastische Beziehungen zwischen Sonnenscheindauer auf der einen und direkter Sonnenstrahlung oder Globalstrahlung auf der anderen Seite, die sich jedoch nur für klimatologische Zwecke nutzen lassen.

Sonnenschein wurde früher als vorhanden angesehen, wenn sich hinter Gegenständen, die der Besonnung ausgesetzt waren, ein Schatten bildete. Dazu muß die Bestrahlungsstärke der direkten Sonnenstrahlung einen Grenzwert überschreiten, der oft als unkritisch betrachtet wurde, weil sich die Bestrahlungsstärke meist stark ändert, wenn Wolken die Sonne bedecken. Es hat sich jedoch gezeigt, daß nach Sonnenaufgang und vor Sonnenuntergang sowie auch am Tage beim Vorhandensein von Schleierbewölkung unterschiedliche Schwellwerte zu deutlich verschiedenen Sonnenscheindauern führen können. Deshalb wurde der Schwellwert international genormt. Dabei wurden die zahlreichen Meßergebnisse mit den an bemannten Stationen eingesetzten Sonnenscheinautographen nach CAMPBELL-STOKES berücksichtigt. Der Schwellwert wurde so gewählt, daß die sich nach der Definition ergebende Sonnenscheindauer im Mittel mit den Meßwerten des genannten Gerätes übereinstimmen. Das Vorhandensein von Sonnenschein wird nach der Definition der CIMO-VIII vom Jahre 1981 (WMO [1981], siehe auch DEHNE [1985, 1989]) dann angenommen, wenn die Bestrahlungsstärke der direkten Sonnenstrahlung auf eine Fläche senkrecht zur Einfallrichtung der Strahlen einen festen Schwellwert übersteigt. Als Schwellwert wurde 1977 der Wert von 200 W/m^2 vorgeschlagen. 1981 wurde der Schwellwert auf 120 W/m^2 herabgesetzt. Als zulässige Toleranz empfahl man einen Bereich von $\pm 20\%$. DEHNE [1985] hat experimentell untersucht, wie sich bei unterschiedlichen Bewölkungsverhältnissen Abweichungen des Schwellwertes im Rahmen der zulässigen Toleranz auf die Genauigkeit bei der Bestimmung der Sonnenscheindauer auswirken. Er kam zu der Schlußfolgerung, daß die von der WMO vorgegebenen Toleranzen zu vertretbaren Unsicherheiten bei den Werten der Sonnenscheindauer führen.

Sonnenscheingeber für automatische Stationen arbeiten entweder nach *kalorimetrischen Prinzipien*, bei denen die Temperaturdifferenz zwischen zwei Körpern unterschiedlicher Färbung oder Exposition als Indikator dient, oder nach *photoelektrischen Prinzipien*, bei denen die Differenz der Ausgangssignale von Photozellen – meist handelt es sich heute um Si-Photoelemente – bei unmittelbarer Sonnenbestrahlung und bei Beschattung ein Signal für das Vorhandensein von Sonnenschein liefern. Bei Geräten beider Prinzipien läßt sich die Ansprechempfindlichkeit regeln und entsprechend den geltenden Normen einstellen.

Geber für Sonnenschein, die nach dem kalorimetrischen Prinzip arbeiten, sind vor allem in älteren automatischen Systemen eingesetzt worden. Auf verschiedene Geräte dieser Art hat

TREUSSART [1961] in seinem Abschlußbericht der Arbeitsgruppe über automatische Wetterstationen hingewiesen. KIRKPATRICK [1973] berichtete über eine Eigenentwicklung, bei dem zwei Thermistoren mit gleicher Charakteristik in außen geschwärzte Metallkugeln von 5 mm Durchmesser eingebaut und diese ihrerseits in strahlungsdurchlässige Perspexkugeln von 10 mm Durchmesser eingesetzt wurden, die mit trockener Luft gefüllt waren. Eine der Kugeln wurde der direkten Sonnenstrahlung ausgesetzt, während die zweite durch einen Beschattungsring dagegen geschützt wurde. Nur bei hellem Sonnenschein stellt sich zwischen beiden eine signifikante Temperaturdifferenz ein, die mittels der Thermistoren in einer Meßschaltung erfaßt wurde, die ein Reedrelais betätigte. Solange das Relais erregt war, gab die Schaltung eine konstante Impulsfrequenz ab, die durch Untersetzung und Zählung die Sonnenscheindauer zu erfassen gestattete. Dieser Sensor wurde nach DAY et al. [1974] in der automatischen Station MOWOS genutzt. Auch HARROLD et al. [1977] setzten einen Sonnenscheindetektor mit Thermistoren als Sensoren ein.

Thermisch arbeitende Sensoren in Sonnenscheingebern haben den Nachteil, daß sie nicht trägheitsfrei sind und primär nur kleine Meßspannungen erzeugen, die in der Regel erst verstärkt werden müssen. Dagegen arbeiten photoelektrische Sensoren wie die Silicium-Photoelemente praktisch trägheitsfrei und erzeugen direkt Spannungen im Zehntelvoltbereich. Bei Wahl eines nicht zu großen Belastungswiderstands wächst der Photostrom nahezu linear mit der Beleuchtungsstärke an. Die spektrale Empfindlichkeitskurve dieser Bauelemente kommt der des menschlichen Auges nahe. Auch Si-Photodioden lassen sich als Lichtdetektoren einsetzen. Sie werden in der Regel mit einem Widerstand in Reihe in Sperrrichtung an eine Niederspannungsquelle geschaltet. Die Empfindlichkeit von Photoelementen und Photodioden ist jedoch temperaturabhängig. Dieser Temperatureinfluß muß kompensiert werden, um die Ansprechschwelle konstant zu halten. Realisiert wurden Sonnenscheingeber sowohl mit nur einem Photoelement als auch mit mehreren Photodetektoren. Die ersten arbeiten entweder mit einer rotierenden Beschattungsvorrichtung, einer Faseroptik mit rotierender Empfangsseite, mit einem rotierenden Spiegel oder einem rotierenden Schlitz mit Lichtleiter. Die letzteren kommen ohne bewegliche Teile aus, doch müssen hier die verschiedenen Photodetektoren in ihrer Empfindlichkeit aufeinander abgeglichen werden. Gerätebeschreibungen bzw. Berichte über den Einsatz in automatischen Stationen findet man bei USOL'CEV [1971a], COOK [1975], KODAIRA et al. [1975], PLAZY [1977], HARROLD et al. [1977], MAGNUSSON [1980], YANAGISAWA [1981], LAU [1981], LINDNER [1984] und GRÉGOIRE [1985]. Über vorläufige Ergebnisse eines Gerätevergleichs in Hamburg in den Jahren 1988/89 berichtete DEHNE [1989].

2.2.7.2 Strahlungsgeber

Sofern an automatischen Wetterstationen Strahlungsmeßgeräte im engeren Sinne netzmäßig zur Anwendung gekommen sind, handelt es sich hauptsächlich um *Pyranometer*. Van GYSEGEM [1981] hat gefordert, bei Untersuchungen des Stadtklimas zumindest die Globalstrahlung sowie die diffuse Himmelsstrahlung zu erfassen. KLINK & CURRY [1984] berichteten über die Errichtung eines Netzes mit 8 automatischen Stationen zur Erfassung der Globalstrahlung im Staate Ohio hauptsächlich für die Zwecke der landwirtschaftlichen Forschung. Pyranometer mit Thermosäule nach SONNTAG [1976, 1977] sind in den automatischen

Stationen der Typen AFMS-1 und AFMS-2 zur Erfassung der Globalstrahlung und mit Schattening zur Bestimmung der diffusen Himmelsstrahlung eingesetzt worden. Bei den neueren Systemen erfolgt die Schatteningkorrektur mit den von SCHÖNE & SONNTAG [1976] bestimmten Korrekturfaktoren bereits im Stationsrechner. Darüber hinaus wird hier die Sonnenscheindauer aus den Meßergebnissen der Global- und der diffusen Himmelsstrahlung nach einem von KLEMM & SONNTAG [1981] erläuterten Verfahren bestimmt, das Ergebnisse mit recht befriedigender Genauigkeit liefert. In ähnlicher Weise beabsichtigte YOUNG [1984b] eine Schätzung des Bedeckungsgrades aus dem Verhältnis zwischen gemessener und für wolkenfreien Himmel geschätzter Globalstrahlung unter Heranziehung der Streuung der Globalstrahlungswerte.

Neben den *Pyranometern mit Thermosäule* sind für automatische Messungen *Pyranometer mit Si-Photoelementen* entwickelt worden, die zwar ein besser verarbeitbares Ausgangssignal liefern, aber nicht im gesamten kurzwelligen Bereich gleiche Empfindlichkeit besitzen. Der Temperatureinfluß der Siliciumzellen muß sorgfältig kompensiert werden. Damit die Strahlungsempfänger das Cosinusetz wenigstens angenähert einhalten, ist ein Diffusor vor den Strahlungsdetektoren anzuordnen. MICHALSKY et al. [1988] beschrieben ein Pyranometer mit rotierendem Schatteningring, dessen Drehbewegung durch einen Schrittmotor angetrieben wird, den ein Mikrorechner steuert. Während der Messung dreht sich der Ring pro Minute einmal um seine Achse. Der Schatten nimmt dabei verschiedene Lagen zur Empfängerfläche ein. Damit ist es möglich, die Globalstrahlung und die diffuse Himmelsstrahlung bei unterschiedlichen Schatteningstellungen zu erfassen und zusätzlich den Wert der Schatteningkorrektur zu ermitteln.

Strahlungsmesser mit photoelektrischen Sensoren werden bevorzugt für die Erfassung von biologischen *Strahlungswirkungen* eingesetzt, bei denen es weniger auf hohe Meßgenauigkeit ankommt. Die spektrale Empfindlichkeit der Strahlungsempfänger ist dabei der der jeweiligen Wirkung anzupassen. Im Vordergrund stehen hier

- die spektrale Empfindlichkeit des menschlichen Auges bei der Erfassung von Beleuchtungsstärken
- das Absorptionsspektrum des Chlorophylls bei der Bestimmung der photosynthetischen Wirkung
- die spektrale Wirkungskurve der Erythembildung der menschlichen Haut.

Für solche Untersuchungen geeignete Sensoren sind u.a. von CROMMELYNCK [1977] und DEHNE [1977] beschrieben worden. Die Geräte müssen jedoch regelmäßig geeicht werden. Dafür haben ACEVES-NAVARRO et al. [1988] eine Eichmethode vorgeschlagen, bei der diese Pyranometer zusammen mit einem Präzisionsspektralpyranometer der Fa. EPPLEY aufgestellt und einheitlich justiert werden. Verglichen werden die Stundensummen an möglichst wolkenlosen Tagen. Die geeichten Pyranometer mit Si-Zellen wurden in einem Netz automatischer Wetterstationen in Nebraska eingesetzt.

Andere Strahlungsmesser sind an automatischen Stationen nur in Ausnahmefällen zum Einsatz gekommen. In den meisten Fällen handelte es sich um Stationen, an denen Personal für die genannten Wartungsarbeiten ständig oder zeitweise zur Verfügung stand.

Strahlungsbilanzmesser sind nicht allein an Wärmehaushaltsstationen mit automatischen Systemen zur Datenerfassung und -verarbeitung sondern auch bei solchen Anwendungen genutzt worden, wo Angaben über den Wärmehaushalt gebraucht werden. Dies trifft z.B. für manche Aufgaben in der agrarmeteorologischen Forschung sowie der technischen Klimatologie zu. Dabei wurden als Geber meist Geräte mit Kunststoffkalotten über den Empfängerflächen verwendet. HALLDIN & LINDROTH [1992] haben beim Vergleich von Bilanzmessern verschiedener Typen und Hersteller, die mit neuen Polyethylenkalotten versehen worden waren, beträchtliche Unterschiede gefunden, die auf ein differenziertes Verhalten gegenüber Störeinflüssen (wie unterschiedliche Empfindlichkeit für kurz- und langwellige Strahlung, Cosinus- und Hysteresefehler, abweichende temperatur- und windabhängigkeit des Eichfaktors, unterschiedliches Verhalten gegenüber Tau, Reif, Regen und Schnee) dieser Strahlungsgeber hindeuten. Zuverlässige Meßergebnisse konnten selbst bei Tau und Reif sowie bei Regen und Schnee nur mit dem ventilierten Strahlungsbilanzgeber nach SCHULZE und DÄKE (vgl. DÄKE [1972]) erzielt werden, der deshalb als De-facto-Standard vorgeschlagen wurde. Diese Ergebnisse belegen eindringlich, daß Strahlungsbilanzmesser an automatischen Stationen gegenwärtig nur eingesetzt werden sollten, wenn Wartung und regelmäßige Nacheichungen in dem erforderlichen Umfang gesichert werden können. Zur Verbesserung der Vergleichbarkeit sollten innerhalb eines Netzes nur Geräte des gleichen Typs und vom gleichen Hersteller aufgestellt werden.

Lediglich MAGNUSSON [1980] berichtete über den geplanten Einsatz einer Reihe von Strahlungsmessern wie Pyranometern, Pyrheliometern mit automatischer Sonnennachführung und Strahlungsbilanzmessern an automatischen Wetterstationen in Schweden. Ein derartiges Sortiment ist bisher meist nur an spezialisierten Strahlungsmeßstationen eingesetzt worden, die zumindest zeitweise bemannt sind. Zu deren Geberbestückung gehören neben Pyranometern auch Pyrheliometer zur Erfassung der direkten Sonnenstrahlung und Pyrgeometer für die langwelligeren Strahlungsströme. Bei diesen Strahlungsgebern werden vorwiegend Thermosäulen mit geschwärtzter Empfängerfläche als Meßfühler eingesetzt. Nur vereinzelt sind für Spezialzwecke auch modernere Sensorprinzipien genutzt worden. So berichteten BIRKELAND et al. [1985] über ein Radiometer, bei dem ein pyroelektrischer Detektor verwendet wurde. Da dieser Sensor nur auf Temperaturänderungen anspricht, mußte die durch eine FRESNEL-Linse konzentrierte Strahlung durch einen rotierenden Zerhacker mit einer Frequenz von 15 Hz moduliert werden. Inwieweit solche Sensoren sich im Vergleich mit den bisher üblichen in der Praxis bewähren und durchsetzen werden, läßt sich heute noch nicht einschätzen.

Besonders komplex ist die Automatisierungsaufgabe bei Pyrheliometern, weil diese der Sonne laufend nachgeführt werden müssen. Ein durch Mikrorechner gesteuerter Geber mit der Bezeichnung RASTA ist nach HEIMO & HOEGGER [1989] in der Schweiz vom World Radiation Center Davos entwickelt worden und bisher an einigen Stationen des ANETZ zum Einsatz gelangt. Der Mikrorechner im Geber übernahm nicht nur die Datenabfrage und -verdichtung, sondern übergab auch die verdichteten Werte an die automatische Station, überwachte das System und steuerte unter Nutzung der Zeitangaben seiner Echtzeituhr den Nachführmechanismus zur Verfolgung der Sonne. Das Pyrheliometergehäuse wurde ventiliert und schützte den Strahlungsempfänger gegen Witterungseinflüsse selbst unter Hochgebirgsbedingungen.

2.2.8 Geber für Wolkenhöhe

Für synoptische und klimatologische Zwecke sind neben der Wolkenart auch der Bedeckungsgrad für die gesamte Bewölkung und für die Wolken im unteren, mittleren und oberen Wolkenstockwerk von Interesse. Fast unentbehrlich sind Angaben über die Wolkenuntergrenze für die Luftfahrt. An bemannten Stationen lassen sich diese Angaben durch Beobachtungen gewinnen. Bereits BELHOUSE & DICKSON [1966] haben die Bereitstellung neuer Wolkenparameter an automatischen Stationen gefordert. Um auch an unbemannten Stationen zu ausreichenden Informationen zu gelangen, müßten Meßverfahren und Geräte zur Verfügung stehen, mit denen die Höhen der Wolkenuntergrenze und eventuell der Gipfelhöhe auch dann bestimmt werden können, wenn mehrere Wolkenstockwerke übereinanderliegen. Die Auswertung der über ein Zeitintervall durchgeführten Wolkenhöhenmessungen gestatten darüber hinaus Rückschlüsse auf den Bewölkungsgrad in den verschiedenen Wolkenstockwerken.

Strahlungs- bzw. Beleuchtungsmessungen sind versuchsweise genutzt worden, um Angaben über den Bewölkungsgrad in verschiedenen Wolkenstockwerken zu erhalten. Zur instrumentellen Erfassung der Bewölkungsverhältnisse unternahmen TASSO & BENEDICTI [1975] orientierende Vorversuche, bei denen

1. die Effektivstrahlung eines begrenzten Himmelsausschnitts mit Hilfe eines Strahlungsbilanzmessers mit Polyethylenhauben, der zur Begrenzung des Gesichtsfeldes von einem innen geschwärzten Aluminiumschirm umgeben war
2. das Verhältnis der Strahlungsintensitäten im blauen und roten Spektralbereich mittels Photowiderständen
3. das Verhältnis von polarisierter zur gesamten Strahlung mit einem Phototransistor, einem Photowiderstand und einem Polarisationsfilter

bei begrenztem Öffnungswinkeln bestimmt wurden. Während die erste Methode am Tage und in der Nacht einsetzbar ist, eignen sich die zweite und dritte nur für Tagesmessungen. Soll nach einer dieser Verfahren ein Geber für die Bewölkungsverhältnisse entwickelt werden, sind nach Ansicht der Verfasser Strahlungsempfänger mit engem Öffnungswinkel erforderlich, die entweder den Himmel abtasten oder auf die Position des Polarsterns ausgerichtet werden, wobei dann die räumliche Mittelung durch eine zeitliche ersetzt werden muß.

HILL [1975] wies auf amerikanische Versuche zur Erfassung des Bedeckungsgrades mit Hilfe von Radiometern mit kleinem Öffnungswinkel hin, die im sog. atmosphärischen Fenster (zwischen 10,5 und 12,5 μm) arbeiteten. Teilweise waren die Strahlungsmesser auf den Zenit gerichtet; andere wurden in einer Spiralbahn zwischen einem Höhenwinkel von 45° und dem Zenit bewegt. Sie erfaßten die Strahlungstemperatur, die nicht nur Rückschlüsse auf das Vorhandensein von Wolken im anvisierten Himmelsausschnitt, sondern auch auf die Wolkenhöhe erlaubte. Ein auf diesem Prinzip basierendes experimentelles Gerät ist von MAGNUSSON [1975] erläutert worden. Mit Hilfe einer Optik aus zwei rotierenden Spiegeln, von denen der eine seinen Winkel gegenüber dem Horizont variierte, wurde der Himmel zwischen einem Höhenwinkel von 40° und dem Zenit spiralförmig abgetastet. Das im Gerät verwendete IR-Strahlungsthermometer war im Wellenlängenbereich von 8...14 μm empfindlich. Um die gemessenen Strahlungstemperaturen verschiedenen Wolkenstockwerken zuordnen zu können, mußten die in den entsprechenden Niveaus vorherrschenden Temperaturen bekannt sein. Sie wur-

den jeweils den Ergebnissen des letzten Radiosondenaufstiegs entnommen und dienten zur Einstellung von drei Potentiometern des Niveaudetektors für tiefe, mittlere und hohe Wolken. Über Torschaltungen führte man die Meßimpulse Zählschaltungen zu, die den drei Niveaus zugeordnet waren. Nach jedem Abtastvorgang wurden die normierten Summenwerte, die den Bedeckungsgrad in den drei Wolkenstockwerken jeweils in Achtel angeben, von den Zählern in einen Speicher übernommen. Bei Niederschlag war das Gerät jedoch nicht arbeitsfähig, weil dann der Strahlungsempfänger einschließlich seiner Optik abgedeckt bleiben mußte.

Bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt haben sich Meßverfahren zur Bestimmung des Bedeckungsgrades in Abhängigkeit von der Wolkenhöhe, die nach radiometrischen Prinzipien arbeiten, im praktischen Einsatz als Geber für automatische Meßsysteme nicht durchsetzen können. Der Grund ist wohl in erster Linie darin zu sehen, daß Geräte nach diesen Verfahren relativ empfindlich auf eine Reihe von Einfluß- bzw. Störgrößen reagieren.

Geber für die Wolkenhöhe haben sich aus Meß- und Registriergeräten entwickelt. Nach OLBERS [1955] arbeiten Wolkenhöhenmesser im wesentlichen nach zwei verschiedenen Verfahren:

- der trigonometrischen Methode (auch als Triangulationsmethode bezeichnet)
- und der Laufzeitmethode.

Beide Verfahren benutzen im allgemeinen Lichtquellen und Strahlungsdetektoren. Für die Laufzeitmessung kommen jedoch neben Lichtwellen im sichtbaren Bereich und im nahen Infrarot auch Mikrowellen im Millimeterbereich in Betracht. Die Wellenlängen der Lichtquellen sind stets kleiner als die Durchmesser der Wolkentröpfchen. Für die Streuung gelten hier die Gesetzmäßigkeiten der MIE-Streuung. Nach COLLIS [1966] ist unter diesen Bedingungen der Volumrückstreuoeffizient der Summe über die Quadrate der Durchmesser aller im Einheitsvolumen enthaltenen Wolkentröpfchen proportional. Die Wellenlänge der Millimeterwellen ist groß gegenüber dem Durchmesser der Wolkentröpfchen. Es gelten daher für diese die Gesetzmäßigkeiten der RAYLEIGH-Streuung, für die der Volumrückstreuoeffizient der Summe über die 6. Potenzen der Durchmesser der Wolkentröpfchen direkt und der 4. Potenz der Wellenlänge umgekehrt proportional ist.

Bei der *trigonometrischen Methode* sind zwei räumlich getrennte Einheiten erforderlich, die als Sender und Empfänger bezeichnet werden. Im Sender befindet sich die Lichtquelle und im Empfänger der Detektor; je nach der maximal erfaßbaren Wolkenhöhe müssen beide in einer festen horizontalen Entfernung voneinander aufgestellt werden. Meist richtet der Sender, wie in Abb. 8 gezeigt, seinen Lichtstrahl vertikal nach oben und der Empfänger ist entweder um eine horizontale Achse quer zur Verbindungslinie zwischen beiden Teilen schwenkbar (fixed-beam ceilometer) oder es werden zwei um 180° versetzte Detektoren in einem Empfänger zusammengefaßt, wobei die Detektoranordnung um eine horizontale Achse rotiert (rotating beam ceilometer). Bei anderen Geräten wird der Empfänger vertikal nach oben gerichtet und der Sender wird geschwenkt oder rotiert. Um das Einfallen direkter Sonnenstrahlung in den Empfänger auszuschließen, wird der Sender in der Regel nördlich vom Empfänger aufgestellt. Die Visierlinie des Empfängers bewegt sich in einer Vertikalebene. Das vom Sender abgestrahlte Licht wird beim Vorhandensein von Bewölkung teilweise gestreut. Es erreicht

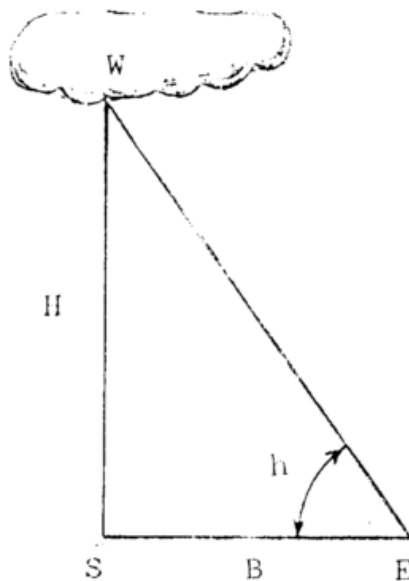


Abb. 8: Geometrisches Schema des Wolkenhöhenmessers nach dem trigonometrischen Prinzip
 W: Wolke H: Höhe der Wolkenuntergrenze
 S: Sender B: Basislänge
 E: Empfänger
 (aus: OLBERS [1955])

den Detektor im Empfänger aber nur dann, wenn der Rückstreuort in der Ziellinie des Empfängers liegt. Bewegt sich die Visierlinie des Empfängers von unten nach oben, so ist deren Höhenwinkel, bei dem der Detektor zum ersten Mal Streulicht nachweist, ein Maß für die Wolkenuntergrenze. Damit die Wolkenhöhenmessung auch am Tage beim Vorhandensein diffuser Himmelsstrahlung möglich ist, muß sich das künstliche Licht der Lichtquelle vom natürlichen Licht unterscheiden lassen. Diese Voraussetzung ist bei Verwendung von moduliertem Licht oder von kurzen Lichtimpulsen erfüllt. Auch die Wahl des Spektralbereichs des künstlichen Lichts spielt dabei eine gewisse Rolle. Das Meßsignal wird bei der trigonometrischen Methode aus der Winkelstellung des Empfängers bzw. des Senders gewonnen. Wird die Entfernung zwischen Sender und Empfänger als Basislänge l_b , die Höhe der Wolkenuntergrenze mit H_w und der Höhenwinkel, um den der schwenkbare Teil gegenüber der horizontalen Stellung geneigt ist, mit h_w bezeichnet, so errechnet sich die Höhe der Wolkenuntergrenze nach der Beziehung

$$H_w = l_b \cdot \tan h_w \quad (10)$$

Der relative Fehler bei der Bestimmung der Wolkenhöhe errechnet sich nach OLBERS [1955] gemäß der Formel

$$\frac{\delta H_w}{H_w} = \frac{2 \cdot \delta h_w}{\sin 2h_w} \quad (11)$$

Der geringste Fehler ergibt sich demzufolge für $h_w = 45^\circ$, d.h. wenn Basislänge und Wolkenhöhe gleich sind. Damit sich die Wolkenuntergrenze hinreichend genau bestimmen läßt, muß die Basislänge l_b in Abhängigkeit vom Meßbereich des Gerätes entsprechend gewählt werden. BROUSAIDES [1982] hat vorgeschlagen, einen Sender mit zwei Empfängern zu kombinieren, die auf einer Linie mit dem Sender in unterschiedlicher Entfernung anzuordnen sind und von denen der eine die tieferen, der andere die höheren Wolken erfaßt.

OLBERS [1955] verglich die technischen Daten verschiedener Wolkenhöhenmesser, die fast alle die Triangulationsmethode nutzen. Ein Wolkenhöhenmesser, der nach diesem Verfahren im Impulsbetrieb arbeitet, ist von LANG [1958] und FRÜNGEL [1961] beschrieben worden. Mit moduliertem Licht arbeitete das Gerät von BOŽEVIKOV [1960]. Daß es auch möglich ist, beim Empfänger ohne bewegte Teile auszukommen, bewies SREEDHARAN [1977], der eine sphärische Linse in Verbindung mit einem Mehrfachdetektorkopf aus Subminiatur-Photodioden nutzte, von denen in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe jeweils eine ansprach.

Meßwerte von Wolkenhöhenmessern werden durch systematische Fehler infolge von Justierunsicherheiten der Geräte, durch zufällige Meßfehler, durch zufallsbedingte Echosignale und durch turbulente Schwankungen der Wolkenuntergrenze beeinflusst. Um trotz dieser Einflüsse zu aussagekräftigen Daten zu gelangen, ist eine Verarbeitung der Meßdaten von Wolkenhöhenmessern erforderlich. ROBINSON [1975] hat für den Einsatz von Rotating-beam-Ceilometern an automatischen Stationen vom Typ MARS sowohl einen Verarbeitungsalgorithmus angegeben, nach dem sich signifikante Wolkenbasen ableiten lassen, als auch einen aus DTL- und MOS-Schaltkreisen aufgebauten Prozessor für die Verarbeitungen beschrieben.

Die *Laufzeitmethode* beruht auf der Messung der Laufzeit elektromagnetischer Wellen von der Quelle am Boden zur Wolkenuntergrenze und von dort zurück zum Detektor. Quelle und Detektor können sich hierbei in einem Gerät befinden oder benachbart in getrennten Gehäusen aufgestellt werden. Im allgemeinen wird ein Signal in Zenitrichtung abgestrahlt. Für diesen Fall gilt, wenn c_L die Lichtgeschwindigkeit und t die Laufzeit bezeichnen,

$$H_w = \frac{c_L \cdot t}{2} \quad (12)$$

Bei der hohen Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen ist hinsichtlich der Zeitmessung eine hohe Auflösung notwendig. Das erfordert trägheitsarme Detektoren, den Einsatz von Verstärkern, deren Verstärkungsgrad mit der Laufzeit definiert ansteigt, und die Verwendung schneller Analog/Digital-Umsetzer. Bei dem von der Fa. Vaisala Oy entwickelten Gerät CT 12K wird nach LÖNNQVIST [1985] die zurückgestreute Leistung mit einer Abtastfrequenz von 10 MHz in Echtzeit erfaßt. Die digitalisierten Signale werden über eine vorgegebene Zahl von Lichtimpulsen für jedes Höhenintervall aufsummiert und in einem RAM-Speicher sehr kurzer Zugriffszeit zwischengespeichert. Am Ende des Meßintervalls werden die Profildaten von einem Prozessor gelesen, der daraus verdichtete Informationen über die Wolkenhöhe ableitet.

Für die Laufzeitmessung können Licht- oder Millimeterwellen eingesetzt werden. Im letztgenannten Falle handelt es sich um ein *Wolkenradar*. Bevorzugt werden hierfür Mikrowellen von 35 GHz oder 95 GHz, was einer Wellenlänge von etwa 8,6 mm bzw. 3 mm entspricht. Die Wellenlänge von 8,6 mm reicht aus, um damit Wolken nachzuweisen, deren Tröpfchendurchmesser $> 15 \mu\text{m}$ sind; andererseits ist sie noch ausreichend groß gegenüber dem Durchmesser der Wolkenröpfchen, so daß die Millimeterwellen imstande sind, auch dichte Wolken ohne starke Schwächung zu durchdringen. Dadurch kann man nicht nur die Höhe der Wolkenbasis, sondern auch deren obere Begrenzung in der gesamten Troposphäre bestimmen. Die Möglichkeit einer Abschätzung von Wolkenparametern auf Grund von Radarmessungen bei 1 cm Wel-

lenlänge hat bereits ATLAS [1954] untersucht. Dort findet man auch weitergehende Literaturangaben. Auch die Messungen des Wolkenradars sind bei einsetzendem Regen gestört. In diesem Falle scheint die Wolkenuntergrenze abzusinken. Bei größeren Intensitäten ist die Höhe der Wolkengipfel nicht mehr feststellbar. Nachteilig für die Verwendung solcher Gerätesysteme an automatischen Stationen sind ferner die hohen Anschaffungs- und Betriebskosten. Ihr Einsatz beschränkt sich daher im allgemeinen auf die Forschung.

Bei älteren, im optischen Bereich arbeitenden Geräten kamen als *Lichtquellen* Scheinwerfer mit moduliertem Licht oder Funkenkammern zur Erzeugung von Lichtimpulsen zur Anwendung. Später wurden diese durch handelsübliche Gasentladungslampen (Elektronenblitzlampen) und in neuerer Zeit durch Laser-Lichtquellen abgelöst (siehe MAGNUSSON [1980], RICO [1991] und KUNZ [1996]). Laser bieten den Vorteil, daß sich das monochrome kohärente Licht sehr gut bündeln läßt. Der vom Laser erzeugte Lichtstrahl muß jedoch durch eine geeignete optische Anordnung im Sender aufgeweitet werden, damit die Augensicherheit gewährleistet wird und ein ausreichend intensives Rückstreusignal zustande kommt. Das vom Empfänger aufgenommene Streulicht ist auf den Detektor zu fokussieren. Es existieren heute Festkörper-, Gas- und Halbleiterlaser für unterschiedliche Wellenlängen vom Ultraviolett- bis zum Infrarotbereich, die über längere Einsatzzeiten zuverlässig arbeiten. In modernen Gebern werden GaAs-Injektionslaser bevorzugt, die Pulse kurzer Dauer und hoher Wiederholfrequenz im nahen IR-Bereich erzeugen und deren Strahlung für die Augen ungefährlich ist. Wegen der Alterung der Laser müssen die Geräte nach LÖNNQVIST [1985] mit einer diffizilen Überwachungs- und Regelelektronik versehen sein.

Als *Strahlungsdetektoren* für Licht kamen bei älteren Geräten ausschließlich Photozellen unterschiedlicher Typen mit geringem Eigenrauschen zum Einsatz. Zum Nachweis von Laserstrahlung werden heute vielfach Si-Avalanche-Photodioden eingesetzt. Um ein gut verarbeitbares Signal zu erhalten, werden rauscharme elektronische Verstärker nachgeschaltet. Bei moduliertem Licht verwendet man Schmalbandverstärker; bei kurzen Lichtimpulsen müssen hingegen Breitbandverstärker eingesetzt werden (vgl. OLBERS [1955]). Zur Fokussierung des Reflexlichts auf dem Photodetektor werden meist Teleskope mit Parabolspiegel genutzt. Ähnliche Vorrichtungen dienten bei Scheinwerfern zur Erzeugung eines annähernd parallelen Lichtbündels.

Moderne Geräte mit leistungsstarken Laser-Lichtquellen sind in der Lage, mehrere übereinander angeordnete Wolkenstockwerke getrennt nachzuweisen, sofern die Lichtextinktion innerhalb der unteren Wolkenschichten nicht zu stark ist. Unsicher wird die Bestimmung der Wolkenbasis bei Regen, wenn sich die Wolkenuntergrenze schlecht definieren läßt. Viele Geräte sind jedoch auf Anwendungen im Bereich des Flugwesens ausgelegt und erreichen nur Maximalhöhen, die deutlich unter der Tropopausehöhe liegen. Aus einer Folge von Wolkenhöhenmessungen lassen sich angenähert Bedeckungsgrade für verschiedene Wolkenniveaus ableiten, indem der räumliche durch den zeitlichen Mittelwert ersetzt wird (vgl. WMO-Report No. 65 [1997]).

Vergleiche von Wolkenhöhenmessern, die nach verschiedenen Prinzipien arbeiten (wie Fixed-beam Ceilometer, Rotating-beam Ceilometer und Laser Ceilometer) die im Jahre 1974 von BRADLEY & LEFKOWITZ [1975] durchgeführt wurden, zeigten z.T.

erhebliche systematische Unterschiede selbst zwischen Geräten des gleichen Typs. Die Eignung eines Wolkenhöhenmessers hängt jedoch nicht allein vom Meßprinzip sondern auch vom jeweiligen Anwendungsfall ab. Offenbar waren die Differenzen zwischen verschiedenen Geräten anfangs teilweise auf fehlerhafte Justierungen der Geräte zurückzuführen. Die neu entwickelten Lasergeräte schnitten bei diesen Versuchen relativ gut ab. Die Experimente sollten weitergeführt werden mit der Zielstellung, Methoden zu entwickeln, nach denen die Ergebnisse von Wolkenhöhenmessungen verarbeitet werden können, um objektive Beobachtungen der Höhe der Wolkenuntergrenze und des Bedeckungsgrades zu erhalten. MULLER & JANSSE [1984] wiesen auf Ergebnisse hin, wonach die damaligen Lasergeräte durch Regen mäßiger Intensität stärker gestört wurden als Rotating-beam Ceilometer. Auch beim Vorhandensein von Nebel traten Probleme auf, die den Nachweis einer darüber befindlichen Wolkenschicht erschwerten. Offenbar sind jedoch bei den neueren Lasergeräten solche Probleme durch Änderungen in Hard- und Software weitgehend behoben worden.

Internationale Vergleiche von Wolkenhöhenmessern, wie sie 1986 durchgeführt wurden, bestätigten nach OULDRIDGE et al. [1988a, 1988b], daß moderne Laser-Ceilometer zuverlässiger arbeiten und bessere Ergebnisse liefern. Trotzdem bleiben auch hier eine Reihe von Problemen, die insbesondere an das Auftreten von Niederschlägen sowie von Sichtbehinderungen gebunden sind. Die in gleichbleibenden Intervallen durchgeführten Messungen liefern nach GALLAGHER [1989] meist nur vom Rauschen bereinigte Angaben zu den augenblicklich vorhandenen Wolkenbasen in bis zu drei Niveaus. Durch geeignete Algorithmen, wie sie beispielsweise von ROBINSON & McNAY [1989] beschrieben wurden, müssen daraus die Bedeckungsgrade in verschiedenen Wolkenstockwerken abgeleitet werden.

Auch moderne Wolkenhöhenmesser befriedigen noch nicht alle Bedürfnisse. Sieht man vom Wolkenradar ab, das zum Nachweis von Wolken im gesamten Troposphärenbereich geeignet ist, aber bei intensiveren Niederschlägen auch keine zuverlässigen Daten über die Wolkenuntergrenzen liefert, reicht der Meßbereich optischer Wolkenhöhenmesser oft nur bis zu wenigen tausend Metern Höhe. Damit sind nur die niedrigen und allenfalls die mittelhohen Wolken, nicht aber die hohen Wolken in der Troposphäre erfaßbar. Für das Flugwesen reichen zwar die erzielbaren Meßhöhen aus, nicht jedoch für allgemeine meteorologische Anwendungen. Hinzu kommt, daß selbst starke Impulslaser nach KLAPHECK [1987] dichte und mächtige Wolken mit niedriger Wolkenbasis nicht durchdringen, so daß eventuell darüberliegende Wolken nicht mehr nachgewiesen werden können. Andererseits sind mit Lidar-Spezialgeräten des Meteorologischen Observatoriums Hamburg Cirren im Höhenbereich 2...13 km gemessen worden. Wenn auch moderne Lasergeräte gegenüber Niederschlag und Nebel weniger empfindlich sind als die älteren Geräte, lassen sich Fehlmessungen bei Regen und stärkerem Schneefall sowie bei Nebel mitunter nicht vermeiden. Umgekehrt können nach MASTERSON et al. [1966] Dunstschichten bereits Echos liefern, die den Schwellenwert des Empfängers überschreiten und beim Einsatz an automatischen Stationen Wolken vortäuschen würden. Ein Teil der genannten Störgrößen läßt sich teilweise durch aufwendige Verarbeitungsalgorithmen beseitigen.

Ein weiteres Hindernis, das sich einem breiteren Einsatz solcher Wolkenhöhenmesser an automatischen Stationen entgegenstellt, sind die relativ hohen Anschaffungs- und Betriebskosten der Ge-

räte. Deshalb werden heute in Netzen automatischer Stationen nur ein Teil der Stationen mit Wolkenhöhenmessern ausgerüstet. Wegen ihrer besonderen Bedeutung für die Luftfahrt insbesondere in der Start- und Landephase kommen sie auf Flugplätzen mitunter in mehreren Exemplaren zum Einsatz.

Wolkenhöhenmesser, die als Geber für automatische Stationen benutzt werden sollen, müssen die gemessenen Informationen in geeigneter Form ausgeben können. Sollen Systeme, die ursprünglich nur als Anzeige- oder Registriergeräte entworfen wurden, als Geber für automatische Systeme eingesetzt werden, sind meist Anpassungen notwendig, so weit nicht bereits bei deren Entwicklung ein Digitalausgang vorgesehen wurde (vgl. BLEEK [1978]). Außerdem sollen die Wolkenhöhengeber über eine automatisch geregelte Heizung verfügen, die ein Beschlagen von optischen Teilen und der Abdeckplatte verhindert und gefallenen Niederschlag auf dieser Glasplatte rasch abtrocknen läßt. Von modernen Geräten wird darüber hinaus eine interne Überwachung wichtiger Funktionen erwartet.

Die Erzeugung der Lichtimpulse, die Beheizung und weitere Zusatzfunktionen erfordern eine Leistung, die im allgemeinen nur an solchen Stationsorten aufgebracht werden kann, an denen Netzanschluß zur Verfügung steht.

2.2.9 Sichtgeber

Die Entfernung, in der ein Gegenstand gerade noch zu sehen ist, hängt nicht allein von den meteorologischen Bedingungen ab, sondern auch von einer Reihe von Eigenschaften des Gegenstands wie Größe, Färbung, Kontrast zur Umgebung und Eigenleuchten (z.B. bei nächtlichen Lichtquellen) sowie von Eigenschaften des menschlichen Auges. Grundsätzlich muß bei der Sichtweite zwischen Tages- und Nachtsicht unterschieden werden. Angaben über die Sichtweite werden vor allem im Flug- und Verkehrswesen gebraucht.

Als *meteorologische Sichtweite* wird die horizontale Entfernung definiert, in der die Transmission auf den Wert $Tr = 0,05$ abgefallen ist, der etwa der mittleren Kontrastschwelle des menschlichen Auges entspricht, die größere individuelle Abweichungen aufweist und außerdem von der Umgebungshelligkeit abhängig ist. Die spektrale Empfindlichkeit des Meßsystems sollte mit der des menschlichen Auges übereinstimmen. Die meteorologische Sichtweite ist im Gegensatz zu der durch Augenbeobachtung gewonnenen Sichtweite eine physikalische Größe. Sie entspricht etwa der Entfernung, in der ein schwarzer Gegenstand, der unter einem nicht zu kleinen Sehinkel wahrgenommen wird, sich bei Tagesbeleuchtung gerade noch vom Hintergrund abhebt und mit dem Auge bei normaler Kontrastschwelle erkennbar ist. Die meteorologische Sichtweite kann an einem Ort von der Himmelsrichtung abhängig sein. Für praktische Zwecke interessieren in diesem Falle die minimale und die vorherrschende Sichtweite. SHEPPARD [1980] hat experimentell untersucht, wie die meteorologische Sichtweite von der durch Beobachtungen in verschiedenen Richtungen gewonnenen vorherrschenden Sichtweite abhängt und hierbei vor allem bei Nebel und stärkerem Schneefall bedeutende Abweichungen und Streuungen festgestellt. Ein Teil der Abweichungen ist offenbar auf räumliche Unterschiede der Sichtbedingungen zurückzuführen.

Nach BRADLEY & LEFKOWITZ [1980] sowie SHEPPARD [1980] gehört die Sichtweite zu den am schwierigsten zu automatisierenden Größen. Für die Bestimmung der meteorologischen Sichtweite kommen vornehmlich zwei Verfahren in Betracht:

- die Erfassung des Transmissionsvermögens und
- die Erfassung des Streulichts in einem bestimmten Winkelbereich.

Als Lichtquellen für Sichtmesser wurden bei älteren Geräten Scheinwerfer und Gasentladungslampen eingesetzt. Bei modernen Geräten sind in steigendem Maße gepulste lichtemittierende Dioden (LEDs), z.T. auch Festkörper-, Dioden- und Halbleiter-Laser (siehe BROWN [1968] sowie LEONG [1995]) zur Anwendung gekommen, die aus Gründen des Augenschutzes bevorzugt im nahen Infrarotbereich arbeiten (vgl. MALLANT [1988]).

Transmissometer messen die Abnahme eines Lichtstroms durch Extinktion über eine längere Strecke in der Größenordnung von Dekka- bis Hektometern. Über die Erprobung eines automatisch arbeitenden Transmissometers, das für den Einsatz an automatischen Wetterstationen entwickelt wurde und über die Fähigkeit zur Fernübertragung der Meßwerte in Form eines Morsecodesignals verfügte, ist bereits von SARTOR [1954] berichtet worden. Um bei diesen Geräten Lichtquelle und Empfänger in einem Gehäuse kombinieren zu können, wird häufig ein Tripelspiegel verwendet, der das Licht wieder zum Ausgangsort reflektiert. Die Länge der Meßstrecke entspricht dann der doppelten Entfernung zwischen Gerät und Spiegel. Eine relativ lange Meßstrecke erschwert die Geräteaufstellung, da die Meßstrecke horizontal liegen soll und neben dem Sendeteil auch das Empfangsteil bzw. der zu beheizende Tripelspiegel mit elektrischer Energie versorgt werden muß. Sie bringt andererseits den Vorteil, daß die Messung für eine weitere Umgebung um den Aufstellungsort repräsentativ ist.

Transmissometer liefern Ausgangssignale, die der Transmission Tr proportional sind. Diese Größen müssen in die meteorologische Sichtweite V_s umgerechnet werden. Bei Transmissometern erfolgt die Umrechnung im allgemeinen nach der Formel von KOSCHMIEDER

$$V_s = l_b \frac{\ln \epsilon_s}{\ln Tr} \quad (13)$$

in der l_b die Basislänge (Entfernung vom Sender eventuell über den Spiegel zum Empfänger), Tr die Transmission, und ϵ_s die Kontrastschwelle des menschlichen Auges bezeichnen. Die Transmission Tr wird direkt gemessen als Verhältnis des empfangenen Lichtstroms Φ zum abgehenden Lichtstrom Φ_0 . Der Wert der Kontrastschwelle wird mit $\epsilon_s = 0,05$ angenommen. SHEPPARD & CLINK [1975] haben darauf hingewiesen, daß beim Transmissometer die Empfindlichkeit an beiden Enden des Meßbereichs deutlich zurückgeht. Der praktisch nutzbare Meßbereich reicht etwa von der halben Basislänge bis zum 15-fachen dieser Bezugslänge.

Andere Umrechnungen gehen von der Formel von ALLARD aus (siehe AFINOGENOV [1981]).

Nephelometer messen das von einem Lichtstrahl durch Streuung abgelenkte Licht unter einem vorgegebenen Winkel zum Lichtstrahl. Die bekannt gewordenen Nephelometer arbeiten mit unterschiedlichen Streuwinkeln sowohl im Bereich der Rückwärts- als auch der Vorwärtsstreuung. CHARLSON et al. [1967] beschrieben ein integrierendes Nephelometer, bei dem das im Streuwinkelbereich von 8° bis 170° im Gerätegehäuse gestreute Licht einer Blitzlichtlampe mittels eines Photomultipliers erfaßt

wurde. LEONG [1995] beschrieb ein Nephelometer, bei dem die Streuung vom bestrahlten Aerosolvolumen gleichzeitig aus 15 Polarwinkeln zwischen 23° und 128° gemessen wird. Die auf diese Weise ermittelten Streukoeffizienten lassen sich sowohl zur Berechnung der Sichtweite als auch zur Bestimmung von Aerosolkonzentrationen nutzen. Von den meisten modernen Geräten wird das nach vorn gestreute Licht erfaßt. Die Lichtstrecke eines Streulichtmessers ist mit einer Länge in der Größenordnung von 1 m wesentlich kürzer als die von Transmissometern. Nephelometer kann man damit auch an Orten aufstellen, wo sich eine längere Meßbasis nicht realisieren läßt. Das Verfahren hat aber nach BOND et. al. [1982] den Nachteil, daß Augenblickswerte infolge des kleinen Meßvolumens stark streuen und daher eine schnelle Datenerfassung bei gleichzeitiger Anwendung von Techniken zur Datenfilterung erforderlich sind. Die dadurch gewonnenen Meßwerte sind nur für ein relativ kleines Gebiet um den Aufstellungsort repräsentativ.

Nephelometer liefern vom Streukoeffizienten b_s abhängige Meßsignale. GAUMET & SALOMON [1989] gingen von der Beziehung

$$P_d = P_o \cdot A_L \cdot \beta(\Theta) \int \frac{\exp[-b_e(l_1 + l_2)]}{d_s \cdot l_2^2} dV \quad (14)$$

aus, in der P_d die Leistung des Streulichts, P_o die emittierte Lichtleistung, A_L die Linsenfläche, $\beta(\Theta)$ die Streufunktion in Abhängigkeit vom Streuwinkel Θ , b_e den Extinktionskoeffizienten, l_1 den Abstand des Streuvolumens dV von der Lichtquelle, l_2 den Abstand zwischen dem Streuvolumen dV und dem Strahlungsempfänger sowie d_s den Durchmesser des Emissionsfeldes bezeichnen. A_L , l_1 , l_2 , und d_s haben konstante Werte, die durch die Konstruktion des Gerätes festgelegt werden. Bei den kleinen Abmessungen von Nephelometern ist $b_e(l_1 + l_2) \ll 1$ und somit $\exp[-b_e(l_1 + l_2)] = 1$. Ferner wurde die Streufunktion dem Extinktionskoeffizienten proportional angesetzt: $\beta(\Theta) = k_1 \cdot b_e$. Damit ergibt sich anstelle von (14)

$$\frac{P_d}{P_o} = A_L \cdot k_1 \cdot b_e \int \frac{dV}{d_s \cdot l_2^2} \quad (15)$$

Unter den gegebenen Voraussetzungen ergibt der Integralwert eine Konstante. Durch Zusammenfassung der unveränderlichen Größen erhält man

$$\frac{P_d}{P_o} = k_3 \cdot b_e \quad (16)$$

Mit $Tr = \exp[-b_e \cdot l_b]$ geht die Formel (13) von KOSCHMIEDER über in

$$V_S = \frac{\ln \epsilon_s}{b_e} \quad (13a)$$

Setzt man den aus (16) sich ergebenden Ausdruck für den Extinktionskoeffizienten b_e in (13a) ein und berücksichtigt man, daß $\ln \epsilon_s$ konstant ist, erhält man schließlich unter der Voraussetzung, daß die Extinktion vorwiegend durch Streuung und nicht durch Absorption bedingt ist

$$V_S = \frac{k_3 \cdot \ln \epsilon_s}{(P_d/P_o)} = \frac{c}{b_s} \quad (17)$$

in der c eine Konstante und b_s den Streukoeffizienten bezeichnen. Eine Beziehung dieser Form zur Berechnung der Sichtweite

wurde bereits von CROSBY [1960], MIDDLETON [1963] sowie CHARLSON et al. [1967] benutzt. SHEPPARD & CLINK [1975] sowie HARRISON [1979] haben auf Schwierigkeiten bei der Umrechnung der mit Nephelometern gemessenen Sichtweite in die meteorologische Sichtweite bei unterschiedlichen Sichthindernissen (wie Dunst, Rauch, Nebel, Nieselregen, Regen, Schnee) sowie unterschiedlichen Beleuchtungsverhältnissen (Tageslicht, Zwielflicht, künstliche Lichtquellen in der Nacht) hingewiesen. Nach den experimentell gewonnenen Ergebnissen von SHEPPARD & CLINK sind streng genommen für Sichtbehinderungen durch Schnee, Nebel und Regen gesonderte Eichkurven für die Bestimmung der Sichtweite aus den Meßsignalen erforderlich.

Über die Meßprinzipien integrierender Nephelometer gaben HEINTZENBERG & CHARLSON [1996] einen Überblick. Aussagen über integrale Aerosolparameter erfordern, daß die Meßergebnisse von der Größenverteilung, Gestalt und Zusammensetzung der Partikel unabhängig sind. Berechnungen auf der Grundlage der MIE-Theorie und Vergleiche mit den Meßwerten belegen eine gewisse Unsicherheit, die sowohl den Meßergebnissen als auch den berechneten Parametern anhaften.

Alle Sichtmeßgeräte haben einen nach oben begrenzten Meßbereich, der von der Leistung der Lichtquelle und bei Transmissometern von der Länge der Meßbasis abhängt. Geber für einen automatischen Betrieb müssen so konzipiert sein, daß Änderungen des ausgehenden Lichtstroms infolge von Spannungsänderungen der Stromquelle, Alterungen der Lichtquelle oder Verschmutzung optischer Teile sowie Empfindlichkeitsänderungen des Lichtdetektors keinen wesentlichen Einfluß auf das Meßergebnis haben. Das gelingt mehr oder weniger vollständig durch Vergleichsmessung des den Meßpfad passierenden Lichtstroms mit dem von der Lichtquelle – nach Verlassen ihres optischen Systems – gelieferten mit ein und demselben Photodetektor. Das Beschlagen optischer Teile läßt sich durch deren Beheizung weitgehend ausschließen. Für die Vergleichbarkeit der Meßergebnisse ist ferner Voraussetzung, daß die Sicht in gleicher Höhe über dem Boden erfaßt wird.

Transmissometer wurden bereits 1942 von SCHÖNEWALD & MÜLLER sowie 1953 von FOITZIK angegeben. Bei dem vom letztgenannten Autor entwickelten Gerät wurden der Meßstrahl, der die Meßstrecke durchlaufen hat, und der unmittelbar von der Lichtquelle hinter deren Optik abgegriffene Vergleichsstrahl, abwechselnd nacheinander zur gleichen Photozelle geführt. Das elektronisch verstärkte Signal des Photodetektors wurde phasenabhängig gleichgerichtet und lieferte das Steuersignal für eine durch Motor verstellbare Blende im Lichtweg des Vergleichsstrahls, mit der sich beide Lichtströme aufeinander abgleichen ließen. Als Maß für die Sichtweite diente die Blendenstellung. Zur Ausschaltung der Tageslichtempfindlichkeit sollte bei Geräten dieses Prinzips mit moduliertem Licht gearbeitet werden. Außerdem ist der Tripelspiegel mit einer dunklen Umgebung zu versehen. Durch sorgfältige Konstruktion ist zu verhindern, daß Temperaturänderungen zu einer Dejustierung optischer Funktionsteile führen. Ein Beschlagen optischer Teile bei hoher Luftfeuchte wird zweckmäßig durch Zusatzbeheizung verhindert, sofern die durch die Lichtquelle bedingte Erwärmung nicht ausreicht,

Ein ähnliches Sichtmeßgerät wurde von OLBERS & HERZOG [1965] behandelt. Bei internationalen Vergleichen von Sichtmessern in England fanden OULDRIDGE et al. [1989] eine gute

Übereinstimmung der Meßergebnisse von Transmissometern bei niedrigen Sichtweiten, während Eichprobleme und vor allem die Verunreinigung optischer Oberflächen deren Meßbereich nach oben auf etwa 5 km begrenzte.

Auch Sichtmesser nach dem Streulichtprinzip, wie der von RUPPERSBERG [1964] angegebene, hatten in den 60er Jahren bereits einen guten technischen Stand erreicht. SHEPPARD & CLINK [1975] untersuchten die Eignung des Videographen der Fa. Dr. FRÜNGEL, einem Gerät, das das rückwärts gestreute Licht logarithmiert erfaßt, als Geber für automatische Wetterstationen und gaben Hinweise für die Umrechnung der Meßwerte in die Sichtweite. Der Videograph hat wegen des logarithmierten Ausgangssignals den Vorteil, daß sich seine Empfindlichkeit im gesamten Meßbereich nicht ändert. MAGNUSSON [1980] berichtete über den Einsatz von Sichtmessern nach dem Streulichtprinzip in Schweden. Als Lichtquelle kam dabei eine lichtemittierende Diode zur Anwendung, die IR-Strahlung von 900 nm Wellenlänge abstrahlte. Als Beispiel für einen Streulichtmesser, der von Änderungen des emittierten Lichts, der Verschmutzung des optischen Systems und der Empfindlichkeit des Photodetektors fast unabhängig ist, soll das von FICHAUX [1981] beschriebene Gerät angeführt werden. Es kann als Geber für automatische Stationen genutzt werden. Wie sein in Abb. 9

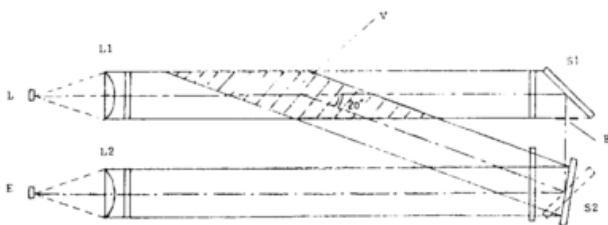


Abb. 9: Strahlengang im Streustrahlungs-Sichtmesser nach FICHAUX
 L: Strahlenquelle (Blitzlichtlampe) L1, L2: Linsen
 E: Lichtdetektor (Photodiode) S1: fester Spiegel
 S2: beweglicher Spiegel mit 2 Stellungen B: feste Blende
 V: Streuvolumen
 (nach: FICHAUX [1981] modifiziert)

dargestellter Strahlengang zeigt, gelangt je nach Stellung des beweglichen Spiegels S2 abwechselnd der durch die Blende B durchgelassene Teil des transmittierten Lichts und das unter einem festen Winkel vorwärtsgestreuete Licht zum Strahlungsempfänger E. Mit Hilfe eines Mikrorechners werden von den gewonnenen Rohwerten die durch das Rauschen der Photodiode bedingten, dem Dunkelstrom entsprechenden Nullwerte abgezogen und die so korrigierten Werte über je 14 aufeinanderfolgende Meßzyklen summiert. Abschließend wird der Quotient aus den Transmissions- und den Streustrahlungswerten bestimmt, der bei fester Blendenöffnung der meteorologischen Sichtweite proportional ist. Der von GAUMET & SALOMON [1989] entwickelte Streulicht-Sichtmesser ist relativ einfach gehalten. Er arbeitet mit einer Xenon-Blitzlichtlampe, deren Lichtleistung stabilisiert wird. Der Meßbereich des Gerätes, das in seinen Ergebnissen gute Übereinstimmung mit denen eines Transmissometers zeigte, ist auf den Bereich 10...500 m ausgelegt. Der nutzbare Meßbereich einer Reihe von Geräten, die nach dem Prinzip der Vorwärtstreuung arbeiten erwies sich nach OULDRIDGE et al. [1989] als deutlich größer gegenüber dem von Transmissometern. Auch waren hier die Einflüsse von Verunreinigungen geringer. Bei schlechter Sicht wiesen diese Geräte im Nahbereich eine geringere Meßgenauigkeit auf. Die genannten Eigenschaften lassen eine Nutzung dieses Meßprinzips bei

Gebern für automatische Wetterstationen insbesondere für synoptische Zwecke als günstig erscheinen.

BOND et al. [1982] haben das Verhalten verschiedener Typen von Sichtmessern untereinander verglichen und aus den Ergebnissen Aussagen über die Eignung der Geräte als Geber für automatische Stationen abgeleitet. Sichtmesser sind übrigens nicht in jedem Fall auf Netzanschluß angewiesen. Es sind auch Geräte bekannt geworden, die sich aus Akkumulatorenbatterien mit der erforderlichen Energie versorgen lassen.

Sichtmesser können durch die natürliche kurzwellige Strahlung aus der Umgebung beeinflusst werden. Ähnlich wie bei Wolkenhöhenmessern sind nach FRÜNGEL [1963] auch hier Vorkehrungen zu treffen, die eine Unterscheidung zwischen dem Licht der künstlichen Lichtquelle und der natürlichen kurzwelligen Strahlung ermöglichen. Das geschieht auch hier entweder durch Modulation des Lichtes oder durch Nutzung von starken Lichtimpulsen.

Ein weiteres Verfahren zur Sichtmessung bietet sich in der *Kontrastmethode*, wie sie z.B. HOFFMANN & KUEHNEMANN [1979] anwandten. Ihr Prinzip kommt einer Bestimmung der Sichtweite durch visuelle Beobachtung nahe. VIEZEE & EVANS [1983] beschrieben einen automatischen Sichtmesser, der nach diesem Prinzip arbeitet. Das zunächst als Prototyp entwickelte Gerät enthält eine Abtastkamera mit einer Bildzeile mit 265 Photodioden in einem Festkörperschaltkreis. Sie wird auf den Horizont gerichtet und tastet dort die Helligkeiten auf einer vertikalen Linie in einem Höhenwinkelbereich von 15° oberhalb und unterhalb des Horizonts ab. Die Abtastkamera kann in Schritten von 1,5 mrad horizontal um 360° geschwenkt werden. Die Sichtmessung beruht auf der Erfassung der vertikalen Helligkeitsverteilung bei guter Sicht über dem Horizont, sonst an einem näher gelegenen Hindernis. Durch Berechnung der Differenz zwischen zwei benachbarten Bildelementen mit maximalem Kontrast und Division durch den Mittelwert der Helligkeit wird der scheinbare Kontrast und aus diesem nach der Formel von KOSCHMIEDER die Sichtweite bestimmt. Das Gerät enthält zwei Mikrorechner, von denen der eine die serielle Abfrage der Photodiodezeile, der andere die Datenanalyse übernimmt. Es eignet sich nicht nur für ungünstige Sichtbedingungen sondern auch für sehr große Sichtweiten.

Für Flugplätze reicht die Ermittlung der meteorologischen Sichtweite allein nicht aus. Hier werden zusätzliche Angaben über die Landebahnsicht (RVR), die Schrägsicht (SVR) sowie der Kontakthöhe der Landebahn-Annäherungslichter (ALCH) gebraucht. Spezielle Sichtmeßgeräte für Flugplätze sind u.a. von STAUFFERT [1960], FRÜNGEL [1960], WINSTANLEY et al. [1974], KRUGLOV [1979], ETIENNE & De SWERT [1984] sowie VIUKARI [1987] beschrieben worden. Die Funktionsweise solcher Geräte soll am Beispiel des von ETIENNE & De SWERT angegebenen automatischen Videometers zur Bestimmung der Landebahnsicht gezeigt werden. Es setzte sich aus den Funktionsgruppen

- Meßkopf auf einem Mast in 5 m Höhe
- einer Reihe von Landebahnleuchten
- einer Einrichtung zur Frequenzmodulation des Lichts
- einem durch Mikrorechner gesteuerten Synchrondetektor

zusammen. Der Meßkopf enthielt eine Optik, die durch den Mikrorechner auf die jeweils zu erfassende Lichtquelle ausgerichtet und fokussiert wurde, sowie einen Sekundärelektronenvervielfa-

cher (SEV), dessen Hochspannung entsprechend der Hintergrundhelligkeit eingestellt wurde. Bei Beginn einer Messung wurde der Meßkopf zuerst auf die nächste Landebahnleuchte ausgerichtet und diese Lichtquelle eingeschaltet. Das Ausgangssignal des SEV wurde dem Synchrondetektor zugeführt, der die Sichtbarkeit dieser Lichtquelle durch Vergleich mit einem Referenzsignal prüfte. Im Falle ihrer Sichtbarkeit schaltete der Mikrorechner das Videometer auf die nächste Lichtquelle um und wiederholte den beschriebenen Vorgang, bis beim Vergleich die Entscheidung "nicht sichtbar" fiel. Dann wurde abwechselnd zwischen dieser und der vorangehenden Lichtquelle gewechselt. Solange dabei das Ausgangssignal des Synchrondetektors zwischen den Zuständen "sichtbar" und "nicht sichtbar" schwankte, wurde das als konstante Landebahnlicht gedeutet. Trat ein Signalwechsel nicht mehr ein, begann ein neuer Suchvorgang. Der RVR-Wert wurde vom Mikrorechner in Entfernungsangaben umgerechnet und an die auswertende Stelle übertragen.

2.2.10 Geber für Wettererscheinungen und Erdbodenzustand

In synoptischen Meldeschlüsseln sind die Parameter "gegenwärtiges Wetter" und "Wetter der letzten 3 h" enthalten. Diese Informationen, die für die Beurteilung des Wetters und seines Verlaufs von besonderer Bedeutung sind, wurden an den Stationen durch Beobachtung gewonnen und vom Personal entsprechend den Richtlinien des Wetterschlüssels codiert. Allein für das gegenwärtige Wetter sind 99 verschiedene Wetterzustände vorgesehen. An unbemannten Stationen mußte auf die Beobachtung dieser wichtigen Parameter in der Vergangenheit verzichtet werden.

Wegen der Bedeutung dieser Parameter für die synoptische Meteorologie hat es nicht an Versuchen gefehlt, das Wetter einer instrumentellen Beobachtung zugänglich zu machen. Gegenwärtig existieren einige Sensoren, die in der Lage sind, einige der im Wetterschlüssel vorgesehenen Situationen des gegenwärtigen Wetters relativ zuverlässig zu identifizieren. Ebenso wie bei den Beobachtungen der Bewölkung und Sicht bestehen auch hier fundamentale Unterschiede zwischen den durch das Personal und den automatisch arbeitenden Gebern erzielten Beobachtungsergebnissen (vgl. "Guidance on Automatic Weather Systems and their Implementation" [1997]).

KODAIRA et al. [1975] kombinierten einen Sonnenscheinsensor mit einem Niederschlagsdetektor in einer Relaischaltung, die nur die Wetterzustände Sonnenschein, Regen und bewölkter Himmel ohne Regen unterscheiden konnte. Diese Schaltung kam bei einer automatischen Wetterstation als Wettersensor zur Anwendung.

Zunächst wurde versucht, aus den an den Wetterstationen gemessenen meteorologischen Größen weiterreichende Rückschlüsse auf das Wetter zu ziehen. Dazu waren nur z.T. neue Geber erforderlich. Über derartige Untersuchungen ist von HILL [1975], BROWN [1979, 1980], CHISHOLM [1979], CHISHOLM et al. [1980] sowie von MEZÖSI et al. [1985] berichtet worden. GOLDBERG et al. [1978] haben untersucht, wie der volle Informationsgehalt beim Einsatz einer automatischen Station vom Typ M-106-M gewahrt werden kann, wenn die Station nur tagsüber mit einem Beobachter besetzt ist. Sie forderten dazu u.a. den Einsatz von Gebern für Glatteis und festen Niederschlag. Die Arbeiten von HILL bezogen sich primär auf Geber für gefrierenden Niederschlag (Rauhreif und Glatteis), zur Erfassung von Hagelfall und zum Nachweis von Gewittern mit passiven und aktiven Verfahren (Blitzzähler und Radarverfahren). Andere Arbeiten galten primär

der Schaffung von Algorithmen zur Unterscheidung verschiedener Wetterparameter. Die an zweckmäßig ausgesuchten Meßorten erfaßten Meßinformationen waren zu einer Sammelstelle zu übertragen und wurden dort mit Hilfe der Entscheidungsbaum-Methode einer Analyse unterzogen. Von den genannten Autoren wurden teilweise unterschiedliche meteorologische Meßgrößen für die Identifizierung des Wetters herangezogen. Dabei zeigte es sich, daß nur einige der vorgesehenen Wetterzustände zuverlässig erfaßt werden konnten. Nach Angaben von MEZÖSI et al. ließen sich aus den Größen Wind, Blitzzahl, Niederschlagsintensität, Niederschlag (ja/nein) und Temperatur von den 99 möglichen Codekombinationen für das gegenwärtige Wetter nur 16 automatisch gewinnen, wobei bezweifelt werden muß, ob mit dem vorgesehenen Algorithmus eine zuverlässige Trennung zwischen Regen und Schnee möglich ist. GALLÓ et al. [1988] wiesen bereits darauf hin, das die Unterscheidung zwischen Regen und Schnee unsicher ist, wenn die Temperatur um 0 °C schwankt. Bei anderen Parametern stimmten die aus den Meßwerten erschlossenen Wetterzustände nur mit mehr oder weniger hoher Häufigkeit mit den Beobachtungsergebnissen überein. Eine Differenzierung zwischen bestimmten Wetterereignissen, wie insbesondere den verschiedenen Niederschlagsarten (Nieselregen, Regen, Regen mit Schnee gemischt, Schnee, Graupel und Hagel) war mit dem konventionellen Instrumentarium nicht möglich. Es mußte daher nach neuen Sensorprinzipien gesucht werden.

Für diese Zwecke erschienen von Anfang an Lasermeßsysteme als aussichtsreich, da die Ausbreitungsbedingungen des Lichts vom Verhältnis zwischen Tropfen- bzw. Teilchengröße und der Lichtwellenlänge abhängig sind. HILL [1975] informierte über die Initialisierung erster Studien mit derartigen Meßverfahren. Über die Ergebnisse der sehr ermutigenden Untersuchungen gaben DERR et al. [1976] einen ersten Bericht. Sie berücksichtigten verschiedene Wechselwirkungen zwischen Laserstrahlung und Niederschlagsteilchen und arbeiteten mit verschiedenen Strahlungsstrecken, wobei die Extinktion, das Auftreten von Szintillationen und die Vorwärtsstreuung unter verschiedenen Winkeln bzw. in unterschiedlichen Frequenzbereichen der Lichtszintillationen erfaßt wurden. Abb. 10 verdeutlicht den Strahlengang in einem solchen Laser-Wetteridentifiziergerät mit drei Strahlungsempfängern. Über entsprechende Versuche mit neuentwickelten Geräten haben EARNSHAW & KEEBAUGH [1978], SANDERS [1979], WANG et al. [1982] sowie HANSEN et al. [1988] berichtet. Mit Hilfe der Laser-Wetteridentifizierer konnte die Zahl der weitgehend fehlerfrei nachweisbaren Wetterzustände und -ereignisse erhöht werden. Damit sind entsprechend nachgerüstete automatische Stationen nun in der Lage, auch das augen-

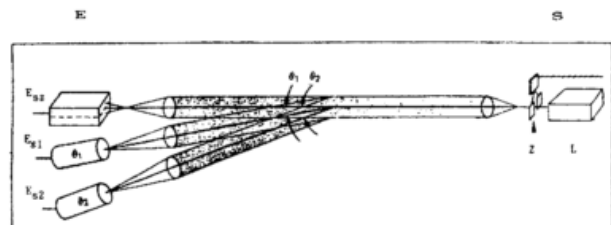


Abb. 10: Optisches System eines Laser-Wetteridentifiziergerätes
 S: Lichtsender
 L: HeNe-Laser
 Z: Lichtzerhacker
 E: Lichtempfänger
 Esz: Szintillationsdetektor
 Es1: Streulichtdetektor 1 (Streuwinkel Θ_1)
 Es2: Streulichtdetektor 2 (Streuwinkel Θ_2)
 (aus: WANG et al. [1982])

blickliche und das vergangene Wetter im großen und ganzen zu erfassen, wenn es gegenwärtig auch nicht möglich ist, alle nach Schlüssel vorgesehenen, visuell beobachtbaren Zustände eindeutig zu ermitteln. Nach Angaben von GALLAGHER [1989] kann der ASOS-Geber PWS für das gegenwärtige Wetter, der im Gegensatz zu älteren Geräten nicht mit einem Gaslaser sondern mit einer lichtemittierenden Diode arbeitet, das Auftreten von Niederschlägen sowie Niederschlagsart, -intensität und -menge ohne Intervention eines Beobachters mit hoher Wahrscheinlichkeit durch Analyse des Leistungsspektrums der empfangenen Signale nachweisen. Der Detektor spricht innerhalb von 5 min nach Beginn solcher Ereignisse an. Er liefert nach NADOLSKI [1995] Informationen über das Auftreten und die Intensität von Regen und Schnee, das Auftreten von gefrierendem Regen, Nebel und Dunst.

Auch in Frankreich laufen nach Mitteilungen von PILON [1989] Projekte zur Automatisierung der z.Zt. noch durch Beobachtung gewonnenen Größen. Besondere Bedeutung wird dabei der automatischen Bestimmung der Niederschlagsart, des Erdbodenzustands, der Sichtbedingungen, der Höhe der Wolkenbasen und dem Bedeckungsgrad beigemessen. Wirkungsweise und Aufbau eines Gebers für den Erdbodenzustand, mit dem automatische Stationen in Frankreich ausgerüstet werden sollen, behandelten GAUMET & SALOMON [1998]. Dieser Geber arbeitet mit einer Referenzfläche aus Beton mit rauher geschwätzter Oberfläche. Mit Hilfe der standardisierten Referenzfläche soll eine Objektivierung des Erdbodenzustands bei automatischer Bestimmung an unterschiedlichen Stationsorten angestrebt werden. Zur Gewährleistung eines guten thermischen Kontakts wird die Betonplatte ebenerdig in den Boden eingelassen. In sie ist ein Pt-Widerstandsthermometer zur Bestimmung der Oberflächentemperatur eingebaut. Schräg über der Referenzfläche in etwa 1 m Höhe sind eine Wechsellichtquelle (Halogenlampe mit Parabolspiegel und IR-Filter) sowie je ein Detektor (mit PIN-Dioden als Sensoren) für das reflektierte und gestreute Licht angeordnet. Die Information über den Erdbodenzustand wird aus den drei Meßsignalen Oberflächentemperatur, reflektiertes und gestreutes Licht unter Verwendung eines Charakterisierungsdiagramms gewonnen. Dazu muß die Meßeinrichtung vor ihrem Einsatz einem Lernprozeß mit Lern- und Validierungsphase unterzogen werden, während der neben den Messungen der Zustand der Referenzfläche zu beobachten ist. Die automatische Auswertung der primären Meßergebnisse erfolgt in der Einsatzphase offenbar mit Rechnerunterstützung, wobei z.T. auch die Signalverläufe zu berücksichtigen sind. Weitgehend eindeutig bestimmen ließen sich die Erdbodenzustände: trocken, feucht, naß und schneebedeckt. Probleme ergaben sich noch bei einer sicheren Zuordnung der Zustände: bereift, Glatteis und partiell schneebedeckt. Zusätzlich ließen sich aus der Varianz der Reflektivität Informationen über die Regenintensität und aus den optischen Messungen in beschränkten Bereichen Angaben über die Schneehöhe ableiten.

FOKEN [1998a] hat kürzlich auf Störungen von Windmessungen mit Ultraschallanemometern durch Schneedriver hingewiesen. Die Häufigkeit der dabei auftretenden Spikes läßt sich andererseits zur Charakterisierung der Schneedriver heranziehen. Vielleicht bietet sich damit eine Möglichkeit zum Nachweis solcher 'exotischer' Wetterphänomene wie dem Schneetreiben.

Die Auswertung der Messungen zur Identifizierung des Wetters erfolgt mit Hilfe der Software und erfordert einen nicht zu vernachlässigenden Programmaufwand. Gegenwärtig wird noch an weiteren Optimierungen sowohl der Meß- als auch der Verarbeitungsverfahren gearbeitet.

2.3 Die wichtigsten Geber für gasförmige Immissionen (Leitkomponenten)

Als Geber für automatisch arbeitende Immissionsmeßstationen sind neben denen für die gleichzeitig mitzuerfassenden meteorologischen Größen die Analysatoren für spezielle Gaskomponenten und die Meßsysteme zur Erfassung des Staubes einschließlich ihrer Hilfseinrichtungen zu betrachten. Bezüglich der Geber für meteorologische Größen kann auf den Abschnitt 2.2 verwiesen werden, so daß an dieser Stelle nicht nochmals darauf eingegangen werden muß. Die folgenden Ausführungen befassen sich ausschließlich mit *Analysatoren für gas- und partikelförmige Luftbeimengungen*. Ähnlich wie bei den meteorologischen Sensoren ist auch bei den Analysatoren eine Beschränkung notwendig. Eingegangen wird hauptsächlich auf die Verfahren und Geräte zur Erfassung der sog. Leitkomponenten an operativen Immissionsmeßstationen, die Möglichkeiten einer Automatisierung bieten.

Besondere Bedingungen für die zu behandelnden Geber ergeben sich aus den im folgenden genannten Anforderungen:

- hohe Selektivität der Analysenverfahren für eine begrenzte Zahl von Leitkomponenten
- hohe Nachweisempfindlichkeit und
- automatische Prüfbarkeit sowie Eichbarkeit der Meßsysteme.

Außerdem müssen Analysatoren, die an automatischen Immissionsmeßstationen eingesetzt werden sollen, gewisse Mindestanforderungen hinsichtlich bestimmter technischer Daten, des Wartungsaufwands, ihrer Überwachungsfunktionen und Schutzeinrichtungen genügen. Kenngrößen, die zur Beurteilung von Meßverfahren und -geräten zur Erfassung von Luftverunreinigungen gebraucht werden, wurden von STRATMANN [1965] zusammengestellt und diskutiert. In den USA wurden nach VERMILLION [1969] bereits in den 60er Jahren über die Notwendigkeit zur Entwicklung eines "universellen Analysators" diskutiert, der auf einem für alle Substanzen einheitlichen Grundprinzip beruhen und gestatten sollte, die Konzentrationen der relevanten Leitkomponenten zu erfassen. Nachdem sich bis heute kein Verfahren im routinemäßigen Einsatz an automatisch arbeitenden Immissionsmeßstellen durchsetzen konnte, das für die gesamte Palette oder zumindest für mehrere Leitsubstanzen als geeignet angesehen werden kann, muß vorerst weiterhin auf *Analysatoren für einzelne Gase* zurückgegriffen werden.

Bei der Auswahl der bisher an Immissionsmeßstationen im Routinebetrieb zum Einsatz gekommene Gasanalysenmethoden waren eine ausgedehnte Erprobung sowie das Vorliegen von Erfahrungen bei der Anwendung wesentliche Kriterien. Verbreitet zur Anwendung gekommene Verfahren sind ausführlicher von LAHMANN [1965], BURMANN [1973], BIRKLE [1979] sowie von der WHO [1976] beschrieben und hinsichtlich ihres Einsatzes an automatischen Immissionsmeßstellen untersucht worden. Die im Lufthygienischen Überwachungssystem Niedersachsen eingesetzten Methoden wurden in einer Publikation des Niedersächsischen Landesamts für Immissionsschutz [1988] zusammengestellt. Nach diesen Übersichten sind für Spurengase folgende physikalisch-chemische und rein physikalische Verfahren herauszustellen:

- * *elektrochemische Verfahren (Potentiometrie, Coulometrie, Galvanometrie)*

* *Konduktometrie (Leitfähigkeitsmessung)*

* *Photometrie und Kolorimetrie*

* *Chemilumineszenz*

* *Flammenionisation,*

zu denen insbesondere für die Bestimmung von einzelnen Kohlenwasserstoffen und anderen flüchtigen organischen Substanzen noch die Verfahren der

* *Gas-Chromatographie* sowie der

* *Ionen- und Flüssigkeits-Chromatographie*

hinzugerechnet werden müssen. Für eine Reihe dieser Immissionsmeßmethoden sind Angaben zu den Verfahrensgrundlagen, den Meßgeräten und Chemikalien, zur Durchführung der Messungen, zur Überprüfung der Meßwertanzeige, zur Selektivität, Reproduzierbarkeit und zum Zeitverhalten der Geräte sowie zu deren Einsatzmöglichkeiten und zu den erforderlichen Wartungsarbeiten sowie Hinweise zur Auswertung der Messungen in VDI-Richtlinien zur Messung gasförmiger Immissionen (VDI 2451...2468) enthalten. In diesen VDI-Richtlinien wurden die in Deutschland bevorzugten sowohl manuell als auch automatisch zu betreibenden Geräte berücksichtigt.

Ein Teil der genannten Verfahren beruht auf rein physikalischen Prinzipien; die Mehrzahl nutzt hingegen chemisch-physikalische Meßmethoden, die zum überwiegenden Teil als naßchemische Verfahren anzusprechen sind. Die in ihnen ablaufenden chemischen Prozesse sowie die Prüfvorgänge erfordern eine Zeitsteuerung von Flüssigkeits- und Gasströmungen mittels Magnetventilen. Diese Vorgänge müssen anhand von Statussignalen überwacht werden, die nach BIRLE & SCHÖLZKE [1976] von den Analysatoren bereitzustellen sind und sowohl Betriebszustände als auch fehlerhafte Funktionen charakterisieren können. Um einen stabilen und von Einflußgrößen unabhängigen Reaktionsablauf zu gewährleisten, müssen die Umgebungsbedingungen annähernd konstant gehalten werden. Das erfordert insbesondere eine Thermostatisierung der Reaktionsgefäße und bei manchen Verfahren konstante Massenflüsse. Die an chemischen Reaktionen beteiligten Reagenzien und Lösungen sind nur über begrenzte Zeiträume haltbar und müssen in vorgegebenen Zeitabständen erneuert werden, um die Einflüsse von Verunreinigungen klein zu halten. Ebenso müssen Oberflächen, die mit Reagenzien und Luftströmungen in Kontakt kommen, regelmäßig gereinigt werden. Nach BIRKLE [1979] ist davon auszugehen, daß die Anwendung chemisch-physikalischer und insbesondere naßchemischer Methoden zugunsten der rein physikalischen Methoden zurückgehen wird.

KRASOV [1979] hat die wesentlichen Probleme bei der automatischen Erfassung atmosphärischer Verunreinigungen diskutiert und eine Übersicht über Analysenmeßverfahren unter besonderer Berücksichtigung der in der damaligen Sowjetunion produzierten Geräte gegeben. GORELIK & KRASOV [1979] gingen auf die meteorologischen Aspekte ein, die bei der Weiterentwicklung solcher Analysenmeßsysteme zu berücksichtigen sind. ANUFRIEV & KOBACEVA [1979] schätzten Meßfehler ab, die in verschiedenen Funktionseinheiten automatisierter Meßsysteme entstehen.

Eine Zuordnung der Verfahren zu den einzelnen Spurengasen ist der Tabelle 2 zu entnehmen. Bei den meisten Meßverfahren sind der eigentlichen Messung chemische Reaktionen vorangestellt, die für die jeweils nachzuweisende Substanz spezifisch sein sol-

Spurengas	SO ₂	NO _x	CO	O ₃	C _m H _n	H ₂ S	CO ₂
Analysenmeßverfahren							
Konduktometrie	*	+				*	
Coulometrie	*	o		+			
Photometrie	+	+	*	+	+	+	*
Kolorimetrie	o	+		+			
Chemolumineszenz		*	o	*	o		
Flammenionisationsdetektor					*		
elektrochem Verfahren				+			
Gaschromatographie	(+)		(+)		(+)	(+)	(+)

- * häufig eingesetzt
- + seltener eingesetzt
- o in Einzelfällen verwendet
- () z. Zt. noch nicht voll automatisierbar

Tabelle 2: Automatisierbare Analysenmeßverfahren für wichtige Spurengase bei Immissionsmessungen

len und den eigentlichen Meßeffect (wie Änderung der Leitfähigkeit, Erzeugung einer Färbung bzw. Erzeugung eines Meßstroms oder einer Meßspannung) bewirken. Wenn also eines der o.g. Verfahren auf mehrere Spurengase anwendbar ist, heißt dies nicht, daß die Messung mit dem gleichen Analysator erfolgen kann. Ebenso erfordern chromatographische Verfahren für den Nachweis unterschiedlicher Substanzen verschiedene Trennsäulen und Detektoren, was die Automatisierung der Messungen zusätzlich erschwert.

Für Probenluft und Flüssigkeiten führende Teile von Analysenmeßsystemen sind ausschließlich Materialien zu verwenden, an denen die zu detektierenden Spurengase bzw. Reagenzien nicht ad- oder absorbiert werden.

Analysenmeßsysteme, wie sie in der Immissionsmeßtechnik benutzt werden, gestatten keine Absolutmessungen. Die Meßverfahren unterliegen einer Vielzahl von Einflüssen, die leicht zu Fehlmessungen führen. Deshalb müssen die Analysatoren periodisch (z.B. täglich) durch Zuführung von Null- oder Prüfgasen bekannter Konzentration kontrolliert werden. Die dazu notwendigen Ventile und Steuereinheiten, die vom Stationsrechner getriggert werden, sollten in den Analysatoren bereits enthalten sein. In mehrwöchigen Abständen, die vom Verfahren und den Eigenschaften der Geräte abhängen, sind zusätzlich komplette Kalibrierungen erforderlich. Dazu sind zumindest vier Prüfgase unterschiedlicher aber bekannter Konzentrationen der zu erfassenden Gaskomponente erforderlich. Der Eichung soll eine Überprüfung und nötigenfalls eine Reinigung des Analysators vorausgehen. Über die für beide Aufgaben einsetzbaren Verfahren und die auf dem deutschen Markt käuflichen Eicheinrichtungen haben HARTKAMP et al. [1983] einen ausführlichen Überblick gegeben. Um die mit Geräten unterschiedlicher Prinzipien und Konstruktion gewonnenen Ergebnisse vergleichen zu können, reicht eine statische Eichung allein nicht aus, da die Spurengas-Konzentrationen fortlaufenden Schwankungen unterliegen. Die Analysenmeßgeräte weisen unterschiedliche Zeitkonstanten und Totzeiten auf. Wie trotzdem bei Kenntnis dieser Parameter vergleichbare Werte erzielt werden können, haben SCHNELLE & NEELEY [1972] gezeigt. Um die Analyseergebnisse vergleichbar zu machen, müssen sie auf normierte Volumina

umgerechnet werden. Dazu ist die Kenntnis der Temperatur und des Luftdrucks in den Analysatoren erforderlich, die neben den Meßgrößen für die Konzentrationen mitzuerfassen sind.

Analysatoren werden in Gehäusen untergebracht, die Anzeigeelemente für den Betriebsstatus und den Meßwert enthalten. Das für die weitere Meßwertverarbeitung erforderliche Ausgangssignal wird auf einen standardisierten Bereich (meist Strombereich 4...20 mA) abgestimmt (vgl. LEFAS [1984]). Moderne Analysatoren enthalten darüber hinaus Analog/Digital-Umsetzer, so daß sie in der Lage sind, digitalisierte Signale über ein vorgesehene Interface für eine stationsinterne Datenverdichtung, Meßwertverarbeitung und Meldungsformatierung auszugeben. Geräte, die auf naßchemischen Verfahren beruhen, sind konstruktiv meist so gestaltet, daß der naßchemische Teil vom elektronischen getrennt wird, um Korrosionswirkungen an den elektronischen Schaltungen weitgehend auszuschließen. Je nach dem genutzten Verfahren werden am Eingang des Luftstroms in den Analysator teilweise Filter verwendet, die Gaskomponenten und Aerosole zurückhalten, welche das Meßergebnis beeinflussen könnten. Die Analysatoren sind eingangsseitig mit dem Luftansaugsystem sowie dem Prüfgassystem über Magnetventile verbunden. Manche moderneren Analysatoren enthalten bereits die benötigten Prüf- und Nullgasgeneratoren. Die Ausgangssignale werden meist aufbereitet, verstärkt und an die Einrichtung zur Meßwertfassung und -verarbeitung weitergeleitet.

Die Erfassung einzelner Komponenten von Kohlenwasserstoffen oder flüchtiger organischer Verbindungen setzt wegen deren geringen Konzentrationen oft eine Anreicherung der Stoffe voraus, was nach BIRKLE [1979] und VOSS [1990] durch Ausfrieren, Adsorption an Oberflächen oder Absorption in geeigneten Kunststoffen geschehen kann. Durch Aufheizen können die Gasproben für die Analyse freigesetzt werden. Diese Vorgänge erfordern zusätzliche Steuerungen, die sich teilweise nur schwer automatisieren lassen.

Im folgenden werden die physikalisch-chemischen Grundlagen der o.g. Analysenmeßprinzipien kurz beschrieben, welche den Aufbau der geläufigen Analysenmeßsysteme und damit der Geber für automatische Immissionsmeßstationen bestimmen. In diesem Zusammenhang werden Hinweise für die Gestaltung der in den Gebern einzusetzenden Sensoren gegeben.

2.3.1 Elektrochemische Verfahren

Zu den elektrochemischen Verfahren werden

- * die Potentiometrie
- * die Coulometrie
- * die Galvanometrie und Amperometrie sowie
- * die Polarographie

gerechnet. Die Polarographie wird hauptsächlich zur Untersuchung von Beimengungen in Wasser eingesetzt und soll hier nicht weiter behandelt werden.

Das Verfahren der *Potentiometrie* beruht auf der Bildung von Potentialen bei Redoxprozessen. Meßbar sind jedoch stets nur Potentialdifferenzen zwischen einer Meß- und einer Referenzelektrode, die in Elektrolytlösungen eintauchen. Die Spannungsangaben werden auf die genormte Wasserstoffelektrode als Referenz umgerechnet. Für die Bestimmung der Konzentrationen von Spurengasen in Luft bieten sich nach BIRKLE [1979] folgende Verfahren an:

- Man führt vor oder in einer Meßzelle einen konstanten Luftstrom mit einem ebenfalls konstanten Elektrolytfluß zusammen. Dabei löst sich die interessierende Gaskomponente im Elektrolyten. Die sich dabei einstellende Ionenkonzentration ist bei konstanten Massenflüssen der Spurengaskonzentration und das Potential dem Logarithmus der Spurengaskonzentration proportional.
- Die zu messende Gaskomponente wird in einem festen oder flüssigen Elektrolyten gelöst, in dem sich dabei eine Ionenkonzentration einstellt, die dem Partialdruck der Spurengaskomponente reversibel proportional ist. Das Verfahren kommt ohne eine dauernde Erneuerung des Elektrolyten aus. Die Meßspannung ist auch hier vom Logarithmus der Spurengaskonzentration abhängig.
- Man arbeitet mit einer in den Elektrolyten eintauchenden Gaselektrode, die z.B. durch ein Platinblech realisiert werden kann, an dem ständig das Meßgas entlangperlt. Dabei stellt sich ein Gleichgewicht zwischen der Gaskonzentration in Luft und der Ionenkonzentration in der Lösung ein. Das Potential ist nach dem NERNSTschen Gesetz von der Ionenaktivität der Lösung und damit vom Gaspartialdruck abhängig.

Bei *potentiometrischen Sensoren* wird die innere Leitfähigkeit in der Regel durch einen Diffusionsvorgang in einer Grenzschicht an der Meßelektrode oder in einem Diafragma begrenzt. Dadurch ergeben sich sehr hochohmige Sensoren, die durch die nachfolgende Elektronik nicht belastet werden dürfen. Man kombiniert daher die Detektoren mit sog. Elektrometerverstärkern, die einen sehr hohen Eingangswiderstand besitzen. Für diese Zwecke haben sich in neuerer Zeit Halbleiterverstärker mit Feldeffekttransistoren in der Eingangsstufe durchgesetzt. Oft bilden Elektrodensystem und Verstärker eine konstruktive Einheit.

Verfahren zur Konzentrationsbestimmung von SO₂, die zu den potentiometrischen gezählt werden können, sind von KÜNDIG & HÖGGER [1964] behandelt worden. Das Hauptanwendungsgebiet der Potentiometrie, zu der im weiteren Sinne auch die pH-Wert-Bestimmung gerechnet werden kann, liegt heute in der Wasseranalytik und weniger in der Überwachung gasförmiger Immissionen.

Das Analysenmeßverfahren der *Coulometrie* nutzt den Effekt der Elektrolyse, wobei der Elektrolyt infolge des Stromdurchgangs umgewandelt oder zersetzt wird. Für diesen Vorgang gilt das FARADAYsche Gesetz

$$m = \frac{MQ}{Fz} \quad (18)$$

wobei m die umgesetzte Stoffmenge, M die molare Masse, Q die elektrische Ladung, F die FARADAY-Konstante ($F = 96\,487 \text{ C/Mol}$) und \hat{z} die Wertigkeit der betreffenden Ionen im Elektrolyt bezeichnen. Löst man diese Beziehung nach Q auf und bildet die zeitliche Ableitung, so ergibt sich bei Berücksichtigung der Tatsache, daß das Verhältnis $(m/M) = n$ die Anzahl der umgesetzten Mole und $(dQ/dt) = I$ die Stromstärke angibt,

$$I = \hat{z}F \frac{dn}{dt} \quad (19)$$

Der Strom ist demnach der in der Zeiteinheit umgesetzten Stoffmenge (gemessen in Mol) direkt proportional. Mit Hilfe des FICKschen Gesetzes läßt sich zeigen, daß

$$\frac{dn}{dt} = Dk \cdot A_e \frac{c(t)}{\delta} \quad (20)$$

der Ionenkonzentration $c(t)$ proportional ist. In (20) bezeichnet Dk den Diffusionskoeffizienten, A_e die wirksame Elektrodenfläche und δ die Dicke der Elektrodengrenzschicht.

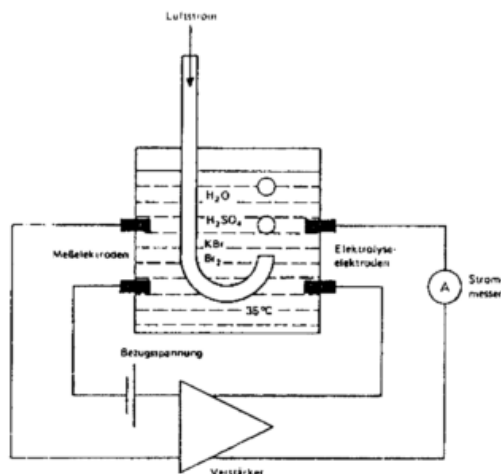


Abb. 11: Prinzip der coulometrischen Messung am Beispiel eines SO_2 -Analysators (aus: BIRKLE [1979])

Als *coulometrischer Sensor* dient nach Abb. 11 eine Meßzelle, die mit einem für die jeweilige Reaktion spezifischen Elektrolyten gefüllt ist. Durch den Elektrolyten perlt ein Luftstrom mit konstanter Strömungsgeschwindigkeit. Dabei löst sich die zu analysierende Gaskomponente weitgehend vollständig im Elektrolyten. In der Meßzelle befinden sich zwei Elektrodenpaare: die Meßelektroden und die Elektrolyselektroden. Die ersteren greifen eine Spannung ab, die ein Maß für die Konzentration der gelösten Ionen ist. Diese Spannung wird nach Abzug der Bezugsspannung dem Eingang eines Verstärkers zugeführt, der am Ausgang den Elektrolysestrom abgibt. Er wird über das zweite Elektrodenpaar dem Elektrolyten zugeführt und dient zugleich als Meßsignal. Der Elektrolysestrom ist der in der Zeiteinheit zugeführten und umgesetzten Stoffmenge proportional, solange er vollkommen und ausschließlich zur Umsetzung des betreffenden Stoffes dient.

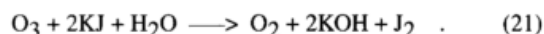
Bei der coulometrischen Umsetzung unterscheidet man zwischen direkten und indirekten elektrolytischen Prozessen. Im ersten Fall wird die zu erfassende Substanz direkt elektrolysiert. Beim indirekten Prozeß wird durch Elektrolyse an einer der Elektroden eine Substanz gebildet, die mit der zu messenden reagiert.

Coulometrische Sensoren können u.a. für die Konzentrationsbestimmung bei den Spurengasen Ozon, Stickstoffdioxid und Schwefelwasserstoff eingesetzt werden. Die Methode ist nicht selektiv. Störkomponenten müssen ggf. durch vorgesetzte Filter unwirksam gemacht werden. Die Zusammensetzung des Elektrolyten ist in Abhängigkeit von der zu detektierenden Substanz und den genutzten Reaktionen unterschiedlich zu wählen. In der VDI-Richtlinie VDI 2468, Blatt 3 wird ein microcoulometrisches Verfahren unter Einsatz des MAST-Recorders 725-6 der Fa. MAST Development Co. Davenport, Iowa, USA und seine Handhabung beschrieben. Auf das coulometrische Analysenverfahren sind ferner WARTBURG et al. [1964], LAHMANN [1965], GAL'DINOV & KON'KOV [1969], BROUWER et al. [1971/72] sowie BURMANN [1973a] eingegangen.

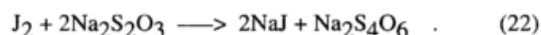
Die Verfahren der Galvanometrie und Amperometrie beruhen auf der Strommessung einer kurzgeschlossenen Meßzelle bei Anwesenheit eines Depolarisators im Elektrolyten. Die Meßanordnung der *Amperometrie* bildet einen Stromkreis, bestehend aus einem Elektrolyten mit einem Depolarisator, einer unpolarisierbaren sowie einer polarisierbaren Elektrode und einer niederohmigen Verbindung zwischen den letzteren. Die Kurzschluß-Stromstärke wird dabei sowohl durch die Spannungsdifferenz zwischen den beiden Elektroden als auch durch den Innenwiderstand der Meßzelle bestimmt, wobei der letztere hauptsächlich durch die Diffusion in der Grenzschicht der polarisierbaren Elektrode festgelegt wird. Der Diffusionsstrom ergibt sich aus (19) und (20), wobei hier $c(t)$ die Konzentration eines Depolarisators im Elektrolyten ist. Nicht immer läßt sich zwischen coulometrischen und amperometrischen Verfahren scharf trennen. Die Übergänge zwischen beiden sind oft fließend.

Man verwendet entweder die zu messende Komponente oder einen mit dieser reagierenden Stoff als Depolarisator. Er wird in dem auf diesen Stoff abgestimmten Elektrolyten in ähnlicher Weise gelöst wie bei der coulometrischen Meßzelle. Der gemessene Strom ist je nach Aufbau der Meßzelle entweder dem Massenfluß oder der Konzentration der Meßkomponente proportional, wenn die Temperatur der Zelle konstant gehalten wird.

In der Immissionsmeßtechnik sind amperometrische Analysenmeßgeräte hauptsächlich zur Bestimmung von O_3 - und SO_2 -Konzentrationen eingesetzt worden. VASSY [1958], LAHMANN [1965] und MUELLER et al. [1971] haben solche Geräte beschrieben. Das Verfahren der Amperometrie soll hier am Beispiel der Arbeiten von MROSE & WARMBT [1964] sowie WARMBT [1968] behandelt werden, die ihre Geräte für beide Schadgaskomponenten einsetzen. WARMBT [1968] berichtete über eine nach diesem Verfahren entwickelte automatisch arbeitende Analysenapparatur zur Erfassung des SO_2 -Gehalts der Luft. Das beschriebene Verfahren ist jedoch ohne vorgeschaltete Filter nicht spezifisch für Schwefeldioxid; es spricht auch auf Ozon sowie andere oxidierende und reduzierende Gaskomponenten an. Gearbeitet wird mit einer 1,5%igen bzw. einer 2%igen mit Natriumthiosulphat versetzten Kaliumjodidlösung in Wasser. Läßt man durch diese Lösung Ozon-haltige Luft perlen, entsteht nach der Reaktionsgleichung

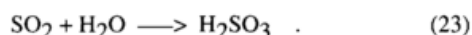


durch Oxidation freies Jod. Die freigesetzte Jodmenge ist der des in der Flüssigkeit gelösten Ozons proportional. Das Jod reagiert nach einem von EHMERT eingeführten Verfahren mit Natriumthiosulphat nach der Reaktionsgleichung

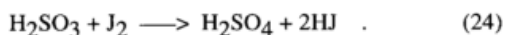


Das von EHMERT angegebene Verfahren beinhaltet die Erzeugung definierter Jodmengen durch Elektrolyse sowie die Bestimmung der Jodkonzentration einer KI-Lösung durch amperometrische Titration.

SO_2 reagiert in der wässrigen Lösung zunächst gemäß der Reaktionsgleichung



Durch Elektrolyse freigesetztes Jod reagiert mit der schwefligen Säure gemäß



Auch hier ist das HJ in Lösung dissoziiert. Die H^+ -Ionen wandern zur Kathode und nehmen dort Elektronen auf, die J^- -Ionen zur Anode und werden dort unter Abgabe von Elektronen neutralisiert, wobei wieder molekulares Jod entsteht. Solange die Lösung jodfrei ist, wird ein Stromfluß durch Polarisation der Elektroden verhindert. Die Aufnahme bzw. Abgabe von Elektronen an den Elektroden bedingt einen Depolarisationsstrom, der der Jodkonzentration und damit auch der SO_2 -Konzentration proportional ist.

Die von WARMBT [1968] angegebene Meßeinrichtung enthielt ein Absorptionsgefäß mit zwei eingeschmolzenen Elektrodenpaaren aus Platinspiralen. Über die Elektrolyseelektroden wurde ein konstanter Strom zugeführt. Der Depolarisationsstrom wurde über die Meßelektroden abgenommen und mittels eines Kompensographen registriert. Der Registrierkurve wurden impulsförmige Marken überlagert, die der Gaszähler jeweils nach Durchlauf einer vorgegebenen Luftmenge lieferte. Das Gerät steuerte ein Programmzeitgeber. Alle 60 min erfolgte ein neuer Meßzyklus. Zu Beginn wurde ein konstanter Elektrolysestrom nur für jeweils 4 min eingeschaltet. Während dieser Zeit saugte das Gerät schadstofffreie Luft über ein Hopkalitfilter an. Dabei stieg der Depolarisationsstrom steil an. Anschließend wurde dem Reaktionsgefäß für 30 min Außenluft zugeführt. Der Verlauf des Meßstroms richtete sich nach den in der Luft enthaltenen Schadstoffen. Er ging zurück, wenn Jod durch reduzierende Spurenstoffe (wie SO_2) abgebaut wurde. Dagegen stieg er an, wenn zusätzliches Jod durch oxidierende Spurenstoffe (wie O_3) im Elektrolyten entstand. Zur Bestimmung der Schadstoffkonzentration wurde die Änderung des Depolarisationsstroms während der Belüftungszeit mit einem Eichfaktor multipliziert.

Das durch Elektrolyse erzeugte Jod diente sowohl für die Bestimmung des Eichfaktors der Apparatur bei der Beschickung mit Nullgas, was täglich einmal über 30 min zur Ausschaltung von Störeffekten notwendig war, als auch zur Umsetzung des gelösten SO_2 während der Messung.

ATTMANNSPACHER et al. [1977] berichteten über Erfahrungen bei der Ozonmessung mit trocken- und naßchemischen Methoden, darunter auch die KJ-Methode. Der naßchemische Sensor erwies sich als für die O_3 -Messung recht gut geeignet, wenn ein SO_2 -Filter im Ansaugrohr vorgeschaltet wurde. Bei extrem hohen und niedrigen Werten der rel. Luftfeuchte wurde jedoch die Meßgenauigkeit beeinträchtigt.

Galvanometrische Detektoren arbeiten ähnlich wie galvanische Zellen. Es handelt sich bei ihnen um Meßzellen, bei denen das Potential der Meßelektrode ständig im Bereich des Diffusionsgrenzstroms gehalten wird. Das gelingt entweder durch zweckmäßige Auswahl der Gegenelektrode oder Einführung einer Hilfsspannung in den Meßkreis. Eine Änderung des Potentials beeinflusst auch die Selektivität des Sensors. Als Meßgröße dient hier wie bei der Amperometrie der Kurzschlußstrom. Heute sind Meßzellen mit flüssigem, in der Regel durchströmenden, und festem Elektrolyten bekannt. U. a. beschrieben WORRELL & LIU [1982] einen Schwefeldioxidensensor mit einem festen Sulfatelektrolyten. Galvanometrische Detektoren wurden für eine Vielzahl von Gaskomponenten, u. a. auch für NO , NO_2 und H_2S entwickelt und eingesetzt.

2.3.2 Konduktometrie

Konduktometrische Verfahren nutzen als Meßeffect Änderungen der elektrischen Leitfähigkeit infolge von Reaktionen zwischen der zu bestimmenden Gaskomponente und einer auf diese abgestimmten Reaktionsflüssigkeit. Zu diesem Zweck wird die zu analysierende Luft mit der Lösung in innigen Kontakt gebracht, wobei die Flüssigkeit das betreffende Spurengas absorbiert. Es findet eine chemische Reaktion zwischen der zu analysierenden Komponente und der Reaktionsflüssigkeit statt, bei der ein Stoff entsteht, der stark dissoziiert. Die dabei gebildeten Ionen erhöhen die elektrische Leitfähigkeit, die in einer Zelle mit Hilfe von zwei Elektroden bestimmt wird, an die zur Vermeidung von Polarisationseffekten eine kleine Wechsellspannung gelegt wird.

Es gibt diskontinuierlich und kontinuierlich arbeitende Konduktometer. Bei den ersteren wird die Reaktionsflüssigkeit in vorgegebenen Zeitabständen erneuert und die zu analysierende Luft für eine konstante Zeitperiode mit der Reaktionsflüssigkeit in Kontakt gebracht. Eine verbesserte Leitfähigkeitszelle für dieses Meßprinzip wurde von KILLICK [1969] vorgeschlagen. Bei kontinuierlich arbeitenden Geräten werden die zu analysierende Luft und die Reaktionsflüssigkeit mit vorgegebener konstanter Geschwindigkeit ständig zugeführt. Moderne Analysatoren für diese Betriebsart enthalten je eine Vergleichs- und eine Meßzelle, die durch ein thermostatisiertes Ölbad auf einer festen Temperatur gehalten werden. Wie in Abb. 12 gezeigt, durchströmt bei den üblichen Analysatoren die einem Vorratsgefäß entnommene Reaktionsflüssigkeit mit konstanter Geschwindigkeit zunächst einen Wärmetauscher WT im Ölbad ÖB zur Temperaturangleichung und anschließend die Vergleichszelle VZ. Sie wird danach in einer Mischstrecke MS mit der zu untersuchenden Luft gemischt, wobei ein konstantes Mengenverhältnis zwischen Luft und Flüssigkeit gewahrt wird. Die Reaktionsflüssigkeit nimmt die nachzuweisende Gaskomponente auf und reagiert mit ihr. Nach Abtrennung der nicht gelösten Luft in einem Gasabscheider

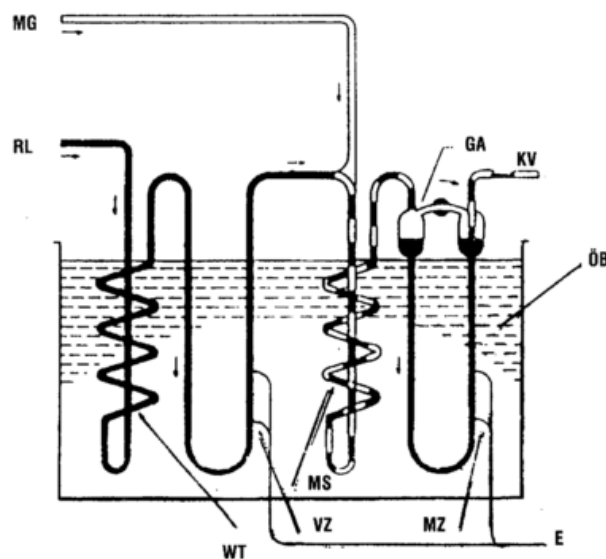


Abb. 12: Prinzip der Leitfähigkeitsmessung in konduktometrischen Analysatoren

MG: Meßgas	RL: Reaktionslösung
VZ: Vergleichszelle	MZ: Meßzelle
WT: Wärmetauscher	MS: Mischstrecke
GA: Gasabscheider	KV: Klemmvorrichtg.
ÖB: Ölbad zur Thermostatisierung	E: Elektroden mit Zuleitungen

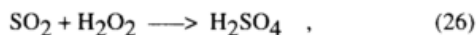
(aus: BIRKLE [1979])

der GA gelangt die Reaktionsflüssigkeit nun in die Meßzelle MZ und wird von hier schließlich zu einem Auffanggefäß für die verbrauchte Reaktionsflüssigkeit geführt. In der Meß- und Vergleichszelle befinden sich identische Elektrodenanordnungen, mit denen die elektrischen Leitfähigkeiten in beiden Zellen erfaßt werden. Die Thermostatisierung der Zellen im Ölbad kompensiert in Verbindung mit der Differenzmessung die Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit. Beide Elektrodenstrecken liegen entweder in einer Brücken- oder in einer Differenzschaltung. Die so bestimmte Spannungsdifferenz wird einem Verstärker bzw. Konverter zugeführt, der das Meßsignal aufbereitet.

LLOYD & MADDEN [1964] haben am Beispiel eines transportablen Gerätes mit geringer Leistungsaufnahme und geringem Verbrauch an Reaktionslösung gezeigt, daß es bereits ausreicht, Meß- und Vergleichszelle mittels eines massiven Kupferblocks als Wärmeaustauscher auf gleicher Temperatur zu halten. Meß- und Vergleichszelle waren hierbei als spaltförmige Durchflußzellen ausgebildet. Der Luftstrom wurde über eine Düse gegen die Flüssigkeitsoberfläche zwischen den beiden Zellen geblasen, was offenbar für eine ausreichende Durchmischung und die Einleitung der chemischen Reaktion ausreichte.

Konduktometrische Verfahren lassen sich leicht zu kontinuierlich arbeitenden Geräten ausbauen, besitzen jedoch nur eine begrenzte Selektivität auf Grund der chemischen Reaktion zwischen Gaskomponente und Reagenz. Prinzipiell lassen sich chemische Reaktionen für eine Vielzahl von Spurenstoffen angeben. Um Quereffekte von anderen Spurengasen auszuschließen, muß am Eingang des Luftstroms in den Analysator ein Selektivfilter vorgesehen werden, das möglichst nur Fremdgase aber nicht die zu analysierende Komponente zurückhält.

Die Leitfähigkeitsmessung wird heute hauptsächlich als Standardmethode für die Bestimmung des SO₂-Gehalts der Luft herangezogen. Als Reaktionsflüssigkeit wird dabei eine wäßrige Lösung von H₂O₂ und H₂SO₄ verwendet, der teilweise geringe Mengen von Fungiziden (zur Verhinderung von Algen- und Pilzbefall) sowie Benetzungsmittel zugesetzt werden. Die chemische Umsetzung erfolgt hier nach der Reaktionsgleichung



wobei die Schwefelsäure dissoziiert und die hierbei gebildeten Ionen die Leitfähigkeit entsprechend erhöhen. Störeffekte können durch alle in der Luft enthaltenen Substanzen hervorgerufen werden, die Säuren oder Basen sowie dissoziierende Salze bilden. Sie müssen im Selektivfilter zurückgehalten werden.

Über konduktometrische Analysatoren zur Erfassung von SO₂-Immissionen, ihre Eigenschaften oder ihren Einsatz haben THOENES [1961], WAINWRIGHT & WILSON [1962], LLOYD & MADDEN [1964], LAHMANN [1965], KILLICK [1969], MUELLER et al. [1971], BURMANN [1973], ROSSANO & THIELKE [1976], BIRKLE [1979], SIGGELKOW [1985] sowie die WHO [1976] berichtet.

2.3.3 Photometrie und Kolorimetrie

Die Verfahren der Photometrie und Kolorimetrie besitzen insofern Gemeinsamkeiten, als bei beiden die Extinktion eines Lichtstrahls den Meßeffect liefert. In beiden Fällen kommen Photometer als Meßsysteme zum Einsatz. Während jedoch bei den photometrischen Immissionsmeßverfahren Luftproben in Küvetten direkt untersucht werden, wird bei kolorimetrischen

Verfahren eine chemische Reaktion der interessierenden Gaskomponente mit einer Flüssigkeitslösung vorangestellt, die einen Farbstoff liefert. Die Absorption der in Betracht kommenden Gase ist bei Immissionskonzentrationen relativ gering und oft auf wenige Banden beschränkt. Sieht man von aufwendigen Spektralphotometern ab, die nur im Labor einsetzbar sind, lassen sich mit den verfügbaren nichtdispersiven Photometern nur Konzentrationen erfassen, wie sie bei Emissionen aber nur selten bei Immissionen auftreten. Die bei kolorimetrischen Verfahren verwendeten Farbstoffe besitzen hingegen in einem gewissen Spektralbereich eine relativ starke Absorption und eignen sich daher für die Erfassung von Konzentrationen von Schadgasen, wie sie bei Immissionen auftreten.

Photometer arbeiten in Spektralbereichen, die vom Ultraviolett bis weit in den Infrarotbereich reichen und etwa den Wellenlängenbereich von 0,2...12 µm umfassen. Im UV- und im sichtbaren Bereich wird die Absorption durch Anregung von Hüllenelektronen der Moleküle hervorgerufen. Im IR-Bereich ist sie durch Molekülschwingungen bedingt, die nur bei Gasmolekülen mit elektrischem Dipolmoment, nicht jedoch bei symmetrisch aufgebauten Gasmolekülen wie O₂ oder N₂ auftreten. Absorptionslinien erscheinen in Gruppen, die als Banden bezeichnet werden. Die Strahlungsabsorption ist für jede Gaskomponente unterschiedlich und damit charakteristisch. Für die Strahlenschwächung in einem Gas gilt das LAMBERT-BEERSche Gesetz

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp(-b_e \rho l) \quad , \quad (27)$$

wenn mit I_0 die Bestrahlungsstärke eines parallelen Lichtbündels vor Eintritt in das Gasvolumen, I die Bestrahlungsstärke hinter dem Gasvolumen der Länge l , mit $b_e(\lambda)$ den Extinktionskoeffizient bei der Wellenlänge λ und mit ρ die Dichte des absorbierenden Gases innerhalb der Gasprobe bezeichnet werden. Für $b_e \rho l \ll 1$ gilt angenähert

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) [1 - b_e(\lambda) \rho l] \quad , \quad (28)$$

d.h. die Lichtintensität hängt nahezu linear von der Dichte der zu erfassenden Gaskomponente und bei konstanter Temperatur und konstantem Druck von der Konzentration c der absorbierenden Gaskomponente ab.

Bei Photometern unterscheidet man dispersive und nichtdispersive Geräte. Die ersteren werden auch als Spektralphotometer bezeichnet. Sie messen die Lichtintensität bei einer Vielzahl von Wellenlängen innerhalb eines vorgegebenen Bereichs. Die Variation der Wellenlänge wird mit optischen Mitteln wie Prismen oder Gittern bewirkt. Der Strahlungsdetektor muß für alle Wellenlängen gleiche Empfindlichkeit besitzen. Spektralphotometer kommen hauptsächlich unter Laborbedingungen zur Anwendung und stellen hier wichtige Analysenmeßsysteme dar. Zur Erzielung einer hohen Nachweisempfindlichkeit muß mit langen Absorptionswegen gearbeitet werden. Für einen Einsatz zur routinemäßigen Erfassung der Konzentrationen von Spurengasen an automatisch arbeitenden Immissionsmeßstellen wurden sie als zu diffizil angesehen, zumal bei den zu erfassenden Leitkomponenten oft relativ lange Küvetten oder Mehrpfadzellen zum Einsatz kommen müßten.

Eine moderne Variante bilden Laseranalysatoren, die nach dem Verfahren des differentiellen Absorptionslidars (DIAL) arbeiten. Der Laser erzeugt zwei benachbarte Wellenlängen, von denen die eine mit der Absorptionslinie eines zu detektierenden Spurengases übereinstimmt, während die zweite als Referenzwellenlänge dient und weder von dem nachzuweisenden Spu-

rengas, noch von anderen Gaskomponenten nennenswert absorbiert werden darf. Das Verhältnis der beiden Intensitäten nach Durchstrahlung einer Meßstrecke (z.B. in einer Küvette) ist dann ein Maß für die Konzentration des zu detektierenden Spurengases und wird von einem photoelektrischen Detektor erfaßt. Eine auf diesem Prinzip beruhendes DIAL-Meßsystem haben JACOB et al. [1994] beschrieben. Dabei kommt als Strahlungsquelle ein Doppelfrequenz-HeNe-Laser zum Einsatz, der zwei räumlich getrennte Lichtstrahlen erzeugt, von denen der eine auf eine CH_4 -Absorptionslinie im IR-Bereich bei $3,3912 \mu\text{m}$ abgestimmt wird, während die Referenzwellenlänge bei $3,3922 \mu\text{m}$ liegt. Beide Strahlen durchlaufen ein optisches Zerhackerrad sowie die gleiche Meßküvette und werden danach auf dem Detektor fokussiert.

Nichtdispersive Photometer kommen ohne die genannten optischen Hilfsmittel zur Durchstimmung der monochromatischen Strahlung in einem vorgegebenen Spektralbereich aus und benutzen nach HODGESON et al. [1973] zur Verbesserung der Diskrimination selektive Strahler, Filter und/oder Strahlungsempfänger. Teilweise arbeiten sie bei verringertem Druck des zu analysierenden Gasgemischs, um die Linien ausreichend schmal halten zu können. Die auf diesen Prinzipien beruhenden Analysatoren ließen sich daher als einfachere und robuste Geräte aufbauen, die sich auch für einen Einsatz an automatischen Immissionsmeßstationen eignen. Besondere Vorkehrungen mußten bei diesen Analysatoren getroffen werden, um Beeinträchtigungen durch

- Änderungen des Lichtstroms der Strahlungsquelle(n),
- Änderungen von Nullpunkt und Empfindlichkeit der Detektoren und
- Änderungen von Nullpunkt und Empfindlichkeit des einzusetzenden Verstärkers

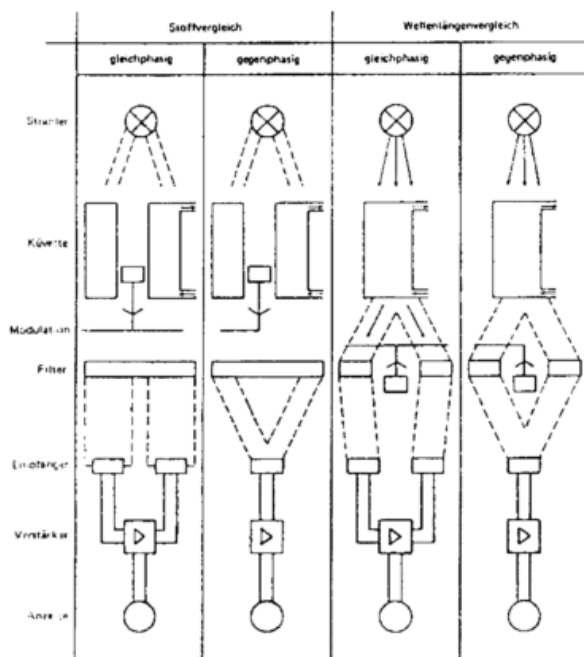


Abb. 13: Varianten der Zweistrahl-Wechsellichtverfahren (aus: BIRKLE [1979])

unwirksam zu machen. Aus diesem Grunde wird bei modernen Geräten nur noch mit der Zweistrahl-Wechsellicht-Methode gearbeitet. In der Abb. 13 sind verschiedene mögliche Varianten dargestellt. Alle gezeigten benutzen nur eine Strahlungsquelle. Bei der Methode des Stoffvergleichs werden zwei identische Lichtbündel erzeugt, von denen das eine durch die Analysenküvette mit dem zu untersuchenden Gasgemisch und das andere durch die mit nicht absorbierendem Gas gefüllte Vergleichsküvette geführt wird. Bei der Methode des Wellenlängenvergleichs ist nur eine Küvette erforderlich. Aus dem Lichtbündel werden zwei Wellenlängenbereiche ausgefiltert, von denen der eine in und der andere außerhalb einer Absorptionsbande der zu bestimmenden Gaskomponente liegt. Bei allen nichtdispersiven Photometern wird heute mit modulierter Strahlung gearbeitet. Unterschieden wird zwischen gleich- und gegenphasiger Modulation, je nachdem, ob die beiden Strahlungskanäle periodisch gleichzeitig oder abwechselnd unterbrochen werden. Bei gleichphasiger Modulation sind zwei Strahlungsempfänger erforderlich, die möglichst übereinstimmende Eigenschaften aufweisen müssen. Geräte mit gegenphasiger Modulation kommen mit nur einem Strahlungsdetektor aus. Das von diesen gebildete elektrische Differenzsignal wird in einem Wechselspannungsverstärker elektronisch verstärkt, phasenabhängig gleichgerichtet und einem Anzeige- oder Registriergerät bzw. einem Analog/Digital-Wandler zugeführt. Das Referenzsignal für die Phasenlage kann aus der Rotationsbewegung des Blendenrads abgeleitet werden.

Die in Abb. 13 gezeigten Varianten besitzen nur dann eine genügende Selektivität, wenn die im Gasgemisch enthaltenen Komponenten keine sich stärker überlappenden Absorptionsbanden besitzen. Das ist bei der Analyse von Luftproben leider nicht immer der Fall. Um trotzdem zu einem hinreichend selektiven Analyseergebnis zu gelangen wird vielfach das *Verfahren der negativen Filterung* genutzt, wie es anhand der Abb. 14 veran-

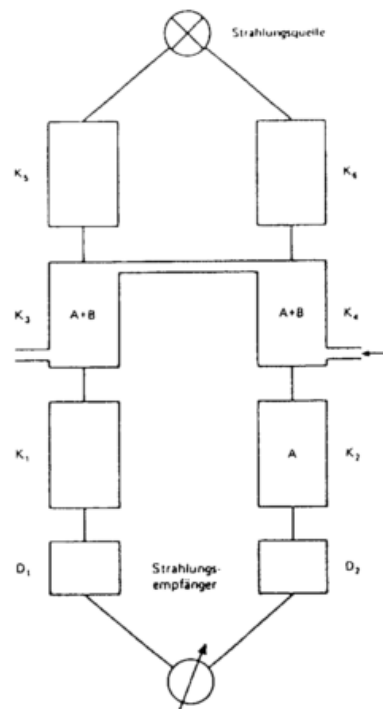


Abb. 14: Prinzip der negativen Filterung (aus: BIRKLE [1979])

schaulich wird. Es wird auch als *Gaskorrelationsverfahren* bezeichnet. Bei diesem werden in den Strahlengängen weitere Küvetten eingefügt, von denen K_1 mit einem nicht absorbierenden Gas und K_2 mit der im Probengas enthaltenen Gaskomponente A gefüllt wird. Das zu untersuchende Gasgemisch, das die beiden absorbierenden Komponenten A und B enthalten möge, leitet man durch die Küvetten K_3 und K_4 . In diesem Falle wird sich die Absorption durch die Komponente B in beiden Strahlengängen gleich auswirken, solange sich die Banden von A und B nicht überschneiden. Die Komponente B bringt unter dieser Voraussetzung keinen Meßeffect, da sich die Verringerungen der Bestrahlungsstärken bei der Differenzbildung herausheben. Im Falle einer Überlappung durch die Störkomponente sind die Küvetten K_5 und K_6 mit dem Gas der Störkomponente zu füllen. Dadurch wird der Strahlungsanteil, der durch die Störkomponente absorbiert werden kann, auf beiden Wegen herausgefiltert.

Obwohl fast alle der Leitkomponenten im UV- bzw. im sichtbaren Bereich Absorptionsbanden besitzen, ist die Anwendung nichtdispersiver photometrischer Verfahren im Rahmen der Immissionsmeßtechnik begrenzt. Der Grund liegt zum einen in den geringen Konzentrationen und zum anderen in den oft geringen Absorptionskoeffizienten der Spurengase und der Störung durch Banden des in höheren Konzentrationen vorhandenen Wasserdampfes.

Über SO_2 -Bestimmungen durch Absorptionsmessungen im UV-Bereich bei 285 nm haben WIEGLEB et al. [1983] berichtet. In diesem Bereich besitzt Wasserdampf keine Absorptionsbande und kann daher keine Querempfindlichkeit verursachen. Das benutzte UV-BINOS-Gerät der Fa. Leybold-Heraeus gestattete, Mischungsverhältnisse bis zu 100 ppm bei 0,1 ppm Auflösung nachzuweisen und war bevorzugt zur Überwachung von Verbrennungsvorgängen bestimmt.

Auch Ozon besitzt im UV in der Nähe der Quecksilberresonanzlinie bei 253,7 nm eine hinreichend starke Absorption, die eine photometrische Erfassung bei einer noch vertretbaren Lichtweglänge zuläßt. Begünstigt wird das Analysenverfahren bei diesem Spurengas durch die Verfügbarkeit über eine Lichtquelle für diese Wellenlänge in Form der Hg-Niederdrucklampe, aus der sich der erforderliche enge Wellenlängenbereich durch optische Filter gewinnen läßt. Die Methode wird jedoch hauptsächlich als Referenzverfahren benutzt, weil natürliche Luft vor dem Einbringen in die Küvetten gereinigt werden muß. Das Verfahren wird in der VDI-Richtlinie VDI 2468, Blatt 6 ausführlich behandelt.

Über die Entwicklung eines Zweistrahl-UV-Photometers als Raketenlast für *in-situ*-Messungen des Ozongehalts in höheren Atmosphärenschichten berichteten SEN et al. [1996]. Das Absorptionsphotometer nutzte als Strahlungsquelle eine Niederdruck-Quecksilberdampfampe, die beide Absorptionskammern mit UV-Strahlung der Wellenlänge 253,7 nm beleuchtete. Temperatur und Druck in den Analysenkammern wurden als Einflußgrößen mitgemessen. Der Analysator erreichte eine Nachweisempfindlichkeit von $2,7 \cdot 10^{15}$ Moleküle/m³ bei einer geschätzten Meßunsicherheit von 8,2%. Meßwerterfassung und -aufbereitung, Geräte- und Sendersteuerung (für die Funkübertragung zur Bodenstation) übernahm ein in die Nutzlast einbezogener Mikrorechner. Die Messungen erfolgten, nachdem die Nutzlast beim Erreichen der Gipfelhöhe ausgestoßen wurde und an einem Fallschirm abstieg. Die eigentliche Auswertung des Ozon-Vertikalprofils erfolgte an der Bodenstation.

Im IR-Bereich besitzen eine Reihe von atmosphärischen Spurengasen Schwingungsbanden. Ihre photometrische Konzentrationsbestimmung wird aber teils durch die geringen Immissions-

konzentrationen, teils durch starke Überlappung der Banden (wie bei den Kohlenwasserstoffen) erschwert oder sogar verhindert. Lediglich für die Gaskomponenten CO und CO_2 , die gegenüber anderen Spurengasen relativ hohe Mischungsverhältnisse von 0...50 ppm bzw. um 330 ppm aufweisen, hat sich die direkte und kontinuierliche Messung der Infrarotabsorption an Gasproben als Standardverfahren durchgesetzt (siehe auch LAHMANN [1965], ROSSANO & THIELKE [1976], WHO [1976]). Die Querempfindlichkeit für Wasserdampf wird entweder durch Ausfrieren des Wassers beim Abkühlen des Probengases vor der Analyse auf $-70^\circ C$, Vorschaltung einer Trockenpatrone z.B. mit Silikagelfüllung oder durch einen vom Mischungsverhältnis abhängigen Korrektionsfaktor ausgeschaltet (vgl. WHO [1976], CUNDARI et al. [1990]).

Die Entwicklung der nichtdispersiven Infrarotverfahren (NDIR) geht auf die Entwicklung des URAS-Gerätes zurück, über die LUFT [1943] berichtete. Als Strahlungsquellen wurden dabei Metalldraht-Heizwendeln mit Reflektor eingesetzt. Die IR-Strahlung wurde durch ein rotierendes Blendenrad moduliert. Die Küvetten waren mit IR-durchlässigen Fenstern auszurüsten. Bei den Geräten wurde weitgehend von den Methoden der negativen Filterung Gebrauch gemacht. Als Strahlungsempfänger dienten Kammern, die mit den Gaskomponenten gefüllt wurden, deren Konzentrationen bestimmt werden sollten. Die mit der Strahlungsabsorption in den Kammern verbundene Erwärmung führte zu periodischen Druckschwankungen, die auf beide Seiten eines Membrankondensators wirken. Dieser Kondensator erzeugte eine elektrische Differenzspannung als Meßsignal. Das Grundprinzip des NDIR-Verfahrens wird auch heute noch bei den im Einsatz befindlichen Geräten genutzt. Dabei kommen moderne Materialien und Schaltungen zur Anwendung. Zwei dieser neueren Verfahren bzw. Geräte mit der Bezeichnung URAS und UNOR werden in den VDI-Richtlinien VDI 2455, Blatt 1 und 2 ausführlich behandelt.

Eine Besonderheit des UNOR-Gerätes besteht darin, daß mit gegenphasig modulierter Strahlung gearbeitet wird, die abwechselnd die von der zu analysierenden Luft durchströmte Analysenküvette und die Vergleichsküvette mit einer nicht absorbierenden Stickstofffüllung durchläuft, bevor sie den Empfänger, bestehend aus zwei hintereinander angeordneten Kammern erreicht (vgl. Abb. 15). Beide Kammern sind mit Kohlenmonoxid

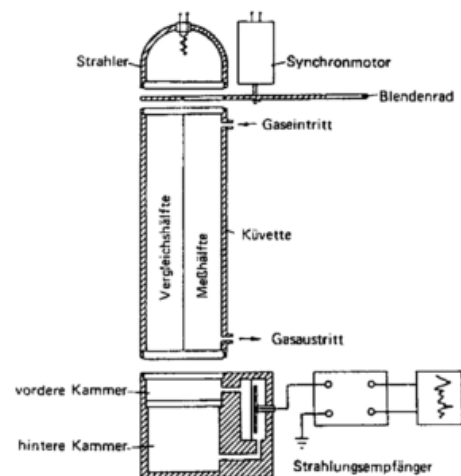


Abb. 15: Aufbau des CO -Meßgerätes UNOR 2 (nach: VDI 2455, Bl. 2)

gefüllt und so dimensioniert, daß sich ihre Gasfüllungen bei CO-freier Luft in der Analysenküvette nahezu gleich stark erwärmen, so daß die Membran des Kondensators im Verbindungsgang beider Kammern sich nicht durchbiegt und damit kein elektrisches Signal liefert. Die in Strahlungsrichtung vordere Kammer absorbiert bevorzugt Strahlung mit Wellenlängen der Linienzentren, die hintere Kammer hingegen hauptsächlich Strahlung im Bereich der Linienflanken. Befindet sich in der Analysenküvette CO, wird dort die Strahlung in den Linienzentren bereits weitgehend absorbiert. Dadurch reduziert sich die Absorption in der vorderen Kammer des Strahlungsempfängers. Das bedingt eine unterschiedliche Erwärmung der Gasfüllungen in beiden Kammern, so daß die Kondensatormembran sich periodisch bewegt und ein mit der CO-Konzentration in der Analysenküvette ansteigendes Wechselspannungssignal liefert.

Weitere Verfahren und Geräte zur kontinuierlichen Gasanalyse durch Absorption infraroter Strahlung wurden in einem Übersichtsreferat von WINTERLING [1965] dargestellt und behandelt. Dort findet sich zugleich eine umfangreiche Literaturübersicht zum genannten Gebiet.

Ein CO-Meßgerät für Konzentrationen ab 1 ppm nach dem Prinzip des IR-Doppelkammerphotometers wurde bereits 1959 in der Zeitschrift *Electronics* unter der Typenbezeichnung LIRA beschrieben. MAYER & SAJONZ [1983] arbeiteten bei der Bestimmung der gleichen Komponente in Luft mit dem Gerät ULTRAMAT 4, bei dem sich die Querempfindlichkeit gegenüber Wasserdampf durch eine abstimmbare optische Kopplung zwischen den beiden Empfängerkammern deutlich reduzieren ließ. LEFAS [1984] benutzte zur Erfassung der Kohlenmonoxid-Konzentrationen in seinem automatisch arbeitenden System die Absorption von IR-Strahlung im Bereich der CO-Bande bei 4,7 µm. Über die Erfassung von meteorologischen Größen sowie Spurengaskonzentrationen beim Durchzug eines tropischen Wirbelsturms berichteten DODDRIDGE et al. [1991]. Dazu mußten Analysatoren mit erhöhter Empfindlichkeit sowie geringerer Nachweisgrenze eingesetzt werden. Die CO-Messungen erfolgten dabei mit einem modifizierten Gaskorrelationsanalysator Model 48 der Fa. Thermo Environmental Corp., Franklin, Mass., dessen Empfindlichkeit erhöht worden war und der eine Nachweisgrenze von ca. 24 ppbv besaß.

Auch für die Überwachung der CO₂-Konzentrationen in Reinluftgebieten sind NDIR-Geräte eingesetzt worden. KRASOV et al. [1979] berichteten über einen IR-Gasanalysator zur Bestimmung der CO₂-Konzentration und die mit dem Gerät gesammelten Erfahrungen. CUNDARI et al. [1990] erläuterten den Einsatz von Geräten der Typen URAS-2T (Fa. Hartmann & Braun) sowie ULTRAMAT-5E (Fa. Siemens) auf dem Mt. Cimone, Italien, das dabei benutzte Probenahmesystem, das Eichverfahren und die Ausschaltung des Wasserdampfeinflusses auf das Meßergebnis.

Die Bestimmungsmethode der *Kolorimetrie* beruht auf einer Farbreaktion einer Gaskomponente mit einer Reaktionsflüssigkeit. Genutzt werden hierbei chemische Reaktionen bei denen ein Farbstoff mit intensiver Färbung entsteht. Die Transparenz der Lösung wird innerhalb eines engen Spektralbereichs photometrisch gemessen, in dem die Farbstofflösung maximal absorbiert.

Heute sind für fast alle in der Immissionsanalytik interessierenden Spurengase geeignete Farbreaktionen bekannt, die für eine kolorimetrische Bestimmung in Betracht kommen. Geeignete Farbreaktionen existieren z.B. für SO₂, NO₂, H₂, O₃ sowie für

die Gesamtmenge der Oxidantien. Sie wurden von LAHMANN [1965], der WHO [1976] sowie in den VDI-Richtlinien VDI 2451, Bl. 3, VDI 2453, Bl. 1 u. 2, VDI 2468, Bl. 5 u. 6 einschließlich der erforderlichen Chemikalien, Geräte und Prozeduren ausführlicher behandelt. Auf die den Verfahren zugrunde liegenden Reaktionen, auf die hier nicht näher eingegangen werden soll, bauen hauptsächlich manuelle Referenzverfahren und die käuflich erhältlichen Detektionsröhrchen auf (vgl. WHO [1976], BIRKLE [1979]). Weitere Beschreibungen teilweise automatisierter kolorimetrischer Verfahren für bestimmte Spurengase findet man bei THOMAS et al. [1956], MOYER & GILBERT [1958], NADER [1959], TADA [1962], sowie WAINWRIGHT & WILSON [1962]. Das von THOMAS et al. beschriebene Gerät war für die Bestimmung von NO₂ und NO_x = NO + NO₂ ausgelegt. Das NO wurde vor der Mischung mit der Reaktionslösung mit einem Oxidationsmittels zu NO₂ oxidiert. Aus der Differenz beider Meßwerte ließ sich die NO-Konzentration ableiten, sofern eine Oxidation des atmosphärischen NO₂ vermieden wurde.

Bei einer Anwendung in automatischen Analysatoren müssen nach BIRKLE [1979] eine Reihe von Voraussetzungen erfüllt sein. Dazu gehören:

- Die erforderlichen Chemikalien müssen sich einfach in der erforderlichen Reinheit herstellen lassen oder kommerziell erhältlich sein. Sie sollen über längere Zeit lagerbar sein.
- Die ablaufenden Reaktionen sollen sich theoretisch gut über-schauen lassen.
- Die Farbreaktionen müssen die notwendige Empfindlichkeit und Selektivität aufweisen und genügend rasch ablaufen. Sie sollen von den Umgebungsbedingungen weitgehend unabhängig sein.
- Die Farbstoffe müssen unter den jeweiligen Umgebungsbedingungen mindestens 30 min beständig bleiben. Sie sollen sich möglichst wenig an den Küvettenwänden ansetzen.

Die Messung der Farbintensität erfolgt meist mit Photometern im Zweistrahl-Wechsellicht-Verfahren. Dabei wird der Spektralbereich mit Filtern auf den Bereich maximaler Farbstoffabsorption eingegrenzt. Für Konzentrationen im ppm-Bereich wird – ähnlich wie bei der Leitfähigkeitsmessung – nach dem in Abb. 16 gezeigten Durchlaufprinzip gearbeitet. Dabei durchströmt die Lösung mit konstanter Geschwindigkeit zuerst die Vergleichsküvette, wird danach mit dem Probenluftstrom gemischt, löst hierbei die Gaskomponente, reagiert mit ihr in einer spezifischen Farbreaktion und gelangt nach Abtrennung der Luft sowie Stabilisierung der Färbung in die Meßküvette, von der sie schließlich in ein Sammelgefäß entleert wird. Für geringere Konzentrationen im ppb-Bereich eignen sich diskontinuierliche Verfahren besser, bei denen eine bestimmte Menge Probenluft durch ein vorgegebenes Volumen der Reaktionslösung gesaugt und dabei die nachzuweisende Gaskomponente in der Reaktionslösung angereichert wird.

Nach beiden Verfahren arbeiten einige automatische Analysatoren für Immissionsmessungen. Die Bedeutung der Kolorimetrie als naßchemisches Verfahren geht jedoch in diesem Anwendungsgebiet zugunsten physikalischer Methoden zurück, da die bei der Farbstoffbildung ablaufenden Vorgänge nicht immer theoretisch voll überschaubar werden. Oft steht die Farbstoffbildung in keinem stöchiometrischen Zusammenhang zur umgesetzten Substanzmenge. In solchen Fällen ist eine empirische Eichung erforderlich.

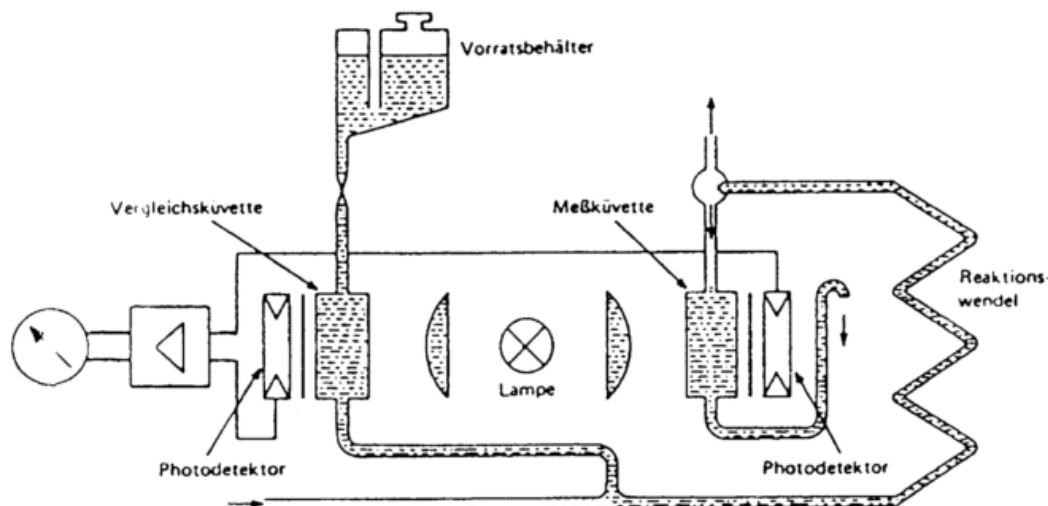


Abb. 16: Prinzip eines kolorimetrischen Analysators nach dem Zweistrahl-Durchlauf-Verfahren (aus: BIRKLE [1979])

Obwohl die der Messung vorangestellte Farbreaktion für den zu untersuchenden Stoff spezifisch gewählt wird, sind Störeffekte durch andere Substanzen auch hier nicht vollständig auszuschließen. Günstig ist es, wenn diese störenden Stoffe vor der Reaktion aus der Probenluft entfernt werden können, was manchmal mit geeigneten Filterpatronen ohne nennenswerte Verfälschung der zu erfassenden Komponente möglich ist.

2.3.4 Chemilumineszenz-Verfahren

Die Chemilumineszenz beruht auf chemischen Reaktionen, bei denen Energie freigesetzt wird, die teilweise zur Anregung von an der Umsetzung beteiligten Molekülen führt. Die betreffenden Moleküle gehen innerhalb relativ kurzer Zeit vom angeregten Zustand in den Grundzustand zurück, wobei sie zum größeren Teil ihre Energie durch Stoß an andere Moleküle, zum kleineren Teil in Form von Photonen abgeben.

Bei den chemischen Umsetzungen, die Lumineszenzerscheinungen verursachen, kann es sich sowohl um Reaktionen mit anderen Gasen als auch um Reaktionen mit Feststoffen handeln. Die letzteren ermöglichen zwar kleinere Nachweisgrenzen, die dabei beteiligten festen Stoffe unterliegen jedoch Alterungserscheinungen, die deren Austausch in regelmäßigen Zeitintervallen notwendig machen. Bei Gasreaktionen werden die Reaktionspartner der Probenluft im Überschuß beigemischt. Das Verfahren der Chemilumineszenz erfordert zwar einen hochempfindlichen Strahlungsdetektor, kommt jedoch weitgehend ohne nachchemische Reaktionen aus. Das favorisiert diese Methode für automatische Analysen.

Das Lumineszenzlicht tritt in der Reaktionskammer der Analysatoren in Form von Lichtblitzen auf und ist dem Volumenstrom der reagierenden Gaskomponente proportional. Wird die Volumenströmung der Probenluft konstant gehalten, besteht eine direkte Proportionalität zur Konzentration der in der Luft enthaltenen Gaskomponente. Der Proportionalitätsfaktor ist jedoch von der Temperatur und dem Druck abhängig. Das bei Spurengasen relativ schwache Lumineszenzlicht wird in den Analysatoren von einem Sekundärelektronenvervielfacher (SEV) als Strahlungsdetektor erfaßt, dessen spektrale Empfindlichkeit nach dem Bereich der bei der betreffenden Reaktion abgegebenen Strahlung gewählt wird. Zur Verringerung des Dunkelstroms kühlt man den SEV. Die Geometrie der Reaktions-

kammer und das Reflexionsvermögen ihrer Innenfläche werden so gewählt, daß die Empfängerfläche des SEV einen möglichst großen Teil der erzeugten Strahlung erhält. Dazu ist der Strahlungsdetektor direkt mit der Reaktionskammer zu koppeln. Abb. 17 zeigt die Reaktionskammer des Ozonanalysators von PEARSON [1990], bei der der mit Ozon reagierende Stoff mit der Luft in einem engen Kanal nahe dem Strahlungsdetektor gemischt wird. Die Innenflächen der Kammer sind poliert und vergoldet. Eine Falle verhindert den Eintritt von Außenlicht über den Pumpstutzen. Das linsenförmige Glasfenster konzentriert das Lumineszenzlicht auf der Empfängerfläche des SEV. Ein Stutzen für die Einführung des Lichtes einer LED dient zu Testzwecken.

Für eine Reihe von Spurengasen, deren Konzentrationen bei Immissionsmessungen als Leitkomponenten zu erfassen sind, kennt man Chemilumineszenzreaktionen, die sich für deren Nachweis nutzen lassen (siehe HODGESON et al. [1973], BIRKLE [1979]). In erster Linie betrifft dies die Gase Stickstoffmonoxid und Ozon. NO reagiert hierbei mit O_3 , das mittels UV-Lampe in einem O_2 -Gasstrom erzeugt wird. Für die Bestim-

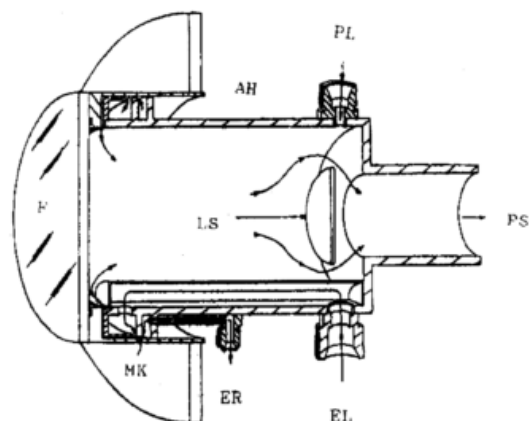


Abb. 17: Reaktionskammer des Ozonanalysators
 LS: Lichtsperre mit reflektierender Seite
 PS: Pumpstutzen
 EL: Einlaß für Luftprobe
 ER: Einlaß für Reagenz
 MK: Mischkanal
 PL: LED für Prüfzwecke
 F: Glasfenster der Kammer
 AH: Angriffsfläche für Thermostatenheizung
 (aus: PEARSON [1990])

mung von O₃-Konzentrationen sind Reaktionen mit den Gasen NO, C₂H₄ sowie mit Gallussäure und dem Farbstoff Rhodamin B bekannt, die auf einen Silikagel-Träger aufgebracht werden. Über verschiedene auf dem letztgenannten Prinzip basierende Ozonmeßgeräte hat REGENER [1964] berichtet. Stickstoffdioxid kann durch eine thermisch-katalytische Reaktion zu NO reduziert werden. Dadurch ist es möglich in zwei gleichzeitig oder in kurzem zeitlichen Abstand nacheinander auszuführenden Messungen die Konzentrationen von NO und NO_x = NO + NO₂ zu bestimmen und durch Differenzbildung die von NO₂ zu berechnen. Auch für Kohlenmonoxid und Stickstoffdioxid sind Reaktionen mit atomarem Sauerstoff bekannt, bei der Chemilumineszenz auftritt. Der atomare Sauerstoff muß durch eine Mikrowellenentladung gebildet werden. Für Meßzwecke werden diese Reaktionen z.Zt. nur selten genutzt. MAEDA & TAKENAKA [1993] beschrieben ein Lumineszenzverfahren, das auf einer Reaktion zwischen Ammoniak und Halogenen basiert und folglich zum Nachweis von Spuren dieser Substanzen geeignet ist.

Methoden und Geräte der chemilumineszenten Ozonanalyse wurden bereits von STEINBERGER et al. [1967] im Laboratorium einer eingehenden Analyse unterzogen. Die Reaktionsgeschwindigkeiten und die Zeitkonstanten der Abgabe des Lumineszenzlichts sind bei diesen Reaktionen relativ kurz. Wird die Verweildauer der Luftprobe in der Reaktionskammer kleiner als die Reaktionszeitkonstante gewählt, so lassen sich mit dieser Methode zeitaufgelöste Konzentrationswerte bestimmen. ATTMANNSPACHER et al. [1977] führten vergleichende Ozonmessungen nach der Chemilumineszenzmethode und einer naßchemischen Methode durch. Dabei änderten sich beim erstgenannten Sensor sowohl der Nullpunkt als auch die Empfindlichkeit im Laufe der Zeit. Er reagierte nur dann auf kurzfristige Spitzenwerte, wenn seine Zeitkonstante auf Werte von 5 s oder kleiner eingestellt worden war. Wie bei den Geräten nach der naßchemischen Methode zeigten sich auch hier Beeinträchtigungen der Meßgenauigkeit bei hoher relativer Luftfeuchte (> 70 bis 80%).

PEARSON [1990] benutzte einen speziellen Ozonanalysator nach der Chemilumineszenzmethode mit einer Bandbreite von 12 Hz zur Bestimmung von O₃-Konzentrationen bei turbulenten Flußmessungen. RIDLEY & GRAHEK [1990] berichteten über einen NO-Sensor kleiner Masse, der mit einem Reaktionsgefäß geringen Volumens und einer begrenzten Durchflußmenge in Flugzeugen eingesetzt werden kann. PERKINS et al. [1993] beschrieben einen Ozonmonitor für entlegene Gebiete, der nicht auf Netzanschluß angewiesen ist. Die Steuerung des Analysensystems und die Meßdatenerfassung übernahm hierbei ein Micrologger.

Über Messungen von NO und NO_y (NO₂ und HNO₃) mit einem Chemilumineszenzverfahren berichteten KONDO et al. [1997]. Die Probenluft wurde über einen Teflonschlauch angesaugt. Mit Hilfe eines Gold-Katalysators ließen sich die NO_y-Verbindungen mit hoher Effektivität in NO konvertieren. Das Verfahren zeichnet sich durch kurze Ansprechzeiten sowie gute Reproduzierbarkeit aus.

KUMAR et al. [1991] beschrieben einen mikrorechnergeführten Analysator zum Nachweis von Wasserstoffperoxid in Luft, der Konzentrationen im Sub-ppb-Bereich detektieren kann. Als Meßeffect wurde die Chemilumineszenz genutzt, die bei einer Reaktion von in Wasser gelöstem H₂O₂ mit Luminol auftritt. Voraussetzung für eine einwandfreie Messung sind höchste

Reinheit der benötigten Substanzen sowie eine vorherige Anreicherung der Luftprobe mit Argon. Ein Mikrorechner übernahm die Zeitsteuerung der für die Aufbereitungs- und Eichvorgänge benötigten Ventile und Pumpen sowie die Erfassung und Verarbeitung der Meßsignale des Analysators und eines UV-Photometers.

2.3.5 Ionisationsstrom-Gasanalyse

Die Wirkung dieser Analyseverfahren beruht auf der Ionisierbarkeit von Gasen. Eine gewisse Selektivität ist durch die substanzspezifische Ionisierungsenergie gegeben, die zur Ionisierung der Gasmoleküle bzw. -atome aufgewendet werden muß. Zur Erzeugung eines Ionisationsstroms muß eine Spannung zwischen zwei Elektroden angelegt werden. Der Sättigungsstrom I_s ist innerhalb eines relativ weiten Spannungsbereiches, innerhalb dessen bei Ionisationsstrommessungen die Saugspannung gewählt wird, von der angelegten Spannung unabhängig. Die für die Ionisation erforderliche Energie kann

- durch eine Flamme,
- durch radioaktive Bestrahlung oder
- durch UV-Bestrahlung

aufgebracht werden.

Auf der erstgenannten Möglichkeit beruht der *Flammenionisationsdetektor*, der kurz auch als FID bezeichnet wird. Sein Prinzip wird anhand der Abb. 18 erläutert, wobei von einer Anordnung ausgegangen wird, die für Immissionsmessungen geeignet ist. Wasserstoffgas wird über eine Düse in einer konstanten Gasrate zugeführt, die über die Flammenhöhe kontrolliert werden kann. Als Brenngas dient die zu analysierende Luft, die rings um die Düse von unten in den FID mit einem ebenfalls konstant gehaltenen Strom eingeleitet wird. Die Saugspannung liegt zwischen der Düse und einer darüber angeordneten Auffangelektrode. Gewöhnlich wird die letztgenannte Elektrode auf Massepotential gehalten und an die Düse eine negative Spannung gelegt. Ist die zugeführte Luft frei von stärker ionisierenden Gasen, kommt wegen der hohen Ionisierungsenergie der atmosphärischen Gase nur ein geringer Ionisationsstrom zustande, der als Nullstrom bezeichnet wird. Er ist bei gleichbleibenden Umgebungsbedingungen (Temperatur und Druck) weitgehend konstant und wird durch einen in entgegengesetzter Richtung fließenden Strom kompensiert. Die untere Nachweisgrenze des FID liegt, wie in der Zeitschrift Electronics [1964] ausgeführt, in einem Bereich, der einen Einsatz zur Immissionsüberwachung zuläßt.

Für die meisten Gase wie H₂, O₂, CO, CO₂ und Wasserdampf ist die Ionisierungsenergie >12eV. Die in einer Wasserstoff- oder CO-Flamme entstehende Ionisierung ist daher gering.

FIDs werden in der Immissionsanalytik bevorzugt für die Bestimmung des Gesamtgehalts an Kohlenwasserstoffen genutzt, da sie bei Vorhandensein im Brenngas den Ionisationsstrom deutlich erhöhen. Diese Wirkung wird der geringen Ionisierungsenergie des Kohlenstoffatoms zugeschrieben, die nur 3,9 eV beträgt. Man geht davon aus, daß in der Flamme C-Atome kurzzeitig als Zwischenprodukte auftreten, bevor die eigentlichen Verbrennungsprodukte CO₂ und H₂O entstehen. Für den Ionisationsstrom I gilt

$$I = \sum s_i \cdot c_i \quad (29)$$

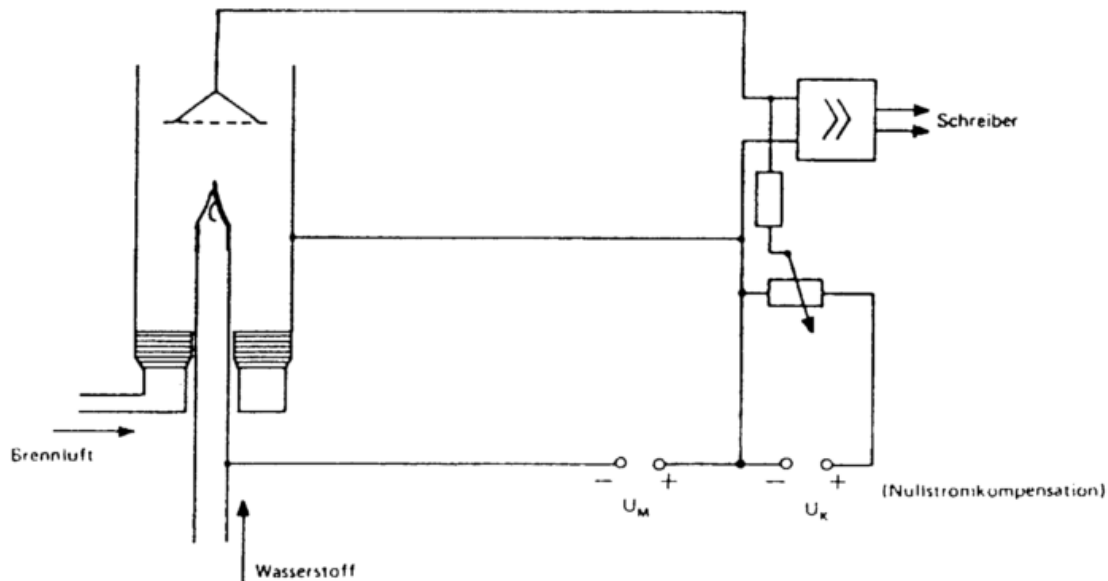


Abb. 18: Prinzip des Flammenionisationsdetektors (FID) (aus: BIRKLE [1979])

wenn c_i die Konzentrationen der in der Luft enthaltenen unterschiedlichen Kohlenwasserstoffe und s_i ihre jeweiligen Empfindlichkeiten bezeichnen. s_i nimmt oft mit steigender Zahl der C-Atome im Molekül zu. Ein völlig eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Ionisierungsstrom und dem Gehalt an Kohlenwasserstoffen läßt sich nur dann voraussetzen, wenn nur ein Kohlenwasserstoff in der Luft enthalten ist. Da meist mit dem Vorhandensein mehrerer verschiedener Kohlenwasserstoffe zu rechnen ist, erfolgt die Eichung des FID mit einer Bezugs-komponente (z.B. CH_4 oder C_3H_8). Die Angabe des Kohlenwasserstoffgehalts erfolgt dann in – auf das Eichgas bezogenen – äquivalenten Einheiten.

Zur Messung der äußerst geringen Ionisationsströme ist eine Verstärkung notwendig. Dazu müssen elektronische Verstärker mit extrem hohem Eingangswiderstand $> 10^{14}$ Ohm zur Verfügung stehen, die dicht am FID anzuordnen sind.

Im Meßergebnis des FID wird auch die Methankonzentration miterfaßt. Sie ist im Gegensatz zu den Kohlenwasserstoffen mit höherer Zahl an C-Atomen oft überwiegend natürlichen Ursprungs. Interessieren nur die antropogen bedingten Luftverunreinigungen, wird häufig auf Angaben des Gesamtkohlenwasserstoffgehalts ohne Methan zurückgegriffen. Er kann durch zwei FID-Messungen bestimmt werden. Zunächst wird der Gesamtkohlenwasserstoffgehalt mit Methan erfaßt. Danach schaltet man der Analysenapparatur eine Einrichtung zur thermisch-katalytischen Verbrennung aller höheren Kohlenwasserstoffe außer CH_4 vor. Mit dem FID wird dann nur der Methangehalt gemessen. Durch Differenzbildung zwischen den Ergebnissen beider Messungen erhält man den gewünschten Gesamtkohlenwasserstoffgehalt ohne Methan.

BRUCKMANN et al. [1983] wiesen darauf hin, daß wegen der sehr unterschiedlichen biologischen Wirkungen verschiedener Kohlenwasserstoffe Messungen des Gesamtkohlenwasserstoffgehalts auch ohne Methan nur dann interpretierbar sind, wenn am Meßort die Anteile der einzelnen Kohlenwasserstoffkomponenten annähernd konstant sind. Da diese Voraussetzung nur selten als erfüllt angesehen werden kann, sind die Meßergebnisse des Gesamtkohlenwasserstoffgehalts oft von beschränktem Wert.

Der Einsatz von Analysatoren für den Gesamtkohlenwasserstoffgehalt an automatischen Immissionsstationen ist daher im letzten Jahrzehnt zurückgegangen. Dagegen werden die Anstrengungen verstärkt, automatisch arbeitende Analysatorsysteme zu schaffen, mit denen sich die Komponenten trennen lassen.

Beim Verfahren des *Aerosolionisationsgasanalysators* wird die nachzuweisende Spurengaskomponente mit einer substanzspezifischen chemischen Umsetzung in ein Aerosol verwandelt. Durch ein radioaktives Präparat wird die das Aerosol enthaltene Luftprobe bestrahlt. Die dabei zunächst entstehenden Kleinionen, welche die elektrische Leitfähigkeit der Luft erhöhen, lagern sich jedoch rasch an die Aerosolpartikel an. Die dabei entstehenden Großionen haben eine geringere Ionenbeweglichkeit, wodurch der Ionisationsstrom in Abhängigkeit von ihrer Konzentration zurückgeht.

Nach diesem Verfahren arbeitet der von GROSSE et al. [1990] angegebene SO_2 -Analysator AIG-2. Die Luft wird in einem Filter zunächst vom natürlichen Aerosol und anderen Schwefelverbindungen (wie H_2S oder CS) befreit. Das in ihr enthaltene SO_2 wird zunächst zu SO_3 oxidiert. In einer nachfolgenden Reaktion mit Butylamin wird das Aerosol erzeugt. Es gelangt in eine Ionisationskammer mit einer radioaktiven Kr-85-Quelle. Einer Vergleichskammer wird gereinigte Luft zugeführt. Die Differenz der Ionisationsströme beider Kammern wird nach Verstärkung gemessen. Das Ergebnis ist hierdurch von den Umgebungsbedingungen Druck, Temperatur und Luftfeuchte sowie von Gasflußänderungen weitgehend unabhängig.

2.3.6 Chromatographie

Chromatographische Verfahren beruhen auf einer Stofftrennung infolge einer unterschiedlichen Löslichkeit der Gaskomponenten in Flüssigkeiten oder einer unterschiedlichen Adsorption bzw. Absorption in Feststoffen. Entwickelt haben sich die heutigen Verfahren ursprünglich aus der sog. Papierchromatographie, bei der die unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeit einer mit den nachzuweisenden Stoffen versehenen Flüssigkeitsprobe in einem saugfähigen Papierblatt zur Stofftrennung genutzt wurde. Um den jeweiligen Aufenthaltsort der verschiedenen Komponenten im Papier feststellen zu können, wurden sie angefärbt, woher

das Verfahren seinen Namen entlehnte. Dieser Name hat sich auch bei den modernen Verfahren der Stofftrennung erhalten, obwohl sie ohne eine Einfärbung arbeiten und statt der optischen Detektion andere Möglichkeiten nutzen.

Das wichtigste chromatographische Verfahren für immissionsanalytische Zwecke ist zweifellos die Gas-Chromatographie. Danaben haben sich weitere Verfahren der Stoffanalyse, wie die Hochdruck-Flüssigkeits-Chromatographie (HPLC) und die Ionen-Chromatographie entwickelt, die teilweise auch für bestimmte Immissionsmessungen von Interesse sind.

Bei der *Gas-Chromatographie* werden zur Trennung dünne Röhren eingesetzt, deren Innenflächen entweder mit einem Flüssigkeitsfilm überzogen oder die mit einem porösen Feststoff gefüllt sind. Die zu analysierende Luftprobe wird einem Trägergas (meist H_2) überlagert und strömt mit diesem in die Trennsäule. Dort werden die in der Luftprobe enthaltenen Gaskomponenten teilweise in der Flüssigkeit gelöst oder vom Feststoff adsorbiert oder absorbiert. Dabei stellt sich ein dynamisches Gleichgewicht zwischen den in der Gasphase verbleibenden c_G und den gelösten, ad- oder absorbierten Stoffkonzentrationen c_F ein. Das Verhältnis

$$k_i = \frac{c_{iF}}{c_{iG}} \quad (30)$$

bezeichnet man als Verteilungskoeffizienten der i -ten Stoffkomponente. Der Weitertransport eines Gasmoleküls durch die Trennsäule ist nur in der Gasphase möglich. Der Bruchteil α_i der i -ten Komponente im Gasraum bestimmt sich gemäß

$$\alpha_i = \frac{1}{1 + k_i(V_F/V_G)} = \frac{t_i}{t_o} \quad (31)$$

worin V_F das Volumen des zurückhaltenden Materials pro Längeneinheit der Trennsäule und V_G das Volumen des Gasraums pro Längeneinheit der Trennsäule bezeichnen und t_i die Zeit angibt, während der sich die Moleküle der Substanz i im Mittel der Gesamtzeit t_o in der Gasphase befinden. Die effektive Wanderungsgeschwindigkeit v_i der Komponente i ergibt sich aus der Trägergasgeschwindigkeit v_G zu

$$v_i = \alpha_i \cdot v_G \quad (32)$$

Man erkennt aus (31) und (32) die Bedeutung des Verteilungskoeffizienten k_i für die mittlere Rückhaltezeit $t_o - t_i$ in der Trennsäule. Die in der Probe enthaltenen Gaskomponenten laufen in der Trennsäule mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten, da α_i und v_i von der Gaskomponente abhängig sind, aber auch von anderen Parametern der Säule (wie Füllmaterial und Temperatur) bestimmt werden. Bei konstant gehaltenen oder zeitlich gesteuerten Parameterwerten lassen sich die verschiedenen Gaskomponenten räumlich und zeitlich trennen sowie gruppenweise anreichern.

Gas-Chromatographen setzen sich aus den Hauptgruppen

- Dosiereinrichtung
- Trennsäule und
- Detektor

zusammen.

In der *Dosiereinrichtung* wird die zu untersuchende Gasprobe impulsartig dem Trägergas aufgeprägt. Zum Nachweis von Substanzen sehr geringer Konzentration kann die Probe in einer Käl-

tefalle oder einem Adsorptionsmittel angereichert und zu einem bestimmten Zeitpunkt durch plötzliches Erwärmen freigesetzt werden. Dabei sind nach HAUNOLD et al. [1990] völlig wasserfreie Gaswege erforderlich, weil sich andernfalls die Spurengase im Wasser lösen und bei der Erwärmung nicht auszutreiben sind.

Die *Trennsäule* übernimmt die bereits beschriebene Trennfunktion der Gaskomponenten. Sie besteht aus einem längeren Röhren, dessen Inneres entsprechend präpariert ist. Das Röhren wird gewöhnlich zu einer Wendel geformt in einen beheiz- und evtl. kühlbaren Gehäuse untergebracht. HAUNOLD et al. [1990] setzten für diese Zwecke eine PELTIERSäule ein und konnten damit die Temperatur der Trennsäule relativ rasch im Bereich $-15...+150$ °C variieren. Entweder wird die Trennsäule thermostatisiert oder ihre Temperatur wird nach einem vorgegebenen Programm zeitlich gesteuert. Für unterschiedliche Anwendungen müssen z.T. verschiedene Trennsäulen eingesetzt werden, um eine hinreichende Trennung der nachzuweisenden Komponenten zu gewährleisten.

Zum Nachweis der verschiedenen nacheinander aus der Trennsäule ausströmenden Gaskomponenten ist ein *Detektor* erforderlich, der auf physikalische Eigenschaften anspricht, in denen sich diese Komponenten deutlich vom Trägergas unterscheiden. In der Anfangszeit kamen Wärmeleitungsdetektoren zum Einsatz. Größere Bedeutung für den Nachweis von Kohlenwasserstoffen hat der Flammenionisationsdetektor (FID) erlangt der bereits im vorangehenden Abschnitt behandelt worden ist. In den letzten zwei Jahrzehnten sind aber noch weitere Detektoren mit unterschiedlichen Wirkprinzipien, wie der Elektroneneinfangdetektor (ECD) und der gepulste flammenphotometrische Detektor (PF-PD) entwickelt worden, die sich nach BERRESHEIM [1997] für leichtflüchtige Kohlenwasserstoffe (einschließlich halogenierte Verbindungen) bzw. für schwefel- und phosphorhaltige Verbindungen eignen. Der einzusetzende Detektor ist in Abhängigkeit von den nachzuweisenden Gaskomponenten, ihren Eigenschaften und den zu erwartenden Konzentrationen zu wählen. Er hat das elektrische Ausgangssignal zu liefern. Früher wurde es nach entsprechender Verstärkung einem Schreiber zugeführt. Bei moderneren Systemen dient es zusätzlich als Eingangssignal für einen Analog/Digital-Umsetzer.

Die Auswertung eines Chromatogramms erfolgte früher anhand der Analogregistrierung. Ausgehend vom Zeitpunkt der Probengaseingabe wurden dem Schrieb die den Peakmaxima entsprechenden Retentionszeiten der Registrierung entnommen, die bei festen Parameterwerten nur von der Art der erfaßten Substanzen abhängig sind. Danach wurde der Verlauf der Nulllinie ermittelt und von dieser aus die Peakflächen durch zeitliche Integration vom Peakanfang bis zu dessen Ende bestimmt. Die Peakfläche ist der Konzentration der Gaskomponente proportional, aber auch von der Gasart abhängig. Der nächste Schritt beinhaltete die Umrechnung der Peakflächen in die Gaskonzentrationen, wobei auf Eichergebnisse zurückgegriffen werden mußte. Der Auswertevorgang schloß mit einer tabellarischen Zusammenstellung der Ergebnisse.

MROSE [1969] berichtete über den Einsatz eines Gas-Chromatographen mit Flammenionisationsdetektor am Observatorium Wahnsdorf zum Nachweis von Aliphaten mit 1...4 C-Atomen in atmosphärischer Luft. Die Probenahme und Auswertung der Chromatogramme war dabei noch nicht automatisiert. Zur Zeit des Aufbaus der Immissionsmeßnetze in den industriell am weitesten fortgeschrittenen Ländern wurde der Einsatz von Gas-

Chromatographen im automatischen Betrieb noch für zu aufwendig und störanfällig gehalten. Geräte dieser Art kamen jedoch im Laboratorium zum Einsatz und wurden mit Luftproben beschickt, die an den Außenstationen mit Gasmäusen gesammelt worden waren (vgl. z.B. BRUCKMANN et al. [1983]). Mit der Entwicklung sog. Prozeßchromatographen für chemische Produktionsprozesse, die weitgehend automatisch arbeiten müssen, wurden erste Voraussetzungen für die Anwendung chromatographischer Prinzipien an automatischen Meßstationen geschaffen. Schrittweise sind durch Mikrorechner gestützte Geräte an Immissionsmeßstationen zunächst für Forschungsaufgaben, zuletzt bereits vereinzelt im operativen Betrieb eingesetzt worden. Die Rechner übernehmen hierbei die Aufgaben der Gerätesteuerung, der Meßwerterfassung sowie der Aufbereitung und Verarbeitung der Meßwerte. Die Leistungsaufnahme der Geräte ist wegen der Vielzahl der zu steuernden Vorgänge, nicht zuletzt wegen der Temperierung der Trennsäulen relativ hoch. Hinzu kommt der Gasverbrauch der Trennsäule, die Notwendigkeit einer Ableitung der Abgase und bei notwendiger Probenanreicherung der Kühlmittelverbrauch. Die automatisierten gaschromatographischen Verfahren sind daher auch heute noch als aufwendig einzustufen.

Im Vordergrund standen bisher die Bestimmung der Konzentrationen von Kohlenwasserstoffen sowie von anderen organischen Schadstoffen. MANN & GIES [1983] beschrieben ihre Erprobungsergebnisse, die sie mit einem amerikanischen Gas-Chromatographen mit FID-Detektor bei mehrmonatlichen Messungen von SO₂- und H₂S-Konzentrationen gesammelt hatten. Danach eignete sich das getestete Gerät nicht für einen Einsatz an automatisierten Immissionsmeßstationen, da der SO₂-Kanal bei Konzentrationen < 120 µg/m³ keine lineare Kennlinie aufwies und beim H₂S-Kanal der Meßbereich nach unten bereits bei 3,5 µg/m³ begrenzt wurde. Die Automatisierung der Meßwerterfassung und -verarbeitung an einem Zweikanal-Gas-Chromatographen am Cape Grim, Tasmanien unter Verwendung des Modells HP 5880A der Fa. Hewlett Packard hat WALFORD [1987] behandelt. Er ging dabei sowohl auf Hardware- als auch auf Softwareprobleme ein. FRASER et al. [1987] berichteten über die gaschromatographische Erfassung von CH₄, CO₂ und CO am gleichen Ort sowohl bei Probenahme mittels Gefäßen und nachträglicher Analyse als auch bei *in situ*-Messungen. Dabei traten im letzten Fall noch Probleme auf, die einerseits auf nicht einwandfreie Integration der Peakflächen zurückgeführt wurden, andererseits durch Verunreinigungen der Probenluft bei der Bestimmung der CO-Konzentrationen zu Fehlern führten. PARTIDGE et al. [1990] informierten über Vergleichsversuche zur Einschätzung der Genauigkeit verschiedener Verfahren zur Bestimmung von Kohlenwasserstoffen in Luft. Bei der Analyse dienten Gas-Chromatographen verschiedener Hersteller mit unterschiedlichen Detektoren als Bezugsgeräte.

Bei den Immissionsmessungen sind je nach den Konzentrationen und sonstigen Eigenschaften der nachzuweisenden Gaskomponenten verschiedene gaschromatographische Spezialverfahren genutzt worden. Zum getrennten Nachweis von Aliphaten und Aromaten wurden nach BIRKLE [1979] Chromatographen mit zwei verschiedenen parallel geschalteten Trennwegen verwendet. Organische Substanzen, die nur in sehr geringer Konzentration auftreten, können entweder in einem Adsorber bzw. einer Kältefalle vor der Trennsäule oder in der gekühlten Trennsäule selbst angereichert werden. NEUBER et al. [1981] benutzten eine mobile Sammelapparatur in Form einer Kaskade aus einem

Aerosolfilter, einem Trockenmittel und einem Adsorptionsröhrchen mit Aluminiumoxidfüllung, die in einer Trockeneis-Methanol-Mischung gekühlt und auf -78°C gehalten wurde. Mit Ausnahme von Methan und Äthan wurden dabei die leichtflüchtigen Kohlenwasserstoffe einer Luftprobe von 1,6 l angereichert. Die Analyse selbst erfolgte mit dem Gas-Chromatographen mit FID, Modell 5710 der Fa. Hewlett-Packard, wobei die Adsorptionsröhrchen plötzlich auf 150°C erwärmt wurden. HAUNOLD et al. [1990] berichteten über einen automatisch arbeitenden Proben-sammler, der zur Anreicherung bestimmter Gaskomponenten mit flüssigem Argon gekühlt wurde. Bei der Analyse wurde die Sammeleinheit mit dem Gas-Chromatographen gekoppelt und die Spurengase vom CO₂ der Trockeneis-Äthanol-Kühlmischung ausgetrieben. WHALEN et al. [1994] verwendeten einen automatisierten Gas-Chromatographen mit Photoionisationsdetektor zur Bestimmung der im ppt-Bereich liegenden Konzentrationen von Benzol, Toluol und Xylol.

Flüssigkeits- und Ionen-Chromatographie sind Verfahren zur Trennung und Analyse von Stoffen, die in gelöster Form vorliegen. Primär werden diese Verfahren zur Bestimmung der Konzentrationen von Spurenstoffen in wäßrigen Lösungen benutzt und kommen auch in der Gewässerüberwachung sowie bei der Bestimmung von im Niederschlagswasser gelösten Stoffen zur Anwendung. Die Erfassung gasförmiger Spurenstoffe setzt voraus, daß sie zuvor in einer geeigneten Reagenzlösung absorbiert werden.

SALTZMAN et al. [1993] beschrieben ein automatisch arbeitendes Verfahren zur Messung von SO₂-Konzentrationen in Luft. Die Probeluft durchströmt einen Austauscher, in dem SO₂ in einer wäßrigen Lösung absorbiert und zu HSO₃ sowie SO₃²⁻ in einen Gleichgewichtszustand gebracht wird. Der in der Lösung enthaltene Schwefel reagiert mit einer chemischen Substanz, wobei sich ein fluoreszierendes Reaktionsprodukt bildet. Diese Substanz wird mittels HPLC getrennt. Durch Bestrahlung mit einer Wellenlänge von 330 nm wird Fluoreszenz angeregt und bei einer Wellenlänge von 380 nm nachgewiesen. Die untere Nachweisgrenze des Verfahrens wurde mit 7 pptv angegeben. Dieser SO₂-Analysator wurde nach GALLAGHER et al. [1997] in Details modifiziert. Insbesondere erwies es sich als notwendig, den Probeneinlaß zu verändern. Um SO₂-Verluste durch Kondensation im Ansaugrohr sicher auszuschließen, wurde das Ansaugrohr aus Teflon gefertigt und ebenso wie der nachgeschaltete Membrantrockner auf 45°C aufgeheizt. Außerdem wurde im Einlaßsystem die Möglichkeit geschaffen, Null- bzw. Standardgase für Prüfzwecke zuzuführen.

Die *Ionen-Chromatographie* ist auf Stoffe spezialisiert, die in wäßriger Lösung dissoziieren. Die Trennung beruht hier auf der unterschiedlichen Beweglichkeit verschiedener Ionen beim Anlegen einer festen Spannung, die so gering ist, daß keine elektrochemischen Umsetzungen stattfinden. Gearbeitet wird bei der Ionen-Chromatographie ähnlich wie bei der Konduktometrie mit einem Detektor für die elektrische Leitfähigkeit. Im Gegensatz zur Konduktometrie ist das Verfahren der Ionen-Chromatographie durch die Trennung der verschiedenen Ionen jedoch stoffspezifisch.

Über die Erprobung ionenchromatographischer Verfahren zur Bestimmung von SO₂-Konzentrationen in Luft haben HERGER et al. [1990] und zur Bestimmung von NO₂-Konzentrationen in Luft MOOSBACH & HARTKAMP [1990] sowie De SANTIS et al. [1994] berichtet. Eine konstante Luftmenge wurde zur SO₂-Bestimmung in einer wäßrigen Wasserstoffperoxidlösung und zur

NO₂-Bestimmung in einer wäßrigen Natriumperoxidlösung bzw. an der Oberfläche einer alkalischen Aktivkohleoberfläche absorbiert. Die Anwesenheit von Alkalimetallen verhindert die Reduktion von NO₂ zu NO. Aus den SO₂-Molekülen wurde gemäß der Reaktionsgleichung (26) SO₄²⁻-Ionen und aus den NO₂-Gasmolekülen NO₂⁻- bzw. Nitritionen erzeugt. In der Trennsäule des Ionen-Chromatographen wurden diese Ionen von anderen zugleich aus der Luft, der Reagenzflüssigkeit oder der Probe stammenden Ionen hinreichend getrennt. Lediglich das CO₂ muß beim NO₂-Analyseverfahren durch einen selektiven Filter aus der Luft entfernt werden, da andernfalls die entstehenden Carbonationen bei der Ionen-Chromatographie stören. Zwischen der Ionenkonzentration c_I in der Flüssigkeit und der Gaskonzentration c_G in Luft besteht ein Zusammenhang der Form

$$c_G = K \cdot c_I \frac{V_A}{V_P} \quad (33)$$

wobei V_A das Volumen der Absorptionslösung, V_P das Volumen der durchgesaugten Luftprobe (bezogen auf Normalbedingungen) und K einen Umrechnungs- und Korrekoeffizienten bezeichnen, durch den auch die Verdunstungsverluste der Reaktionsflüssigkeit beim Durchsaugen der Luftprobe berücksichtigt werden.

BOUTACOFF et al. [1990] sowie SICKLES et al. [1990] berichteten über den Einsatz von Mehrkomponentensammlern zur Bestimmung von Gas- und Partikelkonzentrationen im Gelände. Bei diesen wird ein Volumenstrom von 20 l/min durch eine Anordnung von mehreren hintereinander liegenden Filtern gesaugt. Während das erste Teflon-Filter den Staub festhält, sind die weiteren mit speziellen Reaktionslösungen getränkt und absorbieren dadurch jeweils nur eine Gaskomponente. Die Analyse erfolgte nach Ausspülen der Filter hauptsächlich mittels eines Ionen-Chromatographen.

KLEMM & TALBOT [1991] sowie TALBOT et al. [1997] beschrieben ein Verfahren zur SO₂-Konzentrationsbestimmung. Die zu analysierende Luft wird durch ein Filter gesaugt, das Partikel zurückhält, und nach dem Zerstäuberprinzip über eine Düse in eine Nebelkammer geleitet, in der hochreines Wasser als feiner Nebel aus einer senkrecht zur Probenluftdüse angeordneten Wasserdüse tritt. Gut wasserlösliche Gase werden hierbei in den Wassertropfen gelöst. Das Wasser wird gesammelt und rezirkuliert während des Zeitraums der Probennahme. Die durchströmende Luftmenge sowie die Wassermenge, in der das SO₂ angereichert wurde, werden gemessen. Durch Zugabe von Natriumkarbonat und Wasserstoffperoxid wird der pH-Wert auf Werte >10 angehoben und vierwertiger Schwefel oxidiert. Nach einer hinreichend langen Konversionszeit von mehreren Stunden wird die Sulfatkonzentration nach der Methode der Ionen-Chromatographie bestimmt. Das Verfahren spricht nicht auf andere Schwefelverbindungen wie H₂S oder CS₂ an. Die Nachweisgrenze wurde auf Werte zwischen 10 und 5 pptv geschätzt. Die zeitliche Auflösung ist wegen der relativ langen Anreicherungszeit bei dieser Methode geringer als bei anderen Verfahren.

Während die ionenchromatographische Analysenmethode für NO₂ als Referenzverfahren vorgesehen ist, wird die für SO₂ als ein Verfahren angesehen, das nach weiterer Felderprobung ggf. als Analysenmethode an Immissionsmeßstellen eingeführt werden könnte. Beide Verfahren sind für die nachzuweisenden Gaskomponenten selektiv und besitzen ausreichend niedrige Nachweisgrenzen.

2.4 Die wichtigsten Geber für Massenkonzentrationen von Partikeln in Luft

Trotz der großen Vielfalt von Meßeffekten, die eine *Schwelbstaubmessung* ermöglichen (wie die Verringerung der Transmission oder die Streuung von Licht durch Staubteilchen, die Staubabscheidung auf Filtern mit unterschiedlichen Detektionsmethoden zum Nachweis des Belags, thermische, elektrostatische, Inertial- und Zentrifugal-Abscheidung von Staub u.a. (siehe GILPIN [1963], STÖBER [1965] sowie VAREY & GREEN [1979]) werden bei automatisch arbeitenden Immissionsmeßstationen nur wenige Verfahren genutzt. Zusammenfassende Darstellungen der zur Immissionsanalytik geeigneten Staubmeßverfahren findet man in einer WHO-Publikation [1976] sowie bei BIRKLE [1979]. Die wichtigsten Begriffe zur Partikelmessung in Außenluft sowie die in Deutschland hierfür gebräuchlichen Geräte und die dabei zu nutzenden Verfahren werden in der VDI-Richtlinie VDI 2463 ausführlich behandelt.

In den 60er Jahren sind optische *Streulichtmeßgeräte* wegen ihrer Einfachheit, kontinuierlichen Arbeitsweise und leichten Automatisierbarkeit häufiger verwendet worden. Meist wird von diesen Geräten die in einem vorgegebenen Winkelbereich nach vorn gestreute Strahlung erfaßt. CHARLSON et al. [1967] haben ein für diese Zwecke geeignetes Nephelometer beschrieben. Streulichtmesser liefern Angaben zu den optischen Eigenschaften des Aerosols, ermöglichen jedoch keine direkte Messung von Massenkonzentrationen. Da sich die Partikelabmessungen bei höherer relativer Feuchte durch Wasseraufnahme vergrößern, sind die Meßergebnisse auch von der Luftfeuchte abhängig. Sollen sie in Massenkonzentrationen umgerechnet werden, sind außerdem Angaben zur Partikelgrößenverteilung des Aerosols bzw. Staubs sowie über die optischen Eigenschaften der Partikel notwendig. Da diese meist nicht vorliegen, kann aus den Ergebnissen der Streulichtmessungen nur über statistische Zusammenhänge auf die Massenkonzentration geschlossen werden. Transmissiometer haben hingegen für die Staubmessung nur bei Emissionsmessungen Bedeutung erlangt, weil dort wegen der höheren Partikelkonzentrationen mit optischen Wegstrecken in der Größe < 1 m gearbeitet werden kann. Bei Immissionsmessungen wären hier optische Pfade erforderlich, die die Meßeinrichtung unhandlich werden ließen.

Als Referenzverfahren zur Erfassung von Massenkonzentrationen des Staubs dienen nach wie vor *diskontinuierliche gravimetrische Meßmethoden*, bei denen durch ein Staubfilter mit hohem Abscheidegrad ein bestimmtes Luftvolumen gesaugt wird. Das getrocknete Filter wird vor und nach der Bestäubung gewogen. Die Automatisierung eines solchen Verfahrens wäre recht aufwendig und würde kaum zu handlichen und zuverlässigen Gebern führen.

In den USA sind in der Vergangenheit *Filtermeßverfahren mit photooptischer Auswertung der Filterbestäubung* benutzt worden. Bei einem dieser Verfahren wurde das Reflexionsvermögen des Filterblattes photometrisch bestimmt. Das Ergebnis ist dabei von der Größe der Filterfläche, dem Volumen der durchgesaugten Luft und den optischen Eigenschaften des Staubs abhängig. Nach Angaben der WHO [1976] wurde das Reflexionsvermögen \hat{r} zunächst in den Schwärzungsgrad $SG = 100 - \hat{r}$ umgerechnet. Nach einem Polynom der Form

$$S_A = \sum_{i=1}^6 a_i \cdot SG_i^i \quad (34)$$

wird der Schwärzungsgrad SG in die Flächenbelegung des Filters S_A (in der Einheit $\mu\text{g}/\text{m}^2$) umgerechnet. Die dabei eingehenden Koeffizienten $a_1 \dots a_6$ sind vom Filtermaterial und den Eigenschaften des Reflektometers abhängig. Bei Änderungen in der Zusammensetzung des Staubs müßten sich streng genommen auch die Koeffizienten ändern. Deshalb werden sie auf einen "international standardisierten Rauch" bezogen, der etwa dem städtischer Aerosole entspricht. Schließlich wird die Flächenbelegung des Filters S_A in die Massenkonzentration des Staubs c in Luft nach der Formel

$$c = k \cdot S_A \frac{A}{V} \quad (35)$$

umgerechnet. Dabei bezeichnen A die bestaubte Filterfläche, V das durchgesaugte Luftvolumen und k einen von der Filtergröße abhängigen Korrekturfaktor.

SIGGELKOW [1985] verglich die Meßergebnisse eines in Großbritannien entwickelten "black-smoke"-Meßgerätes, das den Staubgehalt durch Messung des Schwärzungsgrades eines Filters mittels eines Reflektometers erfaßt, mit deutschen Geräten zur Bestimmung der Massenkonzentration des Staubes nach der gravimetrischen Methode. Er kam zu der Schlußfolgerung, daß die in der Außenluft mit der "black-smoke"-Methode gemessenen Schwebstaubkonzentrationen gegenüber den Vergleichswerten deutlich geringer ausfallen und eine gewisse Streubreite aufweisen. Die Staubbelegung des Filters kann auch über dessen Transmission bestimmt werden. Dieser Weg wurde bei der ASTM-Methode zur Bestimmung des "coefficient of haze" (COH) eingeschlagen. Bei der dabei genutzten Sammelapparatur läuft ein Filterstreifen gemäß Abb. 19 quer durch das Luftansaugrohr und wird während der Bestäubung durch eine Klemmvorrichtung gehalten, die ebenso wie der Papiertransport und der Pumpenmotor von einem durch eine Uhr getriggerten Programmgeber zeitlich gesteuert wird. Während der Sammelzeit wird die Geschwindigkeit der Luftströmung konstant gehalten. Nach Ablauf jedes Sammelintervalls wird die Klemmvorrichtung gelöst, der Filterpapierstreifen um ein Stück weiterbewegt und auf einer Aufwickelspule aufgewickelt. Bei Bedarf wird der bestaubte Teil des Filterstreifens von der Aufwickelspule genommen und einem photoelektrischen Photometer zur Transmissionsmessung zugeführt. Die Transmission, die durch entsprechende Wahl der Bestäubungszeit etwa 50% betragen soll, ergibt sich gemäß der Beziehung

$$Tr = \ln \frac{I_0}{I} = c \cdot \log_{10} \frac{I_0}{I} \quad (36)$$

Darin bezeichnen I_0 die Bestrahlungsstärke hinter einen sauberen und I die hinter dem bestaubten Filterstreifen. Der Koeffizient c ist eine Konstante. Für die Bestimmung des COH-Wertes wird das Hundertfache des Wertes von Tr/c gewählt und zur Erzielung vergleichbarer Werte mit dem Faktor $1000 \cdot (A/V)$ normiert, so daß sich der "coefficient of haze" nach der Beziehung

$$COH_{100m} = 100 \cdot \log_{10} \frac{I_0}{I} \cdot \frac{1000A}{V} \quad (37)$$

errechnet. Auch hier bezeichnen A die bestaubte Filterfläche und V die durchgesaugte Luftmenge. V/A hat die Dimension einer Länge und gibt wegen des Faktors 1000 die Länge der durchgesaugten Luftsäule (in 1000-Meter-Einheiten) an. Wie man anhand der Gerätebeschreibung und der Abb. 19 erkennt, läßt sich das Verfahren ohne großen Aufwand automatisieren.

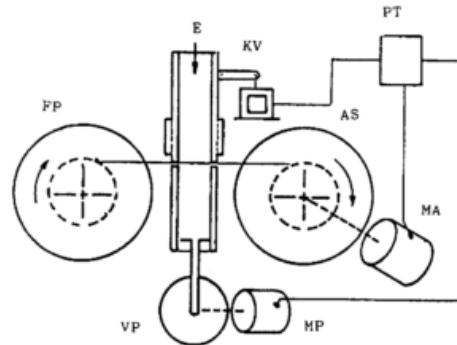


Abb. 19: Prinzip des ASTM-Staubsammlers

E: Einlaßrohr	PT: Programmteil
FP: Filterpapier (Vorratsrolle)	AS: Aufwickelspule für bestaubtes Filterband
MA: Motor für Aufwickelspule	VP: Vakuumpumpe
(aus: WHO [1976])	MP: Pumpenmotor

Nach BIRKLE [1979], KON'KOV & GOLOVINA [1979], PFEFFER & LOHSE [1984] sowie SIGGELKOW [1985] werden heute zur Bestimmung der Massenkonzentration des Staubs fast ausschließlich *diskontinuierlich arbeitende Filtermeßverfahren* herangezogen, bei denen Luft während einer vorgegebenen Meßzeit mit annähernd konstanter Geschwindigkeit durch ein Filterband gesaugt wird, auf dem sich der Staub abgelagert. Der Abscheidegrad soll von der Korngröße der Staubpartikel weitgehend unabhängig sein, um die Massenkonzentration bestimmen zu können. In der Praxis scheidet dies bereits daran, daß eine exakt isokinetische Probenahme nicht möglich ist und somit nicht alle Partikel zum Filter gelangen. BÜRKHOLZ [1991] hat die dadurch bedingten Meßfehler untersucht und Korrektionsformeln mitgeteilt. Auch bei den Filtermethoden wird das Filterband nach Ablauf der gewählten Sammeldauer diskontinuierlich ein Stück vorwärts bewegt. Damit wird ein noch sauberes Stück des Filterbandes dem Luftstrahl ausgesetzt. Als Filtermaterialien kommen nach DANNECKER & REICH [1983] Vliese aus Glasfasern, Celluloseacetat bzw. Cellulosenitrat und Mischpolymere auf Nylongrundgewebe zum Einsatz. Die Pumpenleistung muß umso höher sein, je geringer die Staubbelastung und je kürzer die Meßzeit ist. Die durchgesaugte Luftmenge ist zu erfassen und auf Normalbedingungen (z.B. 20°C und 1000 hPa) umzurechnen. In der Regel wird die *Extinktion von radioaktiven Strahlen eines Betastrahlers* innerhalb des Filters als Maß für den Staubgehalt herangezogen. Bezeichnet man die Intensität der Betastrahlung vor dem Filter mit I_0 , so ergibt sich die Intensität hinter dem Filter zu

$$I = I_0 \cdot \exp(-b_a d) \quad (38a)$$

wenn b_a den linearen Absorptionskoeffizienten und d die Dicke des Absorbers bezeichnen. Da sich für ein inhomogenes Material wie das des Filters die Dicke d nicht direkt messen läßt, wird $d = (m_A/\rho)$ gesetzt, wobei m_A die Flächenmasse und ρ die Materialdichte bezeichnen. Anstelle von (38a) tritt dann

$$I = I_0 \cdot \exp\left[-\frac{b \cdot a}{\rho} \cdot m_A\right] \quad (38b)$$

In erster Linie ist die Strahlungsintensität von der durchstrahlten Flächenmasse abhängig. Für kleine Werte des Arguments der e-Funktion ist die gemessene Strahlungsintensität I annähernd eine lineare Funktion von m_A . Da die Flächenmasse des Filterbands nicht exakt konstant gehalten werden kann und sich I_0 auf Grund der Alterung der Strahlungsquelle im Laufe der Zeit verringert, sind zur Bestimmung der Staubebelegung zwei Messungen erforderlich. Vor der Exposition wird die Flächenmasse des sauberen Filterbandes und danach die des bestaubten Filterbandes gemessen. Aus der Differenz beider erhält man die Staubebelegung. Da das Meßverfahren auf einer Massebestimmung beruht, würde bei hoher Luftfeuchte das Filter befeuchtet und daher dessen Wassergehalt miterfaßt werden. Dies läßt sich vermeiden, wenn die Luft im Ansaugrohr vor Erreichen des Filters erwärmt wird. Um mit einer schwach radioaktiven Strahlungsquelle arbeiten zu können, wird z.B. mit einem Zählrohr eine Einzelimpulszählung durchgeführt. Die Aktivität der Betastrahlenquelle und die Länge des Zählzeitraums sind so zu bemessen, daß einerseits die Totzeitverluste und andererseits der statistische Fehler der Zählung vernachlässigbar bleiben. Wie durch eine zweckmäßige Auswertung der statistische Fehler verringert werden kann, haben PFEFFER & LOHSE [1984] gezeigt. Die Aktivität der Strahlenquelle muß nach BIRKLE [1979] so groß bemessen sein, daß eine vorhandene Eigenaktivität des Staubs die Meßergebnisse nicht wesentlich verfälscht.

Meßverfahren, die nach diesem Prinzip arbeiten, sind u.a. von DRESIA et al. [1964], LILIENFELD [1971] sowie in Regelungstechn. Praxis [1967] und in VDI-Richtlinie VDI 2463, Bl. 6 beschrieben worden. Sie lassen sich ohne hohen Aufwand automatisieren. Abb. 20 zeigt als Beispiel den Aufbau des Beta-Staubmeters F 703 der Firma Verewa, Mühlheim/Ruhr, das von SPOHR [1982] beschrieben wurde. Bei solchen Geräten ist nach DANNECKER & REICH [1983] ein Luftvolumenstrom

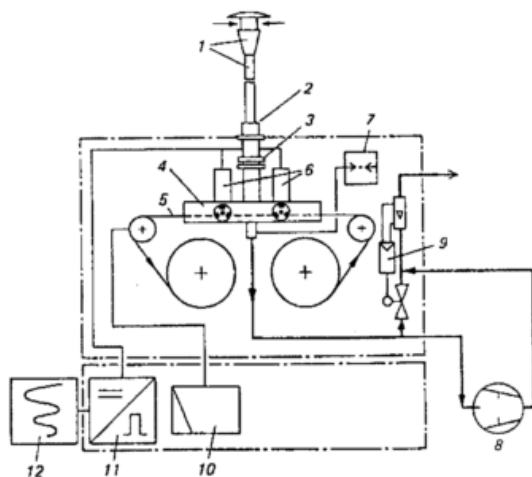


Abb. 20: Schema des Aufbaus des BETA-Staubmeters F 703

- | | |
|--|--------------------------|
| 1 Probenahmesystem | 7 Manometer |
| 2 Schnittstelle | 8 Pumpe |
| 3 Einlaufstrecke | 9 Volumenstromregelung |
| 4 Filteradapter | 10 Programmgeber |
| 5 Filterband | 11 Meßsignalverarbeitung |
| 6 Betastrahler
(Null und Massenmeßstelle) | 12 Registriergerät |
- (aus: VDI 2463, Blatt 6)

von einigen m^3/h erforderlich, um bei Probenahmezeiten von 30 min, wie sie in der Immissionsmeßtechnik üblich sind, noch eine hinreichende Meßgenauigkeit zu erzielen.

Weitergehende Untersuchungen der abgeschiedenen Staubproben können, wie BREUER [1965], BROCKHAUS & FRIEDRICH [1965], HETTICHE [1965], SPOHR [1982], DANNECKER & REICH [1983], BOLDRIN et al. [1986] sowie HOPKE et al. [1990] gezeigt haben, gemäß den Ausführungen in Regelungstechn. Praxis [1972] nach entsprechender Probenvorbereitung mit Hilfe von Partikelgrößenanalytoren, mikroskopischen und elektronenmikroskopischen Untersuchungen bzw. mit mikrochemischen Analysemethoden (Atomabsorptionsspektrometrie, Röntgen-Fluoreszenzspektrometrie und Dünnschicht-Chromatographie) durchgeführt werden. Sie lassen sich jedoch gegenwärtig höchstens teilautomatisieren. Solche Messungen gestatten jedoch auch Aussagen über die chemische Zusammensetzung des Staubes.

SPOHR beschrieb die Schwermetallbestimmung von auf Filterbändern abgeschiedenen Staubproben mit Hilfe des energiedispersiven Röntgenfluoreszenz-Analysators RF 1000. Dabei mußte ein weitgehend schwermetallfreies Filtermaterial verwendet werden. Das belegte Filterband wurde programmgesteuert durch die Bestrahlungskammer schrittweise transportiert. Dabei erfolgte durch Röntgenstrahlen eine Anregung der Schwermetallatome. Ein Halbleiterdetektor lieferte das Meßsignal, das nach Verstärkung und Analog/Digital-Umsetzung über einen Diskriminator einem Vielkanalanalysator zugeleitet wurde. Die in den einzelnen elementspezifischen Kanälen gespeicherten Impulszahlen wurden mit einem im Gerät enthaltenen Mikrorechner unter Berücksichtigung der Eichkurve und der mit dem Beta-Staubmeter bestimmten Masse und des Volumenstroms in Konzentrationen umgerechnet.

2.5 Entwicklung moderner Geber

Die meisten konventionellen Meßfühler liefern amplitudenanaloge Ausgangssignale in Form kleiner Spannungen im Millivoltbereich oder Widerstandsänderungen um kleine Beträge. Die Übertragung solcher Meßsignale vom Meßort zum Aufstellungs-ort der Meßwerterfassungsanlage ist mit Schwierigkeiten verbunden, weil kleine Gleichspannungen durch parasitäre Thermospannungen, unterschiedliche Erdpotentiale und bei Feuchteinwirkung auch durch galvanische Störeffekte verfälscht werden können. Bei widerstandselektrischen Meßverfahren stören Widerstandsänderungen in den Zuleitungen sowie unvermeidbare Übergangswiderstände in Meßstellenschaltern und an anderen Übergangsstellen. Außerdem können durch kapazitive oder induktive Einkopplung Störwechselspannungen in den Meßschaltungen auftreten, die sich entweder als Gleichtakt- oder als Gegentakt-Störspannungen auswirken. Zwar lassen sich diese Störeffekte durch eine Reihe z.T. seit langem bekannter Maßnahmen in Grenzen halten. Durch eine Potentialtrennung zwischen den Gebern und dem Erfassungssystem können nach CONNORS [1981] Gleichtakt-Störspannungen vermieden werden. SICHLA [1989] hat gezeigt, wie sich Gleichtakt-Störspannungen bei einfachen Verstärkern auswirken und wie sich die daraus resultierenden Schwierigkeiten mit Hilfe von Instrumentationsverstärkern vermeiden lassen. Bei Meßsystemen, die über mehrere Jahre im Einsatz sind, erhöhen sich erfahrungsgemäß mit zunehmender Lebensdauer der Systeme die Meßfehler.

Bereits vor Einführung der Digitaltechnik hat man in solchen Fällen versucht, das Ausgangssignal mittels eines Transmitters am Meßort in eine Signalform zu überführen, die gegenüber solchen Störungen weniger empfindlich ist. Das konnten beispielsweise Verstärker sein, die die Meßspannung in den Voltbereich anheben (vgl. PEINECKE [1968]). Vielfach wurden kleine Gleichspannungen auch in eingepreßte Ströme gewandelt, die gegenüber Widerstandsänderungen der Leitungen weitgehend unempfindlich sind. Beispiele für solche Umformungen der Gebersignale sind von WOJCIECHOWSKI & MICHAŁCZEWSKI [1980] diskutiert worden. Die Verfasser wiesen auf Vorteile standardisierter Ausgangssignale bei meteorologischen Gebern im Hinblick auf eine Automatisierung hydrometeorologischer Messungen hin. Weitgehend unempfindlich gegenüber den genannten Störbeeinflussungen erwiesen sich frequenzanaloge, impulsförmige und digitale Signale. LUDBROOK [1974] berichtete bereits über eine Sensorgeneration der Firma Plessey für automatische Stationen, die nur Geber mit frequenzanalogen Ausgangssignalen umfaßt. Auch bei Digitalsignalen kann man mit einem Aderpaar für jede Übertragungsstrecke auskommen, wenn diese serialisiert werden. Nachteilig war jedoch, daß der als Signalwandler einzusetzende Umformer bzw. Umsetzer zusätzliche Fehler mit sich brachte, die u.U. nicht zu vernachlässigende Beträge annahm, da er in der Regel den Umgebungsbedingungen am Meßort ausgesetzt werden mußte.

2.5.1 Unifizierte Geber

Die Zusammenschaltung eines oder mehrerer Sensoren für meteorologische Signale mit einem Meßumformer oder Meßumsetzer zur Erzielung einheitlicher günstigerer Übertragungsbedingungen soll im folgenden als *unifizierter Geber* bezeichnet werden.

Mit den automatischen Stationen der 4. Generation waren durch die Nutzung hochintegrierter Schaltungen sowie der Rechentechnik Voraussetzungen gegeben, die durch Signalwandler in den Gebern zusätzlich verursachten Fehler zu ermitteln und – soweit sie reproduzierbar sind – rechnerisch auszuschalten. Bei Anschluß mehrerer Sensoren über einen Multiplexer ließ sich der dafür erforderliche Aufwand in Grenzen halten.

Meßwandler für die genannten Zwecke sind u.a. von ENGEL [1982], KRAUSS et al. [1982], JEHLICH [1982], HOYER [1984] sowie von JEHLICH et al. [1985] angegeben worden. Im Vordergrund standen dabei Meßumsetzer, die amplitudenanaloge Meßsignale in frequenzanaloge bzw. Impulssignale überführen. Diese Signalformen stellen an die Übertragungsleitungen zwischen den Gebern und dem Erfassungssystem geringere Ansprüche und sind für die Eingabe der Meßinformationen in einen Rechner besser geeignet als Analogsignale, da sie mit einfacheren Schnittstellen auskommen.

In der automatischen Station AFMS-2 wird für alle amplitudenanaloge Meßsignale ein von ROHDE in zwei Varianten entwickelter Meßumsetzer verwendet (vgl. Techn. Beschreibung ZWG [1985] und HÖHNE [1986/87]). An jeden Meßumsetzer können 7 bzw. 6 Sensoren angeschlossen werden. Der Typ MUS 100 ist wahlweise für widerstandselektrische Sensoren (Widerstandsbereich 80...140 Ohm) oder für Meßfühler mit Spannungsausgang (Bereich -100...+120 mV) vorgesehen. Der Typ MUS 10 eignet sich für den Anschluß von Sensoren, die Spannungssignale im Bereich -10...+10 mV liefern, wie dies vor allem für Strahlungsmesser mit Thermosäulen zutrifft. Das Blockschaltbild eines Spannungsumsetzers vom Typ MUS 100 wird anhand der Abb. 21 veranschaulicht.

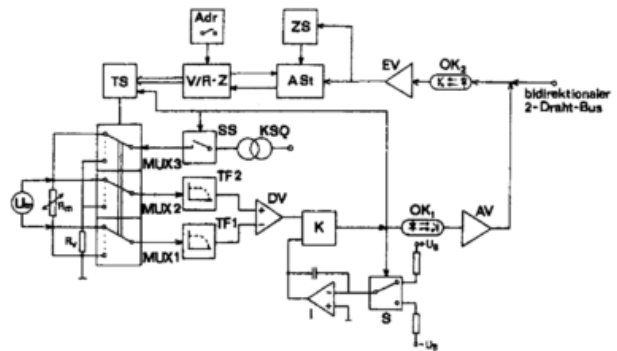


Abb. 21: Blockschaltbild des Meßumsetzers MUS 100

MUX:	Multiplexer	TS:	Torschaltung
SS:	Stromschalter	V/R-Z:	Vorwärts-Rückwärts-Zähler
TF:	Tiefpaßfilter	KSQ:	Konstantstromquelle
Adr:	Adresschalter	DV:	Differenzverstärker
ASt:	Ablaufsteuerer	K:	Komparator
ZS:	Zeitschalter	I:	Integrator
EV:	Eingangsverstärker	S:	Schalter
OK:	Optokoppler	AV:	Ausgangsverstärker

(aus: Techn. Beschreibung ZWG Berlin [1985])

Alle Meßumsetzer werden über einen seriellen bidirektionalen Zweidrahtbus mit dem Stationsrechner verbunden. Er überträgt sowohl die Steuerbefehle vom Rechner zum Meßumsetzer als auch die umgesetzten Meßsignale in umgekehrter Richtung. Durch Optokoppler OK sind die Meßumsetzer gegenüber diesem Bus galvanisch getrennt. Jedem Meßumsetzer ist eine Adresse zugeordnet, die durch Lötbrücken festgelegt wird. Zur Kennzeichnung des abzufragenden Sensors und der Art seines Ausgangssignals dient eine Subadresse. Bei der Adressierung werden Adresse und Subadresse in Form zweier Impulsfolgen nacheinander auf die Busleitung gelegt. Beide Impulsfolgen werden im Meßumsetzer mit Hilfe der Ablaufsteuerung ASt, des Zeitschalters ZS, des Vorwärts-Rückwärts-Zählers V/R-Z und des Subadressentors Adr entschlüsselt. Adr spricht nur in dem Meßumsetzer an, dessen Adresse gesendet wurde. Es steuert den Meßstellenumschalter, bestehend aus den drei Multiplexern MUX 1, MUX 2 und MUX 3 mit MOS-Schaltern. Während MUX 3 bei widerstandselektrischen Sensoren den von der Konstantstromquelle KSQ erzeugten und über den Stromschalter SS laufenden Belastungsstrom durchschaltet, legen MUX 1 und MUX 2 die Potentialleitungen des Meßwiderstands R_M über je ein Tiefpaßfilter (TF1 und TF2) an den Eingang des Differenzverstärkers DV. Das verstärkte Meßsignal wird in einem Komparator K mit der Rampenspannung eines Integrators I verglichen. Das Ausgangssignal des Komparators steuert den Schalter S, der die Integratoreingangsspannung bei Gleichheit beider Spannungen umpolt. Damit ergibt sich eine Impulsfolge, deren Periodendauer der Meßspannung proportional ist. Sie wird zugleich über den Optokoppler OK₁ dem Ausgangsverstärker AV und der Torschaltung TS zugeführt, wodurch mittels des Multiplexers MUX 3 ein pulsierender Belastungsstrom des Meßwiderstands erzeugt wird. Dadurch wird gesichert, daß sich parasitäre Gleichspannungen, die im Meßumsetzer auftreten könnten, nicht auf das Meßergebnis auswirken.

Empfindlichkeitsänderungen, die durch Änderungen der Versorgungsspannung oder der Temperatur des Meßumsetzers hervorgerufen werden könnten, werden dadurch unwirksam gemacht, daß innerhalb jedes Meßzyklus ein im Umsetzer enthaltener Prä-

zisionswiderstand R_V als Referenz eingeschaltet wird und der Ohmwert der Meßwiderstände nach der Beziehung

$$R_m = R_V \frac{t_m}{t_v} \quad (39)$$

bestimmt wird, wobei t_m und t_v die Periodendauern bei Einschaltung des Meßwiderstands bzw. des Referenzwiderstands bezeichnen.

Bei der Spannungsmessung wird der Multiplexer MUX 1 nur zur Einschaltung des Referenzwiderstands gebraucht, der mit seinem Spannungsabfall die Referenzspannung liefert. MUX 1 und MUX 2 werden bei Wahl einer Subadresse für Spannungsmessungen mit einer Impulsfolge angesteuert. Die Funktionsweise des Meßumsetzers MUS 10 entspricht weitgehend der des MUS 100. Da alle Signalquellen einseitig auf Masse liegen, wird zur Meßstellenumschaltung nur ein Multiplexer gebraucht. Konstantstromquelle KSQ und Stromschalter SS können hier entfallen. An die Stelle des Differenzverstärkers tritt ein einfacher Operationsverstärker.

Die beschriebenen Meßwandler sind in der Nähe der Signalquellen aufzustellen, so daß die Zuleitungen zu den Meßfühlern kurz gehalten werden können. Widerstandselektrische Sensoren werden über Vierleiterschaltung an die Meßumsetzer angeschlossen. Damit sind die Voraussetzungen gegeben, daß alle mit einem Meßumsetzer zu einem gemeinsamen Geber vereinigten Sensoren über Steckverbinder angeschlossen werden können und somit leicht auswechselbar sind. Die gruppenweise Zuordnung der Sensoren zu einem Meßumsetzer verringerte die Zahl der notwendigen Leitungsadern zwischen dem Meßfeld und dem Stationsraum.

Bei der transportablen ungarischen automatischen Station PAWS kam nach MÁRKUS [1984] ebenfalls ein Meßwandler, bestehend aus einem Multiplexer und einem Signalwandler, zum Einsatz. Er war in Gebernähe zu installieren, fragte die Ausgangssignale der Sensoren seriell ab, setzte sie in digitale Signale um, die sich seriell als frequenzmodulierte Digitalsignale über eine verdrehte Zweidrahtleitung bis zu mehrere hundert Meter zur Zentraleinheit übertragen ließen. Auch in einer neueren automatischen hydrometeorologischen Station der UdSSR sind nach MEKHOVITCH et al. [1984] in der Nähe der Geber Meßwandler vorgesehen worden, an die mehrere Geber anschließbar sind. Diese Meßwandler enthielten neben dem Multiplexer einen Signalwandler, der die unterschiedlichen Signalformen der Geber vereinheitlichte. Weitere technische Einzelheiten zu diesen Meßwandlern sind nicht bekannt geworden.

Das kanadische MAPS-Konzept ging nach Van CAUWENBERGHE [1977] davon aus, jedem Geber einen Interfacemodul zuzuordnen. Mit dem Übergang zum READAC-Konzept wurde zusätzlich eine einheitliche Schnittstelle zwischen den Interfacemodulen und der Programmsteuerung vorgesehen. Die Datenübergabe erfolgte hierbei auf einem Kanal mit 120 ASCII-Zeichen/s. Jeder Interfacemodul enthielt zusätzlich eine Schutzschaltung gegen elektromagnetische Störungen.

Bei meteorologischen Meßsystemen ist mit der Gefahr zu rechnen, daß Blitze in die im Freien exponierten Geber oder ihre Zuleitungen einschlagen. Die dabei auftretenden Spannungen können zu einer erheblichen Beschädigung oder gar Zerstörung des Meßwerterfassungssystems führen. Das muß unbedingt verhindert werden. Selbst wenn es sich um Blitze handelt, die

sich nicht unmittelbar über Teile des Meßsystems entladen, sondern nur durch Induktion Störspannungen in längere Leitungen einkoppeln, ist eine Beschädigung der Meßeinrichtung nicht ausgeschlossen. Bei den üblichen Gebern mit amplitudenanalogen Ausgangssignalen sind Schutzmaßnahmen gegen Gewitterstörungen nur bedingt möglich. Geber mit frequenzanalogen, impulsförmigen und digitalen Ausgangssignalen gestatten mit geringem Aufwand eine galvanische Trennung der Stromkreise.

2.5.2 Intelligente Geber

Wird in einen Geber eigene Rechentechnik einbezogen, um ihn dadurch flexibler zu gestalten und zusätzliche Aufgaben zu übertragen, so bezeichnet man ihn als *intelligenten Geber*. Bereits LUDBROOK [1974] hat vorgeschlagen, Geber mit Mikroprozessoren auszustatten, um die erforderlichen Linearisierungen, Ausschaltungen von Einflußgrößen und Umrechnungen in physikalische Einheiten vor Ort vornehmen zu können. Für diese Zwecke werden meist Microcontroller in kleinen Bauformen – bevorzugt als Einchip-Mikrorechner – herangezogen. Auch ein intelligenter Geber kann einen Sensor oder mehrere Sensoren enthalten. Die Aufgabe des Rechners im Geber konzentrieren sich zum einen auf die Meßwerterfassung und -verarbeitung, zum andern auf die Anpassung der Gebersignale an ein Meßbus-system, das die Geber mit dem zugeordneten Eingabeport des Stationsrechners verbindet. Im ersten Fall spricht man von einem intelligenten Sensor, im zweiten von einer intelligenten Geberanpassung. Beide Aufgaben können entweder mit einem Mikrorechner oder zwei getrennten Mikrorechnern wahrgenommen werden.

Ein *intelligenter Sensor* setzt sich aus einem Primärsensor (oder mehreren Primärsensoren), einem Signalumsetzer und dem Mikrorechner zusammen. Primärsensoren können als Meßgrößenwandler angesehen werden, die eine Meßgröße in ein elektrisches Signal umformen, dessen Informationsparameter in einem eindeutigen funktionalen Zusammenhang mit der Meßgröße steht. Ein nachfolgender Signalumsetzer wandelt dieses Meßsignal in ein digitales Signal um, das vom Port des Mikrorechners direkt übernommen werden kann. Der Mikrorechner hat im allgemeinen folgende Aufgaben:

- Steuerung des Meßvorgangs
- Überprüfung der Gültigkeit des Meßwertes
- Meßwertverarbeitungen im Sensor
- Anpassung der Ausgangssignale an das Bussystem, über das der intelligente Sensor mit dem Stationsrechner verbunden ist.

Die *Steuerung des Meßvorgangs* umfaßt:

- Steuerung des Multiplexers (bei Gebern mit mehreren Sensoren)
- Steuerung des ADU zur Digitalisierung des Meßwertes
- Abspeichern der erfaßten Meßwerte
- Bildung von Statussignalen zur Kennzeichnung von Betriebs- und Fehlerzuständen.

Zu den in intelligenten Gebern auszuführenden *Verarbeitungsfunktionen* zählen:

- Funktionswandlungen (zur Linearisierung, Umrechnung in physikalische Einheiten)

- Datenverdichtungen und -reduktionen über kürzere Verarbeitungsintervalle
- Verknüpfungen mit Meßsignalen, die im gleichen Geber gewonnen werden)
- Verknüpfung der Meßsignale mit Parametern, die im Speicher des intelligenten Sensors abgelegt worden sind
- Abspeicherung der Verarbeitungsergebnisse
- Bereitstellung der Meßergebnisse als Dezimalzahlen, wobei die Ziffern meist im ASCII-Code verschlüsselt sind
- Formatierung von kurzen Ausgabeprotokollen.

Die *intelligente Geberanpaßeinheit* hat folgende Aufgaben:

- Auswertung der internen Statussignale
- Entgegennahme und Auswertung von Steuerbefehlen des Stationsrechners
- Steuerung und Überwachung des Verkehrs über den Meßbus beim Absetzen von Protokollen
- Überwachung der Übertragungsvorgänge auf dem Meßbus (einschließlich Nachweis von Übertragungsfehlern).

Verknüpfungen mit Daten, die in anderen Gebern erfaßt werden, können nur dann in einem gebereigenen Rechner erfolgen, wenn der Meßbus zu einem lokalen Netz erweitert ist und demzufolge alle angeschlossenen Geber die Möglichkeit haben, untereinander zu kommunizieren. In den meisten Fällen überläßt man solche Verknüpfungen aus Gründen der Einfachheit dem Stationsrechner, der auch Datenverdichtungen und -reduktionen über längere Zeitintervalle auszuführen hat. Auch die Formatierung und Ausgabe von Meldungen bleibt eine Aufgabe des Stationsrechners oder wird einem zusätzlichen Kommunikationsrechner zugewiesen.

Der Vorschlag zum Einsatz von integrierten Gebern mit intelligenten Sensoren und Anpaßeinheiten in automatischen meteorologischen Stationen geht auf PIKE et al. [1983a] sowie PAINTING [1985] zurück. Möglichkeiten zur Kopplung von Sensoren mit Einchip-Mikrorechnern mit dem Ziel einer Verlagerung von Verarbeitungsfunktionen in die Geber haben PFEIFER et al. [1984] behandelt. Auch die Geber der Fernmeßstationen, die nach BROCK et al. [1986] beim "portable automatic mesonet II" zum Einsatz kamen, waren mit eigenen Mikrorechnern ausgerüstet. Intelligente Prozeßkoppelmodule, an die bis zu 7 Analog- und ein Digitaleingang anschließbar waren, entwickelten BEIKIRCH et al. [1988]. Über Gründe der Entwicklung intelligenter Geber für meteorologische Zwecke und deren Aufbau haben MONTERUMISI et al. [1989] einen Überblick gegeben. Bei neuen niederländischen automatischen Wetterstationen wird nach MAZEE [1989, 1995] auf den Einsatz von Gebern mit digitalem Ausgangssignal orientiert. Alle Geber werden über einen intelligenten Anpassungsmodul SIAM, der nur aus wenigen Steckkarten besteht, das Sensorsignal digitalisiert und Statussignale erzeugt, mit dem Datenerfassungssystem verbunden. Der Einsatz intelligenter Sensoren ist nach GALLAGHER [1989] bei den Gebern für das US-amerikanische Bodenbeobachtungssystem ASOS vorgesehen. Die wichtigsten in diesem System zum Einsatz kommenden Geber für Wind, Temperatur bzw. Taupunkt, Luftdruck, Schneehöhe, flüssigen Niederschlag, Schneeequivalent und Wolkenhöhe sind von GALLAGHER beschrieben worden. Intelligente Interfaceeinhei-

ten wurden nach DOCKENDORFF & Van CAUWENBERGHE [1984] auch bei der kanadischen automatischen Mehrzweck-Wetterstation READAC verwendet.

Intelligente Geber mit Mehrfachsensoren können aus verschiedenen Gründen zweckmäßig sein.

a) Bei sehr einfachen und kostengünstigen Meßfühlern wie z.B. Widerstandsthermometern würden die für einen intelligenten Geber aufzubringenden Kosten in keinem vernünftigen Verhältnis zu denen des Primärsensors stehen. Es besteht hier jedoch wie bei den unifizierten Gebern die Möglichkeit, mehrere gleichartige Sensoren in einem Geber zusammenzufassen. Als Beispiel soll ein intelligenter Geber für alle Erdbodenthermometer genannt werden, der die Bodentemperaturen in verschiedenen Tiefen mißt und verarbeitet. Der Signalumformer muß dann um einen Multiplexer erweitert werden. Funktionsgruppen dieser Art sind heute als integrierte Schaltungen kommerziell verfügbar. Die mit den Primärsignalen durchzuführenden Verarbeitungsaufgaben stimmen hier weitgehend überein.

b) Es gibt eine Reihe meteorologischer Größen, die sich nur aus den Ergebnissen mehrerer Meßgrößen bestimmen lassen. Dazu zählt zum Beispiel der auf Meeresebene reduzierte Luftdruck, zu dessen Berechnung nicht nur der Luftdruck an der Station, sondern zusätzlich Angaben über die Lufttemperatur und den Dampfdruck sowie die Stationshöhe über NN gebraucht werden. DOCKENDORFF & McNAIR [1995] berichteten über die Absicht des kanadischen Wetterdienstes zur Entwicklung von Multisensoren für Bewölkung, Sicht und Niederschlag einschließlich der dazu erforderlichen Algorithmen. Noch weit mehr Meßgrößen müssen bei der automatischen Bestimmung des gegenwärtigen Wetterzustands oder des Wetterverlaufs der vergangenen Stunden Berücksichtigung finden, was nach HUOVILA [1980] und SHORT [1980] im Prinzip möglich sein sollte. Der in den USA entwickelte 'Laser Weather Indicator' kann als Geber angesprochen werden, der geeignet ist, einige der Zustände des gegenwärtigen Wetters zu identifizieren. Weitere Entwicklungsarbeiten an intelligenten Gebern, die sich sowohl auf die Gerätetechnik als auch die Algorithmen beziehen, waren nach SHORT in Vorbereitung. Analysatoren für Spurengase benötigen für die Umrechnung gemessener Gaskonzentrationen auf Normalbedingungen Angaben über den Luftdruck und die Temperatur im Gerät. Bei allen solchen Anwendungen liegt es nahe, die erforderlichen Sensoren in einem Geber zusammenzufügen.

c) Zur Erhöhung der Zuverlässigkeit und zur Schaffung von Voraussetzungen für eine bessere Beurteilung der Datenqualität haben Van Den ENDEN & MULLER [1985] sowie PIKE [1986] vorgeschlagen, innerhalb bestimmter Geber mehrere Festkörpersensoren vorzusehen, welche die gleiche Größe nach verschiedenen physikalischen Meßprinzipien erfassen. Zusätzlich können weitere Sensoren zur Bestimmung von Einflußgrößen vorgesehen werden. Das Prinzip dieser als "ultimate sensor" bezeichneten Geber ist in Abb. 22 dargestellt. Durch einen im Sensor enthaltenen Prozessor werden aus den Meßsignalen und den im geberinternen Speicher-Schaltkreis abgelegten Eichdaten Meßwerte in physikalischen Einheiten berechnet. Diese sind untereinander zu vergleichen und aus dem Ergebnis ist eine Statusinformation abzuleiten. Bei nur zwei verschiedenen Sensoren besteht lediglich die Möglich-

keit zu schließen, daß zumindest eine Messung fehlerbehaftet ist, wenn die Differenz beider Meßergebnisse einen vorgegebenen Wert überschreitet. Werden hingegen drei oder mehr Sensoren genutzt, kann mit gewisser Wahrscheinlichkeit ein fehlerhaft arbeitender erkannt werden.

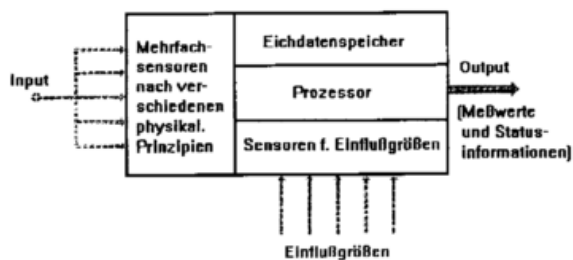


Abb. 22: Prinzip des "ultimate sensor"
(aus: Van Den ENDEN & MULLER [1985])

ANTIKAINEN & HYVÖNEN [1984] beschrieben das Präzisions-Digitalbarometer PA 11 der Fa. Vaisala, in dem drei kapazitive Aneroidkapseln als unabhängige Drucksensoren zum Einsatz kamen. Die Ausgangssignale der Sensoren wurden zunächst in Frequenzen umgesetzt und danach digitalisiert. Die weitere Verarbeitung übernahm ein Mikroprozessor, der neben dem augenblicklichen Luftdruck den dreistündigen Trend bestimmte und ein Testsignal erzeugte. Für die Luftdruckdaten wurden die Angaben aller drei Sensoren gemittelt, sofern sich ihre Ausgangssignale als einwandfrei erwiesen. Andernfalls wurden bei der Mittelbildung nur die ungestörten Sensoren einbezogen. Der Trend wurde als Differenz des aktuellen Druckwertes gegenüber dem vor 3 h berechnet. Auftretende und vom Mikrorechner erkannte Störungen führten zu akustischen Alarmen. Die Verwendung von drei unabhängigen Drucksensoren erhöhte nicht nur die Reproduzierbarkeit der Anzeigen, sondern schaffte die Möglichkeit zur Erkennung von Fehlern und Störungen und erhöhte ferner die Zuverlässigkeit des Gebers. Damit eignete sich der Druckgeber für Anwendungen, bei denen es wie im Flugwesen auf hohe Genauigkeit, Datenqualität und Zuverlässigkeit ankommt.

Eine intelligente Unterstation Autodat-12-IDL mit 12 Meßstellen zum Anschluß von Pt-100-Widerständen, Thermoelementen oder anderen analogen Sensoren mit Spannungs- oder Stromausgang, die sich über eine serielle Schnittstelle nach dem Standard RS-232C wahlweise direkt oder über Unterstation AMS-12-DS an einen Personalcomputer anschließen läßt, wurde von ZIMMER [1988] behandelt.

Intelligente Geber, welche die genannten Aufgaben erfüllen, lassen sich nicht nur in automatischen Stationen nutzen. Da sie die auszugebenden Informationen als Dezimalzahlen zur Verfügung stellen, können sie ohne hohen Aufwand in Verbindung mit anzeigenden oder registrierenden meteorologischen Meßgeräten verwendet werden. Dazu müssen lediglich entsprechende Displays oder Speichergeräte zur Verfügung stehen, die ebenfalls mit einer Mikrorechnersteuerung ausgerüstet und geeignet sind, die Datenprotokolle der Geber zu empfangen. Eine Kopplung ist dann problemlos durchführbar. Bei einer Normung der Bussysteme für den Datenaustausch und der Protokollformen bestünde ein Vorteil in der Möglichkeit, die Funktionseinheiten wie Geber, Anzeige- und Registriergeräte in größeren Stückzahlen und damit wirtschaftlicher und kostengünstiger herzustellen.

2.5.3 Geber mit neuen Sensoren

Bei der Sensorentwicklung ist gegenwärtig eine Tendenz zur Einführung neuer Sensorprinzipien zu verzeichnen. Möglich wurde dies durch die Entwicklung der Technologien für die Fertigung moderner Halbleiter-Bauelemente (vgl. BERNT & REICHL [1979], SELDERS [1982] und GOODENOUGH [1985]). In Abhängigkeit von den eingesetzten Technologien unterscheiden sich die Wirkprinzipien der modernen Sensoren deutlich. Eine Vielzahl von Sensoren für unterschiedliche Meßgrößen ist nach RÖHL [1981] und SCHOPPNIES [1983] bereits realisiert worden. Die Primärsensoren können nach OBERMEIER [1986] innerhalb des Sensorgehäuses mit Funktionsgruppen zur Signalaufbereitung, Signalumsetzung und mit eigenen Mikrorechnern kombiniert werden, wodurch sich integrierte intelligente Sensoren realisieren lassen. Über Entwicklungstendenzen der modernen Sensortechnik haben GÜNZEL [1979], HOFMANN [1982] sowie HABEKOTTÉ et al. [1990] informiert.

Es ist im Rahmen dieses Aufsatzes nicht möglich, auf die Vielzahl der vorgeschlagenen bzw. entwickelten Sensoren einzugehen. Im folgenden sollen nur einige der Sensorprinzipien genannt werden, die auch im Bereich automatisierter Meßsysteme in der Meteorologie und den Umweltwissenschaften in Zukunft eine gewisse Bedeutung erlangen könnten.

Technisch verwertbare Ergebnisse liegen bereits bei *elektronischen Siliciumsensoren* vor, die über eine mehr oder weniger aufwendige integrierte Zusatzelektronik verfügen. Da für diese Sensoren die Technologien aus der Halbleiterelektronik unmittelbar übernommen werden konnten, lassen sich die Siliciumsensoren in Massenfertigung meist relativ preisgünstig und mit kleinen Abmessungen herstellen (siehe REICHL [1979], ALLAN [1980], GOODENOUGH [1985] sowie MIDDLEHOEK & AUDET [1987]). Temperaturmeßfühler, welche die Temperaturabhängigkeit des Spannungsabfalls an einem in Durchlaßrichtung betriebenen pn-Übergang als Sensorprinzip nutzen, sowie piezoresistive bzw. piezokapazitive Absolutdrucksensoren sind bereits in den Abschnitten 2.2.1 bzw. 2.2.3 genannt worden. Sie kamen vereinzelt auch bereits für meteorologische Anwendungen zum Einsatz. In Verbindung mit thermischen Meßverfahren lassen sich die Wirkprinzipien von Temperatursensoren zur Messung anderer meteorologischer Größen wie Strahlung, Wind, Luftdruck und Luftfeuchte nutzen.

Optoelektronische Zeilen- und Bildsensoren sind Anordnungen von photoelektrischen Elementarsensoren kleiner Abmessungen einschließlich der für die Steuerung der Bildspeicherungs- und Lesevorgänge erforderlichen Zusatzelektronik auf einem Chip. Moderne Bildsensoren erreichen auf Grund ihrer hohen Pixelzahl eine gute Auflösung. Die spektralen Empfindlichkeitsbereiche der Elementarsensoren können sowohl im sichtbaren als auch im kurzwelligen und mittleren Infrarotbereich liegen. Die Wirkungsweise verschiedener Bildsensoren und ihre Eigenschaften sind u.a. von BARBE [1975] sowie von TORR & DEVLIN [1982] behandelt worden. THEDEN & GREEN [1985] haben einen Überblick zu den für IR-Strahlung geeigneten Detektoren gegeben. Bildsensoren sind wiederholt in Erkundungssatelliten zum Einsatz gekommen. Über die Entwicklung dafür geeigneter Geräte zur Fernerkundung hat u.a. SCHWARZ [1985] einen zusammenfassenden Bericht gegeben. Sie dürften sich in Verbindung mit Mikrorechnern auch für eine Reihe von terrestrischen Anwendungen als intelligente Sensoren eignen, bei denen es auf die Auswertung von bildhaften Informationen ankommt. So sind

bereits Bildsensoren nach WOLFE & NAGLER [1980] zum optischen Nachweis von Blitzen, nach GOTWOLS & IRANI [1982] zur Erfassung der Dynamik von Meereswellen, nach LaBAW [1983] als Strahlungsdetektoren für Spektrometer und von VIEZEE & EVANS [1983] zur automatischen Erfassung der Sichtweite eingesetzt worden. Weitere potentielle Anwendungen zeichnen sich u.a. bei der Identifikation der Wolkentypen ab. Einem erweiterten Einsatz dieser Sensoren steht jedoch gegenwärtig noch ihr relativ hoher Preis im Wege.

Verstärkte Anstrengungen werden gegenwärtig auch bei der Entwicklung *chemischer Sensoren* unternommen. Übersichten zu den in Sensoren für Umweltgrößen, insbesondere den Gassensoren, genutzten Wirkprinzipien haben GÖPEL [1985] sowie DOBOS et. al. [1988] gegeben. Auf die Festkörpersensoren zum Nachweis von Gasen sind insbesondere FIRTH et al. [1974] sowie HÜBNER & OBERMEIER [1985] eingegangen. Trotz der immer wieder hervorgehobenen Anwendungen im Umweltschutz muß jedoch darauf verwiesen werden, daß diese Sensoren heute bei weitem noch nicht die Empfindlichkeit, Selektivität und Langzeitstabilität besitzen, die zur Erfassung von Immissionen erforderlich sind. Durch Einsatz von chemischen Mehrfachsensoren wird versucht, Möglichkeiten für den Nachweis von in Luft enthaltenen Schadgasen zu schaffen, wenn von einer geringen Zahl unterschiedlicher Beimengungen ausgegangen werden darf (vgl. ZAROMB & STETTNER [1984]). Bereits heute lassen sich einige einfache chemische Sensoren nach STAHL [1986] für die Erfassung von Schadstoffkonzentrationen bei der Emissionsüberwachung verwenden. Daneben beansprucht gegenwärtig die Entwicklung der *Biosensoren* besondere Aufmerksamkeit. Bei diesen handelt es sich um Sensoren, bei denen ein Biomolekül mit einem zu analysierenden organischen Stoff eine substanzspezifische chemische Reaktion eingeht. Die Reaktion erzeugt ein chemisches Zwischensignal (z.B. pH-Wertänderung), das mit einem weiteren Wandler in ein elektrisches Ausgangssignal umgesetzt wird, das sich zum selektiven Nachweis nutzen läßt. Weitergehende Erläuterungen zu diesen Sensoren findet man bei GAISFORD & RAWSON [1989] sowie WEIGLEIN [1990].

Als noch im Entwicklungs- bzw. Erprobungsstadium müssen wohl gegenwärtig die *faseroptischen Sensoren* betrachtet werden. Sie nutzen optische Effekte wie Änderungen der Reflexion, Transmission und Polarisation sowie Erzeugung bzw. Dämpfung von Fluoreszenzlicht. Über Lichtleiter in Form von Glas- oder Kunststofffasern wird sowohl das zur Anregung erforderliche Licht zugeführt als auch das optische Meßsignal zum Detektor geleitet. Für eine Vielzahl von Meßgrößen, darunter auch meteorologischen wie Temperatur, Luftfeuchte und Luftdruck sowie für den Nachweis einer Reihe von Schadstoffen in Luft bzw. Wasser wurden faseroptische Sensoren vorgeschlagen oder bereits als Muster entwickelt. Übersichtsreferate zu diesen Sensoren haben KIST [1986] und MARTENS [1986] gegeben. Über Versuche mit faseroptischen Temperatur-, Feuchte-, Windgeschwindigkeits- und Windrichtungssensoren zur Instrumentierung eines Meßmasts haben BÜKER & HÄSING [1990] berichtet. Die genutzten Sensorprinzipien wurden angegeben. Um dem Meßmast vollständig mit faseroptischen Sensoren auszurüsten zu können, sind noch weitere Entwicklungsarbeiten erforderlich. Ein Vorteil dieser Sensoren besteht darin, daß die optischen Signale zwar durch Fremdlicht, aber nicht durch elektromagnetische Effekte gestört werden können. Sofern der Sensor und die zur Signalübertragung dienenden Glasfasern gegen

Fremdlicht sicher abgeschirmt werden, lassen sich Störungen auf dem Übertragungswege weitgehend ausschließen. Auch die bei drahtgebundenen Übertragungswegen auftretenden Probleme hinsichtlich des Blitzschutzes entfallen hier vollständig. Da der Sensor mit Strahlungsenergie versorgt wird und daher ohne elektrischen Strom auskommt, entfällt jede Explosionsgefahr, was jedoch im vorliegenden Anwendungsgebiet von untergeordneter Bedeutung ist. Wie LENZ & BJORK [1988] hervorhoben, verbleiben bei faseroptischen Sensoren noch viele Entwicklungsprobleme, die vor einem erweiterten Einsatz gelöst werden müssen. Über Anwendungen faseroptischer Sensoren im Bereich der Geophysik haben KUMAR et al. [1995] eine Übersicht gegeben, wobei Druck- und Temperatursensoren im Vordergrund standen.

Vom Prinzip, Lichtsignale zur Übertragung der Informationen von den Gebern zur Meßwerterfassungsanlage einzusetzen, wird in elektromagnetisch stark gestörter Umgebung auch dann Gebrauch gemacht, wenn Geber mit elektrischen Ausgangssignal verwendet werden. In diesem Falle muß in der Geberanschlußeinheit eine Wandlung der elektrischen Signale in Lichtsignale und am Eingang des Meßwerterfassungssystems eine Rückwandlung des Lichtsignals in ein elektrisches stattfinden. An die Stelle der Kabel mit Kupferadern treten Glasfaser-Leitungen. Auf die technische Realisierung von Systemen zur Übertragung der Meßsignale über Lichtleiter sind DAHLMANN & SCHNEKENBURGER [1986] näher eingegangen. Sie beschrieben einen Ringbus, der wahlweise aus Lichtwellenleitern oder Zweidrahtleitungen aufgebaut werden kann. Da die Lichtwellensender und -empfänger von den gleichen Treibern angesteuert werden können wie die Kupferleitungen, ist der Hardware-Aufwand in beiden Fällen der gleiche. Lichtwellenleiter arbeiten jedoch in stark gestörter Umgebung zuverlässiger als Zweidrahtleitungen. KUNTZ & MORES [1989] untersuchten Möglichkeiten zur Energieversorgung von leistungsarmen Sensoren mit Laserlicht, das über den gleichen Lichtwellenleiter übertragen und am Sensorort mit Hilfe von Photoelementen in elektrische Energie verwandelt wurde. Ein faseroptisches Übertragungssystem, bestehend aus einem lokalen Netz mit zwei Glasfasern und intelligenten Geberinterfaces ist nach REYNOLDS et al. [1988] auf einem Forschungsschiff installiert worden, wo erfahrungsgemäß häufig Probleme hinsichtlich der elektromagnetischen Verträglichkeit auftreten.

Die Prinzipien der meisten konventionellen Sensoren sind seit vielen Jahrzehnten bekannt. Meßfühler, welche auf diesen Grundlagen basieren, wurden langzeitlich erprobt und haben sich sowohl im wissenschaftlichen als auch im industriellen Einsatz bewährt. Die meisten neuen Sensorprinzipien sind hingegen erst in den letzten Jahrzehnten erarbeitet worden. Dabei orientierte man zunächst vorwiegend auf eine Massenfertigung für breite Anwendungen in der Konsumgüterindustrie, bei denen die Anforderungen an die Qualität der Sensoren oft deutlich geringer sind als im wissenschaftlichen Bereich. Nur vereinzelt richteten sich die Bestrebungen auf die Schaffung von Präzisionsensoren und deren Herstellung in kleineren Stückzahlen. Diese Präzisionsensoren haben noch keine längere Erprobungsphase hinter sich. Vielfach fehlen noch verlässliche Angaben zur Langzeitkonstanz. Auch sind die auf sie wirkenden Einflußgrößen noch nicht vollständig bekannt.

Für einen routinemäßigen Einsatz in automatischen meteorologischen Meßsystemen reichen die gegenwärtig vorliegenden Erfahrungen hinsichtlich Langzeitkonstanz, Reproduzierbarkeit

der Meßergebnisse und der beim Einsatz im Freien wirksamen Einflußgrößen oft noch nicht aus, wenn man von den o.g. Temperatur- und Drucksensoren absieht. Nach einem intensiven Testprozeß bezüglich der Sensorstabilität innerhalb vorgegebener Temperatur- und Luftdruckbereiche sowie bei Auftreten von Beschleunigungen und Schwingungen hat sich nach Angaben von NAITO [1998] die Japan Meteorological Agency entschlossen, das Digitalbarometer PTB220 und den Feuchtefühler HMP233 der Firma Vaisala als Geber für die japanische automatische Bodenstation JMA-95 vorzusehen und im Netz der Bodenbeobachtungsstationen einzusetzen. Nach Van GYSEGEM [1980] deutet sich ferner an, daß neue Sensoren u.U. in Spezialinstrumentarien vorwiegend im Bereich der Forschung erfolgreich angewendet werden könnten. Inwieweit sich der Einsatzbereich dieser Sensoren in Zukunft auch bei meteorologischen Routinemessungen ausweiten wird, kann man gegenwärtig noch nicht sicher einschätzen. Wegen der sensorbedingten Unsicherheiten haben Van Den ENDEN & MULLER [1985] zur Sicherung der erforderlichen Datenqualität vorgeschlagen, nach unterschiedlichen Wirkprinzipien arbeitende Primärsensoren für die gleiche meteorologische Größe auf einem Chip zu integrieren und durch eine Vergleichs- und Auswahllogik den wahrscheinlichsten Wert zu ermitteln. Mit Sicherheit kann man davon ausgehen, daß die neuen Sensoren nicht in der Lage sein dürften, die gegenwärtig verbreitet im Gebrauch befindlichen und bewährten konventionellen Sensoren zu verdrängen.

3 Schnittstellen und Netze

Rechner, wie sie in modernen Meßwerterfassungssystemen üblich sind, besitzen Ein-/Ausgabeports, über die sie Daten in bitparalleler oder serieller Form austauschen können. Die Wortbreite der Ein-/Ausgabeports entspricht meist der Datenwortbreite der Rechner. Bevorzugt sind Wortbreiten von 8, 16 und 32 bit.

Periphere Geräte, zu denen bei automatischen meteorologischen Stationen auch die Geber, das Modem zur Fernübertragung von Meldungen bzw. Fernsteuerung des Meßsystems sowie externe Speicher wie Magnetband-Kassettengeräte oder Diskettenlaufwerke zur Datenspeicherung vor Ort zu zählen sind, liefern bzw. erfordern die Informationen häufig in anderer Form. Sie sind daher nicht in der Lage, unmittelbar mit einem Rechner zu korrespondieren. Um einen Datenaustausch zu ermöglichen, sind geeignete *Schnittstellen* (engl.: interfaces) zwischen den Einheiten eines informationsverarbeitenden Systems erforderlich. Die Schnittstellendefinitionen umfassen nach BAUMANN et al. [1974] Festlegungen über deren

- * *logische Bedingungen*, wie die Art und Anzahl der auszutauschenden Signale, ihre Codierung, den zeitlichen Ablauf und die gegenseitigen Verknüpfungen sowie Festlegungen zur Wirkung der Signale,
- * *elektrische Bedingungen*, zu denen die Zuordnung von Spannungsbereichen für Ein- und Ausgänge zu den logischen Pegeln, die Festlegung von Lastfaktoren für Ein- und Ausgänge und von Zeitbedingungen sowie zulässigen Übertragungslängen gehören, und
- * *konstruktiven Eigenschaften*, die z.B. Angaben über Art, Zu- und Anordnung der Verbindungselemente im Funktionsblock, sowie über die Art der Verbindungsleitungen umfassen müssen.

Vervollständigt wird die Schnittstellendefinition durch weitere Festlegungen über Algorithmen für Schnittstellentreiberprogramme. Den Aufbau solcher Interface-Software für Personalcomputer hat THIESER [1994] ausführlich behandelt. Technisch realisiert werden die erforderlichen Bedingungen durch *Interface-Einheiten*, die man auch als Anschlußsteuerungen bezeichnet und die meist als Baugruppen ausgeführt werden. Zu den Aufgaben dieser Interface-Einheiten gehören insbesondere:

- Adressierung der Datenquelle oder -senke, mit der der Austausch stattfinden soll.
- Umwandlung einzugebender Informationen in bitparallele Datenworte der erforderlichen Wortbreite und Zwischenspeicherung des Datenwortes in einem Register.
- Zwischenspeicherung einer auszugebenden Information und Umwandlung in die erforderliche Signalform.
- Steuerung des Übernahme- bzw. Übergabevorgangs durch Austausch von Befehls- und Statusbits mit dem Rechner.

Aus der Zusammenstellung geht bereits hervor, daß es nicht ausreicht, die eigentlichen Informationsinhalte auszutauschen, sondern daß zusätzlich zu diesen Daten, zumindest Adreß-, Befehls- und Meldesignale gebraucht werden, zu denen eventuell weitere hinzukommen können. Zur Übertragung dieser Signale verwendet man ein einheitliches Leitungssystem als Sammelschiene, das als *Bus* bezeichnet wird. Solange die Entfernungen zwischen den Einheiten kurz sind, wie das innerhalb eines Rechnersystems oder auch bei der Laborautomatisierung meist der Fall ist, werden alle Einzelsignale auf getrennte Leitungen bitparallel übertragen. Der Bus kann dann in einen *Daten-, Adreß- und Steuerbus* untergliedert werden. Parallele Busstrukturen sind bereits zeitig in automatischen Stationen eingesetzt worden. So enthielt die Meßwerterfassungsanlage MME1 der automatischen meteorologischen Station AFMS-1 bereits einen parallelen Datenbus zum Austausch von Informationen zwischen verschiedenen Teilen des Systems (vgl. BAUMGART & HÖHNE [1969]). Auch in Kanada ist nach Angaben von ROBINSON [1980] bereits in den 60er Jahren ein Busverbindungsverfahren bei den automatischen Stationen vom Typ MARS-1 eingeführt und standardisiert worden.

Mit steigenden Entfernungen zwischen den zu verbindenden Funktionsgruppen – wie das bei Bussystemen zwangsläufig der Fall ist, die verschiedene Sensoren mit der Meßwerterfassungsanlage verbinden müssen – erhöht sich bei Parallelbussen der Leitungsaufwand erheblich. Es ist dann günstiger, Adressen, Steuersignale und Daten nacheinander auf einem *seriellen Zweidrahtbus* oder einen *Glasfaserbus* bitseriell über den gleichen Übertragungskanal zu schicken, um die Leitungskosten in Grenzen zu halten. In der Vergangenheit gab es auch Übergangslösungen, bei denen z.B. die Ziffern eines Meßwertes nacheinander, die Bits einer Ziffer sowie die Steuerbefehle und Adresse jedoch parallel übertragen wurden. Eine solche Struktur nutzte beispielsweise das Partyline-System der Firma Philips, das sich bei programmierbaren Systemen sowohl in Verbindung mit Rechnern als auch mit digitalen Steuerschaltungen anwenden ließ. KLAUS [1972] beschrieb eine automatische Wetterstation, bei der dieses System eingesetzt wurde. Die größte Verbreitung unter den standardisierten seriellen Bussystemen haben in der Vergangenheit wohl die Schnittstelle nach den Normen RS-232 bzw. RS-232C und RS-485 erlangt. Sie erfordern neben dem Einsatz der den Normen entsprechenden Interfaceeinheiten zusätzlich

die Einhaltung der zugehörigen Busprotokolle. KAINKA [1994] befaßte sich in seiner Monographie mit Meß-, Steuer- und Regelsystemen, welche die RS-232-Schnittstelle nutzen und gab Hinweise zur Gestaltung solcher Interfaces. MARTINEZ & PEREZ [1988] verwendeten ein RS-232-Interface zur Kopplung eines ozeanographischen Datenerfassungssystems mit einem Computer vom Typ Apple IIe über eine Koppelkarte.

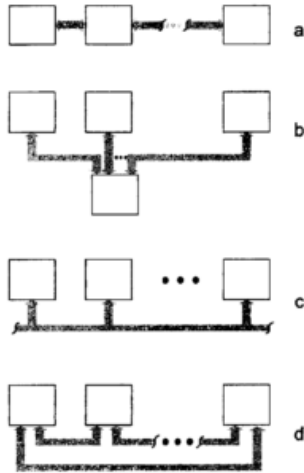


Abb. 23: Grundtopologien von Bussystemen
a) Punkt-zu-Punkt-Verbindung b) Sternstruktur
c) Linienstruktur d) Ringstruktur

Bussysteme können gemäß Abb. 23 als Punkt-zu-Punkt-Verbindungen (die bei mehreren hintereinander angeordneten und zu verbindenden Einheiten als Kettenleiterstruktur bezeichnet wird), sowie in Stern-, Linien- oder Ringtopologie aufgebaut werden. Typische Entfernungen bei solchen Bussystemen reichen bis zu Entfernungen von wenigen hundert Metern.

Ein Ringbussystem mit hoher Störsicherheit und Potentialtrennung von Sender und Empfänger haben DAHLMANN & SCHNEKENBURGER [1986] beschrieben. Als Busleitungen kamen sowohl verdrehte Zweidrahtleitungen als auch Lichtwellenleiter in Betracht. Für dieses System wurde eine universelle Interfacekarte entwickelt, die einen Mikrorechner enthält. Auch das von DAHLMANN & KRAMMER [1990] beschriebene Meßdatenerfassungssystem für Tiefbohrungen arbeitete mit einer durch Einchiprechner geführten Sondenelektronik und galvanischer Trennung zwischen Sonden und Bohrlochkabel. Für diese Zwecke wurden Sende- und Empfangsbausteine mit Optokopplern eingesetzt. Dadurch war es möglich, erhebliche Gleichstromstörungen zu unterdrücken.

Für die zum Rechner gehörende Standardperipherie, zu der insbesondere Tastatur, Bildschirmgerät, Drucker und Externspeicher zu zählen sind, ist das erforderliche Interface im Rechnergehäuse oft bereits enthalten. In der Regel werden für den Datenaustausch mit diesen Geräten standardisierte Schnittstellen genutzt. Hierbei kommt wegen der erforderlichen hohen Übertragungsgeschwindigkeit bei nur kurzen zu überbrückenden Strecken häufig eine bitparallele Datenübertragung zur Anwendung. Meßsignale müssen von den Gebern bis zum Rechner Entfernungen von einigen zehn bis zu einigen hundert Metern zurücklegen. Um die Leitungskosten in Grenzen zu halten, werden hier verdrehte Zweidrahtleitungen bevorzugt. Digitale Meß-, Adreß- und Steuersignale sind dann bitseriell zu übertragen. Dafür existieren eine Reihe von Vorschlägen über sog. serielle Meßbusse. Für die Über-

mittlungen von Meldungen zwischen den Stationen und der zentralen Sammelstelle sind Entfernungen von vielen Kilometern zu überbrücken. Hierfür können aus wirtschaftlichen Gründen nur kommerzielle Nachrichtenkanäle wie das Telefon- oder Telexnetz bei drahtgebundener Übertragung genutzt werden. Die vorhandenen Übertragungsnormen sehen auch hier eine bitserielle Übermittlung vor. Zu den Aufgaben der Ausgabesteuerung gehört ferner der Verbindungsaufbau durch einen Wählvorgang.

Gegenwärtig existiert eine Vielzahl von Schnittstellen- und Busnormen, die kaum noch vollständig zu überschauen sind. Ältere, meist parallel arbeitende Interfacesysteme wurden von BAUMANN et al. [1974] zusammengestellt und untereinander verglichen. Sie waren oft auf bestimmte Anwendungen oder Rechner zugeschnitten. Übersichten zu verschiedenen gebräuchlichen Schnittstellen sowie parallelen und seriellen Bussystemen mit Angaben einiger charakteristischer Daten hat SCHUMNY [1990] zusammengestellt. Einen Überblick zu wesentlichen internationalen Normen für Kommunikationssysteme in der Automatisierungstechnik haben NEUMANN & SAVATZKY [1988] gegeben.

Besitzen die verschiedenen Komponenten eines Systems eigene Intelligenz, wie dies auch bei einer automatischen meteorologischen Station mit intelligenten Funktionseinheiten der Fall ist, und sind Kommunikationswege zwischen den beteiligten Systemkomponenten vorzusehen, muß an die Stelle eines Busses ein Netz treten. Für die Entfernungen, wie sie zwischen den Gebern, dem Stationsrechner und den Ausgabegeräten einer automatischen Wetterstation zu überbrücken sind, reicht in der Regel ein *lokales Netz* (engl.: local area network, Kurzbezeichnung: LAN). LANs sind hauptsächlich für den Entfernungsbereich zwischen 100 m und 10 km bestimmt. Sie wurden ursprünglich für die Vernetzung von Systemen der Bürokommunikation entwickelt. Unabhängig von Rechnern, die in den Einzelkomponenten des Netzes zum Einsatz kommen, werden solche Netze häufig von einem zentralen Rechner gesteuert, der auch als Server bezeichnet wird. Sollen sie für Automatisierungsaufgaben genutzt werden, müssen die besonderen Bedingungen in diesem Bereich berücksichtigt werden. Dazu zählen

- die unterschiedlichen Umgebungsbedingungen, gekennzeichnet durch elektromagnetische Störungen und Witterungseinflüsse auf das Übertragungssystem
- die Echtzeitbedingungen, die eine Einhaltung vorgegebener maximaler Verzögerungszeiten bei der Übertragung von Datensätzen verlangen, was ein deterministisches Buszugriffsverfahren erfordert.

Das *Buszugriffsverfahren* hat zu sichern, daß stets nur ein Busteilnehmer Zugriff zum Bus hat und Bustelegramme senden darf. Dazu werden verschiedene Verfahren genutzt. Beim CMA/CD-Verfahren (carrier sense, multiple access with collision detection) beobachten alle Teilnehmer das Netz. Wenn kein Verkehr stattfindet, darf jeder Teilnehmer, der auf Zugriff zum Netz wartet, mit dem Absetzen seiner Nachricht beginnen. Kommt es dabei durch das gleichzeitige Senden mehrerer Teilnehmer zur Kollision, wird von allen der Verkehr abgebrochen. Um eine erneute Kollision zu vermeiden startet jeder der sendewilligen Teilnehmer nach einer durch einen Zufallsgenerator vorgegebenen Zeit einen neuen Versuch. Ein anderes Zugriffsverfahren ist das sog. Token-passing-Verfahren. Dabei läuft auf dem Bus reihum von Teilnehmer zu Teilnehmer ein als Token bezeichnetes Signal, das dem jeweils angesprochenen die Freigabe zur Sendung erteilt. Hat der betreffende Busteilnehmer eine Nachricht abzugeben, beginnt

er nun mit der Sendung und gibt das Tokensignal erst nach dem Ende der Übertragung ab. Ist er nicht sendebereit, wird das Tokensignal sofort weitergegeben. Diese Verfahrensweise sichert, daß jeder Busteilnehmer innerhalb einer bestimmten Zeitspanne Zugriff auf den Bus erhält und alle hinsichtlich des Buszugriffs gleichberechtigt sind.

PAINTING [1985] hat ein Konzept einer automatischen Station vorgeschlagen, bei dem der oder die zentralen Mikrorechner und ihre peripheren Ein-/Ausgabegeräte über ein lokales Netz untereinander kommunizieren.

LANs nutzen bitserielle Kommunikationsverfahren und unterscheiden sich in ihrer Topologie (Linien-, Ring- und Sternbus) sowie in den Zugriffsverfahren, mit denen zugleich ein Mehrfachzugriff auf den gleichen Bus verhindert werden muß. PETER [1988] gab eine Übersicht zu Grundlagen, Ausführungen und Normen von lokalen Netzen. BARSCH & JÄNICKE [1988] berichteten über die Anpassung eines lokalen Netzes an die in Automatisierungsanlagen auftretenden besonderen Bedingungen durch Ersatz der Koaxialleitungen durch Lichtwellenleiter und Anwendung eines einfachen deterministischen Buszugriffsverfahrens. Eine Übersicht zu typischen PC-Netzen findet man bei SCHUMNY [1990]. NEUMANN & SAWATZKY [1988] haben im Rahmen ihrer Übersicht zu Kommunikationssystemen der Automatisierungstechnik die Leistungsbereiche von verschiedenen Netzen denen von Bussystemen gegenübergestellt.

Um zu besser strukturierten Systemen zu gelangen, wurde das Referenzmodell für die Kommunikation offener Systeme entwickelt. Dieses *ISO-OSI-Referenzmodell*, das international unter der Bezeichnung ISO 7498 genormt wurde, hat die Aufgabe, die für die Kommunikation offener Systeme nötigen Funktionen zu identifizieren und zueinander in Beziehung zu setzen. Es soll helfen, die weitere Arbeit an den Normen zu koordinieren. Unter *offenen Systemen* werden dabei Systeme verstanden, deren Schnittstellen, Daten- und Funktionsstrukturen dokumentiert und offengelegt worden sind. Die Systemkomponenten selbst brauchen untereinander nicht kompatibel zu sein. Sie sollen jedoch über Kommunikationsmöglichkeiten untereinander verfügen. Dazu müssen sie vereinheitlichten Festlegungen entsprechen. Das Referenzmodell beschreibt die Kommunikation zwischen Systemen, die durch Übertragungsstrecken untereinander verbunden sind; liefert aber keine Spezifikationen für eine Implementation und enthält keine technologischen Festlegungen. Die Kommunikation offener Systeme beinhaltet nicht nur die Übertragung der Daten zwischen den Systemen, sondern auch die Zusammenarbeit von Systemen mit dem Ziel der Bewältigung einer gemeinsamen Aufgabe. Die dabei einzuhaltenden Regeln sind in einem Satz von Normen zusammengefaßt.

Schicht Nr.	Bezeichnung	
	deutsch	englisch
7	Verarbeitungsschicht	application layer
6	Darstellungsschicht	presentation layer
5	Kommunikationssteuerungsschicht	session layer
4	Transportschicht	transport layer
3	Vermittlungsschicht	network layer
2	Sicherungsschicht	data link layer
1	Bitübertragungsschicht	physical layer

Tabelle 3: Schichten und Protokolle des ISO-OSI-Referenzmodells

Ein Grundgedanke des Referenzmodells ist die Unterscheidung von sieben übereinanderliegenden Schichten gemäß Tabelle 3. Jeder Schicht ist ein Protokoll sowie ein Kommunikationsdienst zugeordnet, die als Programme die Dienste der darunter- aber nicht der darüberliegenden Schichten mitbenutzen können. Bei einem konkreten Anwendungsfall müssen jedoch nicht immer alle sieben Funktionsschichten berücksichtigt werden. Eine Anwendung dieses Referenzmodells kann aber in jedem Falle helfen, ein logisch sauber strukturiertes System aufzubauen.

3.1 Geberinterfaces

Damit Geber in einem automatischen rechnergeführten Meßsystem als Informationsquellen wirksam werden können, müssen Möglichkeiten geschaffen werden, die Meßsignale in eine Form zu überführen, in der sie über die Entfernung zwischen Geber und Erfassungsanlage weitgehend störungsfrei übertragen und vom Rechner aufgenommen und verarbeitet werden können. Die Übertragung der Meßsignale erfolgt fast ausschließlich über Leitungen und Kabel, die mehr oder weniger starken Störungen ausgesetzt sein können. QUECK [1986] hat sich mit dieser Problematik befaßt und dabei galvanische, kapazitive, induktive Störbeeinflussungen sowie solche durch leitungsgebundene und leitungsfreie elektromagnetische Wellen unterschieden. Für jede dieser Störungen gab er geeignete Gegenmaßnahmen an. Erschwert werden diese Meßsignalübertragungen bei meteorologischen Meßsystemen durch die Vielzahl der *unterschiedlichen Signalformen* meteorologischer Sensoren. Insbesondere erfordern amplitudenanaloge Signale, frequenzanaloge Signale und Impulsfolgen sowie digitalisierte Signale unterschiedliche Schnittstellen. Bei den letztgenannten ist noch zwischen parallel anstehenden und seriellen Signalen zu unterscheiden. Auf die dazu notwendigen Interfaceschaltungen wird in den kommenden Abschnitten einzugehen sein.

Die Vielfalt der Interfaceschaltungen ließe sich jedoch in Zukunft unter bestimmten Voraussetzungen vermeiden. Eine Voraussetzung wäre, daß intelligente Geber für alle meteorologischen Meßgrößen zur Verfügung stünden, was gegenwärtig bei weitem noch nicht der Fall ist. Zusätzlich müßten alle Geber mit einem einheitlichen Interface-Standard arbeiten.

In den letzten zwei Jahrzehnten sind unter der Bezeichnung *Feldbus* zahlreiche Vorschläge für serielle Bussysteme für Meß- und Steuerzwecke erarbeitet und zum Teil auch realisiert und erprobt worden. Die Mehrzahl bezog sich auf industrielle Anwendungen, wobei die Anforderungen hinsichtlich der Echtzeitforderungen, der zu überbrückenden Entfernungen, der Meßstellenzahl und der Verarbeitungsaufgaben in den verschiedenen Branchen nach PFEIFER & HEILER [1987] recht unterschiedlich waren. Die Hauptmerkmale des Feldbusses faßten SCHWAIER [1986] und SCHWARZ [1987] in Übersichtsvorträgen zusammen. SCHOLZ [1988] beschrieb eine Feldbus-Realisierung für kleine Systeme unter Einsatz eines Einchip-Mikrorechners sowohl in den Koppel-einheiten der peripheren Funktionseinheiten als auch in der Bussteuerung. Die dabei verwendeten Telegrammstrukturen sind angegeben. Durch weitgehende Übertragung von Aufgaben auf die Software konnte der Hardwareaufwand minimiert werden. Die Struktur der über den Feldbus zu übermittelnden Telegramme wurde erläutert. DRATHEN [1991] stellte Anforderungen an Feldbussysteme aus der Sicht des industriellen Anwenders an und wies auf die Zweckmäßigkeit nationaler und internationaler Normen hin. NEUMANN & SAWATZKY [1988] verglichen Beispiele verschiedener Feldbussysteme und berichte-

ten über einige nationale und internationale Normungsvorhaben auf diesem Gebiet. Im Rahmen seiner Übersicht zu Feldbussystemen auf der INTERKAMA '89 beschrieb NEUMANN [1990] die Feldbussysteme Unified Fieldbus, PROFIBUS und FIP-Bus. Über Einsatzerfahrungen mit einem dezentralen Meßdatenerfassungssystem in Feldbusstruktur, in dem Prozeßkoppelmodule mit Einchip-Mikrorechner zum Einsatz kamen, an die mehrere Sensoren mit analogen und binären Signalen angeschlossen werden konnten, berichteten BEIKIRCH et al. [1988].

Auf nationaler und internationaler Ebene wurden Normungsgremien eingesetzt, die zu einer Standardisierung des Feldbusses beitragen sollen. Einen Überblick über den aktuellen Stand der Normungsaktivitäten zum Feldbus gaben VOGELSANG & WUTTIG [1989]. So ist nach Angaben von GÖDDERTZ [1989] sowie KATZ et al. [1989] z.B. in Deutschland im Rahmen des Verbundprojektes "Feldbus" durch Zusammenarbeit von 13 Firmen und 5 Instituten ein Feldbus unter der Bezeichnung PROFIBUS spezifiziert und als Ergebnis der Arbeiten eine Vornorm verabschiedet worden. Das zugrundeliegende Buskonzept nutzt wie auch andere Feldbusse nur die drei Ebenen 1, 2 und 7 gemäß Tabelle 3 des ISO-OSI-Referenzmodells und berücksichtigt den Echtzeitbetrieb durch Beschränkung auf kurze Nachrichten und Bereitstellung von zwei effektiven Buszugriffverfahren. Für manche Anwendungen stellt der PROFIBUS einen zu hohen Aufwand dar. Dann sind weniger breit ausgelegte Lösungen angebracht. So haben sich nach Angaben von POST [1991] mehrere Firmen aus dem Sektor elektronischer Antriebe in der Drivecom-Nutzergruppe zusammengeschlossen und den Feldbus Interbus-S als standardisierten Sensor- und Aktorbus geschaffen, der einen Sensoranschluß mit einem Kostenaufwand ab ca. 20 DM möglich macht. KRIESEL et al. [1990] schlugen ein Mehrebenenkonzept für Feldbusnetze vor, um die Anforderungen an die Informationsübertragung bei unterschiedlichen Anwendungsklassen abdecken zu können. Über Bestrebungen zur Schaffung genormter Feldbussysteme in den USA informierte WANXING LI [1989]. Er beschrieb Architektur und Funktion des MPFB-Feldbusses, der zur Automatisierung der industriellen Fertigung auch bei größeren verteilten Systemen geeignet sein dürfte. Indessen sind in den letzten Jahren Zweifel geäußert worden, ob eine radikale Vereinheitlichung bei den unterschiedlichen Anforderungen überhaupt sinnvoll ist. Wahrscheinlich werden auch in Zukunft mehrere genormte Meßbusysteme nebeneinander bestehen (vgl. auch KRIESEL et al. [1990] sowie DRATHEN [1991]).

Nach Angaben von HOFFMANN et al. [1993] wurde ein serieller Zweidraht-Feldbus bei der Instrumentierung eines Leitsystems an einer Deponie eingesetzt, das auch Informationen über das Wetter zu erfassen hat, um die Verdunstung und Wasserbilanz des Deponiekörpers abschätzen zu können.

Der Einsatz serieller Feldbussysteme bei Automatisierungsaufgaben kann zu einer Zuverlässigkeitsschwachstelle vor allem dann führen, wenn sie in Linien- oder Ringtopologie ausgelegt sind. Sowohl Störungen im Buskabel als auch in einer angeschlossenen Einheit können Totalausfälle verursachen, wenn nicht bereits bei der Konzipierung des Bussystems Maßnahmen zur Verminderung der Ausfallraten getroffen werden. ROHBECK et al. [1990] haben die Zuverlässigkeit bitserieller Bussysteme untersucht und auf den Einsatz redundanter Bussysteme orientiert. Erhebliche Verbesserungen der Zuverlässigkeit sind durch doppelte gegenläufige Auslegung von Ringbussen zu erwarten. Passive Bypaßschalter, die ausgefallene aktive Koppelheiten überbrücken, erhöhen die

Systemzuverlässigkeit weiter. Im Störfalle fällt dabei zwar die an der überbrückten Koppelheit angeschlossene Systemkomponente bis zur Fehlerbehebung aus; andere Systemkomponenten werden jedoch hiervon nicht oder nicht wesentlich beeinflusst. SITTERLE et al. [1988] beschrieben ein meteorologisches Datenerfassungssystem für Untersuchungen der atmosphärischen Ausbreitungsbedingungen, bei dem die 7 durch Mikroprozessoren gesteuerten Außenstationen über Lichtleiter-Doppelleitungen mit einem zentralen Kleinrechnersystem verbunden waren.

Moderne meteorologische Stationen sind im allgemeinen durch weniger kritische Echtzeitanforderungen, mittlere Übertragungsentfernungen zwischen den Meßorten und dem Stationsrechner, Meßstellenzahlen bis maximal 100, aber z.T. umfangreichen Verarbeitungsaufgaben gekennzeichnet. Ein serielles Bussystem für dieses Anwendungsgebiet sollte die genannten Voraussetzungen berücksichtigen. Bereits 1985 hat PAINTING die Nutzung eines gemeinsamen Geberbusses propagiert, auf dem die durch Geberanpaßeinheiten vereinheitlichten Meßsignale ebenso wie die Abfragesignale des steuernden Prozessors übertragen werden. Bei meteorologischen Stationen ist ein Bussystem völlig ausreichend, bei dem der Stationsrechner als Master und alle Geber sowie zusätzliche Peripheriegeräte als Slaves arbeiten. Die Genehmigung zum Buszugriff kann auf Anfrage vom Master erteilt werden. Die Zuverlässigkeit des Nachrichtenaustauschs über den Geberbus ist wichtiger als dessen Geschwindigkeit. Gerade bei meteorologischen Gebern, die oft nur in kleineren Stückzahlen gefertigt werden, würde eine internationale Standardisierung der Schnittstellen, wie sie u.a. PARADIŽ [1977] gefordert hat, deutliche Vorteile bringen. Hohe Datenraten kommen nur bei einigen meteorologischen Fernmeßgeräten vor, die im allgemeinen nur bei Einzelgeräten und in meteorologischen Sondernetzen eingesetzt werden und hier besondere Anforderungen an die Meßwerterfassung stellen.

Der Verkehr zwischen einem Stationsrechner und einem Geber erfordert Datenbewegungen in beiden Richtungen. Beim Einsatz intelligenter Geber arbeitet das System im Master-Slave-Betrieb. Der Stationsrechner fungiert hierbei als Master, die intelligenten Geber als Slaves. Vom Rechner zum Geber sind Adressier- und Steuersignale zu übertragen, bevor ein Meßsignal abgefragt werden kann. Nicht allein Meßsignale, die einen Meßwert charakterisieren, sind vom Geber zum Rechner zu übertragen. Auch die Statussignale, welche Auskunft über die Gültigkeit jedes Meßwertes geben und im Fehlerfall Hinweise auf deren Ursache liefern, müssen zusammen mit jedem Meßwert übermittelt werden. Nur so kann entschieden werden, ob ein Meßsignal genutzt werden kann oder zu verwerfen ist.

3.1.1 Interfaces für Digital- und Binärsignale

Während Digitalsignale zur Kennzeichnung von Meßwerten je nach der erforderlichen Auflösung eine Wortlänge von 6...12 bit besitzen, kommen Steuersignale, die zur Kennzeichnung von Befehls- und Meldesignalen genutzt werden, in der Regel mit einem Bit aus. Bei der Übertragung werden mehrere Befehlssignale in einem Steuerwort, mehrere Meldesignale in einem Statuswort gestapelt. Ist nur ein Statussignal (z.B. als Gültigkeitskennzeichen) zu übermitteln, wird es manchmal auch mit dem Meßwert zu einem Wort zusammengefaßt.

Als Geber für digitale Ausgangssignale kommen solche in Betracht, die Codescheiben oder -lineale enthalten, wie dies LAKE [1966] vorsah. Intelligente Geber, die in anderer Form anfallende

Meßsignale in digitale Signale am Meßort umsetzen, gehören ebenfalls zu der hier zu behandelnden Gruppe. Die Übertragung digitaler Signale kann parallel oder seriell erfolgen. Bei längeren Übertragungsstrecken wird heute die serielle Übermittlung aus Kostengründen bevorzugt. Dabei ist an der Sendeseite ein Parallel/Serien-Wandler und an der Empfangsseite ein Serien/Parallel-Wandler erforderlich. Beide Funktionseinheiten lassen sich mittels eines Schieberegisters realisieren, das mit einer Taktfrequenz zu triggern ist. Der dabei ablaufende Vorgang wird schematisch in Abb. 24 veranschaulicht. In der Sendeeinrichtung werden die zunächst parallel anstehenden Bits des Digitalwortes über eine Abfrageschaltung AS1 in die einzelnen Stufen des Schieberegisters SR1 parallel übernommen, anschließend durch den Schiebepuls von Stufe zu Stufe weitergeleitet und am Ende des Schieberegisters seriell auf den Übertragungskanal ÜK gegeben. Das Schieberegister SR2 am Empfangsort wird mit der gleichen Taktfrequenz angesteuert, übernimmt bitweise die eintreffenden Signale und schiebt sie innerhalb des Registers von Stufe zu Stufe. Nach dem Einschreiben eines Wortes kann dieses durch das Abfragesignal S₂ mittels der Abfrageschaltung AS2 parallel in einen Puffer P übernommen werden, der bereits Bestandteil des Stationsrechners sein kann. Die Synchronisierung beider Vorgänge läßt sich auf zwei Wegen bewerkstelligen: entweder durch Übermittlung des gleichen Taktsignals zum Sender und Empfänger beim Synchronbetrieb oder durch Einfügen zusätzlicher Start- und Stoppimpulse am Beginn und Ende jedes zu übertragenden Wortes. Das Startsignal signalisiert dem Empfänger den Beginn eines neuen Wortes. Der Stoppimpuls gibt somit die Folge von Taktimpulsen frei, welche die Übernahme der einzelnen Bitwerte steuert. Der Stoppimpuls dient zum Ausgleich kleiner Unterschiede zwischen den Taktfrequenzen im Sender und Empfänger. Er sichert den Abschluß der Übernahme des letzten Datenwortes, bevor das folgende gesendet wird.

Die Übertragung digitaler Signale ist wegen des relativ großen Abstandes zwischen den beiden Signalpegeln wenig stör anfällig. Treten in Einzelfällen doch Störungen auf, können diese durch eine Reihe von Maßnahmen erkannt oder sogar korrigiert werden. Beispielsweise kann man mit einem Paritätsbit arbeiten, das die Zahl der Bits mit Signalpegel L in einem Digitalwort auf eine gerade oder ungerade Zahl ergänzt, mit redundanten fehlerkorrigierenden Codeformen, die einen größeren HAMMING-Abstand besitzen oder mit Prüfsummen am Ende jedes Datenblocks.

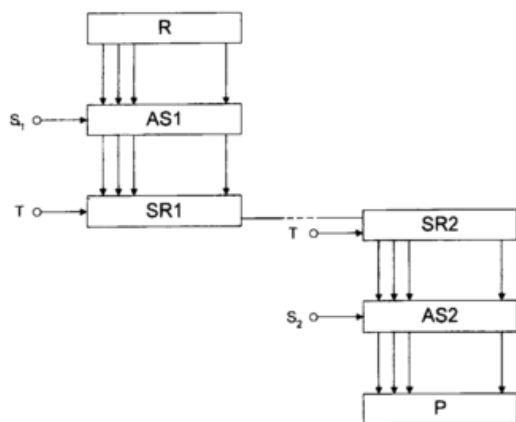


Abb. 24: Übernahme serialisierter Digitalsignale in den Rechner
 R: Register im Geber T: Taktsignal
 AS: Abfrageschaltung S: Abfragesignal
 SR: Schieberegister P: Puffer

Die Bitmuster digitaler Signale müssen nach einer vorgegebenen Vorschrift in geeigneter Weise den Zahlenwerten zugeordnet sein. Diese Zuordnung bezeichnet man als *Codierung*. Nach KUSSL [1963] haben sich für unterschiedliche Zwecke verschiedene Codeformen durchgesetzt. Für Übertragungs- und Rechenvorgänge am günstigsten erscheint ein rein dualer Code, wie er in Rechnern hauptsächlich genutzt wird, weil dann die Zahl der bei vorgegebener Auflösung zu sendenden Bits minimiert werden kann. Hier hat jedes Bit einen von seiner Stellung abhängigen festen Wert. Zählt man die Bits eines Dualwortes von der niedrigsten Stelle aus, so ist der Wert des n-ten Bits, falls es gesetzt wurde, 2^{n-1} . Der Dualcode hat jedoch den Nachteil, daß die für eine Anzeige oder Ausgabe des Meßwerts erforderliche Codewandlung von der binären in die dezimale Zahlenform mit einem gewissen technischen Aufwand verbunden ist. Zwar bereitet eine Umcodierung per Rechnerprogramm kaum Schwierigkeiten, doch stehen solche Hilfsmittel nicht immer dort zur Verfügung, wo eine Codewandlung notwendig ist. Vor allem in Gebern, die keinen Mikrorechner enthalten, wurden daher häufig Codeformen bevorzugt, bei denen nur die Dezimalziffern des Meßwertes binär codiert werden (sog. BCD-Codes). Die an Codescheiben abgegriffenen Digitalwerte liegen häufig in einschrittigen Codeformen vor, bei denen sich beim Übergang von einem Abtastwert zum nächsten stets nur der Signalwert eines Bits ändert. Neben dem dual orientierten GRAY-Code, der sich leicht in den reinen Dualcode umsetzen läßt, existieren einige andere einschrittige Codes, aus denen sich mit geringem Aufwand ein BCD-Code für eine dezimale Zahlendarstellung gewinnen läßt. In Abb. 25 sind aus der großen Zahl nutzbarer Codeformen nur einige gebräuchliche dargestellt. Auf Fragen der Codierung und die wichtigsten dabei genutzten Codeformen ist bereits SORGE [1956] eingegangen. OLIVIERI [1966] hat verschiedene Codeformen hinsichtlich ihrer Eignung zur Codierung meteorologischer Informationen untersucht. Im Elektronik-Arbeitsblatt Nr. 69 [1972] sind die Eigenschaften einer größeren Zahl verschiedener Codeformen beschrieben sowie Vor- und Nachteile ihrer Anwendung für unterschiedliche Zwecke hervorgehoben worden.

Bei der Übernahme eines parallel anstehenden Digitalwortes in einen Rechner ergeben sich lediglich Probleme, wenn dessen Wortlänge größer ist als die Wortbreite des Eingabekanals des Rechners. In diesem Falle muß das einzugebende Digitalwort in zwei oder mehr Eingabeworte zerlegt werden, die dann nacheinander

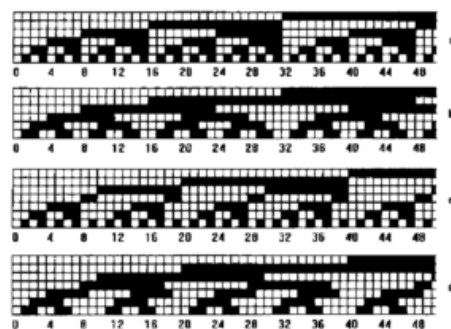


Abb. 25: Codeformen von Digitalsignalen
 a) Dualcode
 b) einschrittiger Dualcode (GRAY-Code)
 c) binärcodierter Dezimalcode BCD-Code)
 d) einschrittiger tetradischer Code

ander vom Rechner einzulesen sind und meist in aufeinanderfolgenden Speicherzellen abgelegt werden. Ist das zu übernehmende Wort kürzer als die Rechnerwortlänge, werden die nicht benutzten Bits mit dem Signalwert 0 aufgefüllt. Für die Übernahme, die meist im Quittungsbetrieb (engl. hand shake) erfolgt, sind mehrere Steuersignale erforderlich. Die wichtigsten sind:

- ein Bereit-Signal, das die Bereitstellung des zu übernehmenden Eingabewortes in der Interfaceeinheit anzeigt,
- ein Abfragesignal, das vom Rechner auszugeben ist und zur Übernahme eines bereitgestellten Wortes in den Eingabeport des Rechners führt,
- eine Fertigmeldung, welche die ordnungsgemäße Übernahme anzeigt und damit die Interfaceschaltung informiert, daß ein neues Eingabewort in den Pufferspeicher eingeschrieben werden darf.

Der Rechner prüft, ob in der Interfaceeinheit das Bereitsignal vorliegt. Erst wenn dies der Fall ist, gibt er das Abfragesignal aus. Das eingelese Wort wird ggf. auf Vollständigkeit geprüft und erst danach die Fertigmeldung an das Interface gegeben. Sie kann nun das Bereitsignal zurücksetzen und ggf. die Bereitstellung eines weiteren Wortes im Puffer veranlassen.

Die Erzeugung der Steuersignale und ihre Signalpegel sind rechner- bzw. interfacespezifisch. Zur Verringerung des Hardwareaufwands sind hochintegrierte Schaltungen als Interfacebausteine entwickelt worden. Teilweise sind sie auf die Architekturen bestimmter Mikroprozessoren abgestimmt. Für die Parallelingabe und -ausgabe in zwei Kanälen von je 8 bit Wortbreite existiert z.B. ein solcher Baustein unter der Kurzbezeichnung PIO (parallel input/output). Adresse und Betriebsart sind dabei programmierbar. Er verfügt über zwei unabhängige Datenports von 8 bit Breite, die für die Ein- und Ausgabe von Bytes oder Bitkombinationen genutzt werden können und mittels des Betriebsarten- und des Wahlregisters ausgewählt werden. Zur Abwicklung des Handshake-Verkehrs dienen die Steuersignale *Ready* und *Strobe*. Mit einem Maskenregister können die Bitsignale festgelegt werden, die zur Auslösung einer Interruptanforderung berechtigt sind. Zur Ein- und Ausgabe seriell anfallender digitaler Signale existieren eine Reihe von Bausteinen mit den Kurzbezeichnungen UART (universal asynchronous receiver/transmitter), USART (universal synchronous/asynchronous receiver/transmitter) und SIO (serial input output), die hinsichtlich einer Reihe von Parametern (wie z.B. Adresse, Länge der zu übertragenden Datenworte, Taktfrequenz und Zahl der Start- und Stoppimpulse) programmierbar sind und damit verschiedensten Zwecken angepaßt werden können. Auch der Schaltkreis SIO verfügt über zwei Kanäle, die beide für Ein- und Ausgabe programmierbar sind. Die Übertragung kann synchron erfolgen, wobei das angeschlossene Gerät die Taktfrequenz vorgibt, oder asynchron, wobei eine Taktfrequenz entsprechend der gewählten Baudrate vorzugeben ist.

Sind mehrere Digitalisignale zu übernehmen, müssen die Signalquellen adressiert werden. Jede Signalquelle vergleicht die übertragene Adresse mit der eigenen. Die Vergleichsschaltung liefert bei Übereinstimmung ein Signal für die Abfrageschaltung, die im Prinzip für jedes Bit nur ein UND- bzw. ein NAND-Gatter erfordert. Die Abfrageschaltung kann damit als Multiplexer für Digitalisignale angesehen werden. Bei den peripheren Bausteinen sind für diese Zwecke die Adressen frei wählbar.

Für Kommunikationsaufgaben innerhalb eines Meßsystems wie dem zwischen Gebern und Stationskern hat die Fa. Vaisala nach

Angaben von INHA [1998] einen Satz von 4 verschiedenen Steckkarten entwickelt, die Schnittstellen für serielle Digitalisignale nach verschiedenen Standards realisieren. Im einzelnen handelt es sich um folgende Moduln:

DSI485 - Modul für RS-485-Schnittstelle im Voll- oder Halbduplexbetrieb; Übertragungsgeschwindigkeit bis zu 38 kbit/s; galvanische Trennung

DSU232 - Modul für 2 RS-232-Kanäle bzw. für Datenaustausch im Handshakebetrieb; ohne galvanische Trennung

DMX501 - Modem für Standleitungen nach den Standards V.21, V.22 oder V.23 bei Übertragungsentfernungen bis 10 km

DCA501 - Feldbusmodul für ein Controlled Area Network (CAN) bei Datenraten bis zu 500 kbit/s mit eigenem Kommunikationsprozessor zur Fehlerkorrektion und Abwicklung der Paketvermittlung; ohne galvanische Trennung.

Mit der Entwicklung dieser Module kann ein weiterer Schritt in Richtung auf offene Systeme realisiert werden; einer Konzeption, die eine Nutzung von Komponenten unterschiedlicher Hersteller innerhalb eines Systems ermöglicht.

3.1.2 Interfaces für frequenzanaloge Signale und Impulsfolgen

Frequenzanaloge Signale können als Wechselspannungen oder -ströme mit veränderlicher Frequenz oder als pulsfrequente Signale auftreten. Im ersten Falle ist es leicht möglich, die Wechselspannung oder den Wechselstrom in einen impulsförmigen Spannungsverlauf zu überführen. Dazu wird das Signal einem Verstärker zugeführt und der Verstärkungsgrad soweit erhöht, daß der Verstärker übersteuert wird. Hierbei entsteht ein trapezförmiger Spannungsverlauf, der sich mittels eines SCHMITT-Triggers in einen rechteckförmigen Spannungsverlauf umformen läßt und dann einer Impulsfolge entspricht. Durch Zählung der Impulse, innerhalb eines konstanten Zählzeitraums erhält man in der Zähl-schaltung einen Digitalwert. Zur Festlegung des konstanten Zählzeitraumes ist ein Zeitgeber erforderlich, falls diese Aufgabe nicht durch einen Rechner wahrgenommen wird.

Liefert ein Geber als Ausgangssignal unmittelbar eine Impulszahl, so ist die Wandlung in ein Digitalsignal noch einfacher. Bei sauber geformten Impulsen genügt ein Zähler, andernfalls ist diesem ein Impulsformer vorzusetzen, der z.B. aus einer monostabilen Kippstufe bestehen kann, deren Schaltzeit im Verhältnis zur Breite der Impulse und der Pulspausen zweckmäßig zu wählen ist.

Die Übertragung impulsförmiger Signale über Leitungen ist wenig stör anfällig, da Pulshöhe und -breite so gewählt werden können, daß die Pulse sich im allgemeinen deutlich von sporadisch auftretenden Störungen unterscheiden. Bei stark gestörten Leitungen sollte die Impulshöhe angehoben und am Ende der Leitung ein Diskriminator vorgesehen werden, der nur auf die pulsförmigen Nutzsignale anspricht. Noch weitere Verbesserungen lassen sich erzielen, wenn Impulssignale zwischen Geber und Interface als nichtnegiertes und negiertes Signal auf zwei getrennten Leitungen übertragen werden. Bei störungsfreier Übertragung müssen beide Leitungen logisch entgegengesetzte Signalpegel führen. Mit einer logischen Äquivalenzschaltung kann man nach Van GORP [1989] gestörte Signale nachweisen.

Auch bei den hier zu erfassenden Signalformen muß bei der Übernahme das in einem Zähler aufsummierte digitale Signal abgefragt werden, wozu eine Abfrageschaltung erforderlich ist.

Zählzeitraum und Impulsfrequenz bestimmen den Digitalisierungsfehler. Um diesen hinreichend klein zu halten, muß der Zählzeitraum ein Vielfaches der Periodendauer betragen. Bei sehr kleinen Pulsfolgefrequenzen kann es günstiger sein, anstelle der Impulszahl innerhalb eines festen Zeitraumes die Dauer der Impulsperiode oder einer vorgegebenen Zahl von Impulsperioden zu bestimmen. Dazu ist eine frequenzstabile, zweckmäßig gewählte Frequenz erforderlich. Die Impulsfrequenz kann ggf. als Kehrwert der Zeitdauer einer Impulsperiode berechnet werden.

Werden frequenzanaloge Signale oder Impulsfolgen vom Geber über die Leitung zu einer Anschlußsteuerung in der Nähe des Rechners übertragen, ist der Aufwand am geringsten, weil dann ein parallel anstehendes digitales Signal vom Rechner direkt übernommen werden kann. WILLIAMS & ERDMAN [1987] koppelten einen Niederschlagsgeber nach dem Wippenprinzip an einen kommerziellen Mikrorechner, indem sie das bei jedem Kippvorgang der Wippe betätigte Reedrelais über eine Zweidrahtleitung mit dem vorhandenen RS-232C-Port des genutzten Mikrocomputers verbanden. Damit wurde im vorliegenden Falle eine kostengünstige und einfache Lösung des Interfaceproblems erreicht.

Zur Vereinfachung der Interfaceschaltung existieren auch hier integrierte Bausteine, die als *Zähler und Zeitgeber* (engl.: counter and timer circuit; Kurzbezeichnung: CTC) bezeichnet werden. Sie enthalten mehrere Zählkanäle, die auch kaskadierbar sind, liefern die für den Datenaustausch mit dem Rechner erforderlichen Adreß- und Steuersignale und sind zur Festlegung ihrer Betriebsart in einem bestimmten Umfang programmierbar. Sie können bei der vorliegenden Anwendung sowohl als Impulszähler als auch zur Erzeugung der Signale zur Festlegung der Zeitspanne, über die die Impulse zu zählen sind, genutzt werden. Über die Entwicklung eines anwenderspezifischen Schaltkreises auf der Basis eines Gate-Arrays, der als Paralleleingabe und -ausgabe sowie als Zähler und Zeitgeber verwendet werden kann, haben SCHMIDT & GNOTH [1989] berichtet.

Wie TAN [1992] gezeigt hat, läßt sich mit einem preisgünstigen Personalcomputer und einem Interface für Impulssignale mit wenig Aufwand ein Eventrecorder aufbauen, mit dem sich z.B. die Impulssignale mehrerer Niederschlagsgeber erfassen und verarbeiten lassen.

3.1.3 Interfaces für amplitudenanaloge Signale

Amplitudenanaloge Signale treten als variable Meßspannungen, Ströme oder Widerstände auf. Ströme können auf einfache Weise in einen Spannungsabfall umgeformt werden, indem man den Strom durch einen konstanten Widerstand fließen läßt. Auch Widerstandswerte lassen sich mit Hilfe von Brückenschaltungen oder durch Anschluß des Widerstands an eine Konstantstromquelle auf Spannungen zurückführen.

Die wichtigsten in Verbindung mit automatischen Meßsystemen einzusetzenden Sensoren für meteorologische Größen liefern nur Meßspannungen im mV-Bereich, schwache Meßströme oder kleine Widerstandsänderungen. Derartige Meßsignale sind stark störanfällig, insbesondere dann, wenn sie über Leitungen einige hundert Meter übertragen werden müssen. Störspannungen treten nicht nur bei automatischen meteorologischen Meßsystemen sondern bei allen Meßanlagen auf, deren Komponenten sich über größere Flächen verteilen. Mit Fragen der *Störspannungsunterdrückung* haben sich u.a. PEINECKE [1968], ECKERT [1975], CONNORS [1981], BÜHN [1983], SCHAEFFER

[1984], PELZ [1984], QUECK [1986] sowie DURCANSKY [1992] befaßt. Für die Unterdrückung solcher Störspannung kommt es auf zweckmäßige Leitungsauswahl und -verlegung, Ermittlung des günstigsten Erdungspunktes und Vermeidung von Schleifenbildungen sowie auf Maßnahmen zur Potentialtrennung an. Bereits bei der Konzipierung der Meßsysteme ist die Störspannungsproblematik in die Überlegungen einzubeziehen. Da sich jedoch eine kapazitive Kopplung zwischen den Signalleitungen und der Erde kaum vermeiden läßt, muß sowohl mit Gleichtakt- als auch Gegentakt-Störspannungen gerechnet werden. Längere Zuleitungen sind zu verdrehen und – falls dies nicht ausreicht – in einer gegenüber dem Boden isolierten Schirmung zu verlegen.

Um amplitudenanaloge Meßsignale in ein Meßwerterfassungssystem eingeben zu können, müssen die Meßsignale digitalisiert werden. Dazu wird meist eine Schaltung genutzt, wie sie Abb. 26

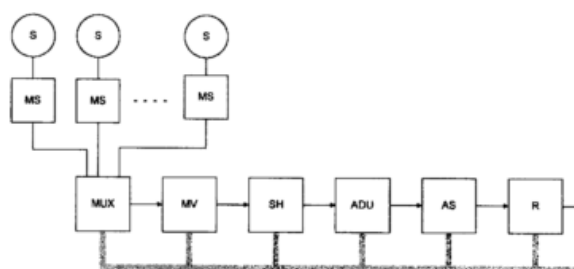


Abb. 26: Interface für amplitudenanaloge Signale
 S: Sensor
 MS: Meßschaltung
 MV: Meßverstärker
 R: Register
 SH: Sample-and-hold-Schaltung
 MUX: Meßstellenschalter
 ADU: Analog/Digital-Wandler
 AS: Abfrageschaltung

zeigt. Das vom Sensor S erzeugte Meßsignal wird in einer Meßschaltung zunächst in ein vereinheitlichtes Signal, z.B. eine Spannung, umgeformt. Um den Aufwand für die *Analog/Digital-Umsetzung* in Grenzen halten zu können, werden die vereinheitlichten Meßsignale über einen Meßstellenschalter MUX geführt, der auch als Multiplexer bezeichnet wird. Ein nachgeschalteter Meßverstärker MV hebt die Spannung auf einen einheitlichen Spannungspegel an und verringert ggf. den Innenwiderstand der Spannungsquelle. Da die A/D-Wandlung eine gewisse Zeit erfordert, muß die umzusetzende Meßgröße während dieser Zeit konstant gehalten werden, falls nicht ein integrierender ADU zum Einsatz kommt. Für diese Zwecke dient die Sample-and-hold-Schaltung SH. Nach Abschluß der Umsetzung wird der Digitalwert aus dem ADU mittels einer Abfrageschaltung AS in ein Register R übernommen. Die in Abb. 26 dargestellte Kette von Umformern und Umsetzern kann in Geber- oder in Rechnernähe installiert werden. Im ersten Falle kann das Interface als ein Geberkoppelmodul im zweiten Fall als Anschlußsteuerung angesprochen werden. Bei Anordnung in Gebernähe ist eine Parallel/Serien-Wandlung zweckmäßig, weil sich dann das Meßsignal auf einer Zweidrahtleitung übertragen läßt.

Der *Meßstellenschalter* kann aus einer Ansteuerelektronik und einem Satz Relais mit mehreren Arbeitskontakten bestehen, die geringe Kontaktwiderstände bei hohen Isolationswiderständen besitzen. Sie lassen jedoch nur eine begrenzte Schaltgeschwindigkeit zu. Bei großer Meßstellenzahl müssen die Relais nach PEINECKE [1968] gruppenweise zusammengefaßt und die einzelnen Gruppen zusätzlich umgeschaltet werden, um die Schalt-

kapazitäten der Relais genügend klein halten zu können. In letzter Zeit versucht man zunehmend, die Relais durch Feldeffekt-Transistoren zu ersetzen, die jedoch ein deutlich ungünstigeres Verhältnis zwischen Kontakt- und Isolationswiderstand aufweisen, aber wesentlich schneller als Relais arbeiten.

Übliche Analog/Digital-Umsetzer besitzen Umsetzungsbereiche von 1...10 V. Um den gesamten Bereich ausnutzen zu können, ist eine Spannungsanpassung erforderlich. Diesem Zweck dient ein *Meßverstärker*, dessen Verstärkung programmierbar sein muß. An derartige Meßverstärker werden hohe Anforderungen hinsichtlich minimaler Drift, geringem Rauschen sowie der Linearität und Konstanz der Verstärkung auch bei veränderlichen Umgebungstemperaturen gestellt. Ferner sollen sie Gleichtaktstörspannungen weitgehend unterdrücken und Gegentakt-Störwechselspannungen unwirksam machen. Häufig werden für diese Zwecke sog. *Instrumentierungsverstärker* eingesetzt, deren Prinzipschaltung in Abb. 27 gezeigt wird. Die dargestellte Schaltung enthält drei Operationsverstärker, von denen OP3 als Differenzverstärker beschaltet ist. Ihm sind zwei nicht invertierende Operationsverstärker OP1 und OP2 vorgeschaltet. Sie gewährleisten einen hohen Eingangswiderstand und verstärken die Eingangssignale einschließlich ihrer Gleichtaktanteile. Der Differenzverstärker addiert die gegensinnigen Signale und beseitigt durch die Differenzbildung die nahezu übereinstimmenden Gleichtaktspannungen. Eigenschaften von Instrumentierungsverstärkern und ihre Applikation wurden von JENKINS & BOWERS [1983] sowie von SICHLA [1989] behandelt. Die Verfasser gaben ferner Hinweise zur Beschaltung und Applikation dieser Verstärker.

Die *Sample-and-hold-Schaltung* arbeitet in zwei Arbeitsregimen, die durch ein Steuersignal gewählt werden. Im Samplestatus folgt sie der am Eingang angelegten Spannung; im Holdstatus wird die im Umschaltmoment anliegende Spannung gehalten und erscheint am Ausgang unverändert auch dann, wenn sich die Eingangsspannung ändert. Der Holdstatus wird während der Analog/ Digital-Umsetzung gewählt und sorgt somit dafür, das sich während des Umsetzvorgangs die Eingangsspannung am ADU nicht ändert.

Der *Analog/Digital-Umsetzer* wandelt das an seinem Eingang anliegende analoge Signal in ein digitales um. In der Anfangszeit wurden vielfach noch Digitalvoltmeter für diese Zwecke eingesetzt oder der Umweg über die Umformung des elektrischen Meßsignals in eine mechanische Größe gewählt und Winkelcodierer zur A/D-Umsetzung verwendet. Heute werden fast ausschließlich integrierte Analog/Digital-Umsetzer genutzt. Die Umsetzung kann dabei nach verschiedenen Wandlerprinzipien erfolgen, von denen für die hier interessierenden Anwendungsfälle

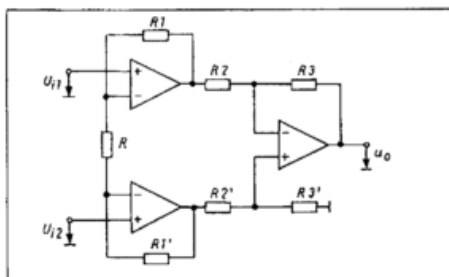


Abb. 27: Prinzipschaltbild des Instrumentierungsverstärkers (aus: SICHLA [1989])

- * Stufenverschlüßler
- * Sägezahnverschlüßler
- * integrierende Verschlüßler und
- * Parallelverschlüßler

die wichtigsten sind. Die verschiedenen genannten Prinzipien weisen unterschiedliche Eigenschaften auf. Zu den wichtigsten gehören die Umsetzzeit, der Eingangswiderstand, die Auflösung und die Linearität (vgl. auch FRITSCHEN [1970] sowie VARCHMIN [1990a]). Kurze Umsetzzeit sowie hohe Auflösung und Linearität sind Forderungen, die nur mit hohem Aufwand zu realisieren sind.

Die Arbeitsweise des *Stufenverschlüßlers* ist mit der einer Balkenwaage vergleichbar, bei der durch Auflegen oder Entfernen von Wägestücken auf der einen Seite stufenweise die Masse des zu wiegenden Körpers approximiert wird. An die Stelle der Wägestücke treten hier definierte Teilspannungen, die sich zu einer Vergleichsspannung summieren. Mit dieser Vergleichsspannung wird die Meßspannung schrittweise verglichen und in Abhängigkeit vom Ergebnis die Vergleichsspannung nach Abb. 28 schrittweise erhöht oder verringert. Auf diese Weise wird die Vergleichsspannung der zu messenden Spannung sukzessive approximiert. Dieser Vorgang beginnt bei der größten Teilspannung, die dem höchstwertigen Bit entspricht und setzt sich bis zur kleinsten Teilspannung fort, die zum niederwertigsten Bit gehört. Die Spannungsänderungen können im einfachsten Fall dual gestuft sein. In diesem Fall liefert der Stufenverschlüßler ein dual codiertes Digitalsignal. Es sind aber auch andere Codierungen (wie z.B. der BCD-Code) möglich. Stufenverschlüßler besitzen eine gute Linearität und lassen sich mit hoher Auflösung herstellen. Für meteorologische Anwendungen sind jedoch meist 10...12 bit (entsprechend 0,10...0,025 % vom Meßbereich) ausreichend; nur Meßsignale, die in weiten Bereichen schwanken können, erfordern 16 bit. Die Umsetzzeit richtet sich nach der Auflösung und ist durch die sequentielle Arbeitsweise beim Abgleichsvorgang begrenzt.

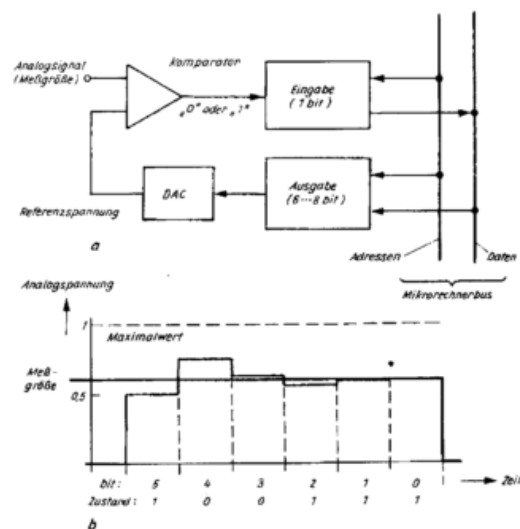


Abb. 28: Arbeitsweise eines Stufenverschlüßlers

- a) Prinzipschaltung unter Nutzung eines Einchip-Mikrorechners
- b) Vorgang der sukzessiven Approximation der Vergleichsspannung

Der *Sägezahnverschlüßler* erzeugt als Vergleichssignal einen sägezahn- oder dreieckförmigen Spannungsverlauf. Während des linearen Anstiegs (oder Abfalls) wird die Vergleichsspannung mit der Meßspannung verglichen. Zu Beginn wird beim Passieren einer festen Spannung ein Tor geschaltet, das die Impulse eines mit konstanter Frequenz arbeitenden Impulsgenerators passieren läßt. Sobald die Sägezahnspannung die Meßspannung erreicht, wird das Tor wieder geschlossen. Die von der Torschaltung durchgelassene Impulszahl wird durch Zählung bestimmt. Um die Auflösung des Sägezahnverschlüßlers zu erhöhen sind verschiedene Varianten dieses Prinzips im Gebrauch. Beim *Single-slope-Verfahren* wird die Meßspannung einem Integrator zugeführt, der die Rampenspannung erzeugt. Sie wird mit einer festen Referenzspannung in einem Komparator verglichen. Bei Gleichheit beider Spannungen wird der Integrationskondensator wieder entladen, so daß der Vorgang von vorn beginnen kann. Die Anstiegszeit wird durch Zählung der Impulse eines schnellen Taktgenerators mit konstanter Pulsfrequenz gemessen und liefert ein Maß für die Meßspannung. Das *Single-slope-Verfahren* hat ohne zusätzliche Schaltungsfunktionen den wesentlichen Nachteil, daß Kapazitätsänderungen des Integrationskondensators die Umsetzgenauigkeit begrenzen. Dieser Nachteil wird beim *Dual-slope-Verfahren* umgangen. Bei diesem wird die Meßspannung über eine bestimmte Zeitdauer integriert. Die dabei im Integrationskondensator gespeicherte Ladung wird anschließend mit konstantem Strom entladen. Die Entladezeit ist ein Maß für die Meßspannung und wird ebenfalls durch Auszählung der während der Entladungszeit anfallenden Taktimpulse gemessen. Kapazitätsänderungen wirken sich nicht aus, solange sie nicht während der kurzen Umsetzzeit eintreten. Die Linearität des *Dual-slope-Umsetzers* wird jedoch durch parasitäre Kapazitäten begrenzt. Durch Umschaltung der Steigung des Integrators während der Auf- oder Entladung des Kondensators läßt sich die Auflösung dieses A/D-Umsetzers steigern. Der *Sägezahnverschlüßler* arbeitet schneller als der *Stufenverschlüßler*, erreicht jedoch nicht dessen Linearität.

WILLIAMS [1980] hat einen *Single-slope-Umsetzer* mit 20 bit Auflösung und einer Umsetzzeit von 300 ms beschrieben. Die Nachteile des genutzten Prinzips wurden durch Einsatz eines Mikroprozessors umgangen, der den Umsetzvorgang steuerte. Nacheinander wurden der Integratoreingang kurzgeschlossen bzw. die volle Referenzspannung oder die Meßspannung an dessen Eingang gelegt. Die sich in diesen drei Fällen ergebenden Anstiegszeiten wurden mit Hilfe einer Taktfrequenz ausgezählt. Die Meßspannung U_m wurde aus den drei Zählwerten n_o bei der Eingangsspannung null, n_r bei angelegter Referenzspannung und n_m bei angelegter Meßspannung nach der Beziehung

$$U_m = K \frac{n_m - n_o}{n_r - n_o} \quad (40)$$

berechnet, wobei K eine Konstante bezeichnet. Das Verfahren garantiert eine weitgehende Ausschaltung der Auswirkungen von Drifterscheinungen und von parasitären Kapazitäten. MASLOSZ & THIEME [1986] haben gezeigt, wie ein nach dem Prinzip der *Dual-Slope-Integration* arbeitender monolithisch integrierter A/D-Umsetzer mit relativ geringem Aufwand über einen Interface-Baustein vom Typ PIO mit einem 8-bit-Mikrorechner gekoppelt werden kann.

Beim *integrierenden Verschlüßler* wird das umzusetzende Analogsignal über eine konstante Zeitspanne einem Spannungs/Fre-

quenz-Umsetzer oder einem Integrator zugeführt. Im ersten Fall wird die Zahl der Schwingungen bzw. Impulse gezählt; im zweiten Fall wird der Integrator mit konstantem Strom entladen und die dazu erforderliche Zeitspanne durch Auszählen der Schwingungen einer Festfrequenz bestimmt. Dieser Umsetzer braucht keine *Sample-and-hold-Schaltung*, da er ein Umsetzungsergebnis liefert, das dem Mittelwert der Meßspannung während des Umsetzzeitraums entspricht. Für die Genauigkeit der Umsetzung sind die Linearität und Konstanz des Spannungs/Frequenz-Umsetzers bzw. des Integrators ausschlaggebend. Durch Wahl einer Umsetzzeit in der Größe einer Wechselstromperiode (20 ms bei 50 Hz) oder eines Mehrfachen dieser Zeitspanne können überlagerte Störwechselfspannungen, die aus dem Netz herrühren, nach PEINECKE [1968] und ECKERT [1975] weitgehend ausgemerzt werden. Die Anwendung dieses Umsetzprinzips empfiehlt sich insbesondere bei kleinen Sensorsignalen, wenn die Dauer der Umsetzzeit von sekundärer Bedeutung ist. Nach diesem Prinzip lassen sich Umsetzer mit hoher Auflösung (bis zu 16 bit) bauen. UHLIG [1977] sowie SUPPI & NORMEY [1988] haben automatisierte meteorologische Meßsysteme beschrieben, bei denen die Meßsignale in frequenzanaloge Signale bzw. Impulsfolgen umgewandelt werden und diese durch Zählung über Zeitintervalle unterschiedlicher Länge in Digitalsignale umgesetzt und erfaßt werden. RIPLEY et al. [1973] nutzten ein ähnliches Verfahren bei der Erfassung von vertikalen CO₂-Profilen mit Hilfe von IR-Gasanalysatoren.

Der *Parallelverschlüßler* wird wegen des mit seiner Realisierung verbundenen hohen Schaltungsaufwands nur dann eingesetzt, wenn es auf kürzeste Umsetzzeiten ankommt. Hier erfolgt der Vergleich zwischen Meß- und Vergleichsspannung jedoch nicht sukzessive wie beim *Stufenverschlüßler* sondern parallel in einem Schritt. Die Vergleichsspannung wird an einer Reihenschaltung von $m = 2^n$ Widerständen abgegriffen, wobei n die Bitzahl des Umsetzers bezeichnet. Die Differenz zwischen Meßspannung und der an jeder Verbindungsstelle zwischen den Widerständen abgegriffenen Teilspannung wird jeweils einem zugeordneten Komparator zugeführt. Die Ausgangsspannungen aller Komparatoren liefern das digitale Signal im $\binom{m}{1}$ -Code. Durch einen Codewandler wird es in einen geeigneteren Code, meist in den Dualcode, überführt. *Parallelverschlüßler* besitzen oft nur die unbedingt erforderliche Bitzahl von 6 oder 8 bit. Es sind jedoch Umsetzzeiten bis zu wenigen Nanosekunden erreichbar. Derart kurze Umsetzzeiten sind z.B. bei der Digitalisierung der Echosignale von Radar- und Lidar-Fernmeßsystemen erforderlich. Bei den kurzen Abtastzeiten, die bei *Parallel-ADUs* möglich sind, können die Meßwerte meist nicht mehr unter Rechnersteuerung abgefragt werden. Es ist vielmehr ein *Schnellspeicher* mit autarker Steuerung erforderlich, dessen Inhalt zur Weiterverarbeitung nach jedem Meßzyklus ggf. in den Rechner übernommen werden muß.

Wird ein schneller ADU mit höherer Auflösung gebraucht, werden häufig *Parallelumsetzer* mit beschränkter Bitzahl kaskadiert. ZIMMER [1979] beschrieb einen schnellen *Kaskaden-ADU* mit 15 bit Wortlänge, bei dem zwei Unterwandler nach dem *GRAY-code-Faltungsverfahren* von je 8 bit Wortlänge kaskadiert wurden. Gearbeitet wurde mit 1-bit-Überlappung, wodurch sich relativ große LSB-Fehler des ersten Unterwandlers korrigieren ließen. Mit diesem ADU konnten Umsetzzeiten von 2 µs erreicht werden.

Analog/Digital-Wandler der beschriebenen Prinzipien sind heute wie auch die meisten der anderen genannten Funktionsgruppen

als integrierte Schaltungen kommerziell erhältlich. Dabei werden die Umsetzer mit geringerer Auflösung monolithisch integriert, die mit höherer Umsetzgenauigkeit als Hybridschaltungen gefertigt. Einen Überblick hierzu hat u.a. MATTERA bereits 1975 gegeben. SCHEUSCHNER [1982] zeigte, wie ein monolithischer ADU, der das digitale Signal als dreistellige Dezimalzahl im BCD-Code bereitstellt, über einen PIO-Schaltkreis mit der CPU eines Mikrorechners gekoppelt werden kann. Wie SMITH et al. [1978] demonstriert haben, läßt sich ein ADU auch über ein Standardinterface, wie es die Schnittstelle RS-232 darstellt, mit einem Mikrorechner koppeln.

Abfrageschaltung und Register unterscheiden sich nicht von den bereits im Zusammenhang mit den Interfaceschaltungen für digitale Signale beschriebenen Funktionsgruppen.

In Digitalvoltmetern sind auch verschiedene Umsetzprinzipien zum Einsatz gekommen. KAHLER & KOEMAN [1978] beschrieben das Digitalvoltmeter Fluke 8205A, das wahlweise für geringe Umsetzgeschwindigkeiten nach dem Dual-slope-Prinzip oder für höhere Umsetzraten nach dem Prinzip der sukzessiven Approximation einsetzbar war. Im ersten Fall bestand die Möglichkeit, die Integrationszeit gleich der Netzperiode oder gleich einem Mehrfachen dieses Wertes zu wählen, um Störungen aus dem Netz weitgehend zu unterdrücken. Bei der sukzessiven Approximation konnte die Umsetzrate gleich der Netzfrequenz oder dem 6-, 32- bzw. 128-fachen dieses Wertes gewählt werden. Durch Mittelwertbildung (Averaging) war eine digitale Filterung möglich, die sich bei tiefen Frequenzen durch eine analoge Tiefpaßfilterung mit unterschiedlichen Werten der Zeitkonstante ergänzen ließ. Das Digitalvoltmeter war darüber hinaus mit einem Mikroprozessor ausgerüstet, mit dem sich weitere Fehlerquellen wie parasitäre Thermospannungen, Offsetspannungen und durch die Stromversorgung bedingte Drifterscheinungen weitgehend ausschalten ließen. Die Genauigkeit konnte durch Eingabe neuer exakter Werte für Eichfaktoren in den Speicher des Mikrorechners gesteigert werden. Das Digitalvoltmeter wurde mit unterschiedlichen Interfaces zur Anpassung an einen Rechner geliefert.

Als Meßwerterfassungssysteme bezeichnet man digital adressierbare Analog/Digital-Wandler mit einem Meßstellenumschalter für mehrere Kanäle. Während solche Systeme zu Beginn der 70er Jahre noch einen Umfang besaßen, der einen eigenen Einschub erforderte, konnten sie mit fortschreitender Miniaturisierung zunächst auf einer Leiterkarte, später als Hybridschaltung in einem Gehäuse oder als Satz von weniger DIP-Schaltkreisen realisiert werden. Kompakte Datenverarbeitungssysteme mit 12 bit Datenbreite und 8 bzw. 16 Kanälen in einem Gehäuse sind u.a. von MARSHALL [1978] und als Satz hochintegrierter Schaltkreise von MUNN [1978] beschrieben worden.

3.1.4 Interfaces für auszugebende Signale

Obwohl Sensoren die Aufgabe haben, Informationen zu liefern, müssen an viele Geber auch Signale ausgegeben werden. Dabei handelt es sich um

- Adressen
- Steuerbefehle und
- Parameter.

Eine Adressierung des Gebers ist immer dann notwendig, wenn an ein Meßsystem mehrere Geber angeschlossen sind. Können Geber mehrere Informationen bereitstellen, sind neben der Gebe-

radresse zusätzliche Subadressen auszugeben.

Steuerbefehle werden gebraucht, um im Geber oder im Interface Steuervorgänge auszulösen, die für die Erfassung eines Meßwertes, für dessen ordnungsgemäße Übertragung zur übergeordneten Einheit oder eine störungsfreie Funktion des Gebers erforderlich sind. Bei der Gebersteuerung kann es sich sowohl um Schalt- als auch um Einstellvorgänge handeln. Schaltvorgänge werden gebraucht zum

- Ein- und Ausschalten des Gebers (insbesondere bei Gebern mit hoher Leistungsaufnahme, die nur zu bestimmten Zeitpunkten Informationen bereitstellen müssen),
- Ein- und Ausschalten von Hilfsfunktionen während des Meßvorgangs wie Aspiratoren, Lichtquellen sowie Heiz- und Kühleinrichtungen,
- Ein- und Ausschaltung von Baugruppen in Ablaufsteuerungen, wie das speziell bei Meßgeräten zur Gasanalyse häufig der Fall ist, wo zum Ansaugen des Analysenluftstromes und von Reagenzlösungen Pumpen bzw. Ventile zu steuern sind.

Schaltvorgänge lassen sich stets mit Binärsignalen steuern. Komplexere Vorgänge, die analoge Signale zur Steuerung brauchen, sind in Gebern nur selten erforderlich und sollten bei der Entwicklung der Geber möglichst vermieden werden. Ist dies nicht möglich, sollte man die Steuerinformationen entweder als Digitalsignale oder als pulslängenmodulierte Signale ausgeben. Im erstgenannten Fall müssen die Steuersignale im Geber mittels eines DAU in ein amplitudenanaloges Spannungssignal gewandelt werden. Im zweiten Fall bildet die Pulslänge den Informationsparameter. Signale dieser Art lassen sich z.B. für einen Einstellvorgang mit Motorsteuerung nutzen.

Steuerbefehle für das Interface werden in Verbindung mit Statussignalen zur Abfrage von Informationen im Quittungsbetrieb gebraucht und steuern dabei das für eine vollständige und fehlerfreie Übertragung erforderliche Signalspiel.

Die Ausgabe von Parameterwerten wird insbesondere bei intelligenten Gebern erforderlich, die die Meßsignale intern aufbereiten und vorverarbeiten. Dabei kann es sich beispielsweise um die Ausgabe von Eichkonstanten oder Umrechnungskoeffizienten handeln, die zur Umrechnung der in technischen Einheiten erfaßten Werte in physikalische Einheiten erforderlich sind. Aber auch bei Verdichtungsvorgängen und Verknüpfungen kann es notwendig sein, die Operation durch Eingabe von Variablen zu spezifizieren.

In den vorangehenden Abschnitten war bereits darauf hingewiesen worden, daß eine Reihe peripherer Bausteine (wie PIO und SIO) sowohl für Eingabe- als auch für Ausgabevorgänge programmierbar ist. Mit Hilfe solcher Schaltkreise lassen sich daher auch Ausgabevorgänge mit relativ geringem Aufwand an Hard- und Software bewerkstelligen. Auch hier ist es üblich, auszugebende Binärsignale in einem Ausgabewort zu stapeln.

3.2 Interfaces für Bedien- und Speicherperipherie

Für alle Ein- und Ausgabevorgänge werden geeignete Geräte, wie *Tastaturen, Displays, Drucker und Plotter* gebraucht, die über Interfaceschaltungen mit dem Rechner zu verbinden sind, der den Ausgabevorgang steuert. An Non-realtime-Stationen werden die Meldungen vor Ort auf *externen Speichern* gesammelt, die vielfach zugleich als Transportmedium dienen. Real-

time-Stationen übertragen ihre Meldungen in Echtzeit oder unter echtzeitnahen Bedingungen über *drahtgebundene oder drahtlose Nachrichtenkanäle*, wobei die Informationsflüsse mittels Modems an die Besonderheiten des Nachrichtenkanals angepaßt werden müssen. Wie bereits gesagt, muß bei den zu überbrückenden Entfernungen zur Meldungsübertragung auf kommerzielle Nachrichtenkanäle zurückgegriffen werden. Externspeicher und Nachrichtenmodems sind hingegen über Interfaceschaltungen direkt mit dem ausgebenden Rechner zu verbinden.

Die Mehrzahl der genannten Ausgabegeräte gehören heute als Peripherie zu jedem handelsüblichen Personalcomputer. In solchen Fällen enthalten die PCs, die in ihrer Architektur einem Quasistandard entsprechen, in der Regel die erforderlichen Ports und Interfaceschaltungen zum Anschluß der Geräte. Falls es sich um ein Gerät handelt, das nicht zum normalen Lieferumfang gehört, werden die Rechnerhersteller in den meisten Fällen in der Lage sein, das erforderliche Interface bereitzustellen und in den Rechner einzubauen.

Bei Mikrorechnern in Form von Steckkartensystemen (sog. OEM-Bausätzen) gehören Anschlußsteuerungen für die verschiedensten peripheren Geräte als Steckkarten zum Lieferumfang. Sie stellen die Interfaceeinheiten für diese Geräte dar. Diese Steckkarten können zusammen mit den anderen Baueinheiten des Mikrorechners an einem Steckplatz des Rahmens mit dem Rechnerbus verbunden werden. Häufig ist zusätzlich zur Hardware die für das Ansprechen der betreffenden Geräte erforderliche Software in Form von Treiberrouitinen käuflich.

Auch für Externspeicher und Modems zur Nachrichtenübertragung sind die erforderlichen Interfaceschaltungen oft kommerziell erhältlich. Eine Eigenentwicklung des Interfaces ist nur noch in Ausnahmefällen notwendig. Oft wird es dann genügen, eine Anpassung an einen vorhandenen genormten Rechnerport vorzunehmen.

Im Normalfall werden die genannten Geräte an den Stationsrechner anzuschließen sein. Manche Geräte mit höherer Arbeitsgeschwindigkeit erfordern jedoch über den Ausgabzeitraum einen ständigen Verkehr mit dem steuernden Rechner. Das kann unter ungünstigen Bedingungen zu einer Störung des Echtzeitbetriebs führen. In solchen Fällen empfiehlt es sich, das Ausgabegerät oder die -geräte nach dem Prinzip der verteilten Intelligenz über einen Slaverchner zu steuern, der mit dem als Master fungierenden Stationsrechner gekoppelt werden muß. Über diese Kopplung ist ein schneller Austausch ganzer Datensätze in hinreichend kurzer Zeit möglich, so daß der Echtzeitbetrieb hierdurch kaum beeinträchtigt werden kann. Beispielsweise werden bei den neueren automatischen Stationen vom Typ MIDAS 410 der Firma Vaisala, Helsinki nach JÄÄSKELÄINEN [1981] die Ebenen der Datenerfassung, der Verarbeitung und der Kommunikation streng getrennt und die Aufgabengruppen zugeordneten Mikrorechnern übertragen.

4 Nutzerinterfaces

Automatische meteorologische Meßsysteme haben die Aufgabe, Informationen an den Installationsorten zu erfassen und aufzubereiten. Dagegen findet eine Auswertung an diesen dezentralisierten Stellen in den meisten Fällen nicht statt. Für diese Zwecke sind die aufbereiteten meteorologischen Daten in Form von Datensätzen bzw. Meldungen an den Meßorten zu sammeln bzw. über Nachrichtenkanäle an die Zentralstellen weiterzuleiten. Bei

modernen automatischen Systemen zeichnet sich eine Tendenz ab, die Ausgabeschchnittstelle so zu gestalten, daß die Meldungen wahlweise über unterschiedliche Nachrichtenkanäle übertragbar oder auf bestimmten Datenträgern am Stationsort speicherbar sind. Erste Ansätze in dieser Richtung waren bereits beim amerikanischen RAMOS-System zu erkennen (vgl. FOSTER [1975]).

Um eine weitgehend lückenlose Bereitstellung der meteorologischen Daten zu gewährleisten, sollen die Meßsysteme zusätzlich Informationen über ihre Arbeitsweise liefern. Zur Erleichterung der Arbeit des Wartungspersonals sind erkannte Fehler und Störungen zu protokollieren.

Eingabefunktionen werden für die manuelle Eingabe beobachteter Daten, aber auch für Bedienfunktionen gebraucht. Ausgabe- und Druckfunktionen an der Station dienen in erster Linie Kontrollzwecken. Darüber hinaus soll das Wartungspersonal und – soweit vorhanden – das Stationspersonal die Möglichkeit besitzen, über die Bedienperipherie mit dem System zu korrespondieren und Informationen auszutauschen. Diese Eingriffe sind speziell für Prüfungsvorgänge und Störungssuche von Bedeutung.

4.1 Ein- und Ausgabegeräte

Ein- und Ausgabegeräte gehören nach der "Guidance Specification for General Purpose Automatic Weather Stations" [1997] zu den allgemeinen Erfordernissen automatischer Stationen. Sofern sie nicht im Routinebetrieb gebraucht werden, sollten sie sich bei Inspektionen zumindest vorübergehend anschließen lassen. Handeingaben, die Auswirkungen auf die Betriebsweise des Systems haben und nur von autorisierten Personen vorgenommen werden dürfen, sollten erst nach Eingabe eines Passworts möglich sein.

Eingabegeräte dienen dem Bedien- und Servicepersonal zur manuellen Eingabe von Informationen. Am häufigsten und vielseitigsten verwendbar sind hierbei *alphanumerische Tastaturen*, mit denen sich sowohl beliebige Texte als auch Zahlen eingeben lassen. Tastaturen für Rechner verfügen meist über mehrere zusätzliche Tasten mit Steuerfunktionen. Die Tastatur soll aus ergonomischen Gründen nach Möglichkeit beweglich und so positioniert sein, daß die Handballen davor bequem aufgelegt werden können. Bei Auswahlfunktionen spielt in zunehmendem Maße die *Computermaus* eine Rolle, mit der viele Bedienfunktionen – insbesondere Menüs – vereinfacht und sicherer gestaltet werden können. Durch Bewegen der Maus auf einer Unterlage läßt sich ein Cursor auf der Bildschirmfläche verschieben und positionieren. Darüber hinaus verfügt jede Maus über zwei oder drei Tasten, mit denen sich Symbole oder Texte auf der Bildschirmfläche anklicken lassen, um bestimmte Programmfunktionen zu eröffnen. Bei jeder Betätigung einer Maustaste werden Muskeln und Sehnen der Hand beansprucht. Auch bei diesem Eingabegerät ist auf ergonomische Gestaltung zu achten. Die für Tastenbetätigungen aufzubringenden Kräfte müssen sich in Grenzen halten. Neben elektromechanisch arbeitenden Mäusen mit Rollkugel und Potentiometern sind heute auch nach optischen Prinzipien arbeitende Mäuse verfügbar, die ohne bewegliche Teile auskommen. Bei Funkmäusen kann die lästige Leitungsverbindung zum Rechner entfallen.

Andere Eingabeformen wie die direkte Spracheingabe haben bis heute in der Praxis automatischer Meßsysteme noch keine Anwendungen gefunden.

Ausgabegeräte haben die Aufgabe, Informationen entweder in alphanumerischer oder in graphischer Form darzustellen. Bei der

Mehrzahl der automatischen Stationen genügt es, Meßwerte und Statusinformationen als Zahlen mit Kurztexten zur Ergänzung auszugeben. Bei einigen Spezialstationen – insbesondere denen, die im Bereich der Forschung eingesetzt werden, und solchen, die in erster Linie das Personal zu unterstützen haben – ist es günstig, wenn sich Meßergebnisse auch in bildlicher Form sichtbar machen lassen.

Für Ausgaben am Stationsort können zweckmäßig die Geräte der Bedienperipherie wie Bildschirmgerät, Drucker und erforderlichenfalls Plotter herangezogen werden, die entweder zum Lieferumfang üblicher Rechner gehören oder sich ohne hohen Aufwand nachrüsten lassen.

Häufig werden bei rechnergeführten Systemen Tastatur und Bildschirm, manchmal auch die Computermaus in einer Geräteeinheit zusammengefaßt, die als *Terminal* bezeichnet wird. HOVBERG [1984] beschrieb die Funktion des durch Mikroprozessor gesteuerten Terminals ManDAT, das neben einer numerischen Tastatur eine Anzeigevorrichtung enthielt und in Schweden sowohl an bemannten als auch an automatischen Wetterstationen zum Einsatz kommen sollte. Synoptische Meldungen ließen sich sowohl im SYNOP-Code als auch in Parameterform eingeben. An automatischen Stationen übernahm das Terminal die Daten vom Meßwerterfassungssystem. Der integrierte Mikrorechner steuerte die Anzeigefunktionen, berechnete Taupunkt und reduzierten Luftdruck, prüfte die aktuelle Meldung durch Vergleich mit der vorangehenden und führte erforderlichenfalls die Meldungsformatierung durch. Bis zu 24 synoptische Meldungen und eine Klimameldung konnten im Terminal gespeichert werden. Die Abfrage erfolgt über das Fernsprechnetz von der Zentrale aus.

Bildschirmgeräte (auch Displays oder Monitore genannt) eignen sich zur Ausgabe sofort ablesbarer Informationen und werden daher bei Bedienvorgängen bevorzugt. Die Darstellungen können in textlicher, tabellarischer und bildlicher Form entweder schwarz/weiß oder in Farbe erfolgen und bieten damit die erforderliche Vielfalt, die ein leichtes Erkennen von Besonderheiten ermöglicht. HOFFMAN et al. [1993] haben sich mit Fragen der Anwendung von Farbdisplays bei meteorologischen Anwendungen beschäftigt und auf die Möglichkeiten von Bildüberlagerungen und Animationen unter Berücksichtigung psychologischer und ergonomischer Gesichtspunkte hingewiesen. Beim Einrichten von Farbgraphiken empfahlen sie ein systematisches iteratives Vorgehen unter Einbeziehung der späteren Nutzer.

Handelsübliche Farbdisplays sind heute in der Lage, bei 768 Zeilen 1024 Bildpunkte (Pixels) pro Zeile aufzulösen. Spezialgeräte erreichen noch höhere Auflösungen. Auch eine Darstellung in bewegten Bildern ist in Verbindung mit leistungsfähigen Computern möglich. Nachdem in der Vergangenheit Fernsehgeräte für diese Zwecke genutzt wurden, kommen jetzt in den meisten Fällen Monitore zum Einsatz, die sich von Fernsehgeräten dadurch unterscheiden, daß sie kein Empfangsteil besitzen. Seltener werden die noch etwas kostenaufwendigeren Flachbildschirme verwendet, die nach dem Prinzip der Flüssigkristallanzeige arbeiten. Sie besitzen bei der Bildwiedergabe zwar nicht ganz die Brillanz der Katodenstrahl-Bildschirme, sind aber absolut frei von schädlicher Strahlung. Die Darstellung auf dem Bildschirm soll stabil und flimmerfrei sein. Das erfordert bei einem 17-Zoll-Monitor eine Bildwiederholrate von mindestens 75 Hz, bei größeren Bildschirmen sollte mit deutlich höheren Bildwiederholfrequenzen gearbeitet werden.

CHEN [1990] erläuterte ein auf mehreren Rechnern beruhendes System, das mehrere Parameter in einem Bild dreidimensional zu aufeinanderfolgenden Zeitpunkten darstellt. Dabei waren Perspektive, Beleuchtungsverhältnisse und Farbuordnung zu den Parametern wählbar und geographische Umrißlinien in die Bilder einblendbar. Generierte Darstellungen ließen sich als Videobilder auf Magnetband ausgeben und mittels eines Fernsehgerätes als Animationen reproduzieren. RAASCH & GROSS [1992] beschrieben ein anderes Bildausgabesystem mit der Bezeichnung VISIS. Eine visuelle Anzeige der gemessenen meteorologischen Größen ist bei bestimmten Stationsarten wie z.B. den Flugplatzstationen, von besonderer Bedeutung (vgl. HOUGHTEN [1966]). SPARKS & SUMMER [1984] benutzten in den von ihnen beschriebenen automatischen Stationen das Display, um u.a. den Verlauf von Meßgrößen darzustellen.

Drucker sind dann erforderlich, wenn bestimmte Vorgänge, Ereignisse oder Daten in Textform protokolliert werden müssen. In der Vergangenheit wurden elektrische Schreibmaschinen und vor allem Fernschreiber für solche Zwecke herangezogen. Heute gibt es speziell für den Einsatz in Verbindung mit Rechnern entwickelte Drucker, die nach unterschiedlichsten Prinzipien arbeiten. Die wichtigsten sind wohl Nadel-, Tintenstrahl- und Laserdrucker. Sie besitzen verschiedene Druckgeschwindigkeit und liefern Vorlagen unterschiedlicher Qualität, stellen jedoch auch an ihre Umgebungsbedingungen mehr oder weniger hohe Ansprüche. Neben den reinen Anschaffungskosten der Drucker sind die laufenden Verbrauchskosten für Papier, Farbbandkassetten, Tintenpatronen bzw. Toner sowie in größeren Zeitabständen für die Erneuerung der Druckköpfe und anderer Verschleißteile zu berücksichtigen.

Für einfache Protokollieraufgaben an automatischen Stationen ist wohl der *Nadeldrucker* noch immer geeignet, zumal er zuverlässig arbeitet, an die Umgebungsbedingungen und die Papierqualität die geringsten Anforderungen stellt und die niedrigsten Druckkosten verursacht. Moderne Drucker mit 24 Nadeln sind in der Lage, ein Druckbild zu erzeugen, das die Zusammensetzung der Zeichen aus einzelnen Punkten mit bloßem Auge kaum noch erkennen läßt. Für Nadeldrucker ausreichend ist ein Papier mit glatter Oberfläche, das ein Verschmutzen der Druckermechanik durch Papierabrieb weitgehend verhindert. Obwohl heute selbsttätig arbeitende Papiereinzugsvorrichtungen für bestimmte Druckertypen käuflich sind, empfiehlt sich für fortlaufende Protokollierungen die Verwendung von Endlospapier, weil hierdurch Störungen vermieden werden, die durch die Papiereinzugsvorrichtung des Druckers verursacht werden könnten. Nur wenn druckreife Vorlagen erforderlich sind und die Umgebungsbedingungen dies zulassen, muß auf Laser- oder Tintenstrahl-drucker ausgewichen werden. Der *Laserdrucker* hat sich zur Ausgabe von Texten und Graphiken hoher Qualität durchgesetzt, insbesondere wenn keine Farben, wohl aber Graustufen erforderlich sind. Die übliche Auflösung liegt bei 600 x 600 Punkten/Zoll und erreicht bei Spitzengeräten sogar 1200 x 1200 Punkte/Zoll. Hinsichtlich Druckqualität und Geschwindigkeit übertrifft er alle anderen Druckerarten. Der Anschaffungspreis ist bei Laserdruckern zwar am höchsten, schlägt aber bei einer größeren Zahl von Druckseiten/Monat auf die Betriebskosten weniger durch. Die Betriebskosten liegen zwischen denen der beiden anderen Druckerarten, sofern man sich auf Schwarz-weiß-Druck beschränkt. Der *Tintenstrahl-drucker* ermöglicht den Druck sowohl farbiger als auch schwarz-weißer Bilder oder Texte, wobei eine hohe Bildqualität nur mit Spezialpapier und Druckern höherer Preisklassen

erreicht wird. Die Auflösung erreicht hier maximal 1440 x 720 Punkte/Zoll. Wird jedoch nicht mit Spezialpapier gearbeitet, können sich Kantenausfransungen im Druckbild störend bemerkbar machen. Die relativ hohen Ausgaben für Tintenpatronen und Spezialpapier erhöhen die Betriebskosten des Tintenstrahldruckers.

Bei der Beschaffung von Druckern sollte außerdem auf einen geringen Geräuschpegel während des Druckvorgangs geachtet werden. Bei zu großer Geräuschentwicklung in Arbeitsräumen wäre es erforderlich, das Gerät in einem Nebenraum aufzustellen, wenn häufig gedruckt werden muß.

Zwar sind moderne Nadeldrucker im Prinzip auch zur Ausgabe einfacherer graphischer Darstellungen bei geringeren Ansprüchen an die Wiedergabequalität geeignet. Werden jedoch Diagramme mit einer höheren Qualität verlangt, sind *Plotter* erforderlich. Dies wird z.B. bei automatischen Stationen für den Forschungseinsatz häufig gefordert. *Plotter* eignen sich in erster Linie für Strichzeichnungen. Für mehrfarbige Vorlagen stehen heute *Farbplotter* oder *Farbdrucker* zur Verfügung. Die von JAEGER [1980, 1983] beschriebene mikroklimatologische Station mit Rechnerführung verfügte beispielsweise über einen *Plotter* zur graphischen Darstellung gewonnener Ergebnisse. OLIVER & OLIVER [1973] benutzten ein computergesteuertes Meßsystem zur Erfassung von Winddaten, das die vertikalen Windprofile alle 5 min mit Hilfe eines *Plotters* aufzeichnete. Die Geräte sollten in der Lage sein, Linien und Kurven in unterschiedlichen Farben sauber zu zeichnen.

Plotter und *Drucker* sind bei Verwendung üblicher Interfaces in Rechnernähe aufzustellen. Müssen bildliche Darstellungen über größere Entfernungen übertragen werden, lassen sich für diese Zwecke sog. *Faksimilegeräte* (Kurzbezeichnung: *Fax*) nutzen, bei denen die digitalisierten Bildinformationen über Fernspreitleitungen bei Datenraten unter 30 kHz übermittelt werden. Die Bildqualität der *Faxgeräte* erreicht nicht ganz das Niveau der *Plotter* und *Drucker*, reicht aber in vielen Fällen aus. Für die Bildausgabe vom Rechner an entfernt aufgestellte *Faksimilegeräte* werden heute kommerziell sog. *Faxmodems* angeboten. In den letzten Jahren sind zudem kostengünstige und platzsparende *Multifunktionsgeräte* auf den Markt gekommen, die die Funktionen Kopieren, Scannen und Faxen realisieren. Über ein 14400 Baud-Faxmodem lassen sie sich mit einem Nachrichtennetz verbinden. Meist enthält das Modem einen Sende- und Empfangsspeicher und einen Speicher für Rufnummern. Zur Darstellung von Bildern und Texten besitzen sie einen Tintendrucker, der z.T. auch als *Farbdrucker* genutzt werden kann. Der Scanner kann zur Abtastung von Bild- oder Textvorlagen genutzt werden. Bei den älteren *Faksimilegeräten* mußte die Verbindung vom Sendenden zum Empfangenden noch manuell aufgebaut werden. Wie auch FULLER [1998] ausführte, existieren heute computergestützte Möglichkeiten, entweder den Anwahlvorgang zu automatisieren und ein *Fax* an mehrere Teilnehmer nacheinander zu übertragen oder unterschiedliche *Fax-Nachrichten* durch Wahl verschiedener *Fax-Nummern* durch die Nutzer abfragen zu lassen.

In den heutigen Personalcomputern sind Interfaceschaltungen für Bildschirmgerät und *Drucker* stets vorhanden. Ein Interface für einen *Plotter* läßt sich leicht nachrüsten. *Drucker* und *Plotter* arbeiten relativ langsam. Zwischen zwei Ausgaben bleibt in der Regel genügend Zeit für andere zeitkritische Aktivitäten im Rechner. Wenn z.B. ein *Drucker* das nächste Zeichen (oder die Zeichen der nächsten Zeile) benötigt, löst er ein Interruptsignal aus und unterbricht damit das laufende Programm nur kurzzeitig.

Eine besondere Ausgabeform, die sich in den letzten Jahrzehnten für spezielle Anwendungen, wie z.B. die Datenausgabe über Telefon, durchgesetzt hat, ist die *akustische Ausgabe von Sprache*. Am Rechner ist eine Schaltung erforderlich, welche die als digitale Signale vorliegenden Ziffern-, Buchstaben- und Zeichenfolgen in elektrische Schwingungen umsetzt, die am Empfangsort mit einem elektrisch/akustischen Wandler schließlich in Sprache umgewandelt werden. Für diese Umsetzung stehen heute verschiedene technische Verfahren zur synthetischen Spracherzeugung zur Verfügung, auf die hier nicht näher eingegangen werden soll. Sie lassen sich rein elektronisch ohne Mechaniken und bewegliche Teile realisieren und erzeugen der menschlichen Sprache sehr nahekommende und noch gut verständliche akustische Informationen. Sprachausgabemodule, die sich bestimmten Rechartypen problemlos anpassen lassen, sind heute im Handel erhältlich. Am Empfangsort der Nachricht werden *Telefonhörer* oder *Lautsprecher* als eigentliche Ausgabeorgane verwendet. Auf die Zweckmäßigkeit der Nutzung solcher Ausgabesysteme für bestimmte meteorologische Zwecke haben HAUGEN & ACKLEY [1980] sowie Van GYSEGEM [1985] hingewiesen.

Bei der Auslegung des Nutzerinterfaces für Ein- und Ausgabevorgänge sowie Dialoge haben nach BENSON [1986] menschliche Faktoren einen entscheidenden Einfluß auf die Effektivität. Der Auswahl der Geräte und der Gestaltung der Ein- und Ausgaben muß daher besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden.

4.2 Leitungsgebundene Übertragungssysteme

Drahtgebundene Nachrichtenkanäle zeichnen sich gegenüber Funkverbindungen im allgemeinen durch eine höhere Übertragungssicherheit aus, obwohl auch hier Störbeeinflussungen auftreten, die u.U. die zu übermittelnden Nachrichten verfälschen können (vgl. QUECK [1986]). Sie sind aber nur von ortsfesten Stationen nutzbar. Ein wirtschaftlicher Einsatz erfordert, daß das Nachrichtennetz im Einsatzgebiet hinreichend engmaschig ist, was in dicht besiedelten Gebieten meist zutrifft, nicht aber in entlegenen Gebieten. Für die Fernübertragung meteorologischer Meldungen sind bevorzugt *Telegraphen- und Telefonleitungen* als fest geschaltete *Standverbindungen* oder als *Wählnetze* herangezogen worden. In den letzten Jahren kamen zu diesen Nachrichtenverbindungen noch *Datennetze* hinzu. Bei der Nutzung der genannten Nachrichtenkanäle müssen die gültigen Spezifikationen des jeweiligen Netzbetreibers eingehalten werden. Die *Modems*, über die der Anschluß des Rechners an die Netze erfolgt und die heute teilweise zusätzliche Funktionen wie Prüfung des Datenformats und Datenkompressionen vornehmen, erfordern eine Zulassung durch den Netzbetreiber.

Über die Nutzung von *Fernschreibleitungen* zur Übertragung von Meldungen haben STERNZAT & SIDEL'NIKOV [1960], BOGOMOLOV & PETROV [1963] sowie GERTH & HÖHNE [1965] berichtet und dafür geeignete technische Lösungen vorgeschlagen. Bei den automatischen Stationen vom Typ AFMS-1 kam das erprobte elektronische System nach BAUMGART & HÖHNE [1969] zunächst in Verbindung mit fest geschalteten Standleitungen zum praktischen Einsatz. KRÜGER & WEHNER [1970] entwickelten hierzu eine Datenspeicher- und Abfrageeinrichtung, mit der die Meldungen an der Station gespeichert und von einer Zentrale aus über das Telexnetz abgefragt werden konnten. Für die neue Generation automatischer Stationen vom Typ AFMS-2 wird nach HÖHNE et al. [1986a] eine Anschlußsteuerung als Interface für den Kommunikationsrechner eingesetzt, über die beliebige Telexteilnehmer angewählt und die nach Her-

stellung der Verbindung die Meldung zum Empfänger übermittelt. Auch das von PALIN & RAE [1987] beschriebene DATAFLOW-System zur Fernmessung von Pegelständen an Küstenstationen arbeitete mit Telegrafien-Standleitungen, auf denen die Meßsignale mit 50 Baud übertragen wurden.

Bei der Übertragung digitaler Nachrichten über *Telefonverbindungen* werden die beiden binären Signalpegel durch unterschiedliche Frequenzen dargestellt. Wegen der oberen Grenzfrequenz von 3000 Hz ist gegenüber dem Fernschreibbetrieb eine höhere Telegrafiergeschwindigkeit erreichbar. Nur in der Anfangszeit wurden Telefonleitungen zur Übertragung frequenzanaloger Signale genutzt (siehe HEDBERG [1966]). Über automatische Stationen, die ihre Meldungen über Telefon übertragen, haben DAY et al. [1974], MANDELJC [1977], GUTERMANN [1978], KALEFF [1981], SIERRA & RODRIGUEZ [1981], WENNERBERG [1985], HAMILTON [1986], PALIN & RAE [1987] sowie SIGURDSSON & RASTRICK [1988] berichtet. Die von DAY et al. behandelten MOWOS-Mk2-Stationen übertragen ihre Meldungen nach Aufforderung durch die Zentrale entsprechend der Datel-400-Norm. Die Serialisierung der Daten erfolgte hierbei mittels eines seriellen Sendespeichers. Bei dem von KALEFF beschriebenen israelischen System wurde mit der relativ geringen Übertragungsrate von 2 bit/s gearbeitet, um auf den stark gestörten Telefonleitungen die erforderliche Störsicherheit zu erreichen. Das von MANDELJC dargestellte Projekt sah bereits einen mikroprozessorgesteuerten Kommunikationsmodul als Bestandteil einer intelligenten Meßstation vor. Dagegen wurden in dem von GUTERMANN behandelten schweizer ANETZ die Meldungen alle 10 min über gemietete Telefonleitungen übermittelt. Bei der isländischen automatischen Station erfolgte nach SIGURDSSON & RASTRICK die telefonische Übertragung der SYNOP-Meldungen zur Zentrale nach Übertragungsprotokoll X.28 mit 300 Baud. PALIN & RAE beschrieben ferner das DATARING-System, mit dem Daten von 33 Gezeitenpegeln an Küstenstationen über das Telefonnetz mit Hilfe automatischer Wählvorrichtungen abgefragt wurden. Beim System TENO-QUEST der Firma Telefonbau & Normalzeit, Frankfurt a. M., das als Meßdatensammelsystem für den zivilen Bevölkerungsschutz [1974] konzipiert wurde, erfolgt normalerweise eine Abfrage der Außenstationen durch einen automatischen Rufnummerngeber der Zentrale. Beim Überschreiten vorgegebener Schwellenwerte waren aber auch die Außenstationen in der Lage, die Zentrale anzuwählen. Ein mikrocomputergesteuertes Wahltelefon, das 10 Telefonnummern speichern und die Dauer der Telefonverbindung (Gesprächsdauer) anzeigen kann, wurde in der Zeitschrift *Der Elektroniker* [1978] kurz beschrieben.

Datennetze sind speziell für eine sichere digitale Übertragung von Informationen bei erhöhten Datenraten über größere Entfernungen ausgelegt. Meist handelt es sich um weitflächige Netze (engl.: wide area networks, Kurzbez.: WAN). Hauptanwendungsgebiet ist die Datenübertragung zwischen leistungsfähigen Computern.

In der Vergangenheit haben sich bei den Fernmeldediensten verschiedene Nachrichtennetze herausgebildet, die teils analoge, teils digitale Signale übertragen. Als Beispiele können das Telefon- und Telexnetz, aber auch die Bildübertragung nach dem Faksimileverfahren und die DATEX-Dienste zur Datenübertragung bei begrenzter Bitrate genannt werden, die im Ortsbereich mit den üblichen Kupferleitungen auskommen. Daneben mußten zur Verbindung größerer Vermittlungszentralen sowie zur Übertragung

von Videosignalen breitbandigere Kabel meist mit Koaxialleitern neu verlegt werden. Die im Handel erhältlichen Modems für den Anschluß von PCs über den Telefonanschluß an Datennetze sind entweder nach Norm V.32 für 14 400 bit/s oder nach Norm V.34 für 28 800 bit/s ausgelegt (vgl. ADAM [1995]). Sie lassen sich sowohl für das alte Verfahren der Impulswahl (ATDP) als auch für das moderne der Tonwahl (ATDT) programmieren. Maximal sind z.Zt. 56 000 bit/s erreichbar.

Neben dem Faksimileverfahren haben nach FULLER [1998] zwischenzeitlich auch spezielle Videotext-Systeme sowie Electronic-mail-Systeme zur Übermittlung meteorologischer Informationen Anwendung gefunden. Mit der Verfügbarkeit über öffentlich zugängliche Rechnernetze dürfte deren Bedeutung wohl zurückgehen.

Die Entwicklung der Mikroelektronik und der Informatik legte nach Schaffung wesentlicher technischer Voraussetzungen den Gedanken nahe, die verschiedenen Fernmeldedienste, wie Fernsprechen, Faksimile-Bildübertragung und Online-Dienste, in einem integrierten digitalen Netz zu vereinigen. Die Art der zwischen verschiedenen Teilnehmern zu übertragenden Informationen (wie Texte, Sprache oder Bildinhalte) spielt dabei keine Rolle, solange die Informationen in Form von Daten übermittelt werden. Sprach- und Bildinformationen müssen dazu vor der Übertragung digitalisiert werden. Von der für den länderübergreifenden Nachrichtenverkehr zuständigen Normungsstelle CCITT wurden für das zu schaffende *Integrated Services Digital Network* (ISDN) Normen auf der Grundlage des ISO-7-Schichten-Modells für ein offenes, d.h. herstellerunabhängiges System, ausgearbeitet, die ein Zusammenwirken der Systeme über Ländergrenzen hinweg ermöglichen und einen standardisierten Teilnehmerzugang vorsehen, über den mehrere auch unterschiedliche Endgeräte anschließbar sind. Beim Stand der vorhandenen Fernmeldedienste läßt sich der Übergang zu einem neuen einheitlichen System nur schrittweise über einen längeren Zeitraum realisieren. Dabei müssen eine Aufwärtskompatibilität der jetzigen Fernmeldedienste zum ISDN gewahrt und Übergänge zwischen den verschiedenen Diensten und Netzen vorgesehen werden. Die Verwirklichung des ISDN wird sich nach STADTHERR [1986] in mehreren Stufen vollziehen müssen.

Begonnen wurde mit einem *Schmalband-ISDN* für das sich die vorhandenen Fernsprech-Kupferkabel nutzen lassen. Durch Einsatz moderner Übertragungsverfahren sind nach WINTER [1995], MARTI & SIUDA [1986], STADTHERR [1986] und KASS [1996b] in den beiden Basiskreisen B₁ und B₂ jeweils Bitraten von je 64 kbit/s und im Steuerkreis D von 16 kbit/s zu erreichen, so daß das ISDN insgesamt Übertragungsgeschwindigkeiten von zusammen 144 kbit/s zuläßt. Das ISDN erlaubt die Übertragung von Nachrichten in Form von Sprache, Text, Bild und Daten. Dem Nutzer stehen die beiden Kanäle B₁ und B₂ zur Verfügung. In Verbindung mit dem Steuerkanal erlauben sie den Anschluß von bis zu 8 Endgeräten. In der Vergangenheit sind für die Kopplung von Rechnern mit dem ISDN von verschiedenen Herstellern ISDN-Leiterkarten entwickelt worden, die sich in einen freien Steckplatz eines Personalcomputers einsetzen lassen und auf unterschiedlichen Protokollen beruhen. Bevor der ISDN-Anschluß in Betrieb genommen wird, müssen den Karten Portadressen und Unterbrechungsanforderungen (IRQ) zugewiesen, die ISDN-Software geladen und die externen ISDN-Geräte an eine serielle Schnittstelle des Rechners angeschlossen werden. Gegenwärtig scheint sich auch hier eine Normung auf der Basis des Eurofile-Protokolls CCITT abzuzeichnen.

Deutlich höhere Geschwindigkeiten sind nach MARTI & SIUDA sowie in späteren Stufen mit *Breitbandnetzen* vorgesehen, wobei mit paarsymmetrischen Kabeln Bitraten bis zu 2 Mbit/s, mit Mini-koaxialkabeln bis 8 Mbit/s, mit Koaxialkabeln von 139 Mbit/s zu erreichen sind. Diskutiert wurde die Nutzung von TV-Kabelnetzen für diese Zwecke, mit denen Übertragungsraten bis zu 550 kbit/s realisierbar wären. Die erforderlichen Koaxialleitungen sind relativ teuer. In einer höchsten Stufe des ISDN ist nach STADTHERR der Einsatz von Glasfaserkabeln zunächst in Multimode- später in Monomodetechnik beabsichtigt. Dabei sollen Bitraten von 565 Mbit/s erreicht werden. Für die Übermittlung meteorologischer Datensätze dürften sich die höchsten Übertragungsraten nur bei wenigen Anwendungen sinnvoll nutzen lassen.

Das ISDN erfordert neue Vermittlungsprinzipien, die in den Netzknoten mit Hilfe hochintegrierter ICs, Einsatz von Rechnern und weitgehender Verlagerung des Aufwands von der Hardware zur Software realisiert werden müssen. Bei der Vermittlung werden zwei Verbindungskonzepte angewendet, die als *Leitungs-* oder *Paketvermittlung* bezeichnet werden. Bei der *Leitungsvermittlung* wird die Verbindung vor Beginn der eigentlichen Datenübertragung aufgebaut und der Nachrichtenpfad bleibt während der gesamten Dauer bis zur Auflösung der Verbindung bestehen, unabhängig davon, ob ein Signalfluß stattfindet oder nicht. Bei der *Paketvermittlung* wird nur für die Dauer des Nachrichtenflusses ein Nachrichtenpfad zur Verfügung gestellt. Das Paketformat untergliedert sich in die fünf Felder, die als Steuerfeld, Datenfeld, Kontrollfeld sowie als Begrenzer am Paketanfang und -ende bezeichnet werden. Das Steuerfeld enthält die Adressen und sonstigen Steuerinformationen, das Datenfeld die zu übermittelnden Daten, das Kontrollfeld die Prüfbit-Kombination zur Fehlererkennung und -korrektur. Die adressierten Nachrichten werden blockweise von Netzknoten zu Netzknoten übertragen und jeweils zwischengespeichert, bis der folgende Übertragungspfad identifiziert ist.

Neben dem ISDN und den sonstigen nationalen Fernmeldediensten existieren auch länderübergreifende. Das bekannteste ist das sog. *INTERNET*, ein weltweites Datennetz. Um zu solchen Netzen Zugang zu erhalten, müssen gewisse Voraussetzungen erfüllt sein (vgl. KASS [1996a, 1996c]). Sog. *Provider* stellen als Dienstleister ihren Kunden die dafür erforderlichen Mittel für die Netzanbindung zur Verfügung und vergeben für die *INTERNET*-Teilnehmer Adressen, über die sie von anderen Teilnehmern erreichbar sind. Provider erstellen jedoch im Gegensatz zu den *Online-Diensten* keine Inhalte. Bei den letztgenannten handelt es sich um Anbieter, die ihren Mitgliedern oder Abonnenten gegen Gebühren bestimmte Inhalte und Dienstleistungen in internationalen Datennetzen in klarer und übersichtlich gegliederter Struktur offerieren sowie Software für den Zugang bereitstellen. Dies erlaubt dem Nutzer eine schnelle Orientierung sowie Sicherheit bei den Transaktionen. Zu den gewährten Dienstleistungen gehört in der Regel auch der Zugang zum *INTERNET* sowie die Bereitstellung einer eigenen Seite (sog. *Homepage*) für jeden Teilnehmer, die dieser selbst gestalten kann. Die Zahl der *INTERNET*-Teilnehmer läßt sich nur schätzen und steigt gegenwärtig noch stark an. Von einer Vielzahl von öffentlichen Einrichtungen, Firmen und Privatleuten werden frei zugängliche Informationen eingespeist. Es drängt sich daher der Gedanke auf, solche Möglichkeiten auch für die Übermittlung und vor allem für die Präsentation meteorologischer Informationen zu nutzen. Dem stehen jedoch zumindest gegenwärtig noch einige Hindernisse im Weg, die sich durch folgende Sachverhalte charakterisieren lassen:

- Das *INTERNET* wurde nicht für einen Realtime-Datenaustausch konzipiert. Ein Zeitlimit für die Bereitstellung der angeforderten Daten läßt sich daher nicht angeben. Infolge des raschen Anstiegs der Teilnehmerzahl ist es bereits zu langen Wartezeiten gekommen, die in Zukunft nur durch einen raschen Ausbau des Netzes behoben werden können.
- Die im *INTERNET* bereitgestellten Informationen sind im allgemeinen öffentlich zugänglich. Der Weg, den eine Nachricht vom Absender zum Empfänger nimmt, läßt sich nicht überschauen. Dabei sind Mißbrauch oder Verfälschungen nicht ganz auszuschließen. Hauptsächlich auf Druck von Banken und Kreditorganisationen wird gegenwärtig an Verfahren zur Datensicherung gearbeitet, die einen weitgehend sicheren elektronischen Geldverkehr im *INTERNET* ermöglichen sollen. Diese Arbeiten zur Datensicherung sind aber noch nicht abgeschlossen.

Eine erfolgreiche Nutzung des *INTERNET*s oder anderer internationaler Datennetze für meteorologische Realtime-Anwendungen wird nicht zuletzt von der Lösung der genannten noch offenen Fragen abhängen. Inwieweit hierbei ausreichende Problemlösungen gefunden werden, muß die Zukunft zeigen. Vorläufig ist davon auszugehen, daß das *INTERNET* zwar zur öffentlichen Verbreitung und Präsentation von Ergebnissen, dagegen weniger zur Sammlung von Realtime-Meßdaten geeignet ist. FULLER [1998] hat eine Reihe von Beispielen angeführt, bei denen das *INTERNET* zur Übermittlung und Verbreitung meteorologischer Informationen in Form von Texten, feststehenden Bildern und Bildfolgen erfolgreich genutzt wird. Wichtig ist dabei, daß die Informationen auf den Webseiten in kurzen regelmäßigen Zeitabständen aktualisiert werden und die Kommunikation ausreichend schnell erfolgt. Dazu müssen entsprechende technische und organisatorische Vorkehrungen getroffen werden. Ferner empfahl er, zu Werbezwecken sowie aus Gründen des Urheberschutzes das Logo des nationalen Wetterdienstes in die jeweiligen Darstellungen einzufügen.

Die Nutzung der kostengünstigeren Wählleitungen erfordert im Gegensatz zu der von Standleitungen, daß die Verbindung vor Beginn des eigentlichen Übertragungsvorgangs durch einen Wählvorgang aufgebaut wird. Die Initiative kann hierbei von der Zentrale oder von der Station ausgehen. Bei zentraler Terminabfrage aller Stationen ist der Aufwand geringer, da die Wähleinrichtung nur einmal vorhanden zu sein braucht. Außerdem erfolgt die Sammlung der Meldungen von allen Stationen am schnellsten. Der Anwahlvorgang muß natürlich so gesteuert werden, daß im Besetzfall die betroffene Station nach Ablauf einer vorgegebenen Zeitverzögerung erneut angewählt wird. Sollen die Stationen zusätzlich zu den Terminmeldungen noch andere Meldungen wie z.B. Gefahrenmeldungen abgeben, deren Zeitpunkte nicht vorhersehbar sind, müßte die Zentrale bei dieser Betriebsart in kürzeren Zeitzyklen alle Stationen auf das Vorliegen solcher Gefahrenmeldungen ansprechen, was einen relativ hohen Aufwand bedeuten würde. In solchen Fällen ist es günstiger, wenn auch die Stationen über eigene Wähleinrichtungen mit Steuerung und Wählprogramm verfügen.

Mit der Zunahme des Umfangs der zu übertragenden Daten bei gleichzeitiger Erhöhung der Übertragungsgeschwindigkeit und der Nutzung von Datennetzen, bei denen der tatsächlich verwendete Datenpfad nachträglich kaum reproduzierbar ist, erhöht sich die Bedeutung von Datensicherheit und -qualität.

Unter *Datensicherheit* versteht man, daß die übertragenen Daten weitgehend gegen mißbräuchliche Nutzung oder Verfälschung auf dem Übertragungswege gesichert sind. Ein Datenmißbrauch kommt nur bei Nachrichten in Betracht, die vertraulich oder geheim gehalten werden müssen. Für die Sicherung lassen sich kryptographische Methoden, d.h. eine komplexe Verschlüsselung der zu übertragenden Nachrichten einsetzen, die eine Dechiffrierung durch Unbefugte bis zu einem gewissen Grade ausschließen. Die Verschlüsselung ist von Zeit zu Zeit zu ändern.

Die *Datenqualität* bei Übertragungsvorgängen wird durch die Wahrscheinlichkeit einer Datenverfälschung bei der Kommunikation bestimmt. Im Gegensatz zu textlichen Mitteilungen haben Meßdaten an sich keine innere Redundanz, an der man einen Fehler erkennen kann. Daher sind bei der Übertragung Sicherungsverfahren erforderlich, mit deren Hilfe man eine Datenverfälschung zumindest erkennen oder sogar korrigieren kann. Der Aufwand für solche Sicherungsverfahren muß umso höher sein, je größer die Wahrscheinlichkeit von Übertragungsfehlern ist und je nachhaltiger sich ein unerkannter Übertragungsfehler auswirken kann. Gängige Sicherungsverfahren bestehen im Anfügen eines Paritätsbits an jedes zu übertragende Zeichen, in der Bildung und Einfügung einer Prüfgröße für jeden Datenblock oder in der Codierung der zu übertragenden Zeichen in einem hochredundanten Code mit hoher HAMMING-Distanz.

Die beschriebenen Verfahren zur Sicherung der Datenqualität bei Kommunikationsvorgängen erlauben zwar eine deutliche Verringerung der Zahl der Übertragungsfehler, können diese aber nur mit einer bestimmten, u.U. sehr hohen Wahrscheinlichkeit ausschließen.

4.3 Drahtlose Übertragungssysteme

Drahtlose Übertragungssysteme sind vor allem für automatische Stationen in entlegenen Gebieten geeignet, in denen keine gut ausgebauten leitungsgebundenen Nachrichtensysteme bestehen. Sie lassen sich ebenfalls in verschiedenen Varianten realisieren. Damit die Sendefrequenz sich nicht verändert, werden heute quarzstabilisierte Sender eingesetzt. Bei ortsveränderlichen Stationen kommen Sender mit Antennen ohne ausgesprochene Richtwirkung wie z.B. Stabantennen in Betracht, deren Sendefrequenzen und Leistungen sich nach den zu überbrückenden Entfernungen zu richten haben. Da die Abmessungen der Antennenanordnungen sich hier an der Größe des Geräteträgers orientieren müssen, werden kürzere Wellen bevorzugt, die bei entsprechender Anpassung an die Wellenlänge Antennen kleinerer Abmessungen erfordern. BÜCHLER [1974] hat diskutiert, welche Parameter und Randbedingungen Einfluß auf die Wahl der Trägerfrequenz und der Sendeleistung bei drahtlosen Telemetriensystemen haben. Danach errechnet sich das Verhältnis von empfangener Leistung P_e zu gesendeter Leistung P_s gemäß

$$\frac{P_e}{P_s} = \frac{G_e \cdot G_s \cdot \lambda^2}{(4\pi r)^2}, \quad (41)$$

wenn G_e und G_s den Leistungsgewinn der Empfangs- bzw. Sendeanenne, λ die Wellenlänge des Senders und r den Abstand zwischen Sender und Empfänger bezeichnen. Die kleinste bei einem Signal/Rauschverhältnis von 1 : 1 noch auswertbare Empfangsleistung ist von der Rauschzahl N_R und Bandbreite Δf des Empfängers abhängig und läßt sich nach der Beziehung

$$P_{e \min} = N_R \cdot k \cdot T_0 \cdot \Delta f \quad (42)$$

ermitteln. Nach TREUSSART et al. [1963] werden bei größeren Übertragungsstrecken bis 1000 km Kurzwellensender mit einer Leistung von 40...50 W eingesetzt und für Tag- und Nachtbetrieb unterschiedliche Frequenzen verwendet. Bei Entfernungen bis 100 km bevorzugt man UKW-Sender, die mit Leistungen von etwa 2 W auskommen.

ŠTEJN [1959] beschrieb die Sendeanlage der russischen automatischen Station ARMS-N. Deren Meldungen waren über Entfernungen von 200...600 km zu übertragen. Tagsüber wurde mit Wellenlängen im Bereich 60...90 m und nachts mit Wellenlängen im Bereich 90...120 m gearbeitet. Die temperaturbedingte Instabilität der Sendefrequenz überschritt im Bereich -60...+50 °C nicht 0,02%. PATRICHI et al. [1973] erläuterten den Aufbau eines optimierten Senders der rumänischen automatischen Wetterstationen mit einer Sendefrequenz im Bereich von 250 MHz, der seine Signale über eine YAGI-Antenne abstrahlte. LANGFORD [1966] behandelte den Aufbau von Sendern, die an australischen automatischen Stationen eingesetzt wurden. Die Sendeleistung des Röhrensenders betrug 40 W, der Frequenzbereich 3...8 MHz. Die Anodenspannung von 500 V wurde mittels eines Festkörper-Konverters aus der 24 V-Batteriespannung erzeugt. Transistorisierte Sender mit Kristalloszillator, erhöhter Sendeleistung und erweitertem Frequenzbereich befanden sich zum damaligen Zeitpunkt in Erprobung.

Für Funkverbindungen zwischen ortsfesten Stationen in entlegenen Gebieten und Zentralen nutzt man bevorzugt *Richtfunkstrecken*. Häufig wird hier mit Sendern gearbeitet, die im UKW- oder im dm-Wellen-Bereich arbeiten. Bei diesen Frequenzen treten kaum atmosphärisch bedingte Störungen auf und es lassen sich als Richtantennen kostengünstige YAGI-Systeme mit Reflektor und mehreren vor dem Dipol angeordneten Direktoren einsetzen, die je nach Zahl der benutzten Elemente eine hinreichende Richtwirkung erzielen. Bereits PEAR [1940] benutzte bei automatischen Bergstationen im Sichtbarkeitsbereich der Empfangsstation den UHF-Bereich zur Übermittlung der Meldungen. Der dazu entwickelte Sender besaß zwei Röhren und erzeugte eine Sendeleistung von ca. 1,5 W. Die Sendeanenne besaß nur je einen Reflektor und Direktor. Es wurden damit Entfernungen über 75 km sicher überbrückt. Infolge der Richtwirkung der Sendeanne und der Empfangsantenne und durch Transistorisierung des Senders läßt sich beim heutigen Stand die Leistungsaufnahme der Sender weiter verringern. Zusätzliche Energieeinsparungen an den Stationen sind durch spezielle Betriebsarten wie den Einseitenbandbetrieb möglich.

Ein originelles Abfragesystem hat ROCKNEY [1959] für Niederschlagsmeßstellen vorgeschlagen. Für diese Zwecke wurde eine Radar-Niederschlagsbake entwickelt. Sie enthält einen Empfänger für Radarsignale und einen Mikrowellensender und ist mit einem Niederschlagsmesser gekoppelt. Beim Empfang des Radar-Abfrageimpulses erzeugt die Radarbake ein Antwortsignal, in dem der Wert der Meßgröße codiert enthalten ist. Im ausgesandten Signal kann die Niederschlagsmenge an der abzufragenden Station verschlüsselt werden. Das Signal der Radarbake wurde von der Parabolantenne des Radargerätes empfangen, im Gerät entschlüsselt und der Wert in das PPI-Bild des Niederschlags auf dem Bildschirm eingeblendet. Mit einem Niederschlagsradar lassen sich eine größere Zahl solcher Radarbaken abfragen und damit zum Bild der Niederschlagsgebiete quantitative Angaben über die Niederschlagsverteilung gewinnen, die sich zur Aneicherung der Meßergebnisse des Radargerätes verwenden lassen. Das beschriebene Verfahren ließe sich nach Angaben

des Autors auch auf andere meteorologische Meßgrößen ausdehnen. Damit bestünde die Möglichkeit, Wetterinformationen aus schwer zugänglichen Gebieten zu sammeln.

Auch Bildinformationen lassen sich über Funk übertragen. WEIHOFEN [1994] beschrieb ein von Delius Klasing entwickeltes System, bestehend aus Hard- und Software, mit dem die von Sendern des Deutschen Wetterdienstes im Kurz- oder Langwellenbereich abgestrahlten FAX-Signale empfangen, demoduliert und die Bilder auf dem Bildschirm eines Personalcomputers graphisch dargestellt werden können.

In Gebieten, in denen leitungsgebundene Nachrichtennetze mit ausreichenden Kapazitätsreserven zwar vorhanden sind, eine Anbindung automatischer Stationen über neu zu verlegende Leitungen aber auf Schwierigkeiten stößt, kommen auch gemischte Nachrichtensysteme zur Anwendung, bei denen die Stationen über Funkverbindungen mit den Terminals des Nachrichtennetzes verbunden werden. Beim Oklahoma Mesonet wurde nach BROCK et al. [1995] auf solch eine Struktur des Nachrichtensystems unter Nutzung eines im Staate Oklahoma vorhandenen zuverlässigen leitungsgebundenen Nachrichtennetzes zurückgegriffen.

Vorübergehend kam ein Übertragungsverfahren zum Einsatz, das auf der Streuung von Sendesignalen an Meteoren in der Hochatmosphäre beruhte. Es bot nach SCHIESL [1975] in arktischen Breiten Vorteile, in denen eine Kommunikation über geostationäre Satelliten nicht mehr sicher arbeitet und wurde nach Mc MILLAN [1981] sowie KLEPPE & YORI [1982] auch im SNOTEL-Netz des U.S. Soil Conservation Service genutzt.

Mit der Weiterentwicklung der Satellitentechnik haben verschiedene Verfahren der Funkübertragung an Bedeutung gewonnen, bei denen ein *Satellit als Relaisstation* dient. Mit Satelliten lassen sich Daten von Stationen innerhalb eines großen Gebietes sammeln. Das Satelliten-Übertragungssystem besteht aus

- den Bodenstationen (in der Satellitentechnik als *data collection platforms*, kurz: DCPs bezeichnet), in denen die gemessenen Informationen erfaßt, zu einem Datensatz formatiert und nach Parallel-Serien-Wandlung einem Sender aufmoduliert werden, der sie über eine geeignete Antenne zum Satelliten überträgt
- dem *Satelliten*, der mittels seines Transponders die von den Bodenstationen drahtlos abgestrahlten Signale empfängt, verstärkt und zu vorgegebenen Zeiten sie einem Träger höherer Frequenz aufmoduliert, der die Signale zu einer bodengebundenen Empfangsstation übermittelt
- der *Satellitenbodenstation*, die die Signale aus dem Orbit empfängt und verstärkt, ggf. den Datenstrom der DCP-Meldungen abtrennt und diesen entweder direkt einer meteorologischen Zentrale zuführt (wo die Signale demoduliert und die Meldungen mittels eines leistungsfähigen Online-Rechners aufbereitet und vorverarbeitet und zu Bulletins zusammengefaßt meist über drahtgebundene Nachrichtenkanäle zu den Nutzern übermittelt werden) oder die Meldungen nur kurz zwischenspeichert und sie ggf. nach grober Prüfung an einen Satelliten über Funk zurücksendet (von wo sie an die Nutzer verteilt werden).

Einsetzen lassen sich für diese Aufgaben sowohl geostationäre Satelliten, als auch Satelliten mit polaren Umlaufbahnen. Die Datensammlung von automatischen Bodenstationen ist nach

BENESCH [1995] eine Aufgabe, die die Satelliten neben der Bildaufnahme und -vorverarbeitung sowie dem Austausch meteorologischer Nachrichten zu erfüllen haben. Geostationäre Satelliten umrunden die Erde in 36 000 km Höhe über dem Äquator in 24 h und besitzen daher relativ zur Erdoberfläche eine nahezu feste Position. Ihr Sichtbarkeitsbereich umfaßt eine annähernd kreisförmige Fläche die über den 60. Breitenkreis hinausreicht. (Im Jahre 1994 befanden sich nach Mitt. d. DMG [1994] folgende Satelliten auf geostationären Umlaufbahnen: GOES 7 (USA), METEOSAT 3 und 4 (EUMETSAT, der europäischen Organisation für meteorologische Satelliten), INSAT 1D (Indien) und GMS 4 (Japan)). Für die GOES-Satelliten wurde in den USA nach MacCALLUM [1985] das Datensammelsystem DCS entwickelt. Satelliten mit polaren Umlaufbahnen bewegen sich in deutlich geringerer Höhe um die Erde und überfliegen dabei polnahe Gebiete. In ihrem Sichtbarkeitsbereich während eines Umlaufs liegt ein Streifen der Erdoberfläche von annähernd konstanter Breite. Zu diesen Satelliten gehören die der Serie NOAA (USA), die in einer Höhe von ca. 850 km mit einer Umlaufzeit von etwa 102 min die Erde umkreisen, sowie die russischen Satelliten der METEOR-Serie. Für die erstgenannten Satelliten wurde in Zusammenarbeit zwischen den USA und Frankreich das ARGOS Data Collection and Location System geschaffen. Allen Satellitenübertragungssystemen ist gemeinsam, daß sie an den Datensammelplattformen mit Rechnerunterstützung Datensätze formatieren, die in der Interfaceschaltung in einen seriellen Datenstrom umgewandelt und über einen Sender meist im 400 MHz-Bereich über eine geeignete Antenne gerichtet oder ungerichtet abgestrahlt werden. Die Datenplattformen müssen an die technischen Ausrüstungen der Satelliten angepaßt sein.

Geostationäre Satelliten können von allen Stationen, die sich in deren relativ weiten Sichtbarkeitsbereich befinden, als Relaisstationen genutzt werden und an diese fast zu beliebigen Zeiten Nachrichten übermitteln. KODAIRA et al. [1975] gaben einen Bericht über eine japanische automatische Wetterstation, die für einen Einsatz auf Inseln vorgesehen war. Die Meldungen sollten dabei von einem geostationären Satelliten mit einem im Frequenzbereich bei 469 MHz übertragenen Signal abgefragt werden, während die Meldung selbst im Frequenzbereich bei 402 MHz mit einer Übertragungsgeschwindigkeit von 100 bit/s zu senden war. Das Datenformat des Abfragesignals und der Meldung wurden mitgeteilt. Als Sendeantenne diente an der Station eine Wendelantenne mit 9 Windungen. Bei Landstationen war eine Sendeleistung von 2 W bei einer Antennenverstärkung von 7 dB ausreichend. LOBECKER et al. [1980] beschrieben das SAT-DAS-System, das für die Erfassung und Verarbeitung einer größeren Zahl mittels Bojen erfaßter ozeanologischer Meßgrößen entwickelt worden war. Es nutzte zur Fernübertragung ein Satellitentelemetriesystem, dem ein GOES-Abfragekanal fest zugewiesen worden war. Dazu wurden die verdichteten Daten der letzten 3 h in einem Telemetriepuffer zwischengespeichert und auf das Abfragesignal vom GOES-Satelliten nach Formatierung einer Meldung zu diesem übertragen. Jedes 12 bit-Datenwort wurde hierzu in zwei 6 bit-Bytes zerlegt, die beiden Bytes durch je ein Paritätsbit und ein Bit mit dem Wert 1 ergänzt und so im ASCII-Format mit einer Telegrafiergeschwindigkeit von 100 Baud gesendet. Der Sender, der auf die besonderen Bedingungen des Einsatzes auf Bojen zugeschnitten war, erforderte eine Sendeleistung von 40 W. Während der Sendung rezirkulierte der Datensatz im Telemetriepuffer. Die Übertragung einer kompletten Meldung nahm 43 s in Anspruch. Nach Übermittlung der Mel-

Um Störungen zu vermeiden, die entstehen können, wenn sich die Sendezeiträume unterschiedlicher Stationen überschneiden oder gleichzeitig andere Sender auf der betreffenden Frequenz zufällig senden, sind verschiedene Verfahren genutzt worden. Gebräuchlich war die Zeitscheibenmethode, bei der jeder DCP eine kurze Zeitspanne zugewiesen wird. Sie erfordert eine hohe Ganggenauigkeit der stationseigenen Uhren. Bei dem beschriebenen Systemen SATDAS konnte zur Erhöhung der Übertragungssicherheit im Fehlerfall jeder Datensatz mehrfach wiederholt werden. Durch Wahl eines Übermittlungsintervalls, das nur einen Bruchteil des in jeder Meldung enthaltenen Meßzeitraums beträgt, wurde bei den Systemen SATDAS und DATA-SAT eine weitere Redundanzhöhung erzielt. Bei dem indischen Verfahren wurden nach SRIVASTAVA [1985] Zeitscheiben von 3 min Länge vorgesehen, von denen die Übertragung eines DCP-Datensatzes jedoch weniger als 100 ms in Anspruch nahm. Die Lage des Sendeintervalls in 3 aufeinanderfolgenden Zeitscheiben wurde mittels eines Pseudozufallsgenerators ausgewählt. BRAS et al. [1985] haben am Beispiel von Niederschlagsdaten untersucht, wie bei Meldungen, die beim Eintreten bestimmter Ereignisse zu zufälligen Zeitpunkten abgesetzt werden sollen, die Gefahr von Meldungskollisionen reduziert und die Zuverlässigkeit im Meßnetz erhöht werden kann.

Die Anwendung von satellitengestützten Übertragungssystemen ist nicht auf bodengebundene Stationen beschränkt. Speziell für die Sammlung von Flugzeugmeldungen über geostationäre GOES-Satelliten wurde das ASDAR-System entwickelt, über das von SPARKMAN & GIRAYTYE [1977], BAGWELL & LINDOW [1980] sowie in NASA Techn. Briefs [1980] berichtet wurde. In den ASDAR-Meldungen werden die meteorologischen Informationen mit Zeitangaben und Daten über den Flugort verknüpft. Solche Meldungen können wertvolle aerologische Informationen aus dünn besiedelten Gebieten liefern. Ein Aufsatz in der Zeitschrift Nachrichten Elektronik [1977] erläuterte Aufgaben und Funktionen eines Satelliten-Kommunikationssystems für die Nachrichtenübertragung von Schiffen zum Festland. Für diese Zwecke wurden die Marisat-Satelliten gestartet und eine rechnergestützte Bodenstation installiert, über die eine Verbindung zu den jeweiligen Reedereien hergestellt wird.

Geostationäre Satelliten sind kaum einsetzbar für Stationen in der Arktis und Antarktis ab einer geographischen Breite von etwa 70°. Stationen in diesen hohen Breiten befinden sich nicht mehr im Sichtbarkeitsbereich der geostationären Satelliten. Dadurch wird die Funkverbindung zu diesen unsicher. Für automatische Meßeinrichtungen in diesen Gebieten kommen nur *Satelliten mit polaren Umlaufbahnen* in Betracht, die Meldungen nur dann empfangen können, wenn sie den Sichtbarkeitsbereich der Station passieren, der wegen der geringeren Höhe der Umlaufbahnen wesentlich kleiner ist als bei den geostationären Satelliten. Bei Umlaufbahnen in etwa 850 km Höhe entspricht der Sichtbarkeitsbereich zu einem bestimmten Zeitpunkt einer kreisförmigen Fläche von etwa 5000 km Durchmesser. Eine Meldungübermittlung zu einem polar umlaufenden Satelliten ist daher nur wenige Male am Tag zu exakt einzuhaltenden Zeiten möglich. Die Sicherheit der Datenübertragung wird nicht zuletzt durch die Genauigkeit bestimmt, mit der der Satellitenorbit bekannt ist. Wegen der sich teilweise überdeckenden Sichtbarkeitsbereiche benachbarter Umlaufbahnen kommen in Polnähe deutlich längere Kontaktzeiten zustande als am Äquator. Mehrere Satelliten mit unterschiedlichen und zweckmäßig gestaffelten

Umlaufbahnen erhöhen die Zahl der täglich möglichen Abfragen. Nach BALZER et al. [1987] stehen bei Verfügbarkeit von zwei NOAA-Satelliten Kontaktzeiten von täglich ca. 80 min am Äquator und ca. 384 min an den Polen zur Verfügung. In der Anfangszeit wurden die Zeitpunkte der Satellitenpassagen aus den Daten der Satellitenbahn im voraus berechnet und in der Station als potentielle Sendezeiten eingespeichert.

Moderne polar umlaufende Satelliten verfügen wegen ihrer Bewegung gegenüber der Erdoberfläche zusätzlich über die Möglichkeit, den Sendeort zu lokalisieren, wenn der Satellitenorbit hinreichend genau bekannt ist (vgl. KIDSON [1985]). Stationen, von denen Meldungen zu übernehmen sind, können auch hier von Satelliten abgefragt werden.

Die Nutzung von Satelliten zur Sammlung meteorologischer Meßdaten begann bereits in den 60er Jahren. STRASSER [1964] berichtete über zwei Projekte, von denen das eine mit der Kurzbezeichnung SCOMO auf die Sammlung von Wetterdaten von Schiffen, automatischen Bojen und Wetterstationen auf entlegenen pazifischen Inseln ausgerichtet war und das andere mit der Kurzbezeichnung STROBE die Verfolgung driftender Ballone und die Datensammlung beinhaltete. Bei den geplanten Versuchen mit driftenden Bojen, über die SANDS & DICKSON [1975] berichteten, war der Satellit Nimbus F mit seinem RAMS-System sowohl als Relais für die Datenübertragung als auch zur Ortung der Bojen auf Grund der DOPPLER-Verschiebung der Trägerfrequenz bei den Passagen in zwei aufeinanderfolgenden Umläufen vorgesehen. Die Bojen mußten zu diesem Zweck mit einem quasikontinuierlich arbeitenden Sender ausgerüstet werden. Beim Vorbeiflug des Satelliten sollte ein mit Identifikationssignatur modulierte Signal von 1 s Dauer ausgesendet werden, das zugleich einen Subrahmen von vier 8-bit-Kanälen mit Sensorinformationen enthielt. Bei Bedarf konnten bei einer Übertragung bis zu 4 Subrahmen nacheinander gesendet werden. THOMSEN [1985] beschrieb den Betrieb automatischer hydrologischer Stationen in Grönland, von denen ein Teil mit Satellitenübertragungssystemen ausgerüstet war. Über mehrjährige Erfahrungen beim Einsatz von satellitengestützten Übertragungssystemen an Stationen der antarktischen Halbinsel, die geostationäre und polar umlaufende Satelliten nutzen, hat ARAYA [1985] berichtet. Nachdem logistische Probleme und Wartungsfragen geklärt werden konnten, erwartete er, daß noch verbliebene Probleme bezüglich der Datenqualität sich in naher Zukunft lösen lassen. CALLÉDE [1985] teilte Erfahrungen mit, die an hydrologischen Stationen in afrikanischen Ländern gesammelt wurden. Er leitete daraus die Forderung nach nutzer-eigenen Satellitenempfangsstationen ab. In der Anfangsphase des Einsatzes solcher Satellitensysteme waren nur bestimmte Bodenstationen mit großen Antennensystemen in der Lage, die vom Satelliten gesammelten Meldungen abzufragen. Sie wurden von diesen zentralisierten Bodenstationen nach Entschlüsselung meist über leitungsgebundene Nachrichtenkanäle zu den Nutzern übertragen. Dadurch verlängerte sich die Zeitdauer, bis zu der die Meldungen zum Anwender gelangten oft soweit, das eine Real-time-Nutzung unmöglich wurde. Nach BALZER et al. [1987] ist das minimale Zeitintervall zwischen Meßwerterfassung und Verfügbarkeit der Daten bei Nutzung von polar umlaufenden Satelliten als Relaisstationen von der Lage der Meßstationen abhängig. Verzögerungszeiten zwischen 80 min und 240 min sind möglich. Bereits SHOPE & PAULSON [1985] wiesen auf Nachteile zentralisierter computerunterstützter Sammelstationen hin, die die Systemkomplexität erhöhen, die Zuverlässigkeit verrin-

gern und hohe Kommunikationskosten für die leitungsgebundene Übertragung der Meldungen zu den Nutzern verursachen. In den letzten Jahren sind einfachere Empfangssysteme für Satellitensignale gefordert und entwickelt worden, mit denen sich bestimmte im Satelliten gesammelte Nachrichtengruppen von den Nutzern selbst abfragen lassen (siehe HERSCHY [1985]). Sie sollen eine Anwendung der Daten unter Near-real-time-Bedingungen zulassen. In Zukunft sollen die Satellitentelemetriesysteme außer denen der GOES-Satelliten durch lokale Nutzerempfangsstationen gesteuert werden, die die Daten direkt vom Satelliten zu empfangen und auszuwerten haben.

Soll ein Satellitenübertragungssystem genutzt werden, müssen die Meldungen die Spezifikationen des jeweiligen Satelliten einhalten. Das betrifft sowohl die Länge als auch das Format der Meldung und die Übertragungsrate. Die nach dem ARGOS-System arbeitenden Satelliten waren nur in der Lage, Meldungen mit einem Informationsinhalt bis zu 256 bit entgegenzunehmen. Die Sender zur Übermittlung von Nachrichten zu den Satelliten arbeiteten in den meisten Fällen im 400 MHz-Band; nur der von Kanada genutzte geostationäre Kommunikationssatellit MSAT arbeitet nach GOODISON et al. [1985] im 800 MHz-Band. Nach Angaben von BALZER et al. [1987] reicht an Stationen mit Richtantenne zur Meldungsübertragung ein Sender mit 200 mW Leistung heute aus. Da die Funkübertragung vom Satelliten zur Sammelstation wesentlich schneller vor sich gehen muß, wird hier mit deutlich höheren Frequenzen gearbeitet. Häufig wird der 4 GHz-Bereich genutzt.

CALLÉDE et al. [1996] berichteten über die Schwierigkeiten, die einer Echtzeitübertragung hydrometeorologischer Daten in Brasilien entgegenstehen. Bereits ab 1975 liefen erste Versuche zum Einsatz von Satelliten-Kommunikationssystemen. Ab 1984 wurde auf dieser Basis ein Netz von 20 Stationen in Amazonasgebiet eingerichtet. Die Ergebnisse waren so ermutigend, daß ein das gesamte Land überdeckendes Netz von 200 Stationen geplant wurde, die ihre Meldungen über den brasilianischen Datensammelsatelliten SCD1 übermitteln sollen.

Moderne Satellitenübertragungssysteme, die mit geostationären Satelliten arbeiten, lassen heute echtzeitnahe Betriebsbedingungen zu. Die Störanfälligkeit der Meldungsübermittlung ist bei satellitengestützten Systemen immer noch größer als bei leitungsgebundenen Nachrichtensystemen. LOBECKER et al. [1980] gaben an, daß in der Regel 95% der Satellitenabfragesignale von SATDAS beantwortet wurden. Nach CALLÉDE [1985] werden weniger als 98% der Meldungen fehlerfrei übertragen. Nach BALZER et al. [1987] wurden 98% der von ihrer Station erfaßten Ozonwerte fehlerfrei übermittelt. Im Einzelfall kann die Ausfallrate ortsabhängig sein, wenn in Stationsnähe Störquellen vorhanden sind, die insbesondere im benutzten Frequenzband Störsignale abgeben. Bei allen Nachrichtensystemen, die auf Satelliten beruhen, sollten daher geeignete Vorkehrungen getroffen werden, die einen Datenausfall durch Redundanz im Übertragungssystem begegnen. Bei automatischen Systemen, die für einen unbegrenzten Betrieb vorgesehen sind, ist zu beachten, daß künstliche Erdsatelliten nur eine begrenzte Lebensdauer haben (vgl. TREUSSART [1975]). Steht zum Zeitpunkt des Ausfalls kein Ersatzsatellit zur Verfügung, auf den die Übertragungsstrecke umgeschaltet werden kann, muß zumindest vorübergehend mit Ausfällen gerechnet werden.

Unter besonderen Bedingungen können heute die Telefon- und Telegrafendienste in Form des Mobilfunks oder der Funktelegra-

fie auch von ortsveränderlichen Stationen oder an solchen Orten genutzt werden, an denen die leitungsgebundenen öffentlichen Telekommunikationssysteme nicht zugänglich sind. Häufig findet man Anwendungen im ozeanologischen Bereich (auf Schiffen und Bojen). Im Prinzip handelt es sich hier bereits um eine Kombination von drahtlosen und drahtgebundenen Kommunikationssystemen, bei denen jeder Teilnehmer jeden anderen im öffentlichen Telefon- bzw. Telegrafienetz erreichen kann, unabhängig davon, ob er über einen Leitungs- oder einen Funkanschluß verfügt. Jeder Teilnehmer, der über Funk eine Verbindung herstellen will, nimmt mit dem Wählvorgang zunächst einen Kontakt mit der nächstgelegenen Funkzelle auf, in deren Empfangsbereich er sich gerade befindet und die die Art der Weiterleitung festlegt. Die derzeit existierenden Mobilfunknetze arbeiten digital nach den internationalen Standards GSM900, GSM1800 bzw. GSM1900, bei denen die Zahl die Frequenz des Übertragungsbandes im Megahertz angibt. Die Nachrichtenübertragung erfolgt paketweise in Blöcken, wobei die Daten verschlüsselt bzw. die Pakete durch eine Prüfsumme gesichert werden können. Da in jedem Band nur eine begrenzte Zahl von Funkkanälen zur Verfügung steht, kann jede Funkzelle zu einem bestimmten Zeitpunkt nur eine begrenzte Zahl von Verbindungen herstellen. Bei Verwendung von Dual-Band-Handys kann man auf Kanäle in zwei verschiedenen Netzen zugreifen. An Orten, von denen keine Funkzelle der erdgebundenen Mobilfunknetze zu erreichen ist, besteht die Möglichkeit, auf Satellitennetze auszuweichen. Bis vor wenigen Jahren war das Satellitennetz Iridium betriebsbereit, das aus 66 Satelliten bestand, die in ca. 780 km Höhe die Erde umkreisen. Die Übertragungskosten sind bei Nutzung von Mobilfunknetzen zwar höher als die in leitungsgebundenen Telefonnetzen und in Satellitennetzen. Da man jedoch bei der Kommunikation auf handelsübliche Handys als Endgeräte zurückgreifen kann, die sich akustisch mit der Datenquelle oder -senke koppeln lassen, halten sich die Anschaffungskosten für das Übertragungssystem in engen Grenzen und eröffnen damit einen wirtschaftlich sinnvollen Weg zur Nachrichtenübermittlung.

Mobilfunknetze nach den genannten GMS-Standards sind nicht in allen Ländern zugänglich. Ab dem Jahre 2002 soll für die nächste Generation von Mobilfunknetzen der Standard des 'Universal Mobile Telecommunications System' UMCS weltweit eingeführt werden, der höhere Übertragungsraten bis zu 2 Mbit/s und damit auch Bildübermittlungen zuläßt. Der Zugang zu UMCS-Netz erfordert jedoch neue Handys. Auch bei Satellitennetzen sind in den nächsten Jahren weitere zu erwarten.

VOLPICELLI et al. [1985] berichteten über ein Meßsystem zur Überwachung der Wasserqualität, bei dem die von einer Boje aus erfaßten und gesammelten Daten über ein drahtloses Telefon zu einem Laborrechner übertragen wurden. Dabei wurde das Rufsignal des Telefons (Klingelzeichen) als Abfragesignal verwendet. Die im Bojenrechner gesammelten Meßinformationen wurden über ein Modem und einen akustischen Koppler zum Handapparat des mobilen Telefons übergeben. Bei diesem Meßsystem eingesetzte Interfaceschaltungen zum Anschluß des drahtlosen Telefons sind detailliert beschrieben.

Da bei drahtlosen Kommunikationsverfahren die Wahrscheinlichkeit einer Beeinträchtigung der Datenqualität auf dem Übertragungsweg meist höher ist als bei leitungsgebundenen, spielen hier die Methoden zur Sicherung der Datenqualität eine noch größere Rolle. Die bereits im vorigen Abschnitt genannten Prüfverfahren lassen sich auch hier einsetzen.

5 Datenspeicherung

Bei der Datenspeicherung kann man zwei Aspekte unterscheiden. Zum einen handelt es sich um die vorübergehende Speicherung der Daten oder Meldungen an der Station mit der Zielstellung, Übertragungskosten zu sparen, Daten zurückliegender Termine auch an den Stationen verfügbar zu haben und bei Störung der Nachrichtenverbindung die Daten solange zwischenspeichern, bis eine Weiterleitung möglich ist. Hierbei wurden meist Externspeicher eingesetzt, die mit dem Stationsrechner in Verbindung stehen und Datenkollektive auf einen geeigneten *Datenträger* ablegen. Der *Datenträger* kann zugleich zum Transport der Daten zur auswertenden Stelle genutzt werden. Die australische "Observation and Engineering Branch" hat in ihrer "Guidance Specification for a General Purpose Automatic Weather Station" [1997] auf die geringere Zuverlässigkeit solcher Externspeicher mit elektromechanischer Wirkungsweise hingewiesen und dem Einsatz von Speichern mit Festkörperschaltkreisen den Vorzug gegeben.

Zum andern werden an Sammel- und Auswertestellen *Massenspeicher* gebraucht, die imstande sind, die Meldungen zahlreicher Stationen über einen längeren Erfassungszeitraum aufzunehmen, zu verwalten und zu archivieren. Gebraucht werden hier Speichermedien hoher Kapazität mit vertretbaren Zugriffszeiten in Verbindung mit Datenverarbeitungsanlagen zur Prüfung der Datenqualität, Korrektur verfälschter Werte und andere erforderliche Rechenvorgänge. Bei der Archivierung spielen Fragen der *Sicherung der Daten und der Datenqualität* eine wichtige Rolle.

5.1 Datenspeicherung an der Station

Von automatischen Meßsystemen erfaßte und vorverarbeitete Daten werden häufig vor Ort auf Externspeichern abgelegt, wenn sie nicht in Echtzeit verarbeitet werden müssen. Aber selbst Realtime-Meldungen werden oft zusätzlich zur Fernübertragung vor Ort gespeichert, um im Falle einer gestörten Nachrichtenverbindung die Daten für eine spätere Verarbeitung zu sichern. Solange die Fehlerrate bei der Speicherung vor Ort deutlich geringer ist als bei der Nachrichtenübermittlung, kann man bei dieser Vorgehensweise eine höhere Datenqualität gewährleisten. Eine Datenspeicherung vor Ort bietet ferner die Möglichkeit, an der Station auf einfache Weise auf zurückliegende Meßergebnisse zurückgreifen zu können, ohne umfangreiche Datensätze auf Papier ausdrucken und nachträglich durchsuchen zu müssen.

An Externspeicher für die Sicherung der Daten sind in erster Linie folgende Forderungen zu stellen:

- hohe Zuverlässigkeit und geringe Fehlerrate
- hinreichende Speicherkapazität
- hinreichende Geschwindigkeit der Schreib- und Lesevorgänge
- vertretbare Leistungsaufnahme.

Bei den Speichermedien ist zu unterscheiden zwischen denen, die für einen stationären Betrieb bestimmt sind und denen, die zum Austausch größerer Dateien zwischen verschiedenen Geräten oder Rechnern eingesetzt werden sollen. Die letzteren haben für die Zwischenspeicherung vor Ort, den materiellen Transport der *Datenträger* zu anderen Stellen und die Weiterverarbeitung der Meßdatenkollektive mit anderen Geräten die größere Bedeutung.

Für die Abspeicherung kommen verschiedene *Datenträger* in Betracht. Das *Lochband* war das erste Speichermedium, das bei Meßwerten in breitem Rahmen genutzt wurde. Gegenüber Lochkarten hat es den Vorteil, daß bei der Aufzeichnung nur in größeren zeitlichen Abständen ein Wechsel des Informationsträgers notwendig ist. Die Informationen sind notfalls – wenn auch mühsam – visuell lesbar. Bei Beschädigung des Bandes können sie meist ohne Verlust rekonstruiert werden. Für eine Archivierung der Daten mittels Lochbändern wirken sich Masse und Abmessungen der Lochbänder nachteilig aus. Außerdem besteht bei Langzeitlagerung die Gefahr von Datenverlusten durch Schädlingsfraß.

In Form *magnetischer Speichermedien* ergab sich etwa ab den 70er Jahren eine Alternative zu Lochband und Lochkarte, die zugleich eine weitere Steigerung der Speicherkapazitäten zuließ. Die in der Vergangenheit häufig benutzten Lochbänder und Magnetbänder auf Spulen sind heute als überholt anzusehen. Waren die Magnetband-Aufzeichnungsgeräte anfangs noch diffizil in der Handhabung, wurde dieser Nachteil mit Einführung der *Magnetband-Kassettengeräte* weitgehend behoben. Zugleich war damit eine weitere Verbesserung des Verhältnisses von Informationsgehalt/Masse verbunden.

Häufig verwendet wurden in den letzten zwei Jahrzehnten *Kassettenmagnetbandgeräte* als Speichergeräte für unterschiedliche Anwendungen, wie die von BETTAN & VITON [1977], HÖRHAMMER [1977], BAKER et al. [1980], BRÖMME et al. [1980], KOTTMEIER et al. [1980], SAXÉN [1980], BILLING [1981], PAINTING & PETTIFER [1981], SIERRA & RODRIGUEZ [1981], WEIHOFEN & WOHL [1981], WILLIAMS et al. [1983], BERGHOLTER [1983], RUDEL [1983], VATJUS-ANTILA et al. [1983], HÖHNE et al. [1986a], GARCIA [1987], PAYNE [1988], WILKINSON & BOATMAN [1988] und BENNETT [1989] beschriebenen Meßsysteme beweisen. Sie sind kostengünstig, arbeiten aber nicht immer ausreichend zuverlässig. Offenbar stellen das Beschleunigen und Abbremsen des Bandes und seiner Auf- und Abwickelpule beim Beginn und Ende eines Aufzeichnungs- oder Lesevorgangs eine mechanische Belastung sowohl für das Laufwerk als auch für das Magnetband dar. Manchmal wurden aus diesem Grunde zwei Laufwerke in einem System eingesetzt. Dies gab die Möglichkeit, im Störfalle auf das zweite Laufwerk umzuschalten. Erreicht werden Speicherkapazitäten in der Größenordnung von maximal 100 kByte. Da die Kassetten nur blockweise beschreibbar und zwischen aufeinanderfolgenden Speicherblöcken informationsfreie Bandlücken erforderlich sind, wird die Speicherkapazität der Kassetten zusätzlich verringert. Weil Kassettenmagnetbänder Fehlstellen aufweisen können, muß der Schreibvorgang durch Echolesen überwacht werden. Treten Schreibfehler auf, ist die Bandlücke vor dem aufzeichnenden Block durch zu verlängern, bis die Fehlstelle in dieser Lücke liegt. Dadurch verlängert sich natürlich die Dauer des Aufzeichnungsvorgangs.

Schreib-, Such- und Lesevorgänge werden bei Kassettenmagnetbandgeräten durch Mikrorechner per Programm gesteuert. Die Kommunikation zwischen Speichergerät und Rechner erfolgt über eine Anschlußsteuerung als Interface, die eine serielle Schnittstelle realisiert. Neben den Datensätzen werden Befehls- und Statussignale ausgetauscht. Ein auszugebender Datenblock muß im Rechner in einem zugeordneten Speicherbereich bereitgestellt werden. Weniger leistungsfähige Mikrorechner sind durch den Verkehr mit dem Kassettenlaufwerk während der Schreib- und Lesevorgänge weitgehend ausgelastet.

Mit den *Disketten* ist ein Speichermedium geschaffen worden, das nicht nur einfach zu handhaben ist, eine gegenüber Magnetbandkassetten um mehr als eine Größenordnung höhere Kapazität besitzt und vor allem in Form der 3½-Zoll-Diskette einen besseren Schutz und damit eine höhere Sicherheit gegen Beschädigungen bietet. Zu modernen Mikrorechnern und Personalcomputern werden *Diskettenlaufwerke* angeboten. Nach den 5¼-Zoll-Disketten haben sich jetzt die 3½-Zoll-Disketten durchgesetzt. Über den Einsatz solcher Speicher in Verbindung mit meteorologischen Meßsystemen ist u.a. von LINDROTH & NORÉN [1979], PARSONS et al. [1980], AMTMANN [1983], JAEGER [1983], SPARKS & SUMNER [1984], DUNCAN [1985], BURKART [1987] sowie SHANKLIN [1998] berichtet worden. Moderne Standard-Disketten besitzen eine Speicherkapazität von 1,44 MByte und sind heute preisgünstig beschaffbar. Die Diskettenlaufwerke haben sich als zuverlässiger als die der Kassettenmagnetbandgeräte erwiesen. Sie weisen eine deutlich kleinere Zugriffszeit auf, was sich insbesondere bei Suchvorgängen bemerkbar macht.

In den letzten Jahren sind Disketten mit hoher Kapazität sowie die dafür erforderlichen Laufwerke entwickelt worden, mit denen sich 100...200 MByte auf einer Diskette mit zum Teil erhöhter Geschwindigkeit abspeichern lassen. Leider arbeiten diese Systeme je nach dem Hersteller nach unterschiedlichen Standards. Nur ein Teil dieser Geräte ist in der Lage, auch normale Disketten zu lesen.

Auch die Steuerung der Diskettenlaufwerke erfolgt durch einen Rechner per Programm. Anschlußsteuerungen für die Verbindung mit dem Rechner sind handelsüblich und in allen Personalcomputern enthalten. Auch sie realisieren eine serielle Schnittstelle. Zum Teil lassen sich diese neuen Laufwerke an vorhandene PC-Schnittstellen anschließen, teils werden die erforderlichen Interfaceschaltungen von den Herstellern der Laufwerke geliefert.

Sind große Datenmengen zu speichern, bieten *Festplattenspeicher* in Form hermetisch gekapselter, steckbarer Einheiten heute eine relativ günstige und platzsparende Alternative. Eine Festplatte besteht aus mehreren, miteinander fest verbundenen Scheiben, die auf einem Spindelmotor übereinander angeordnet sind. Die Scheiben bestehen aus Aluminium und sind auf beiden Seiten mit einer dünnen magnetisierbaren Schicht überzogen. Jede Scheibe wird von oben und unten durch einen Schreib- und Lesekopf angesteuert, der durch einen beweglichen Arm positioniert wird. Die Schreib- und Leseköpfe berühren die Scheibe nicht, sondern schweben auf einem Luftkissen über deren Oberfläche. Der Abstand zur Scheibe ist so gering, daß selbst kleine Staubkörnchen zu einer Beschädigung oder gar Zerstörung der Speicherschicht führen könnten. Deshalb muß das Innere eines Festplattenspeichers gut gegen Staub und andere Umwelteinflüsse geschützt werden.

Eine Festplatte läßt sich jedoch im Gegensatz zur Diskette nicht einfach wechseln. Auch ein Austausch des gesamten Laufwerks dürfte auf Dauer nicht zu empfehlen sein. Es bleibt daher hier nur die Möglichkeit, den Inhalt auf andere Datenträger zu überspielen.

Magnetplattenspeicher mit Festplatte gehören zur Standardausrüstung jedes PC. Solche Speicher sind heute mit Speicherkapazitäten bis zu einigen Gigabyte in kleinen, als Einschub ausgeführten Gehäusen verfügbar. An den Rechner werden Festplattenspeicher über ein Bussystem angeschlossen, das entweder dem EIDE- oder dem SCSI-Standard entspricht. In erster Linie

werden Magnetplattenspeicher als Programmspeicher genutzt. Sie dienen in automatisierten Meßsystemen zum Laden des Programms in den Arbeitsspeicher und lassen sich auch nach einem Programmabsturz mit Zerstörung des Programms im Arbeitsspeicher zum Neuladen des Programms nutzen. Bei den heute erreichbaren Speicherkapazitäten bleibt noch genügend Platz auf der Platte, um auch Daten über mehr oder weniger lange Zeit zwischenzuspeichern. Über die Anwendung von Plattenspeichern für solche Zwecke ist u.a. von KAIMAL [1977], KAIMAL & GAYNOR [1983] sowie PERTTU [1983] berichtet worden. Als Datenträger im engeren Sinne können die Magnetplatten dagegen nicht angesehen werden, da die Laufwerke nicht für einen ständigen Wechsel konstruiert sind und ein regelmäßiger Transport wohl einen ungünstigen Einfluß auf die Zuverlässigkeit der Laufwerke nehmen würde. Zur Entlastung des Arbeitsspeichers besteht die Möglichkeit, umfangreichere Realtime-Dateien bis zu ihrer Fernübertragung oder Non-realtime-Datenkollektive bis zu ihrer Übernahme auf andere Datenträger auf einer Magnetplatte zwischenzuspeichern.

Seit mehr als zehn Jahren stehen steckbare und daher leicht austauschbare Speichermodule mit *Halbleiterspeichern* auf der Basis unterschiedlicher Halbleiter-Technologien zur Verfügung. Durch Variation von Zahl und Speicherkapazität der Chips lassen sie sich den aufzuzeichnenden Informationsmengen anpassen. Ihr Hauptvorteil ist in dem Fakt zu sehen, daß sie ohne mechanische Bewegungsvorgänge auskommen. Die Kosten pro Bit sind jedoch deutlich höher als bei Diskettenspeichern.

Meist müssen mehrere Speicherschaltkreise auf einer Steckkarte angeordnet sein, die sich bei eingeschaltetem Meßsystem ohne Informationsverlust wechseln lassen muß. Nach dem Lesen der Daten an der Auswertestelle sollen die Informationen gelöscht werden, bevor sie erneut zur Datenspeicherung genutzt werden. Über die Anwendung solcher Festkörperspeicher zur Datenspeicherung bei meteorologischen Meßsystemen hat GARCIA [1987] berichtet.

RAM-Speicher verlieren bei Unterbrechung der Versorgungsspannung(en) ihre Speicherinhalte. Um sie als Datenträger verwenden zu können, muß auf der Karte eine Stützbatterie montiert sein, die den Informationsverlust beim Wechseln der Steckkarte und beim Transport verhindert. Die Halterung der Stützbatterie muß so ausgeführt sein, daß Wackelkontakte auch beim Transport der Speicher ausgeschlossen werden können.

EPROM-Speicher sind primär als Programmspeicher gedacht, wurden jedoch auch für die Speicherung von Daten z.B. an automatischen Niederschlagsmeßstellen und Strahlungsmeßstationen bereits benutzt (siehe BRACEWELL & CAMPBELL [1981]) sowie YOUNG [1984]). Die Leiterkarten sind so auszuliegen, daß sich die EPROM-Bausteine auf der Karte beschreiben lassen. Dazu muß die erforderliche Schreibspannung von 24...27 V am Meßort zur Verfügung stehen. Nachteilig ist der relativ lange Schreibvorgang, da zur Vermeidung einer Überhitzung der Schaltkreise die Schreibspannung in vielfach zu wiederholenden kurzen Impulsen zuzuführen ist. Es empfiehlt sich daher, die abzuspeichernden Meßdaten zunächst in einem RAM-Speicher zu sammeln und einen Datensatz in gewissen zeitlichen Abständen zum EPROM-Schaltkreis zu übertragen. EPROM-Speicherkarten lassen sich problemlos transportieren, da auch beim Fehlen der Spannungen ihre Speicherinhalte über viele Jahre erhalten bleiben. Nach der Übernahme der Informationen an der Auswertestelle müssen die Schaltkreise zur Lö-

schung der gespeicherten Informationen mit einer UV-Lampe bestrahlt werden.

Mit den *EEPROM-Speichern* stehen heute Schaltkreise zur Verfügung, die elektrisch beschrieben und gelöscht werden können. Die Speicherkapazitäten dieser Schaltkreise erreichen noch nicht die Werte, der EPROM-Speicher. Auch sind die Preise deutlich höher. Im Transportverhalten ähneln sie weitgehend den EPROM-Speichern.

Verschiedene der genannten Speicherschaltkreise werden nach BOEDER [1994] auch in sog. *Memory Cards* eingebaut, die meist die Flächenabmessungen der üblichen Scheckkarten aber eine Kartendicke von nur 3 mm haben und nach einer Übersicht in der Zeitschrift *Der Elektroniker* [1990] zum Berichtszeitpunkt Speicherkapazitäten zwischen 8 kByte und 1 MByte aufwiesen. In den letzten Jahren wurden flache Speicherkarten in erster Linie für Anwendungen bei der digitalen Musik- und Bildspeicherung weiterentwickelt und erreichen heute Kapazitäten von 32 MByte. Sofern sie statische RAM-Speicherschaltkreise enthalten, besitzen sie eine eigene Batterie. Die Verbindung zum Schreib-/Lesegerät wird über goldplattierte Kontakte hergestellt. Vorgesehen sind ferner Kontakte, über die ein Schreibschutz gewährleistet, das korrekte Stecken der Karte erkannt und ein Datenverlust beim Ziehen oder Stecken der Karte verhindert wird. Typische Anwendungsgebiete für solche Memory Cards ergeben sich dort, wo transportable Speicher mit schnellem Datenzugriff (100...200 ns) unter rauen Umweltbedingungen erforderlich sind. Sie lassen sich (im Gegensatz zu den Scheckkarten mit Magnetstreifen, die nur einige Byte speichern können) zur Ablage von Daten auch außerhalb des Bereichs der Konsumgüterelektronik einsetzen. Die handlichen *Magnetkarten* kommen nur in Betracht, wenn die Sicherung weniger Informationen ausreicht.

5.2 Datenverwaltung und -archivierung an Zentralstellen

Von automatischen Stationen zusammengestellte Datensätze können entweder als Realtime-Meldungen über ein Kommunikationssystem als Nachrichten oder als Non-realtime-Meldungen durch Postversand der duplizierten Datenträger zur Sammelstelle gelangen. Sie müssen an einer Zentralstelle auf geeigneten Speichermedien gesammelt, geprüft, erforderlichenfalls korrigiert und auf Datenträgern hoher Kapazität so abgelegt werden, daß für eine Weiterverarbeitung mit Rechnern ein bequemer und schneller Zugriff besteht. Dazu ist ein gut ausgebautes Datenverwaltungs- und Archivierungssystem erforderlich.

Die üblichen *Aufbereitungs- und Verarbeitungsvorgänge* bei den meteorologischen Auswertungen dürfen aus Aktualitätsgründen je nach der Art der Daten Zeiträume von einigen Stunden bis zu mehreren Wochen in Anspruch nehmen. Während dieser Zeit sollen die Daten in einem Speicher bereitstehen, der einen schnellen Zugriff und eine übersichtliche *Verwaltung* erlaubt. Das erfordert nicht nur Speicher mit kurzen Zugriffszeiten sondern auch zweckmäßig aufgebaute Datenbanken. *Relationale Datenbanken* erlauben dem Benutzer, Daten selektiv abzurufen, die zu anderen Daten in einer bestimmten Beziehung stehen. Diese Relation muß vor dem Abruf vom Benutzer definiert werden.

Nach der aktuellen Auswertung sind die Daten für eine spätere Nutzung (hauptsächlich für klimatologische Zwecke) aufzuheben. Dieser als *Archivierung* bezeichnete Vorgang erfordert ebenfalls Speichermedien, stellt jedoch an sie gänzlich andere Anforderungen. Da sich im Lauf der Zeit der Umfang des Ar-

chivs ständig erweitert, sind Speichermedien erforderlich, die erstens pro Einheit hohe Kapazitäten aufweisen und zweitens sich wechseln lassen. Die Geschwindigkeit des Zugriffs spielt hier eine untergeordnete Rolle, da im Falle einer nachträglichen Nutzung von Archivmaterial die Daten auf Speicher mit kürzeren Zugriffszeiten umgeladen werden können, die unmittelbar mit leistungsfähigen Rechenanlagen gekoppelt sind. Für die Archivierung sind jedoch der Preis pro kByte und die Lebensdauer der Speichermedien von Bedeutung.

Für die Verwaltung und Archivierung großer Datenmengen kommen folgende Speichermedien in Betracht:

Magnetplattenspeicher, bevorzugt mit Wechselplatten, sind das wichtigste Medium für die Datenspeicherung während des Verarbeitungsprozesses. Mehrere Laufwerke können an eine Datenverarbeitungsanlage angeschlossen werden, um die erforderliche Datenmenge für den Rechner bereitzuhalten. So verfügte der Auswerterechner in Upsala, der nach PERTTU et al. [1977] für die Auswertung der Experimente im Rahmen des Schwedischen Koniferenprojektes eingesetzt wurde, über drei Wechselplattenlaufwerke. Bei einem Speicherzugriff wird jeweils ein Datensatz oder ein File eingelesen bzw. abgelegt. Wechselplatten lassen sich auch als Archivmaterial nutzen, sind jedoch hierfür nicht besonders kostengünstig.

Als preisgünstigstes Speichermedium für die Archivierung bietet sich nach wie vor der Magnetbandspeicher an, der nach RICKETTS [1980] seit langem zur Archivierung von Klimadaten Verwendung fand. In Form der sog. *Streamer* stehen heute Magnetbandspeicher zur Verfügung, die speziell für solche Zwecke geschaffen wurden. Da beim Magnetband nur ein sequentieller Zugriff zu den Informationen möglich ist, sind die Zugriffszeiten relativ lang und können bis zu Minuten betragen. Daher kommen Magnetbandspeicher heute nicht mehr für die Datenverwaltung bei Verarbeitungsvorgängen in Betracht.

Magnetisch gespeicherte Informationen können durch ionisierende Strahlungen verändert bzw. gelöscht werden. Da sich der Einfluß der ionisierenden Umgebungsstrahlung durch Radioaktivität bzw. Höhenstrahlung ebensowenig ausschalten läßt, wie das Versprüden des Trägermaterials und das Ablösen der magnetischen Schicht, sind solche Speichermedien in regelmäßigen Zeitabständen von mehreren Jahren zu kopieren, um einen Datenverlust zu vermeiden.

Als *Kompaktdisk* (Kurzbezeichnung: CD) oder *CD-ROM* wird ein optischer Nur-Lesespeicher mit hoher Kapazität bezeichnet. Es handelt sich um eine Scheibe, bei der die eigentliche Speicherschicht durch eine Polykarbonatschicht gebildet wird, die zum mechanischen Schutz mit einer dünnen Acrylschicht überzogen wird. In die Speicherschicht lassen sich mittels Lasergeräten kleine Vertiefungen (sog. Pits) einbrennen. Dieser Schreibvorgang, bei dem verschiedene Varianten in Nutzung sind, ist technisch komplizierter als bei anderen Speichermedien. Die zum Beschreiben erforderlichen Geräte – sog. CD-Brenner – sind zwar noch relativ teuer; es werden aber bereits für Preise unter 1000 DM CD-Brenner angeboten, die sich über geeignete Schnittstellen (z.B. den SCSI-Adapter) an Personalcomputer und andere kleinere Rechner anschließen lassen. Sowohl Schreib- als auch Lesevorgang erfolgen mit einem Laserstrahl unterschiedlicher Intensität. Die eingebrannten Vertiefungen reflektieren beim Lesevorgang das Licht eines scharf fokussierten Laserstrahls anders als die ebene Diskoberfläche. Eine Photodiode empfängt das reflektierte Licht. Die nachfolgende Elektronik diskriminiert die

beiden Signalpegel. Beim Beschreiben werden die Daten in einem redundanten Code in die Platte eingebrannt. Zweckmäßigerweise werden dabei größere Datensätze in einem Arbeitsgang auf die CD übertragen. Beim Lesen erfolgt in der Auswertelektronik ggf. eine Fehlerkorrektion, so daß sich einzelne Staubkörner auf der Platte sowie unwesentliche Beschädigungen kaum auswirken können. CD-ROMs mit einer Kapazität von 650 bzw. 700 kByte werden nach NÖBEL [1996] vorwiegend als Programmspeicher oder als Lesespeicher für feste Daten verwendet. Die auf einer Kompaktdisk gespeicherten Daten sind gegen Überschreiben sicher. Die Lebensdauer qualitativ guter CDs wird bei sachgemäßer Lagerung auf ca. 100 Jahre geschätzt. Für die Zukunft bietet die CD sowohl von ihren Eigenschaften als auch vom Preis her gute Voraussetzungen für eine Nutzung bei der Datenarchivierung. Bereits heute werden umfangreichere Programmpakete auf CD geliefert. Auch abgeschlossene Dateien von aufbereiteten und geprüften Meßdaten werden zunehmend auf diesem Speichermedium angeboten.

Die *CD-RW* ist eine wiederbeschreibbare CD. Bei dieser erhitzt der Laserstrahl des Brenners eine kristalline Legierung bis an den Schmelzpunkt. Dabei geht die Schicht an den belichteten Stellen von der geordneten kristallinen in eine ungeordnete nichtkristalline Struktur über, die den Laserstrahl des Recorders weniger gut reflektiert. Der geordnete Zustand der Speicherschicht kann aber wiederhergestellt werden, so daß sich die Scheibe wiederholt beschreiben läßt. Die Kosten für einen CD-RW-Recorder liegen nur wenig über denen eines CD-ROM-Laufwerks; jedoch sind die CD-RW-Scheiben noch deutlich teurer als einfache CD-Rohlinge.

Im übrigen sind die Entwicklungsmöglichkeiten der CD noch nicht als ausgereizt zu betrachten. Gegenwärtig wird die Einführung einer "digital versatile disc" (Kurzbezeichnung: *DVD*) mit einer Speicherkapazität von 8,5 (bei einer Schicht) bzw. 17 GByte (bei zwei übereinanderliegenden Speicherschichten, von denen die obere teildurchlässig ist) vorbereitet. Die untere Schicht liest der Laserstrahl durch die darüber befindliche hindurch. Daneben besteht die Möglichkeit, beide Plattenseiten mit den optischen Speicherschichten zu versehen, wobei ebenfalls eine Speicherkapazität von 17 GByte erreichbar ist. Damit kommt die Speicherkapazität der DVD in einen Bereich der mit dem von modernen Festplattenspeichern vergleichbar ist.

Dieses neue Speichermedium ist nicht nur für die digitale Aufzeichnung von Video- und Audioprodukten sondern auch für die Datenspeicherung geeignet. Die größere Speicherdichte wird hier durch kleinere Strukturen und geringeren Spurbstand von nur 0,74 µm erreicht.

BOCHTLER [1991] beschrieb Wirkungsweise und Eigenschaften von *optischen Speicherplatten*, die für Aufgaben der Langzeitar Archivierung eingesetzt werden können. Bei diesen wurde der Bitwert 1 durch ein Loch, der Bitwert 0 durch eine unveränderte Spiegelschicht dargestellt. Jede Platte enthielt 20 000 Spuren mit je 32 Sektoren zu 512 Byte. 2300 Sektoren dienten als Ersatzspuren. Beim Beschreiben der Platte wurden mit einem Laser für jedes Bit mit dem Signalwert 1 ein Loch in die Spiegelschicht gebrannt, während beim Bitwert 0 die Schicht unverändert blieb. Nach dem Beschreiben von je 7 aufeinanderfolgenden Sektoren wurden die gespeicherten Daten zur Kontrolle gelesen. Beim Erkennen eines Schreibfehlers wurde der Sektor als defekt gekennzeichnet und die in diesem zu speichernde Information in einen Ersatzsektor geschrieben, der ebenfalls kontrolliert wurde. Das Lesen von der optischen Platte erfolgt mit einem schwachen La-

serstrahl, wobei die Bitwerte 0 und 1 durch Reflexion bzw. durch fehlende Reflexion des Lichts gekennzeichnet sind. Bei der Archivierung wurden die Daten einem Plattenspeicher entnommen und auf einen freien Speicherbereich der optischen Platte kopiert. Die Datenhaltbarkeit wurde auf mindestens 30 Jahre geschätzt.

Nach NÖBEL [1996] gibt es *magneto-optische Schichten*, die sich auf eine Scheibe aufbringen lassen und zur Datenspeicherung eingesetzt werden können. Wird beim Beschreiben die Oberfläche an den gewünschten Stellen mit einem Laserstrahl auf 200 °C erhitzt, ändert sich entweder die magnetische Polarität (MO-Laufwerke) oder die Phasenlage (PD-Laufwerke). Zum Lesen werden ebenfalls Laserstrahlen verwendet, jedoch mit so geringer Intensität, daß sich die Schicht auf der Platte hierbei kaum erwärmt. Starke Magnetfelder können bei beiden Prinzipien den gespeicherten Daten nichts anhaben. Die Schreibgeschwindigkeit ist beim MO-Speichermedium gegenüber der Lesegeschwindigkeit relativ gering. Die Speicherkapazitäten einer Scheibe sind zwar noch kleiner und die Laufwerke etwas teurer als die einer CD-ROM. Man geht davon aus, daß dieses als CD-RW bezeichnete Speichermedium bis zu etwa tausend Mal überschreibbar ist. WODE et al. [1995] haben magneto-optische Plattenspeicher bereits zur Zwischenspeicherung von Rohdaten in einer Hubschrauber-Schleppsonde verwendet.

Weitere Speichermedien mit Speicherkapazitäten von mehreren Gigabyte befinden sich gegenwärtig noch in Entwicklung und dürften in wenigen Jahren auf den Markt gelangen.

6 Zeitabhängige Funktionseinheiten

Die Programmsteuerung hat innerhalb automatischer Meßsysteme die Aufgabe, bestimmte Aktivitäten zu im voraus festgelegten Terminen einmalig, in vorgegebenen Zeitabständen zyklisch oder beim Auftreten äußerer Ereignisse, die durch ein Unterbrechungssignal gemeldet werden, zu starten. Konkurrieren mehrere Aktivitäten zu einem gegebenen Zeitpunkt untereinander, so hat die Programmsteuerung – falls notwendig – die Reihenfolge ihrer Abarbeitung vorzugeben.

Die Fähigkeit eines Systems, auf von außen zu nicht vorhersehbaren Zeiten kommende Signale sowie auf spezielle Zeitbedingungen bevorzugt zu reagieren, bezeichnet man als *Echtzeit- oder Realtime-Verhalten*. Die Programmsteuerung einer automatischen Station bewerkstelligt demzufolge wesentliche Funktionen des Echtzeitbetriebes. Da viele der an automatischen meteorologischen Stationen ablaufenden Prozesse durch die Uhrzeit bestimmt sind, benötigt die Programmsteuerung Zeitsignale einer möglichst exakt arbeitenden *Uhr*. Es sollen daher zunächst die Möglichkeiten zur Verwirklichung geeigneter Uhren behandelt werden, bevor auf die Realisierung von Programmsteuerungen im engeren Sinne eingegangen wird.

6.1 Echtzeituhren

Echtzeituhren sind Vorrichtungen zur Zeitmessung, die unabhängig von den zu steuernden Geräten arbeiten. Man unterscheidet

- freilaufende Echtzeituhren, die wiederholt eine feste Periodendauer abzuzählen haben, zu denen bestimmte Vorgänge einzuleiten sind
- programmierbare Echtzeituhren, bei denen das zu messende Zeitintervall veränderlich sein kann und durch Programmierung vorgegeben wird sowie

- Tageszeituhren, die die Tageszeit in Stunden, Minuten und Sekunden und eventuell das Datum erfassen und damit in der Lage sind, zu vorgegebenen Zeitpunkten Reaktionen auszulösen.

Da automatische meteorologische Stationen in ihren Reaktionen eng an die Uhrzeit gebunden sind und verschiedene voneinander unabhängige Vorgänge mit unterschiedlichen Zeitperioden auszulösen haben, spielt hier die dritte der genannten Varianten eine herausragende Rolle.

Die älteren automatischen Stationen arbeiteten noch mit mechanischen Uhren. Abgelöst wurden diese durch Uhrenschaltungen, bei denen die Schwingungen elektrisch angeregt und die Uhrzeit durch Zählung der Schwingungen bestimmt wurden. Dabei kamen anfangs Stimmgabel-, später *Quarz-Oszillatoren* zum Einsatz. Der Aufbau einfacher Quarzoszillatoren wird in der Abb. 30 gezeigt.

COURT [1966] hat mechanische, elektromechanische und elektronische Uhren hinsichtlich ihrer Eignung als Zeitgeber in automatischen Wetterstationen für entlegene Gebiete untersucht. Unter den damals gegebenen Voraussetzungen erwies sich die elektromechanisch arbeitende Uhr mit einer Miniaturstimmgabel, die in einem konventionellen mechanischen Uhrwerk die Funktion der Unruhe übernahm, noch als die günstigste Lösung.

Moderne Quarzuhren arbeiten zwar wesentlich genauer als die früheren mechanischen Uhren; sie erfordern jedoch eine ununterbrochene Stromversorgung. Auf Einfachheit der Schaltung wird schon aus Gründen einer unterbrechungsfreien Stromversorgung Wert gelegt. Daher verzichtet man häufig auf eine Thermostatisierung des Schwingquarzes. Auch bei Quarzuhren muß man mit Abweichungen im Uhrgang rechnen, die sich in Laufe längerer Einsatzzeiten zu merklichen Fehlern aufsummieren können und deshalb korrigiert werden müssen. Der Quarzoszillator ist so ausulegen, daß er sicher anschwingt. Biegeschwinger lassen sich mit Frequenzen ab ca. 1 kHz fertigen. Sie schwingen jedoch schwerer an und benötigen daher häufig eine Oszillatorschaltung mit zumindest 2 Transistoren. Außerdem unterliegen sie in stärkerem Maße Alterungserscheinungen. Man bevorzugt daher heute Scherschwinger mit deutlich höheren Frequenzen. Der höhere Aufwand für die Frequenzteilung kann bei Verwendung hochin-

tegrierter Schaltungen in Kauf genommen werden. Die Frequenz von Schwingquarzen läßt sich mittels eines Trimmkondensators in der Oszillatorschaltung innerhalb relativ enger Grenzen "ziehen" und damit auf den erforderlichen Wert genau abgleichen.

Quarzhren lassen sich nach zwei verschiedenen Prinzipien aufbauen. Bei einer reinen *Hardware-Realisierung* wird der Quarzoszillator über eine Impulsformerstufe mit einer Untersetzungsschaltung verbunden, die die Impulsfrequenz zunächst bis zu einem Wert untersetzt, der der kleinsten Zeitbasis entspricht, die in der Programmsteuerung gebraucht wird. Dieses Signal muß zur Ansteuerung des Programmteils herausgeführt werden. Dem schließen sich weitere Schaltungen an, die zunächst die Uhrzeit (in Sekunden, Minuten und Stunden) und sodann das Datum bestimmen (vgl. HÖHNE [1975a]). Eine einfache Quarzuhr zum Selbstbau hat bereits WILHELM [1968] beschrieben. Dabei wurden ausschließlich diskrete Bauelemente verwendet. Um den Aufwand in Grenzen zu halten, benutzte er Frequenzteiler mit monostabilen Kippschaltungen sowie einen Schrittmotor mit Getriebe. LANE [1985] verwendete in einer Niederschlagsmeßeinrichtung mit Regenwippe den CMOS-Schaltkreis MM58174A als Uhr. Sie lieferte für jeden Kippvorgang der Regenwippe die Zeitangaben (Stunde, Minute und Sekunde), die im RAM-Speicher abgelegt wurden. KÖHLER [1991] setzte in seiner Echtzeituhr den japanischen CMOS-Uhrenschaltkreis MSM 5832 ein. Er zeichnet sich durch einen geringen Stromverbrauch im Schlafzustand von 30 µA bei einer Spannung > 0,2 V aus, die sich leicht durch NiCd-Pufferakkumulatoren bereitstellen läßt. Der Schaltkreis enthält neben dem Oszillator eine Untersetzungsschaltung für das Teilungsverhältnis $2^{15} : 1$ und Schaltungen zur Steuerung und Adressierung, Zähler für die Sekunden, Minuten, Stunden, den Wochentag, den Monatstag, den Monat und das Jahr. Der Schwingquarz mit einer Frequenz von 32,768 MHz wird außen zugeschaltet. Die Funktionen "Uhren stellen" sowie "Ausgabe von Uhrzeit und Datum" werden durch den angeschlossenen Mikrorechner per Software erledigt.

Bei der *Software-Realisierung* ist der Quarzoszillator mit Impulsformer ebenfalls erforderlich. Die Funktion der nachfolgenden Untersetzungsschaltung übernehmen hier jedoch ein Mikrorechner mit peripherem Zehlschaltkreis (z.B. einer CTC). Im letzteren wird zunächst eine kleinste Zeitbasis gebildet. Der

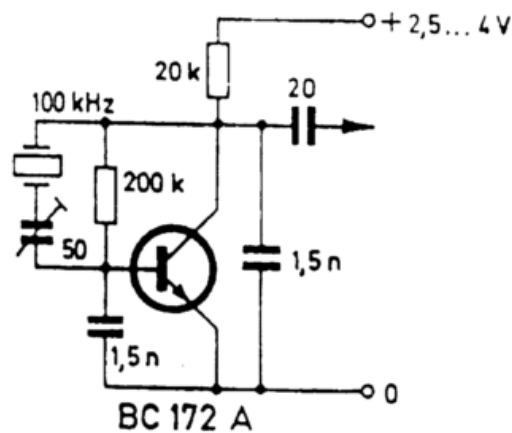
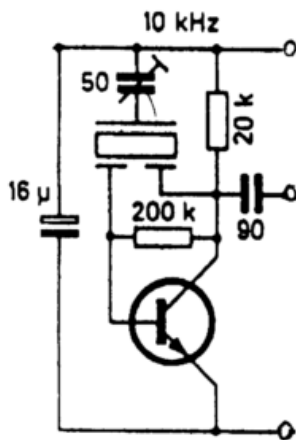


Abb. 30: Aufbau einfacher Quarzoszillatoren
a) für dreipoligen 10-kHz-Quarz (Biegeschwinger)
(nach: WILHELM [1968])

b) für zweipoligen 100-kHz-Quarz

Zähler erzeugt zyklisch ein Interruptsignal, das im Mikrorechner das Uhrzeit-Programm aufruft und die RAM-Zellen aktualisiert, in denen die Sekundenbruchteile, die ganzen Sekunden, Minuten und Stunden sowie der Monatstag, der Monat und das Jahr gezählt werden. Gleichzeitig steuert dieses Signal die Programmsteuerung. Das Interruptsignal darf nicht maskierbar, d.h. nicht abschaltbar sein, damit die Weiterleitung der Taktimpulse nicht gestört wird. Eine nach diesem Prinzip arbeitende Quarzuhr, bei der ein Taschenrechnerschaltkreis verwendet wurde, hat BILZ [1978] beschrieben. Aber auch der Stationsrechner eines automatischen Meßsystems kann neben seinen eigentlichen Aufgaben die Funktion der Uhrzeit- und Datumbildung mitübernehmen. Bei beiden Realisierungen der Uhr lassen sich beim Datum die Monatslängen entsprechend dem Gregorianischen Kalender bilden. Falls erforderlich ist es sogar möglich, in Schaltjahren den Schalttag automatisch zu berücksichtigen.

Die Anforderungen an die Ganggenauigkeit sind vom Einsatzfall abhängig. Besonders hohe Uhrengenauigkeiten sind bei bestimmten geophysikalischen Messungen, wie der Erfassung seismischer Daten, erforderlich (siehe PAULAT [1981]). Quarzuhren, die automatische Meßsysteme steuern, müssen in Abhängigkeit von ihrer Ganggenauigkeit und den Anforderungen an die Genauigkeit der Uhrzeit von Zeit zu Zeit korrigiert werden. Dazu können die Signale einfacher Zeitzeichensender herangezogen werden. Die Idee, deren Signale ständig zu empfangen und als Zeitbasis für die Programmsteuerung zu verwenden, scheitert jedoch an dem Fakt, daß solche Sender sich nicht völlig unterbrechungsfrei betreiben lassen. Bei einem Ausfall des Zeitzeichensenders würde aber auch ein durch sie gesteuertes Meßsystem nicht mehr arbeitsbereit sein.

Schaltungen zum automatischen Stellen von Digitaluhren unter Ausnutzung der Minuten- und Sekundenimpulse von Zeitzeichensendern haben BREUER [1977] sowie EGOROV et al. [1986] angegeben. Die Angleichung der Digitaluhr an die genauere Uhr der Zeitzeichensender erfolgt dabei abrupt. Die Schaltung der letztgenannten Autoren gewährleistet eine Genauigkeit von 1 s bei der Bestimmung des Zeitfehlers.

Bei der Korrektur von Echtzeituhren muß beachtet werden, daß sie zugleich die Zeitbasen für Datenverdichtungen und andere zeitabhängige Verarbeitungsvorgänge zu liefern haben. Eine plötzliche Änderung der Uhrzeit kann daher die Arbeit der Programmsteuerung stören und damit zu verfälschten Ergebnissen bei den zeitabhängigen Verarbeitungsvorgängen führen. Von HÖHNE & SCHULZE [1990] wurde für solche Zwecke ein Verfahren vorgeschlagen und in der Anlage AFMS-2 genutzt, bei dem die Uhr nicht abrupt verstellt, sondern der Uhrgang über eine von der Zeitkorrektur abhängige Zeitspanne geringfügig erhöht oder vermindert wurde. Die Gangänderung war dabei so gering, daß sich eventuelle Beeinflussungen verarbeiteter Daten in zulässigen Grenzen halten.

Die Nutzbarkeit von Zeitsignalen eines GOES-Satelliten für Stationen in höheren geographischen Breiten hat HOLTHAM [1984] an drei Inselstationen im Kanadischen Archipel untersucht, die in geographischen Breiten zwischen 74° und 81°30' nördlicher Breite lagen. Für den Empfang wurden transportable Helixantennen mit hohem Gewinn verwendet. An allen untersuchten Orten erwiesen sich die Empfangsbedingungen der codierten Zeitangaben als ausreichend.

Seit einigen Jahren bieten sog. *Funkuhren* die Möglichkeit, auf solche Korrekturen ganz zu verzichten. Eine Funkuhr stellt eine

Quarzuhr dar, die nach Einschaltung des Meßsystems sowie in regelmäßigen Zeitabständen (z.B. stündlich) mittels eines eingebauten Empfängers Verbindung zu einem Langwellensender aufnimmt, der von einer Atomuhr gesteuert wird und nicht nur Zeitzeichen sondern codierte Informationen zu Uhrzeit und Datum sendet. Der Zeitfehler dieser Sender ist vernachlässigbar gering. In Deutschland arbeitet nach Angaben von SCHREIBER [1974] und MÜLLER [1990] sowie der Zeitschrift Elektronik [1990] der Langwellensender DCF 77 auf der Frequenz 77,5 kHz. Seine Sendeleistung beträgt 25 kW. Wegen seiner niedrigen Frequenz erzielt er damit eine Empfangsreichweite von 1500 km. Er sendet Zeitinformationen nach der Zeitskala UTC (koordinierte Weltzeit) sowie Signale für die Differenz zwischen den Zeitskalen $UT1 - UTC = DUT1$, die jedoch für meteorologische Zwecke kaum gebraucht wird. Die Genauigkeit der vom Sender abgestrahlten Zeitsignale liegt bei ca. $\pm 50 \mu s$. Dazu addiert sich am Empfangsort eine weitere Ungenauigkeit, die durch unterschiedliche Laufzeiten zwischen Sender und Empfänger sowie durch variable Zeitverzögerungen in der Empfangs- und Demodulationsschaltung bedingt sind.

Bereits SCHREIBER [1974] stellte einschließlich einiger technischer Daten 21 Zeitzeichensender tabellarisch zusammen, die in Mitteleuropa empfangen werden können und zumindest mehrmals je Stunde Zeitzeichensendungen abstrahlen. VONWYL [1992] hat eine Übersicht zu den technischen Daten sowie den Codeschemata bei dem schweizer Sender HBG, dem deutschen Sender DCF 77, dem britischen Sender MSF, dem tschechischen Sender OMA und dem US-amerikanischen Sender WWVB gegeben. Im allgemeinen unterscheiden sich die Codierungen nur in Einzelheiten.

Funkuhren erfordern keine manuelle Einstellung der Uhrzeit, da sie sich nach dem Einschalten bei ungestörtem Empfang innerhalb von höchstens 2 min auf die richtige Uhrzeit einstellen. Weicht bei den in regelmäßigen Zeitabständen selbsttätig ausgeführten Vergleichen die Quarzuhr von der Atomuhr ab, wird die Zeitanzeige der Quarzuhr automatisch korrigiert. Fällt der Zeitzeichensender aus oder ist die Funkverbindung gestört, läuft die Funkuhr mit Quarzgenauigkeit weiter. SCHREIBER gab Schaltungen zur Auswertung der Zeit- und Datumssignale an, die dem damaligen Stand der Technik entsprechend im wesentlichen als Digitalschaltungen ausgeführt wurden. Über eine Funkuhr, die sich mit Hilfe eines Einchip-Mikrorechners realisieren ließ, berichtete BOBE [1986]. Sie konnte in Verbindung mit verschiedenen Zeitzeichensendern betrieben werden. Der Mikrorechner, aus dessen quarzstabilisiertem Taktgeber die Uhrzeit abgeleitet wurde, übernahm hierbei die Decodierung der Zeitsignale des Senders, prüfte die Sinnfälligkeit der Daten und trug sie im Falle der Fehlerfreiheit in die Uhrenregister ein. Über eine serielle Schnittstelle ließen sich die Zeitangaben an räumlich abgesetzte Einheiten übertragen. MÜLLER [1990] hat die vom Zeitzeichensender DCF 77 erzeugten codierten Zeitsignale beschrieben. Zur Sekundenerkennung wird zu Beginn jeder Sekunde außer der 58. in jeder Minute die Amplitude der Trägerfrequenz um 75% abgesenkt. Im Zeitlegramm des Zeitzeichensenders werden in jeder Minute nacheinander die BCD-codierten Informationen über Minute, Stunde, Monatstag, Wochentag, Monat und Jahr sowie Paritätsbits für bestimmte Daten innerhalb der Sekunden 21...58 jeder Minute übertragen. Dabei wird der Bitwert 0 durch einen 100 ms langen Impuls, der Bitwert 1 durch einen 200 ms langen Impuls dargestellt. Die Pulslängenmodulation des Senders erfolgt durch Absenken der Trägeramplitude.

MÜLLER gab eine für den Langwellenbereich geeignete einfache Empfängerschaltung sowie eine Mikrorechnerbaugruppe zur Prüfung und Auswertung des Zeitlegramms und das dazu erforderliche Programm an. Die genannten Baugruppen bildeten zusammen mit dem Schwingquarz im Taktgeber des Einchip-Mikrorechners eine Funkuhr, die für Automatisierungssysteme bestimmt war. Sie ließ sich über ein serielles Interface mit einem übergeordneten Rechner koppeln. Das Programm setzte sich aus den Modulen Initialisierung, Anwendermodul, Auswertung des Zeitlegramms des Senders und Quarzuhr zusammen, wobei die beiden letztgenannten Module als Interruptserviceroutinen geschrieben waren.

Funkuhren werden heute als Armband- oder Weckeruhren preisgünstig angeboten. Die dabei genutzten Schaltungen dürften sich auch als Uhren in automatischen Meßsystemen kostengünstig einsetzen lassen. DIBBERN [1995] unterbreitete den Vorschlag, bei der nächsten Generation automatischer Stationen solche Funkuhren als Zeitgeber zu verwenden.

Der Empfang von Zeitzeichensendern im KW- und VLF-Bereich ist in entlegenen Gebieten nicht überall möglich. Für solche Einsatzfälle hat PAULAT [1981] vorgeschlagen, die durch Atomuhren gesteuerten Signale eines Senders des Omega-Funknavigationssystems zu nutzen. Jede Station des Omega-Systems sendet in einer Sequenz mit den Frequenzwerten von 10,2 kHz, 1,33 kHz und 13,6 kHz modulierte Impulse aus, die alle 10 s wiederholt wird. Zur Synchronisation der Quarzuhr vor Ort wurde nur die Frequenz von 13,6 kHz genutzt. Aus den empfangenen Navigationssignalen ließen sich Sekundenimpulse über Teiler und einen Phasenschieber ableiten und mit den Sekundenimpulsen der Quarzuhr vor Ort vergleichen. Beginn der Sekundenimpulse der Quarzuhr früher als der aus dem Omega-Signal abgeleitete, wurde mittels einer Synchronisierungsschaltung ein Impuls der 1kHz-Impulsfolge in der Teilerschaltung der Quarzuhr ausgeblendet und damit der Sekundenimpuls um 1 ms verzögert. Ging hingegen die Quarzuhr nach, wurde durch die Synchronisierungsschaltung ein Zusatzimpuls erzeugt und die Quarzuhr damit um 1 ms vorgestellt. Mittels eines Codegenerators ließ sich ein Zeitcode erzeugen, der dem DCF-Code des deutschen Zeitzeichensenders entsprach.

6.2 Programmsteuerungen

Der früher häufig begangene Weg, Programmsteuerungen mit mechanischen oder elektromechanischen Hilfsmitteln, wie mechanischen Uhren, Kontaktwalzen mit elektrischen Motorantrieben oder Schrittschaltwerken aufzubauen (vgl. LANGFORD [1966]), ist heute als überholt anzusehen. Die Auslösung zeitabhängiger oder von äußeren Ereignissen abhängigen Aktivitäten erfolgt bei modernen Anlagen nach zwei Prinzipien:

- durch Hardware in Form einer Digitalschaltung, die von einer elektronischen Uhr mit Taktimpulsen versorgt wird oder
- durch einen Rechner mit Echtzeituhr und einem Echtzeit-Multitask-Steuerprogramm.

Beim ersten Lösungsweg ist die Programmsteuerung stets als Funktions- und Baugruppe vorhanden. Im Prinzip besteht sie aus einer Kette von Zählern, die mit der Untersetzerschaltung zur Bildung des Sekundenimpulses sowie dem Sekunden-, Minuten- und Stundenzähler der Uhr und dem Tages-, Monats- und Jahreszähler des Datumgebers identisch sein können. An die Ausgänge der Untersetzerschaltungen dieser Zähler sind Gatter so angeschlossen, daß zu den Terminen, zu denen Aktivitäten

anzustoßen sind, Impulse erzeugt werden. Auf diese Weise lassen sich auch Signale bilden für Aktivitäten, die zeitzyklisch abgearbeitet werden müssen. Von äußeren Ereignissen abhängige Aktivitäten werden in der Regel bei Schwellenwertüberschreitungen durch bestimmte Meßgrößen ausgelöst, wozu analog oder digital arbeitende Komparatorschaltungen herangezogen werden müssen (vgl. HÖHNE [1970a]). Wie man solche Signale zur Auslösung zusätzlicher Meldungen (Gefahren- und Aviomeldungen) nutzen kann, ist vom gleichen Autor [1974b] gezeigt worden.

Da beim zweiten Lösungsweg in der Regel der Stationsrechner für die hier vorliegenden Aufgaben eingesetzt wird, bildet die Programmsteuerung keine selbständige Baugruppe, sondern wird durch die Echtzeituhr und das Echtzeit-Multitask-Steuerprogramm repräsentiert, das Bestandteil des Echtzeit-Betriebssystems ist. Das Charakteristikum eines solchen Steuerprogramms besteht darin, daß es sowohl auf Interruptsignale aus dem Prozeß bevorzugt durch Aufruf einer sog. Interruptserviceroutine reagieren kann, als auch zu vorgegebenen von der Uhrzeit abhängigen Terminen oder zeitzyklisch sog. Tasks aufzurufen in der Lage ist, die zeitabhängigen Aufgaben lösen. Tasks bestehen dabei aus einem Programmmodul oder mehreren Programmmodulen, die zusammen eine Aufgabe lösen. Sind zu einem Zeitpunkt verschiedene Tasks zu starten, entscheidet die Priorität der Task über die Reihenfolge ihrer Abarbeitung. Konkurrieren verschiedene Tasks um ein gemeinsam genutzten Pufferspeicher oder um ein Gerät, so kann durch Zuordnung sog. Semaphore zu dem gemeinsam benutzten Puffer oder Gerät die Zusammenarbeit der Tasks so verwaltet werden, daß keine zeitkritischen Probleme mehr auftreten. Diese in der Informatik bekannte Methode wurde bei meteorologischen Messungen u.a. von Van GORP [1989] zur Lösung des Echtzeitproblems bei konkurrierenden Ein- und Ausgabetasks angewandt. Die Reihenfolge von Teilaktivitäten innerhalb der gleichen Task läßt sich bei listenorientierten Anwenderprogrammen mit den zugehörigen Parameterlisten festlegen. Da sich bei modernen automatischen Stationen der Rechnerinsatz zumindest im Stationskern durchgesetzt hat, wird der zweite Weg bevorzugt, bei dem die Programmsteuerung nur noch als Funktionsgruppe in Erscheinung tritt. Der erstgenannte Lösungsweg kommt aber nach wie vor bei einfacheren Meßsystemen zur Anwendung, bei denen kein Rechner eingesetzt werden soll und die Programmsteuerung nur begrenzte Aufgaben zu erfüllen hat.

Im Normalfall läuft das Programm einer automatischen Station nach dessen Erststart ununterbrochen, bis es entweder durch einen Eingriff von außen gestoppt oder im Fehlerfall durch einen sog. Systemabsturz zu einem Halt gelangt. Im letzten Fall besteht in Übereinstimmung mit der australischen "Observation and Engineering Branch" [1997] eine Grundanforderung darin, daß ein automatischer Wiederanlauf möglich sein muß.

Ein Verzicht auf ein Echtzeit-Multitask-Steuerprogramm würde erfordern, die Zeitabhängigkeiten in den Anwenderprogrammen zu berücksichtigen. Es hat sich erwiesen, daß dieser Weg nicht nur ein unübersichtliches, schlecht strukturiertes Programmsystem nach sich zieht, sondern auch die Zuverlässigkeit der Arbeit des Systems und vor allem dessen Flexibilität negativ beeinflusst. Änderungen, die den Programmablauf im System berühren, sind dann nur mit umfangreichen Programmänderungen und Testläufen zu bewerkstelligen und erfordern manchmal sogar ein Neuschreiben bestimmter Anwenderprogramme.

Ein erprobtes Echtzeitsteuerprogramm sollte von einem renommierten Hersteller bezogen werden. Am günstigsten ist es, wenn ein generierfähiges System verfügbar ist, bei dem z.B. die Maximalzahl der Interruptquellen, die Maximalzahl der Tasks, die vorzusehenden RAM- und PROM-Bereiche, die Tiefe der Kellerspeicher und die erforderlichen Treiberrouninen sich im voraus festlegen lassen und nach diesen Spezifikationen ein Steuerprogramm mit den erforderlichen Funktionen bei minimalem Speicherbedarf und optimalen Reaktionszeiten generiert werden kann. Das System ist aber stets so auszulegen, daß genügend Platz für im Laufe der Zeit notwendig werdende Ergänzungen bleibt.

7 Meßdatenerfassung

Die Datenerfassung ist eine der Hauptaufgaben automatischer Stationen. Sie beinhaltet neben der Erfassung von Meßwerten und Statussignalen die Bereitstellung von Zusatzinformationen, die allgemein als Kennungen bezeichnet werden.

Meßsignale können als amplitudenanaloge, frequenzanaloge, diskrete und digitale Signale anfallen. Sie lassen sich mit den in den Abschnitten 3.1.1 bis 3.1.3 behandelten Interfaceschaltungen in den Stationskern übernehmen und werden dort entweder in Registern bereitgehalten oder von einem Rechner im Arbeitsspeicher abgelegt. In Abhängigkeit von der geforderten Auflösung sind dazu Wortlängen notwendig, die kaum über 12 bit hinausgehen. Bei zweckmäßiger Skalierung der Meßwerte kommt man meist sogar mit 10 bit aus.

Schritthaltend mit der Meßwertenerfassung sind die Meßwerte einem ersten Test hinsichtlich der Datenqualität zu unterziehen. Da dieser Test unter Echtzeitbedingungen erfolgen muß, kommen dabei nur sehr einfache Algorithmen in Betracht (vgl. Abschnitt 8.1).

Mit den Meßsignalen sind die Statussignale zu übernehmen, die in den Gebern bzw. im Interface gebildet werden. Dabei handelt es sich nach BIRKLE & SCHÖLZKE [1976] um binäre Signale mit unterschiedlichen Informationsinhalten. Die genannten Verfasser unterschieden

- Gerätestatus
- Wartungsstatus
- Befehlsstatus
- Quellenstatus.

Gerätestatussignale kennzeichnen die Arbeitsweise von Funktionsgruppen, die für einen automatischen Betrieb der Meßeinrichtung oder von Zusatzbaugruppen wesentlich sind. Insbesondere bei Analysenmeßsystemen hat die Überwachung von Zusatzbaugruppen für die Beurteilung des Meßsystems besondere Bedeutung. Der Befehlsstatus dient zur Überwachung der Befehlsausführung und der Quittungssignale. Geräte- und Befehlsstatus können hinsichtlich ihres Signalpegels als Betriebs- oder Fehlerstatus definiert werden. Ein Statusbit erhält als Betriebsstatus den Signalwert 1, wenn kein Fehler und keine Störung vorliegt, dagegen als Fehlerstatus den Signalwert 0, wenn ein Fehler oder eine Störung vorliegt. Der Wartungsstatus wird entweder automatisch oder durch einen von Hand zu betätigenden Schalter bei Wartungsarbeiten gesetzt. Er kennzeichnet, daß der übertragene Meßwert nicht als solcher nutzbar ist und insbesondere nicht in Verarbeitungsvorgänge einbezogen werden darf. An teilautomati-

schen meteorologischen Stationen können Meßwerte beim Ausfall von Meßeinrichtungen oder beim Fehlen entsprechender Geber von Hand eingegeben werden. In diesem Falle ist es zweckmäßig, die Art der Datengewinnung durch einen Quellenstatus zu kennzeichnen. Mit einem solchen Status wurde in der Station AFMS-2 gearbeitet (vgl. HÖHNE & GATZKI [1988]).

Die verschiedenen Statusinformationen werden zweckmäßig zu einem Statuswort zusammengefaßt. Je nach Zahl der erforderlichen Statusbits, der Wortlänge des Meßwertes und der Wortbreite des Eingabekanals können Meßwert und Statuswort entweder in einem Datenwort oder aufeinanderfolgend in zwei bzw. drei Datenworten übernommen werden. Durch zweckmäßige logische Verknüpfung der verschiedenen Statusbits innerhalb des Statuswortes ist ein Gültigkeitsstatus zu bilden und in das Statuswort einzutragen. Das Gültigkeitsbit ist zu setzen, wenn die Auswertung der verschiedenen Statusinformationen einen ungestörten Meßwert erwarten läßt. Nach Ausführung des Tests der Datenqualität ist das Gültigkeitsbit rückzusetzen, wenn der Meßwert als verfälscht angesehen werden muß.

Neben gemessenen und/oder beobachteten Größen gehen in Wettermeldungen eine Reihe von Kennungen ein. Ein Teil davon (wie die Stationsnummer), ist stationsabhängig und kann im Speicher als Konstante notiert werden. Andere, wie die Angaben über Uhrzeit und Datum, werden im Stationskern gebildet und können als Variablen zu vorgegebenen Terminen abgefragt und im Arbeitsspeicher abgelegt werden. Weitere Kennungen sind von der Gewinnung bestimmter Meßgrößen und von den Maßeinheiten abhängig. Sie lassen sich entweder aus den Statusinformationen der betreffenden Größen oder aus festen Parametern ableiten, die im Rechner vorgegeben sind.

Um den Aufwand für das Geberinterface in Grenzen zu halten, werden die Meßsignale in der Regel nicht gleichzeitig, sondern in einem Zyklus oder in mehreren Zyklen nacheinander abgefragt. Man spricht dann von einem *Zeitmultiplexbetrieb*. Er begrenzt die Meßwertfolge, da eine erneute Abfrage einer bestimmten Meßstelle erst nach Durchlaufen des jeweiligen Abfragezyklus vorgesehen ist. Nur in seltenen Ausnahmefällen, wenn Meßsignale mit sehr hoher Datenrate zu erfassen sind oder die Messungen verschiedener Geber exakt gleichzeitig erfolgen müssen, wird hiervon abgewichen.

Die Übernahme von Meßdaten durch den Stationsrechner kann unabhängig von den Besonderheiten der Schnittstelle nach einem der im folgenden genannten Verfahren erfolgen:

- Das *Pollingverfahren* ist durch zyklische Abfrage mittels eines Programms charakterisiert. Die Initiative geht hierbei vom Stationsrechner aus. Die Methode wird immer dann genutzt, wenn Meßgrößen regelmäßig (z.B. in konstanten Zeitintervallen) abgefragt werden müssen. Sie kann bei der Erfassung meteorologischer Größen an automatischen Stationen als das Hauptverfahren angesehen werden.
- Das *Unterbrechungsverfahren* ist für die Erfassung von Ereignissen geeignet, die zu nicht vorhersehbaren Zeitpunkten eintreten oder bei denen zwischen der Anforderung und der Bereitstellung des Signals ein längeres Zeitintervall liegt, während dessen das Erfassungsprogramm des Stationsrechners beim Pollingbetrieb in einer Warteschleife verweilen müßte.
- Das Verfahren des *direkten Speicherzugriffs* ist für die Erfassung größerer Datensätze bei hoher Datenrate geeignet. Die

Daten gelangen dabei nicht erst in den Prozessor des Rechners, sondern werden über eine sog. DMA-Steuerung direkt in einen vorgegebenen RAM-Speicherbereich eingeschrieben. Da während des DMA-Betriebs in der zentralen Verarbeitungseinheit des Rechners entweder kein Programm abgearbeitet werden kann oder zumindest dessen Bearbeitung stark verzögert wird, kommt diese Betriebsart nur dann zur Anwendung, wenn andere Verfahren auf Grund der hohen Datenrate ausscheiden.

Die erforderliche Abtastfrequenz für jede Meßstelle hat sich nach der Variabilität der Meßgröße, der Trägheit des Sensors und dem Zweck der Messung zu richten. Soll sich der Verlauf der Meßgröße ohne Informationsverlust aus den digitalisierten Werten reproduzieren lassen, muß bei der Festlegung der Abtastfrequenz das Abtasttheorem von SHANNON [1949] beachtet werden. Dazu ist die Bedingung

$$\delta t_a \leq \frac{1}{2 \cdot f_{gr}} \quad (43)$$

einzuhalten, in der δt_a den zeitlichen Abstand aufeinanderfolgender Abtastungen der gleichen Meßstelle und f_{gr} die obere Grenzfrequenz des bandbreitenbegrenzten Meßsignals bezeichnen. Zur Festlegung der Bandbreite sind ggf. vor der Sample-and-hold-Schaltung Filter vorzusehen. Nach PAINTING [1991] soll das Abfrageintervall δt_a bei Gebern, die ein Tiefpaßfilterverhalten aufweisen und unerwünschte Frequenzen nicht scharf abschneiden, mit der Zeitkonstante des Gebers τ unter den vorliegenden Erfassungsbedingungen übereinstimmen.

Wegen der sehr unterschiedlichen Trägheiten der Sensoren in meteorologischen Gebern und der verschiedenen oberen Grenzfrequenzen meteorologischer Signale ist es zweckmäßig, für verschiedene Meßgrößen unterschiedliche Abtastfrequenzen zu wählen. Unter den konventionellen meteorologischen Elementen erfordern die Größen Windrichtung und -geschwindigkeit die kürzesten Abfrageintervalle (von 0,1...2 s je nach Ansprechverhalten der Windgeber). Mit δt_a -Werten in der Größenordnung von 6...12 s kommen ventilierte Thermometer sowie Strahlungsmesser aus. Für den größten Teil der meteorologischen Geber ist ein Abfrageintervall von 1 min voll ausreichend. Besonders träge reagieren Erdbodenthermometer in Tiefen > 10 cm, für die eine Abfrage in größeren Zeitintervallen von 10...60 min angemessen sein dürfte. Es empfiehlt sich daher, die Meßgrößen bzw. Geber gruppenweise unterschiedlichen Abfragezyklen zuzuordnen. Dabei sind 3 bis 4 verschiedene Zyklenlängen sicher ausreichend.

Die Länge des Abfrageintervalls hängt übrigens eng mit der Schärfe bestimmter Testverfahren zusammen. So ist die im Abfrageintervall maximal mögliche zeitliche Änderung einer Meßgröße umso kleiner, je geringer das Verhältnis ($\delta t_a/\tau$) ist.

Eine besondere Behandlung erfordern Geber, die von ihrer Adressierung bis zur Bereitstellung der Meßinformationen längere Zeit benötigen. Als lang ist bei der Meßwertfassung bereits ein Zeitraum anzusehen, der 1 ms deutlich überschreitet. Solche Bedingungen treten speziell bei der Erfassung analoger Signale mit integrierenden ADUs auf. Um den Echtzeitbetrieb des Gesamtsystems nicht zu beeinträchtigen, empfiehlt es sich, das Pollingverfahren mit dem Interruptbetrieb zu kombinieren. Nach dem Adressiervorgang wird hierbei die Abfragetask unterbrochen. Das Steuerprogrammssystem aktiviert darauf die z.Zt. lauffähige Task mit der jeweils höchsten Priorität. Wenn der Geber bzw. die Interfaceinheit den Meßwert bereitstellen kann, meldet sie dies durch

Auslösen eines Interruptsignals. Die laufende Task wird unterbrochen und die Interruptserviceroutine veranlaßt, daß die zuvor unterbrochene Erfassungstask fortgesetzt wird. Bereits Integrationszeiten von 100 ms sind ausreichend, um in dieser Zeit mehrere verschiedene Verarbeitungstasks, die keine Wartezeiten erfordern, voll abzuarbeiten.

In die Meßdatenerfassung sind einige Verarbeitungsvorgänge einzubeziehen, die im folgenden Abschnitt näher erläutert werden. Dazu zählen insbesondere

- die Überprüfung der Datenqualität und das Setzen des Gültigkeitsbits,
 - die Bildung der Meßdaten aus den Meßsignalen,
 - die Filterung bzw. Glättung von Meßsignalen,
 - einzelne Rechenschritte bei der Datenverdichtung und -reduktion
- sowie bei manchen Meßsignalen mit stark gekrümmter Kennlinie
- eine Linearisierung (bzw. Umrechnung in physikalische Einheiten).

Da diese Verarbeitungsvorgänge schritthaltend mit der Meßwertfassung erfolgen müssen und die Erfassungstasks nicht merklich verzögern dürfen, können bei diesen Verarbeitungen nur sehr einfache Algorithmen eingesetzt werden, die wenig Rechenzeit erfordern.

8 Meßwertaufbereitung und -vorverarbeitung an automatischen Stationen

Unter dem Begriff *Meßwertverarbeitung* werden heute alle Vorgänge zusammengefaßt, mit denen aus Meßdaten unter Einbeziehung mathematischer Algorithmen und Nutzung von Mitteln der Rechentechnik selbständig aussagekräftigere Informationen gebildet werden. Zu unterscheiden ist hierbei die nachträgliche Ausführung (*Offline-Verarbeitung*), bei der auf Datenträgern gespeicherte Daten einem Rechner zugeführt werden, von der Bearbeitung der unmittelbar aus einem Prozeß zum Rechner gelangenden Daten (*Online-Verarbeitung*). Erfolgt zusätzlich dieser Vorgang schritthaltend mit dem Prozeß, spricht man von *Realtime- oder Echtzeitbetrieb*.

Bereits im Jahre 1961 hat WEBER einen Überblick zum damaligen Stand der von ihm sehr weit gefaßten Meßwertverarbeitung gegeben, wobei für diesen Begriff damals noch keine allgemein verbindliche Definition vorlag. Neben Vorgängen, die heute zur Meßwertfassung gezählt werden, erwähnte er bereits Vorgänge wie die Datenreduktion, Linearisierung der Meßsignale, Anpassung an den Analog/Digital-Umsetzer und Verknüpfungen zu den Verarbeitungsaufgaben. Die Fortschrittsberichte von DITTMANN [1965] und BEST [1988] zu diesem Gebiet lassen die rasche Entwicklung, den zunehmenden Einsatz von Digitalrechnern, die Bedeutung der Verfahren zur Signalanalyse und die zunehmende Verbreiterung der Anwendungen erkennen.

Nur in der Anfangszeit nach Bereitstellung der ersten Meßwertfassungsanlagen war es üblich, Meßsignale ohne Aufbereitung als Zahlenwerte so zu übertragen oder abzuspeichern, wie sie vom Meßsystem erfaßt wurden. Alle Verarbeitungsaufgaben waren dabei den Zentralstellen vorbehalten. Das behinderte nicht nur den Echtzeitbetrieb, sondern erforderte oft

die Übertragung oder Speicherung wesentlich umfangreicherer Datenmengen. Mit der Weiterentwicklung der Digitaltechnik wurden *Prozessorschaltungen* für verschiedene Aufbereitungen wie Umrechnungen, Linearisierungen und Datenverdichtungen geschaffen. Diese Prozessoren waren aber nur für Berechnungen nach einfachen, fest vorgegebenen Algorithmen geeignet und mußten in der Regel jedem zu verarbeitenden Meßsignal fest zugeordnet werden. Der eigentliche Durchbruch hinsichtlich der Meßwertaufbereitung und -verarbeitung an den Stationen kam erst mit dem *Einsatz von Rechnern innerhalb der Meßsysteme*, die den heutigen Stand der Meßwertverarbeitung an den Meßstationen kennzeichnet. Damit wurde es nach PETTIFER [1981] möglich, komplexe Berechnungen bei der Aufbereitung und Verarbeitung der Meßdaten auszuführen.

Der Einsatz von Realtime-Verarbeitungsverfahren an den Meßorten unterliegt einigen Begrenzungen. Einerseits können nur Berechnungen mit den an den Stationen vorliegenden Meßwerten und Parametern ausgeführt werden. Eine netzmäßige Auswertung von Meßergebnissen verschiedener Stationen muß an einer Zentralstelle erfolgen, da andernfalls die dazu erforderlichen Meßdaten zur Station übertragen werden müßten. Andererseits hat sich der Umfang der an den Stationen durchzuführenden Verarbeitungsvorgänge nach den Zeitbedingungen zu richten, da die Verarbeitungsvorgänge den Echtzeitbetrieb – insbesondere die Meßwerterfassung und -aufbereitung – nicht stören dürfen. Der Zeitbedarf für alle in einer längeren Zeitspanne zu erledigenden Verarbeitungen muß deutlich kleiner sein als die Zeit, die im betreffenden Intervall nach Abzug der Summe aller für die Meßwerterfassung und die sonstigen notwendigen Verwaltungs- und Kontrollfunktionen erforderlichen Zeiten verbleibt.

Hinsichtlich der Art der Verarbeitungen an den Stationen kann man folgende Stufen unterscheiden:

- * Datenaufbereitungen
- * Datenverdichtungen und -reduktionen
- * komplexere Datenvorverarbeitungen und
- * Datenformatierungen.

Welche Vorgänge zu diesen Stufen gerechnet werden, soll in den folgenden Abschnitten im Detail erläutert werden.

Auch für verarbeitete Größen muß die Gültigkeit der Information durch ein Statusbit gekennzeichnet werden. Selbst wenn bei der Meßwerterfassung kein Fehler festgestellt wurde, kann es u.U. notwendig sein, die aufbereitete Information als ungültig zu kennzeichnen, wenn z.B. bei einer Wolkenhöhen- oder Sichtmessung die Obergrenze des Meßbereichs überschritten wurde. Gehen in eine Berechnung mehrere Meßwerte ein, wie dies bei Verknüpfungen der Fall ist, so kann das Ergebnis nur dann als gültig angesehen werden, wenn alle Eingangsdaten gültig sind. Bei Datenverdichtungen und -reduktionen über längere Zeitintervalle würde diese Verfahrensweise jedoch zu einer deutlich erhöhten Zahl ungültiger Parameter führen. In solchen Fällen erscheint es gerechtfertigt, eine geringe Zahl ungültiger aber nicht aufeinanderfolgender Werte zuzulassen, ohne daß hierdurch eine unzulässige Beeinflussung der verdichteten bzw. reduzierten Daten eintritt. Die Verdichtungs- bzw. Reduktionsoperationen sind dann nur über die gültigen Daten zu erstrecken (vgl. HÖHNE [1986/87]).

Die innerhalb der genannten Stufen auszuführenden Rechenvorgänge erfordern arithmetische Operationen und zum Teil Funkti-

onsberechnungen. Es sollte daher ein Arithmetikpaket zur Verfügung stehen, das zumindest Routinen für die vier Grundrechenarten mit der notwendigen Wortlänge umfaßt (sofern die CPU des Rechners nicht in der Lage ist, diese Operationen selbst per Hardware auszuführen). Zusätzlich muß dieses Paket Routinen zur Bestimmung der erforderlichen Funktionen – wie Exponential- und Logarithmusfunktion, trigonometrische Funktionen, Quadratwurzel- und Potenzfunktion (nach HORNER-Schema) – umfassen. Obwohl für die reine Meßwertverarbeitung meteorologischer Meßgrößen eine Festkomma-Arithmetik wegen der begrenzten Meßgenauigkeit im Prinzip ausreicht, sollte aus Gründen der Programmiervereinfachung ein Gleitkomma-Arithmetikpaket heute bevorzugt werden. Die Gleitkomma-Arithmetik befreit den Programmierer von der Notwendigkeit häufiger Skalierungen, wie sie bei Rechnungen in Festkomma-Arithmetik zur Vermeidung unnötiger Rundungsfehler unerlässlich sind (vgl. HÖHNE [1989]).

Vorgänge der Meßwertaufbereitung und Datenverarbeitung beeinflussen die Meßdaten ebenso wie die Auswahl der Geber und die Meßbedingungen. Um die Homogenität der Meßreihen und die Vergleichbarkeit der Daten zu wahren, sollten – wie schon Van GYSEGEM [1985] forderte – bei diesen Vorgängen weitgehend *einheitliche Algorithmen* eingesetzt werden. Das setzt eine internationale Standardisierung auch auf diesem Sektor voraus. Bisher existieren hier jedoch nur Ansätze. Ein Leitfaden für die Aufstellung von Algorithmen zur Verarbeitung der Bodenwinddaten in automatischen synoptischen Stationen wurde von PAINTING [1991] der Commission for Instruments and Methods of Observation (CIMO) der WMO vorgelegt. Materialien für andere meteorologische Größen sind in Arbeit bzw. Vorbereitung. DOCKENDORFF & McNAIR [1995] haben am Beispiel der Algorithmen für die Bestimmung der Bedeckungsgrade in verschiedenen Wolkenstockwerken und der Windmittelwerte jedoch auch Grenzen einer internationalen Standardisierung aufgezeigt.

8.1 Datenaufbereitungen

Unter dem Begriff Datenaufbereitungen werden alle Vorgänge zusammengefaßt, die letzten Endes zu Bereitstellung aussagekräftiger Meßwerte führen. Dazu sind im einzelnen folgende Operationen zu zählen:

- Bildung von Meßdaten aus Meßsignalen
- Filterung und Glättung von Meßdaten
- Umrechnung der Meßdaten von technischen in physikalische Einheiten
- Ausschaltung von Einflußgrößen
- Anbringen von Korrekturen
- Prüfung der ordnungsgemäßen Arbeitsweise der Meßwerterfassung und der Datenqualität.

Nicht immer gehört zu jedem Meßsignal eine Meßgröße. Relativ häufig müssen mehrere Signale für die *Bestimmung eines Meßwertes* herangezogen werden. Beispielsweise sind oft Meßsignale auf Referenzsignale zu beziehen, die dann in die Berechnung des Meßwertes mit eingehen. Der so bestimmte Meßwert wird zunächst noch in technischen Einheiten (wie z.B. in Ohmwerten bei Temperaturmessungen mit Widerstandsthermometern) vorliegen.

Besonders wichtig ist die Aufbereitung der Meßwerte bei Meßsignalen, die ein ungünstiges Signal/Rausch-Verhältnis aufweisen. In solchen Fällen sind manchmal spezielle Algorithmen erforderlich. Das trifft beispielsweise bei der Bestimmung der Wolkenhöhe zu. ROBINSON & McKAY [1989] beschrieben einen Algorithmus, bei dem zunächst die Amplitudenwerte der Echosignale bezüglich der Höhe und vorhandener Streuverluste unter der Wolkenuntergrenze korrigiert werden und die Entscheidung über ein Wolkenecho nicht auf Grund einer Echoamplitude, sondern der Häufigkeit der Überschreitung eines Schwellenwertes durch mehrere Werte innerhalb eines Zeit-Höhen-Fensters getroffen wird.

Sind einem Meßsignal Störsignale mit abweichender Frequenzverteilung überlagert, ist ein *Filterungs- oder Glättungsprozeß* angebracht, um die im Meßsignal enthaltenen Störanteile abzutrennen. Die letzteren können zum einen durch den Meßvorgang bedingt sein, z.B. wenn sich eine durch Verstärker, andere elektronische Schaltungen oder ein netzbedingtes Rauschen verursachte Störung dem eigentlichen Meßsignal in der Meßeinrichtung überlagert. Andererseits können Störanteile auch bereits in der zu erfassenden Meßgröße enthalten sein, wenn diese von Vorgängen unterschiedlicher Scales beeinflusst wird und durch kleinräumige, kurzperiodische Vorgänge Frequenzanteile erzeugt werden, die für eine spätere Auswertung uninteressant sind. So wird der Gang der Lufttemperatur nicht nur durch den Tages- und Jahresgang sowie wetterbedingte Einflüsse im synoptischen Scale, sondern auch durch Vorgänge im Mesoscale (wie wechselnde Bewölkung) beeinflusst, die jedoch für die synoptische Beurteilung als Störgrößen in Erscheinung treten.

Mit dem Problem der Glättung und Filterung meteorologischer Datenreihen hat sich ausführlich LEE [1981] beschäftigt. Er diskutierte die Eigenschaften verschiedener Filter (wie BUTTERWORTH-, TSCHEBYSCHJEFF-, GAUSS- und BESSEL-Filter) und stellte sie dem in der Meteorologie häufig benutzten Verfahren der Mittelung gegenüber. In diesem Zusammenhang wurde auch auf die Anwendung rekursiver Filter verwiesen, die sich wegen des geringen Rechenaufwands besonders für Mikrorechner eignen. MANUILOV et al. [1981] haben die Variabilität meteorologischer Größen untersucht und deren Variationen durch ein additiv-multiplikatives Modell eines unstationären Zufallsprozesses wiedergegeben. Sie zogen aus ihren Ergebnissen Schlußfolgerungen und empfahlen, meteorologische Variablen für synoptische Zwecke über einen Zeitraum von 10...20 min zu glätten sowie die Meßfolge von 3 h auf 1 h zu verkürzen.

Als *Filterung* bezeichnet man einen Prozeß, bei dem überlagerte Rauschanteile vom Nutzsignal getrennt werden sollen. Dabei sind folgende Fälle zu unterscheiden:

- die Frequenzanteile von Nutzsignal und Rauschen überschneiden sich nicht oder nicht wesentlich
- dem Nutzsignal sind Störungen bei festen Frequenzen überlagert
- Nutzsignal und Rauschen überdecken sich vollständig oder weitgehend im Frequenzbereich.

In den beiden erstgenannten Fällen besteht die Möglichkeit, das aufgenommene Signal in den Frequenzbereich zu transformieren und dort die Anteile zu löschen die durch Rauschen erzeugt werden bzw. überlagerte Linien abzuschneiden, die durch Störspannungen diskreter Frequenzen bedingt sind. Erhalten bleiben dann

weitgehend nur noch die Frequenzbereiche des Meßsignals. Eine Filterung muß als Rechenoperation nicht unbedingt im Frequenzbereich erfolgen; sie läßt sich auch in Form einer Faltungsoperation im Zeitbereich durchführen. Theoretisch sind dabei alle Daten der Zeitreihe (oder zumindest eine größere Zahl von ihnen) in jede Einzeloperation einzubeziehen. Die erforderliche Rechenzeit ist wegen der großen Zahl notwendiger Multiplikationen erheblich.

Deutlich geringer ist der Aufwand bei einer exponentiellen Filterung, die der Nachbildung eines RC-Filters entspricht. Diese Filterung erzeugt jedoch eine Phasenänderung. Die Nachbildung eines exponentiellen Filters mit analogen Schaltungsmitteln hat den Nachteil, daß durch Drifterscheinungen das Ergebnis insbesondere dann verfälscht werden kann, wenn längere Zeitkonstanten $\tau = RC$ erforderlich sind. Daß sich solche Filter als digitale Rechenschaltung aufbauen lassen, hat u.a. PAINTING [1975b] gezeigt. In modernen automatischen Stationen, die rechnergeführt arbeiten, ist es indessen zweckmäßiger die exponentielle Filterung mit Hilfe der Software zu realisieren. In diesem Falle lassen sich die gefilterten Werte y_n aus den ungefilterten x_n rekursiv nach der Beziehung

$$y_n := \zeta y_{n-1} + (1 - \zeta)x_n \quad (44)$$

berechnen, in der ζ einen echten Bruch bezeichnet, der die Stärke der glättenden Wirkung bestimmt. Der Rechenaufwand ist besonders gering, wenn für ζ ein Zweierbruch gewählt wird, dessen Multiplikationen sich mit Hilfe von Verschiebeoperationen und Additionen ausführen lassen.

Komplizierter wird eine Filterung, wenn sich Nutzsignal und Rauschen im gleichen Frequenzbereich überlagern. Hier hat sich das Verfahren der *Akkumulation* (engl.: averaging) bewährt. Es setzt aber voraus, daß sich der zu untersuchende Prozeß während des Akkumulationszeitraums zumindest quasistationär verhält bzw. beliebig oft reproduzierbar ist. Beim Akkumulationsverfahren wird der Meßvorgang im Zeitbereich N -mal wiederholt und die Einzelwerte jeder Meßreihe werden stützstellenabhängig aufsummiert. Die dabei gebildeten Summenwerte setzen sich ebenfalls aus dem Nutzsignal S_i und dem Rauschen R_i zusammen, wobei i die Stützstelle angibt. Bei der Summation erhöht sich das Nutzsignal proportional N , während der Erwartungswert des Rauschens infolge seines Zufallscharakters nur proportional \sqrt{N} ansteigt. Das Signal-Rausch-Verhältnis des akkumulierten Datensatzes erhöht sich damit nur um den Faktor \sqrt{N} . Die Akkumulationszahl N ist möglichst so zu wählen, daß der verbleibende Rauschanteil das Meßsignal nicht mehr wesentlich stört. Die Programme sind so zu gestalten, daß die Akkumulationszahl vom Nutzer (innerhalb gewisser Grenzen) vorgegeben werden kann.

Als *Glättung* werden hingegen Operationen der Form

$$y_N = \sum_{i=-n}^{+n} a_i \cdot x_{N+i} \quad (45)$$

bezeichnet, bei denen $n \ll N_{max}$ und die Summe über alle a_i gleich 1 ist. Die Einbeziehung von Stützstellenwerten $i > 0$ erfordert die Kenntnis der Einzelwerte x_{N+i} , die nach dem aktuellen Wert x_N liegen. Der geglättete Wert kann daher erst zu einem späteren Zeitpunkt berechnet werden. Ist dies aus Echtzeitgründen nicht zulässig, kann man nur über ein zurückliegendes Stützstellenintervall $-2n \leq i \leq 0$ glätten, was jedoch zu einem Phasenfehler führt. Im einfachsten Fall werden alle Koeffizienten a_i gleich

groß gewählt. Man spricht dann von Averaging. Der geglättete Wert entspricht dem arithmetischen Mittel. Das Averagingverfahren wird in Verbindung mit automatischen Stationen bei einer Vielzahl von Meßgrößen eingesetzt. Die zweckmäßige Wahl des Glättungszeitraums ist von entscheidender Bedeutung für die Aussagekraft der so aufbereiteten Daten.

Das verwendete Filterungs- bzw. Glättungsverfahren und die Zeitdauer bzw. Zeitkonstanten, über die die Operation ausgeführt wird, haben Einfluß auf die Häufigkeitsverteilungen der Meßdaten. MEZÖSI [1984] wies an einigen Beispielen nach, daß die optimalen Glättungsparameter experimentell bestimmt werden müssen, wenn die Meßergebnisse mit denen früherer Messungen unter Nutzung anderer Geber vergleichbar sein sollen.

In der automatischen Station AFMS-2 wurden alle Momentanwerte mit Ausnahme des Windes nach der Gültigkeitsprüfung über eine Zeitspanne von 5 min geglättet. Zur Verbesserung des S/N-Verhältnisses der korrigierten Amplitudenwerte der Echosignale bei Wolkenhöhenmessungen, haben ROBINSON & McKAY [1989] die Werte einer Glättung nach dem Averagingverfahren ebenfalls über 5 min unterzogen.

Um Meßwerte bequem interpretieren zu können, müssen sie in *physikalische Einheiten umgerechnet* werden. Dabei kann jedoch nur selten von einem exakt linearen Zusammenhang zwischen der Abbildungsgröße in technischen Einheiten und der Meßgröße in physikalischen Einheiten ausgegangen werden. Die meisten Sensoren weisen einen nur annähernd linearen, aber keinen exakt linearen Zusammenhang auf. Die Umrechnung in physikalische Einheiten beinhaltet somit zugleich eine *Linearisierung*. Nach PIKE [1981] ist das Verhalten des Sensors durch ein mathematisches Sensormodell zu beschreiben, das den Zusammenhang zwischen dem Abbildungssignal und der gewünschten meteorologischen Größe (sowie eventuell weiteren Einflußgrößen) darstellt. Am günstigsten ist es, wenn dieses Modell aus physikalischen Gesetzmäßigkeiten abgeleitet werden kann und mit einem Minimum an Parametern auskommt, deren Werte im Einzelfall durch Eichungen bestimmt werden müssen. Dabei sind nur die Terme der Beziehung zu berücksichtigen, die zum Erreichen der geforderten Genauigkeit notwendig sind.

Zur Umrechnung sind verschiedene Verfahren nutzbar. Bei nahezu linearem Zusammenhang besteht die Möglichkeit, charakteristische Punkte der Eichkurve in einer Tabelle zusammenzustellen. Die umzurechnenden Meßwerte werden jedoch mit diesen tabellierten Daten nur in den seltensten Fällen übereinstimmen. Es werden dann die beiden benachbarten Wertepaare der Tabelle entnommen, die den umzurechnenden Wert einschließen. Zwischen beiden Punkten wird linear interpoliert, was in den meisten Fällen ausreicht. Bezeichnet man die beiden benachbarten Paare mit x_n, y_n und x_{n+1}, y_{n+1} , wobei die x -Werte die Daten in technischen Einheiten und die y -Werte die Daten in physikalischen Einheiten angeben, so bestimmt sich der interpolierte Wert y aus x nach der Beziehung

$$y = y_n + \frac{x - x_n}{x_{n+1} - x_n} (y_{n+1} - y_n) \quad (46)$$

Diese Methode benutzten u.a. SARANG & SARANG [1989] zur Linearisierung der Kennlinien von Thermoelementen bei der Umrechnung der Thermospannungen in Temperaturen.

Ein allgemeiner anwendbares Verfahren zur Umrechnung von technischen in physikalische Einheiten geht nach HOLUB &

MICHAELIS [1988] von einer Reihenentwicklung mit dem Problem angepaßten sog. Basisfunktionen $f_i(x)$ in der Form

$$y = \sum_{i=0}^n a_i \cdot f_i(x) \quad (46a)$$

aus. Bei zweckmäßiger Wahl der Basisfunktionen kann die Reihe bereits nach wenigen Gliedern abgebrochen werden.

Bei GILL-Anemometern sind die Ausgangssignale der drei Propeller nur angenähert dem Cosinus des Anströmwinkels Θ proportional. Die Sensorkennlinie kann jedoch durch eine Funktion in guter Näherung nachgebildet werden, die außer dem Term $\cos \Theta$ weitere Glieder mit $\sin 2\Theta$ und $\sin 4\Theta$ enthält. MASSMAN & ZELLER [1988] entwickelten hierzu einen rekursiven Algorithmus, der ein Anbringen der Cosinuskorrektion in Echtzeit selbst bei einer Datenrate von 14 s^{-1} für alle drei Windkomponenten ermöglichte und damit auch bei Messungen turbulenter Flüsse anwendbar war.

Bei Meßfühlern, deren Charakteristik nicht zu stark von einer Geraden abweicht, genügt es, die Funktionen $f_i(x) = x^i$ zu setzen. Man gelangt dann zu einem Potenzansatz der Form

$$y = \sum_{i=0}^n a_i \cdot x^i \quad (46b)$$

Bei den Eichkurven der meisten Sensoren wird es ausreichen, n nicht größer als 2 oder 3 zu wählen. Das Polynom kann auf einfache Weise nach dem HORNER-Schema berechnet werden. Die Polynommethode zur Linearisierung und Umrechnung in physikalische Einheiten ist bei automatischen meteorologischen Stationen wiederholt angewendet worden, so u.a. von Von HOLLEUFFER-KYPKE et al. [1984] sowie von HÖHNE et al. [1986b]. PIKE [1981] schlug vor, die Koeffizienten a_i in einem EEPROM-Speicher des Gebers abzulegen und die Umrechnung in physikalische Einheiten mittels eines gebereinigten Mikroprozessors vornehmen zu lassen. Bei einer solchen Vorgehensweise sind die Geber ohne Programmänderung austauschbar.

Bei vielen Meßverfahren ist das Meßergebnis nicht allein von der zu bestimmenden Größe sondern in deutlich geringerem Maße auch von anderen abhängig, die als Einflußgrößen bezeichnet werden. Die *Ausschaltung der Einflußgrößen* erfordert, aus einem mathematisch-physikalischen Sensormodell die durch sie bedingten Effekte abzuleiten. Die Einflußgrößen-Korrektion erfolgt durch Verknüpfung der Meßgröße mit den Meßwerten der Einflußgrößen. Wegen ihres wesentlich geringeren Einflusses auf das Meßergebnis können hier meist sehr einfache Korrektionsformeln verwendet werden.

Auf jeden Fall sollte die Möglichkeit zum *Anbringen von Korrekturen* vorgesehen werden. Dabei ist zwischen additiven und multiplikativen Korrekturen zu unterscheiden. Additive Korrekturen sind kleine Beträge Δy , die gemäß der Beziehung

$$y_{ka} = y + \Delta y \quad (47a)$$

mit positivem oder negativem Vorzeichen zum Meßwert zu addieren sind. Solche Korrekturen sind z.B. bei Temperaturen und Drücken zweckmäßig. Multiplikative Korrekturen sind solche, die mit dem jeweiligen Meßwert gemäß

$$y_{km} = y \cdot (1 + \xi) \quad (47b)$$

zu multiplizieren sind. Dabei ist stets $|\xi| < 1$. Auch hier kann ξ positives oder negatives Vorzeichen annehmen. Multiplikative Korrekturen sind vor allem bei Meßgrößen notwendig, die annähernd logarithmisch normalverteilt sind. Dazu zählen beispielsweise Strahlungsgrößen und die Windgeschwindigkeit. In komplexen Fällen wird man beide Korrekturen vorsehen müssen, wobei es jedoch dann ausreicht, für Δy und ξ konstante Werte vorzusehen.

Die ordnungsgemäße *Arbeitsweise der Meßeinrichtung* kann anhand von Statusinformationen geprüft werden, die vom Geber und evtl. dem Interface gebildet wurden. Die *Datenqualität* läßt sich an den automatischen Stationen nur an Hand einfacher Tests überwachen. Als Prüfgrößen zur Beurteilung der Fehlerfreiheit der Meßwerte werden häufig Grenzwerte und maximale Änderungen der Meßdaten herangezogen, wie dies u.a. auch PAINTING [1991] empfohlen hat. Als Grenzen lassen sich dabei nur klimatologische Maximal- und Minimalwerte nutzen. PONTING & SARSON [1984] haben solche Grenzwerte für die meteorologischen Variablen Luftdruck, Lufttemperatur, Taupunkttemperatur und Windgeschwindigkeit angegeben, die für die Bedingungen in und um Großbritannien gelten. Sie zeigen, daß die Grenzwerttests relativ unscharf sein müssen. Bei manchen Größen ließe sich die Schärfe dieser Tests etwas steigern, wenn die Grenzwerte in Abhängigkeit von der Jahreszeit unterschiedlich gewählt werden können.

Erfolgen die Messungen in kurzen Zeitspannen, die die Zeitkonstanten der Geber nicht überschreiten, kann die Differenz aufeinanderfolgender Meßwerte eine deutlich schärfere Prüfgröße bilden. Dieser Test ist jedoch nicht in der Lage, durch Drift hervorgerufene Fehler nachzuweisen. Ggf. kommen außer den genannten noch Plausibilitätsprüfungen in Betracht. Zum Beispiel müssen alle Meßgrößen innerhalb des durch Maximal- und Minimalwert der aktuellen Stunde gegebenen Bereichs liegen. Auch Zusammenhänge mit anderen Meßgrößen (z.B. zwischen Lufttemperatur in 2 m Höhe und am Erdboden oder zwischen Taupunkt- und Lufttemperatur) können hierfür genutzt werden.

Natürlich ist es mit den relativ einfach zu haltenden Testverfahren nicht möglich, alle Fehler zu erkennen oder gar auszumerzen. Den in Echtzeit an der Station durchgeführten Prüfungen der Datenqualität sollte sich daher stets eine weitere anschließen, die an den Auswertezentralen unter Nutzung der Daten von Nachbarstationen durchzuführen sind.

Nacheichnungen von Meßeinrichtungen lassen sich bei im Einsatz befindlichen automatischen Stationen unter Feldbedingungen nur in Form von Vergleichsmessungen durchführen, wobei geeignete Referenzgeräte zur Verfügung stehen müssen. PIKE [1984] hat festgestellt, daß sich bei solchen Vergleichen in ungünstigen meteorologischen Situationen überraschend große Abweichungen ergeben können. Er zog daraus den Schluß, daß zuverlässige Vergleichsergebnisse nur aus Mittelwerten über hinreichend lange Meßzeiten gewonnen werden können. Keinesfalls sollten auf Grund der Ergebnisse vereinzelter Vergleichsmessungen Korrekturen geändert werden.

8.2 Datenverdichtungen und -reduktionen

Datenverdichtungen und -reduktionen dienen der Verminderung des Umfangs der Meßdaten. Sie werden gerade bei der Vorverarbeitung von Meßgrößen in automatischen Stationen häufig herangezogen, da sich der Rechenaufwand in Grenzen hält und sich diese Operationen daher in Echtzeit abarbeiten lassen. Bereits

bevor geeignete Mini- oder Mikrorechner zur Verfügung standen, sind Datenverdichtungen und -reduktionen an automatischen Stationen mit Hilfe von Prozessorschaltungen ausgeführt worden. HÖHNE [1970a] hat Schaltungen beschrieben, die von frequenzanalogen Signalen oder Impulsfolgen ausgehen und zeitliche Integrationen, Mittelwertbildungen, Extremwertbestimmungen sowie den Nachweis von Schwellenwertüberschreitungen zulassen.

Datenverdichtungen und Datenreduktionen ermöglichen eine Verringerung der für die Datenarchivierung erforderlichen Speicherkapazität. Dies geht jedoch u.U. auf Kosten des Informationsgehalts. Es kommt daher darauf an, die Verarbeitungsintervalle so zu wählen, daß sich der Informationsverlust in Grenzen hält. POWELL [1992] wies auf solche Informationsverluste bei den Windmeßdaten des automatischen Bodenbeobachtungssystem ASOS hin und empfahl alternative Erfassungs- und Archivierungsstrategien, die nur geringfügig höhere Kosten verursachen.

Von *Datenverdichtungen* spricht man, wenn auf statistischem Wege neue Daten gebildet werden, in die die Gesamtzahl aller erfaßten Einzeldaten eingehen. Zu dieser Klasse gehören u.a.

- zeitliche Integration
- Mittelwertbildungen
- Streuungsberechnungen
- Häufigkeitsauszählungen
- Berechnung von Auto- und Kreuzkovarianzfunktionen bzw. -korrelationsfunktionen.

Die Summation einer Meßgröße über die Zeit entspricht einer *zeitlichen Integration*. Diese Operation läßt sich am bequemsten ausführen, wenn die Meßsignale als Impulsfolgen oder frequenzanalogue Signale vorliegen, weil dann die Integration einfach auf ein Aufsummieren in einem Zähler zurückführbar ist. Analoge Signale werden zweckmäßig einem Spannungs/Frequenz-Wandler zugeführt und können dann ebenso weiterverarbeitet werden. Bei rechnergeführten Meßsystemen wird die Integration auf das Summieren der in ausreichend kurzen Zeitabständen abgetasteten Meßwerte zurückgeführt.

Mittelwerte werden aus verschiedenen Gründen berechnet. Für klimatologische Zwecke dienen sie zur Wiedergabe der mittleren Verhältnisse. Für synoptische Zwecke werden nach BRADLEY & NADOLSKI [1985] zeitliche Mittelwerte bestimmt, um damit eine höhere Repräsentativität der Meßdaten für ein mehr oder weniger großes Gebiet zu erreichen. In diesem Falle kommt es auf eine zweckmäßige Festlegung des Verdichtungszeitraums an. Andererseits werden Mittelwerte verwendet, um zufällige Schwankungen stark zu reduzieren oder beim Meßvorgang eingestreutes Rauschen unwirksam zu machen. Es können verschiedene Mittelwerte berechnet werden. Meist wird das *arithmetische Mittel*

$$y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (48a)$$

bestimmt, das für annähernd normal verteilte Größen die geeignetste Kenngröße darstellt. Zur Berechnung des arithmetischen Mittels gibt es auch ein rekursives Verfahren. Die dafür gebräuchliche Beziehung lautet (vgl. PAINTING [1991])

$$\bar{y}_n = \frac{1}{n}(y_n - \bar{y}_{n-1}) + \bar{y}_{n-1} \quad (48b)$$

Zur Charakterisierung logarithmisch normalverteilter Größen eignet sich u.U. das *geometrische Mittel* besser. Die Mittelung kann für aufeinanderfolgende oder für gleitende Zeitintervalle erfolgen.

VENUGOPAL & SRIVASTAVA [1977] beschrieben eine Rechenschaltung zur Bestimmung der 2 min-Mittel der Windgeschwindigkeit, welche die Mittelwerte alle 10 s aktualisierte. Die unteretzte Impulsfolge eines Schalenanemometers mit photoelektrischer Abtastung wurde dazu jeweils über 10 s aufsummiert und die dabei gewonnene Summe einem von 12 Speichern übergeben. Alle 120 s wurden die Speicherinhalte mittels eines Adders aufsummiert. Durch zweckmäßige Wahl des Teilverhältnisses des Untersetzers hinter dem Windgeber konnte ein Zahlenwert gebildet werden, der dem 2 min-Mittel in der Einheit Knoten entspricht.

Eine Bestimmung des arithmetischen Mittels kann im allgemeinen durch Aufsummiering der Meßwerte über einen vorgesehene Mittelungszeitraum erfolgen. Am Ende des Zeitintervalls wird dann die Summe durch die Zahl der Meßwerte geteilt. Sollen gleitende Mittelwerte mit einem Computer fortlaufend berechnet werden, sind die jeweils letzten n Werte, über die die Summe zu bilden ist, in einem Speicherbereich abzulegen. Immer dann, wenn ein neuer aktueller Wert anfällt, ist dieser zur Summe zu addieren und der älteste Wert zu subtrahieren, bevor die neu gebildete Summe durch die Stützstellenzahl n dividiert wird. Anschließend ist der älteste Wert aus dem Speicherbereich zu entfernen und der aktuelle Wert hinzuzufügen.

Zweidimensionale Daten, die als Betrag und Winkel oder als zwei Komponenten gemessen werden, erfordern bei der statistischen Analyse eine besondere Vorgehensweise. Auf geeignete statistische Methoden ist FISHER [1993] in einer Monographie ausführlich eingegangen.

So ergeben sich bei der *skalaren Mittelung der Windrichtung* Probleme, weil bei dieser Meßgröße das Ende des Meßbereichs in den Anfang übergeht. Bereits bei der schaltungstechnischen Lösung des Mittelungsproblems waren daher besondere Lösungen erforderlich, bei denen mit Hilfe eines Getriebes zwei oder drei Umdrehungen der Windfahne auf dem Umfang eines Abtastsystems abgebildet wurden (vgl. MOSES & KULHANEK [1962] sowie HÖHNE [1970c]). Soll die Bildung des Windrichtungsmittels mit Hilfe der Software erfolgen, sind im Prinzip zwei Lösungswege gangbar.

Beim ersten muß die Windrichtung in so kurzen Zeitabständen abgetastet werden, daß die Windfahne in der Zwischenzeit um nicht mehr als 90° ausschlagen kann. Bei jeder neuen Meßwertabfrage wird die Änderung der Meßgröße gegenüber dem vorangehenden Wert geprüft. Ist der Betrag der Änderung $> 180^\circ$, muß von einer Überschreitung der Unstetigkeitsstelle ausgegangen werden (die ohne Beeinträchtigung der Allgemeingültigkeit der Überlegungen in der Nordrichtung angenommen werden kann). In diesem Falle sind je nach dem Vorzeichen der Differenz zur neuen Windrichtung entweder 360° hinzuzuzählen oder abzuziehen. Mit den so gewonnenen Daten kann in die normale Mittelungsroutine eingetreten werden. Lediglich am Ende des Mittelungszeitraums ist nach der Division durch die Zahl der Meßdaten zu prüfen, ob das Ergebnis im Zahlenbereich $0 \dots 360^\circ$ liegt. Ist der Wert $< 0^\circ$ bzw. $> 360^\circ$, sind solange 360° hinzu-

zählen bzw. zu subtrahieren, bis das Ergebnis im genannten Zahlenbereich liegt. Dieses Verfahren wurde z.B. von REYNOLDS [1983] und HÖHNE et al. [1986b] genutzt.

Beim zweiten Verfahren werden zur erfaßten Windrichtung in Winkelgrad ϑ die Sinus- und Cosinuswerte bestimmt. Die Werte der beiden trigonometrischen Funktionen werden für sich aufsummiert und am Ende des Mittelungsintervalls durch die Zahl der gültigen Meßwerte dividiert. Aus den so gebildeten beiden Mittelwerten läßt sich mit Hilfe der Arcus-Tangens-Funktion die mittlere Windrichtung bestimmen (vgl. HAUGEN [1963]). Der gleiche Algorithmus kann in wenig veränderter Form auch zur Bestimmung des vektoriellen Windmittels genutzt werden. In diesem Falle sind die beiden Komponenten des Windvektors v_x und v_y getrennt zu mitteln. Aus den Ergebnissen lassen sich das vektorielle Windgeschwindigkeits- und Windrichtungsmittel nach den Formeln

$$|\bar{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad \text{und} \quad \bar{\vartheta} = \text{arc tg} \left(\frac{v_y}{v_x} \right) \quad (49)$$

errechnen. Beide Werte können von den skalar bestimmten Mittelwerten leicht abweichen. Von REYNOLDS [1983] wurde eine Schaltung angegeben, mit der sich die vektoriell gemittelte Windgeschwindigkeit in Bojen ohne Mikrorechner bestimmen läßt. Dabei mußten vor der Mittelung die Ausgangssignale der Windfahne und des Kompasses addiert werden, um die Windrichtung auf die Nordrichtung zu beziehen. Die Sinus- und Cosinuswerte waren als Tabellen in einem ROM-Speicher abgelegt.

Zeitlichen Integrationen und Mittelwertbildungen muß streng genommen die Linearisierung vorausgehen, weil andernfalls der Mittelwert der Abbildungsgröße und nicht der eigentlichen Meßgröße gebildet wird. Diese Vorgehensweise ist jedoch gegenüber der umgekehrten Reihenfolge beider Operationen mit einem erheblich höheren Rechenaufwand verbunden. Solange die Sensor-kennlinie nur wenig von einer Geraden abweicht und die zeitliche Summation oder Mittelung über kürzere Zeitabschnitte erfolgt, in denen sich die Meßgröße nur innerhalb eines beschränkten Intervalles bewegt, dürfte der Fehler, der bei der Summation über die Abbildungsgröße mit nachträglicher Umrechnung in physikalische Einheiten entsteht, nur unbedeutend sein. Insofern ist es oftmals zweckmäßig, bei kürzeren Mittelungszeiträumen die Integration oder Mittelung der Umrechnung in physikalische Einheiten voranzustellen.

Streuungen charakterisieren die Schwankungsbreite einer Variablen. Sie werden insbesondere bei Meßgrößen berechnet, die – wie der Wind oder viele der mit Fernmeßverfahren bestimmten Größen – starken kurzperiodischen Schwankungen unterliegen. So hat HAUGEN [1963] die Streuung der Windrichtungsschwankungen nach einer Näherungsmethode bestimmt, um Informationen über die Turbulenz zu gewinnen. Das dabei angewandte Verfahren gab bis zu Streuungswerten von 30° ausreichend genaue Ergebnisse. Bei anderen meteorologischen Größen, die normal verteilt sind, liefert die Streuung Aussagen über die Häufigkeitsverteilung. ROTH [1965] behandelte ein Gerät zur Untersuchung kurzfristiger Schwankungen meteorologischer Parameter, das geeignet war, Streuungsquadrate und Kovarianzen zu bestimmen. Der dazu entwickelte Prozessor arbeitete bereits digital, beruhte aber noch weitgehend auf Relais-technik. Heute bietet es sich an, solche Rechnungen per Software mittels eines Rechners zu erledigen, wobei die Streuungsberechnungen durchaus im Realtime-Betrieb oder zumindest unter echtzeitnahen Bedingungen erfolgen kann.

Histogramme werden für Größen bestimmt, deren statistische Verteilung nicht bekannt ist oder von der Normalverteilung abweicht. Um Häufigkeiten berechnen zu können, müssen Klassengrenzen vorgegeben, die Meßwerte den Klassen zugeordnet und die Anzahl der Meßwerte in jeder Klasse aufsummiert werden. Histogramme, die sowohl tabellarisch als auch graphisch dargestellt werden können, geben einen besseren Überblick über die Verteilung einer Größe als Mittelwert und Streuung. Bereits 1957 berichteten MENDE sowie VOGT & ZIMMER über Geräte zur Ermittlung der Summenhäufigkeitsverteilung von Meßwerten bei vorgegebener Klassenlage und -breite und deren Anwendung für analoge und diskrete Meßsignale. Die Summenhäufigkeiten in den einzelnen Klassen wurden durch das Zünden von Thyratrons erfaßt und in elektromechanischen Zählwerken gespeichert.

Bei der Ableitung des Bedeckungsgrades aus Wolkenhöhenmessungen wird in Kanada nach ROBINSON & McKAY [1989] sowie DOCKENDORFF & McNAIR [1995] ein Algorithmus verwendet, der auf einer Clusterbildung beruht und in der Lage ist, die relative Häufigkeit von Wolkenechos in bis zu 4 Wolkenstockwerken zu bestimmen. Ein ähnliches Verfahren wird nach NADOLSKI & GIFFORD [1995] in den USA genutzt. Wegen der begrenzten Reichweite optischer Wolkenhöhenmesser wurden Meßergebnisse aus der Verarbeitung ausgeschlossen, die über der Obergrenze dieser Geräte lagen.

Korrelations- und Kovarianzfunktionen werden hauptsächlich für Aufgaben der Signalanalyse eingesetzt. Mit Autokorrelationsfunktionen lassen sich innere Zusammenhänge in einer Zeitreihe (wie die Erhaltungseigung und Periodizitäten) nachweisen. Kreuzkorrelationsfunktionen werden genutzt, um Zusammenhänge zwischen verschiedenen Zeitreihen zu ermitteln. Die genannten Funktionen, die deterministische Zusammenhänge bei stochastischen Prozessen aufdecken können, werden hauptsächlich in Verbindung mit Fernmeßsystemen und Forschungsstationen, weniger dagegen bei automatischen Wetterstationen für einen operativen Einsatz genutzt.

MESTAYER et al. [1990] haben gezeigt, daß sich schnell ansprechende Sensoren, die meist nur eine beschränkte Eichkonstanz aufweisen, mit Hilfe von Sensoren mit geringer Ansprechzeit aber hoher Langzeitkonstanz als Referenzsensoren betreiben und mit deren Meßdaten dynamisch eichen lassen. Sie zeigten, daß die dazu notwendigen Berechnungen oft zweckmäßiger im Frequenzbereich durchgeführt werden. Sollen sie in Echtzeit erfolgen, sind schnelle FOURIER-Prozessoren (sog. FFT-Prozessoren) erforderlich, die unmittelbar in moderne Tischrechner als Kartenbausteine einsteckbar sind.

Zu den *Datenreduktionen* zählt man Operationen, bei denen aus einem mehr oder weniger umfangreichen Datenkollektiv nur einige charakteristische ausgewählt werden. Hierzu gehören die Extremwerte (Maximum und Minimum), mit denen in der Meteorologie häufig gearbeitet wird. Auch die Bestimmung des Medianwertes muß hierzu gezählt werden. Die genannten Operationen lassen sich auf Vergleichsoperationen zurückführen und benötigen daher wenig Rechenzeit.

Die Angabe von verdichteten und reduzierten Werten hat nur Sinn, wenn zugleich die Zeitperiode und die Meßintervalle mitgeteilt werden, auf die sich diese Daten beziehen.

Das Maximum der Windgeschwindigkeit für einen Bezugszeitraum wird im Routinebetrieb häufig zur Charakterisierung der Böigkeit benutzt, da es deutlich weniger Rechenaufwand erfordert

als die Bestimmung der Streuung. BELJAARS & WIERINGA [1984] haben empfohlen, bei Windmessungen an synoptische Stationen über eine Zeitdauer von jeweils 10 min fortlaufend den arithmetischen Mittelwert, die Standardabweichung und die Windspitze zu bestimmen. Sie wiesen aber darauf hin, daß die beiden letztgenannten Größen von den charakteristischen Kenndaten des Windmeßsystems und der Meßwerterfassung abhängig sind. Auf theoretischem Wege zeigten sie, daß sich für jedes Windmeßsystem eine Böenlänge definieren läßt. Nach angegebenen Formeln bzw. Nomogrammen lassen sich Streuung und Windspitze bei Geräten mit unterschiedlichen Kenndaten auf einheitliche Bedingungen umrechnen und damit vergleichbar machen.

Langzeit-Meßaufgaben liefern mitunter eine extrem hohe Datenmenge, deren Abspeicherung oder Übertragung Schwierigkeiten bereitet. Eine Online-Datenverdichtung ist z.B. dann nicht nutzbar, wenn der ursprüngliche Signalverlauf nachträglich rekonstruiert werden muß. In solchen Fällen bleiben nur die Verfahren der *Datenkompression*.

Eine Methode zur Datenkompression, die prinzipiell ohne *a-priori*-Wissen über die Signalform auskommt, ist von WIESBAUER [1996] beschrieben worden. Der Signalverlauf wird dabei in Intervalle zerlegt, die von Extrem- oder Wendepunkten begrenzt werden. Bei überlagerten Rauschsignalen besteht die Möglichkeit, eine zu große Zahl von Abschnitten durch Einführung einer Toleranz bei der Festlegung der Intervallgrenzen zu vermeiden. Jeder Abschnitt wird durch seinen Anfangs- und Endpunkt sowie das arithmetische und quadratische Mittel charakterisiert. Die beiden Mittelwerte lassen Rückschlüsse auf die Signalform zu. Vorgesehen wurden von WIESBAUER die Sinus-, Exponential-, Parabel- und Kreisform. Läßt sich der Signalverlauf im Intervall keiner der genannten Formen zuordnen wird er durch eine Gerade approximiert. Für jedes Intervall sind der Anfangspunkt, die Signalform und ein Mittelwert oder bei nicht identifizierter Signalform zwei Werte der Näherungsgeraden abzuspeichern. Das Verfahren ist echtzeitfähig und erlaubt bei einem Personalcomputer mit 80360-Prozessor Abtastraten von etwa 1 kHz, bei einem Signalprozessor sogar von 50...100 kHz.

8.3 Datenvorverarbeitungen

Die Datenvorverarbeitung (pre-processing) umfaßt eine Reihe von Operationen, die ebenfalls online und in Echtzeit ablaufen müssen. Dazu zählen insbesondere:

- Verknüpfungen mehrerer Meßdaten
- Verknüpfungen mit festen Parametern
- Berechnungen zur graphischen Ausgabe
- Transformationen.

Verknüpfungen mehrerer Meßdaten sind immer dann notwendig, wenn eine Größe nicht direkt gemessen werden kann und aus mehreren Meßdaten durch Rechnung bestimmt werden muß. Dabei kann es sich um Daten der gleichen Meßgröße zu unterschiedlichen Zeiten handeln (wie z.B. bei der Bestimmung der Luftdrucktendenz) oder auch um Daten unterschiedlicher Meßgrößen. Die Verknüpfungen können in einfacheren Fällen nach einer vorgegebenen *funktionalen Beziehung* gemäß einer mathematischen Formel erfolgen, in die manchmal auch analytische Funktionen bestimmter Variablen eingehen müssen. Verknüpfungen dieser Art sind erforderlich, wenn die Luftfeuchte durch verschiedene Maßzahlen ausgedrückt werden soll (vgl. HÖHNE [1987]).

Verknüpfungen mit festen Parametern treten beispielsweise auf, wenn die an einer Station gemessenen Winddaten nicht in der genormten Aufstellungshöhe von 10 m erfaßt werden. In diesem Falle kann die Windgeschwindigkeit v_{norm} in Normhöhe nach PAINTING [1991] unter der Annahme eines logarithmischen Profils nach einer Zahlenwertgleichung der Form

$$v_{norm} = v_z [0,233 + 0,656 \log_{10}(z + 4,75)]^{-1} \quad (50)$$

aus der in der Höhe z gemessenen angenähert berechnet werden. Die Reduktion des Luftdrucks auf Meeresebene ist eine Verknüpfung mit mehreren Meßgrößen (Luftdruck an der Station, Lufttemperatur und Luftfeuchte) sowie den Parametern der Höhe über NN und der Schwerebeschleunigung. Sie kann nach der barometrischen Höhenformel erfolgen, wobei für die Luftschicht zwischen Stationshöhe und Meeresebene plausible Annahmen über die Temperaturverteilung gemacht werden müssen. Meist wird von einem konstanten vertikalen Temperaturgradienten γ ausgegangen. Unter mitteleuropäischen Verhältnissen ist ein mittlerer Wert von $\gamma = 5$ K/km angemessen. Bezeichnet man den an der Station gemessenen Luftdruck mit p_S und den auf das Meeresebene reduzierten mit p_N , so gilt

$$p_N = p_S \cdot \exp \frac{z_S}{\tilde{H} \left[1 + \frac{T_v + (\gamma/2)z_S}{T_o} \right]} \quad (51)$$

wobei z_S die Stationshöhe über NN, \tilde{H} die Höhe der homogenen Atmosphäre ($\tilde{H} = 7990$ m), T_v die virtuelle Temperatur an der Station bezeichnen und $T_o = 273,15$ K ist. In die virtuelle Temperatur geht neben der Lufttemperatur T_L (in °C) der Dampfdruck e ein. Sie berechnet sich nach der Formel

$$T_v = T_L + (T_o + T_L) \frac{0,376 \cdot e}{p_s - 0,377 \cdot e} \quad (52)$$

Nicht alle Zusammenhänge lassen sich analytisch formulieren. Dann ist nach einem Modell ein Algorithmus zu erarbeiten, nach dem die Verknüpfung vorgenommen werden kann. Solche Verknüpfungen treten insbesondere bei komplexeren Größen, wie der Art der Luftdruckänderung, dem Verhalten des Windes, der Niederschlagsart, den Bedeckungsgraden in verschiedenen Wolkenstockwerken und den Sichtbedingungen auf und sind in Verbindung mit automatischen Wetterstationen z.B. von BERGMAN et al. [1985], HÖHNE [1989], DOCKENDORFF & McNAIR [1995] sowie von NADOLSKI & GIFFORD [1995] beschrieben worden. Auf die für die Bestimmung des gegenwärtigen Wetters und des Wetters der vergangenen 3 h wurde bereits in Verbindung mit den Gebern zur Erfassung von Wettererscheinungen im Abschnitt 2.2.10 hingewiesen. Dort sind auch Hinweise auf Literaturstellen zu finden, die sich mit solchen Algorithmen befassen. CHISHOLM [1979] berichtete bereits über einen Entscheidungsbaum, der auf Grund der Messungen mehrerer Sensoren Aussagen zum Wettertyp zulassen sollte. MEZÖSI et al. [1985] beschrieben einen Algorithmus zur Identifizierung von 16 Wetterzuständen an Hand eines Ablaufplans. Bisher ist es nur möglich, die Codezahlen für einige wichtige Wettererscheinungen, jedoch nicht für alle im synoptischen Wetterschlüssel vorgesehenen, automatisch zu gewinnen (vgl. MEZÖSI [1987]).

In der "Guidance Specification for a General Purpose Automatic Weather Station" der "Observation and Engineering Branch" des "Australian Weather Bureau" [1997] wurde gefordert, nach einem Modell zu bestimmende Daten nicht an der Station zu berechnen, sondern die in die Berechnung eingehenden Daten in den zu archivierenden Datensatz einzufügen, um die Berechnung der Modellgrößen dem jeweiligen Nutzer zu überlassen, wobei dann u.U. auch unterschiedliche Algorithmen herangezogen werden könnten. Dieser Forderung lag der Gedanke zugrunde, daß Modelle häufig einer Weiterentwicklung unterliegen. Ein vollständiger Verzicht auf die Bildung von modellbezogenen Größen an den Stationen bringt aber auch Nachteile mit sich. In automatischen Stationen laufende Berechnungsprozeduren können auf Daten zugreifen, die vom Meßsystem in kurzen Zeitintervallen erfaßt und nur kurzzeitig gespeichert werden, in die Meldung selbst aber höchstens als starke verdichtete Werte eingehen. In solchen Fällen wäre eine nachträgliche Bestimmung dieser Größen nicht möglich, weil die dazu erforderlichen Daten nicht mehr vorliegen. Würden hingegen alle für die spätere Bestimmung nach einem Algorithmus erforderlichen Daten in die Meldung aufgenommen, wäre dies mit einem deutlich erhöhten Aufwand bei der Übertragung und Speicherung der Meldungen verbunden.

Graphische Darstellungen können in sehr unterschiedlicher Form erfolgen. Genannt seien hier nur Diagramme von Meßgrößen als Funktion der Uhrzeit, der Frequenz oder einer anderen Meßgröße, Darstellungen in kartesischen Koordinaten oder Polarkoordinaten sowie perspektivische Darstellungen dreidimensionaler Zusammenhänge. Beispiele für einige zwei- und dreidimensionale Darstellungsformen sind u.a. bei JAEGER [1983] zu finden. Bei allen Diagrammen sollen zur Erhöhung der Übersichtlichkeit neben den Meßwertverläufen die Koordinaten mit Teilungen und Bemaßungen eingetragen werden. Bei der Wiedergabe von Datensätzen mit diskreten Werten in Form von Kurven ist es erforderlich, Zwischenwerte für eine "glatte" Kurvendarstellung zu interpolieren. Eine lineare Interpolation befriedigt insbesondere bei streuenden Einzelwerten nicht. Interpolationen 2. Grades erlauben wohl Maxima und Minima im Kurvenverlauf darzustellen, nicht jedoch Wendepunkte, für die eine Interpolation 3. Grades erforderlich ist.

Je nachdem, ob es sich um eine zweidimensionale oder eine dreidimensionale Darstellung handelt, müssen aus den Meßinformationen die Kurven oder Flächen bestimmt werden, die in den bildlichen Darstellungen erscheinen sollen. Dazu sind intensive Umrechnungen, manchmal auch Transformationen notwendig.

Programme für die Ausgabe graphischer Darstellungen in unterschiedlichen Formen sind oft relativ umfangreich und erfordern schnell arbeitende Rechner insbesondere dann, wenn bewegte Bilder gezeigt werden sollen. Moderne Softwaresysteme sind u.a. von KUSCH & POGODA [1995], PIONTEK [1995], RAASCH & GROSS [1992] sowie von KOPPERT [1995] beschrieben worden. Bei den beiden letztgenannten handelt es sich um Systeme zur Animation, d.h. Visualisierung in bewegten Bildern, bei denen dreidimensionale Darstellungen als Funktion der Zeit als vierter Dimension darstellbar sind. Die genannten Systeme wurden für eine direkte Ausgabe graphischer Informationen jedoch nicht primär von automatisierten Meßsystemen sondern von zentralen Datenverarbeitungssystemen entwickelt.

Transformationen werden z.B. beim Übergang vom Zeit- in den Frequenzbereich notwendig, wenn die spektrale Verteilung der

Meßdaten interessiert. Transformationen sind häufig bei der Auswertung der Messungen an Forschungsstationen, aber auch bei der Aufbereitung bestimmter Fernmeßverfahren notwendig.

Die wichtigste Transformation, die in Verbindung mit meteorologischen Zeitreihen vorgenommen werden muß, ist die *FOURIER-Transformation*. In selteneren Fällen interessiert auch die *LAPLACE-Transformation*. In jedem Falle wird dabei von Datensätzen ausgegangen, so daß die Bedingungen für diskrete Transformationen gelten, bei denen Integrale durch Summen ersetzt werden und bei den Rechnungen im allgemeinen von äquidistanten Stützstellenwerten ausgegangen wird. Die dabei vorzunehmenden Berechnungen sind sehr rechenzeitaufwendig, insbesondere wenn längere Zeitreihen zu verarbeiten sind. Es werden daher besondere Transformationsalgorithmen herangezogen, welche weniger Elementaroperationen erfordern. Dazu gehört z.B. der Algorithmus der schnellen *FOURIER-Transformation* (abgekürzt: FFT) nach COOLEY & TUCKEY [1965], der in verschiedenen Varianten eingesetzt werden kann. Das FFT-Verfahren setzt die Anzahl der Multiplikationen von N^2 auf $N \cdot \log_2 N$ herab, wenn N die Stützstellenzahl im Zeitbereich bezeichnet. Insbesondere bei hohen Stützstellenzahlen wird dabei wesentlich an Rechenzeit eingespart, wenn die Multiplikationen wie üblich den größten Teil der Rechenzeit bei der Transformation beanspruchen. Bei einer Stützstellenzahl von $N = 1024$ verringert sich die Zahl der Multiplikationen von 1 048 576 auf 10 240; dies ist weniger als 1/100.

Um bei *FOURIER-Transformation* einer Zeitreihe das gewünschte Spektrum mit dem erforderlichen Frequenzbereich Δf_B und der notwendigen spektralen Auflösung δf zu erhalten, müssen die Relationen beachtet werden die zwischen den Parametern im Zeit- und denen im Frequenzbereich bei der diskreten *FOURIER-Transformation* bestehen. Der Umfang des Frequenzbereichs wird durch die Datenrate im Zeitbereich festgelegt und beträgt

$$\Delta f_B = \frac{1}{2 \cdot \delta t_a} \quad (53)$$

wenn δt_a den zeitlichen Abstand zweier aufeinanderfolgender Messungen bezeichnet. Für die spektrale Auflösung ist hingegen nach der Beziehung

$$\delta f = \frac{1}{(N/2) \cdot 2\delta t_a} = \frac{1}{\Delta t_m} \quad (54)$$

die Länge der zu transformierenden Zeitreihe Δt_m maßgebend. Bereits bei der Festlegung der Parameter für die Meßwerterfassung müssen demnach die Anforderungen beachtet werden, die seitens des zu gewinnenden Spektrums zu stellen sind!

Müssen Transformationen in Echtzeit vorgenommen werden, reicht die Anwendung des FFT-Algorithmus allein oft noch nicht aus. In solchen Fällen ist es zweckmäßig, die Transformation einem speziellen FFT-Prozessor zu übertragen, der mit dem Stationsrechner zu koppeln ist und auf einen Datenpuffer Zugriff hat.

8.4 Datenformatierungen

Bereits PETERSON & HUGHES [1975] berichteten über den Einsatz eines Minicomputers zur Aufbereitung der von automatischen Stationen einlaufenden Meldungen in Echtzeit. Dazu gehörten die Korrektur der Meßwerte, ihre Umrechnung in physikalische Einheiten, die Berechnung abgeleiteter Daten so-

wie die Formatierung der Meldung nach standardisierten Wetterschlüsseln. Heute ist es durch Heranziehung von Mikrorechnern möglich, die Aufbereitungen an den Stationen selbst vorzunehmen und die Meldungen meist nach internationalen Regelungen einer Sammelstelle zu übergeben. ROBINSON [1980] berichtete über einen neuen Systementwurf für intelligente automatische Stationen in Kanada, bei dem jeder Modul seinen eigenen Mikroprozessor erhalten sollte. Diesem System wurde die Aufgabe gestellt, die Meldungen in einem Standardformat zu senden. Auch die automatischen Stationen der Typen MISTRAL, AFMS-2 und METEOR-2 sind nach Angaben von BETTAN [1985], und HÖHNE et al. [1986b] sowie GALLÓ et al. [1988] in der Lage, international standardisierte Meldungen, wie die SYNOP-Meldung auszugeben. Die von HANÁK & SZENN [1984] beschriebene ungarische Mehrzweckstation war in der Lage, Meldungen in den Codeformen SYNOP, CLIMA und SPECI zu formatieren. Auch bei der von MEKHOVITCH et al. [1984] beschriebenen automatischen hydrometeorologischen Station war vorgesehen, die synoptische Meldung in der Form des FM-12-Schlüssels auszugeben. Wenn die aufbereiteten, verdichteten und vorverarbeiteten Daten in einer Datenliste zur Verfügung stehen, sind für die *Formatierung einer Meldung* nach dem Schlüssel FM 12, wie HÖHNE [1982] zeigte, noch folgende Einzeloperationen erforderlich:

- Codierung von einzelnen Meßinformationen nach vorgegebenen Codeschlüsseln und
- Formatierung der Meldung nach dem erforderlichen internationalen Schlüssel.

Nicht bei allen Meßgrößen gehen die Meßwerte in physikalischen Einheiten in die Meldung ein. Zur Verringerung der zu übertragenden Zeichenzahlen werden für die *zu codierenden Informationen* Codeschlüssel vorgegeben, nach denen die Informationen als ein-, zwei- oder dreistellige Codezahlen zu übertragen sind. Bei anderen Informationen ist die zu übermittelnde Information nicht aus dem Meßwert sondern aus der zugehörigen Statusinformation abzuleiten. Für jede Codierung ist u.U. eine eigene Codieroutine erforderlich.

Innerhalb einer *Meldung* werden die Informationen zu Sektionen und Gruppen zusammengestellt, wobei in der Regel jede *Sektion* eine Zeile beansprucht und mit einer Sektionskennung beginnt. Jede Sektion besteht aus mehreren *Gruppen*. Früher enthielt jede Gruppe genau 5 Zeichen, heute kann eine Gruppe 3...6 Zeichen besitzen. Eine Gruppe kann (muß aber nicht) durch eine vorangestellte Gruppenkennziffer gekennzeichnet sein. Auch die Anzahl der in einer Gruppe zusammengefaßten Informationen ist unterschiedlich.

Die heute gebräuchlichen international genormten Meldeschlüssel wurden offenbar noch weitgehend unter dem Gesichtspunkt einer manuellen Arbeitsweise entwickelt. Bei zukünftigen Schlüsseländerungen erscheint es angebracht, die Bedingungen einer maschinellen Codierung stärker in den Vordergrund zu rücken. Hierdurch würde sich nicht nur der Aufwand bei der Erstellung der Codier- und Formatierprogramme senken, sondern auch die Fehleranfälligkeit während der Übertragung auf gestörten Kanälen deutlich verringern lassen. Insbesondere sollten

- jede Sektion und Gruppe einer Meldung eindeutig durch Zahlen bzw. Ziffern gekennzeichnet werden
- die Codetabellen für unterschiedliche meteorologische Elemente so weit wie möglich vereinheitlicht werden

- jeder Meldung eine Prüfgröße angehängt werden, mit der sich Fehler auf dem Übertragungswege mit hoher Wahrscheinlichkeit nachweisen lassen.

Ein Formatierprogramm muß in der Lage sein, Meldungen nach dem vorgegebenen Meldungsschlüssel zusammenzustellen. Bei Schlüsseländerungen sollte es sich ohne hohen Programmieraufwand dem neuen Schlüssel anpassen lassen. Günstig ist es, wenn dasselbe Programm zur Formatierung verschiedener Meldungen genutzt werden kann. Diese Forderungen sind bei dem von HÖHNE [1982] beschriebenen erfüllt.

9 Energieversorgung automatischer Meßsysteme

Im Gegensatz zu den automatischen meteorologischen Stationen der Anfangszeit, bei denen bisweilen noch Federwerke als Energiequellen genutzt wurden, erfolgt bei modernen automatischen Meßsystemen die Energieversorgung ausschließlich aus elektrischen Energiequellen. Die Art der Stromversorgung hängt aber stark davon ab, ob der Einsatz in technisch entwickelten oder in entlegenen Gebieten erfolgt. Auch die Betriebsweise und die Leistungsaufnahme des Systems sind maßgeblich. Hauptlieferant der Energie ist in dicht bewohnten und entwickelten Gebieten das Energienetz; in unbewohnten bzw. schwach besiedelten Regionen sind es hingegen Batterien.

Automatische meteorologische Stationen für entlegene Gebiete müssen mit der gespeicherten Energie sparsam umgehen, wenn von ihnen eine lange wartungsfreie Betriebsdauer gefordert werden muß und vor Ort keine Möglichkeiten zum Wiederaufladen der Batterien gegeben sind.

9.1 Netzstromversorgung

Mit der Verlagerung des Schwergewichts bei der Entwicklung und Einrichtung automatischer Stationen hin zu Meßsystemen für den Einsatz in entwickelten Gebieten traten die Energieversorgungsnetze als Hauptenergielieferanten immer mehr in den Vordergrund. Vorteilhaft ist bei diesen, daß Anschlußstellen in der Regel über kurze Leitungen erreichbar sind und aus dem Energienetz auch höhere, zeitlich schwankende Leistungen entnommen werden können. Öffentliche Stromversorgungsnetze liefern in der Regel Wechsel- bzw. Drehstrom, wobei sich die Spannungen mit Hilfe von Transformatoren ohne größere Verluste umspannen lassen.

Energieversorgungsnetze besitzen jedoch auch nachteilige Eigenschaften. Dazu zählen in erster Linie

- Spannungs- und Frequenzschwankungen in Abhängigkeit von der Netzbelastung
- Spannungsausfälle durch technische und atmosphärische Störungen
- transiente Störungen in Form von kurzen Unterbrechungen und von Spannungsspitzen.

Der Bereich der *Spannungsschwankungen* hängt von der tages- und jahreszeitlichen Belastung des Versorgungsstrangs und dem Querschnitt der Leitungen ab, an den das Meßsystem angeschlossen werden soll. In günstig ausgelegten Netzen hält sich die Schwankungsbreite mit $\pm(10...15)\%$ in Grenzen. Treten größere Schwankungen auf oder weicht die mittlere Netzspannung deutlich von ihrem Nennwert ab, sollte das zuständige Energieversorgungsunternehmen kontaktiert werden.

Die *Frequenzschwankungen* halten sich hingegen bei Verbundnetzen in engen Grenzen. In Mitteleuropa ist es darüber hinaus üblich, den zeitlichen Mittelwert der Netzfrequenz über mehrere Tage durch Steuerungsmaßnahmen in sehr engen Grenzen zu halten, um dadurch bei Uhren mit Synchronmotoren ein langfristiges Abdriften des Uhrengangs gegenüber der gesetzlichen Uhrzeit zu vermeiden.

Spannungsausfälle sind bei Netzen mit Freileitungen eher zu erwarten als bei verkabelten Netzen, wie sie in größeren Städten die Regel darstellen. Ursachen für solche Ausfälle können sowohl Gewitter mit Blitzeinschlägen in Leitungen sein, bei denen Sicherungen selbsttätig ansprechen und die Leitung abschalten, als auch technische Störungen in Kraftwerken oder in den Leitungsnetzen (einschließlich der Hochspannungsleitungen). Unwetter mit extremen Niederschlagsmengen oder starke Stürme führen manchmal zu Störungen an Versorgungsleitungen und Umspannwerken. Netzunterbrechungen können wenige Minuten bis zu mehreren Stunden dauern. Die Überbrückung der dadurch bedingten Pausen ist nur mit Hilfe einer entsprechend ausgelegten Notstromversorgung möglich.

Transiente Störungen können sich als kurzfristige Überspannungen oder Spannungsunterbrechungen (im Mikro- bis Millisekundenbereich) bemerkbar machen. Überspannungen erreichen hierbei u.U. ein Vielfaches der Nennspannung. Gelangen solche Spannungsspitzen in elektronische Schaltungen des Meßsystems, können sie eine mehr oder weniger große Zahl von Bauelementen zerstören und damit das Meßsystem weitgehend unbrauchbar machen. Transiente Spannungsunterbrechungen machen sich hingegen in Digitalschaltungen und Rechnern, die mit geregelten Gleichspannungen betrieben werden, kaum bemerkbar, weil die zwischengeschalteten Netzteile Kondensatoren hinreichend hoher Kapazität enthalten, die die Versorgungsspannungen selbst bei kurzfristigen Netzunterbrechungen über mehrere Millisekunden aufrechterhalten. Allenfalls kann es zu vorübergehenden Störungen kommen.

Die nachteiligen Eigenschaften des Energienetzes lassen sich durch die im folgenden beschriebenen Maßnahmen weitgehend reduzieren bzw. beseitigen. Dazu einzusetzende Geräte, die hier angeführt werden, sind handelsüblich.

Spannungsschwankungen lassen sich mit *Spannungskonstanthaltern* weitgehend beseitigen. Diese Vorschaltgeräte arbeiten sehr zuverlässig, da sie nur Transformatoren, Drosseln und Kondensatoren enthalten und somit ohne kontaktgebende Bauelemente und bewegte Teile auskommen. Sie beeinflussen jedoch die Kurvenform des Wechselstroms, sofern sie am Ausgang kein auf die Netzfrequenz abgestimmtes LC-Filter besitzen.

Sind zum Betrieb der Funktionsgruppen einer automatischen Station jedoch nur Gleichspannungen erforderlich, werden in der Regel ohnehin stabilisierte Netzgeräte eingesetzt. Die früher üblichen *Konstantspannungsquellen* nutzten stetig arbeitende Regelschaltungen, deren Ausgangsspannung durch einen als steuerbaren Widerstand wirkenden Längstransistor in der Gleichstromleitung unabhängig vom Laststrom konstant gehalten wurde. Sie wiesen einen relativ hohen Eigenverbrauch auch bei geringer Stromentnahme auf. In den letzten Jahrzehnten sind sie durch sog. *Schaltnetzteile* bei Digital- und Rechenschaltungen weitgehend verdrängt worden, bei denen eine un stetige Regelung erfolgt. Mit einer Frequenz im Kiloherz-Bereich wird ein als Schalter wirkender Transistor jeweils kurzfristig solange geöffnet, bis der am Ausgang des Netzteils liegende Kondensator wieder auf eine vor-

gegebene Spannung aufgeladen ist. Der Gleichspannung ist dabei eine Wechselfrequenz mit deutlich kleinerer Amplitude überlagert, die sich durch Siebglieder weitgehend beseitigen läßt. Der Eigenverbrauch von Schaltnetzteilen ist gering. Sie erzeugen jedoch infolge ihres Schaltverhaltens Störspannungen, die sich über das Netz ausbreiten und den Funkverkehr und den Rundfunkempfang stören können und daher mit Hilfe von vorgeschalteten Netzfiltern abgefangen werden müssen.

Gegen Änderungen der Netzfrequenz gibt es praktisch keine Gegenmaßnahmen außer dem Einsatz frequenzkonstanter Energieversorgungssysteme mit Wechselrichtern, auf die weiter unten noch einzugehen sein wird. In den meisten Fällen stören jedoch geringe Frequenzänderungen, wie sie in nicht überlasteten Netzen vorkommen, kaum.

Netzspannungsausfällen kann man nur mit einer Hilfsenergieversorgung begegnen. Für diese Zwecke werden wiederaufladbare Batterien verwendet (vgl. LAMBOLEY & LARTIGUE [1975]). Die Kapazität dieser Batterien ist in Abhängigkeit von der Stromaufnahme der anzuschließenden Verbraucher und der gewünschten Überbrückungsdauer eines Netzausfalls zu wählen. Es lassen sich also nur Ausfallzeiten bis zu einer vorgegebenen Maximallänge überbrücken. Eine solche Hilfsstromversorgung ist immer dann vorzusehen, wenn häufig mit Netzausfällen zu rechnen ist oder ein weitgehend störungsfreier Betrieb eines automatischen Meßsystems gewährleistet werden muß. Das letztere trifft insbesondere für Observatorien in exponierter Lage zu. So wurde nach MOTSCHKA et al. [1988] für das Meßsystem des Sonnblitz-Bergobservatoriums eine Stromversorgung vorgesehen, die bei Netzausfall auf Batterien zurückgreift. Bei der von GAYTANDJIEV et al. [1995] beschriebenen bulgarischen automatischen Wetterstation schaltet das Stromversorgungsteil bei Ausfall des Netzes sofort auf Batterieversorgung um, ohne daß die Energieversorgung des Systems unterbrochen wird.

Zur Hilfsstromversorgung kommen zwei grundsätzlich verschiedene Arten in Betracht. Werden für die Versorgung der Funktionsgruppen im wesentlichen nur Gleichspannungen im Niedervoltbereich gebraucht, können *Akkumulatoren als Pufferbatterien* betrieben werden. Bei vorhandener Netzspannung wird die zum Betrieb des Meßsystems erforderliche Energie dem Netz, bei dessen Ausfall den Batterien entnommen. Die Entkopplung der Netzteile von den Batterien erfolgt meist mit Gleichrichterschaltungen. Für die Akkumulatoren sind Zusatzschaltungen erforderlich, die

- für ein regelmäßiges Wiederaufladen der Batterien sorgen,
- deren Überladen durch Begrenzung bzw. Abschaltung des Ladestroms unmöglich machen und
- ein vollständiges Entladen der Batterien bei zu langer Netzausfallszeit durch Abschaltung des Meßsystems verhindern.

Diese Betriebsart war beispielsweise bei südafrikanischen automatischen Wetterstationen vorgesehen, die nach LLOYD [1966] in den Jahren 1966-1972 eingerichtet wurden. Eine stabilisierte Betriebsgleichspannung von 12 V wurde normalerweise aus der Netzspannung erzeugt. Bei Netzausfall übernahm eine NiCd-Batterie die Stromversorgung für maximal 8 h. Auch die Anlage AFMS-1 war für eine Notstromversorgung ausgelegt, wobei jedoch Bleibatterien vorgesehen wurden (vgl. HÖHNE [1970b]).

Für einzelne Stromverbraucher, die auch bei Netzausfall unbedingt mit Wechselfrequenz versorgt werden müssen (wie z.B. Feuchtegeber mit LiCl-Taupunktsensoren), können *Transverter-schaltungen* als zuverlässig arbeitende Wechselrichter eingesetzt werden. Auch sie entnehmen ihre Energie Pufferbatterien.

Bei Verwendung moderner Rechner in Verbindung mit automatisierten Meßsystemen sind häufig eine Reihe peripherer Geräte erforderlich, die mit Netzspannung zu versorgen sind. In solchen Fällen empfiehlt sich der Einsatz von *unterbrechungsfreien Stromversorgungssystemen*. Dabei handelt es sich um Kombinationen von Pufferladegerät, Akkumulatorenbatterie und einem Wechselrichter. Früher wurden für solche Zwecke häufig Maschinenumformer verwendet. Heute stehen elektronisch arbeitende Wechselrichter zur Verfügung, die ohne bewegte Teile auskommen und eine weitgehend spannungs- und frequenzkonstante Ausgangsspannung bereitstellen, die gegenüber dem Netz galvanisch getrennt ist. Das Ladegerät liegt ständig am Netz und lädt die Batterie, sofern das Netz Spannung führt. Die Batterie versorgt den Wechselrichter mit der jeweils erforderlichen Energie. Er wird von einem frequenzstabilisierten Oszillator gesteuert und liefert an seinem Ausgang einen nahezu sinusförmigen Wechselstrom der gewünschten Spannung und Frequenz. Der Wechselrichter versorgt ständig den oder die angeschlossenen Verbraucher, wobei auch im Augenblick des Netzausfalls eine stoßfreie Weiterversorgung gesichert ist. Beim Erreichen der Entladespannung der Batterie schaltet jedoch eine elektronische Sicherung im Wechselrichter die Stromversorgung ab, um eine Beschädigung der Batterie zu vermeiden. Unterbrechungsfreie Stromversorgungen bieten auch in Fällen, in denen das Netz nicht die erforderlichen Qualitätsanforderungen erfüllt, die günstigste Möglichkeit, um einen weitgehend ungestörten Betrieb automatisierter elektronischer Meßsysteme auch dann zu gewährleisten, wenn kurze Netzausfälle oder andere Netzstörungen relativ häufig auftreten. Sie schützen das Meßsystem auch gegen kurze transiente Störungen im Millisekundenbereich. Nahezu wartungsfrei arbeitende unterbrechungsfreie Stromversorgungsanlagen werden heute industriell für unterschiedliche Ausgangsnennleistungen (bis zu 100 kW) und überbrückbare Netzausfallszeiten angeboten. Sie besitzen vertretbare Abmessungen und einen Wirkungsgrad in der Größenordnung von 80...90%. Die Batterien sind teilweise getrennt von den elektronischen Baugruppen in einem besonderen Gehäuse untergebracht.

Über die Stromversorgung japanischer automatischer Stationen vom Typ JMA-79 und JMA-80 berichteten YANAGISAWA [1981] sowie YAMANOUCI & NUMASAKI [1985]. Sie entnahmen bei Netzausfall die Energie aus Akkumulatoren. Bei der letztgenannten Station wurde der erforderliche Wechselstrom aus Batteriegleichstrom mit Hilfe eines Wechselrichters erzeugt. Dieser Hilfsstrom sicherte den weiteren Betrieb der gesamten Station mit Ausnahme der Heizungen über eine Zeitdauer > 1 h.

Transiente Netzstörungen lassen sich mit *Netzfiltern* abfangen, sofern die Spitzenspannungen nicht zu hoch sind. Kurzzeitig auftretende hohe Spitzenspannungen werden mit *Überspannungsableitern*, die vor dem Netzfilter anzuordnen sind, zur Erde abgeführt. Ihre Ansprechschwelle ist so zu wählen, daß sie (unter Berücksichtigung der erforderlichen Toleranzen) über dem Maximalwert der Scheitelspannung liegt, d.h. etwa dem doppelten Betrag des Effektivwertes der Netzspannung gegenüber dem Erdpotential entspricht. Kurze Netzausfälle im Millisekundenbereich, wie sie durch Umschaltungen im Netz hervorgerufen werden können, werden durch Siebglieder in Netzteilen meist unterdrückt. Sollten

sie trotzdem in Rechenschaltungen zu vorübergehenden Beeinträchtigungen führen, können die letzteren durch eine sog. *Watch-dog-Schaltung*, die jedes rechnergeführte Realtime-Meßsystem enthalten sollte, unwirksam gemacht werden. Sie hat die Aufgabe, im Falle eines Programmabsturzes, einer Programmverklemmung oder einer vorübergehenden Spannungsunterbrechung einen selbsttätigen Wiederanlauf möglich zu machen.

Eine Batterie-Hilfsstromversorgung allein kann Ausfälle einer Station bei Netzstörungen nicht vollständig ausschließen. Obwohl alle österreichischen Stationen mit einer Batterie-Notstromversorgung für mindestens 2 h sowie einem selbsttätigen Wiederanlauf ausgerüstet waren, hat es sich nach RUDEL [1995] bei einer Fehleranalyse herausgestellt, daß die größten Datenverluste durch Ausfälle der Energieversorgung bedingt wurden. Ursache dieser Ausfälle waren oft durch Blitzeinschläge zerstörte Haussicherungen. Sie verhinderten eine Wiederaufladung der Batterien. RUDEL forderte daher, daß an Stationen, die zeitweilig mit Personal besetzt sind, der für die Station Verantwortliche behebbare Ausfallursachen möglichst umgehend beseitigen sollte.

9.2 Batteriestromversorgung

Als Spannungsquellen kommen grundsätzlich Primär- und Sekundärelemente in Betracht. Die nicht wiederaufladbaren *Primärelemente* eignen sich nur für Verbraucher mit geringem Leistungsbedarf. MANI [1966] berichtete über eine automatische Regenmesser mit Funkübertragung der Meßergebnisse, für dessen Stromversorgung eine 10,5 V-Trockenbatterie ausreichte. Die Anodenspannung des Senders wurde aus dieser Niederspannung mittels eines Transistorinverters erzeugt. McKAY [1975] beschrieb eine für den Einsatz in arktischen Gebieten bestimmte kanadische automatische Klimastation CARS, deren Energiebedarf über mehrere Monate mit vier alkalischen 9 V-Trockenbatterien gedeckt werden konnte. Bevorzugt werden Primärelemente bei Meßeinrichtungen, die (wie Radiosonden) bei beschränkter Stromaufnahme nur über begrenzte Betriebszeiten arbeiten müssen.

In der Regel wird an Orten, an denen kein Netzanschluß verfügbar ist, auf wiederaufladbare *Sekundärelemente* zurückgegriffen. Technisch werden meist mehrere Zellen zu einer Batterie zusammengefaßt, die auch die Bezeichnung Akkumulator trägt. Bestimmte Akkumulatortypen können 1000 Lade-Entladezyklen überstehen, ohne daß ihre Speicherkapazität wesentlich absinkt. Zu den Akkumulatoren, die auch für andere technische Zwecke genutzt werden und daher preisgünstig erhältlich sind, gehören in erster Linie

- der Bleiakkumulator und
- der Nickel-Cadmium- oder der Nickel-Metallhydrid-Akkumulator.

Im letzten Jahrzehnt sind *Lithiumbatterien* hinzugekommen, die sich durch relativ hohe Zellenspannung, ein günstiges Energie/Masse-Verhältnis und lange Lebensdauer auszeichnen. FUSEY et al. [1984] sowie STEEVES & GRANT [1988] berichteten über ihren Einsatz in driftenden Meßbojen bzw. automatischen Antarktisstationen. Von den letztgenannten Autoren wurde der weite Temperatureinsatzbereich hervorgehoben, der nach unten bis -55 °C reicht. Lithiumbatterien können als zukunftssträchtige Stromquellen angesehen werden.

Bleiakkumulatoren enthalten im geladenen Zustand Pb- und PbO₂-Platten, die in verdünnte Schwefelsäure eintauchen. Sie

werden mit unterschiedlichen Kapazitätswerten in Kraftfahrzeugen als Starterbatterien genutzt und sind daher preiswert erhältlich. Ihre Zellennennspannung beträgt 2,1 V. Ein Vorteil dieser robusten Sekundärbatterien besteht in ihrem geringen Innenwiderstand, der vorübergehend auch hohe Entnahmeströme zuläßt. Dem stand bei den konventionellen Ausführungen ein erhöhter Pflegebedarf sowie eine geringe Beständigkeit unter tropischen Klimabedingungen gegenüber. Heute stehen moderne pflegefreie Bleiakumulatoren zur Verfügung, bei denen das Gehäuse einen hermetischen Abschluß bildet. Bei ihrem Einsatz wird zugleich verhindert, daß beim Aufladen solcher Batterien Dämpfe freigesetzt werden, die Wasserstoff und Schwefelsäure enthalten.

NiCd-Akkumulatoren bestehen aus Nickel- und Cadmiumplatten, *NiMH-Akkumulatoren* aus Nickelhydroxid und einer Metallegerung, die Wasserstoff speichern kann. Die Platten tauchen in verdünnte Kalilauge ein, die als Elektrolyt dient. Die Zellenspannung beträgt bei diesen Akkumulatoren nur 1,2 V. Ihr Innenwiderstand ist deutlich höher als der von Bleibatterien, weshalb sie sich nicht für Verbraucher eignen, die zeitweilig hohe Stromstärken erfordern. NiCd-Batterien sind noch robuster als Pb-Batterien, besitzen eine lange Lebensdauer und erfordern wenig Pflege. Sie besitzen jedoch eine relativ lange Aufladedauer sowie einen sog. Gedächtniseffekt, der bei unvollständiger Entladung zu einer Kapazitätsverminderung führt.

Als eine Stromquelle der Zukunft wird der *Lithium-Ionen-Akkumulator* angesehen. Bei seiner Ladung und Entladung wandern nicht – wie in anderen Sammlern – Elektronen zwischen Anode und Katode hin und her sondern Lithiumionen. Um Kurzschlüsse durch Unebenheiten in den Plattenoberflächen und damit mögliche Kurzschlüsse zwischen den Elektroden zu vermeiden, werden die Lithiumatome in einem Graphitgitter fixiert. Erst hierdurch wird ein wiederholtes Aufladen möglich. Lithium-Ionen-Batterien besitzen eine höhere Zellenspannung und ein höheres Speichervermögen als die meisten übrigen Akkumulatoren.

Die von STRAKA et al. [1996] erläuterten mobilen mesometeorologische Stationen, die einschließlich des zur Meßsignalerfassung erforderlichen Datenloggers und des zur Meßdatenverarbeitung dienenden Laptop-Rechners in einem Pkw untergebracht waren, wurden aus 12 V-Akkumulatoren mit Energie versorgt, die von der Lichtmaschine des Fahrzeugs aufgeladen wurden.

Über die besonderen Einsatzbedingungen für Batterien zur Stromversorgung arktischer Stationen berichteten HEADLEY & MAXWELL [1985]. Die Batteriebehälter wurden hier in das Eis eingegraben, um annähernd konstante, aber nicht zu tiefe Temperaturen zu gewährleisten.

Nur am Rande erwähnt werden sollen hier *Brennstoffzellen*. Sie erzeugen ihre elektrische Energie aus der Zersetzung von gasförmigen oder flüssigen Brennstoffen in einer katalytischen Reaktion. Die damit generierbare elektrische Energie hängt nur von der Größe des Vorratsgefäßes der zu lagernden Brennstoffe ab. Trotz jahrzehntelangen Versuchen haben sich bis heute Brennstoffzellen in der Praxis noch nicht durchsetzen können, obwohl verschiedene Typen z.T. mit Erfolg experimentell erprobt wurden. In Verbindung mit automatischen meteorologischen Stationen ist der Einsatz von Brennstoffzellen bisher noch nicht bekannt geworden. Gegenwärtig fehlt es bei diesen wohl noch an der erforderlichen technischen Reife.

Sekundärbatterien stellen die wichtigsten Stromquellen für automatische Stationen in entlegenen Gebieten dar. Dabei müssen Typen ausgewählt werden, die eine Einsatzdauer von zumindest einigen Monaten ohne Nachladung ermöglichen. Falls keine nach anderen Prinzipien arbeitenden Generatoren vor Ort zum Aufladen der Batterien zur Verfügung stehen, müssen sie in regelmäßigen Wartungsintervallen gegen geladene Akkumulatoren ausgetauscht werden. Bei der von COOK [1981] beschriebenen automatischen Station mit geringem Leistungsbedarf konnte durch Beschränkung auf die unbedingt erforderlichen Geber und peripheren Geräte, Verwendung von CMOS-Schaltungen sowie durch Einschaltung der Energieversorgung für die einzelnen Baugruppen nur in den unbedingt notwendigen Zeitspannen der Strombedarf im Mittel auf 1 mA gesenkt werden. Dadurch reichten für die Stromversorgung zwei 12 V-Batterien aus. Werden automatisch arbeitende Meßsysteme aus Batterien mit Strom versorgt, sollte man die Batteriespannung und ggf. auch die Wiederaufladung vom System überwachen lassen.

9.3 Andere Energiequellen

Der regelmäßige Austausch von Batterien an Orten, die keinen Zugang zum Energienetz haben, kann mit einem erheblichen Aufwand verbunden sein. Dies trifft insbesondere dann zu, wenn die Stationsorte nur schwer oder nur mit speziellen Transportmitteln wie Schiffen und Hubschraubern erreichbar sind. Es hat daher nicht an Versuchen gefehlt, Generatoren zum Aufladen der Batterien oder zum direkten Betrieb der automatischen Meßsysteme einzusetzen. Im folgenden sollen die wichtigsten Generatortypen kurz beschrieben werden, die in Verbindung mit automatischen meteorologischen Stationen zum Einsatz gekommen sind. Über Erprobungen verschiedener Generatorarten und Speicherbatterien in Verbindung mit der britischen NOMAD-Boje hat PYLE [1966a] berichtet.

Maschinengeneratoren stellen eine Kopplung von Antriebsmotoren mit elektrischen Generatoren dar. Die Antriebsmotoren können mit flüssigen Brennstoffen (wie Benzin bzw. Dieselöl) oder Brenngasen (z.B. Propan) betrieben werden. Der Treibstoff ist ständig aus Vorratsgefäßen zuzuführen. Maschinengeneratoren haben einen hohen technischen Stand erreicht, der auch ohne ständige Anwesenheit von Personal einen weitgehend unterbrechungsfreien Betrieb zuläßt. Sie werden bevorzugt für Schiffstationen genutzt, wobei nach Angaben von FRANK [1966] auf den Schiffen für die bordeigene Stromversorgung unterschiedliche Typen für Gleich- oder Wechselstrom sowie für verschiedene Ausgangsspannungen zur Verfügung stehen. Maschinengeneratoren sind auch an bemannten Stationen in der Arktis und Antarktis zum Einsatz gekommen, wo sie nicht nur den Strom für die Meßeinrichtungen sondern auch für Beleuchtungs-, Koch- und andere Zwecke zu liefern hatten. Da Maschinengeneratoren in der Lage sind, die Stromversorgung über längere Zeit kontinuierlich zu sichern und bei entsprechender Steuerung auch einen schwankenden Leistungsbedarf abzusichern, kann auf Batterien zu Speicherzwecken zuweilen verzichtet werden. Auch für die Stromversorgung der relativ großen NOMAD-Boje wurden nach Angaben von PYLE [1966a] Maschinengeneratoren mit Propan als Treibstoff erprobt. KORAČIN et al. [1984] berichteten über den Einsatz von Dieselgeneratoren zum Aufladen der Batterien, die für den Betrieb eines durch Mikrorechner gesteuerten Systems zur Erfassung meteorologischer Profildaten an einem Mast auf der Insel Vir gebraucht wurden.

Auch die im folgenden aufgeführten Generatoren sind bereits in Verbindung mit automatischen meteorologischen Meßsystemen zum Einsatz gekommen. Da sie entweder nicht in der Lage sind, ständig Energie zu erzeugen oder nur einen beschränkten festen Strom abgeben und sich damit nicht schwankenden Leistungsanforderungen anpassen können, lassen sie sich nur in Verbindung mit Batterien verwenden, die die von den Generatoren erzeugte Energie zwischenspeichern.

Windgeneratoren stellen die Kombination einer Windrad- oder Propelleranordnung, deren Achse mittels einer geeigneten Vorrichtung ständig in die mittlere Windrichtung ausgerichtet wird, mit einem elektrischen Generator dar. Sie kommen vor allem in Gebieten zur Anwendung, wo beständige Winde einer gewissen Mindeststärke zu erwarten sind. Derartige Bedingungen sind z.B. auf Inseln in den gemäßigten und höheren Breiten sowie im Gebirge gegeben. Die dem Wind ausgesetzten Teile (einschließlich dem Mast, an dem der Windgenerator montiert wird) müssen so dimensioniert sein, daß sie den stärksten Stürmen widerstehen können, die im Einsatzgebiet auftreten können. Verstellbare Propeller ermöglichen in Verbindung mit einer automatischen Regelung eine in weiten Bereichen sich wenig ändernde Generatorspannung. Einen Windgenerator in Verbindung mit einer 24 V-Batterie mit einer Kapazität von 250 Ah und einer Ladeschaltung mit automatischer Steuerung zur Verhinderung einer Überladung der Batterie setzten DATAR & PAKKIR MOHAMMED [1966] zur Stromversorgung einer indischen automatischen Wetterstation ein. Die für den Röhrensender erforderliche höhere Anodenspannung wurde mittels eines Inverters aus der Batteriespannung erzeugt. Ein störungsfreier Betrieb ist vor allem beim Einsatz bürstenloser Drehstromgeneratoren mit Vollwellengleichrichtung zu gewährleisten, wie ihn HASSET [1966] beschrieb. Windgeneratoren werden auch häufig zur Aufladung der Akkumulatoren von automatischen Stationen in abgelegenen Gebieten (vgl. MANUILOV [1966]) sowie für automatische Bojenstationen (so u.a. auch bei der NOMAD-Boje, vgl. PYLE [1966a]) eingesetzt. Auch für die Stromversorgung der finnischen MILOS-Station, die nur wenige Watt an Leistung benötigt, wurde nach SAXÉN [1980] eine 12 V-Batterie von 90 Ah Kapazität in Verbindung mit einem kleinen Windgenerator vorgesehen. MAKITA [1993] berichtete über die Erprobung eines speziell für den Einsatz in Polargebieten entwickelten Windgenerators und seiner erfolgreichen einjährigen Erprobung an der japanischen Antarktisstation Asuka.

Solargeneratoren arbeiten mit flächenhaften Anordnungen von Si-Solarbatterien und können heute Wirkungsgrade bis zu etwa 15% erreichen. Die größte Energiemenge läßt sich mit Anordnungen erzielen, die dem jeweiligen Stand der Sonne nachgeführt werden. An automatischen Stationen wird jedoch darauf verzichtet, weil die Nachführeinrichtung an unbemannten Stationen den Generator störanfälliger machen kann. Stattdessen werden die Empfangsflächen hinsichtlich Azimut und Neigung so ausgerichtet, daß sie im Mittel ein Maximum an Energie aufnehmen. Solargeneratoren werden bevorzugt in Regionen eingesetzt, in denen geringe Bedeckungsgrade und ein ausreichend hoher Sonnenstand zu erwarten sind. Zur Stromversorgung der extrem einfachen automatischen Wetterstation MOSES nutzten bereits LALLY et al. [1966] in Neuseeland eine Solarbatterie aus 90 Si-Zellen von (1 x 2) cm Fläche in Verbindung mit einer NiCd-Batterie. In Regionen, in denen kein Schneefall vorkommt, kann nach SAXÉN [1980] die Stromversorgung automatischer Stationen vom Typ MILOS auch mit einer durch Solarpaneel aufzuladenden Batterie

erfolgen. Die kanadischen READAC-Stationen entnahmen in entlegenen Regionen nach BOURKE & Van CAUWENBERGHE [1980] den erforderlichen Strom aus Batterien, die in einem runden Gefäß untergebracht waren, das in den Boden eingesetzt wurde. Für die Aufladung der Akkumulatoren sorgten Solarpaneele, die am Windmast befestigt wurden. In ähnlicher Weise wurde auch die von SOGATOD [1981] beschriebene norwegische fernmesende Wetterstation mit der erforderlichen Energie versorgt. Über Entwicklung und Einsatz eines Solargenerators in Verbindung mit einer automatisch arbeitenden Ozonmeßstation für entlegene Gebiete, die zugleich eine gewisse Zahl meteorologischer Größen erfaßte, haben BALZER et al. [1987] berichtet.

Eine komplexe Stromversorgungsanlage für ein Meßsystem auf einer tropischen Insel, das aus einer automatischen Bodenstation und einer aerologischen NAVAID-Station bestand, erläuterten COLE & KEENAN [1989]. Sie setzte sich aus einer 1000 W-Windturbine, mehreren Solarpaneelen mit einer Gesamtleistung von ca. 1200 W, zwei Akkumulatorenbatterien, Schalt- und Regeleinrichtungen sowie einem 4,4 kW-Benzingenerator zusammen. Für zukünftige automatische Wetterstationen in der Arktis empfahl SHANKLIN [1989] Sekundärbatterien, die von Wind- bzw. Solargeneratoren aufgeladen werden.

Thermoelektrische Generatoren stellen nach ihrem Prinzip Thermosäulen aus Halbleitermaterialien dar, deren "warme Lötstellen" durch Verbrennungsvorgänge oder auf andere Weise erwärmt, und deren "kalten Lötstellen" mittels eines Wärmetauschers gekühlt werden. Auf die Optimierung der Eigenschaften solcher Generatoren, die auch für die Stromversorgung automatischer meteorologischer Stationen eingesetzt wurden, sind GUENNOG & STOLL [1966] eingegangen. Ihre Thermosäulen waren aus p- bzw. n-leitenden Pb- und Te-Zylindern aufgebaut, die durch Metallscheiben elektrisch in Reihe geschaltet wurden. Zur Erhitzung der "warmen Lötstellen" diente ein Propangasbrenner. Bei einem Gasverbrauch von 60 g/h konnte eine elektrische Leistung von ca. 20 W erzielt werden. Die für den Betrieb des Meßsystems erforderliche stabilisierte Gleichspannung wurde mittels eines elektronischen Gleichspannungswandlers mit einem Wirkungsgrad von 75% in Verbindung mit Z-Dioden erzielt. Beim heutigen Stand der Halbleitertechnologie ließen sich mit Hilfe von Halbleitern auf Silicium- und Germaniumbasis thermoelektrische Generatoren mit größeren Temperaturdifferenzen und noch günstigerem Wirkungsgrad realisieren. Als Heizer sind früher in Verbindung mit thermoelektrischen Generatoren auch kleine Atomreaktoren eingesetzt worden. Beim heutigen Kenntnisstand der Gefährlichkeit solcher unbeaufsichtigt arbeitenden Reaktoren werden solche Energiequellen wohl kaum noch zum Einsatz kommen. Thermoelektrische Generatoren mit Propanheizer sind nach PYLE [1966a] versuchsweise auf der NOMAD-Boje eingesetzt worden.

Als *Nukleargeneratoren* können bereits thermoelektrische Generatoren mit Atomreaktoren bezeichnet werden. Es gibt jedoch noch ein anderes Prinzip, bei dem die beim radioaktiven Zerfall frei werdende Energie direkt in elektrische Energie umgewandelt wird. Für diese Spannungsquelle sind radioaktive Präparate erforderlich, die in ein hermetisch dichtes Metallgefäß eingeschlossen werden, so daß die Gefahr einer Kontamination der Umgebung minimal ist. Nukleargeneratoren dieser Art sind jedoch nur in der Lage eine relativ geringe Leistung aufzubringen. Die Lebensdauer dieser Spannungsquellen richtet sich nach der Halbwertszeit der radioaktiven Quelle und kann mit einigen Jahren deutlich länger sein als die konventioneller Primärelemente. Über Versuche mit einem *Radioisotopengenerator* auf einer im

Golf von Mexiko verankerten NOMAD-Boje berichtete PYLE [1966a]. Auch in der UdSSR sind nach MANUILOV [1966] in der Vergangenheit Isotopengeneratoren in Verbindung mit automatischen Wetterstationen in entlegenen Gebieten zum Einsatz gekommen.

Die Auswahl der einzusetzenden Generatoren hängt von den an den Stationsorten gegebenen Bedingungen ab. Der günstigste Generator kann daher von Station zu Station ein anderer sein. Bei der Entwicklung der amerikanischen RAMOS-Stationen wurde dies nach FOSTER [1975] berücksichtigt, indem sich zum Aufladen der Akkumulatoren wahlweise das Energienetz, Propangasgeneratoren, Windgeneratoren oder Solarzellen nutzen ließen.

10 Gehäuseformen automatischer Stationen

Gehäuse werden bei automatischen Stationen für verschiedene Teile gebraucht. Im wesentlichen ist hierbei zwischen den folgenden zu unterscheiden:

- dem Stationskern als den zentralen Teil der automatischen Station
- den Gebergehäusen und
- den Gehäusen für sonstige Teile (wie Energieversorgung, Sender usw.)

Die Gestaltung der Gehäuse automatischer Stationen richtet sich vorwiegend nach dem Einsatzort und den Einsatzbedingungen. Dazu kommen noch Vorrichtungen für die Aufstellung von Gebern, Generatoren und Antennen, die meist als Masten ausgeführt werden.

Sofern es sich um bemannte Stationen handelt, werden in der Regel *Gebäude* zur Verfügung stehen, in denen auch die Stationskerne aufgestellt werden können. Ist dies nicht der Fall oder soll das Meßsystem transportabel sein, werden thermisch gut isolierte *Container* bevorzugt, die mittels eines zusätzlichen Sonnendachs eine stärkere Erwärmung infolge direkter Sonnenstrahlung verhindern und die enthaltenen Schaltungen sicher gegen Niederschlagswasser schützen. Für den Stationskern liegen dann Umgebungsbedingungen vor, wie sie auch für andere Laborgeräte gelten. Durch Heizung, Lüftung und in wärmeren Klimaten durch Kühlung lassen sich die Innentemperaturen in Bereichen halten, die zu allen Jahreszeiten ein Arbeiten ohne wesentliche Erschwernisse erlauben. Die dabei erreichbaren Raumtemperaturen werden dann den Bereich 15...35 °C kaum nach unten oder oben überschreiten. Die Luftfeuchte läßt sich außerhalb der Tropen ohne zusätzliche Maßnahmen im Gebäude unter 80% relativer Feuchte halten, so daß Kondensation sicher vermieden werden kann. Als Gefäß für den Stationskern wird man folglich Metallgehäuse wählen, die mit Lüftungsöffnungen und erforderlichenfalls mit Lüftern zur Abführung der in den dicht gepackten Schaltungen umgesetzten Wärme ausgerüstet werden müssen. Lüftungsschlitze sind ggf. so auszubilden, daß das Eindringen von Schadinsekten und größerem Staub vermieden wird. Nötigenfalls sind die Ansaugöffnungen mit Filtern zu versehen.

Bei der Gehäusegestaltung kommt bevorzugt der Zugänglichkeit der Baugruppen für Wartungsmaßnahmen Bedeutung zu. Geschlossene Räume und Container bieten nicht nur den Geräten sondern auch dem Bedienungs- und Wartungspersonal günstige Arbeitsmöglichkeiten. Im Hinblick auf Wartungsarbeiten sind auf-

klappbare Gehäuse oder herausziehbare Einschübe gemäß Abb. 31 sehr günstig, weil dann ohne Abschaltung der Betriebsspannungen und damit ohne Unterbrechung der Arbeit des Systems Kontrollen und Messungen an Prüfpunkten im Innern vorgenommen werden können. Im Störfalle wird zugleich das Austauschen einzelner, meist steckbarer Baugruppen erleichtert.

Für Stationen in entlegenen Gebieten bieten *Container* die günstigsten Arbeitsbedingungen, wenn sie sich an die gewünschten Aufstellungsorte transportieren lassen. Unbemannte automatische Stationen für entlegene Gebiete werden häufig so konstruiert, daß sie sich in handliche Teile mit beschränkter Masse zerlegen und somit ohne technische Hebevorrichtungen transportieren und aufstellen lassen. Für die Unterbringung des Stationskerns werden oft hüttenartige Gehäuse bevorzugt. GOODMAN [1966] beschrieb eine zerlegbare doppelwandige Hütte mit Zwischenraum und Öffnungen, die eine Luftzirkulation zwischen der äußeren Stahlwand und der inneren, mit Polystyrolschaum gefüllten Aluminiumwand ermöglichten.

Meßsysteme mit geringen Abmessungen lassen sich auch in wetterfesten kleinen Gehäusen unterbringen, die entweder hermetisch abdichtbar sind oder definierte Belüftungsöffnungen an Stellen besitzen, an denen kein Wasser eindringen kann. Für diese Zwecke kommen sowohl Metall-Druckgußgehäuse als auch glas- oder kohlefaserverstärkte Kunststoffgehäuse in Betracht. Die Gehäusetür wird gegenüber dem Gehäuse durch eine weiche Gummieinlage abgedichtet. Leitungseinführungen sind am zweckmäßigsten von unten über wassergeschützte Steckvorrichtungen oder Kabeleinführungen mit Stopfbuchsen vorzunehmen. Das Gehäuse ist so aufzustellen bzw. zu befestigen, daß es weder bei starkem Sturm noch durch Einwirkung von Menschen

oder größeren Tieren umgeworfen werden kann. Der Aufstellungs- bzw. Befestigungsort ist so zu wählen, daß auch bei stärkeren Niederschlägen ein Eintauchen des Gehäuses in Stauwasser verhindert wird. Um eine rasche Erwärmung des Gehäuseinnern zu vermeiden, ist das Gehäuse mit einem hellen Anstrich zu versehen. Außerdem sollte entweder der Aufstellungsort so gewählt werden, daß direkte Sonnenstrahlung das Gehäuse nicht trifft, oder es ist ein zusätzlicher Strahlungsschutz über dem Gehäuse vorzusehen, der die Wandungen weitgehend beschattet, ohne den Luftaustausch wesentlich zu behindern.

Besondere Anforderungen stellen die *Gebergehäuse*, die einerseits den Geber gegen negative Witterungseinflüsse schützen sollen, andererseits aber den Kontakt zur Umgebung nicht vollständig aufheben dürfen, damit die in den Gebern enthaltenen Sensoren tatsächlich die zu messenden Größen erfassen können. In den meisten Fällen stellen die Gebergehäuse daher einen Kompromiß zwischen Witterungsschutz und Kontakt zur Atmosphäre dar. Im einzelnen wurde darauf bei der Behandlung der Geber bereits eingegangen. Bestimmte Geber werden zum Schutz gegen Niederschläge und direkte Sonneneinstrahlung in sog. *englischen Hütten* untergebracht, die mit ihren doppelwandigen Jalousiewänden einen mehr oder weniger guten Luftaustausch mit der Umgebung ermöglichen.

Sekundärbatterien – insbesondere solche mit saurem Elektrolyten – sollten stets getrennt von anderen Teilen der Meßeinrichtung aufgestellt werden, da von den insbesondere beim Laden entweichenden säurehaltigen Dämpfen eine Korrosionsgefahr ausgeht. Bei der Aufstellung des Stationskerns im Gebäude ist ein besonderer Batterieraum vorzusehen. Stationen für entlegene Gebiete benötigen ein besonderes Batteriegehäuse, das zur Auf-

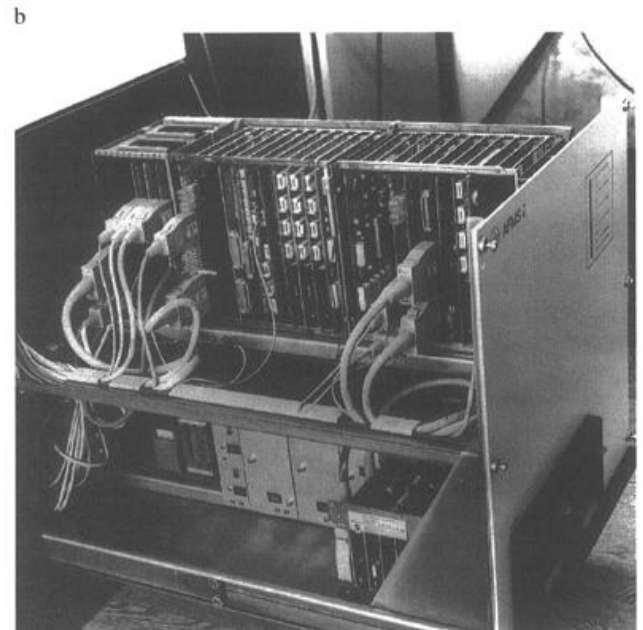
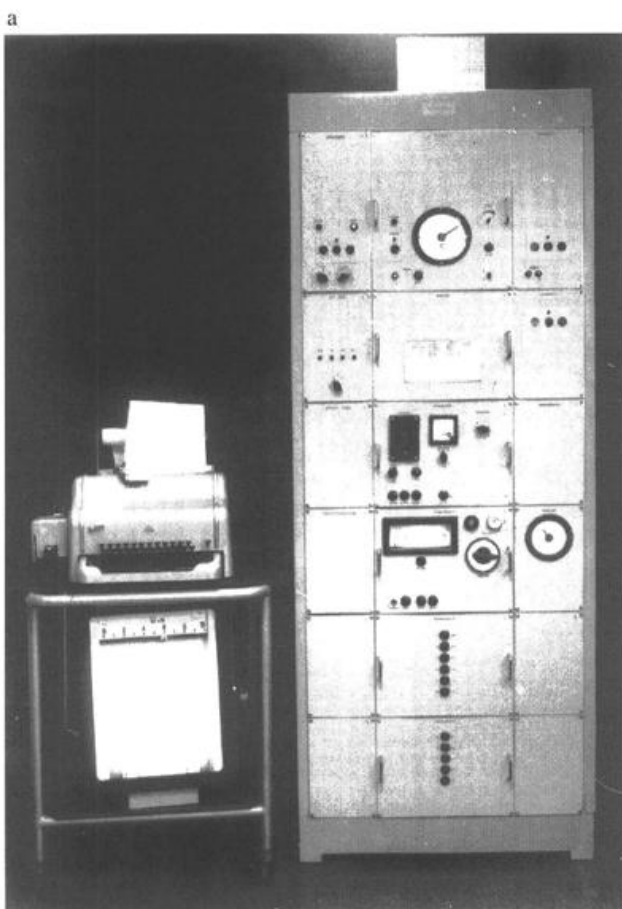


Abb. 31: Gehäuseformen, die Arbeiten während des Betriebs zulassen
 a) Stationskern der Station AFMS-1 mit Schwenkchassis (links u. rechts) sowie Einschüben (mittl. Reihe), Bild links
 b) Herausziehbarer Einschub im Stationskern der Station AFMS-2, Bild oben

rechterhaltung ausgeglichener Temperaturen in den Untergrund eingegraben werden kann, wie dies bei dem von SOGATOD [1981] beschriebenen System geschah.

Für die Aufstellung vieler meteorologischer Geber aber auch für Antennen und Wind- bzw. Solargeneratoren sind *Masten* am günstigsten. Sie erfordern zu ihrer Aufstellung ein festes Fundament und sollten zusätzlich durch Drahtseilabspannungen gesichert werden. Mastformen, die bei der transportablen automatischen Wetterstation PAWS zur Befestigung der Geber und des Meßumsetzers gebraucht werden und zum Lieferumfang gehörten, sind von MÁRKUS [1984] beschrieben worden. Höhere Masten müssen für Wartungsarbeiten Sprossen zur Besteigung der Masten besitzen, sofern sie nicht wie der bei den Stationen des Mesonetzes II (vgl. BROCK et al. [1986]) von wenigen Personen umgelegt oder wie bei den von GAUTIER & TAGGE [1986] beschriebenen Befestigungsvorrichtungen für Geber auf festen Plattformen eingezogen werden können. Die zu befestigenden Teile können entweder an der Spitze des Mastes oder in geringerer Höhe an seitlichen Auslegern montiert werden. Masten aus runden Rohren besitzen den Vorteil, daß sich die Zuleitungen in deren Innern verlegen lassen. Insbesondere höhere Masten sind mit einem Blitzschutz, bestehend aus einem

Blitzableiter und einer einwandfreien Erdung zu versehen. Die Spitze des Blitzableiters muß alle leitenden Geberteile um ca. 1 m überragen.

Die *Kabelverlegung* sollte an Stationen, für die eine längere Betriebszeit vorgesehen ist, grundsätzlich unter der Erdoberfläche erfolgen. Hinsichtlich der Einwirkungen von Erdströmen und anderen elektromagnetischen Störungen ist eine Verlegung der Leitungen in Stahlrohren am günstigsten. Aber auch dann, wenn infolge fehlender Störungen und kurzer Leitungen so aufwendige Maßnahmen überflüssig erscheinen, ist es zweckmäßig, die Leitungen mechanisch durch Kabelsteine zu sichern.

Alle Metallteile, die im Freien aufgestellt werden müssen, sind gegen Korrosion zu schützen. Aluminiumteile lassen sich u.U. bereits durch eine sorgfältig aufgebraute Eloxalschicht sichern. Stahloberflächen sollten durch einen metallischen Überzug (Zink oder Aluminium) und zusätzlich durch einen wetterfesten Anstrich gegen Korrosion geschützt werden. Der Anstrich ist in Abhängigkeit von den am Einsatzort zu erwartenden klimatischen Bedingungen zu wählen. Eine direkte, elektrisch leitende Verbindung verschiedener Metalle ist wegen der Gefahr der Bildung von Lokalelementen im Freien zu vermeiden.

Literaturverzeichnis

- AANDERAA, I. [1985]: A set of standard sensors for an automatic weather station. Papers presented at the 3rd WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-III), Ottawa, Canada: 8-12 July 1985; Instruments and Observing Methods Rep. No. 22, (WMO/TD-No. 50); Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1985, Ref. II.2, p. 37-42
- ABADIE, G. [1989]: Multilayer hygrometric sensors. Papers presented at the 4th Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-IV), Brussels, Belgium: 4-8 Sept. 1989; WMO Instruments and Observing Methods, Rep. No. 35; (WMO/TD - No. 303); Ref. IV.6, p. 183-187
- ACEVES-NAVARRO, L.A., HUBBARD, K.G. & SCHMIDT, J. [1988]: Group calibration of silicon cell pyranometers for use in an automated network. *J. Atmosph. and Oceanic Technology* **5**, No. 6, 875-879
- ACHESON, D.T. [1980]: Progress and problems in the automation of observations. Automated Meteorological Systems, Rep. No. 1, Papers presented at the Techn. Conf. on Evaluation and Standardization of Observing Techniques in Light of Automation, Norrköping (Sweden): 1-5 Sept. 1980; WMO Instruments and Methods of Observation, Geneva: 1980, Ref. IV.1, p. 133-137
- ADAM, B. [1995]: Start auf der Datenautobahn. Welche Anfangsprobleme mit dem Modem auftreten können. Ein Modem kaufen, aber welches? Geschwindigkeit ist Trumpf – auf die Bitzahl achten! *Berliner Zeitung* Nr. 274 (23. Nov. 1995) S. 60
- AFINOGENOV, L.P. [1981]: Metodika rasčeta vidivosti OVI v avtomatičeskich izmeritel'nyh sistemach. *Trudy Glavnoj Geofiz. Observ. Leningrad* Nr. 449, 88-91
- AKYÜZ, F.A., LIU, H. & HORST, T. [1991]: Wind tunnel evaluation of PAM II pressure ports. *J. Atmosph. and Oceanic Technology* **8**, No. 3, 323-330
- ALLAN, R. [1980]: New applications open up for silicon sensors: a special report. *Electronics* **53**, No. 24, 113-122
- AMTMANN, R. [1983]: Data acquisition system for wind induced tree vibration. The Forest-Atmosphere Interaction; Proc. Forest Environmental Measurements Conf., Oak Ridge, Tenn.: Oct. 23-28, 1983; D. Reiden Publ. Comp., Dordrecht / Boston / Lancaster: 1985, p. 149-159
- ANDERSON, R.B. [1977]: Measuring techniques. *Lightning*, Vol. 1: Physics of lightning; ed. by R.H. GOLDE; Acad. Press, London: 1977, p. 437-463
- ANGERMANN, R. [1978]: Sensors for measuring air-temperature and humidity appropriated to unmanned platforms. *Polska Akademia Nauk, Komitet Badaj Morza, Studia i Materiały Oceanologiczne* No. 23, Sopot: 1979, 97-104
- ANGERMANN, R., BOHMANN, W., MÖCKEL, F. & NEUBERT, G. [1980]: Ein Aspirationspsychrometer mit frequenzanalogem Ausgangssignal und Eignung zum Langzeiteinsatz auf maritimen Geräteträgern. *Beitr. Meereskde.* 1980, H. 43, 63-72
- ANTIKAINEN, V., JALAVA, J. & SALASMAA, E. [1981]: Sensor design with new technology. WMO, Instruments and Observing Methods, Rep. No. 9; Papers presented at the WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-II), Mexico-City: 13-17 July 1981; Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1981, Ref. IV.3, p. 219-226
- ANTIKAINEN, V. & HYVÖNEN, V. [1984]: Triple sensor digital barometer. Papers presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Cost-Effective Meteorological Observations (TECEMO), Nordwijkershout, Netherlands: 24-28 Sept. 1984; WMO Instruments and Observing Methods, Report No. 15; Secr. of the WMO, Geneva, Switzerland: 1984, Ref. III.8, p. 145-149
- ANTONIK, B. & GEITHNER, H. [1971]: Vergleiche der an der Automatischen Fernmeldenden Meteorologischen Station gewonnenen Temperaturwerte mit den Angaben von Quecksilberthermometern. *Sympos. "Automatische meteorologische Stationen"* Potsdam: 17.-18. März 1970; *Z. Meteorol.* **22** [1971] H. 8-10, 268-274
- ANUFRIEV, V.I. & KOBAČEVA, E.V. [1979]: Ocenka pogrešnosti izmeritel'nyh kanalov avtomatizirovannoj sistemy kontrolja zagrzaznenija vozducha. *Trudy Glavnoj Geofiz. Observ. Leningrad* Nr. 421, 1979, 88-93
- ARAYA, M.F. [1985]: Evaluation of geostationary and polar-orbiting satellites to collect meteorological data from automatic stations in the Antarctic Peninsula. *Advances in Space Res. (Oxford)* **5**, No. 6, 283-287
- ATLAS, D. [1954]: The estimation of cloud parameters by radar. *J. of Meteorol.* **11**, No. 4, 309-317
- ATTMANNSPACHER, W. [1977]: Operational experience with Ombrometer HP measurements over a period of several years. WMO, Papers presented at the WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO), Hamburg: 27-30 July 1977; WMO-No. 480, Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1977, p. 220-225
- ATTMANNSPACHER, W., HARTMANNGRUBER, R. & HANS, D. [1977]: Operational experience with dry and wet chemical type instruments to measure ozone near the ground. WMO, Papers presented at the WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO), Hamburg: 27-30 July 1977; WMO-No. 480, Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1977, p. 185-190
- ATTMANNSPACHER, W. [1978]: Neue Geräte und Methoden zur Messung des Punkt- und Flächenniederschlags. *Ber. Dtsch. Wetterdienst. (Offenbach)* Nr. 146 (15 S.)
- BACHEM, C., JOHN, G. & RUST, G. [1967]: Über ein neues Taupunktmeßgerät. *Meteorol. Rdsch.* **20**, H. 3, 67-68
- BAGWELL, J.W. & LINDOW, B.G. [1980]: Airborne meteorological data-collection system. *NASA Techn. Briefs (USA)* **5**, No. 3, 290-291
- BAKER, D.L., PRINE, G.D. & CANADA, R.H. [1980]: ANBESS test payload. *OCEANS '80, Internat. Forum on Ocean Engineering in the '80s*, Seattle, WA.: Sept. 8-12, 1980; Proc. IEEE (Cat. No. 80CH1572-7), New York: 1980, p. 350-356
- BALZER, W., ETTL, J., REINIGER, K., HEINRICH, G. & GÜSTEN, H. [1987]: An autonomic station for measuring air pollutants in remote areas. *Atmospheric Environment* **21**, No. 1, 179-183
- BARBE, F.D. [1975]: Imaging devices using the charged coupled concept. *Proc. IEEE* **63**, New York: 1975, No. 1, 38-67
- BARRY, I.L. & BURCH, J.J. [1980]: A battery-operated, averaging, digital temperature recorder. *Transact. of the ASAE, General Edit.*, **23**, No. 2, 394-397
- BATTISTA, P., BENINCASA, F. & FASANO, G. [1990]: Pluviointensimetro a microprocessore. *Elettronica Oggi* No. 110 (15. Nov. 1990), 123-132
- BAUMANN, W., KURTZE, P. & NAUMANN, G. [1974]: Standardinterfaces der elektronischen Meßtechnik. *Reihe Automatisierungstechnik*, Nr. 165, VEB Verlag Technik Berlin: 1974 (92 S.)
- BAUMGART, H. & HÖHNE, W. [1969]: Meßwerterfassungsanlage für Klimastationen. *Z. Meteorol.* **21**, H. 1/2, 26-30
- BEIKIRCH, H., FINCKE, U., SCHINDLER, Th. & MÜLLER, W. [1988]: Einsatzverfahren mit einem dezentralen Meßdatenerfassungssystem in Feldbusstruktur. *Messen Steuern Regeln* **31**, H. 6, 251-254
- BELHOUSE, H.C., & DICKSON, J.S. [1966]: The measurement and reporting of cloud height and amount by automatic weather station. *Automatic Weather Stations*, WMO Techn. Note No. 82; Proc. of the WMO Techn. Conf. on Automatic Weather Stations, Geneva: 1967, (WMO-No. 200.TP.104) p. 45-54

- BELJAARS, A.C.M. & WIERINGA, J. [1984]: Specification and determination of gustiness by classical and digital wind stations. Papers presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Cost-Effective Meteorological Observations (TECEMO), Noordwijkerhout, Netherlands: 24-28 Sept. 1984; WMO Instruments and Observing Methods, Report No. 15; Secr. of the WMO, Geneva, Switzerland: 1984, Ref. V.6, p. 257-261
- BENESCH, W. [1995]: EUMETSAT – Europas meteorologische Satellitenorganisation. Mitt. Dtsch. Meteorol. Ges. 1995, H. 3, 26-30
- BENNETT, M. [1989]: Meteorological logging on a 389 m TV mast. *Weather (UK)* 44, No. 3, 116-120
- BENSON, K. [1986]: Human factors of an environmental information system. Proc. Internat. Conf. on Development and Application of Computer Techniques to Environmental Studies (ENVIROSOFT 86), Los Angeles: Nov. 1986; Computational Mechanics Publ., Southampton: 1986, p. 661-668
- BERGHOLTER, U. [1983]: MEISE: Ein automatisches Meßwerterfassungssystem. *Annalen d. Meteorol. (N.F.)* Nr. 20, 1983, 101-102
- BERGMAN, L., HOVBERG, T. & WIBECK, H. [1985]: "Pressure tendency" and "discontinuity in wind" – discussion of two algorithms used in Swedish automatic weather stations. Papers presented at the 3rd WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-III), Ottawa, Canada: 8-12 July 1985; Instruments and Observing Methods Rep. No. 22, (WMO/TD-No. 50); Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1985, Ref. V.6, p. 261
- BERNT, H. & REICHL, H. [1979]: Zukunftsperspektiven für die elektronischen Bauelemente und Sensoren. VDI-Berichte Nr. 348, S. 147-152
- BERRSHEIM, H. [1997]: Methoden und Prozesse der atmosphärischen Chemie. *Promet – Meteorol. Fortbildg.* 26, H. 1/2, 61-68
- BEST, R. [1988]: Digitale Meßwertverarbeitung. *Techn. Messen* 55, H. 5, 203-208
- BETTAN, A. & VITON, P. [1977]: Équipement automatique pour l'observation de surface en France. WMO, Papers presented at the WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO), Hamburg: 27-30 July 1977; WMO-No. 480, Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1977, p. 78-84
- BETTAN, A. [1985]: Automatisation du réseau de base – Système d'aide à l'observation MISTRAL. Papers presented at the 3rd WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-III), Ottawa, Canada: 8-12 July 1985; Instruments and Observing Methods Rep. No. 22, (WMO/TD-No. 50); Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1985, Ref. IV.11, p. 209-214
- BILLING, D. [1981]: Airborne data acquisition system. *Computer Design* 20, No. 11, 151-152 & 154
- BILZ, F. [1978]: Digitaluhr und Rechner mit U 820 D. *Radio Fernsehen Elektronik* 27, H. 10, 662-666
- BIRKELAND, J.D., KAUFMAN, I. & BACKUS, C.E. [1985]: A photothermal radiometer for concentrated sunlight intensity measurements. 28. IEEE Photovoltaic Specialists Conf. 1985; Conf. Record (Cat. No. 86CH2208-7), IEEE New York: 1985, p. 1689-1692
- BIRKLE, M. & SCHÖLZKE, D. [1976]: Analysengeräte mit Statussignaleinrichtung und ihr Einsatz in automatisierten Meßnetzen. *Siemens-Z.* 50, H. 6, 394-402
- BIRKLE, M. [1979]: Meßsysteme. *Meßtechnik für den Immissionschutz – Messen der gas- und partikelförmigen Luftverunreinigungen.* Oldenbourg Verlag, München u. Wien: 1979, S. 143-172
- BLEEK, U. [1978]: Wolkenhöhenmesser IWO mit Fernregistrierung und als Geber für die AFMS. 4. Internat. Sympos. über die effektive Nutzung Automatischer Meteorologischer Stationen. Potsdam: 25.-27. April 1978; Abhandlgen. Meteorol. Dienst. d. DDR Nr. 125, 1980, 29-30
- BOBE, W. [1986]: Zeitzeichengesteuerte Uhr mit Einchip-Mikrorechner. *Radio Fernsehen Elektronik* 35, H. 4, 215-217
- BOCHTLER, J. [1991]: Langzeitarchivierung von Prozeßdaten auf optischen Speicherplatten. *Automatisierungstechn. Praxis* 33, H. 2, 98-100
- BOEDER, L. [1994]: Quadratisch, praktisch, gut. Disketten bleiben vorerst Speichermedium Nummer eins. *Frankfurter Allg. Zeitung, PC-Beilage* Nr. 266 (15. Nov. 1994), S. B4
- BOGOMOLOV, A.M. & PETROV, V.P. [1963]: Problema svjazi avtomatičeskoj teleizmeritel'noj stancii s telegrafnymi setjami obščego pol'zovanija. *Trudy Vses. Nauč.-Meteorol. Sovešč. (Leningrad)* Nr. 9 (1963) 42-47
- BOLDRIN, A., CESCA, A. & RABITTI, S. [1986]: An automatic data acquisition system for Coulter Counter Mod. TA II. *Boll. di Oceanol. Teorica ed Appl.* 4, No. 3, 159-164
- BOND, F.S. et al. [1982]: Comparative study of some single pole visibility sensors, the Meteorological Office Mk-4 transmissometer, and estimates of visibility made by observers. *Scient. Paper Meteorol. Office, London, Great Britain* No. 39, 1982 (60 p.). *Meteorol. & Geophys. Abstr.* 34.2-63 [1983] p. 228-229
- BOURKE, R.S. & Van CAUWENBERGHE, R. [1980]: The automation program for surface observation stations in Canada. *Automated Meteorological Systems, Rep. No. 1*, Papers presented at the Techn. Conf. on Evaluation and Standardization of Observing Techniques in Light of Automation, Norrköping (Sweden): 1-5 Sept. 1980; WMO Instruments and Methods of Observation, Geneva: 1980, Ref. II.5, p. 75-82
- BOUTACOFF, D., PERHAC, R., HANSEN, A., MUELLER, P.K. & ALLEN, M.A. [1990]: Reality test for acid rain models. *EPRI Journal* 1990, Dec., p. 28-35
- BOWMAN, W.P. & Van CAUWENBERGHE, R. [1985]: The READAC field test. Papers presented at the 3rd WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-III), Ottawa, Canada: 8-12 July 1985; Instruments and Observing Methods Rep. No. 22, (WMO/TD-No. 50); Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1985, Ref. IV.10, p. 203-208
- BOŽEVIKOV, N.S. [1960]: Registrator vysoty nižnej granicy oblakov. *Meteorol. i Gidrol. (Moskva)* 1960, No. 11, 42-45
- BRACEWELL, M.G. & CAMPBELL, L.A. [1981]: A rainfall recording system employing non-volatile solid state memories. WMO, Instruments and Observing Methods, Rep. No. 9; Papers presented at the WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-II), Mexico-City: 13-17 July 1981; Secr. of WMO Geneva, Switzerland: 1981, Ref. II.5, p. 115-122
- BRADLEY, J.T. & LEFKOWITZ, M. [1975]: Experiments with new generation ceilometers for potential automatic station use. WMO, Automated Meteorological Systems; Proc. of the WMO Techn. Conf. on Automated Meteorological Systems (TECAMS), Washington, D.C.: 14-17 Febr. 1975; (WMO - No. 420); Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1975, 137-147
- BRADLEY, J.T. & LEFKOWITZ, M. [1980]: Development of automated observing techniques for clouds and visibility. *Automated Meteorological Systems, Rep. No. 1*, Papers presented at the Techn. Conf. on Evaluation and Standardization of Observing Techniques in Light of Automation, Norrköping (Sweden): 1-5 Sept. 1980; WMO Instruments and Methods of Observation, Geneva: 1980, Ref. IV.5, p. 159-166
- BRADLEY, J.T. & NADOLSKI, V.L. [1985]: The development of reporting algorithms for automated surface observations. Papers presented at the 3rd WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-III), Ottawa, Canada: 8-12 July 1985; Instruments and Observing Methods Rep. No. 22, (WMO/TD-No. 50); Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1985, Ref. V.4, p. 249-254
- BRAS, R.L., GROSSMAN, D. & SCHAFFER, D. [1985]: Effects of hydrometeorology on the GOES random data collection system. *J. Hydrol. Sciences (Oxford)* 30, No. 1, 1-22
- BREUER, H. [1965]: Meßtechnische Grundlagen auf dem Gebiet der Messung staubförmiger Luftverunreinigungen. *Staub* 25, Nr. 9, 351-356

- BREUER, L.J. [1977]: Equipment for rain structure measurements on a five second time base. WMO, Papers presented at the WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO), Hamburg: 27-30 July 1977; WMO-No. 480, Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1977, p. 1-6
- BREUER, R. [1977]: Schaltung zum automatischen Stellen von Digitaluhren. *Radio Fernsehen Elektronik* 26, H. 3, S. 80
- BROCK, F.V., SAUM, G.H. & SEMMER, S.R. [1986]: Portable automated mesonet II. *J. Atmosph. and Oceanic Technology* 3, No. 4, 573-582
- BROCK, F.V., CRAWFORD, K., ELLIOTT, R.L., CUPERUS, G.W., STADLER, S.J., JOHNSON, H.L. & EILTS, M.D. [1995]: The Oklahoma mesonet: a technical review. *J. Atmosph. and Oceanic Technology* 12, No. 1, 5-19
- BROCKHAUS, A. & FRIEDRICH, K.-H. [1965]: Methoden der Messung staubförmiger Luftverunreinigungen. *Staub* 25, Nr. 9, 356-359
- BRÖMME, G., MESSERSCHMIDT, P. & WALDOW, H. [1980]: Einsatz der Magnetbandeinheit daro C 8260 zur Speicherung meteorologischer Daten auf Magnetbandkassette. *Z. Meteorol.* 30, H. 3, 160-162
- BROUSAIDES, F.J. [1982]: Assessment of the AN/GMQ-13 cloud height set capability to meet AWS requirements. U.S. Air Force Geophys. Labor., Hanscom AFB, MA; Environmental Research Papers No. 812, Dec. 12, 1982 (AFGL-TR-82-0382) (26 p.)
- BROUWER, H.J., De VEER, S.M. & ZEEDIJK, H. [1971/72]: Das Meßstellennetz für SO₂-Konzentrationen im Mündungsgebiet des Rheins. *Philips Techn. Rdsch.* 32, No. 2, 29-38
- BROWN, R.T. [1968]: Weather watcher. *Electronics* 41, No. 3, p. 196 & 198
- BROWN, H.A. [1979]: Preliminary assessment of an automated system for detecting present weather. U.S. Air Force, Geophys. Labor., Hanscom AFB, MA., (AFGL-TR-79-0137) Instrumentation Papers No. 276, June 1979 (38 p.)
- BROWN, H.A. [1980]: Automation of visual weather observations. U.S. Air Force, Geophys. Labor., Hanscom AFB, MA., Final Report 1.4. (AFGL-TR-80-0097); Instrumentation Papers No. 286, 1980 (34 p.)
- BRUCKMANN, P., BEIER, R. & KRAUTSCHEID, S. [1983]: Immissionsmessungen von Kohlenwasserstoffen in den Belastungsgebieten Rhein-Ruhr. *Staub - Reinhaltg. d. Luft* 43, Nr. 10, 404-410
- BÜCHLER, W. [1974]: Telemetrie - eine Übersicht mit Beispielen aus der Meteorologie. *Der Elektroniker (Aarau)* 13, Nr. 2, EL8-EL13
- BÜHN, U. [1983]: Verbesserung der Störsicherheit elektronischer Geräte. *Radio Fernsehen Elektronik* 32, H. 4, 207-211
- BÜKER, H. & HÄSING, F.W. [1990]: Fiber-optic sensors for meteorological data acquisition. *SPIE* 1314, Fibre Optics '90, p. 244-254
- BÜRKHOLZ, A. [1991]: Untersuchungen zum Meßfehler bei nicht isokinetischer Entnahme, Teil 1 und Teil 2. *Staub - Reinhaltg. d. Luft* 51, Nr. 11, 395-400 u. Nr. 12, 439-443
- BURKART, H. [1987]: Mobile Meßdatenerfassung in der Umwelttechnik. *EEE Elektronik-Technologie/Elektronik-Anwendung* Nr. 15, 1987, 43-44
- BURMANN, F.J. [1973a]: A review of automated monitoring systems for air quality. Automatic air quality monitoring systems; Proc. Conf. Nat. Inst. Public Health, Bilthoven, Nederl.: 5-8 June 1973, ed. by T. SCHNEIDER; Elsevier Scient. Publ. Comp., Amsterdam/London/ New York: 1973, p. 1-21
- BURMANN, F.J. [1973b]: National monitoring systems in the U.S.A. Automatic air quality monitoring systems; Proc. Conf. Nat. Inst. Public Health, Bilthoven, Nederl.: 5-8 June 1973, ed. by T. SCHNEIDER; Elsevier Scient. Publ. Comp., Amsterdam/London/ New York: 1973, p. 65-70
- BUSEN, R. & BUCK, A.L. [1995]: A high-performance hygrometer for aircraft use: description, installation, and flight data. *J. Atmosph. and Oceanic Technology* 12, No. 1, 73-84
- CALLÉDE, J. [1985]: Emploi des satellites à orbite polaire pour la collecte des mesures effectuées aux stations hydrométéorologiques: bilan de quatre années d'utilisation. *IAHS Publ. (Wallingford, Engl.)* No. 145, 1985, p. 135-142
- CALLÉDE, J. et al. [1996]: Use of satellite communication of hydro-metric data for the whole of Brazil. *Hydrol. Sciences J. (Oxfordshire, Engl.)* 41, No. 6, 903-013
- CHARLSON, R.J., HORVARTH, H. & PUESCHEL, R.F. [1967]: The direct measurement of atmospheric light scattering coefficient for studies of visibility and air pollution. *Atmosph. Environment* 1, No. 4, 469-478
- CHEN, Ph.C. [1990]: Application of scientific visualization to meteorological data analysis and animation. *Computer ANIMATION '90*, Geneva (Switzerland): 25-27 April 1990; Springer-Verlag, Berlin: 1990, p. 31-38
- CHISHOLM, D.A. [1979]: Recent developments in automated weather observing and forecasting. U.S. Air Weather Service, Scott AFB, IL.; Techn. Report (AWS-TR-79-001), May 1979, 62-68
- CHISHOLM, D.A., LYNCH, R.H. & WEYMAN, J.C. [1980]: Demonstration test of the modular automated weather system (MAWS). U.S. Air Force Geophys. Labor., Hanscom AFB, IL., Instrumentation Papers No. 285. (AFGL-TR-80-0037), March 1980 (85 p.)
- COLE, H.L. & KEENAN, W.H. [1989]: A transportable, self contained surface and upper-air measurement system for the Tropical Ocean and Global Atmospheric Program (TOGA). Papers presented at the 4th Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-IV), Brussels, Belgium: 4-8 Sept. 1989; WMO Instruments and Observing Methods, Rep. No. 35; (WMO/TD - No. 303); Ref. V.10, p. 247-252
- COLLIS, R.T.H. [1966]: Lidar: a new atmospheric probe. *Quart. J. Royal Meteorol. Soc.* 92, No. 392, 220-230
- CONNORS, J.F. [1968]: Effect of aerial download capacitance on lightning-flashcounter performance. *Proc. Inst. Electr. Engrs. (London)* 115, No. 7, 951-953
- CONNORS, St. [1981]: Sichere Eingangspotentialtrennung mit Reed-Relais für Datenerfassungssysteme. *Elektronik* 30, H. 15, 65-72
- COOK, J.M. [1975b]: Micropower sunshine sensor for AWS. WMO, Automated Meteorological Systems; Proc. of the WMO Techn. Conf. on Automated Meteorological Systems (TECAMS), Washington, D.C.: 14-17 Febr. 1975; (WMO - No. 420); Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1975, 179-183
- COOK, J. [1981]: Efficient techniques for low power auto stations. WMO, Instruments and Observing Methods, Rep. No. 9; Papers presented at the WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-II), Mexico-City: 13-17 July 1981; Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1981, Ref. IV.6, p. 235-239
- COOLEY, J.W. & TUCKEY, J. [1965]: *J. Math. Computation* 19, p. 90-98
- COORAY, V. [1986]: Response of CIGRE and CCIR lightning flash counters to the electric field changes from lightning: A theoretical study. *J. Geophys. Res.* 91, No. D2, 2835-2842
- COURT, G.W.G. [1966]: Automatic weather station timing system. Automatic Weather Stations, WMO Techn. Note No. 82; Proc. of the WMO Techn. Conf. on Automatic Weather Stations, Geneva: 1967, (WMO-No. 200.TP.104) p. 90-94
- CROMMELYNCK, D. [1977]: Mesure du flux radiatif spectral sur un plan horizontal. WMO, Papers presented at the WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO), Hamburg: 27-30 July 1977; WMO-No. 480, Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1977, p. 129-131

- CROSBY, P. [1960]: Measurement of visual range. *Nature* 185, No. 4711, 438-439
- CUNDARI, V., COLOMBO, T., PAPINI, G., BENEDICTI, G. & CIATTIAGLIA, L. [1990]: Recent improvements on atmospheric CO₂ measurements at Mt. Cimone Observatory, Italy. *Il Nuovo Cimento* 13, No. 5, 871-882
- CUNNINGHAM, J.A. [1979]: Microprocessors in weather data acquisition. U.S. Air Weather Service, Scott AFB, IL.; Techn. Report (AWS-TR-79-001), May 1979, p. 87-90
- DÄKE, C.U. [1972]: Über ein neues Modell des Strahlungsbilanzmessers nach Schulze. *Ber. Dtsch. Wetterdienst*, Nr. 126 (Band 16) (22 S.)
- DAHLMANN, H. & KRAMMER, K. [1990]: Meßdatenerfassung in der Kontinentalen Tiefbohrung. *Techn. Messen* 57, H. 12, 478-483
- DAHLMANN, H. & SCHNEKENBURGER, B. [1986]: Ringbus-System zur flexiblen Meßdatenerfassung. *Elektronik* 35, H. 24, 89-90 u. 92-94
- DANNECKER, W. & REICH, Th. [1983]: Automatische Kurzzeitprobenahme von Immissionsstäuben und die nachfolgende analytische Bestimmung von Elementgehalten. *Staub - Reinhaltg. d. Luft* 43, Nr. 6, 253-258
- DATAR, S.V. & PAKKIR MOHAMMED, P.M. [1966]: An automatic weather station for use in India. *Automatic Weather Stations*, WMO Techn. Note No. 82; Proc. of the WMO Techn. Conf. on Automatic Weather Stations, Geneva: 1967, (WMO-No. 200.TP.104) p. 331-337
- DAY, G.J., SANDS, K.J.T. & TONKINSON, B. [1974]: The Meteorological Office weather observing system MOWOS Mk 2. *Meteorol. Mag.* 103, No. 1228, 329-337
- De BRICHAMBAUT, C.P. & LEROY, M. [1995]: La mesure de la température de l'air. *La Météorologie (Paris)* 8, No. 12, 14-30
- DeCHENG, Z. [1989]: Some research on the temperature characteristics of capacitive thin film (polymer) humidity sensors. Papers presented at the 4th Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-IV), Brussels, Belgium: 4-8 Sept. 1989; WMO Instruments and Observing Methods, Rep. No. 35; (WMO/TD - No. 303); Ref. IV.7, p. 189-194
- DEHNE, K. [1977]: Design and performance of a new instrument for measuring UV-B global radiation. WMO, Papers presented at the WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-IV), Hamburg: 27-30 July 1977; WMO-No. 480, Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1977, p. 173-178
- DEHNE, K. [1985]: Dependence on threshold solar irradiance of measured sunshine duration. Papers presented at the 3rd WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-III), Ottawa, Canada: 8-12 July 1985; Instruments and Observing Methods Rep. No. 22, (WMO/TD-No. 50); Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1985, Ref. V.7, p. 263-270
- DEHNE, K. [1989]: Preliminary results of the WMO automatic sunshine duration measurement comparison 1988/89 in Hamburg. Papers presented at the 4th Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-IV), Brussels, Belgium: 4-8 Sept. 1989; WMO Instruments and Observing Methods, Rep. No. 35; (WMO/TD - No. 303); Ref. I.4, p. 27-32
- DERR, V.E., POST, M.J., SCHWIESOW, R.L., CALFEE, R.F. & McNICE, G.T. [1976]: A theoretical analysis of the information content of lidar atmospheric returns. Techn. Rep. NOAA, ERL, Wave Propagation Labor., NOAA-TR-ERL-296-WPL29, Boulder, Colorado
- De SANTIS, F., Di FILIPPO, P. & ALLEGRINI, I. [1994]: Measurement of nitrogen dioxide in ambient atmosphere by carbon coated annular diffusion denuders. *Air Pollution II*, Vol. 2: Pollution Control and Monitoring, ed. by J.M. BALDASANO et al.; Computational Mechanics Publ., Billerica, MA: 1994, p. 425-432
- DIBBERN, J. [1995]: Requirements on new automatic weather stations of the Deutscher Wetterdienst. Papers presented at the International Workshop on Experiences with Automatic Weather Stations in Operational Use within National Weather Services, Vienna, Austria: 15-17 May 1995, WMO Instruments and Observing Methods Rep. No. 58 (WMO/TD - No. 670), p. 15-17
- DITTMANN, J. [1965]: Meßwertverarbeitung. *Arch. techn. Messen* 1965, Lfg. 348, 23-24 (J 080-F2)
- DOBOS, K., MOKWA, W & ZIMMER, G. [1988]: Sensoren für Umweltgrößen. *Elektrotechnik u. Informationstechnik* 105, H. 4, 163-168
- DOCKENDORFF, D. & Van CAUWENBERGHE, R. [1984]: Canada's new multipurpose automatic weather observing and reporting station. Papers presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Cost-Effective Meteorological Observations (TECEMO), Nordwijkershout, Netherlands: 24-28 Sept. 1984; WMO Instruments and Observing Methods, Report No. 15; Secr. of the WMO, Geneva, Switzerland: 1984, Ref. VI.2, p. 287-290
- DOCKENDORFF, D. & McNAIR, S. [1995]: Program requirements and issues related to surface weather automation in Canada. Papers presented at the Internat. Workshop on Experiences with Automatic Weather Stations in Operational Use within National Weather Services, Vienna, Austria: 15-17 May 1995, WMO Instruments and Observing Methods Rep. No. 58 (WMO/TD - No. 670), Ref. VI.3, p. 19-23
- DODDRIDGE, B.G., DICKERSON, R.R., HOLLAND, J.Z., COOPER, J.N., WARDELL, R.G., POULIDA, O. & WATKINS, J.G. [1991]: Observations of tropospheric trace gases and meteorology in rural Virginia using an unattended monitoring system: Hurricane Hugo (1989), a case study. *J. Geophys. Res.* 96, No. 5, 9341-9360
- DRATHEN, H. [1991]: Der Feldbus aus Sicht des Anwenders. *Automatisierungstechn. Praxis* 33, H. 2, 55-63
- DRESIA, H., FISCHÖTTER, P. & FELDEN, G. [1964]: Kontinuierliches Messen des Staubgehaltes in Luft und Abgasen mit Betastrahlen. *VDI-Z.* 106, Nr. 24, 1191-1195
- DUNCAN, C.N. [1985]: METDADS: A microcomputer-controlled weather display station. *Weather (Bracknell)* 40, No. 3, 68-76
- DURCANSKY, G. [1992]: EMV-gerechtes Gerätedesign. *Franzis-Verlag, Poing*: 1992 (568 S.)
- DUSEK, D.A., HOWELL, T.A. & STEINER, J.L. [1993]: Evaluation of electronic temperature/relative humidity sensors. Management of irrigation and drainage systems: integrated perspectives, ed. by R.G. ALLEN, American Soc. of Civil Engrs., New York: 1993, p. 993-999
- DUVERNOY, J. & GAUMET, J.L. [1996]: Precipitating hydrometeor characterization by a CW Doppler radar. *J. Atmosph. and Oceanic Technology* 13, No. 3, 620-629
- EARNSHAW, K.B. & KEEBAUGH, B. [1978]: Research laser weather identification instrument. U.S. Nat. Oceanic and Atmosph. Administration, Environmental Res. Labors., Wave Propagation Labor., Boulder, CO., Collected Reprints 1976-1977, Sept. 1978, p. 829 (AQC 865 W38)
- ECKERT, K. [1975]: Störspannungen bei digitaler Meßwerterfassung und ihre Unterdrückung. *Radio Fernsehen Elektronik* 24, H. 17, 555-558
- EGOROV, A.F., ZACHARČENKO, N.Z. & MIŠATKIN, V.N. [1986]: Specializirovanye kvarcevye časy dlja geofizičeskich issledovanij. *Seism. Pribor. Instrum. Sredstva Seism. Nabl. (SSSR)* 18, 3-7
- ELOMAA, E., HYVÖNEN, R., TAMMELIN, B. & TUOMINEN, A. [1989]: Preliminary results of the WMO solid precipitation intercomparison in Finland. Papers presented at the 4th Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-IV), Brussels, Belgium: 4-8 Sept. 1989; WMO Instruments and Observing Methods, Rep. No. 35; (WMO/TD - No. 303); Ref. I.5, p. 33-40
- ENGEL, R. [1982]: Frequenzanaloge Systemkomponenten als Bestandteil moderner Automatisierungskonzepte auf Mikrorechnerbasis. *Messen Steuern Regeln* 25, H. 11, 618-620

- ETIENNE, M. & De SWERT, C. [1984]: Automatic videometer for the runway visual range measurement. Papers presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Cost-Effective Meteorological Observations (TECEMO), Nordwijkershout, Netherlands: 24-28 Sept. 1984; WMO Instruments and Observing Methods, Report No. 15; Secr. of the WMO, Geneva, Switzerland: 1984, Ref. III.9, p. 151-155
- FENZEL, H. & KNAUER, R. [1981]: Batteriebetriebenes Barometer mit digitaler Anzeige. Siemens Components 19, H. 3, 100-103
- FICHAUX, C. [1981]: A diffusometer for measurement visibility. WMO, Instruments and Observing Methods, Rep. No. 9; Papers presented at the WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-II), Mexico-City: 13-17 July 1981; Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1981, Ref. I.11, p. 67-74
- FIRTH, J.G., JONES, A. & JONES, T.A. [1974]: Solid state sensors for gas detection. Proc. Conf. on Environmental Sensors and Applications, Roy. Soc. London: 18-19 Nov. 1974; IEEE, London: 1974, p. 67-65
- FISHER, N.I. [1993]: Statistical analysis of circular data. Press Syndicate of the Univ. of Cambridge, Cambridge: 1993 (277 p.)
- FOITZIK, L. [1953]: Messung und Registrierung der Sichtweite. *Optik* 10, H. 10, 513-516
- FOKEN, Th. [1998a]: Bestimmung der Schneedrift mittels Ultraschallanemometers. Deutsche Meteorologen-Tagung 14.-18. Sept. 1998 in Leipzig; *Annalen d. Meteorologie* 37, Bd. 2, 451-452
- FOSTER, D.L. [1975]: Use of RAMOS in the AFOS system. WMO, Automated Meteorological Systems; Proc. of the WMO Techn. Conf. on Automated Meteorological Systems (TECAMS), Washington, D.C.: 14-17 Febr. 1975; (WMO - No. 420); Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1975, 236-245
- FRANK, R.E. [1966]: Automatic stations for shipborne use. Automatic Weather Stations, WMO Techn. Note No. 82; Proc. of the WMO Techn. Conf. on Automatic Weather Stations, Geneva: 1967, (WMO-No. 200.TP.104) p. 281-293
- FRASER, P.J., CORAM, S. & DEREK, N. [1987]: Atmospheric methane, carbon monoxide, and carbon dioxide by gas chromatography, 1978-1985. Baseline Atmospheric Program (Australia), 1985; ed. by B. FORGAN & P.J. FRASER; Dept. of Science, Bureau of Meteorology, Tasmania, Australia: June 1987, p. 48-50
- FREITAG, H.P., McPHADEN, M.J. & SHEPHERD, A.J. [1989]: Comparison of equatorial winds as measured by cup and propeller anemometers. *J. Atmosph. and Oceanic Technology* 6, No. 2, 327-332
- FRI TSCH, V. [1965]: Zum Problem der Blitzzählung. *Gerlands Beitr. Geophys.* 74, Nr. 1, 71-75
- FRI TSCHEN, L.J. [1963]: Condensation on shielded net radiometers. *J. Appl. Meteorol.* 2, No. 2, 308-310
- FRI TSCHEN, L.J. [1970]: Particular problems of instrument design and overall development of systems for agricultural and climatological stations. *Meteorol. Monographs* 11, No. 33, 346-351
- FRÜHAUF, D. & HEINZE, D. [1990]: Taupunktmessung auf der Basis akustischer Oberflächenwellen. *Feingerätetechnik* 39, H. 4, 162-163
- FRÜHAUF, G. [1965]: Blitzzählung. *ETZ B* 17, Nr. 24, 807-809
- FRÜNGEL, F. [1960]: Der "Skopograph" ein Flugplatz-Transmissometer mit Impulslicht. *Beitr. Phys. Atmosph.* 33, H. 1/2, 36-52
- FRÜNGEL, F. [1961]: Der impulsoptische Wolkenhöhenmesser. *Arch. Meteorol. Geophys. Bioklimatol.* B10, H. 2, 243-251
- FRÜNGEL, F. [1963]: Methoden der Transmissions- und Strahlungsmessung an großen Luftvolumina mittels Impulslicht, Nebelwarn- und Sichtweitenmeßgerät mit sehr großer Meßbasis. *Berichte Dtsch. Wetterdienst. (Offenbach)* 12, Nr. 91, 159-163
- FULLER, C. [1998]: The use of electronic media in public weather services. *WMO Bull.* 47, No. 3, 242-245
- FUNK, J.P. [1959]: Improved polythene-shielded net radiometer. *J. Scient. Instrum.* 36, No. 6, 267-270
- FUSEY, F.X., BLOUCH, P. & KLAUS, V. [1984]: Development of drifting and moored meteorological buoys. Papers presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Cost-Effective Meteorological Observations (TECEMO), Nordwijkershout, Netherlands: 24-28 Sept. 1984; WMO Instruments and Observing Methods, Report No. 15; Secr. of the WMO, Geneva, Switzerland: 1984, Ref. VI.7, p. 315-319
- GAISFORD, W.C. & RAWSON, D.M. [1989]: Biosensor for environmental monitoring. *Measurement & Control* 22, No. 6, 183-186
- GAL'DINOV, G.V. & KON'KOV, S.A. [1969]: Nekotorye rezultaty avtomatičeskoj registracii sernistogo gaza pyli. *Trudy Glavnoj Geofiz. Observ. Leningrad* Nr. 238, 1969, 96-106
- GALLAGHER, F.W. [1989]: The next generation of sensors of ASOS. Papers presented at the 4th Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-IV), Brussels, Belgium: 4-8 Sept. 1989; WMO Instruments and Observing Methods, Rep. No. 35; (WMO/TD - No. 303); Ref. III.2, p. 105-109
- GALLAGHER, M.S., KING, D.B., WHUNG, P.-Y. & SALTZMAN, E.S. [1997]: Performance of the HPLC/fluorescence SO₂ detector during the GASIE instrument intercomparison experiment. *J. Geophys. Res.* 102, No. D13, 16247-16254
- GALLÓ, V., MEZŐSI, M. & SIMON, A. [1988]: Operational experiences with the "METEOR-2" AWS: compatibility of sensors and products. WMO, Papers presented at the WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECO-1988), Leipzig: 16-20 May 1988; Instruments and Observing Methods Rep. No. 33 (WMO/TD-No. 222), Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1988, Ref. VI.10, p. 341-346
- GARCIA, E.P. [1987]: A smart low-power meteorological system. *Aerospace Electron. System Mag.* 2, No. 9, 16-19
- GARRATT, J.R., BIRD, I.G. & STEVENSON, J. [1986]: Electrical-readout, oven-controlled aneroid barometer for meteorological application. *J. Atmosph. and Oceanic Technology (Boston)* 3, No. 4, 605-613
- GAUMET, J.L. & SALOMON, P. [1989]: Un visibilimètre par diffusion de la lumière. Papers presented at the 4th Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-IV), Brussels, Belgium: 4-8 Sept. 1989; WMO Instruments and Observing Methods, Rep. No. 35; (WMO/TD - No. 303); Ref. III.5, p. 123-128
- GAUMET, J.-L. & SALOMON, P. [1998]: Solia, un nouvel instrument météorologique pour caractériser l'état du sol. *La Météorologie (Paris)* 8, No. 24, 8-20
- GAUTIER, W.J. & TAGGE, F. [1986]: Retractable mounting of meteorological sensors on fixed platforms. Proc. Internat. Sympos. Marine Data Systems MDS '86, New Orleans: April 30 - May 2, 1986, p. 565-567
- GAYTANDJIEV, D., KRUSTEVA, K., IVANOV, H., KRUSTEV, K. & PETROV, R. [1995]: A new low-cost AWS for climatological and environmental monitoring. Papers presented at the International Workshop on Experiences with Automatic Weather Stations in Operational Use within National Weather Services, Vienna, Austria: 15-17 May 1995, WMO Instruments and Observing Methods Rep. No. 58 (WMO/TD - No. 670), p. 103-107
- GELBKE, W. [1949]: Wege zur Konstruktion eines kältefesten Windmessers. *Z. Meteorol.* 3, H. 8/9, 260-266
- GERLACH, G., SAGER, K. & NAKLADAL, A. [1996]: Wie genau messen piezoresistive Sensoren? *Techn. Messen* 63, H. 11, 403-412
- GERTH, G. & HÖHNE, W. [1965]: Eine automatische Meßwerterfassung- und -übertragungsanlage für meteorologische Zwecke. *Z. Meteorol.* 18, H. 3/4, 132-141
- GIELES, A.C.M. & SOMERS, G.H.J. [1973/74]: Miniaturdruckwandler mit einer Siliziummembrane. *Philips techn. Rdsch.* 3, Nr. 1, 15-22
- GILPIN, A. [1963]: Control of air pollution. Butterworth & Co. Ltd., London: 1963

- GÖDDERTZ, J. [1989]: Das PROFIBUS-Konzept: Durchgängige Kommunikationslinie im Feldbusbereich. *Elektronik* 38, H. 16, 71-78
- GÖPEL, W. [1985]: Entwicklung chemischer Sensoren: Empirische Kunst oder systematische Forschung. *Techn. Messen* 52, H. 2, 47-58
- GÖTZ, K. & ENTLEUTNER [1986]: Elektronisches Barometer mit LCD-Graphic-Modul. *Elektronik* 35, H. 7, 121-122
- GOLDE, R.H. [1966]: A lightning flash counter. *Electron. Engrng. (London)* 38, No. 457, 164-166
- GOODENOUGH, F. [1985]: Sensor ICs: processing, materials open factory doors. *Electron. Design* 33, No. 9, 133-138, 140, 142, 144, 146
- GOODISON, B.E., LANGHAM, E.J. & ATHANASSIADIS, D. [1985a]: RADARSAT and MSAT: proposed Canadian satellite systems with hydrological applications. *IAHS Publ. (Wallingford, Engl.)* No. 145, 1985, p. 75-85
- GOODISON, B.E., WILSON, B. & METCALFE, J. [1985b]: An inexpensive remote snow depth gauge. Papers presented at the 3rd WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-III), Ottawa, Canada: 8-12 July 1985; Instruments and Observing Methods Rep. No. 22, (WMO/TD-No. 50); Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1985, Ref. II.14, p. 111-116
- GOODISON, B.E., METCALFE, J.R. & WILSON, R.A. [1988a]: Performance of a Canadian automatic snow depth sensor. WMO, Papers presented at the WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECO-1988), Leipzig: 16-20 May 1988; Instruments and Observing Methods Rep. No. 33 (WMO/TD-No. 222), Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1988, Ref. II.4, p. 41-46
- GOODISON, B.E., LOUIE, P.Y.T. & YANG, D. [1998b]: WMO solid precipitation measurement intercomparison. Final report. WMO Instruments and Observing Methods, Rep. No. 67 (WMO/TD-No. 872), 1998 (88 + 211 p.)
- GOODMAN, G.S. [1966]: The housing and packing of automatic weather stations. *Automatic Weather Stations*, WMO Techn. Note No. 82; Proc. of the WMO Techn. Conf. on Automatic Weather Stations, Geneva: 1967, (WMO-No. 200.TP.104) p. 140-143
- GORELIK, D.O. & KRASOV, V.I. [1979]: Meteorologičeskie aspekty soveršenstvovaniya sredstv kontrolja zagraznenija atmosfery. *Trudy Glavnoj Geofiz. Observ. Leningrad* No. 421, 1979, 13-17
- GOTWOLS, B.L. & IRANI, G.B. [1982]: Charge-coupled device camera system for remotely measuring the dynamics of ocean waves. *Appl. Optics (USA)* 21, No. 5, 851-860
- GRÉGOIRE, P. [1985]: Héliographe à fibre optique. Papers presented at the 3rd WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-III), Ottawa, Canada: 8-12 July 1985; Instruments and Observing Methods Rep. No. 22, (WMO/TD-No. 50); Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1985, Ref. II.4, p. 57-59
- GROSSE, H.-J., HEMPEL, E., NIETZSCHMANN, H., JAAKOLA, T. & KARTTUNEN, E. [1990]: Schwefeldioxidmessungen mit dem verbesserten Aerosolionisationsgasanalysator AIG-2. *Staub - Reinhaltg. d. Luft* 50, Nr. 4, 161-166
- GROSSKLAUS, M., HASSE, L. & UHLIG, K. [1998]: In situ Messungen von maritimen Niederschlagsspektren in verschiedenen Klimaregionen. *Deutsche Meteorologen-Tagung 14.-18. Sept. 1998 in Leipzig; Annalen d. Meteorologie* 37, Bd. 1, 283-284
- GUENOC, H. & STOLL, R. [1966]: Optimisation des caractéristiques d'un générateur thermoélectrique à flamme por l'alimentation des stations météorologiques automatiques. *Automatic Weather Stations*, WMO Techn. Note No. 82; Proc. of the WMO Techn. Conf. on Automatic Weather Stations, Geneva: 1967, (WMO-No. 200.TP.104) p. 83-89
- GÜNZEL, K. [1979]: Sensoren - Meßglieder am Eingang der Mikroelektronik. *VDI-Berichte* Nr. 348, S. 101-112
- GUTERMANN, Th. [1978]: Das Automatisierungsprojekt der Beobachtungsstationen "ANETZ" (1975-1979) in der Schweiz und erste Erfahrungen mit neuentwickelten Meßinstrumenten für Temperatur und Niederschlag. *Arbeiten d. Zentrinst. f. Meteorol. u. Geodyn. Wien* Nr. 31, Vol. 1, Vortr. 1 (9 S.)
- HABEKOTTÉ, E., APEL, U. & WARKOWSKI, F. [1990]: Integrierbare Funktionsblöcke und Systeme; Teil I: Intelligente Sensoren. *Elektronik* 39, H. 1, 80-87
- HALLDIN, S. & LINDROTH, A. [1992]: Errors in net radiometry: comparison and evaluation of six radiometer designs. *J. Atmosph. and Oceanic Technology* 9, No. 6, 762-783
- HAMILTON, G.D. [1986]: National data buoy center program. *Bull. Americ. Meteorol. Soc.* 67, No. 4, 411-415
- HANÁK, P. & SZENN, O. [1984]: Multipurpose AWS for small scale automation. Papers presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Cost-Effective Meteorological Observations (TECIMO), Nordwijkershout, Netherlands: 24-28 Sept. 1984; WMO Instruments and Observing Methods, Report No. 15; Secr. of the WMO, Geneva, Switzerland: 1984, Ref. VII.3, p. 351-355
- HANNA, E. [1995]: How effective are tipping-bucket raingauges? A review. *Weather* 50, No. 10, 336-342
- HANSEN, D.F., SHUBERT, W.K. & ROHLER, D.R. [1988]: Program to improve performance of AFGL automated present weather observing sensor. U.S. Air Force Cambridge Research Labor., Hanscom AFB, MA. (AFGL-TR-88-0329), Final Report 2 (Apr. 1985 - May 1988); Aug. 1988 (66 p.)
- HARRISON, A.W. [1979]: Nephelometer estimates of visual range. *Atmosph. Environment (Oxford)* 13, No. 5, 645-652
- HARROLD, T.W., WARD, E.P., DIBBEN, P.C. & De WEBB, R.V. [1977]: A microprocessor-based automatic weather station. WMO, Papers presented at the WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO), Hamburg: 27-30 July 1977; WMO-No. 480, Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1977, p. 13-18
- HARTKAMP, H., BUCHHOLZ, N., KLUKAS, F. & MÜNCH, J. [1983]: Ermittlung und Erprobung von Kalibrierverfahren für Immissionsmeßnetze - Ermittlung der Leistungsbilder kommerzieller Eicheinrichtungen. *UBA-F&E-Bericht* 104 02 216 vom 16. 3. 1983 (883 S.)
- HARTLEY, G.E.W. [1970]: A heated anemometer. *Meteorol. Mag.* 99, No. 1778, 270-274
- HASSET, M. [1966]: Primary power suppliers for automatic weather stations. *Automatic Weather Stations*, WMO Techn. Note No. 82; Proc. of the WMO Techn. Conf. on Automatic Weather Stations, Geneva: 1967, (WMO-No. 200.TP.104) p. 79-82
- HAUGEN, D.A. [1963]: A simplified method for automatic computation of turbulent wind direction statistics. *J. Appl. Meteorol.* 2, No. 2, 306-308
- HAUNOLD, W., OCKELMANN, G. & GEORGII, H.-W. [1990]: Neuartiger Gaschromatograph zur Messung von SO₂ und reduzierten Schwefelgasen in Reingluftgebieten. *Staub - Reinhaltg. d. Luft* 50, Nr. 5, 191-193
- HEADLEY, A.N. & MAXWELL, J.B. [1985]: A Canadian high arctic mesoscale surface observing project. Papers presented at the 3rd WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-III), Ottawa, Canada: 8-12 July 1985; Instruments and Observing Methods Rep. No. 22, (WMO/TD-No. 50); Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1985, Ref. V.13, p. 303-308
- HEBEKER, H., KNAUER, R., LINDL, F., PETERS, W., RAUHUT, J., THEUERL, R. et al. [1980]: Integrierter Feuchtesensor. Abschlußbericht BMFT FB-T 81-007, März 1980, Firma Siemens AG, Unternehmensbereich Bauelemente, München (56 S.)

- HEDBERG, R. [1966]: Equipment for weather data acquisition and reduction. Automatic Weather Stations, WMO Techn. Note No. 82; Proc. of the WMO Techn. Conf. on Automatic Weather Stations, Geneva: 1967, (WMO-No. 200.TP.104) p. 271-231
- HEIMO, A. & HOEGGER, B. [1989]: A new automatic device for the measurement of solar irradiance. Papers presented at the 4th Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-IV), Brussels, Belgium: 4-8 Sept. 1989; WMO Instruments and Observing Methods, Rep. No. 35; (WMO/TD - No. 303); Ref. III.4, p. 119-122
- HEINTZENBERG, J. & CHARLSON, R.J. [1996]: Design and applications of the integrating nephelometer: a review. *J. Atmosph. and Oceanic Technology* 13, No. 5, 987-1000
- HENCKE, H. [1981]: Piezoresistive Druckaufnehmer. *Elektronik* 30, H.8, 59-60
- HENNING, H. [1964]: Zur Bestimmung des Wassergehalts einer Schneedecke unter Benutzung von Gamma-Strahlen an der meteorologischen Station Fichtelberg. *Z. Meteorol.* 17, H. 7-8, 229-233
- HENNING, H. [1970]: Zur Messung der Taupunkttemperatur mit dem LiCl-Taupunkthygrometer der Fa. Feutron, Greiz. Sympos. "Automatische meteorologische Stationen" Potsdam: 17.-18. März 1970; *Z. Meteorol.* 22 [1971] H. 8-10, 283-287
- HENNING, H. [1978]: Über Erfahrungen der Taupunkttemperaturmessung mit dem LiCl-Taupunktfühler der Firma Feutron im AFMS-Netz des Meteorologischen Dienstes der DDR. 4. Internat. Sympos. über die effektive Nutzung Automatischer Meteorologischer Stationen, Potsdam: 25.-27. April 1978; *Abhandlgen. Meteorol. Dienst. d. DDR Nr. 125*, 1980, 37-39
- HERGER, P., KAPOLKA, G. & ISRAEL, G.W. [1990]: Einsatz der Ionenchromatographie zur Immissionsanalyse von SO₂. *Staub - Reinhaltg. d. Luft* 50, Nr. 1, 13-15
- HERSCHY, R.W. [1985]: Collection of data using the METEO-SAT-DCP retransmission system. *IAHS Publ. (Wallingford, Engl.) No. 145*, 1985, p. 109-117
- HETTICHE, H.O. [1965]: Messung polyzyklischer Aromaten in der Atmosphäre. *Staub* 25, Nr. 9, 365-367
- HIJIKIGAWA, M., MIYOSHI, S., SUGIHARA, T. & JINDA, A. [1983]: A thin-film resistance humidity sensor. *Sensors & Actuators (Lausanne)* 4, 307-315
- HILL, A.N. [1975]: Automated objective observation techniques for "present weather elements". WMO, Automated Meteorological Systems; Proc. of the WMO Techn. Conf. on Automated Meteorological Systems (TECAMS), Washington, D.C.: 14-17 Febr. 1975; (WMO - No. 420); Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1975, 128-136
- HINZPETER, M.F.E. [1975]: A new versatile cup anemometer for automated data acquisition. WMO, Automated Meteorological Systems; Proc. of the WMO Techn. Conf. on Automated Meteorological Systems (TECAMS), Washington, D.C.: 14-17 Febr. 1975; (WMO - No. 420); Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1975, 148-157
- HODGESON, J.A., McCLEMMY, W.A. & HANST, P.L. [1973]: Air pollution monitoring by advanced spectroscopic techniques. *Science* 182, No. 4109, 248-258
- HOEGGER, B.A., JOSS, J., WASSERFALLEN, P. & RUPPERT, P. [1985]: THYGAN - a new rugged microprocessor-based thermometer and dew-point hygrometer. Papers presented at the 3rd WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-III), Ottawa, Canada: 8-12 July 1985; Instruments and Observing Methods Rep. No. 22, (WMO/TD-No. 50); Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1985, Ref. II.11, p. 95-101
- HOEGGER, B., HEIMO, A. & CONVERSO, G. [1989a]: Intercomparison of different wind sensors at the Swiss Meteorological Institute. Papers presented at the 4th Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-IV), Brussels, Belgium: 4-8 Sept. 1989; WMO Instruments and Observing Methods, Rep. No. 35; (WMO/TD - No. 303); Ref. I.11, p. 71-77
- HÖHNE, W. [1970a]: Meßwerferfassung und Meßwertverarbeitung in der angewandten Meteorologie. *Abhandlgen. Meteorol. Dienst. d. DDR Nr. 100* (Bd. 13), 1970, 13-24
- HÖHNE, W. [1970b]: Beziehungen zwischen Zuverlässigkeit, Betriebssicherheit und Systemkonzeption bei Automatischen Meteorologischen Stationen. Sympos. Automatische Meteorologische Stationen, Potsdam: 17.-18. März 1970; *Z. Meteorol.* 22 [1971], H. 8-10, 262-267
- HÖHNE, W. [1970c]: Eine Schaltung zur Bestimmung der mittleren Windrichtung. Sympos. Automatische Meteorologische Stationen, Potsdam: 17.-18. März 1970; *Z. Meteorol.* 22 [1971] H. 8-10, 296-299
- HÖHNE, W. [1975a]: Eine Schaltung zur digitalen Ausgabe von Uhrzeit und Datum. *Gerlands Beitr. Geophys. (Leipzig)* 84, H. 3/4, 348-354
- HÖHNE, W. [1982a]: Ausgabe von Meldungen automatischer meteorologischer Stationen in Standard-Schlüsselformen. *Z. Meteorol.* 32, H. 5, 306-312
- HÖHNE, W. [1986]: Automatische meteorologische Stationen - Entwicklungstendenzen, Systemaspekte und Einsatzprobleme. *Z. Meteorol.* 36, H. 1, 1-14
- HÖHNE, W., ROHDE, M., GATZKI, W., KROMER, K., SCHULZE, G., MEINHARDT, D., SCHÄDLICH, R. & FAHLBUSCH, K. [1986a]: Über die Entwicklung einer durch Mikrorechner gesteuerten automatischen fernmeldenden meteorologischen Station. Teil 1: Hauptanforderungen, Gerätetechnik und Datenflüsse. *Z. Meteorol.* 36, H. 3, 187-200
- HÖHNE, W., ROHDE, M., GATZKI, W., KROMER, K., SCHULZE, G., MEINHARDT, D., SCHÄDLICH, R. & FAHLBUSCH, K. [1986b]: Über die Entwicklung einer durch Mikrorechner gesteuerten automatischen fernmeldenden meteorologischen Station. Teil 2: Programmsystem und Erprobungsergebnisse. *Z. Meteorol.* 36, H. 5, 281-297
- HÖHNE, W. [1986/87]: Die automatische fernmeldende meteorologische Station AFMS-2. Meteorologische Meßtechnik, Ingenieurschule für Geodäsie und Kartographie, Dresden: 1986/87; Teil 1: Lehrbrief 83-24 (58 S.), Teil 2: Lehrbrief 83-25 (63 S.), Teil 3: Lehrbrief 83-26 (34 S.)
- HÖHNE, W. [1987]: Verarbeitung von Feuchtemeßdaten in der automatischen fernmeldenden meteorologischen Station AFMS-2. *Z. Meteorol.* 37, H. 4, 204-207
- HÖHNE, W. & GATZKI, W. [1988]: Assurance of data quality in automatic meteorological stations. WMO, Papers presented at the WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECO-1988), Leipzig: 16-20 May 1988; Instruments and Observing Methods Rep. No. 33 (WMO/TD-No. 222), Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1988, Ref. VI.11, p. 347-356
- HÖHNE, W. & GATZKI, W. [1989]: Real-time methods for assurance of data quality in automatic meteorological stations. *Naučnjaja Apparatūra / Scient. Instrum. (Wrocław)* 4, No. 1, 13-27
- HÖHNE, W. & SCHULZE, G. [1990]: Sicherung eines robusten Betriebs mikrorechnergeführter Meßsysteme. *Techn. Messen* 57, H. 1, 28-37
- HÖHNE, W. [1991]: Zum statischen Fehler des LiCl-Taupunkthygrometers. *Z. Meteorol.* 41, H. 6, 451-458
- HÖRHAMMER, J. [1977]: Low-power microcomputer-AWS. WMO, Papers presented at the WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO), Hamburg: 27-30 July 1977; WMO-No. 480, Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1977, p. 261-264
- HOFFMANN, H.E. & KUEHNEMANN, W. [1979]: Comparison of the results of two measuring methods determining the horizontal standard visibility with the visual visibility range. *Atmosph. Environment (Oxford)* 13, No. 12, 1629-1634
- HOFFMANN, J., HERTIG, U., JÄGER, M. & POLTORACZYK, H. [1993]: Einsatz zentraler Leittechnik auf der Deponie Horm, Hilfsmittel zur Eigenkontrolle, Dokumentation und Betriebsführung. *Müll u. Abfall* 25, H. 5, 326-342

- HOFMANN, D. [1982]: Entwicklungstendenzen der Sensortechnik. *Fingerätetechnik* 31; H. 1, 3-7
- HOLMES, J.F. [1975]: Investigation of meteorological sensors to maximize data quality of NDBO buoy systems. WMO, Automated Meteorological Systems; Proc. of the WMO Techn. Conf. on Automated Meteorological Systems (TECAMS), Washington, D.C.: 14-17 Febr. 1975; (WMO - No. 420); Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1975, 292-301
- HOLTHAM, P.M. [1984]: GOES satellite timekeeping for field stations at high arctic latitudes. *J. Atmosph. and Terrestr. Phys. (Oxford)* 46, No. 4, 303-313
- HOLUB, H. & MICHAELIS, B. [1988]: Mikrorechnergestützte Verfahren zur Kalibrierung, Nachkalibrierung und Linearisierung von Meßfühlerkennlinien. *Messen Steuern Regeln* 31, H. 11, 482-486
- HOPKE, P.K., CASUCCIO, G.S., MERSHON, W.J. & LEE, R.J. [1990]: The use of fractal dimension to characterize airborne particles. Proc. 1990 Scient. Comput. and Automat. Conf. "Scientific Computation and Automation", Maastricht (NL): 12-15 June 1990; Elsevier, Amsterdam: 1990, p. 173-178
- HOSKING, J.G., STOW, C.D., BRADLEY, S.G. & GRAY, W.R. [1986]: An improved high-resolution raingage. *J. Atmosph. and Oceanic Technology* 3, No. 3, 536-541
- HAUGEN, D.A. & ACKLEY, M.H. [1980]: Automation of a meteorological data acquisition and processing system for surface, satellite, and radar data. Automated Meteorological Systems, Rep. No. 1, Papers presented at the Techn. Conf. on Evaluation and Standardization of Observing Techniques in Light of Automation, Norrköping (Sweden): 1-5 Sept. 1980; WMO Instruments and Methods of Observation, Geneva: 1980, Ref. VII.2, p. 227-232
- HOUGHTEN, R.L. [1966]: A semi-automatic meteorological station. Automatic Weather Stations, WMO Techn. Note No. 82; Proc. of the WMO Techn. Conf. on Automatic Weather Stations, Geneva: 1967, (WMO-No. 200.TP.104) p. 119-126
- HOVBERG, T. [1984]: Manual data entry device for synoptical and climatological observations in Sweden. Papers presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Cost-Effective Meteorological Observations (TECEMO), Nordwijkershout, Netherlands: 24-28 Sept. 1984; WMO Instruments and Observing Methods, Report No. 15; Secr. of the WMO, Geneva, Switzerland: 1984, Ref. V.9, p. 273-277
- HOYER, H. [1984]: Prozeß-Schnittstellen in der Mikrorechner-technik. *Messen Steuern Regeln* 27, H. 7, 302-303
- HUANG, P.H. [1988]: Polymeric humidity sensors for industrial process applications. Proc. of Sensors EXPO Chicago, IL.: Sept. 13-15, 1988; Sensors Mag. (Petersborough, NH.) 1988, p. 106b/1-16
- HÜBNER, H.-P. & OBERMEIER, E. [1985]: Gassensoren auf der Basis von Metalloxid-Halbleitern. *Techn. Messen* 52, H. 2, 59-66
- HUOVILA, S. [1980]: Sensors used in surface-based automatic weather observing systems. Automated Meteorological Systems, Rep. No. 1, Papers presented at the Techn. Conf. on Evaluation and Standardization of Observing Techniques in Light of Automation, Norrköping (Sweden): 1-5 Sept. 1980; WMO Instruments and Methods of Observation, Geneva: 1980, Ref. I.1, p. 1-3
- INHA, K. [1998]: New communication modules – important step towards open communication. *Vaisala News* No. 147, 15-16
- JACOB, D., TRAN, N.H., BRETENAKER, F. & LeFLOCH, A. [1994]: Differential absorption measurement of methane with two spatially resolved laser lines. *Appl. Optics* 33, No. 15, 3261-3264
- JÄÄSKELÄINEN, J. [1981]: New concepts of information processing in airport meteorological systems. WMO, Instruments and Observing Methods, Rep. No. 9; Papers presented at the WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-II), Mexico-City: 13-17 July 1981; Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1981, Ref. V.6, p. 305-311
- JAEGER, L. [1980]: Process computers in microclimatology. *Siemens Power Engng.* 2, No. 3, 72-74
- JAEGER, L. [1983]: Estimation of surface roughnesses and displacement heights above a growing pine forest from wind profile measurements over a period of ten years. *The Forest-Atmosphere Interaction*; Proc. Forest Environmental Measurement Conf., Oak Ridge, Tenn.: Oct. 23-28, 1983; D. Reidel Publ. Comp., Dordrecht/ Boston/Lancaster: 1985, p. 71-100
- JEHMLICH, W. [1982]: Eingabe-Schnittstellen zur Prozeßdatenerfassung mit dem Mikrorechner K 1520. *Messen Steuern Regeln* 25, H. 7, 380-385
- JEHMLICH, W., KRAUSS, R. & RÖSSLER, V. [1985]: Meßwerterfassungssysteme. *Messen Steuern Regeln* 28, H. 2, 72-78
- JENKINS, A. & BOWERS, D. [1983]: Instrumentation amp IC delivers high current. *Electron. Design* 31, No. 12, 171-178
- JESSON, E.E. & MCKENZIE, R.J. [1975]: Some design aspects of sensor and electronic systems for sea buoys. WMO, Automated Meteorological Systems; Proc. of the WMO Techn. Conf. on Automated Meteorological Systems (TECAMS), Washington, D.C.: 14-17 Febr. 1975; (WMO - No. 420); Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1975, 369-374
- JONES, D.W. & PAINTING, D.J. [1984]: Measurement of wind, temperature and humidity in conditions of severe ice accretion. Papers presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Cost-Effective Meteorological Observations (TECEMO), Nordwijkershout, Netherlands: 24-28 Sept. 1984; WMO Instruments and Observing Methods, Report No. 15; Secr. of the WMO, Geneva, Switzerland: 1984, Ref. III.13, p. 173-177
- KAHLER, W.C. & KOEMAN, H. [1978]: User-controllable filtering cuts measurement errors in DVM. *Electronics* 51, No. 15, 137-141 (July 20)
- KAIMAL, J.C. [1977]: The Boulder Atmospheric Observatory – a facility for atmospheric research and instrument comparison. WMO, Papers presented at the WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO), Hamburg: 27-30 July 1977; WMO-No. 480, Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1977, p. 35-38
- KAIMAL, J.C. & GAYNOR, G.E. [1983]: The Boulder Atmospheric Observatory. *J. Climate and Appl. Meteorol.* 22, No. 5, 863-880
- KAINKA, B. [1994]: Messen, Steuern und Regeln über die RS232-Schnittstelle. *Franzis-Verlag, Poing*: 1994 (192 S.)
- KAISER, H. & SCHULZE, H.-G. [1960]: Blitzzählgeräte und ihre Anwendung für die Ortung von Gewitterherden. *Z. Meteorol.* 14, H. 2, 50-55
- KALEFF, H. [1981]: Low cost automatic weather station using a noisy network. WMO, Instruments and Observing Methods, Rep. No. 9; Papers presented at the WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-II), Mexico-City: 13-17 July 1981; Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1981, Ref. IV.5, p. 7
- KALLFASS, T. & MAINKA, M. [1986]: Ein kapazitiver Luftdrucksensor mit Auswerteschaltung in Dünnschichttechnik. *NTG-Fachberichte (Offenbach)* Nr. 93, 1986, 170-174
- KASS, St. [1996a]: Dörfer im globalen Netz. Serie: Surfen durch das Internet hat seinen Preis (Teil 3). *Berliner Zeitung* Nr. 27 (1. Febr. 1996) S. 32
- KASS, St. [1996b]: Telefonieren im "Dreierpack". ISDN: Digitaler Informationsaustausch in Sekundenschnelle. *Berliner Zeitung* Nr. 85 (11. April 1996) S. 11
- KASS, St. [1996c]: Ein digitaler Vertriebskanal. Druck des Internets auf Online-Dienste wächst. *Berliner Zeitung* Nr. 227 (27. Sept. 1996) S. 29
- KATZ, M., BIWER, G. & BENDER, K. [1989]: Die PROFIBUS-Anwenderschicht. Ein neuer Weg zur offenen Kommunikation im Feldbereich. *Automatisierungstechn. Praxis* 31, H. 12, 588-597

- KAWANO, Y., KODATO, S., SUMI, T., MIYAGI, K., INAGAKI, S. & TAKAMASHI, Y. [1982]: Properties of anodic Al_2O_3 film and its application. *Aritsu Techn. Bull. (Japan)* 1982, No. 43, 107-116
- KIDSON, J.W. [1985]: Location of mobile platforms from satellite Doppler frequency measurements. *Scient. Rep. Meteorol. Service New Zealand, Wellington*, No. 12, April 1985 (22 p.)
- KILLICK, C.M. [1969]: An improved conductivity cell for the continuous measurement of sulphur dioxide in the atmosphere. *J. Scient. Instrum.* (2) 2, No. 12, 1017-1020
- KIRKPATRICK, W.A. [1973]: A sunshine sensor for automatic weather stations. WMO, Commission for Instruments and Methods of Observation, 6th Session, Helsinki: Aug. 1973; CIMO-IV, *Scient. Discuss.* 1973, p. 22-27
- KIST, R. [1986]: Faseroptische Sensoren auf dem Wege zur industriellen Anwendung. 3. Fachtagung "Sensoren - Technologie und Anwendung" Bad Nauheim: 17.-19. März 1986; NTG-Fachberichte Nr. 93, VDE-Verlag GmbH, Berlin u. Offenbach: 1986, S. 206-214
- KITAGAWA, H. [1986]: Effect of humidity on electrical properties of thin-film Li-Te junctions. *Electronics and Communications in Japan, Part 2*, 69, No. 4, 94-102
- KLAPHECK, K. [1987]: Erfassung von Cirruswolken mittels Lidar. *Meteorol. Rdsch.* 40, H. 1, 25-28
- KLAUS, J. [1972]: Programmierbare Vielstellen-Meßanlage nach dem "Partyline-System". *Elektronik* 21, H. 10, 331-333
- KLEMM, O. & TALBOT, R.W. [1991]: A sensitive method for measuring atmospheric concentrations of sulfur dioxide. *J. Atmosph. Chemistry (Dordrecht)* 13, No. 4, 325-342
- KLEMM, S. [1970b]: Ein Meßwertgeber für Regenmenge und Regendauer. *Sympos. Automatische Meteorologische Stationen, Potsdam: 17.-18. März 1970; Z. Meteorol.* 22 [1971] H. 8-10, 292-295
- KLEMM, S., HENNING, H. & BLEEK, U. [1978]: Über die Erprobung eines AFMS-Gebers für festen Niederschlag. 4. Internat. Sympos. über die effektive Nutzung Automatischer Meteorologischer Stationen, Potsdam: 25.-27. April 1978; *Abhandlgen. Meteorol. Dienst. d. DDR* Nr. 125, 1980, S. 27-28
- KLEMM, S. & SONNTAG, D. [1981]: A solution for determining sunshine duration. WMO, Instruments and Observing Methods, Rep. No. 9; Papers presented at the WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-II), Mexico-City: 13-17 July 1981; *Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1981, Ref. I.8, p. 49-52*
- KLEPPE, J.A. & YORI, L.G. [1982]: Remote data acquisition using random mode subtelemetry systems. *Proc. Western Snow Conf., Annual Meeting 50th, Reno, NV: April 19-23, 1982; Colorado State Univ., Ft. Collins, CO. p. 176-179*
- KLINK, J.C. & CURRY, R.B. [1984]: Development of an automated global solar radiation network in Ohio. *Solar Energy (Oxford)* 32, No. 2, 189-194
- KODAIRA, N., MURAYAMA, N., TOKAYAMA, Y. & KAMISHIRO, E. [1975]: Automatic weather station as a data collection platform on the Geostationary Meteorological Satellite System. WMO, Automated Meteorological Systems; *Proc. of the WMO Techn. Conf. on Automated Meteorological Systems (TECAMS), Washington, D.C.: 14-17 Febr. 1975; (WMO - No. 420); Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1975, 310-315*
- KODAMA, M., KAWASAKI, S., NAKAI, K. & WADA, M. [1977]: Measurement of snow water equivalent by cosmic ray neutron technique. WMO, Papers presented at the WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO), Hamburg: 27-30 July 1977; *WMO-No. 480, Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1977, p. 124-128*
- KÖHLER, A. [1991]: Echtzeituhr für Z-80-Rechner. *Radio Fernsehen Elektronik* 40, H. 5, 264-261
- KONDO, Y., KAWAKAMI, S., KOIKE, M., FAHEY, D.W., NAKAJIMA, H., ZHAO, Y., TORIYAMA, N., KANADA, M., SACHSE, G.W. & GREGORY, G.L. [1997]: Performance of an aircraft instrument for the measurement of NO_y . *J. Geophys. Res.* 102, No. D23, 28663-28671
- KON'KOV, S.A. & GOLOVINA, E.G. [1979]: Avtomatičeskij kontrol' zapylennosti atmosfery. *Trudy Glavnoj Geofiz. Observ. Leningrad* No. 421, 1979, 113-117
- KOPPERT, H.-J. [1995]: Visualisierung meteorologischer Daten für Fernsehanstalten: das System TriVis. *Promet - Meteorol. Fortbildg.* 24, H. 4, 106-110
- KORAČIN, D., ŠNAJDER, J. & MANDELJC, E. [1984a]: Experience with automatic weather station. Papers presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Cost-Effective Meteorological Observations (TECEMO), Nordwijkershout, Netherlands: 24-28 Sept. 1984; *WMO Instruments and Observing Methods, Report No. 15; Secr. of the WMO, Geneva, Switzerland: 1984, Ref. VI.5, p. 305-309*
- KOTTMEIER, C., LEGE, D. & ROTH, R. [1980]: Ein Meßsystem zur Sondierung der Planetarischen Grenzschicht. *Meteorol. Rdsch.* 33, H. 1, 9-13
- KRAMP, G. [1982]: Digitale Luftfeuchte-Meßschaltungen. *Elektronik* 31, H. 16, 30-34
- KRASOV, V.I. [1979]: Avtomatizirovannyj kontrol' zagrjaznenij atmosfery i ego pribornoje obespečenie. *Trudy Glavnoj Geofiz. Observ. Leningrad* No. 421, 1979, 3-12
- KRASOV, V.I., MALEJKO, L.V. & CVETKOV, V.A. [1979]: Infrakrasnyj gasoanalizator dnuokisi ugleroda i vodjanogo para v atmosfere. *Trudy Glavnoj Geofiz. Observ. Leningrad* No. 421, 1979, 18-26
- KRAUSS, M., JEHMLICH, W. & ENGEWALD, J. [1982]: A/D-Umsetzung bei der Meßdatenerfassung, insbesondere unter dem Aspekt der Kopplung mit dem Mikrorechner K 1520. *Messen Steuern Regeln* 25, H. 2, 62-67
- KREUELS, R.K. & BREUER, L.J. [1977]: Influence of definition on rainfall events, length, frequency and other precipitation statistics. WMO, Papers presented at the WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO), Hamburg: 27-30 July 1977; *WMO-No. 480, Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1977, p. 50-54*
- KRIESEL, W., GIBAS, P., RIEDEL, M. & BLANKE, W. [1990]: Feldbus als Mehrebenenkonzept. *Messen Steuern Regeln* 33, H. 4, 150-153
- KRÜGER, K. & WEHNER, H.F. [1970]: Datenspeicher- und Abfrageeinrichtung zur MME 1. *Sympos. Automatische Meteorologische Stationen, Potsdam: 17.-18. März 1970; Z. Meteorol.* 22 [1971] H. 8-10, 300-301
- KRUGLOV, R.A. [1979]: Usoveršenstvovanie metodiki opredelenija vzletno-posadočnoj polosy (VPP) v uslovijach nizkoj oblačnosti. *Trudy Glavnoj Geofiz. Observ. Leningrad* Nr. 433, 31-37
- KÜNDIG, S. & HÖGGER, D. [1964]: Turicum II, ein einfacher Apparat zur Registrierung von Schwefeldioxidkonzentrationen in der Atmosphäre. *Staub - Reinhaltg. d. Luft* 24, Nr. 10, 408-409
- KUMAR, S., AMEENULLA, S. & PRABHU, A. [1995]: MONTBLEX tower observations; instrumentation, data acquisition and data quality. *Proc. (Bangalore)* 104, No. 2, 221-248
- KUMAR, V., VORA, H.S., DAS, T.N., KUMBHARE, M.N. & KOUL, R. [1991]: Microprocessor-based air analyzer unit for sub part per billion level measurements of hydrogen peroxide. *Atmosph. Environment* 25A, No. 5/6, 1033-1038
- KUNTZ, W. & MORES, R. [1989]: Energie- und Datenübertragung über Lichtwellenleiter bei intelligenten Sensoren. *Techn. Messen* 56, H. 4, 164-165
- KUNZ, G.J. [1996]: Transmission as an input boundary value for an analytical solution of a single-scatter lidar equation. *Appl. Optics* 35, No. 18, 3255-3260

- KUSCH, W. & POGODA, M. [1995]: Das Meteorologische Applikations- und Präsentationssystem für den dezentralen Wettervorhersagedienst (MAP). *Promet – Meteorol. Fortbildg.* 24, H. 4, 85-95
- KUSSL, V. [1963]: Datenverarbeitung und Feinwerktechnik. *Feinwerktechnik* 67, H. 2, 37-45
- LaBAW, C. [1983]: Airborne imaging spectrometer: an advanced concept instrument. *Proc. Internat. Soc. Opt. Eng. (USA)* 430, 68-74
- LAHMANN, E. [1965]: Methoden zur Messung gasförmiger Luftverunreinigungen. *Staub* 25, Nr. 9, 346-351
- LAKE, J.K. [1966]: A versatile approach to automatic weather stations. *Automatic Weather Stations*, WMO Techn. Note No. 82; *Proc. of the WMO Techn. Conf. on Automatic Weather Stations*, Geneva: 1967, (WMO-No. 200.TP.104) p. 329-330
- LALLY, V.E., LICHFIELD, E.W. & RUTTENBERG, S. [1966]: An extremely simple automatic weather station. *Automatic Weather Stations*, WMO Techn. Note No. 82; *Proc. of the WMO Techn. Conf. on Automatic Weather Stations*, Geneva: 1967, (WMO-No. 200.TP.104) p. 271-280
- LAMBOLEY, G. & LARTIGUE, M. [1975]: La fiabilité de la station automatique a transmission d'information numérique "SATIN". WMO, Automated Meteorological Systems; *Proc. of the WMO Techn. Conf. on Automated Meteorological Systems (TECAMS)*, Washington, D.C.: 14-17 Febr. 1975; (WMO - No. 420); *Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1975*, 228-235
- LANE, R.A. [1985]: An autonomous real-time data logging rain gauge system. *Conf. Proc. 28th Midwest Sympos. on Circuits and Systems*, Univ. Louisville, KY (USA): 1985, p. 764-767
- LANG, A. [1958]: Die Messung der Wolkenhöhe am Tage nach dem impulsoptischen Verfahren. *Techn. Mitt. d. Instrumentenwesens d. Dtsch. Wetterdienstes (N.F.)* Nr. 4, 69-77
- LANG, A.R.G. & LEUNING, R. [1981]: New omnidirectional anemometer with no moving parts. *Boundary-Layer Meteorology* 20, No. 4, 445-457
- LANG, A. [1982]: Beitrag zur Weiterentwicklung quantisierender Niederschlagsmesser. *Meteorol. Rdsch.* 35, H. 10, 145-152
- LANGFORD, D. [1966a]: The programme unit for automatic stations. *Automatic Weather Stations*, WMO Techn. Note No. 82; *Proc. of the WMO Techn. Conf. on Automatic Weather Stations*, Geneva: 1967, (WMO-No. 200.TP.104) p. 95-100
- LANGFORD, D. [1966b]: High-frequency transmitters for automatic weather stations. *Automatic Weather Stations*, WMO Techn. Note No. 82; *Proc. of the WMO Techn. Conf. on Automatic Weather Stations*, Geneva: 1967, (WMO-No. 200.TP.104) p. 101-102
- LAU, P. [1981]: A sunshine monitor for automatic registration of sunshine duration. *Arch. Meteorol. Geophys. Bioklimatol.* B29, No. 1-2, 89-97
- LEE, A.C.L. [1981]: Smoothing and filtering of meteorological data. *Meteorol. Mag.* 110, No. 1306, 115-132
- LEFAS, C.C. [1984]: An automatic air pollution data collection and telemetering station. *Internat. J. Electronics (UK)* 57, No. 5, 697-707
- LENHART, K.G. [1981]: Bilderstellung und Datentechnik des Wettersatelliten "Meteosat". *Fernseh- u. Kinotechnik* 35, Nr. 2, 45-50
- LENZ, J. & BJORK, P. [1988]: Optical powered sensors: a system approach to fiber optic sensors. *SPIE Industr. Opt. Sensing* 961, 8-25
- LEONG, K.H. [1995]: Design and test of a polar nephelometer. *Aerosol Science and Technol.* (Amsterdam) 23, No. 3, 341-356
- LIGDA, M.G.H. [1959]: Radar observation of lightning. *J. Atmosph. Terrest. Phys. (London)* 15, 248-250
- LILIENTHIELD, P. [1971]: Beta absorption mass monitoring of particulates – a review. *Joint Conf. on Sensing of Environmental Pollutants*, Palo Alto, CA., Nov. 8-10, 1971; GCA Corp. Bedford, Mass.
- LI MING-QIN & AN WU-ZHENG [1988]: New types of rain-snow gauges in China. WMO, Papers presented at the WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECO-1988), Leipzig: 16-20 May 1988; *Instruments and Observing Methods Rep. No. 33 (WMO/TD-No. 222)*, *Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1988*, Ref. II.3, p. 33-40
- LINDNER, P. [1984]: A new sunshine duration sensor. Papers presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Cost-Effective Meteorological Observations (TECEMO), Noordwijkershout, Netherlands: 24-28 Sept. 1984; *WMO Instruments and Observing Methods, Report No. 15*; *Secr. of the WMO, Geneva, Switzerland: 1984*, Ref. III.14, p. 179-183
- LINDROTH, A. & NORÉN, B. [1979]: Evapotranspiration measurements in Järdrås, instrumentation, data gathering and processing. *Comparison of Forest Water and Energy Exchange Models*, ed. by S. HALDIN; *Internat. Soc. for Ecol. Modelling*, Copenhagen: 1979, p. 15-26
- LLOYD, D.A. & MADDEN, M. [1964]: A portable sulphur dioxide recorder. *J. Scient. Instrum.* 41, No. 10, 622-625
- LLOYD, I.H. [1966]: The automatic weather station programme of the South African Weather Bureau. *Automated Meteorological Systems*, Rep. No. 1, Papers presented at the Techn. Conf. on Evaluation and Standardization of Observing Techniques in Light of Automation, Norrköping (Sweden): 1-5 Sept. 1980; *WMO Instruments and Methods of Observation*, Geneva: 1980, p. 353-357
- LOBECKER, R.M., SETHU RAMAN, S. & FIELD, G. [1980]: SATDAS – for air-sea interaction data acquisition using satellite telemetry. *Bull. Americ. Meteorol. Soc.* 61, No. 10, 1212-1222
- LÖNNQVIST, J. [1985]: New generation laser ceilometer. Papers presented at the 3rd WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-III), Ottawa, Canada: 8-12 July 1985; *Instruments and Observing Methods Rep. No. 22 (WMO/TD-No. 50)*; *Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1985*, Ref. IV.15, p. 117-119
- LUDBROOK, F.T. [1974]: A new generation of sensors for automatic weather stations. *Proc. of the Conf. on Environmental Sensors and Applications*, Roy. Soc. London, 18-19 Nov. 1974; *IERE London: 1974*, p. 103-122
- LÜDER, E., KALLFASS, T. & BORGWARDT, O. [1982]: A highly sensitive dielectric humidity sensor out of sputtered low density Ta. *NTG-Fachber. (Berlin)* 1982, Nr. 79, 299-303
- LUFT, K.F. [1943]: Über eine neue Methode der registrierenden Gasanalyse mit Hilfe der Absorption ultraroter Strahlung ohne spektrale Zerlegung. *Z. techn. Phys.* 24, Nr. 5, 97-104
- LUNDBERG, A. & JOHANSSON, R.-M. [1994]: Optical precipitation gauge: determination of precipitation type and intensity by light attenuation technique; paper presented at POLARTECH '94. *Nordic Hydrology (Lyngby, Denmark)* 25, No. 5, 359-370
- LYYRA, M. [1994]: PTB 100 series analog barometers – New product family designed with the customers in mind. *Vaisala News* No. 133, 18-19
- MacCALLUM, D.H. [1985]: Operational satellite data collection systems operated by the National Oceanic and Atmospheric Administration. *IAHS Publ. (Wallingford, Engl.)* No. 145, 1985, p. 89-97
- MAEDA, Y. & TAKENAKA, N. [1993]: Chemiluminescence determination of trace amounts of ammonia and halogen species in the environment. *Optical Methods in Atmospheric Chemistry*, ed. by H.I. SCHIFF & U. PLATT; *Internat. Soc. for Optical Engineering, SPIE Proc. Ser. Vol. 1715*; SPIE: 1993, p. 185-193
- MAGNUSSON, L.S. [1975]: Automatic cloud amount recorder. WMO, Automated Meteorological Systems; *Proc. of the WMO Techn. Conf. on Automated Meteorological Systems (TECAMS)*, Washington, D.C.: 14-17 Febr. 1975; (WMO - No. 420); *Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1975*, 123-127

- MAGNUSSON, S. [1980]: Sensors used, or planned to be used, at automatic weather-stations in Sweden. Automated Meteorological Systems, Rep. No. 1, Papers presented at the Techn. Conf. on Evaluation and Standardization of Observing Techniques in Light of Automation, Norrköping (Sweden): 1-5 Sept. 1980; WMO Instruments and Methods of Observation, Geneva: 1980, Ref. I, p. 5-9
- MAKITA, K. [1993]: Activities of the fifth wintering party at Asuka Station by the 32nd Japanese Research Expedition in 1991. Antarctic Record (Tokyo) 37, No. 1, 32-60
- MAKKONEN, L. [1996]: Comments on "a method for rescaling humidity sensors at temperatures well below freezing". J. Atmosph. and Oceanic Technology 13, No. 4, 911-912
- MALLANT, R.K.A.M. [1988]: Poor man's optical fog detector. Annalen d. Meteorol. (N.F.) Nr. 25, 1988, 333-334
- MANDELJC, E. [1977]: Prenoš podatkov v mreži hidrometeoroloških postaj. Razprave Pap. (Ljubljana) 1977, No. 21, 29-34
- MANI, A. [1966]: Automatic radio-reporting raingauge. Automatic Weather Stations, WMO Techn. Note No. 82; Proc. of the WMO Techn. Conf. on Automatic Weather Stations, Geneva: 1967, (WMO-No. 200.TP.104) p. 338-343
- MANN, H. & GIES, H. [1983]: Ergebnisse der Erprobung eines Monitors für die gaschromatographische Bestimmung von Schwefelverbindungen in Luft. Schriftenreihe d. Landesanstalt f. Immissionsschutz d. Landes NW, Essen H. 57, 1983, 47-54
- MANUILOV, K.N. [1966]: Principles of the construction and experience in the operation of automatic weather stations in the U.S.S.R. Automatic Weather Stations, WMO Techn. Note No. 82; Proc. of the WMO Techn. Conf. on Automatic Weather Stations, Geneva: 1967, (WMO-No. 200.TP.104) p. 34-38
- MANUILOV, K.N., KRANTSBERG, A.S., RUBITSHEV, N.A. & SOROKIN, V.G. [1981]: Study of meteorological elements variability spectra and requirements to meteorological measurements. WMO, Instruments and Observing Methods, Rep. No. 9; Papers presented at the WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-II), Mexico-City: 13-17 July 1981; Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1981, Ref. III.3, p. 157-165
- MÁRKUS, M. [1984]: Portable automatic weather station. Papers presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Cost-Effective Meteorological Observations (TECEMO), Nordwijkershout, Netherlands: 24-28 Sept. 1984; WMO Instruments and Observing Methods, Report No. 15; Secr. of the WMO, Geneva, Switzerland: 1984, Ref. VI.4, p. 299-303
- MARRON, J.K. & DAVIS, R.T. [1982]: Event reporting on Mount Saint Helens SNOTEL, flexibility for the future. Proc. Western Snow Conf., Annual Meeting 50th, Reno, NV: April 19-23, 1982; Colorado State Univ. Ft. Collins, CO.: 1982, p.133-138
- MARSHALL, W.E. [1978]: Single hybrid package houses 12-bit data-acquisition system. Electronics 51, No. 13, 113-118 (June 22)
- MARTENS, G. [1986]: Faseroptische Sensoren. INTERKAMA-Kongreß 1986; Fachberichte Messen Steuern, Regeln 14; Springer-Verlag, Berlin: 1986, S. 77-87
- MARTI, M. & SIUDA, K. [1986]: Die Digitalisierung der öffentlichen Fernmeldenetze. Der Elektroniker (Aarau) 25, Nr. 9, 117-126
- MARTINEZ, C.M. & PEREZ, T. [1988]: Interfacing a 6502-based microcomputer to a data acquisition system (XBT). Intelligent Instrum. & Computers (USA) 6, No. 7-8, 235-245
- MASSMAN, W.J. & ZELLER, K.F. [1988]: Rapid method for correcting the non-cosine response errors of the Gill propeller anemometer. J. Atmosph. and Oceanic Technology 5, No. 6, 862-869
- MASTERTON, J.E., KARNEY, J.L. & HOEHNE, W.E. [1966]: The laser as an operational meteorological tool. Bull. Americ. Meteorol. Soc. 47, No. 9, 695-701
- MATTERA, L. [1975]: Monolithics mature, passive improve. Electronics 48, No. 21, 116-120
- MAYER, H. & SAJONZ, D. [1983]: Immission measurements with Ultramat 4 to determine carbon monoxide concentrations. Siemens Power Engng. 5, Nr. 2, 50-52
- MAZEE, A.N. [1989]: An AWS, validation and repair-policy. Papers presented at the 4th Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-IV), Brussels, Belgium: 4-8 Sept. 1989; WMO Instruments and Observing Methods, Rep. No. 35; (WMO/TD - No. 303); Ref. IX.1, p. 385-388
- MAZEE, A.N. [1995]: Automatic weather stations and infrastructure. Papers presented at the International Workshop on Experiences with Automatic Weather Stations in Operational Use within National Weather Services, Vienna, Austria: 15-17 May 1995, WMO Instruments and Observing Methods Rep. No. 58 (WMO/TD - No. 670), p. 57-61
- McGINN, S.M., KING, K.M. & THURTELL, G.W. [1989]: Reducing dew and frost on the domes of net pyrradiometers. J. Atmosph. and Oceanic Technology 6, No. 3, 528-531
- McKAY, D.J. [1975]: The climatological automated recording station (CARS). WMO, Automated Meteorological Systems; Proc. of the WMO Techn. Conf. on Automated Meteorological Systems (TECAMS), Washington, D.C.: 14-17 Febr. 1975; (WMO - No. 420); Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1975, 104-113
- McKAY, D.J. & McTAGGART-COWAN, J.D. [1977]: An intercomparison of radiation shields for auto stations. WMO, Papers presented at the WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO), Hamburg: 27-30 July 1977; WMO-No. 480, Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1977, p. 208-213
- McMILLAN, G.D. [1981]: SNOTEL: a management tool for the future. Western Snow Conf., 49th Annual Meeting, St. George, Utah: April 14-16, 1981; Proc. Colorado State Univ. Ft. Collins: 1981, p. 116-119
- MECHOVIČ, A.I., GREJZ, E.B., TIMOFEEV, V.I. & ČUB, V.N. [1978]: Hochfrequenzverfahren und Vorrichtungen zur Messung von Windparametern. 4. Internat. Sympos. über die effektive Nutzung Automatischer Meteorologischer Stationen, Potsdam: 25.-27. April 1978; Abhandlgen. Meteorol. Dienst. d. DDR Nr. 125 [1980], 81-84
- MEKHOVITCH, A.I., AFINOGENOV, L.P. & PERSIN, S.M. [1984]: A new automatic hydrometeorological station. Papers presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Cost-Effective Meteorological Observations (TECEMO), Nordwijkershout, Netherlands: 24-28 Sept. 1984; WMO Instruments and Observing Methods, Report No. 15; Secr. of the WMO, Geneva, Switzerland: 1984, Ref. VI.3, p. 291-298
- MESIÄ, H. [1994]: Market leaders worldwide - Vaisala's capacitive sensors. Vaisala News No. 133, 6-8
- MESTAYER, P.G., LARSEN, S.E., FAIRALL, C.W. & EDSON, J.B. [1990]: Turbulence sensor dynamic calibration using real-time spectral computations. J. Atmosph. and Oceanic Technol. 7, No. 6, 841-851
- MEZŐSI, M. [1984]: Problems associated with development and acceptance of new sensors. Papers presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Cost-Effective Meteorological Observations (TECEMO), Nordwijkershout, Netherlands: 24-28 Sept. 1984; WMO Instruments and Observing Methods, Report No. 15; Secr. of the WMO, Geneva, Switzerland: 1984, Ref. III.1, p. 109-113
- MEZŐSI, M., SIMON, A., HANÁK, P. & SZENN, O. [1985]: Algorithms for automatic coding of the present and past weather by unmanned meteorological stations. Keynote papers presented at the 3rd WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-III), Ottawa, Canada: 8-12 July 1985; Instruments and Observing Methods Rep. No. 22, (WMO/TD-No. 51); Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1985, p. 255-259
- MEZŐSI, M. [1987]: Kísérlet automatizált meteorológiai mérőhálózat kifejlesztésére Magyarországon. Időjárás (Budapest) 91, No. 5, 284-301

- MICHALSKY, J.J., PEREZ, R., STEWART, R., LeBARON, B.A. & HARRISON, R. [1988]: Design and development of a rotating shadow-band radiometer solar radiation/daylight network. *Solar Energy (Oxford)* **41**, No. 6, 577-581
- MICHELENA, E.D. [1984]: Relative humidity sensors tested on Great Lakes. *Techn. Bull. NOAA Data Buoy Center* **10**, No. 1, p. 4
- MIDDLEHOEK, S. & AUDET, S.A. [1987]: Silicon sensors: full of promises and pitfalls. *J. Phys. E, Scient. Instrum.* **20**, No. 9, 1080-1086
- MIDDLETON, W.E.K. [1963]: Vision through the atmosphere. Univ. of Toronto Press, Toronto: 1963
- MOLYNEUX, M.J. [1984]: A weighing tipping bucket raingauge. Papers presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Cost-Effective Meteorological Observations (TECEMO), Nordwijkershout, Netherlands: 24-28 Sept. 1984; WMO Instruments and Observing Methods, Report No. 15; Secr. of the WMO, Geneva, Switzerland: 1984, Ref. III.4, p. 127-131
- MONTERUMISI, A., NUMI, F. & SCHIASSI, A. [1989]: Evoluzione dei sensori nella rilevazione dei parametri meteorologici, dalle configurazioni analogiche di origine alle attuali configurazioni intelligenti. *Automazione e Strumentazione* **37**, No. 4, 153-157
- MOOSBACH, E. & HARTKAMP, H. [1990]: Referenzverfahren zur Bestimmung von Stickoxid-Konzentrationen in Prüfgasen. *Staub - Reinhaltg. d. Luft* **50**, Nr. 3, 87-91
- MOSES, H. & KULHANEK, F.C. [1962]: Argonne automatic meteorological data processing system. *J. Appl. Meteorol.* **1**, No. 1, 69-80
- MOTSCHKA, O., RUDEL, E. & SCHWABACH, H. [1988]: A partial automatic meteorological recording system under extreme mountainous conditions. WMO, Papers presented at the WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECO-1988), Leipzig: 16-20 May 1988; Instruments and Observing Methods Rep. No. 33 (WMO/TD-No. 222), Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1988, Ref. III.8, p. 137-142
- MOTSCHKA, O. & RUDEL, E. [1989]: Experience with dew-point sensors in Austria. Papers presented at the 4th Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-IV), Brussels, Belgium: 4-8 Sept. 1989; WMO Instruments and Observing Methods, Rep. No. 35; (WMO/TD - No. 303); Ref. IV.5, p. 181-182
- MOYER, D.T. & GILBERT, A.St.J. [1958]: Nitric oxide concentrations near the ground at Menlo Park, California. *J. Air Pollut. Contr. Assoc.* **8**, No. 3, 234-239 & 277; Ref.: *Staub* **19** [1959], Nr. 10, 374
- MROSE, H. & WARMBT, W. [1964]: Bestimmung des SO₂-Gehalts der Atmosphäre durch amperometrische Titration. *Angew. Meteorol.* **4**, H. 11/12, 345-355
- MROSE, H. [1969]: Bestimmung des Kohlenwasserstoffgehaltes der Luft mit Hilfe der Gaschromatographie. *Z. Meteorol.* **20**, H. 1-6, 60-67
- MUELLER, P.K., KOTHNY, E.L., PIERCE, L.B., BELSKY, Th., IMADA, M. & MOORE, H. [1971]: Air pollution. *Analyt. Chem. (Reviews)* **43**, No. 5, 1R-15R
- MÜLLER, U. [1990]: Funkuhr für Automatisierungssysteme. *Radio Fernsehen Elektronik* **39**, H. 5, 296-298
- MULLER, S.H. & JANSSE, M.P.D. [1984]: Back to the rotating beam? An evaluation of five cloud-base measurement systems. Papers presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Cost-Effective Meteorological Observations (TECEMO), Nordwijkershout, Netherlands: 24-28 Sept. 1984; WMO Instruments and Observing Methods, Report No. 15; Secr. of the WMO, Geneva, Switzerland: 1984, Ref. III.10, p. 157-159
- MULLER, S.H. & BEEKMAN, P.J. [1987]: A test of commercial humidity sensors for use at automatic weather stations. *J. Atmosph. and Oceanic Technology* **4**, No. 12, 731-735
- MUNN, J.F. [1978]: Low cost data acquisition system using standard DIPs. *Computer Design (Winchester/Pa.)* **17**, No. 5, 200-208
- NADER, J.S. [1959]: Instrumenting the study of the air pollution problem. *Proc. of the IRE (New York)* **47**, p. 988-990
- NADOLSKI, V.L. [1995]: Operational experiences with the automated surface observing system - ASOS. Papers presented at the International Workshop on Experiences with Automatic Weather Stations in Operational Use within National Weather Services, Vienna, Austria: 15-17 May 1995, WMO Instruments and Observing Methods Rep. No. 58 (WMO/TD - No. 670), p. 69-71
- NADOLSKI, V.L. & GIFFORD, M.D. [1995]: An overview of ASOS algorithms. Papers presented at the International Workshop on Experiences with Automatic Weather Stations in Operational Use within National Weather Services, Vienna, Austria: 15-17 May 1995, WMO Instruments and Observing Methods Rep. No. 58 (WMO/TD - No. 670), p. 63-68
- NAITO, I. [1998]: Vaisala is the first foreign supplier of network sensors for the Japan Meteorological Agency. *Vaisala News* No. 148, 36-38
- NANTOU, Y. & SUZUKI, S. [1981]: Multichannel digital ventilated psychrometer using eight-bit microcomputer. *IEEE Transact. on Instrum. and Measurement* **IM-30**, No. 2, 98-102
- NEUBER, E., GEORGII, H.-W. & MÜLLER, J. [1981]: Verteilung leichter Kohlenwasserstoffe an Meßstellen unterschiedlicher Luftqualität. *Staub - Reinhaltg. d. Luft* **41**, Nr. 3, 91-97
- NEUMANN, W.T. et al. [1988]: Considerations for using lightning locating systems in performance evaluations of single-station lightning detection sensors. *Proc. Internat. Aerospace and Ground Conf. on Lightning and Static Electricity, Oklahoma City, OK.:* April 19-22, 1988; U.S. Nat. Oceanic and Atmosph. Administration, Environmental Res. Labs. 1988, NOAA Special Report p. 439-449
- NÖBEL, T. [1996]: Schneller, größer und sicherer - Aktueller Einkaufsführer zu PC-Laufwerken. *Berliner Zeitung* Nr. 178 (1. Aug. 1996), S. 36
- NOGUCHI, H., UCHIDA, Y., NOMURA, A. & MORI, S.-I. [1989]: A highly reliable humidity sensor using ionene polymers. *J. Materials Sci. Lett. (UK)* **8**, No. 11, 1278-1280
- NYSTUEN, J.A., PRONI, J.R., BLACK, P.G. & WILKERSON, J.C. [1996]: A comparison of automatic rain gauges. *J. Atmosph. and Oceanic Technology* **13**, No. 1, 62-73
- OBERMEIER, E. [1986]: Sensor und Signalverarbeitung auf einem Chip - Entwicklungstendenzen und Risiken. *Techn. Messen* **53**, H. 2, 51-54
- OLBERS, W. [1955]: Grundlagen der objektiven Wolkenhöhenmessung. *Techn. Mitt. d. Instrumentenwesens d. Dtsch. Wetterdienst. (N.F.)* Nr. 1, 1955, 3-18
- OLBERS, W. & HERZOG, F. [1965]: Das objektive Sichtmeßgerät (Transmissometer) des Instrumentenamtes Hamburg. *Optik (Stuttgart)* **22**, Nr. 1, 29-34
- OLIVER, S.A. & OLIVER, H.R. [1973]: A computer method for automatic acquisition of wind speed data. *J. Phys. E, Scient. Instrum.* **6**, No. 4, 401-403
- OLIVIERI, J.C. [1966]: Le codage des informations météorologiques. Automatic Weather Stations, WMO Techn. Note No. 82; *Proc. of the WMO Techn. Conf. on Automatic Weather Stations, Geneva: 1967*, (WMO-No. 200.TP.104) p. 144-174
- OLIVIERI, J. [1977b]: Détecteur optique d'éclairage. WMO, Papers presented at the WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO), Hamburg: 27-30 July 1977; WMO-No. 480, Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1977, p. 144-146
- OSMOND, A. & PAINTING, D.J. [1984]: Static pressure heads for meteorological use. Papers presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Cost-Effective Meteorological Observations (TECEMO), Nordwijkershout, Netherlands: 24-28 Sept. 1984; WMO Instruments and Observing Methods, Report No. 15; Secr. of the WMO, Geneva, Switzerland: 1984, Ref. III.15, p. 185-188

- OTSUKA, I. & SADAKATA, M. [1957]: Practical radioactive snow-gage with wireless telemetering system. *Electrotechn. J. of Japan* 3, No. 6, 65-68
- OULDRIDGE, M., JONES, D.W. & PAINTING, D.J. [1988a]: Organization of and results from the WMO international ceilometer intercomparison; United Kingdom 1986. WMO, Papers presented at the WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECO-1988), Leipzig: 16-20 May 1988; Instruments and Observing Methods Rep. No. 33 (WMO/TD-No. 222), Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1988, Ref. I.1, p. 3-8
- OULDRIDGE, M., JONES, D.W. & PAINTING, D.J. [1988b]: The WMO international ceilometer intercomparison, Beauford Park 1986. *Meteorol. Mag.* 118, No. 1408, 242-246
- OULDRIDGE, M., SPARKS, W.R., GRIGGS, D.J. & JONES, D.W. [1989]: The first WMO international intercomparison of visibility measurements. Part II: Preliminary results. Papers presented at the 4th Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-IV), Brussels, Belgium: 4-8 Sept. 1989; WMO Instruments and Observing Methods, Rep. No. 35; (WMO/TD - No. 303); Ref. I.3, p. 19-25
- PAHOR, S., POLAK, Z. & ŠNAJDER, J. [1989]: A simple hot cylinder wind probe. Papers presented at the 4th Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-IV), Brussels, Belgium: 4-8 Sept. 1989; WMO Instruments and Observing Methods, Rep. No. 35; (WMO/TD - No. 303); Ref. III.7, p. 135-140
- PAINTING, D.J. [1975b]: A wind averaging system for automatic weather stations. WMO, Automated Meteorological Systems; Proc. of the WMO Techn. Conf. on Automated Meteorological Systems (TECAMS), Washington, D.C.: 14-17 Febr. 1975; (WMO - No. 420); Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1975, 217-223
- PAINTING, D.J. & PETTIFER, R.E.W. [1981]: ACRE – an automatic climatological recording equipment. WMO, Instruments and Observing Methods, Rep. No. 9; Papers presented at the WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-II), Mexico-City: 13-17 July 1981; Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1981, Ref. V.4, p. 293-296
- PAINTING, D.J. [1985]: A new automatic observing system. Papers presented at the 3rd WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-III), Ottawa, Canada: 8-12 July 1985; Instruments and Observing Methods Rep. No. 22, (WMO/TD-No. 50); Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1985, Ref. IV.8, p. 193-196
- PAINTING, D. [1991]: Guidance on the establishment of algorithms for use in synoptic automatic weather stations. – Processing of surface wind data. WMO, Report to the CIMO Working Group on Surface Measurements, Instruments and Observing Methods Rep. No. 47, (WMO/TD-No. 452) (10 p.)
- PALIN, R.I.R. & RAE, J.B. [1987]: Data transmission and acquisition systems for shore-based sea-level measurements. *Electronics for Ocean Technology*, Edinburgh, Scotland: 24-26 March 1987; Heriot-Watt Univ., Institution of Electronic and Radio Engineers, Publ. No. 72, p. 1-6
- PANG, S., GRASSL, H. & JÄGER, H. [1996]: An improved humidity sensor. *J. Atmosph. and Oceanic Technol.* 13, No. 5, 1110-1115
- PARADIŽ, B. [1977]: Avtomatizacija v meteorologiji. *Razprave Pap. (Ljubljana)* 1977, Nr. 21, 7-14
- PARSONS, J.E., DUNLAP, J.L., MCKINION, J.M., PHENE, C.J. & BAKER, D.N. [1980]: Microprocessor-based data acquisition and control software for plant growth chambers. *Transact. of the Americ. Soc. Agricult. Engrs. (ASEA)*, General Edition 23, No. 3, 589-595
- PARTRIDGE, R.H., BROOKES, C. & DAVENPORT, A.J. [1990]: An intercomparison exercise to evaluate the accuracy of ambient hydrocarbon measurements in the UK. *Nat. Phys. Labor. Teddington, Middlesex; NPL Report Qu 82*, March 1990 (27 p.)
- PATRICHİ, F., MAXIM, P. & GRIGORESCU, C. [1973]: Optimizarea parametrilor electrici și realizarea unei noi forme constructive a emittorului de la S.M.A. *Noi Apparate si Instrum. Meteorol. (Bucarest)* 1973, 39-48
- PATRICHİ, F. [1984]: The Romanian experience in conceiving and achievement of sensors for automated unattended meteorological stations operating in mountain areas under severe hoar frost. Papers presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Cost-Effective Meteorological Observations (TECIMO), Nordwijkershout, Netherlands: 24-28 Sept. 1984; WMO Instruments and Observing Methods, Report No. 15; Secr. of the WMO, Geneva, Switzerland: 1984, Ref. VI.10, p. 333-336
- PAULAT, A. [1981]: Eine Omega-synchronisierte Quarzuhr mit codiertem Ausgangssignal. *Der Elektroniker (Stuttgart)* 20, Nr. 2, 21-22
- PAYNE, G.A., FRIEHE, C.A. & EDWARDS, D.K. [1994]: Time and frequency response of a resistance-wire aircraft atmospheric temperature sensor. *J. Atmosph. and Oceanic Technology* 11, No. 2, Pt. 2, 463-475
- PAYNE, R.E. [1988]: The MR: a meteorological data sensing, recording and telemetering package for use on moored buoys. *J. Atmosph. and Oceanic Technology* 5, No. 2, 286-297
- PEAR, C.B. [1940]: Radio equipment for an un-manned weather station. *Bull. Americ. Meteorol. Soc.* 21, No. 3, 107-110
- PEARSON, R. [1990]: Measuring ambient ozone with high sensitivity and bandwidth. *Rev. Scient. Instrum.* 61, No. 2, 907-916
- PECK, R.C., ATKINS, E.W. & HILL, A.N. [1966]: A sensitive precipitation indicator for automatic weather stations. *Automatic Weather Stations*, WMO Techn. Note No. 82; Proc. of the WMO Techn. Conf. on Automatic Weather Stations, Geneva: 1967, (WMO-No. 200.TP.104) p. 67-72
- PEINECKE, H. [1968]: Meßeinrichtungen in zentralisierten Meßwert-erfassungsanlagen. *Messen Steuern Regeln* 11, H. 3, 40-43
- PELZ, H. [1984]: Elektromagnetische Störeinflüsse auf elektronische Geräte. *Regelungstechn. Praxis* 26, H. 10, 440-448
- PERKINS, T.D., HEMMERLEIN, M.T. & VOGELMANN, H.W. [1993]: Techniques for pollution monitoring in remote sites. II: Ozone. *Water, Air, & Soil Pollution (Dordrecht)* 68, No. 3-4, 391-397
- PERTTU, K., LINDGREEN, Å, LINDROTH, A. & NORÉN, B. [1977]: Micro- and biometeorological measurements at Jadråås. Instrumentation and measurement techniques. Swedish Coniferous Forest Project, Barrskogslandskapets Ekologi, Swedish Univ. of Agricult. Sciences Upsala; Techn. Rep. No. 7, 1977 (69 p.)
- PERTTU, K. [1983]: Data acquisition for forest environmental measurements in Sweden. *The Forest-Atmosphere Interaction; Proc. Forest Environmental Measurement Conf.*, Oak Ridge, Tenn.: Oct. 23-28, 1983; D. Reidel Publ. Comp., Dordrecht/Boston/Lancaster: 1985, p. 105-115
- PETER, K. [1988]: Lokale Netze – eine Übersicht (Teil 1 und 2). *Elektronik* 37, H. 20, 70-72 u. 76-76, H. 21, 128-130
- PETERSON, B.G. & HUGHES, R.S. [1975]: Code conversion of automatic weather station reports by a real-time computer. WMO, Automated Meteorological Systems; Proc. of the WMO Techn. Conf. on Automated Meteorological Systems (TECAMS), Washington, D.C.: 14-17 Febr. 1975; (WMO - No. 420); Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1975, 360-368
- PETROCCHI, P.J. & DICKSON, E.B. [1977]: Lightning warning set. WMO, Papers presented at the WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO), Hamburg: 27-30 July 1977; WMO-No. 480, Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1977, p. 111-113

- PETTIFER, R.E.W., WESTBURY, P.R. & MOLYNEUX, M.J. [1980]: Recent developments in automatic systems – 2: A new continuously indicating rain gauge for use on automatic weather stations. Automated Meteorological Systems, Rep. No. 1, Papers presented at the Techn. Conf. on Evaluation and Standardization of Observing Techniques in Light of Automation, Norrköping (Sweden): 1-5 Sept. 1980; WMO Instruments and Methods of Observation, Geneva: 1980, Ref. I.6, p. 25-28
- PETTIFER, R.E.W. [1981]: Automatic meteorological observations – new methods and new problems. WMO, Instruments and Observing Methods, Rep. No. 9; Papers presented at the WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-II), Mexico-City: 13-17 July 1981; Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1981, Ref. I.1, p. 3-8
- PFEFFER, H.-U. & LOHSE, H.W. [1984]: Qualitätssicherung in automatischen Immissionsmeßnetzen; Teil II: Eine Methode zur Echtzeitauswertung von Schwebstoffmessungen mit dem Staubmonitor FH 62 I [1]. Staub – Reinhaltg. d. Luft 44, Nr. 2, 67-33
- PFEIFER, T., KOMISCHKE, M. & SCHWERHOFF, U. [1984]: Sensoren gekoppelt mit Singlechip-Mikrocomputern – Möglichkeiten der Vorverarbeitung und Sensorschnittstelle. Tagung "Sensoren – Technologie und Anwendung" Bad Nauheim: 19.-21. März 1984; VDI-Berichte Nr. 509, 1984, 125-129
- PFEIFER, T. & HEILER, K.-U. [1987]: Ziele und Anwendungen von Feldbussystemen. Automatisierungstechn. Praxis 29, H. 12, 549-557
- PIERCE, E.T. [1956]: The influence of individual variations in the field changes due to lightning discharges upon the design and performance of lightning flash counters. Arch. f. Meteorol., Geophys. u. Bioklimatol. A 9, H. 1, 78-86
- PIKE, J.M. [1981]: Modeling, calibration and curve-fitting sensors for electronic weather stations. WMO, Instruments and Observing Methods, Rep. No. 9; Papers presented at the WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-II), Mexico-City: 13-17 July 1981; Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1981, Ref. I.2, p. 9-10
- PIKE, J.M., BROOK, F.V. & SEMMER, S.R. [1983a]: Integrated sensors for PAM II. Preprints of the 5th Sympos. on Meteorological Observations and Instrumentation, Toronto: 1983, 326-333
- PIKE, J.M. & RINEHART, R.E. [1983]: Calibration of pressure sensor and radar receiver using behavioral modeling. J. of Climate and Appl. Meteorol. 22, No. 8, 1462-1467
- PIKE, J.M. [1984]: Field calibration methods for automatic weather stations. Papers presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Cost-Effective Meteorological Observations (TECEMO), Nordwijkershout, Netherlands: 24-28 Sept. 1984; WMO Instruments and Observing Methods, Report No. 15; Secr. of the WMO, Geneva, Switzerland: 1984, Ref. I.2, p. 7-11
- PIKE, J.M. [1986]: An advanced measurement concept: the integrated sensor. J. Atmosph. and Oceanic Technology 3, No. 1, 179-181
- PILON, J. [1989]: Vers l'automatisation complete de l'observation météorologique de surface: le project SOLFEGE. Papers presented at the 4th Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-IV), Brussels, Belgium: 4-8 Sept. 1989; WMO Instruments and Observing Methods, Rep. No. 35; (WMO/TD - No. 303); Ref. III.1, p. 101-104
- PIONTEK, M. [1995]: Präsentation von BLM-Vorhersagen mit VIS-5D auf der *geotechnica* 1995. Mitt. Dtsch. Meteorol. Ges. 1995, Nr. 4, S. 9
- PLAZY, J.-L. [1977]: Héliographe automatique et durée d'insolation. WMO, Papers presented at the WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO), Hamburg: 27-30 July 1977; WMO-No. 480, Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1977, p. 65-69
- PONTING, J.F. & SARSON, M.-A. [1984]: Operational quality evaluation of surface observations. Papers presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Cost-Effective Meteorological Observations (TECEMO), Nordwijkershout, Netherlands: 24-28 Sept. 1984; WMO Instruments and Observing Methods, Report No. 15; Secr. of the WMO, Geneva, Switzerland: 1984, Ref. V.3, p. 239-244
- POST, H. [1991]: Ein Lichtblick im Feldbus-Dschungel. Elektronik 40, H. 13, 24-26
- POWELL, M.D. [1992]: Wind measurement and archival under the Automated Surface Observing System (ASOS): user concerns and opportunity for improvement. Bull. Americ. Meteorol. Soc. 74, No. 4, 615-623
- POWERS, M.H. & HULL, S.E. [1988]: Gas monitoring transducers: Relative humidity sensors. J. Computers in Math. and Science Teaching 7, No. 4, 66-69
- PRABHU DESAI, R.G., DESA, E. & VITHAYATHIL, G. [1992]: A marine meteorological data acquisition system. Oceanography of the Indian Ocean, ed. by B.N. DESAI; A.A. Balkema, Rotterdam: 1992, p. 719-731
- PYLE, A.F. [1966a]: The NOMAD automatic buoy station. Automatic Weather Stations, WMO Techn. Note No. 82; Proc. of the WMO Techn. Conf. on Automatic Weather Stations, Geneva: 1967, (WMO-No. 200.TP.104) p. 183-186
- QUECK, U. [1986]: Das Übertragungsmedium "Kabel". Im Blickpunkt: Störbeeinflussung, Schirmung und Schutz gegen Überspannungen. Elektronik 35, H. 3, 51-66 u. H. 4, 99-105
- RAAB, H. [1981]: Probleme und Entwicklungstendenzen der Feuchte-meßtechnik in der chemischen Industrie. Regelungstechn. Praxis 23, H. 6, 195-200
- RAASCH, S. & GROSS, G. [1992]: VISIS: Visualisierung numerischer Simulationsergebnisse mittels Videofilm. Meteorol. Z. (N.F.) 1, H. 4, 211
- REGENER, V.R. [1964]: Measurement of atmospheric ozone with the chemiluminescent method. J. Geophys. Res. (Richmond, Va.) 69, No. 18, 3795-3800
- REICHL, H. [1979]: Siliziumsensoren als Schrittmacher neuer Computeranwendungen. Computerwoche 1979, Nr. 51/52, 56.
- RENARD, P. [1988]: Humidité: Le point de rosée investit le process. Mesures (Frankr.) 53, No. 9, 67 & 69-70
- REYNOLDS, D.W. [1983]: Prototype work station for mesoscale forecasting. Bull. Americ. Meteorol. Soc. 63, No. 3, 264-273
- REYNOLDS, M., HENDERSHOT, R., JUNGCK, M. & REID, B. [1988]: The Zeno Alliance network: a dual-loop fiber optic instrumentation network for ships. OCEANS '88, Baltimore, MD: Oct. 31 - Nov. 2, 1988; Proc. IEEE (Cat. No. 88-CH2585-8) New York: 1988, Vol. 4, p. 1560-1568
- RICKETTS, J.N. [1980]: World surface climatological data – methods of quality control and archiving. Meteorol. Mag. 109, No. 1300, 102-108
- RICO, S.P. [1991]: Ceilómetro nefobasímetro, o sencillamente "pinchanubes", se llama al dispositivo electrónico usado en aeropuertos para medir la altura de la base de las nubes. La Meteorología (Madrid) 1, No. 4-5, 23-30
- RIDLEY, B.A. & GRAHEK, F.E. [1990]: A small, low flow, high sensitive reaction vessel for NO chemiluminescence detectors. J. Atmosph. Oceanic Technol. 7, No. 2, 307-311
- RIEDL, J. & PLÖRER, O. [1997]: Messungen der Niederschlagsintensität mit Ombrometer Hp. Promet – Meteorol. Fortbildg. 26, H. 1/2, 17-21
- RINGENBACH, M.E. [1970]: Instrument development for automatic stations. Meteorol. Monographs (Boston) 11 No. 33, p. 334-345
- RIPLEY, E.A., SAUGIER, B. & OLM, O.J. [1973]: A control and read-out system for the measurement of atmospheric CO₂ profiles with a digital data logger. J. Phys., Scient. Instrum. E6, No. 2, 183-185
- ROBINSON, C.E. [1975]: Automation of cloud height measurements. WMO, Automated Meteorological Systems; Proc. of the WMO Techn. Conf. on Automated Meteorological Systems (TECAMS), Washington, D.C.: 14-17 Febr. 1975; (WMO - No. 420); Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1975, 169-178

- ROBINSON, C.E. [1980]: Automatic weather stations – anatomy of a concept. Automated Meteorological Systems, Rep. No. 1, Papers presented at the Techn. Conf. on Evaluation and Standardization of Observing Techniques in Light of Automation, Norrköping (Sweden): 1-5 Sept. 1980; WMO Instruments and Methods of Observation, Geneva: 1980, Ref. II.2, p. 53-60
- ROBINSON, C.E. & McKAY, D.J. [1989]: A practical cloud algorithm for automatic weather stations. Papers presented at the 4th Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-IV), Brussels, Belgium: 4-8 Sept. 1989; WMO Instruments and Observing Methods, Rep. No. 35; (WMO/TD - No. 303); Ref. II.11 p. 81-86
- ROCKNEY, V.D. [1959]: New developments in observations and instruments in the Weather Bureau. Bull. Americ. Meteorol. Soc. 40, No. 11, 554-560
- RÖHL, D. [1981]: Sensoren, Aktoren – periphere Komponenten der Mikrocomputer. Elektronik-Applikation 13, H. 2, 23-27
- ROHBECK, V., STEINBOCK, K. & KRIESEL, W. [1990]: Zuverlässigkeit bitserieller Feldbussysteme. Messen Steuern Regeln 33, H. 4, 153-156
- ROSSANO, A.T. & THIELKE, J.F. [1976]: The design and operation of air quality surveillance systems. Manual on Urban Air Quality Management, ed. by M. SUESS & S.R. CRAXFORD, WHO Regional Publ., European Series, Copenhagen, No. 1, p. 153-177
- ROTH, R. [1965]: Ein Gerät zur Untersuchung der kurzfristigen Schwankungen meteorologischer Parameter. Wiss. Mitt. Univ. München, Meteorol. Inst. Nr. 10, 1965, 1-76
- RUDEL, E. [1983]: Teilautomatische Klimastationen in Österreich, Teil 1. Wetter u. Leben 35, Nr. 1, 43-47
- RUDEL, E. [1995]: More than 10 years experience with the automatic meteorologic observation network in Austria. Papers presented at the International Workshop on Experiences with Automatic Weather Stations in Operational Use within National Weather Services, Vienna, Austria: 15-17 May 1995, WMO Instruments and Observing Methods Rep. No. 58 (WMO/TD - No. 670), p. 89-94
- RUF, C.B., AYDIN, K., MATHUR, S. & BOBAK, J.P. [1996]: 35-GHz dual polarization link for rain-rate estimation. J. Atmosph. and Oceanic Technology 13, No. 2, 419-425
- RUPPERSBERG, G.H. [1964]: Registrierung der Sichtweite mit dem Streulichtschreiber. Beitr. Phys. Atmosph. 37, H. 3/4, 252-263
- RUPPERT, P. [1981]: An economical dew- or frost-point hygrometer. WMO, Instruments and Observing Methods, Rep. No. 9; Papers presented at the WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-II), Mexico-City: 13-17 July 1981; Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1981, Ref. I.6, p. 33-40
- RYHÄNEN, T. [1994]: A new high performance Barocap – meeting customers needs. Vaisala News No. 133, 15-17
- SALTZMAN, E.S., YVON, S.A. & MATRAI, P.A. [1993]: Low-level atmospheric sulfur dioxide measurement using HPLC/fluorescence detection. J. Atmosph. Chemistry (Dordrecht) 17, No. 1, 73-90
- SANDERS, M.J. [1979]: A laser weather identifier system. U.S. Air Weather Service, Scott AFB, IL., Techn. Report (AEW-TR-79-001) May 1979, p. 79-86
- SANDS, K.J.T. & DICKSON, R.R. [1975]: A drifting buoy system for use with Nimbus F. WMO, Automated Meteorological Systems; Proc. of the WMO Techn. Conf. on Automated Meteorological Systems (TECAMS), Washington, D.C.: 14-17 Febr. 1975; (WMO - No. 420); Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1975, 316-322
- SANDS, K.J.T. & TONKINSON, B. [1975]: An interrogable weather observing system for use in synoptic networks. WMO, Automated Meteorological Systems; Proc. of the WMO Techn. Conf. on Automated Meteorological Systems (TECAMS), Washington, D.C.: 14-17 Febr. 1975; (WMO - No. 420); Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1975, 95-103
- SARANG, P.G. & SARANG, N.P. [1989]: A software solution for the linearization of the thermocouple. Intelligent Instrum. & Computers 7, No. 4, 160-163
- SARTOR, E.E. [1954]: Transmissometer components: test report. U.S. Signal Corps Engrng. Labor., Ft. Monmouth, N.J.; Project DA 3-36-02-042, Test Report T-1345, Sept. 1954
- SAXÉN, K. [1980]: MILOS, a low power automatic weather station for remote applications. Automated Meteorological Systems, Rep. No. 1, Papers presented at the Techn. Conf. on Evaluation and Standardization of Observing Techniques in Light of Automation, Norrköping (Sweden): 1-5 Sept. 1980; WMO Instruments and Methods of Observation, Geneva: 1980, Ref. II.5, p. 61-68
- SCHAEFFER, D. [1984]: Probleme der Erdung elektronischer Geräteeinheiten. Radio Fernsehen Elektronik 33, H. 11, 691-692
- SCHAEUSCHNER, D. [1982]: A-D-Wandler C 520 D mit U 880 gekoppelt. Radio Fernsehen Elektronik 31, H. 6, 384
- SCHIESL, J.W. [1975]: Automating the hydrologic reporting network. WMO, Automated Meteorological Systems; Proc. of the WMO Techn. Conf. on Automated Meteorological Systems (TECAMS), Washington, D.C.: 14-17 Febr. 1975; (WMO - No. 420); Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1975, 330-340
- SCHMIDT, J. & GNOTH, S. [1989]: Integrierte Interfaceschaltung U 5201 FC-306. Radio Fernsehen Elektronik 38, H. 12, 751-754
- SCHNELLE, K.B. & NEELEY, R.D. [1972]: Air pollution analyzer dynamics. Instrum. Technol. 19, No. 6, 53-55
- SCHÖNE, W. & SONNTAG, D. [1976]: Die Schattenringkorrektur beim Pyranometer mit galvanisch erzeugter Thermosäule. Z. Meteorol. 26, H.1, 48-52
- SCHOLZ, B. [1988]: Feldbusrealisierungsvorschlag für die Kleinautomatisierung. Messen Steuern Regeln 31, H. 6, 255-258
- SCHOLZ, H. [1987]: Möglichkeiten zur Temperaturkompensation von Silizium-Drucksensoren. Der Elektroniker (Aarau) 26, Nr. 9, 55-59
- SCHOPPNIES, E. [1983]: Sensoren auf der Grundlage der Si-Planartechnologie. Radio Fernsehen Elektronik 32, H. 3, 159-162 u. 175, H. 4, 226-228
- SCHREIBER, H. [1974]: Der Zeitzeichen- und Normalfrequenzsender DCF 77. Funk-Technik 29, Nr. 1, 21-23 u. Nr. 2, 61-63
- SCHUMNY, H. [1990]: Personal Computer in Labor, Versuchs- und Prüffeld – Der PC als Hilfsmittel bei der Erfassung, Verarbeitung und Darstellung von Meßdaten. 2. Aufl., Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York/London/Paris/Tokyo/Hong Kong: 1990 (332 S.)
- SCHWAIER, A. [1979]: Miniaturisierte Druckaufnehmer mit piezoresistiven Fühlern. Regelungstechn. Praxis 21, H. 7, 193-198
- SCHWAIER, A. [1986]: Digitales Einheitssignal – der Feldbus als Übertragungsmedium digitalisierter Prozeßsignale. 3. Fachtagung "Sensoren – Technologie und Anwendung" Bad Nauheim: 17.-19. März 1986; NTG-Fachberichte Nr. 93, VDE-Verlag, Berlin u. Offenbach: 1986, 318-323
- SCHWARZ, B. [1985]: Brennpunkt Erde – Fernerkundung aus dem All. Elektronikpraxis 1985, No. 4, 132-138
- SCHWARZ, S. [1987]: Low-Cost-Netzwerke zur Verbindung von Sensoren, Aktoren, Einchip-Rechnern sowie allen Geräten mit RS232-Anschluß. 4. Europäische Kongreßmesse für Technische Automation KOMMTECH '87 Essen: 12.-15. Mai 1987, Thema 07.6, S. 1-13
- SELDERS, T.M. [1982]: Key technologies of sensor fabrication. Konferenzunterlagen Sensor '82, Band 1, Nr. 1.3, S. 28-52
- SEN, B., SEHLDON, W.R. & BENBROOK, J.R. [1996]: Ultraviolet-absorption photometer for measurement of ozone on a rocket-boosted payload. Appl. Optics 35, No. 30, 6010-6014

- SEVRUK, B. [1981]: Correction of the systematic error in precipitation measurement by Hellmann gauges in the Swiss National Network. WMO, Instruments and Observing Methods, Rep. No. 9; Papers presented at the WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-II), Mexico-City: 13-17 July 1981; Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1981, Ref. III.6, p.177-184
- SEVRUK, B. [1984]: Comparison of evaporation losses from standard precipitation gauges. Papers presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Cost-Effective Meteorological Observations (TECEMO), Nordwijkershout, Netherlands: 24-28 Sept. 1984; WMO Instruments and Observing Methods, Report No. 15; Secr. of the WMO, Geneva, Switzerland: 1984, Ref. I.11, p. 57-61
- SHANKLIN, J.D. [1989]: Requirements for automatic weather stations in the Antarctic. Papers presented at the 4th Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-IV), Brussels, Belgium: 4-8 Sept. 1989; WMO Instruments and Observing Methods, Rep. No. 35; (WMO/TD - No. 303); Ref. IX.3, p. 395-399
- SHEPPARD, B.E. & CLINK, W.L. [1975]: Visibility through various obscuring media as determined by the Videograph. WMO, Automated Meteorological Systems; Proc. of the WMO Techn. Conf. on Automated Meteorological Systems (TECAMS), Washington, D.C.: 14-17 Febr. 1975; (WMO - No. 420); Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1975, 184-193
- SHEPPARD, B.E. [1980]: Some aspects of automatic visibility observations. Automated Meteorological Systems, Rep. No. 1, Papers presented at the Techn. Conf. on Evaluation and Standardization of Observing Techniques in Light of Automation, Norrköping (Sweden): 1-5 Sept. 1980; WMO Instruments and Methods of Observation, Geneva: 1980, Ref. I.9, p. 37-44
- SHEPPARD, B.E. & WU, K.K. [1985]: An improved AES precipitation occurrence sensor system. Papers presented at the 3rd WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-III), Ottawa, Canada: 8-12 July 1985; Instruments and Observing Methods Rep. No. 22, (WMO/TD-No. 50); Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1985, Ref. II.12, p. 103-108
- SHEPPARD, B.E. [1990]: Measurement of raindrop size distribution using a small Doppler radar. *J. Atmosph. and Oceanic Technol.* 7, No. 2, 255-268
- SHOPE, W.G. & PAULSON, R.W. [1985]: Development of a distributive system for handling real-time hydrological data collected by the U.S. Geological Survey. *IAHS Publ. (Wallingford, Engl.)* No. 145, 1985, p. 99-108
- SHORT, S.E. [1980]: National Weather Service (NWS) automation of surface observations. Automated Meteorological Systems, Rep. No. 1, Papers presented at the Techn. Conf. on Evaluation and Standardization of Observing Techniques in Light of Automation, Norrköping (Sweden): 1-5 Sept. 1980; WMO Instruments and Methods of Observation, Geneva: 1980, Ref. VI.2, p. 205-212
- SHURTLEFF, W.W. [1975]: A minicomputer-controlled lightning early warning/ meteorological system. WMO, Automated Meteorological Systems; Proc. of the WMO Techn. Conf. on Automated Meteorological Systems (TECAMS), Washington, D.C.: 14-17 Febr. 1975; (WMO - No. 420); Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1975, 199-206
- SICHLA, F. [1989]: Der Instrumentationsverstärker – ein hochwertiger Meßverstärker. *Messen Steuern Regeln* 32, H. 6, 275-277
- SICKLES, J.E., HODSON, L.L., McCLENNY, W.A., PAUR, R.J., ELLESTAD, T.G., MULIK, J.D., ANLAUF, K.G., WIEBE, H.A., MAKKEY, G.I., SCHIFF, H.I. & BUBACZ, D.K. [1990]: Field comparison of methods for the measurement of gaseous and particulate contributors to acidic dry deposition. *Atmosph. Environment* 24A, No. 1, 155-165
- SIERRA, M.R. & RODRIGUEZ, J.S. [1981]: Integrated system for air navigation meteorological aids. WMO, Instruments and Observing Methods, Rep. No. 9; Papers presented at the WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-II), Mexico-City: 13-17 July 1981; Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1981, Ref. V.5, p. 297-304
- SIGGELKOW, W. [1985]: Vergleich von Meßverfahren, Meßsystemen und Grenzwerten für Schwefeldioxid und Schwebstaub in atmosphärischer Luft. Institut f. Wasser-, Boden- und Lufthygiene des Bundesgesundheitsamtes, *WaBoLu Hefte* Nr. 6, Okt. 1985 (209 S.)
- SIGURDSSON, T. & RASTRICK, S. [1988]: Use of micro-computers at synoptic stations in Iceland. WMO, Papers presented at the WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECO-1988), Leipzig: 16-20 May 1988; Instruments and Observing Methods Rep. No. 33 (WMO/TD-No. 222), Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1988, Ref. III.9, p. 143-147
- SIMIDCHIEV, D.A. [1980]: On the comparison of sensors and automatic observation systems. Automated Meteorological Systems, Rep. No. 1, Papers presented at the Techn. Conf. on Evaluation and Standardization of Observing Techniques in Light of Automation, Norrköping (Sweden): 1-5 Sept. 1980; WMO Instruments and Methods of Observation, Geneva: 1980, Ref. VIII.1, p. 263-268
- SITTERLE, J.J., PODANY, M.E., CLASPY, P.C. & MERAT, F.L. [1988]: A meteorological data-acquisition system for atmospheric propagation studies. *IEEE Transact. Instrum. Measurements* 37, No. 3, 444-448
- SKAAR, J. & HEGG, K. [1989]: The WMO international hygrometer intercomparison, Norway 1987-89. Papers presented at the 4th Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-IV), Brussels, Belgium: 4-8 Sept. 1989; WMO Instruments and Observing Methods, Rep. No. 35; (WMO/TD - No. 303); Ref. I.1, p. 3-12
- SMITH, C.S. [1954]: Piezoresistance effect in germanium and silicon. *Phys. Review (2nd Ser.)* 94, No. 1, 42-49
- SMITH, M.O., SIMPSON, J.R. & FRITSCHEN, L.J. [1978]: A micro-processor-based system for the determination of eddy fluxes from aerodynamically rough surfaces. *Proc. WMO Sympos. on Forest Meteorology*, Univ. of Ottawa; Ottawa, Ontario, Canada: Aug. 21-25, 1978 (WMO - No. 527), p. 87-91
- SOGATOD, G. [1981]: A solar powered telemetering weather station. WMO, Instruments and Observing Methods, Rep. No. 9; Papers presented at the WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-II), Mexico-City: 13-17 July 1981; Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1981, Ref. IV.7, p. 241-246
- SOMMER, K. & HEINZE, F. [1980]: Das Fehlerverhalten des LiCl-Feuchtefühlers. *Wiss. Z. TU Ilmenau* 26, H. 4, 69-74
- SONNTAG, D. [1967]: Ein Pyranometer bzw. Effektivpyranometer mit galvanisch erzeugter Thermosäule. *Z. Meteorol.* 17, H. 1/2, 49-56
- SONNTAG, D. [1976]: A pyranometer for automatic remote-transmitting meteorological stations and for research purposes. *Meteorology in the GDR* 1976, No. 3, 43-58
- SONNTAG, D. [1978]: Das elektrische Aspirationspsychrometer EAP-1 als Meßwertgeber für die AFMS. 4. Internat. Sympos. über die effektive Nutzung Automatischer Meteorologischer Stationen, Potsdam: 25.-27. April 1978; *Abhandlgen. Meteorol. Dienst. d. DDR* Nr. 125, 1980, 41-44
- SONNTAG, D. [1994]: Advances in the field of hygrometry. *Meteorol. Z. (N.F.)* 3, H. 2, 51-66
- SORGE, J. [1956]: Grundsätzliches über das digitale Messen. *Arch. techn. Messen* 1956, Lfg. 246, R67-R70
- SPARKMAN, J. & GIRAYTYS, J. [1977]: Aircraft to satellite relay (ASDAR). WMO, Papers presented at the WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO), Hamburg: 27-30 July 1977; WMO-No. 480, Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1977, p. 226-230
- SPARKS, L. & SUMNER, G. [1984a]: A microcomputer-based weather station monitoring system. *J. Microcomputer Appl. (UK)* 7, No. 3/4, 233-242

- SPARKS, L. & SUMNER, G. [1984b]: Micros in control: online weather data acquisition using a BBC microcomputer. *Weather (Bracknell)* **39**, No. 7, 212-218
- SPICHTIGER, R. [1989]: Accuracy of relative humidity measurement equipments for automatic weather stations. Papers presented at the 4th Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-IV), Brussels, Belgium: 4-8 Sept. 1989; WMO Instruments and Observing Methods, Rep. No. 35; (WMO/TD - No. 303); Ref. VIII.4, p. 311-315
- SPOHR, F. [1982]: Kontinuierliche radiometrische Staub- und Schwermetallkonzentrationsmessung in der Außenluft. *Staub - Reinhaltung d. Luft* **42**, No. 12, 493-496
- SREEDHARAN, C.R. [1977]: A modified technique for the measurement of cloud height. WMO, Papers presented at the WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO), Hamburg: 27-30 July 1977; WMO-No. 480, Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1977, p. 97-99
- SRIVASTAVA, C.P. [1985]: Automatic collection of surface meteorological data from remote stations, using Indian geostationary satellite INSAT-1B. Papers presented at the 3rd WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-III), Ottawa, Canada: 8-12 July 1985; Instruments and Observing Methods Rep. No. 22, (WMO/TD-No. 50); Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1985, Ref. V.15, p. 325-332
- STADTHER, K.O. [1986]: Netz-Welten verbinden (Teil 1 u. 2). *Der Elektroniker (Stuttgart)* **25**, H. 9, 34-45 u. H. 11, 70-78
- STAHL, H. [1986]: Möglichkeiten und Grenzen der Sensortechnik in der Praxis der Luftreinhaltung. Fachtagung "Sensoren - Technologie und Anwendung" Bad Nauheim: 17.-19. März 1986; NTG-Fachberichte Nr. 93, VDE-Verlag GmbH, Berlin/Offenbach: 1986, S. 15-21
- STAUFFERT, F. [1960]: Schrägsichtmessung mit einer Fernsehanlage. *Beitr. Phys. Atmosph.* **33**, H. 1/2, 53-56
- STEEVES, G. & GRANT, S. [1988]: An automatic atmospheric pressure recorder for establishing polar sea surface height. *OCEANS '88*, Baltimore, MD: Oct. 31 - Nov. 2, 1988; Proc. IEEE (Cat. No. 88CH2585-8), New York: 1988, Vol. 2, p. 567-572
- STEINBERGER, E.H., SIVAN, J., NEUMANN, J. & ROSENBERG, N.W. [1967]: A laboratory analysis of chemiluminescent ozone measurements. *J. Geophys. Res.* **72**, No. 17, 4519-4524
- ŠTEJN, N.I. [1959]: Radioperedajusčee ustrojstvo avtomatičeskoj radiometeorologičeskoj stancii (ARMS-N). *Trudy Naučno-issled. Inst. Gidrometeorol. Priborostroeniija, Leningrad* 1959, 25-35
- STERNZAT, M.S. & SIDEL'NIKOV, V.V. [1960]: K voprosu o kompleksnoj avtomatizacii meteorologičeskich izmerenij. *Trudy Glavnoj Geofiz. Observ., Leningrad*, Nr. 103, 1960, 2-9
- STEWART, A.D., MCKAY, D.J. & HACKING, T. [1975]: Field testing for selection and development of high reliability sensors. WMO, Automated Meteorological Systems; Proc. of the WMO Techn. Conf. on Automated Meteorological Systems (TECAMS), Washington, D.C.: 14-17 Febr. 1975; (WMO - No. 420); Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1975, 302-309
- STÖBER, W. [1965]: Meßmethoden zur physikalischen Beschreibung von Aerosolsystemen. *Staub* **25**, Nr. 9, 360-365
- STRASSER, J.A. [1964]: Weathermen plan data-satellite net. *Electronics* **37**, No. 8, 14-15
- STRAKA, J.M., RASMUSSEN, E.N. & FREDRICKSON, S.E. [1996]: A mobile mesonet for finescale meteorological observations. *J. Atmosph. and Oceanic Technology* **13**, No. 5, 921-936
- STRATMANN, H. [1965]: Meßtechnische Grundlagen auf dem Gebiete der Messung gasförmiger Luftverunreinigungen. *Staub* **25**, Nr. 9, 341-346
- SULLIVAN, A.W. & WELLS, J.D. [1957]: A lightning stroke counter. *Bull. Americ. Meteorol. Soc.* **38**, No. 5, 291-294
- SUPPI, R.L. & NORMEY, J. [1988]: Sistema procesador frontal de datos meteorológicos. *Revista Telegrafica Electronica (Argentinien)* **76**, No. 895, 623-630 & No. 896, 814-816
- TADA, O. [1962]: Determination of nitrogen oxides in the air. *Rep. Inst. Science of Labour* No. 62, 1962, 7-26. Ref.: *Staub* **23** [1963] No. 6, 321
- TALBOT, R.W., SCHEUER, E.M. & LEFER, B.L. [1997]: Measurement of sulfur dioxide during GASIE with the mist chamber technique. *J. Geophys. Res.* **102**, No. D13, 16273-16278
- TAN, S.-K. [1992]: Event-triggered rainfall recording and analysis. *Computer Techniques in Environmental Studies IV*, ed. by P. ZANNETTI; Computational Mechanics Inc. and Elsevier Science Publ., Essex: 1992, p. 673-687
- TANABE, T. & NUMASAKI, N. [1985]: Precision digital barometer using cylindrical resonator. Papers presented at the 3rd WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-III), Ottawa, Canada: 8-12 July 1985; Instruments and Observing Methods Rep. No. 22, (WMO/TD-No. 50); Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1985, Ref. II.7, p. 73-78
- TASSO, L. & BENEDICTI, G. [1975]: Instrumental evaluation of cloudiness. WMO, Automated Meteorological Systems; Proc. of the WMO Techn. Conf. on Automated Meteorological Systems (TECAMS), Washington, D.C.: 14-17 Febr. 1975; (WMO - No. 420); Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1975, 158-168
- TESTA, C.G. [1985]: Transmetteur de pression numérique pour station automatique. Papers presented at the 3rd WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-III), Ottawa, Canada: 8-12 July 1985; Instruments and Observing Methods Rep. No. 22, (WMO/TD-No. 50); Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1985, Ref. IV.14, p. 227-230
- THEDEN, U., MÜLLER, B. & BOETERS, K.-E. [1982]: Halbleiter-Druckaufnehmer mit integrierter piezoresistiver Widerstandsbrücke. *Regelungstechn. Praxis* **24**, H. 7, 223-230
- THEDEN, U. & GREEN, M. [1985]: Development of silicon infrared charge coupled detector arrays. *Proc. 4th Austral. Microelectronics Conf., Migrating Systems to Silicon*; 1985, p. 59-65
- THIESER, M. [1994]: Schnittstellen-Software für PCs. *Francis-Verlag, Poing*: 1994
- THOENES, H.-W. [1961]: Möglichkeiten und Grenzen von Emissions- und Immissionsmessungen als Voraussetzung für die praktische Luftreinhaltung. *Zentralbl. Aerosol-Forsch.* **10**, Nr. 3, S. 269
- THOMAS, M.D., MacLEOD, J.A., ROBBINS, R.C., GOETTELMAN, R.C. & ELDRIDGE, R.W. [1956]: Automatic apparatus for determination of nitric oxide and nitrogen dioxide in the atmosphere. *Analyt. Chem. (Washington)* **28**, No. 12, 1810-1816
- THOMSEN, T. [1985]: Hydrological study in Greenland using the ARGOS system. *IAHS Publ. (Wallingford, Engl.)* No. 145, 1985, p. 125-133
- TIEFENAU, H.K.E. [1984]: A LiCl dewpoint sensor. Papers presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Cost-Effective Meteorological Observations (TECEMO), Nordwijkershout, Netherlands: 24-28 Sept. 1984; WMO Instruments and Observing Methods, Report No. 15; Secr. of the WMO, Geneva, Switzerland: 1984, Ref. III.7, p. 140-144
- TIEFENAU, H.K.E. [1988]: Measurement of wind speed and wind direction with a dynamic pressure sensor. WMO, Papers presented at the WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECO-1988), Leipzig: 16-20 May 1988; Instruments and Observing Methods Rep. No. 33 (WMO/TD-No. 222), Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1988, Ref. II.7, p. 61-66
- TORR, M.R. & DEVLIN, J. [1982]: Intensified charge coupled devices for use as a spaceborne spectrographical image-plane detector system. *Appl. Optics (USA)* **21**, No. 17, 3091-3108

- TREUSSART, H. [1961]: Final report of the chairman of the working group on automatic weather stations. WMO, Comm. for Instruments and Methods of Observation, Third session, New Delhi, 1962; CIMO-III/Doc. 4 (15. 09. 1961)
- TREUSSART, H., KETTERING, C.A., SANUKI, M., VENKITESHWAN, S.P. & MANI, A. [1963]: Automatic weather stations. WMO Techn. Note No. 52, (WMO-No. 136.TP.62) p. 1-19
- TREUSSART, H.P. [1975]: Les stations météorologiques automatiques – possibilités actuelles et futures. WMO, Automated Meteorological Systems; Proc. of the WMO Techn. Conf. on Automated Meteorological Systems (TECAMS), Washington, D.C.: 14-17 Febr. 1975; (WMO - No. 420); Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1975, 1-11
- TREUSSART, H. [1984]: Automatic weather stations. Papers presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Cost-Effective Meteorological Observations (TECEMO), Nordwijkershout, Netherlands: 24-28 Sept. 1984; WMO Instruments and Observing Methods, Report No. 15; Secr. of the WMO, Geneva, Switzerland: 1984, Ref. VI.1, p. 281-286
- TSUDA, N. & UOTSU, H. [1975]: An optical snow depthmeter (two-poles type). WMO, Automated Meteorological Systems; Proc. of the WMO Techn. Conf. on Automated Meteorological Systems (TECAMS), Washington, D.C.: 14-17 Febr. 1975; (WMO - No. 420); Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1975, 194-198
- UHLIG, K. [1977]: Ein Meßsystem zur Erfassung von Mittelwerten meteorologischer Größen. Arch. Techn. Messen 44, H. 10, 343-350
- ULLNER, H.-A. [1978]: Pt-100-Widerstandsthermometer als Temperaturgeber für AFMS. 4. Internat. Sympos. über die effektive Nutzung Automatischer Meteorologischer Stationen, Potsdam: 25.-27. April 1978; Abhandlgen. Meteorol. Dienst. d. DDR Nr. 125, 1980, 95-96
- URIMOTO, S., YAMAZAKI, S. & KOIKE, M. [1984]: Micro-computer based weighing raingauge. Papers presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Cost-Effective Meteorological Observations (TECEMO), Nordwijkershout, Netherlands: 24-28 Sept. 1984; WMO Instruments and Observing Methods, Report No. 15; Secr. of the WMO, Geneva, Switzerland: 1984, Ref. III.3, p. 121-125
- USOL'CEV, V.A. [1970a]: Unificirovannye datýki dlja avtomatičeskich gidrometeorologičeskich stancij. Sympos. "Automatische meteorologische Stationen" Potsdam: 17.-18. März 1970; Z. Meteorol. 22 [1971] H. 8-10, 279-282
- USOL'CEV, V.A. [1970b]: Datčik vlažnosti vozducha s podogrevnym elektrolitičeskim čuvstviteľnym elementom. Sympos. "Automatische meteorologische Stationen" Potsdam: 17.-18. März 1970; Z. Meteorol. 22 [1971] H. 8-10, 288-291
- Van ASSELT, C.J., JACOBS, A.F.G., Van BOXEL, J.H. & JANSEN, A.E. [1989]: A simple fast-response thermometer for outdoor use. Papers presented at the 4th Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-IV), Brussels, Belgium: 4-8 Sept. 1989; WMO Instruments and Observing Methods, Rep. No. 35; (WMO/TD - No. 303); Ref. III.6, p. 129-134
- Van CAUWENBERGHE, R. [1977]: 'MAPS – READAC' a concept in meteorological data acquisition. WMO, Papers presented at the WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO), Hamburg: 27-30 July 1977; WMO-No. 480, Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1977, p. 132-137
- Van Den ENDEN, I. & MULLER, S.H. [1985]: Sensors. Keynote papers presented at the 3rd WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-III), Ottawa, Canada: 8-12 July 1985; Instruments and Observing Methods Rep. No. 23, (WMO/TD-No. 51); Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1985, p. 45-62
- Van Der MEULEN, J.P. [1989]: A comparative study of a set of digital automatic barometers. Papers presented at the 4th Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-IV), Brussels, Belgium: 4-8 Sept. 1989; WMO Instruments and Observing Methods, Rep. No. 35; (WMO/TD - No. 303); Ref. I.6, p. 41-46
- Van GORP, J.J. [1989]: Software engineering to improve meteorological measurements. Papers presented at the 4th Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-IV), Brussels, Belgium: 4-8 Sept. 1989; WMO Instruments and Observing Methods, Rep. No. 35; (WMO/TD - No. 303); Ref. II.3, p. 93-97
- Van GYSEGEM, A.O. [1980]: Requirements for urban automated meteorological stations. Automated Meteorological Systems, Rep. No. 1, Papers presented at the Techn. Conf. on Evaluation and Standardization of Observing Techniques in Light of Automation, Norrköping (Sweden): 1-5 Sept. 1980; WMO Instruments and Methods of Observation, Geneva: 1980, Ref. VII.3, p. 233-238
- Van GYSEGEM, A. [1981]: Considerations concerning the application of new technology in meteorology. WMO, Instruments and Observing Methods, Rep. No. 9; Papers presented at the WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-II), Mexico-City: 13-17 July 1981; Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1981, Ref. IV.1, p. 207-212
- Van GYSEGEM, A.O. [1985]: Observational systems and new technology. Keynote papers presented at the 3rd WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-III), Ottawa, Canada: 8-12 July 1985; Instruments and Observing Methods Rep. No. 23, (WMO/TD-No. 51); Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1985, p. 87-114
- Van OUDHEUSDEN, B.W. & HUIJSING, J.H. [1989]: Micro-electronic wind meter. Papers presented at the 4th Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-IV), Brussels, Belgium: 4-8 Sept. 1989; WMO Instruments and Observing Methods, Rep. No. 35; (WMO/TD - No. 303); Ref. III.8, p. 141-146
- Van OUDHEUSDEN, B.W. & HUIJSING, J.H. [1991]: Microelectronic thermal anemometer for the measurement of surface winds. J. Atmosph. and Oceanic Technology 8, No. 3, 374-384
- VARCHMIN, J.-U. [1990a]: Grundlagen der Meßdatenerfassung und -auswertung. Personal Computer in Labor, Versuchs- und Prüffeld, herausgeg. von H. SCHUMNY, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York/Paris/Tokyo/HongKong: 1990, Kap. 6, S. 93-121
- VAREY, R. & GREEN, D.E. [1979]: Advanced methods of monitoring and measurement. Clean Air (Brighton) 9, No. 6, p. 193
- VASSY, A. [1958]: Appareil enregistrateur donnant la concentration de l'ozone dans l'air. Geofiz. Pura e Appl. 39, No. 1, 164-173
- VATJUS-ANTTILA, L., KARPPINEN, M. & SAUKKONEN, S. [1983]: A portable data logger for severe environments. Information Processing '83, Proc. of the IFIP 9th Computer Congress, ed. by R.E.A. MASON, Elsevier Science Publ. (North Holland): 1983, p. 173-176
- VENUGOPAL, G. & SRIVASTAVA, G.P. [1977a]: A digital continuously updated two minute mean wind speed indicator for use at airports. WMO, Papers presented at the WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO), Hamburg: 27-30 July 1977; WMO-No. 480, Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1977, p. 91-96
- VERMILLION, L. [1969]: Jumble of electronics, instruments keeps air pollution monitoring hazy. Electronics 42, No. 25, p. 137-138, 140, 143-144 & 146
- VIEZEE, W. & EVANS, W.E. [1983]: Automated measurements of atmospheric visibility. J. of Climate and Appl. Meteorol. 22, No. 8, 1455-1461
- VITON, P. [1966]: Contribution a la recherche d'un capteur d'humidité pour stations automatiques. Automatic Weather Stations, WMO Techn. Note No. 82; Proc. of the WMO Techn. Conf. on Automatic Weather Stations, Geneva: 1967, (WMO-No. 200.TP.104) p. 55-62
- VITON, P. [1977]: Transmetteur barométrique a jauges de contrainte. WMO, Papers presented at the WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO), Hamburg: 27-30 July 1977; WMO-No. 480, Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1977, p. 74-77

- VITON, P. [1980]: A rainfall intensity recorder. Automated Meteorological Systems, Rep. No. 1, Papers presented at the Techn. Conf. on Evaluation and Standardization of Observing Techniques in Light of Automation, Norrköping (Sweden): 1-5 Sept. 1980; WMO Instruments and Methods of Observation, Geneva: 1980, Ref. I.12, p. 75-78
- VIUKARI, P. [1987]: New means to increase the reliability of runway visual range measurement. Vaisala News (Helsinki) No. 111/112 [1987], p. 32-34
- VOGELANG, E. & WUTTIG, H. [1989]: Feldbus – aktueller Stand der Normungsaktivitäten. Messen Prüfen Automatisieren 1989, H. 9, 414-420
- VOIGT, J., KRUSCHE, J. & FIEDLER, K. [1988]: Entwicklung eines kapazitiven Luftfeuchte-Sensors. Tagungsband "Feuchte 88", KdT Bezirksverband Suhl, Bereich Wiss. u. Technik, S. 84-90
- VOLPICELLI, R., ANDEWEG, P. & HAGAR, W.G. [1985]: Interactive water monitoring system accessible by cordless telephone. Rev. Scient. Instrum. 56, No. 12, 2328-2332
- VONWYL, E. [1992]: Normalfrequenz- und Zeitzeichensender. Der Elektroniker (Aarau) 31, Nr. 1, 37-40
- Von HOLLEUFFER-KYPKE, R., HÜBSCHMANN, W.G., SÜSS, F. & THOMAS, P. [1984]: Meteorologisches Informationssystem des Kernforschungszentrums Karlsruhe. Atomenergie Kerntechnik 44, H. 4, 300-304
- VOSS, G. [1990]: Lösungsdiffusion in Polymeren als Speicher- und Anreicherungsmechanismus für die massenspektrometrische Analyse. Techn. Messen 57, H. 4, 160-164
- WÄHRN, O. & KOSTAMO, P. [1975]: Operational experience with the Humicap relative humidity sensor. WMO, Automated Meteorological Systems; Proc. of the WMO Techn. Conf. on Automated Meteorological Systems (TECAMS), Washington, D.C.: 14-17 Febr. 1975; (WMO - No. 420); Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1975, 207-216
- WALFORD, P. [1987]: Automation of gas chromatograph data acquisition and processing at Cape Grim. Baseline Atmospheric Program (Australia) 1985, ed. by B.W. FORGAN & P.J. FRASER; Dept. of Science, Bureau of Meteorol., Tasmania, Australia: 1987, p. 30-34
- WANG, T., LATAITIS, R., LAWRENCE, R.S. & OCHS, G.R. [1982]: Laser weather identifier: present and future. J. Appl. Meteorol. 21, No. 11, 1747-1753
- WANXING LI [1989]: The MPFB: a new type of field bus. Intelligent Instrum. and Computers [1989] No.4, 165-171
- WARCHOL, E.J., SACHS, M.S. & LORENTSON, H.S. [1961]: Automatic precipitation and temperature reporting over very-high frequency radio systems. Americ. Inst. Electr. Eng., Commun. Electronics No. 53, 77-80
- WARD, B.K. [1983]: Digital hygrometer with capacitive sensor. J. Phys. E, Scient. Instrum. 16, No. 8, 731-733
- WARMBT, W. [1968]: SO₂-Messungen mit einer amperometrisch-jodometrischen Registrierapparatur. Z. Meteorol. 20, H. 1-6, 43-59
- WARTBURG, A.F., BREWER, A.W. & LODGE, I.P. [1964]: Evaluation of a coulometric oxidant sensor. Internat. J. Air & Water Poll. 1964, No. 1, 21-28
- WEIGLEIN, G. [1990]: Feldeffekttransistoren als Sensoren. Phys. in unserer Zeit 21, H. 3, 113-116
- WEIHOFFEN, R. [1994]: Die eigene Wetterkarte für die Freizeit. Frankfurter Allg. Zeitung Nr. 201 (30. Aug. 1994), S. T4
- WEIHOFFEN, U. & WOEHL, R. [1981]: A low-cost, multi-purpose data acquisition device based on a microprocessor. Agricult. Meteorol. (Amsterdam) 24, No. 2, 111-116
- WENNERBERG, G. [1985]: Hydrological data collection and transmission in Sweden. IAHS Publ. (Wallingford, Engl.) No. 145, 1985, p. 119-124
- WERTHSCHÜTZKY, R. [1989]: Drucksensoren mit piezoresistiven Widerständen. Messen Steuern Regeln 32, H. 11, 486-491
- WHALEN, M., DRISCOLL, J.N. & WOOD, C.D. [1994]: Detection of aromatic hydrocarbons in the atmosphere. Atmosph. Environment (Oxford) 28, No. 2, 567-570
- WIEGLEB, G., RADOW, A. & RÖSS, R. [1983]: SO₂-Messung mit dem neuen UV-BINOS. Techn. Messen 50, Nr. 4, 143-150
- WIERINGA, J. [1977]: Wind representativity increase due to an exposure correction, obtaining from past analog station wind records. WMO, Papers presented at the WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO), Hamburg: 27-30 July 1977; WMO-No. 480, Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1977, p. 39-44
- WILD, H. [1981]: Drucksensoren der neuesten Generation. Der Elektroniker (Aarau) 20, Nr. 4, EL18-EL20
- WILHELM, K. [1968]: Eine selbstgebaute Quarzuhr. Funk-Technik 23, Nr. 10, 391-395
- WILKINSON, S.W. & BOATMAN, J.F. [1988]: The NOAA King Air airborne data acquisition system: description and user's guide. Rep. U.S. Dept. of Commerce, Nat. Oceanic and Atmosph. Administration, Environmental Res. Laboratories; Air Resources Laboratory, Silver Spring, Maryland: July 1988 (76 p.)
- WILLIAMS, J. [1980]: Single-slope a-d converter makes a comeback with 20-bit linearity. Electronics 53, No. 23, 151-155 (Nov. 6)
- WILLIAMS, R.M., HAUMANN, J.R. & WHITE, R.V. [1983]: A battery-operated data-acquisition system. IEEE Transact. Instrum. and Measurements IM-32, No. 2, 356-360
- WILLIAMS, R.G. & ERDMAN, M.D. [1987]: Low-cost computer interfaced rain gauge. Computers and Electronics in Agriculture 2, p. 67-73
- WINKLER, P. [1987]: Vergleichende Untersuchungen von Niederschlagssensoren und Sammlern im Hinblick auf eine Standardisierung. VDI Berichte Nr. 608, 1987, S. 483-492
- WINKLER, P. [1988]: Response of precipitation sensors to precipitation. WMO, Papers presented at the WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECO-1988), Leipzig: 16-20 May 1988; Instruments and Observing Methods Rep. No. 33 (WMO/TD-No. 222), Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1988, Ref. V.5, p. 269-274
- WINKLER, P. [1989]: Field and laboratory intercomparison of precipitation sensors. Papers presented at the 4th Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-IV), Brussels, Belgium: 4-8 Sept. 1989; WMO Instruments and Observing Methods, Rep. No. 35; (WMO/TD - No. 303); Ref. III.3, p. 111-117
- WINKLER, P., RIEDL, J. & LANG, P. [1993]: A threshold intensity to standardize wet deposition. Meteorol. Z. (N.F.) 2, H. 1, 21-26
- WINKLER, P. [1993a]: Principles of automatic rain detection. Meteorol. Z. (N.F.) 2, H. 1, 27-34
- WINKLER, P. [1993b]: Response of precipitation sensors to rain. Meteorol. Z. (N.F.) 2, H. 1, 35-44
- WINSTANLEY, J.V., ADAMS, M.J. & WHITLEY, A. [1974]: The role of lidar in environmental sensing. Proc. of the Conf. on Environmental Sensors and Applications, Roy. Soc. London: 18. - 19. Nov. 1974; IERE, London: 1974, p. 163-178
- WINTER, P. [1995]: Die Filiale kommt ins Stammhaus. Datenübertragung per Integrated Services Digital Network erspart Dienstreisen. Berliner Zeitung Nr. 79 (3. März 1995) S. 38
- WINTERLING, K.H. [1965]: Kontinuierliche Gasanalyse durch Absorption infraroter Strahlung; Teil II: Geräte und Anwendungen. Arch. techn. Messen 1965, Lfg. 350, 59-62 (V 723-23)

- WODE, C., ROTH, R., HOFF, A., SCHÜRMAN, M., WACHS, P. et al. [1995]: Die Hubschrauberschleppsonde Helipod – über Konzeption, Realisierung und Erprobung eines zukunftsweisenden meteorologischen Sensorträgers. Deutsche Meteorologen-Tagung 11. - 15. 09. 1995 in München; Annalen d. Meteorol. (N.F.) Nr. 31, S. 279-280
- WOJCIECHOWSKI, T. & MICHAŁCZEWSKI, E. [1980]: Raboty v oblasti datčikov i preobrazovatelej avtomatičeskich meteorologičeskich stancij. 4. Internat. Sympos. über die effektive Nutzung Automatischer Meteorologischer Stationen, Potsdam: 25.-27. April 1978; Abhandlgen. Meteorol. Dienst. d. DDR Nr. 125, 1980, 17-21
- WOLFE, Q.L. & NAGLER, M. [1980]: Conceptual design of a spaceborne lightning sensor. Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. (USA) 246, 22-33
- WORRELL, W.L. & LIU, Q.G. [1982]: Sulfur dioxide sensor using solid-sulfate electrolytes. Sensors and Actuators 2, No. 4, 385-386
- YAMAGUCHI, Y., MITSUMOTO, M., SENGOKU, M. & ABE, T. [1994]: Synthetic aperture FM-CW radar applied in the detection of objects buried in snowpack. IEEE Transact. on Geoscience and Remote Sensing 32, No. 1, 11-18
- YAMANOUCI, Y. & NUMASAKI, N. [1985]: JMA-80 surface meteorological observation equipment – a new data acquisition system for observatory in Japan. Papers presented at the 3rd WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-III), Ottawa, Canada: 8-12 July 1985; Instruments and Observing Methods Rep. No. 22, (WMO/TD-No. 50); Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1985, Ref. IV.9, p. 197-202
- YANAGISAWA, S. [1981]: Automatic meteorological observing stations. WMO, Instruments and Observing Methods, Rep. No. 9; Papers presented at the WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-II), Mexico-City: 13-17 July 1981; Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1981, Ref. II.3, p. 103-109
- YASUSHI, O. [1981]: Operational use of an automatic snow-depth tele-meter system. WMO, Instruments and Observing Methods, Rep. No. 9; Papers presented at the WMO Techn. Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-II), Mexico-City: 13-17 July 1981; Secr. of WMO, Geneva, Switzerland: 1981, Ref. II.4, p. 111-113
- YOUNG, A.F. [1984a]: Air transport effects on N & Z precision aneroid barometers used as transfer standards in high accuracy comparisons. Papers presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Cost-Effective Meteorological Observations (TECEMO), Nordwijkershout, Netherlands: 24-28 Sept. 1984; WMO Instruments and Observing Methods, Report No. 15; Secr. of the WMO, Geneva, Switzerland: 1984, Ref. I.4, p. 19-23
- YOUNG, A.F. [1984b]: Automation of solar radiation data collection. Papers presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Cost-Effective Meteorological Observations (TECEMO), Nordwijkershout, Netherlands: 24-28 Sept. 1984; WMO Instruments and Observing Methods, Report No. 15; Secr. of the WMO, Geneva, Switzerland: 1984, Ref. V.8, p. 269-271
- YUAN-CHANG YEH & TSENG, T.Y. [1989]: Electrical properties of K₂O-doped Ba_{0.5}Sr_{0.5}TiO₃ ceramic humidity sensor. IEEE Transact. Compon. Hybrids Manuf. Technol. (USA) 12, No. 2, 259-266
- ZAROMB, S. & STETTNER, J.R. [1984]: Theoretical basis for identification and measurement of air contaminants using an array of sensors having partly overlapping selectivities. Sensors & Actuators 6, No. 4, 225-243
- ZIMMER, H. [1988]: Meßdatenerfassung mit dem PC – Flexibel durch intelligente Unterstationen und spezielle Software. Elektronik 37, Nr. 19, 76-79
- ZIMMER, M. [1979]: Genaue Analog/Digital-Umsetzer für die Hochfrequenz-Datenerfassung. Elektronik 28, H. 6, 41-45
- ZOBEL, H. & REINECKE, H. [1956]: Entwicklung und Erprobung eines winterfesten Regenschreibers. Meteorol. Rdsch. 9, 7/8, 147-149
- Analysers measures gas hydrocarbones. Electronics 37 [1964] No. 31, 115-116
- Anemometer aids remote weather stations – Lightweight instruments contain solid-state sensors that give direction and velocity. Electron. Design 3 [1970] No. 1, 30-31
- Elektronik Arbeitsblatt Nr. 69: Code-Übersicht (1. u. 2. Teil). Elektronik 21 [1972] H. 9, 327-328 u. H. 10, 361-364
- Elektronische Speicher in kleinen stabilen Gehäusen. Der Elektroniker (Stuttgart) 29 [1990] Nr. 1, 44-45
- Dornier data collection system, Handbuch. Dornier GmbH, Friedrichshafen; Dok.-Nr. HB 126-300000.00.0, Ausg. B vom 17. 06. 1993
- Humidity meters. Vaisala News (Helsinki) No. 82 [1979], p. 14
- Infrared spots air pollution. Electronics 32 [1959] No. 19, p. 38
- Lufthygienisches Überwachungssystem Niedersachsen – Aufbau und Aufgabe. Druckschrift: Niedersächs. Landesamt für Immissionsschutz, Hannover [1988] (20 S.)
- Luftstaubmeßgerät. Regelungstechn. Praxis 9 [1967] H. 4, 126
- Meßdaten-Sammelsystem für den zivilen Bevölkerungsschutz. Frequenz 28 [1974] H. 9, 264
- Meßumsetzer MUS 100 und MUS 10; Technische Beschreibung. Akad. d. Wissensch. d. DDR, Zentrum f. wissenschaft. Gerätebau, Bereich Schöne-weide; Berlin: 1985
- Mikrocomputergesteuertes, intelligentes Tastenwahltelefon. Der Elektroniker (Stuttgart) 17 [1978] Nr. 6, 10
- Normalzeit am Handgelenk. Elektronik 39 [1990] H. 5, 36
- Observation and Engineering Branch, Australian Bureau of Meteorology [1997]: Guidance on automatic weather systems and their implementation. Part I: Guidance specification (functional) for a general purpose automatic weather station; Part II: Implementation and user training considerations. WMO Instruments and Observing Methods, Report No. 65, WMO Secret.: 1997 (WMO/TD - No. 862)
- Reports rainfalls. Control Enginrng. 14 [1967] No. 12, 17
- Röntgen-Fluoreszenzanalyse zur Ermittlung der Luftverschmutzung. Regelungstechn. Praxis 20 [1972] H. 8, 371-372
- Selected methods of measuring air pollutants. WHO Offset Publ. No. 24, Geneva: [1976] (112 p.)
- Sensor-minicomputer network tells when lightning will strike. Electron. Design 23 [1975] No. 26, p. 28 & 30
- Überwachungssystem für den Umweltschutz. Nachrichten Elektronik 31 [1977] H. 3, 76
- VDI-Richtlinien, Messung gasförmiger Immissionen, Messung der Schwefeldioxid-Konzentration; VDI 2451 (VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft)
- VDI-Richtlinien, Messung gasförmiger Immissionen, Messung der Stickstoffmonoxid-Konzentration und Messung der Stickstoffdioxid-Konzentration; VDI 2453 (VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft)
- VDI-Richtlinien, Messung gasförmiger Immissionen, Messung der Kohlenmonoxid-Konzentration; VDI 2455 (VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft)
- VDI-Richtlinien, Messung von Partikeln, Messung der Massenkonzentration (Immission), Filterverfahren; VDI 2463 (VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft)
- VDI-Richtlinien, Messung gasförmiger Immissionen, Messung der Ozon- und Peroxid-Konzentration; VDI 2468 (VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft)
- WMO Secretariat [1981]: Abridged final report. WMO, Comm. for Instruments and Methods of Observation, 8th Session Mexico City: 19-30 Oct. 1981, WMO-No. 590; Recommendation 10