



Berichte des Deutschen Wetterdienstes

131

**Ein Ombrometer im Baukastenprinzip zur Erfassung und
digitalen Ausgabe der Niederschlagsdauer und -menge**

von
Walter Attmannspacher
Johann Riedl



Zitationsvorschlag:

Attmannspacher, Walter; Riedl, Johannes: Ein Ombrometer im Baukastenprinzip zur Erfassung und digitalen Ausgabe der Niederschlagsdauer und -menge. - Offenbach am Main: Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, 1973.

(Berichte des Deutschen Wetterdienstes ; 131)

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

Vorwort

Die vorliegende Arbeit stellt den Abschluß einer mehrjährigen Entwicklung am Meteorologischen Observatorium Hohenpeißenberg des Deutschen Wetterdienstes dar, die in ihren Anfängen auf den früheren Leiter des Observatoriums, Dr. J. GRUNOW, zurückgeht.

Das Ombrometer HP wurde für eine genaue Niederschlagsmessung an einem Punkt konzipiert. Diese Meßart ist auch in Zukunft erforderlich, sie wird bei künftigen Flächenniederschlagsmessungen mittels Radar notwendig sein, sie kann und muß die Flächenmessung wesentlich ergänzen.

Ohne die unermüdliche Mitarbeit aller Angehöriger der Gruppen Entwicklung und Betrieb bzw. Radar wäre diese Veröffentlichung nicht möglich gewesen. Die Autoren möchten diesen Mitarbeitern dafür herzlich danken. Ihr Dank gilt nicht zuletzt der Deutschen Forschungsgemeinschaft, die es ermöglicht hat, daß zunächst 4 und später weitere 4 Ombrometer HP der Stufe IIIs gebaut und im Rahmen des hiesigen Regenmeßsondernetzes zusätzlich praktisch erprobt werden konnten.

Hohenpeißenberg, Herbst 1972

W. ATTMANNSPACHER
J. RIEDL

Inhalt

	Seite
Vorwort	2
Zusammenfassung	5
Abstract	5
1. Einleitung und Aufgabenstellung	5
2. Die Meßfühler	6
2.1. Der Niederschlagsdauergeber	6
2.2. Zur Frage der Niederschlagsintensitätsmessung	6
2.3. Der Tropfengeber	7
2.3.1. Allgemeines	7
2.3.2. Versuche mit verschieden geformten Tropfengebern	8
2.4. Die Wippe	10
2.4.1. Allgemeines	10
2.4.2. Versuche mit verschiedenen Wippen	10
2.5. Der komplette Niederschlagsintensitäts-Meßfühler	12
2.5.1. Regenmessung	12
2.5.2. Schneemessung	12
3. Der Verstärker- und Druckerteil	12
4. Das Baukastenprinzip	13
5. Weitere Laborversuche	13
5.1. Tests der Elektronik	13
5.2. Maximal zeitgerecht meßbare Niederschlagsintensität	14
5.3. Messungen mit verschmutztem Regenwasser	14
5.4. Messungen mit Regenwasser bei Temperaturen knapp über dem Gefrierpunkt	14
6. Ergebnisse der bisherigen praktischen Erprobung	15
6.1. Niederschlagsdauergeber	15
6.2. Komplette Ombrometer der verschiedenen Baustufen	15
6.3. Vergleich der Tageswerte des Ombrometers HP Stufe III und dreier Hellmann-Regenmesser	16
6.3.1. Regenmessung	16
6.3.2. Schnee- bzw. Schneewassermessung	18
7. Literatur	19

Anschrift der Verfasser:

Dr. W. Attmannspacher, Dipl.-Ing. J. Riedl

Meteorologisches Observatorium Hohenpeißenberg

Zusammenfassung

Zur Bestimmung der Niederschlagsdauer dient ein eigener Meßfühler, der Beginn und Ende des Niederschlags auf 1 Minute genau gibt.

Die Niederschlagsmenge wird mit 2 Meßfühlern, einem Tropfengeber und einer Wippe bestimmt. Der Tropfengeber weist eine praktisch lineare Eichkurve von 0 bis 1,5 mm Niederschlag pro Minute, die Wippe eine fast lineare Eichkurve von 0 bis 6 mm Niederschlag pro Minute bei einem Auffangtrichter von 200 cm² auf. Mit der Wippe können maximal Niederschläge bis zu 15 mm pro Minute eindeutig erfaßt werden. Bei jedem Kippen wurde eine völlige Entleerung — einschließlich des „letzten Tropfens“ — erreicht. Die Meßgenauigkeit des Tropfengebers liegt bei 0,005 mm, jene der Wippe bei 0,1 mm Niederschlag.

Eine neuartige Flächenheizung des Auffangtrichters ergibt eine zeitgerechte Messung des winterlichen Niederschlags.

Es werden die drei Baustufen des Gerätes erläutert, die es gestatten, den Geräteaufwand den jeweiligen meteorologischen Erfordernissen anzupassen.

Laboruntersuchungen sowie ein ausführlicher praktischer Vergleich des Ombrometers HP mit handelsüblichen Regenmessern zeigen die Möglichkeiten des Gerätes und seine Bewährung in der Praxis bei Messungen zu jeder Jahreszeit auf.

Abstract

The duration of the precipitation is determined by a separate sensor, appointing the start and the end of precipitation with an accuracy of one minute. The amount of precipitation is measured by two sensors, uniform artificial formed drops and a tipping bucket. The calibration curve of the uniform drop former is practically linear between 0 and 1.5 mm precipitation per minute, the tipping bucket calibration curve is nearly linear between 0 and 6 mm precipitation per minute. By aid of the tipping bucket precipitation up to 15 mm per minute can be measured (all data for an orifice of 200 cm²). With each tip an entire run out of the water, including the "last drop" could be reached. The accuracy of measurement in case of the artificial drop is 0.005 mm, in case of the tipping bucket 0.1 mm precipitation.

A new "area heater system" of the gauge enables measurements of winter precipitation in accurate time.

Three different stages of the unit composed system of the ombrometer are described. By aid of them it is possible to choice the best stage due to the meteorological necessities.

Laboratory tests as well as detailed comparisons with common rain gauges show the possibilities of the ombrometer HP, and its verification in practice during different seasons.

1. Einleitung und Aufgabenstellung

Die älteste meteorologische Messung dürfte die Niederschlagsmessung sein, sie wird rund 400 Jahre vor Christus von KAUTILYA (1) im „Arthasastra“ erwähnt. Bis zum ersten registrierenden Regenmesser vergingen fast 2 Jahrtausende; 1662 n. Chr. baute CH. WREN (siehe in (2)) einen mit Uhrwerk betriebenen Regenmesser, bei dem der Niederschlag einer Stunde in kleinen Kästchen aufgefangen wurde. Große Verbreitung weisen heute registrierende Regenmesser nach dem Wippenprinzip auf. Die ersten Geräte dieser Art wurden 1829 von CROSSLEY (siehe in (3)) und unabhängig davon 1830 von HORNER (4) entwickelt. Die Möglichkeit, den Niederschlag zu wiegen, benutzte erstmals 1837 OSLER (5). HELLMANN (6) baute 1885 den Prototyp des heute noch bei uns meist verwendeten Regenmessers mit 200 cm² Auffangfläche; von ihm fließt der Regen in einen Blechbehälter, seine Menge wird dann in festen Zeitabständen mit Hilfe eines Meßglases bestimmt. 1897 entwickelte HELLMANN (7) schließlich einen registrierenden Regenmesser nach dem Schwimmerprinzip. Bereits vorher, 1887, veröffentlichte GALLENKAMP (8) einen registrierenden Regenmesser, in dem künstliche Tropfen hinter dem Auffanggefäß erzeugt und elektrisch gezählt wurden. Ein ausführlicher historischer Rückblick auf die verschiedenen Methoden und Geräte zur Messung des Niederschlags soll hier nicht gegeben werden. Es sei

dazu auf die sehr sorgfältig zusammengestellte Studie von J. C. KURTYKA (3) hingewiesen.

Im Deutschen Wetterdienst werden heute noch meistens Regenmesser und Registriergeräte nach HELLMANN verwendet. Mit ihrer Hilfe sind Niederschlagsmessungen an einem bestimmten Ort bis zu einer Zeitauflösung von ca. 10 Minuten noch sinnvoll. Aussagen über wahre Intensitäten und Häufigkeiten von Niederschlägen unterhalb 10 Minuten können damit nicht mehr gemacht werden. Gerade derartige Angaben werden für die Bau- und Wasserwirtschaft immer wichtiger. Aus diesen berechtigten Wünschen der Abnehmer ergeben sich folgende Forderungen an einen modernen Regenmesser:

- (a) Messung aller vorkommenden Niederschläge bis herab zur realistischen Messung für das Zeitintervall von einer Minute.
- (b) Möglichst lineare Eichkurven, da gleichmäßiger Regen sehr selten auftritt (Abb. 1). Bei gekrümmten Eichkurven geht die zu messende Regenintensität selbst in die Eichkurve ein; d. h. eine genaue Niederschlagsmessung wird damit unmöglich.
- (c) Digitaler Ausdruck des Beginns und des Endes eines Niederschlags und der Niederschlagsmenge je gewünschter Zeiteinheit. Möglichkeit der computergerechten Ausgabe oder einer drahtlosen Übertragung der Meßwerte

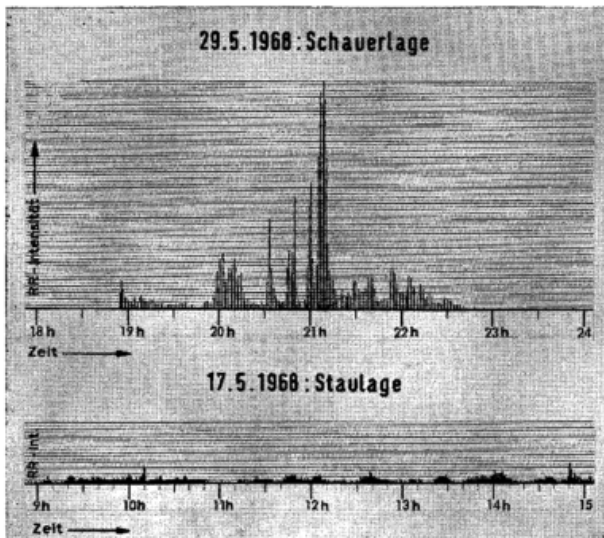


Abb. 1

1-Minuten-Intensitäten einer Schauer- und einer Staulage

(d) Auch im Winter möglichst zeit- und mengenmäßig richtige Meßwerte.

Aus dem praktischen Einsatz derartiger Meßgeräte resultieren zwei weitere Forderungen:

- (e) Robuster, im praktischen Dienst verwendbarer Aufbau.
- (f) Möglichkeit der rationellen Erweiterung und Verfeinerung der Meßanlage, d. h. Aufbau im Baukastenprinzip.

2. Die Meßfühler

2.1. Der Niederschlagsdauergeber (Abb. 2)

Die Forderung einer möglichst genauen Angabe des Beginns und des Endes eines Niederschlags bedingt einen eigenen Meßfühler, da beim normalen Regenmesser bzw. -schreiber erst nach Benetzung der Auffangfläche der erste Tropfen Niederschlagswasser in das Auffang- bzw. Schwimmergefäß gelangt. Die wahre Zeit des Niederschlagsbeginns kann dementsprechend damit nur annähernd festgelegt werden.

Ein geeigneter Meßfühler für die Niederschlagsdauer wurde im Prinzip bereits von GRUNOW (9) am Observatorium Hohenpeißenberg entwickelt. Er wurde aufgrund

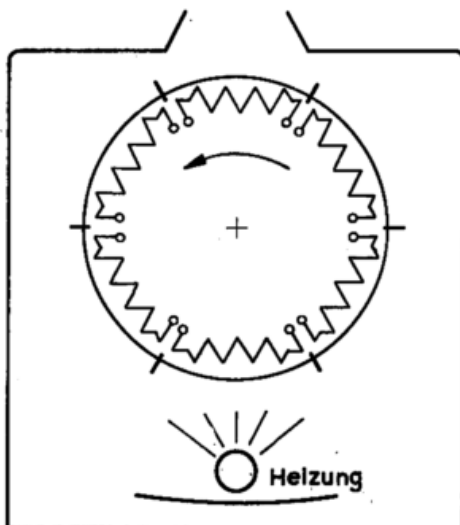


Abb. 2

Niederschlagsdauergeber HP (schematisch)

jahrelanger praktischer Erfahrungen etwas abgeändert und damit seine Zuverlässigkeit noch weiter erhöht.

Die technische Realisierung dieses Meßfühlers ergibt sich aus der Widerstandsänderung in einem Stromkreis durch Niederschlag. Zwei galvanisch getrennte, auf einem Isoliermaterial aufgezogene Wicklungen rostfreier Stahldrähte werden unter einer Testfläche von 3×15 cm dem Niederschlag ausgesetzt. Die Erniedrigung des Übergangswiderstands zwischen den beiden parallel liegenden Wicklungen durch einen oder mehrere Niesel- oder Regentropfen bzw. durch eine oder mehrere Schneeflocken wird elektrisch erkannt und über einen kleinen Transistorverstärker zur Ansteuerung eines Relais benutzt. Die Wicklungen werden 30 Sekunden exponiert; nach dieser Zeit kommen 2 weitere, trockene Wicklungen unter die Öffnung des Gerätedeckels; d. h. alle 30 Sekunden wird die Frage „Niederschlag oder nicht“ erneut gestellt.

Sechs derartige Wicklungssegmente sind auf einem zylindrischen Träger aufgebracht, so daß jedes Segment nach 3 Minuten wieder exponiert wird. In der Zwischenzeit werden die Wicklungen und deren Trägersegment von einer thermostatgesteuerten Heizung abgetrocknet. Schließt man an den Relaiskontakt dieses Fühlers z. B. einen Chronographen an, erhält man bereits einen betriebsfähigen Niederschlagsdauergeber.

2.2. Zur Frage der Niederschlagsintensitätsmessung

Bei der geforderten Zeitauflösung lassen sich die geringen Niederschlagsmengen bei Nieselregen und sehr schwachem Regen ausreichend genau durch die Erzeugung künstlicher, gleichgroßer Tropfen aus Niederschlagswasser im Regenmesser bestimmen. Die Methode versagt, wenn die hintereinander folgenden Tropfen ineinander übergehen; dies ist bei einem gleichmäßigen Wasserdurchfluß von etwa 30 ml/min der Fall. Bei einer Auffangfläche von 200 cm² entspricht dies einer Niederschlagsintensität von ca. 1,5 mm/min. Wie aus Tab. 2 ersichtlich, werden damit mehr als 99 % des hier vorkommenden Niederschlags erfaßt, sofern man mögliche starke Intensitätsschwankungen innerhalb einer Minute vernachlässigt. Die zugrunde liegende Meßperiode reicht nicht aus, um genaue Grenzwerte auszugeben, es kann aber eindeutig festgestellt werden, daß gerade die hydrologisch äußerst wichtigen Starkregenfälle nicht damit meßbar sind. Für diese starken Niederschläge muß dementsprechend ein zweiter Meßfühler vorhanden sein, der aus praktischen Erwägungen so gestaltet sein soll, daß er auch allein alle vorkommenden Niederschläge mit einer für praktische Belange voll ausreichenden Genauigkeit erfassen kann; diese Aufgabe übernimmt eine Wippe.

Die Entwicklung der am besten geeigneten Form der beiden Meßfühler erfordert langwierige genaue Laborversuche mit Probegeräten. Dabei ist es sehr wesentlich, möglichst naturnah jede gewünschte Niederschlagswassermenge pro Zeiteinheit gleichmäßig in den Auffangtrichter des Testgerätes zu bringen, da z. B. an einem Punkt eingebrachte Wassermengen Schwingungsvorgänge am Tropfengeber auslösen und damit die Tropfengröße selbst verändern können.

In Abb. 3 ist schematisch der Laborregner dargestellt. In einem Niederschlagstotalisatorgefäß wird mit Hilfe eines Zufluß- und Überlaufgefäßes die Füllmenge unabhängig vom Abfluß konstant gehalten. So ist gewährleistet, daß bei konstantem Staudruck am Feinregelhahn für jede gewünschte Einstellung die Durchflußmenge pro Zeiteinheit praktisch gleich ist. Der mit einem kleinen Elektromotor angetriebene Regenwasserverteiler sorgt für eine weitgehend gleichmäßige Benetzung des Meßtrichters. Letzterer wurde mit einem Deckel verschlossen um zu verhindern, daß durch Verdunstung

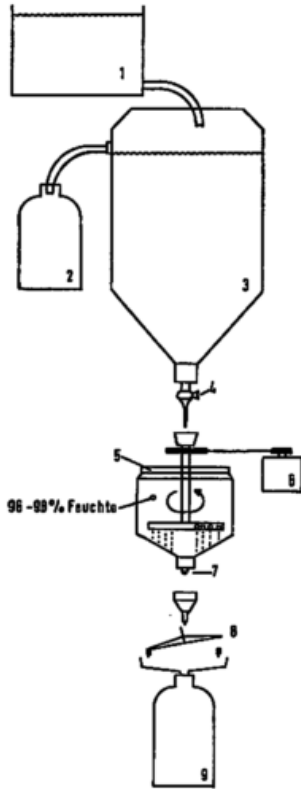


Abb. 3

Laboraufbau zur Eichung der Meßfühler

- | | |
|------------------------|----------------|
| 1 Zufluß-Gefäß | 5 Abdeckung |
| 2 Überlauf-Gefäß | 6 El. Motor |
| 3 Regenwasser-Behälter | 7 Tropfengeber |
| 4 Feinregelhahn | 8 Wippe |
| 9 Auffang-Gefäß | |

Meßfehler entstehen können. Versuche ergaben, daß mit dieser Testeinrichtung bei gut benetztem Trichter alles pro Minute in den Verteiler fließende Wasser unter dem Tropfengeber wieder herauskam. Für die Eichung der Tropfengeber bzw. der Wippen wurde für die jeweils eingestellte Niederschlagsintensität die genaue, möglichst um 1 Minute liegende Tropfen- bzw. Wippenzahl (nach einem gerade gezählten Tropfen bzw. einer gezählten Wippe) bestimmt und daraus die Tropfen- bzw. Wippenzahl für eine Minute berechnet. Die dazugehörige Niederschlagsintensität wurde unter dem Tropfer (zur Kontrolle zwischendurch auch vor dem Verteiler – siehe oben –) in flachen Schalen mit genau bekanntem Trokengewicht in der vor bzw. nach der „Meßminute“ liegenden Minute aufgefangen und mit einer genauen Waage auf 10^{-3} gr ausgewogen. Unter der Voraussetzung, daß das Gewicht der Durchflußmengen in der 1. und 3. Minute um weniger als 0,5 gr differiert, wurde der gemittelte Wert, genau auf 1 Minute bezogen und der jeweiligen Tropfen- bzw. Wippenzahl pro Minute zugeordnet.

2.3. Der Tropfengeber

2.3.1. Allgemeines

Der physikalische Vorgang der Ablösung eines Wassertropfens von einem Rohr und die Abhängigkeit des Tropfengewichts von der Tropfenzahl pro Zeiteinheit wurden bereits Ende des vorigen Jahrhunderts u. a. von LENARD (10) untersucht.

Das Tropfenprinzip wurde, wie oben erwähnt, bereits 1887 von GALLENKAMP (8) zur Konstruktion eines Regenmessers benutzt. Eine theoretische Untersuchung der Tropfenablösung von einem Glasrohr gab schließlich J. RÖSSLER (11).

Ganz allgemein wirken auf einen entstehenden Tropfen an einem Tropfengeber folgende Kräfte:

- (a) Druckkräfte im Zuflußrohr
- (b) Molekularkräfte zwischen der Tropfengeberwandung und dem Niederschlagswasser; d. h. Adhäsionskräfte sowie Kohäsionskräfte des Niederschlagswassers
- (c) Die Oberflächenspannung des Niederschlagswassers
- (d) Die Schwerkraft
- (e) Ggf. Kapillarkräfte.

Benutzt man ein einfaches Rohr, dessen Innendurchmesser zur Gewinnung eines brauchbaren künstlichen Tropfens nur wenige mm sein darf, so dominieren die unter (a) und (c) genannten Kräfte. Der sich bildende Tropfen wächst durch die Wasserzufuhr, bis sein Gewicht die Kraft der Oberflächenspannung überkompensiert. Der Tropfen schnürt sich ein, bekommt aber je nach Größe der Druckkraft im Rohr noch Wasser zugeführt, bis er abreißt. D. h. die Tropfengröße hängt von der Wasserzufuhr und damit von der Intensität des Niederschlags selbst ab. Aus dieser Überlegung ergeben sich zwei Grundforderungen, wenn man im Rahmen der Meßmöglichkeit (bis zum Übergang vom Tropfen zum Fließen) immer gleiche Tropfen erzeugen will:

- (aa) Im Zuflußrohr dürfen keine Staudrucke auftreten; der Zufluß selbst soll möglichst gleichmäßig sein.
- (bb) Der Tropfenabreiß muß schlagartig erfolgen, um ein Nachfließen praktisch zu verhindern; d. h. der Abreiß darf nicht wesentlich von der Oberflächenspannung abhängen. Dafür bieten sich die unter (b) genannten Kräfte an; ist deren Grenzwert erreicht, erfolgt ein abruptes Abreißen.

Adhäsion, Kohäsion und Oberflächenspannung sind temperaturabhängige Molekularkräfte elektrischen Ursprungs. Für den in Frage kommenden Temperaturbereich von etwa $1-20^{\circ}\text{C}$ ist z. B. die Oberflächenspannung bei 20°C um 4 % geringer als bei 1°C . (12). Wesentlich stärker reagiert sie bei Verschmutzung des Wassers. Bereits eine geringe Verunreinigung bewirkt eine merkliche Verringerung der Oberflächenspannung. Daraus ergibt sich, daß Tropfengeber, bei denen diese Molekularkraft die Ablösung des Tropfens, wie oben beschrieben, bestimmt, in ihrer Tropfengröße stark vom Verschmutzungsgrad des Niederschlags abhängen. Aufgrund einer einfachen Überlegung kann bei der Adhäsions- und Kohäsionskraft angenommen werden, daß sie weit weniger vom Grad der Verschmutzung abhängen, da die zwischen Wassertropfen und Tropfengeberwandung bzw. zwischen den Wassermolekülen wirkenden Molekularkräfte durch eingebettete Fremdmoleküle weniger gestört werden, als die Oberflächenmoleküle des von Luft umgebenen Wassertropfens.

In Wirklichkeit sind die Kräfteverhältnisse zwischen Tropfengeber und Regenwasser sicher viel komplizierter, da der Anteil der Adhäsion bzw. Kohäsion quantitativ schwer festgelegt werden kann. Eine wirklichkeitsnahe rechnerische Erfassung der Kräfteverhältnisse bei der Tropfenbildung ist aus den genannten Gründen kaum möglich. Es soll deshalb anhand eines einfachen Versuchs festgestellt werden, ob die angestellten Überlegungen in Bezug auf das Verhalten beider Kräfte praktisch zutreffen und ihr Zusammenspiel im Falle des Tropfenmaterials praktisch immer gleich bleibt. Für die folgenden Wasserproben, destilliertes Wasser, Regenwasser vom Hohenpeißenberg, Regenwasser von Essen, Leitungswasser vom Hohenpeißenberg und entspanntes Leitungswasser wurde zunächst nach der klassischen Kapillarröhrenmethode (13) die Oberflächenspannung bestimmt, wobei als Einheit die Millimeteerteilung eines Kapillarrohres mit 2,3 mm Innendurchmesser benutzt wurde. Anschließend folgte die Bestimmung der Adhäsions- bzw. Kohäsionskräfte derselben Wasserproben mit einer sogenannten hydrostatischen Waage (14). Der

Berührungstempel war aus demselben Edelstahl, aus dem die Tropfengeber hergestellt wurden. Für die Messung der Adhäsions- und Kohäsionskräfte stand eine Zeigerwaage mit einer Dezigrammeinteilung zur Verfügung. Die Relativergebnisse in Bezug auf das Verhalten des Regenwassers Hohenpeißenberg sind für beide Versuche in Tab. 1 angegeben.

Tab. 1

Relativwerte der Oberflächenspannung und der Adhäsions-Kohäsionskraft bei verschiedenen Wasserproben aufgrund einfacher Laborversuche

Wasserprobe	Oberflächenspannung (‰)	Adhäsions/Kohäsionskraft (‰)
Destilliert	162	99
Regen HP	100	100
Regen Essen	81	98
Leitung HP	76	96
Leitung HP, entspannt	57	59

In der zweiten Spalte liegen die fast gleichen Meßergebnisse der ersten drei Wasserproben sicher innerhalb der Meßgenauigkeit. D. h. diese Kräfte sind im Rahmen der Versuchsbedingungen praktisch unabhängig von der Verschmutzung des Regenwassers, während in der ersten Spalte die Oberflächenspannung beim Regenwasser Essen um 19 ‰ niedrigere Werte aufweist als beim Regenwasser vom Hohenpeißenberg.

2.3.2. Versuche mit verschieden geformten Tropfengebern

Aus den Überlegungen des letzten Abschnitts ergibt sich bereits die Grundform des Tropfengebers, die in Abb. 4, Typ A, dargestellt ist. Sie ist generell so gestaltet, daß bis zu 15 mm Niederschlag (30 ml) pro Minute keine Stauung vor dem Tropfengeber auftritt. Es wurde weiter versucht, den Geber so auszulegen, daß die

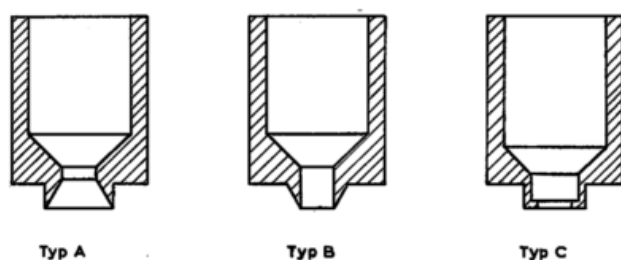


Abb. 4 Die Tropfengebergrundtypen

Tropfenablösung dominierend von den Adhäsions- und Kohäsionskräften bestimmt wird. Dabei war es klar, daß die optimale geometrische Form des Tropfengebers nur durch eingehende Laborversuche gefunden werden konnte. Zum Vergleich wurden noch andere Geberformen angefertigt (z. B. Abb. 4, Typ B und C), bei denen die Oberflächenspannung die Tropfenablösung stark beeinflusst.

Forderung (e) in Abschnitt 1 bedingt, daß der Tropfengeber aus einem Material hergestellt wird, das von möglichen chemischen Beimengungen im Niederschlagswasser nicht verändert wird und das bei der mechanischen Reinigung des Gerätes mit normalen Mitteln seine Konfiguration nicht ändert. Beide Bedingungen werden

von nicht rostendem Chrom-Nickel-Stahl erfüllt. Er wurde dementsprechend zur Herstellung der Tropfengebermodelle benutzt; zur Wartung des Gerätes erschien es außerdem zweckmäßig, den Tropfengeber von außen austauschbar zu machen.

Zur Zählung des Tropfens wurden früher meist, z. B. in (8), (9), (11), zwei Metallelektroden so im Fallweg des Tropfens angebracht, daß durch letzteren eine mehr oder weniger gut leitende Verbindung zwischen den in einem Stromkreis befindlichen Elektroden entstand. In Gegenden mit reinem Regenwasser (Leitfähigkeit $\leq 0,5 \cdot 10^{-6}$ Siemens/cm) bedeutete dies die Notwendigkeit einer elektronischen Verstärkung des Meßstroms zur Auslösung eines Relaiskontakts. Es war nun kein wesentlicher Mehraufwand, die Tropfen gleich mit einer optoelektronischen Meßstrecke zu zählen und so wirklich bis zum Fließen eindeutige Zählwerte zu erhalten. Auf diese Weise kann der Tropfengeber ggf. bis an die Grenze dieses Meßprinzips eingesetzt werden.

Abb. 5 gibt u. a. die Eichkurve des Tropfengebers 1 vom Typ A wieder, bis 8 gr/min (0,4 mm Niederschlag pro Minute bei 200 cm² Auffangfläche) ist sie weitgehend linear, darüber streuen die Werte stark und die Tropfen

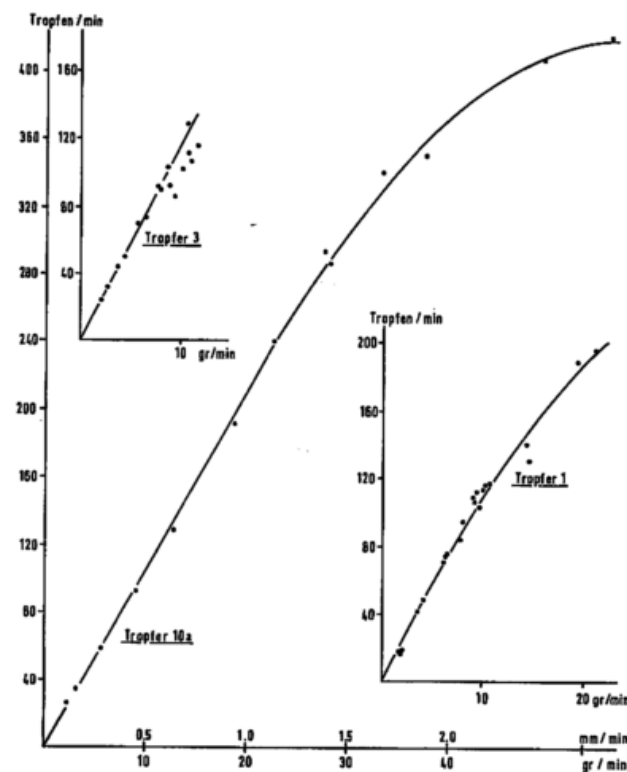


Abb. 5 Eichkurven der Tropfengeber 1, 3 und 10a

werden mit zunehmender Niederschlagsintensität größer. Die Eichkurve des Tropfengebers 2, Typ B, wurde nicht wiedergegeben, da die Werte von Anfang an zu stark streuten.

Die Ergebnisse der Eichung des Tropfengebers 3, Typ C, sind in Abb. 5 enthalten. Auch bei diesem Typ ist die Streuung zu groß, bei 9 gr/min beträgt sie bereits rund $\pm 10\%$ des Meßwertes.

Die Typen B und C schieden damit, wie erwartet, für weitere Laborversuche aus. Systematische Änderungen der Konfiguration des Types A ergaben bei Tropfengeber 10a schließlich die in Abb. 5 groß dargestellte Eichkurve. Sie ist zwischen 0 und 34 gr/min ($\pm 0 - 1,7$ mm/min) praktisch linear, nur der Meßwert 128 Tropfen/min weist einen Meßfehler von 4 Tropfen auf ($= 3\% = 0,02$ mm Niederschlag), der zumindest teilweise durch

nicht ganz vermeidbare Eichungenauigkeiten wie Fehler der Zeitmessung, unvermeidbare Verdunstungsverluste bis zum Wiegen der Niederschlagsmenge usw. entstanden sein kann. Ab 290 Tropfen/min ist die Tropfenfolge so dicht, daß eine Trennung der einzelnen Tropfen nicht immer möglich ist, d. h. es können nicht mehr alle Tropfen optoelektronisch einzeln erkannt werden; ab 415 Tropfen pro Minute tritt dann kontinuierliches Fließen ein.

Mit dem Tropfengeber sind dementsprechend Niederschlagsintensitäten bis zu 2 mm/min (das sind 120 mm/std), dies entspricht sehr starken Regengüssen, zumindest im Laborversuch meßbar.

Die Frage wieviele Niederschläge damit theoretisch in der Natur erfaßt werden können, soll Tab. 2 mit beant-

worten. In ihr sind Minutenzählungen der genormten Tropfen während der Monate April mit Oktober 1971 und die 5-Minutenzählungen der Wippenfüllungen während der Monate Mai mit Oktober 1968 und 1969, umgerechnet in Regenintensitäten und in prozentualen Häufigkeiten bzw. Summen der prozentualen Häufigkeiten wiedergegeben.

Es zeigt sich, daß trotz unterschiedlicher Meßart und Meßperiode beide Meßarten praktisch die gleichen prozentualen Häufigkeiten liefern. Demnach weisen 94 % der Regenfälle Intensitäten von weniger als 0,1 mm/min auf, 99 % der Regenfälle zeigen maximal eine Intensität von 0,2 mm/min. In den 3 vorliegenden Jahren war kein Regen stärker als 2 mm/min. Daraus könnte man zunächst schließen, daß in den meisten Fällen eine Regennmessung mit dem Tropfengeber allein ausreicht.

Tab. 2

Prozentuale Häufigkeiten von Regenintensitäten aufgrund von Zählung genormter Tropfen pro Minute (Sommer 1971) bzw. Wippenfüllungen pro 5 Minuten (Sommer 1968 und 1969) am Meteorologischen Observatorium Hohenpeißenberg

Zahl der Tropfen	Tropfen 1971, Sommer			Wippe 1968/69, Sommer		mm/std (Rechengröße)
	%	∑ %	RR mm/min	RR/5 min	∑ %	
1	32	32	0,005			0,3
2	15	47	0,01	0,05		0,6
3	10	57				
4	7	64	0,02	0,1	67	
5	5	69				
6	4	73	0,03			
7	4	77				
8	3	80	0,04	0,2	78	
9	2	82				
10	2	84	0,05	0,25	85	3
15	1	92				
20	0,5	95	0,1	0,5	95	6
30	0,2	97				
40	0,1	98	0,2	1,0	98	12
50	0,05	98,97				
60	0,01	99,20	0,3	1,5	99,28	18
70	0,02	99,38				
80	0,01	99,50	0,4	2,0	99,60	24
90	0,01	99,57				
100	0,01	99,66	0,5	2,5	99,73	30
150						
200			1,0	5,0		60
250						
300			1,5	7,5		90
350						
400	0,004	100 %	2,0	8,4	100 %	100,8

Betrachtet man alle Fälle mit Regenintensitäten ≥ 1 mm/min, so beträgt deren Häufigkeit in den Sommerhalbjahren 1968, 1969 0,09 %, im Sommerhalbjahr 1971 0,07 %; ihr Anteil an der gesamten Niederschlagsmenge beträgt aber 8,4 % bzw. 4,7 %. Diese starken, für die Wasserwirtschaft besonders wichtigen Regenfälle müssen möglichst genau erfaßt werden. Aus der Praxis und der Literatur ist bekannt, daß noch weit stärkere, oft zu Katastrophen führende Niederschläge mit weit mehr als 2 mm/min auftreten, die ebenfalls von einer

digitalen Niederschlagsmeßanlage erfaßt werden müssen. Letzteres ist mit einem künstlich geformten Tropfen unmöglich. Die Erfassung von Niederschlägen bis zu 2,4 mm/min scheint zunächst mit dieser Meßmethode aufgrund der in Abbildung 5 wiedergegebenen Eichung möglich. Dazu muß aber festgestellt werden, daß die Eichkurve nur bis 1,5 mm/min linear verläuft, d. h. darüber hinaus gehende Niederschläge werden lediglich dann richtig erfaßt, wenn ihre Intensität während der jeweiligen Meßzeit konstant bleibt, da die Tropfengröße

oberhalb dieses Grenzwertes von der Intensität selbst abhängt. Diese Gleichmäßigkeit ist, wie bereits aus Abb. 1 ersichtlich ist, häufig auch bei einem Zeitintervall von einer Minute nicht mehr erfüllt. Es kommt ein weiterer Punkt hinzu, der bei der praktischen Messung von großer Bedeutung ist. Bei der Eichung im Labor muß zwangsläufig darauf geachtet werden, daß die jeweils zugeführte Wassermenge zeitunabhängig ist und gleichmäßig verteilt wird. In der Natur ist die Tropfenverteilung auf den Auffangtrichter und die Intensität selbst sicher nicht immer gleichmäßig, so daß ab einer bestimmten Regenintensität damit gerechnet werden muß, daß kurzzeitig so viel Regenwasser zum Tropfengeber abfließt, daß er diese Menge nicht mehr in einzelne Tropfen auflösen kann und dementsprechend für diesen Moment das Regenwasser durchfließt. Am Ende derartiger Meßminuten zeigt dann diese Art der Niederschlagsbestimmung systematisch zu geringe Meßwerte auf, die jedoch nicht eindeutig korrigiert werden können. Das heißt, für eine digitale Niederschlagsmeßanlage muß zur Erfassung größerer Niederschläge noch ein zweiter Meßfühler vorhanden sein.

2.4. Die Wippe

2.4.1. Allgemeines

Dieses Meßprinzip wurde, wie in Abschnitt 1 bereits erwähnt, vor fast eineinhalb Jahrhunderten von 2 Autoren veröffentlicht. Die Arbeit von SPRUNG und FUSS (15) machte die HORNERSCHE Wippe weiter bekannt. Es erschienen Ende des 19. Jahrhunderts noch mehrere Arbeiten über registrierende Regenmesser nach dem gleichen Prinzip, das heute verbreitet praktisch Verwendung findet, so z. B. als ein Standardgerät des US-Wetterdienstes (3). In letzter Zeit befaßten sich J. JOSS und E. TOGNINI (16) erneut ausführlich mit der Konstruktion einer Wippe zur Messung des Niederschlags, für die sie auch eine theoretische Ableitung brachten.

Die Funktion einer bistabilen Meßwippe hat bereits HORNER 1830 (4) klar beschrieben:

„Aus der Röhre eines Trichters . . . fließt das Regenwasser in eine Art Schiffchen . . . , das eine feste Scheidewand hat, und zwischen zwei Spitzen so beweglich ist, daß es eine bedeutende Oberlast hat. Vermöge der Letzteren steht es nie horizontal, sondern fällt nach der einen oder anderen Seite über, so daß immer eine der Abtheilungen senkrecht unter die Öffnung des Trichters zu stehen kömmt . . . sobald die jetzt oben stehende Abtheilung des Schiffchens sich soweit mit Wasser gefüllt hat, daß sie das Gewicht der anderen, leeren Hälfte . . . zu überwinden vermag, schlägt das Schiffchen um und erhebt dadurch die andere Abtheilung, die nun gleichfalls sich füllt . . . “

Aus dieser Schilderung des Meßablaufs ergeben sich bereits für eine möglichst genaue Messung einige Grundforderungen:

- (a) Der Wippvorgang soll schnell vor sich gehen, damit während desselben in die gerade kippende Wippenhälfte möglichst wenig Regenwasser gelangt, das von der Messung nicht erfaßt wird.
- (b) Die Regenwasserzufuhr darf keine, den Kippvorgang variierende kinetische Energie aufweisen.

Aus praktischen Erwägungen ergibt sich eine weitere Forderung:

- (c) Die, den Kippvorgang auslösende Wassermenge soll bei beiden Wippenhälften immer gleich sein.

Entscheidend für die Bistabilität einer Wippe ist die Lage des Schwerpunkts der vollen Wippenschale zum Drehpunkt im Verhältnis zur Lage des Schwerpunkts der leeren Schale. Damit wird durch das Drehmoment und die (Anfangs-)Beschleunigung der Kippvorgang bestimmt. Aufgrund der Oberflächeneffekte bleibt nach

dem Ausleeren einer Wippenhälfte normalerweise ein „letzter Tropfen“ in der Schale, der nur dann meßtechnisch vernachlässigt werden könnte, wenn er immer gleich groß und immer an der gleichen Stelle vorhanden wäre.

Um Grundforderung (a) zu erfüllen, wurde eine Schneidenlagerung der Wippe in Teflon gewählt, die neben der sehr geringen Reibung leichte Wartungsmöglichkeiten bietet. Um Verzögerungen durch elektromechanische Kontaktgebung bei der Zählung der Wippenhälften zu vermeiden, wurde die gleiche optoelektronische Zählmethode wie bei der Tropfenzählung vorgesehen. Außerdem wurde ein Versuchsmodell so gestaltet, daß mit beginnendem Kippvorgang das abfließende Wasser durch den etwas nach außen wandernden Schwerpunkt den Drehvorgang noch beschleunigt.

Forderung (b) bedingt bei der Messung mit Tropfengeber und Wippe eine Umwandlung des künstlich geformten Tropfens in kleine Tröpfchen bzw. in ein dünnes Rinnsal. Dies besorgt ein „Tropfenzerstörer“ knapp oberhalb der Wippe.

Forderung (c) kann durch eine Taxierstange an der Wippe und durch verstellbare Widerlager erfüllt werden.

2.4.2. Versuche mit verschiedenen Wippen

Umfangreiche Laborversuche wurden unternommen, um die geeignetste geometrische Form der Wippe zu finden, die alle, aus den physikalischen Überlegungen sich ergebenden Forderungen am besten erfüllt. Die in Abb. 6 skizzierten Wippentypen stellen Variationen von 2 Grundformen dar, bei denen angenommen werden kann,

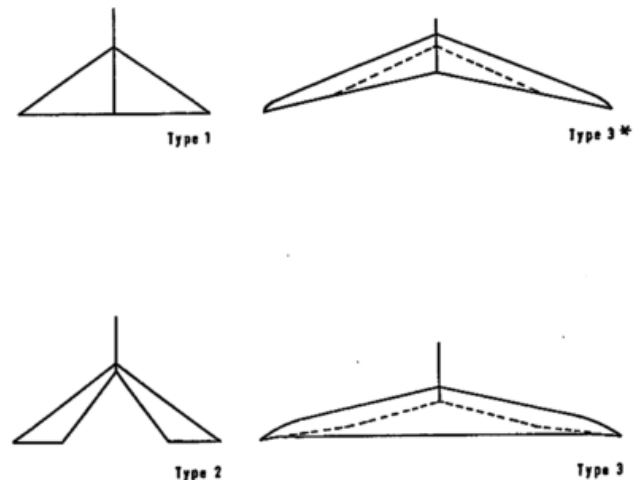


Abb. 6
Wippgrundformen

daß sie diesen Forderungen zum großen Teil entsprechen. Typ 1 ist ein Nachbau der von J. JOSS und E. TOGNINI angegebenen Wippe, bei Typ 2 wurde lediglich der Schwerpunkt der Wippenschale weiter nach außen gelegt. Typ 3* ist eine Abwandlung einer seit vielen Jahren am hiesigen Observatorium vorhandenen Version der HORNERSCHEN Wippe; Typ 3 ist schließlich eine mechanisch stabilere Form des Typs 3*.

Aus arbeitstechnischen Gründen wurden die Wippentypen zunächst aus Neusilberblech hergestellt; die fertigen Wippen erhielten einen wetterbeständigen Schutzanstrich aus mattglänzendem schwarzem Lack. Die ersten Versuche zeigten bereits, daß dieser Schutzanstrich eine gleichmäßige Benetzung der Wippenschale zum Teil in Frage stellte, er wurde deshalb wieder entfernt.

Im vorigen Abschnitt wurde bereits darauf hingewiesen, daß bei größeren Regenintensitäten während des Kippvorgangs etwas Regenwasser in die kippende Wip-

pe fließt und so die auslösende Regenwassermenge scheinbar zunimmt. Die Messung des Niederschlags wird dementsprechend umso genauer, je kleiner diese scheinbare Zunahme der auslösenden Wippenschalenfüllung ist. Die Eichung der 4 lackfreien Wippentypen zeigte sehr unterschiedliche Ergebnisse, es wiesen jedoch alle Wippenformen zu große derartige scheinbare Zunahmen (12–24 % bei 20 Wippenkontakten pro Minute) auf.

Nach diesem Vorversuch wurden die Wippentypen 1 und 3 in etwas abgeänderter Form aus Nirosta-Stahlblech gefertigt, um Oberflächenbenetzungsprobleme möglichst zu vermeiden und zudem wartungsfreundliche Wippen zu erhalten. Dazu mußte für Wippentyp 3 eine eigene Preßform hergestellt werden, um die erforderlichen Maße genau einhalten zu können.

Der mechanische Aufbau des Typs 2 war für einen praktischen Einsatz nicht stabil genug. Ein Versuch, diesen Nachteil durch eine Versteifung zu beheben, mußte mit einem schlechteren Kippmoment bezahlt werden. Die Versuche mit diesem Typ wurden deshalb eingestellt, ebenso jene mit dem mechanisch wenig stabilen Typ 3*.

Abb. 7 gibt die Füllmengen einer Wippenhälfte als Funktion der Wippenkontakte pro Minute wieder. In ihr stellen die Kurven 1c bzw. 3c die Meßergebnisse etwas

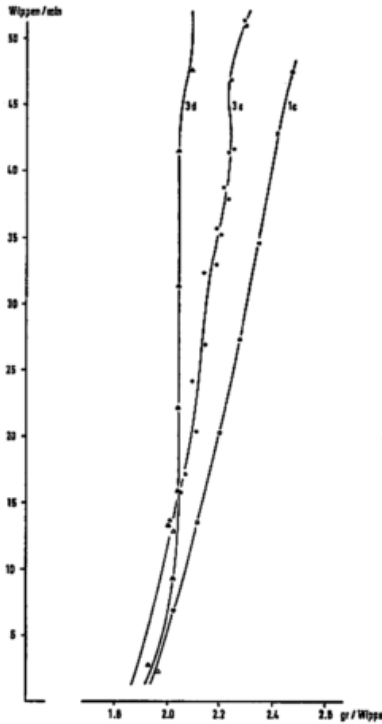


Abb. 7
Wippenfüllungen als Funktion der Wippenzahl pro Minute

größerer Wippen aus Nirostablech des Typs 1 bzw. 3 dar. Der Kurve 3d liegen die Eichwerte eines geometrisch etwas abgeänderten Modells 3 zugrunde.

Am besten schneidet der Wippentyp 3d ab, bei dem die Füllmengen bei 20 (40) Wippenkontakten/min nur um 6,9 (7,4) % größer sind als bei einem Wippenkontakt/min. Aufgrund dieser Ergebnisse wurden die weiteren Versuche auf den Wippentyp 3d beschränkt. Zunächst erschien es wichtig, das Problem des „letzten Tropfens“ zu lösen, am besten so, daß er beim Kippen mit ausgeleert wird. Ein zusätzlicher mechanischer Aufwand, wie er von DOHERTY und ROCHELEAU (17) beschrieben wurde, erschien für die vorliegende Entwicklung als nicht vertretbar. Es wurde deshalb versucht, durch entsprechende

Tab. 3

Füllmengen verschiedener Wippentypen aus Nirostablech bei 20 bzw. 40 Wippenkontakten pro Minute

Wippen- typ	Zahl der Wippenfüllmenge [gr] bzw. Wippenkontakte/min						
	1	20	Δ_{20-1}	%	40	Δ_{40-1}	%
1c	1,94	2,19	0,25	12,9	2,39	0,45	23,2
3c	1,86	2,09	0,23	12,4	2,23	0,37	19,9
3d	1,90	2,03	0,13	6,9	2,04	0,14	7,4

Auswahl der Materialien und der geometrischen Formgebung der Wippe den „letzten Tropfen“ durch Ausnutzung einfacher physikalischer Gesetze möglichst rasch herauszubringen, so daß beim erneuten Bereitstellen der Wippenschale alles Regenwasser entleert ist. Beim Wippentyp 3d war dies bereits zum Teil gelungen. Weitere Verbesserungen an diesem Wippentyp, an der Lagerung der Wippe und deren Fixierpunkten sowie an der Zufuhr des Wassers von Tropfenzerstörer zur Wippe führten schließlich nach vielen Laborversuchen zum

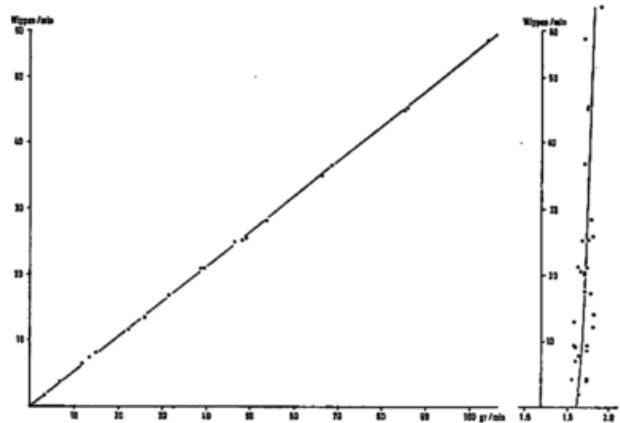


Abb. 8
Eich- und Füllmengenkurve der endgültigen Wippenform

endgültigen Wippenmeßfühler, dessen Eich- und Füllmengenkurven in Abb. 8 enthalten sind. Zur leichteren Beurteilung sind in Tab. 4 wieder die Abweichungen der Füllmengen für 20 bzw. 40 Füllungen pro Minute zusammengestellt.

Tab. 4

Füllmengen des endgültigen Wippenmeßfühlers bei 20 bzw. 40 Wippenkontakten pro Minute

1	Zahl der Wippenkontakte/min bzw. Wippen- füllmenge [gr]								
	20		40		60				
	Δ_{20-1}	%	Δ_{40-1}	%	Δ_{60-1}	%			
1,85	1,87	0,02	1	1,90	0,05	3	1,92	0,07	4

Beide Darstellungen zeigen, daß der aufgrund der Laboruntersuchungen erhaltene Wippenmeßfühler bis zu 6 mm/min eine fast lineare Eichkurve aufweist. Mit ihm können praktisch alle in Europa vorkommenden Niederschläge mit einem Auflösungsvermögen von 0,1 mm gemessen werden. Aus der Literatur ist bekannt, daß äußerst selten noch stärkere Regenfälle auftreten können. Auf derartige Extremregenfälle wird in Abschnitt 5.2 noch eingegangen.

2.5. Der komplette Niederschlagsintensitäts-Meßfühler

2.5.1. Regenmessung

Abb. 9 und 10 zeigen den Aufbau des kompletten Intensitäts-Meßfühlers. Der Niederschlagsauffangtrichter entspricht völlig dem normalen 200-cm²-Hellmann-Regenmesser, nur daß an der Stelle des Abflußrohres die Schraubfassung des Tropfengebers sitzt. Letzterer ist zur Erleichterung der Wartung von oben her ein- bzw.

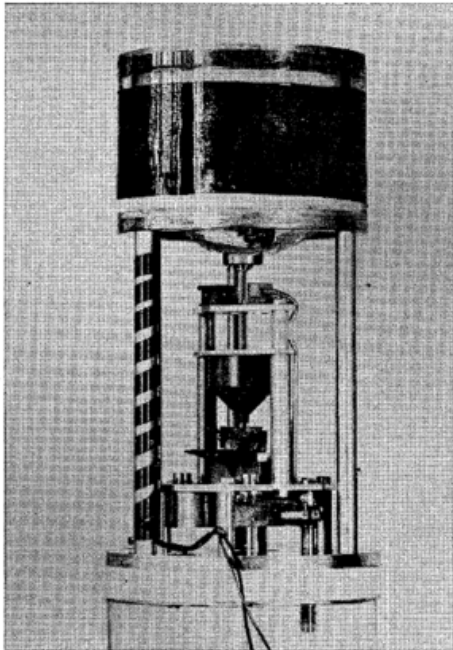


Abb. 9
Intensitätsmeßfühler des Ombrometers HP

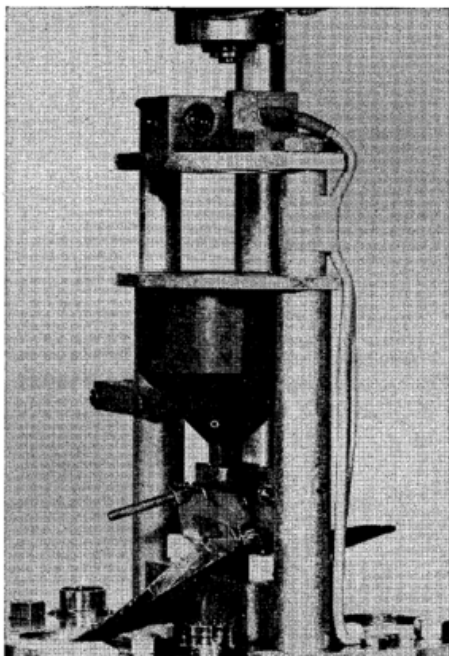


Abb. 10
Intensitätsmeßfühler, Teilansicht

ausschraubbar. Knapp unterhalb des Tropfengebers befindet sich die optoelektronische Strecke zur Zählung der Tropfen. Etwas darunter liegt der Tropfenzerstörer, unter ihm sitzt die Wippe in ihrem Teflonlager. Eine Seite des Lagerbettes ist etwas hochgezogen, um die optoelektronische Meßstrecke zur Zählung der Wippenkippvorgänge aufzunehmen.

Bei der praktischen Messung ist es erforderlich, die Abflußöffnung und damit den Zufluß des Tropfengebers vor Verunreinigungen zu schützen und zugleich zu verhindern, daß ein direkt in den Tropfengeber fallender Regentropfen durch seine mitgebrachte kinetische Energie eine vorzeitige Ablösung des künstlich erzeugten Tropfens bewirkt und so unkontrollierbare Fehler verursacht. Dieses Problem läßt sich im Prinzip durch Anbringen eines Siebes mit ausreichendem Durchfluß leicht lösen. Praktisch erweisen sich aber viele, im feuchten Zustand ausgezeichnet geeignete Materialien nach einer längeren Trockenperiode so stark wasserabstoßend, daß sich das Regenwasser erst beachtlich im Meßtrichter aufstaut, bis es durch genügenden Eigendruck schließlich durch das Sieb fließen kann. Erst eingehende Laborversuche mit verschiedenen Siebmaterialien erbrachten ein mechanisch stabiles Sieb, das keinen Stauereffekt zeigte.

2.5.2. Schneemessung

Die bisherigen Ausführungen bezogen sich alle auf Regenmessungen. Die genaue Bestimmung des festen Niederschlags in Form von Schnee und Eisteilchen ist in der Praxis aber noch viel ungenauer als die Regenmessung. Eine ausreichende Beheizung des Regenmessers mit elektrischen Lampen (meist mit Kohlefäden) bringt hohe Verdunstungsverluste, wenn bei Schneeschauern die Zeitrelation halbwegs gewährt bleiben soll. Setzt man die Wärmezufuhr herab, ist eine zeitliche Zuordnung in den meisten Fällen nicht mehr eindeutig, Verschiebungen um Stunden sind dann bei Schneeschauern keine Seltenheit. Halbwegs genaue Angaben über Kurzzeitschneefälle werden so meist unmöglich.

R. ANIOL (18) führte mit dem Material des hiesigen Observatoriums für den Zeitraum 1960 bis 1969 u. a. einen Vergleich zwischen den Meßergebnissen eines mit thermostatgesteuerten Biluxlampen beheizten Regenschreibers mit 200 cm² Auffangfläche nach dem Schwimmerprinzip und den eines normalen Hellmann-Regenmessers durch. Er fand, daß im Mittel im August der Regenschreiber 10 %, im Februar aber 35 % weniger Niederschlag registriert als der normale Regenmesser mit gleicher Auffangfläche von 200 cm². Ergänzend muß dazu festgestellt werden, daß bei kohlefädenlampenbeheizten Regenschreibern mit noch größeren Verdunstungsverlusten gerechnet werden muß. Diese Fehler werden im Mittel in Gebieten mit wenig Schneefall natürlich wesentlich kleiner, doch bleiben im Einzelfall die nicht eindeutig festlegbaren zeitlichen Verschiebungen und die unkontrollierbaren Verluste durch Verdunstung.

Durch eine neue Beheizung wurde versucht, die eben genannten meßtechnischen Fehler zu verkleinern, um damit einer genauen, zeitgerechten Messung des Winter-niederschlags einen Schritt näher zu kommen. Mit einer neuartigen Heizfolie werden die senkrechte Außenwand (siehe Abb. 9) und die Unterseite des Trichters des Auffanggefäßes großflächig beheizt. Die Temperatur dieses Blechgefäßes wird durch einen Thermostaten (in Abb. 9 auf der Vorderseite des Trichters erkennbar) mit einer Schalttoleranz von $\pm 0,2^\circ$ wenige Grade über dem Gefrierpunkt gehalten. Die Heizleistung der mit 24 V Spannung betriebenen Heizfolie ist so ausgelegt, daß die eingestellte Temperatur auch bei starker Abkühlung durch Schnee und Wind erhalten bleibt.

3. Der Verstärker- und Druckerteil

Abb. 11 zeigt das Blockschaltbild des in Abb. 12 dargestellten Verstärker- und Druckerteils. Durch die Verringerung des Widerstands auf dem Niederschlagsdauergeber springt das Zeitrelais auf die eingestellte Verzögerungszeit, normalerweise 4,9 Minuten, und beginnt abzulaufen, eine Niederschlagsanzeigelampe leuchtet

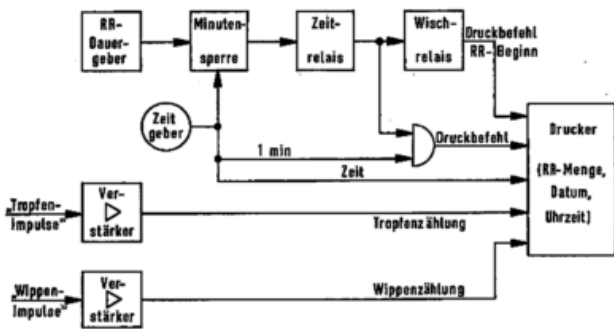


Abb. 11
Blockschaltbild des Verstärker- und Druckerteils

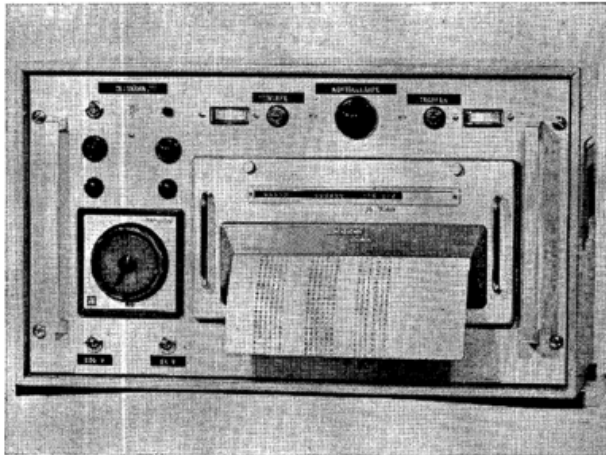


Abb. 12
Prototyp vom Verstärker- und Druckerteil des Ombrometers HP

auf; die Anlage wird von „Wartezustand“ auf „Betrieb“ geschaltet, und gleichzeitig löst ein Druckbefehl den Ausdruck von Datum und Uhrzeit aus.

Zur Schonung des Zeitrelais wird über das Minutenrelais nur jeweils nach Ablauf einer Minute der Dauergeber angeschlossen um festzustellen, ob es noch Niederschlag gibt. Wird durch wenigstens einen weiteren Niesel- oder Regentropfen bzw. eine Schneeflocke erneut ein Signal gegeben, springt das Zeitrelais wieder auf 4,9 Minuten. Die Anlage bleibt solange in Betrieb, solange innerhalb der Laufzeit des Zeitrelais noch Niederschlag auf den Dauergeber gelangt. Vom Augenblick des vollen Betriebszustands der Anlage an druckt der Drucker im eingestellten Zeitraster die Zahl der gezählten künstlichen Tropfen bzw. Wippen aus. Dieses Raster kann durch geringfügige Änderung zwischen 1 und 10 Minuten gewählt werden. Aus den in Abschnitt 5.2. genannten Gründen empfiehlt es sich, bei der Tropfenzählung jede Minute ausdrucken zu lassen. Für die Wippe allein reicht ein Raster von 5 Minuten, das eine gute, in den meisten Fällen ausreichende Feinauflösung des Niederschlags ermöglicht.

4. Das Baukastenprinzip

Es bietet sich an, Dauergeber, Tropfer, Wippe und entsprechende Elektronik je nach den gestellten Anforderungen zu verschiedenen Stufen eines Baukastensystems zu kombinieren. Bei der einfachsten Ausführung (Stufe I), von der die meisten in der Praxis gestellten Anforderungen erfüllt werden, dient der Tropfer als „Dauergeber“, die Niederschlagsintensität wird mit der Wippe auf $\pm 0,1$ mm genau gemessen. Beim ersten Tropfen, der sich vom Tropfer im Gerät gelöst hat, schaltet sich die Anlage von „Bereitschaft“ auf „Betrieb“ (siehe Abschnitt 3), die Anzeigelampe „Niederschlag“

leuchtet auf, der Drucker druckt Datum und Uhrzeit des „Niederschlagsbeginns“. Im 5-Minuten-Raster erfolgt der Ausdruck der Wippenkontakte. 4,9 Minuten nach dem letzten vom Tropfer kommenden Tropfen gibt der Drucker den Schlußdruck des Niederschlags, das Wippen-Zählwerk wird genullt, die Elektronik schaltet sich wieder auf Wartestellung. Aus Preisgründen wird hier die Zeitunsicherheit bei der Bestimmung des wirklichen Niederschlagsbeginns, verursacht durch die vom Niederschlag selbst abhängige Zeit zur Benetzung des Trichters in Kauf genommen.

Durch Hinzufügen des Dauergebers wird aus der Stufe I, nach Abänderung des Verstärkerteils, Stufe II; sie ermöglicht die genaue Messung der Niederschlagsdauer und die Bestimmung der Niederschlagsmenge bzw. -Intensität auf $\pm 0,1$ mm genau.

Werden durch Erweiterung des Druckers um einen Zählkanal auch die Signale des Tropfengebers zur Intensitätsmessung mit verwertet, so erhält man Stufe III, die bereits im vorigen Abschnitt geschildert wurde. Sie ermöglicht die genaue Bestimmung der Niederschlagsdauer bzw. -Intensität bis zu weit mehr als 6 mm pro Minute, wobei die Meßgenauigkeit bei schwachen Niederschlägen $\pm 0,005$ mm (Tropfer), bei starken Niederschlägen $\pm 0,1$ mm (Wippe) beträgt.

Für bestimmte Untersuchungen, z. B. für den Vergleich zwischen Punktmessung und Radarflächenmessung im Sondernetz des hiesigen Observatoriums, reicht es aus, wenn die genaue Punktmessung des Niederschlags nach Ablösung des ersten Tropfens im Meßfühler beginnt; d. h. anstelle des Niederschlagsdauergebers in Baustufe III übernimmt, wie in Stufe I, der Tropfengeber diese Funktion. Die vereinfachte Stufe III wird kurz als Stufe III_s bezeichnet.

5. Weitere Laborversuche

5.1. Tests der Elektronik

Die Verstärker der optoelektronischen Meßstrecken bzw. des Dauergebers stellen im Prinzip einfache Elektronik dar. Die sehr schwachen elektronischen Impulse von den Gebern über meist mehrere Dekameter lange Kabelverbindungen (am hiesigen Observatorium 150 m) zum Verstärker- und Druckerteil erfordern jedoch einigen Aufwand, um die Störfreiheit der Anlage zu sichern. Durch Dauertests der einzelnen Verstärker selbst konnten störanfällige Stellen erkannt und behoben werden, so daß die Verstärker sich schließlich weder untereinander störten, noch durch kräftige Störimpulserzeugungen in unmittelbarer Nähe zu falschen Zählimpulsen verleitet wurden. Ein komplettes Gerät der Stufe I wurde in dem Raum des Observatoriums aufgebaut, der am meisten elektronischen Störimpulsen ausgesetzt ist. Das Ombrometer lief bis zum Abbau nach mehreren Monaten völlig störungsfrei.

Aufgrund der Dauertests wurden zwei ursprünglich auf der Rückseite des Elektronik-Gehäusekastens befindliche Potentiometer an der Frontplatte untergebracht. Damit können die langsam nachlassenden Lichtstärken der Glühlämpchen der optoelektronischen Lichtstrecke durch Verringerung des jeweiligen Widerstands bequem ausgeglichen werden.

Die Lebensdauer dieser einfachen, billigen Lämpchen betrug im Dauerbetrieb 4–6 Monate. Aus Gründen der Meßsicherheit dürfte ein Austausch derselben nach 2–3 Monaten zweckmäßig sein. Ein Ersatz der Lämpchen durch Leuchtdioden ist vorgesehen. Die anderen elektronischen und mechanischen Teile des Prototyps des Gerätes sind seit mehr als einem Jahr störungsfrei in Betrieb.

5.2. Maximal zeitgerecht meßbare Niederschlagsintensität

Wie aus Tabelle 2 hervorgeht, weisen rund 95 % der hiesigen Regenfälle Intensitäten $\leq 0,1$ mm pro Minute auf. D. h. bei 95 % der Regenfälle treten pro Minute im Mittel bis zu 20 künstliche Tropfen bzw. bis zu 1 Wippenkontakt auf. In den bisherigen Abbildungen wurden die Eichkurven nur bis zu einer Niederschlagsintensität von 5 mm/min angegeben. Diese Zahl beträgt das 2 $\frac{1}{2}$ -fache der seit 1968 am Hohenpeißenberg mit 2 mm/min gemessenen Maximalintensität.

In der Literatur, z. B. (19), (20), werden für Europa als höchste Niederschlagswerte die am Bannwaldsee bei Füssen am 25. 5. 1920 gemessenen 126 mm in 8 Minuten angegeben. Aus der Arbeit von J. HAEUSER (21) geht hervor, daß diese Messung mit großer Sorgfalt gemacht wurde. Der Beobachter, staatlicher Straßenaufseher A. MÜHLEGGGER, schrieb u. a.: „Das Schaff, in dem das Wasser aufgefangen und gemessen wurde, war (vor der Messung) leer und dicht . . . In 8 Minuten — es können einige Sekunden mehr gewesen sein — waren in dem Schaff 12,6 cm Wasser . . . habe das Wasser an drei Stellen im Schaff mittels des genannten Maßstabs mit senkrechter Haltung desselben gemessen . . .“ Seit dieser Zeit sind mehr als 50 Jahre vergangen, in denen keine derart hohen Meßwerte mehr bekannt wurden. Es erschien jedoch angebracht, durch einen Versuch festzustellen, bis zu welcher Regenmenge pro Minute das hier entwickelte Ombrometer noch zeitgerechte Messungen erlaubt.

Meßfühler Nr. 4 wurde deshalb bis zum maximal möglichen, nicht verzögerten Regenwasserdurchfluß geeicht. Das Ergebnis ist in Abb. 13 dargestellt; in ihr ist auch die Niederschlagsmenge pro Wippenkontakt als Funktion der Regenintensität enthalten. Wie bei Meßfühler Nr. 6 (Abb. 6) ist die Eichkurve bis zu 40 Wippen — 99 % der vorkommenden Niederschläge — weitgehend linear.

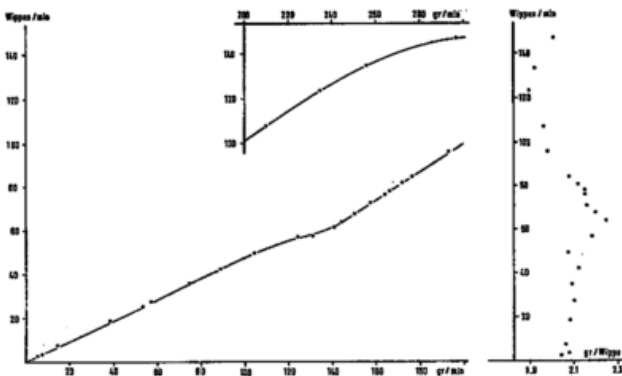


Abb. 13

Eich- und Füllmengenkurve des Meßfühlers Nr. 4 für extremste Niederschläge

Bis dahin verhält sich das Regenwasser in der Wippe bis zum Kippvorgang weitgehend quasistatisch, erst dann bewirkt der immer stärker werdende Zufluß einen Schwingungsvorgang des Wassers in der Wippe. Bei etwa 59 bis 60 Wippen pro Minute scheinen die Eigenfrequenzen der Wippe und der Wasseroberflächenschwingung in Einklang zu stehen. Die gegenläufige Wasserschwingung bewirkt eine größere Füllung bis zum Ausleervorgang. Oberhalb von 60 Wippenkontakten bewirkt der zunehmende dynamische Druck des Zuflusses eine zunehmende Verschiebung der Wassermenge nach außen, d. h. die Füllung pro Wippenkontakt geht trotz des vermehrten Einfließens nach Beginn des Kippvorgangs insgesamt zurück. Bei 90 Wippenkontakten erreicht die Füllung wieder den Wert von 1 Kontakt pro Minute, bei 120 Wippenkontakten ist sie um 0,07 gr

(3,5 %) kleiner. Die höchste noch voll zeitgerechte meßbare Niederschlagsintensität lag bei 15 mm pro Minute. Darüber hinaus staut sich das Niederschlagswasser etwas im Tropfenzerstörer und im Auffangtrichter. Noch stärkerer Niederschlag wird dann etwas verzögert gemessen.

Mit diesem Gesamtmeßbereich ist das Gerät in den meisten Niederschlagsgebieten einsetzbar. Sollen noch stärkere Niederschläge mit größtmöglicher Genauigkeit gemessen werden, kann dies durch einige Abänderungen, im wesentlichen durch eine entsprechende Vergrößerung der Wippe, erreicht werden.

5.3. Messungen mit verschmutztem Regenwasser

In Industriegebieten ist leider nicht selten, besonders nach Niederschlagsbeginn, das Niederschlagswasser ziemlich verschmutzt. Es erschien deshalb zweckmäßig, zur Ergänzung des Versuchs in 2.3. zu prüfen, ob die Niederschlagsmeßfühler bzw. deren Eichkurven vom Grad der Verunreinigung abhängen. Aus dem Meßprinzip des Niederschlagdauergebers folgt bereits, daß seine Anzeige unabhängig von Fremdstoffen im Niederschlag sein mußte, da die Fremd Beimengungen praktisch eine Erniedrigung des Widerstands des Regenwassers verursachen und der Verstärker vom hochohmigen Eingangssignal bis zum Kurzschluß einwandfrei arbeitet.

Zur Prüfung der Niederschlagsintensitätsmeßfühler wurde ein Ombrometer HP IIIs mit stark verschmutztem Regenwasser aus dem Ruhrgebiet, das dem Observatorium freundlicherweise vom Wetteramt Essen zur Verfügung gestellt wurde, nachgeeicht, nachdem dieses Ombrometer 4 Wochen vorher mit hiesigem, sauberem

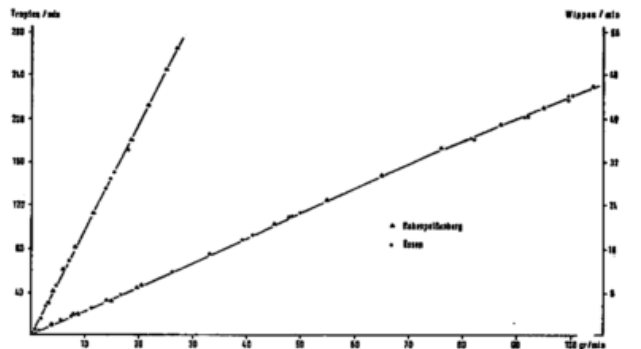


Abb. 14

Ombrometertest mit normalem und stark verschmutztem Regenwasser bei Zimmertemperatur

Regenwasser geeicht worden war. Das Ergebnis dieses Tests zeigt Abbildung 14. Beim Tropfengeber und bei der Wippe liegen die mit reinem und verschmutztem Regenwasser gewonnenen Meßpunkte praktisch auf der gleichen Eichkurve, d. h. das Ombrometer arbeitet auch bei verschmutztem Niederschlagswasser einwandfrei. Bei der Wippe war dieses Ergebnis zu erwarten, da diese Beimengungen gewichtsmäßig unbedeutend sind. Beim Tropfengeber kann Abb. 14 als Bestätigung der in Abschnitt 2.3. angestellten Überlegungen und Grundversuche angesehen werden.

5.4. Messungen mit Regenwasser bei Temperaturen knapp über dem Gefrierpunkt

Bei der Bestimmung der Form des Tropfengebers (Abschnitt 2.3.) wurde bereits versucht, einen Geber mit möglichst geringer Abhängigkeit von der Temperatur des Niederschlagswassers zu konzipieren. Bei der Wippe ist dieser Temperatureinfluß sicher auch gering, da der kubische Ausdehnungskoeffizient für Wasser ziemlich klein ist ($\alpha_w = 1 \cdot 8 \cdot 10^{-4}$ Cels $^{-1}$). Bei einer Temperaturzunahme von 20° C ergibt sich dementsprechend ein

Volumenzuwachs von $\Delta V = V_0 \cdot \alpha \Delta T = V_0 \cdot 3 \cdot 6 \cdot 10^{-3}$. Diese $3,6\text{‰}$ liegen innerhalb der Meßgenauigkeit.

Ein Ombrometer IIIs, für das bereits eine Eichung mit Regenwasser von $18-20^\circ\text{C}$ und $9-10^\circ\text{C}$ Temperatur vorhanden war, wurde zusätzlich mit Regenwasser, dessen Temperatur mit Hilfe der Kühltasche eines Kälteaggregats auf $2^\circ \pm 0,5^\circ\text{C}$ gehalten wurde, neu geeicht.

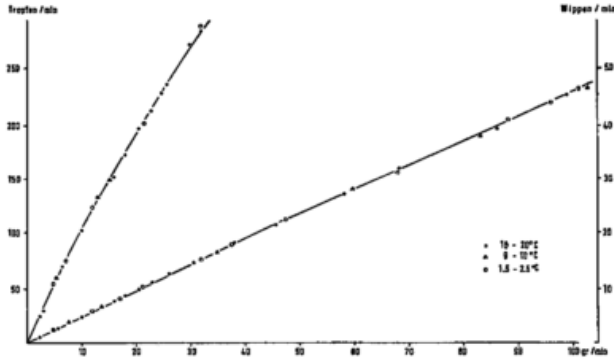


Abb. 15

Ombrometertest mit Niederschlagswasser bei unterschiedlichen Temperaturen

Das Ergebnis ist in Abb. 15 enthalten. Die Eichwerte der unterschiedlichen Regenwassertemperaturen liegen auch hier beim Tropfengeber und bei der Wippe praktisch auf den jeweiligen Eichkurven.

6. Ergebnisse der bisherigen praktischen Erprobung

6.1. Niederschlagsdauergeber

Der von GRUNOW (9) entwickelte Prototyp wurde Ende 1961 eingesetzt, seine Impulse zeichnete ein Chronograph auf. Er lief bei regelmäßiger, etwa $\frac{1}{2}$ jähriger Wartung jahrelang störungsfrei. Ende 1970 wurde die Sechskantmeßfühlerwalze undicht, das Gerät mußte eingezogen werden, da es auch den neuen VDE-Vorschriften nicht mehr ganz entsprach. Eine zweite Ausführung mit runder Meßfühlerwalze (Vereinfachung der Herstellung) konnte Anfang 1965 in Betrieb genommen werden. Ende 1968 wurde die Abgrenzung zwischen den



Abb. 16

Parallelregistrierung zweier Niederschlagsdauergeber in 3 m Abstand bei überwiegend leichtem Schneefall

einzelnen Meßfühlern noch besser abgedichtet und mit Stegen versehen, so daß auch bei sehr starken Regenfällen kein Regenwasser auf die nächste, zur Exposition bereit stehenden Meßfläche gelangen kann. Dieses Modell wurde zum Verschleißtest bewußt längere Zeit nicht gewartet. Es lief fast 3 Jahre völlig einwandfrei, wurde dann im Juni 1971 überholt und arbeitet seither wieder einwandfrei. Der normale Wartungszeitraum beträgt 6 Monate. Während eines ganzen Jahres (1968) liefen auf dem Hauptmeßfeld des Observatoriums diese beiden Niederschlagsdauergeber zum Vergleich in einem Abstand von knapp 3 Metern. Die Meßergebnisse waren – unabhängig von der Niederschlagsart – im Rahmen des überhaupt Möglichen gleich. Nebeltropfen wurden auch bei diesem Test in keinem einzigen Fall als Niederschlag gemeldet. Ein typisches Beispiel dieses Vergleichs zeigt Abb. 16. In ihr sind die Minutenimpulse der beiden Dauergeber als Funktion der Zeit für den 3. März 1968 dargestellt. Bei echtem Dauerniederschlag, in diesem Fall Schnee, kurzzeitig Graupel, stimmen beide Geräte völlig überein. Bei Beginn des Niederschlags um 2.30h fielen zunächst nur einzelne Schneeflocken, die zwangsläufig nicht von jedem Dauergeber erfaßt werden konnten, so daß hier leichte Zeitunterschiede in der Registrierung auftreten, dasselbe gilt für Zeiten mit sehr schwachem Niederschlag am Nachmittag und Abend. Insgesamt waren an diesem Tag 4,5 mm Niederschlag gefallen.

Seit fast zehn Jahren läuft zur vollen Zufriedenheit der Wetterbeobachter ein zweiter Chronograph im Beobachtungsraum der hiesigen Wetterstation. Die Niederschlagsdauerangaben werden damit wesentlich genauer, in der beobachterfreien Zeit überhaupt erst möglich.

6.2. Komplette Ombrometer der verschiedenen Baustufen

Auf dem Hauptfeld des hiesigen Observatoriums wurde am 5. 2. 1971 der komplette Meßfühler Nr. 1 (mit Heizung) aufgebaut und mit einem Windschutzring versehen (Abb. 17). Der Meßfühler ist auf einem frostschutzsicher einbetonierten, feuerverzinkten Stahlrohr stoßsicher befestigt. Der Windschutzring sitzt auf einem eigenen Halterohr. Die Elektronik- und Druckereinheit dieser Anlage entspricht im Prinzip der Stufe III, nur

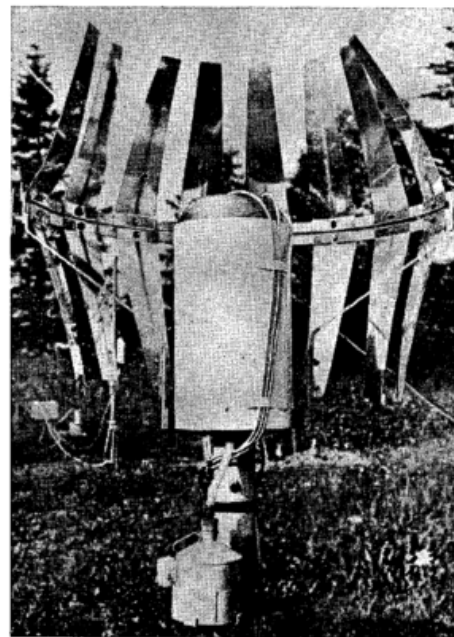


Abb. 17

Meßteil des Ombrometers HP mit Windschutzring und Sammelkanne (an der rechten Seite Meßkabel der 3 Temperaturmeßfühler im Sammelgefäß)

daß ein größerer, bereits früher vorhandener Drucker im 5-Minuten-Raster für jede der letzten 5 Minuten die Zahl der Wippen und die Zahl der Tropfen ausdrückt. Zusätzlich enthält dieses Gerät einen Chronographen zur Kontrolle des Dauergebers und einen einzelnen, von den Wippenkontakten ausgelösten kleinen Drucker zur Bestimmung der Tropfenzahl pro Wippe.

Im Rahmen des hiesigen Niederschlagnetzes konnten an geeigneten Stellen 4 Ombrometer, zunächst ohne Heizung, der Baustufe IIIs aufgestellt werden. Sie waren jeweils nach Fertigstellung des Gerätes von Anfang Juli bzw. August bis Anfang Oktober 1971 in Betrieb. Ein beheiztes Ombrometer der Stufe I wurde schließlich Anfang November 1971 im Gelände des Bergheims des hiesigen Observatoriums neben der großen Schneewaage aufgestellt. Die außerhalb des Observatoriums befindlichen Geräte wurden in den ersten Wochen regelmäßig überprüft, vereinzelt auftretende Fehler konnten so rasch lokalisiert und behoben werden. Die Erfahrungen mit der Elektronik in stark schwankenden, gestörten Stromnetzen führten z. B. zu kleinen Abänderungen bei allen Geräten. Insgesamt kann festgestellt werden, daß die Geräte zuerst zufriedenstellend, nach kleinen Verbesserungen in der Elektronik einwandfrei arbeiteten.

Aufgrund der so gewonnenen Ergebnisse konnte eine sehr wesentliche Frage für die Praxis näher untersucht werden: Wo liegt im praktischen Betrieb der Ombrometerstufe III der Übergang von der Tropfenmessung zur Wippenmessung? Bei quasi kontinuierlicher Zufuhr

von Regenwasser, wie sie bei der Eichung des Ombrometers erforderlich ist, kann mit dem Tropfengeber die Niederschlagsintensität bis zu 1,5 mm pro Minute praktisch linear gemessen werden. In der Natur weisen derartige, kräftige Schauer stark schwankende Intensitäten auf (siehe z. B. Abb. 1), so daß dabei sicher nicht mehr von quasi kontinuierlicher Wasserzufuhr gesprochen werden kann. Es muß angenommen werden, daß kurzzeitig – und sei es nur für ein paar Sekunden – die dem Tropfengeber zugeführte Wassermenge pro Sekunde größer als 0,5 gr wird. Für diese Intensität gelten keine linearen Verhältnisse mehr. Über die volle Minute hinweg zeigt dann bereits bei einer Gesamtzahl von künstlichen Tropfen ≤ 300 der Fühler eine etwas zu geringe Niederschlagsintensität. Da der Wippenfühler in diesem Bereich praktisch linear arbeitet, war es möglich, durch den Vergleich beider Fühlerergebnisse diese Linearitätsgrenze des Tropfengebers wenigstens im Mittel festzulegen.

Von den Minutenausdrucken zweier Stationen mit Ombrometer HP IIIs wurden für die Meßperiode 1971 alle Intensitäten bis 0,3 mm, bis 0,5 mm und zwischen 0,5 bis 1 mm, 1,0 bis 2,0 mm pro Minute zusammengestellt nach der Zahl der Tropfen pro Wippe. Der mögliche Einfluß des Tropfenzerstörers zwischen Tropfengeber und Wippe wird durch die Mittelbildung eliminiert bzw. bei der geringeren Zahl der Fälle zumindest stark abgeschwächt. Das Ergebnis dieser Auszählung ist in Tab. 5 enthalten.

Tab. 5

Zahl der künstlichen Tropfen pro Wippenkontakt für verschiedene Minutenintensitäten des Niederschlags, Sommer 1971

Station	Tropfen pro Wippenkontakt bei verschiedenen Regenintensitäten n = Zahl der Fälle								Eichwert 1 Wippe pro Minute
	$\leq 0,3$ mm	n	$\leq 0,5$ mm	n	0,5–1 mm	n	1–2 mm	n	
Wielenbach	22,68	550	22,42	600	20,68	17	19,04	2	22,6
Raisting	22,27	660	22,25	700	20,23	17	18,28	13	22,2

Aus ihr geht klar hervor, daß bis zu einer Niederschlagsintensität von 0,5 mm pro Minute die Zahl der Tropfen pro Wippe praktisch konstant bleibt, darüber hinaus geht sie bis zu 1 mm pro Minute um 10 %, bis zu 2 mm pro Minute um 18 % zurück. Eine erneute Aufgliederung der Intensitäten zwischen 0,5 und 1,0 mm pro Minute liefert infolge der geringen Zahl der Fälle keine zusätzlichen, verwertbaren Aussagen mehr. Aufgrund dieser Ergebnisse muß festgestellt werden, daß zumindest im hiesigen Klimabereich Tropfengeberzählungen dieser Art nur bis zu einer Intensität von maximal 0,5 mm Niederschlag pro Minute sinnvoll sind.

Tab. 5 unterstreicht außerdem die Notwendigkeit zweier Meßfühler bei möglichst genauer Bestimmung des Punktniederschlags. Aus ihr kann gefolgert werden, daß bei nur einem Meßfühler zur Erfassung des Gesamtniederschlags der Wippe der Vorzug gegeben werden muß, wenn man nicht von vornherein auf die Erfassung der für praktische Belange sehr wesentlichen Starkniederschläge weitgehend verzichten will.

6.3. Vergleich der Tageswerte des Ombrometers HP Stufe III und dreier Hellmann-Regenmesser

6.3.1. Regenmessung

Die Schwierigkeiten eines Regenmesservergleiches bedingt durch mögliche starke Intensitätsschwankungen auch auf engem Raum sind bekannt. DIEM (22) fand z. B.

auf einem Meßfeld von 4 × 4 Metern, auf dem im Abstand von 2 Metern 9 Regenmesser aufgestellt waren, bei schwachem Wind Abweichungen innerhalb der Meßgenauigkeit, bei starkem Wind jedoch erhebliche Unterschiede. Im Gebirgsbereich werden die Verhältnisse noch komplizierter. Z. B. stellte GRUNOW (23) auf dem Hauptfeld des hiesigen Observatoriums bei Mes-



Abb. 18
Vergleichsaufstellung des Ombrometers HP (mittleres Gerät) auf dem Hauptmeßfeld des Observatoriums

sungen über 4 Monate in 2 Metern Abstand Unterschiede zwischen 2 sonst gleichen Hellmann-Regenmessern bis zu 16 % fest. Um Windeinflüsse von vornherein weitgehend auszuschalten, wurden auch die in gleicher Höhe, im Abstand von 5 Metern aufgebauten Vergleichsregensmesser nach HELLMANN ebenfalls mit Windschutzringen nach WÖLFLE-TRETIKOV versehen (siehe Abb. 18). Zunächst mußte untersucht werden, welche Unterschiede

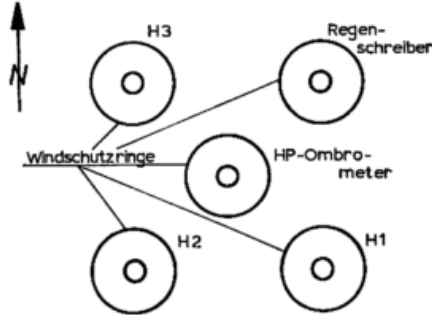


Abb. 18

Schematischer Lageplan der Vergleichsaufstellung von Niederschlagsmessern auf dem Hauptmeßfeld

zwischen den Hellmann-Regenmessern selbst, bedingt durch die Aufstellungslage auftreten. Abb. 19 gibt den Lageplan der einzelnen Hellmann-Regensmesser und ihre Bezifferung. Die Monatssummen derselben und ihre Prozentwerte vom gemeinsamen Mittelwert sind für die Monate Mai mit September 1971 in Tab. 6 zusammengestellt. H₂ und H₃ zeigen über den ganzen Zeitabschnitt gute Übereinstimmung, während H₁ ab August 5 bis 6 % tiefere Werte aufweist.

Berücksichtigt man die schwierigen Regenmeßverhältnisse auf einem Berg, so muß festgestellt werden, daß die Übereinstimmung – wohl in erster Linie bedingt durch die Windschutzringe – insgesamt recht gut ist.

Tab. 6

Monatsniederschlagsmengen vom Hohenpeißenberg der Regenmesser H₁, H₂, H₃ in mm und in Prozenten vom Gesamtmittel H_M (1, 2, 3)

Monate 1971	Niederschlagsmesser $\frac{(H_1 + H_2 + H_3)}{3} = 100\%$					
	H ₁		H ₂		H ₃	
	mm	%	mm	%	mm	%
Mai	199	101	200	101	194	98
Juni	203	100	204	100	204	100
Juli	100	98	103	101	104	102
August	168	95	181	102	182	103
September	84	94	92	103	91	102
Σ	753	98	781	102	776	101

Verbesserungen am Ombrometer ausgeführt wurden, liegt die Zahl der Vergleichsfälle und damit die Höhe der Niederschlagssummen niedriger als in Tabelle 6. Die Meßergebnisse des Tropfengebers, der Wippe und ihre Kombination: Tropfenmessung bis 0,5 mm Niederschlag pro min, darüber Wippenmessung, kurz bezeichnet als HP III, sind getrennt aufgeführt. Sie zeigen insgesamt eine gute Übereinstimmung mit dem Mittel aus H₁, H₂, H₃. Das Defizit des Tropfengebers im Mai ist überwiegend auf den in Abschnitt 6.2 beschriebenen Effekt bei Intensitäten > 0,5 mm/min zurückzuführen. Die niedrigeren Prozentzahlen im August und September bestätigen die oben ausgesprochene Vermutung, daß in diesen Monaten der während der Niederschläge dominierende Wind aus WSW bzw. NE im Bereich des Ombrometers

Tab. 7

Monatsniederschlagsmengen am Hohenpeißenberg des Ombrometers HP III und der jeweiligen Gesamtmittel H_M (1, 2, 3) in mm und in Prozenten vom Gesamtmittel (Tro = Tropfer, Wi = Wippe)

Monate 1971	Ombrometer HP			H ₁	H _M	Prozente von H _M			
	Tro	Wi	HP III			Tro	Wi	HP III	H ₁
Mai	162,5	171,6	171,7	172,1	171,4	95	100	100	101
Juni	196,5	195,3	197,0	200,6	201,3	97	97	98	100
Juli	99,1	97,2	99,1	99,8	102,1	97	95	97	98
August	128,0	129,0	129,3	130,8	139,1	92	93	93	94
September	42,2	41,0	42,2	42,2	45,2	93	91	93	93
Σ	628,9	634,1	639,3	645,7	659,1	95	96	97	96

Eine Untersuchung des Windeinflusses aufgrund von Wölfle-Windschreibern in Höhe der Regenmesser und in 5 Metern Höhe, bei einem Abstand von einem bzw. sechs Metern vom Ombrometer HP, ergab, daß die etwas niedrigeren Meßwerte des Regenmessers H₁ auf Wirbelungen bei starkem WSW- bzw. nordöstlichen Winden zurückzuführen sein dürften. Derartige Vorgänge können auch für das Ombrometer HP nicht ausgeschlossen werden. Es erschien deshalb zweckmäßig, die Meßwerte dieses Gerätes mit dem Mittel aus den Hellmann-Regenmessern zu vergleichen. Das Ergebnis ist in Tabelle 7 zusammengestellt. Da zwischendurch kleine

HP, ähnlich wie beim Hellmann-Regensmesser H₁, die Ursache für niedrigere Werte sein dürfte. Die Intensitäten ≥ 0,5 mm pro Minute wurden in Tab. 8 gesondert zusammengestellt.

Aus ihr geht klar hervor, daß im Mittel bei diesen Fällen 11 % der starken Niederschläge vom Tropfengeber nicht mehr erfaßt werden konnten. Diese 130 Minuten machen nur 3,5 % der mit dem Dauergeber bestimmten Gesamtregenzeit, aber 14,2 % der Gesamtniederschlagsmenge aus; der vom Tropfer nicht mehr erfaßte Starkregenanteil beträgt davon 1,5 %. Ein Vergleich der 5-Mi-

Tab. 8

Summe der Niederschläge $\geq 0,5$ mm/Minute (130 Fälle)
Ombrometer HP III am Hohenpeißenberg,
Mai – September 1971

Meßfühler	
Tropfengeber	Wippe
80,0 mm	90,4 mm.
89 %	100 %

nuten-Meßwerte dieser Fälle zeigte, daß Tropfengeber und Wippe praktisch identische Regenmengen messen, solange die Zahl der „Tropfen“ pro Minute nicht größer als 100 ($\sim 0,5$ mm) ist, sie differieren umso mehr (bis zu 16 %), je größer diese Tropfenzahl wird. Intensitätsänderungen von einer Minute zur anderen um den Faktor 2 sind keinesfalls selten, Änderungen um den Faktor 4 bis 18 kamen vor.

6.3.2. Schnee- bzw. Schneewassermessung

Das beheizte Ombrometer HP konnte im März 1971 auf dem Hauptversuchsfeld des Observatoriums eingesetzt werden. Leider war der Winter 1971/72 ungewöhnlich mild, er war im Mittel um $2,6^\circ$ zu warm und viel zu trocken; es fiel nur rund $\frac{1}{3}$ des mittleren Niederschlags und der nur z. T. als Schnee, so daß insgesamt lediglich 14 Tage mit Schneefall zum Vergleich zur Verfügung standen. Während der ersten Versuchstage erwies sich die Innenbeheizung des Ombrometers als zu knapp ausgelegt, so daß einmal die Wippe einfrohr. Dieser Fehler wurde durch Einbau eines Heizwiderstandes unterhalb des Auffanggefäßes behoben; ein einfacher Schaltthermostat im Gehäuse regelt dabei die Innentemperatur. Zur Kontrolle der Temperaturverhältnisse am Ombrometer wurden Widerstandsthermometer auf der West- und Ostseite der Innenwand des Auffangtrichters, an der Unterseite des Trichters selbst und im Innern des Ombrometergehäuses angebracht und deren Meßergebnisse laufend registriert. Zur besseren Wärmeübertragung wurden die knapp sitzenden Thermometerhalterungen am Trichter angelötet. Eine typische Temperaturregistrierung zeigt Abb. 20.

Die Temperatur am Innenzylinder des Auffanggefäßes schwankt, je nach Windstärke zwischen 0 und 5° C, am Trichter zwischen 2 und 7° C, im Gehäuseinnern zwischen 2 und 7° C. Die relativ hohen Endtemperaturen sind darauf zurückzuführen, daß der steuernde Thermostat an der Unterseite des Trichters auf einem 6 mm starken Messinghalter sitzt. Bei den später gebauten Meßfühlern wurde dieser Abstand auf 2 mm reduziert und damit die Trägheit des auf $\pm 0,2^\circ$ C schaltenden Thermostaten verkleinert. In der Zwischenzeit wurde der Messinghalter des hiesigen Ombrometers ebenfalls auf 2 mm Stärke reduziert, die registrierten Temperaturen schwanken seither nur noch zwischen $1,5$ und maximal 6° C.

Regelmäßige visuelle Beobachtungen während der Schneefälle zeigten, daß auch bei Schneeschauern durch das Schmelzen des hereingefallenen Schnees kein merkbarer Zeitverlust zwischen Schneefall und Niederschlagsregistrierung entstand, während bei dem mit Biluxlampen beheizten Regenschreiber oft erst lange nach einem Schauer der Schwimmer zu steigen begann.

Den Vergleich der Meßergebnisse zwischen dem Ombrometer HP, dem Mittel der Hellmann-Regenmesser H_1, H_2, H_3 und einem Regenschreiber nach dem Schwimmerprinzip zeigt Tab. 9. Der mit Biluxlampen beheizte Niederschlagsschreiber (R_S) erfaßte nur 66 %

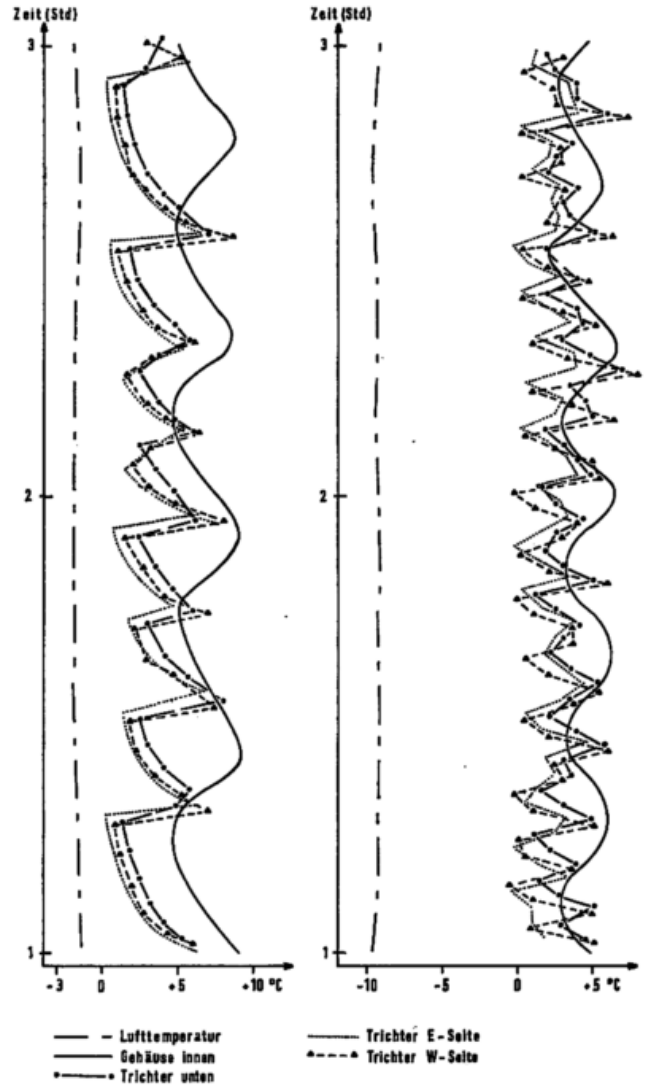


Abb. 20
Temperaturen am Meßfühler des Ombrometers HP im Winter
(Außentemperatur $< 0^\circ$ C)

des Schneewassers, verglichen mit dem Mittel der sehr sorgfältig bei Zimmerluft geschmolzenen Schneemengen in den Gefäßen H_1, H_2, H_3 .

Tab. 9

Schneeniederschläge am Hohenpeißenberg erfaßt mit Ombrometer HP, Hellmann-Regenmesser H_1, H_2, H_3 und -Schreiber (R_S), Oktober – Dezember 1971

Ombrometer HP		Hellmann		
Tro	Wi	$H_M (1, 2, 3)$	R_S	
76,4	69,8	90,1	59,7	[mm]
85	78	100	66	%

Mit der neuartigen Beheizung des Ombrometers konnte der Meßfehler auf 15 % verringert werden, bei der Wippenmessung betrug er 22 %. Zwangsläufig muß bei einem derartigen Vergleich das registrierende Gerät gegen das reine Sammelgefäß immer einen gewissen Fehler aufweisen, da neben der unvermeidlichen Verdunstung ein Teil des Schneewassers zur Befeuchtung des Auffangtrichters benötigt wird; dieser Niederschlagsanteil wird umso höher sein, je schwächer der Schneefall ist, da dann eine völlige Benetzung des Trichters praktisch kaum eintritt. Dies war bei der überwie-

genden Zahl der Schneefälle im letzten Winter der Fall. Tab. 10 zeigt die prozentuale Häufigkeit der aufgetretenen Minutenintensitäten während der insgesamt 78 Stunden des Schneemeßvergleichs.

Tab. 10

Prozentuale Häufigkeit der Schneewasserintensitäten pro Minute am Hohenpeißenberg, Oktober–Dezember 1971

Schneewasserintensität pro Minute						
< 0,005	0,005	0,01	0,02	0,1	> 0,1	mm
60,4	13,7	15,5	7,7	2,3	0,4	%

Weit mehr als die Hälfte aller Schneefälle brachte pro Minute weniger als 0,005 mm Schneewasser, d. h. es dauerte länger als eine Minute, recht häufig sogar erheblich länger, bis ein künstlich erzeugter Niederschlagstropfen im Ombrometer die optoelektronische Zählstrecke passierte.

Bei anhaltendem leichtem Schneefall betrug die Zeitspanne zwischen zwei aufeinander folgenden Wippenkontakten oft mehrere Stunden. So ist es leicht erklärlich, daß durch Verdunstungsverluste am Tropfenzerstörer und auch in der Wippe selbst dieser Meßfühler einen um 7 % höheren Meßfehler aufweist als die Tropfenmessung. Während des ganzen Schneemeßvergleichs war die Niederschlagsintensität kleiner als 0,5 mm pro Minute, so daß für die benutzte Ombrometerstufe III die Niederschlagsmessung mit dem Tropfengeber nach Abschnitt 6.2. die besten Ergebnisse liefern mußte; dies gilt auch hier bei Schneeniederschlag.

Die bisherigen Versuche mit der Trichterflächenheizung erlauben insgesamt – trotz der relativ kurzen Testperiode – die Schlußfolgerung, daß es damit gelang, den bisherigen Meßfehler bei Schneeniederschlag wesentlich zu verringern.

7. Literatur

- (1) KAUTILYA: Arthasastra. 321–296 v. Chr. Translated by R. SHAMASAstra: Government Oriental Library Series, Bibliotheca Sanskrita Nr. 37 (1915) Pt. 2.
- (2) PLEISS, H.: Bedeutung und Probleme der Niederschlagsmessung. Abh. Meteor. Dienst DDR Nr. 97 (1969) S. 20–29.
- (3) KURTYKA, J. C.: Precipitation measurements study. State Water Survey Div., Urbana/JIL., Rep. of Investigation Nr. 20 (1953).
- (4) HORNER: Ein neuer Regenmesser. Jb. Chemie und Phys. 2 (1830) H. 1, S. 36–43.
- (5) OSLER, F.: An account of a new registering anemometer and raingage . . . Transact. Brit. Assoc. for the Advancement of Sci. 6 (1837) S. 32–33.
- (6) HELLMANN, G.: Neuer Regen- und Schneemesser. Z. Instrumentenkde. 5 (1885) S. 89–90.
- (7) HELLMANN, G.: Ein neuer registrierender Regenmesser (R. FUESS). Meteor. Z. 14 (1897) S. 41–44.
- (8) GALLENKAMP, W.: Über den Verlauf des Regens (Eine neue Methode der Regenmessung). Meteor. Z. 22 (1905) S. 1–10.
- (9) GRUNOW, J.: Variationen der Niederschlagsstruktur und ihre meßtechnische Erfassung. Publ. UGGI. Assoc. Internat. Hydrol. Sci. Nr. 53 (1961) S. 285–299.
- (10) LENARD, PH.: Über die Schwingungen fallender Tropfen. Ann. Phys. Chemie N. F. 30 (1887) S. 209–243.
- (11) RÖSSLER, J.: Zum prinzipiellen Fehler von Tropfenzählern (Regenmessern). Meteor. Rdsch. 23 (1970) S. 71–74.
- (12) LANDOLT-BÖRNSTEIN: Taschenbuch für Chemie und Physik. 2. Aufl. Berlin 1949, S. 1002.
- (13) BERGMANN-SCHÄFER: Lehrbuch der Experimentalphysik. 1. Bd. Berlin 1954, S. 325.
- (14) GRIMSEHL-TOMASCHEK: Lehrbuch der Physik. 1. Bd. Leipzig–Berlin 1940, S. 171.
- (15) SPRUNG, A.; FUESS, R.: Neue Registrierapparate für Regenfall und Wind mit elektrischer Übertragung. Meteor. Z. 6 (1889) S. 344–348.
- (16) JOSS, J.; TOGNINI, E.: Ein automatisch arbeitender Ombrograph mit großem Auflösungsvermögen und mit Fernübertragung der Meßwerte. Pure and appl. Geophys. 68 (1967) S. 229–239.
- (17) DOHERTY, L. H.; ROCHELEAU, D. O.: Modifications to a tipping bucket rain gauge. Ottawa 1963.
- (18) ANIOL, R.: Andauer und Menge der Niederschläge auf dem Hohenpeißenberg. Sonderbeob. Meteor. Obs. Hohenpeißenberg Nr. 19 (1972).
- (19) HANN-SÜRING: Lehrbuch der Meteorologie. 5. Aufl. 1. Bd. Leipzig 1939, S. 479.
- (20) MARX, S.: Über die extremsten Niederschlagsmessungen auf der Erde. Z. Meteor. 21 (1969) S. 118–119.
- (21) HAEUSER, J.: Kurze, starke Regenfälle in Bayern. 1. Erg.-Bd. München 1922, S. 116.
- (22) DIEM, M.: Zur Struktur der Niederschläge. I. Die Genauigkeit von Regenmessungen. Arch. Meteor. Geophys. Bioklimat. B 15 (1967) S. 39–51.
- (23) GRUNOW, J.: Einfluß des Anstrichs der Niederschlagsmesser auf das Meßergebnis. Meteor. Rdsch. 14 (1961) S. 63–64.