

HEINRICH-HERTZ-INSTITUT FÜR SCHWINGUNGSFORSCHUNG
BERLIN-CHARLOTTENBURG

Technischer Bericht Nr. 157

Zur Messung des Tropfenspektrums im Regen und der
Regenintensität mit dem Regenanalysator

von

Dr.-Ing. Jörg Sander Ing. grad. Fred Schmidt



B e r l i n

1 9 7 2

Zur Messung des Tropfenspektrums im Regen und der Regenintensität mit dem
Regenanalysator

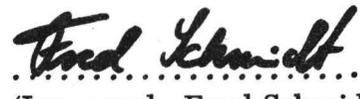
Zusammenfassung

Im Technischen Bericht Nr. 91 des Heinrich-Hertz-Instituts wurde über die erste Ausführung eines Gerätes berichtet, mit dem ein Teil des Tropfenspektrums im Regen kontinuierlich gemessen und registriert werden kann. Die zu der Zeit vorliegenden Erfahrungen mit diesen Regenanalysatoren waren nicht sehr umfangreich, in der Zwischenzeit durchgeführte Änderungen an den Geräten und weitere Meßergebnisse machten eine Neufassung des Berichts notwendig. Im Folgenden wird noch einmal auf die grundsätzliche Wirkungsweise der Geräte und die mit ihr verbundenen wesentlichen Fehlerquellen eingegangen. Eine Geräteausführung, die in den Jahren 1969 und 1970 bei Messungen zur Dämpfung sehr kurzer elektromagnetischer Wellen durch Regen eingesetzt wurde, wird zusammen mit der Eichmethode zur Bestimmung des Zusammenhangs zwischen der Ausgangsgröße der Regenanalysatoren und der Tropfengröße beschrieben. Es folgt die Darstellung einiger Ergebnisse aus den erwähnten Untersuchungen zur Regendämpfung, die eine teilweise Wertung der Meßmethode zulassen. Den Abschluß dieses Berichts bildet die kurze Beschreibung der neuesten Geräteausführung, bei der die jetzt vorliegenden Erfahrungen berücksichtigt wurden.

Heinrich-Hertz-Institut für Schwingungsforschung

Die Bearbeiter :


.....
(Dr. -Ing. Jörg Sander)


.....
(Ing. grad. Fred Schmidt)

Der Abteilungsleiter und Institutsdirektor


.....
(Prof. Dr. -Ing. F. W. Gundlach)

Berlin-Charlottenburg, den 27. September 1972

Inhalt

	Seite
1. Einleitung	1
2. Meßprinzip, Aufbau und Eichung der Regen- analysatoren	5
2.1. Funktionsweise	5
2.1.1. Spannungsverläufe am Meßgitter und hinter dem Elektrometer-Verstärker	6
2.1.2. Ladungsaufnahme	14
2.2. Geräteaufbau	16
2.2.1. Mechanischer Aufbau	16
2.2.2. Elektrischer Aufbau	18
2.3. Eichung	23
3. Diskussion des Meßverfahrens	25
4. Meßergebnisse	34
4.1. Korrelation zwischen den mit den Hellmann- schreibern und Regenanalysatoren gemessenen Regenintensitäten	35
4.2. Korrelation zwischen den gemessenen Dämpfungs- koeffizienten bei 52, 90.8 und 150 GHz und den zur gleichen Zeit mit den Hellmannschreibern und Regenanalysatoren ermittelten Regenintensitäten	39
4.3. Mit den Regenanalysatoren im Untersuchungszeit- raum gemessene mittlere Tropfengrößen-Vertei- lung im Regen	42
5. Neueste Geräteausführung	44
Literaturverzeichnis	48

1. Einleitung

Mit den Regenganalysatoren werden die auf einer kleinen Meßfläche auftreffenden Regentropfen nach ihrer Größe sortiert und gespeichert. Der meßbare Tropfengrößen-Bereich ist nach unten hin auf Tropfendurchmesser von etwa 0,3 mm begrenzt. Die Speicherung der Tropfengrößen kann so erfolgen, daß die Information über die Tropfenfolge erhalten bleibt.

Die Entwicklung der Geräte ist im Zusammenhang mit Untersuchungen zur Dämpfung sehr kurzer elektromagnetischer Wellen durch Regen zu sehen, die in den Jahren 1969 - 1970 am Heinrich-Hertz-Institut bei den Wellenlängen 5,77, 3,3 und 2 mm durchgeführt wurden [SANDER 1972]. Es ist gleich an dieser Stelle zu betonen, daß der Aussagewert von Messungen mit den Regenganalysatoren oder mit ähnlichen Geräten, bei denen mit relativ kleinen Meßvolumen oder Meßflächen Stichproben aus der jeweils vorliegenden Tropfengrößen-Verteilung genommen werden, stark begrenzt wird durch die Eigenschaften des Regens. Hierzu gehören die große flächenmäßige Inhomogenität des Regens und die starke zeitliche Variabilität der Tropfengrößen-Verteilungen auch bei konstanter Regenintensität. Die Tropfenfolge selbst unterliegt statistischen Gesetzen, was den Vertrauensbereich der Stichproben weiter einschränkt. Schließlich ist zu sehen, daß am Erdboden gemessene Tropfengrößen-Verteilungen auch bei Windstille nicht für das gesamte Volumen oberhalb der Meßfläche bis zur Wolkenuntergrenze gelten : Auf dem ersten Kilometer der Fallstrecke verschwindet aus den ursprünglichen Spektren ein wesentlicher Teil der kleinen Tropfen durch Verdunstung oder Verbindung mit anderen, womit der relative Anteil der großen Tropfen am Gesamtspektrum zunimmt (vgl. z.B. HARDY [1963]) .

Zu den Forderungen, die an Meßverfahren zur Bestimmung der Tropfengrößen-Verteilung im Regen zu stellen sind, gehören :

- Eine von Störeinflüssen, wie etwa der Tropfenfallgeschwindigkeit, möglichst unabhängige und hinreichend genaue Methode zur Bestimmung

der Größe von Wassertropfen in einem Durchmesserbereich von etwa 0,1 - 6 mm.

- Ein auch bei hohen Regenintensitäten ausreichendes zeitliches Auflösungsvermögen zur Identifizierung der einzelnen Tropfen. Die Abmessungen der Meßfläche oder des Meßvolumens sollten hierbei groß genug sein, um auch bei niedrigen Intensitäten statistisch relevante Stichprobenumfänge über kurze Zeitintervalle zu liefern.
- Die Stichprobenumfänge sollten nicht durch das Meßverfahren selbst begrenzt werden, so daß kontinuierliche Registrierungen im Dauerregen möglich sind.
- Die Auswertung der Meßdaten sollte einfach und zeitsparend im Extremfall quasianalog durchgeführt werden können, so daß irgendwelche Fragestellungen möglichst wenig schon durch die Art der Registrierung beschränkt werden.
- Die zur Realisierung des Meßverfahrens notwendigen Geräte sollten nur geringen Bedienungsaufwand erfordern und störunanfällig im Aufbau sein.

Alle uns bekannten Meßverfahren erfüllen jeweils nur einen Teil dieser Forderungen. Das älteste von ihnen ist die sogenannte Filterpapiermethode nach WIESNER [1895] . Hier werden die Tropfendurchmesser über Abdrucke bestimmt, die der Regen auf einem 100 cm² - großen mit Eosin bestäubten Papierfilter hervorrufen. Das Verfahren wurde von DIEM perfektioniert und für umfangreiche Untersuchungen zur Struktur der Niederschläge eingesetzt(vgl. z.B. DIEM [1969]).

Ein ebenfalls altes Meßverfahren stammt von BENTLEY [1904] . Hier werden die von Regentropfen in einer lockeren Mehlschicht hervorgerufenen Kugeln ausgetrocknet und dann mit Sieben klassifiziert. LAWS und PARSONS [1943] bestimmten so mittlere Zusammenhänge zwischen der Häufigkeitsverteilung der Tropfengrößen im

Regen und der Regenintensität. Diese LAWS - und PARSONS - Verteilung wird für Abschätzungen in der Radiometeorologie vorwiegend benutzt.

Es ist offensichtlich, daß die beiden beschriebenen Verfahren für kontinuierlich durchzuführende Dauerregistrierungen nicht geeignet sind. Darüber hinaus ist die Auswertung der Meßergebnisse relativ aufwendig. Beide Mängel gelten auch für ein naheliegendes photographisches Meßverfahren von JONES und DEAN [1953]. Ihre Drop Camera hat allerdings den Vorteil, daß die ja auf das Volumen bezogene Tropfenverteilungsdichte direkt bestimmt wird, also nicht über die Tropfengeschwindigkeit aus der pro Meßfläche und -zeit aufgefangenen Tropfenzahl errechnet werden muß.

Ebenfalls nach einem optischen Verfahren arbeiten das Rain-Drop Size Spectrometer von DINGLE und SCHULTE [1962] und das Pluviometer von DONNADIEU, DUBOSCLARD und GODARD [1969]. Das Meßsystem besteht aus einem kollimierten Lichtstrahl und einem Photometer. Tropfen, die durch dieses System fallen, erzeugen eine ihrem Querschnitt entsprechende Streulichtintensität, die vom Photometer in äquivalente elektronische Impulse umgewandelt wird. Das Spectrometer rotiert dabei um eine Achse, womit sich das Meßvolumen vergrößert. Das optische System des Pluviometers ruht. Das Spectrometer wurde für umfangreiche meteorologische Untersuchungen eingesetzt (vgl. z. B. DINGLE und HARDY [1962]). Das Pluviometer scheint noch wenig erprobt zu sein, es soll bei Untersuchungen zur cm - und mm-Wellenausbreitung im Regen eingesetzt werden GODARD [1970] .

Im Rahmen dieser Übersicht ist schließlich noch der Spectrograph von JOSS und WALDVOGEL [1967] zu erwähnen. Hier werden die mechanischen Impulse, die die Tropfen auf einer 50 cm^2 - großen Membrane erzeugen, elektronisch umgesetzt und registriert. Mit der Auswertung dieser mechanischen Impulse wird die Anzeige der Tropfenfallgeschwindigkeit proportional. Von den in dieser Übersicht beschriebenen Meßmethoden ist die des Spectrographen wohl am erfolgversprechensten, da bei ihr die Forderungen nach einem weiten Meßbereich, nach kontinuierlicher Registrierung und zeitsparender Auswertemöglichkeit sowie nach geringem Bedienungsaufwand

zufriedenstellend erfüllt sind.

Die Idee zum Aufbau der Regenanalysatoren stammt von LAMMERS [1969] : Hier werden die Tropfen an einem konstanten elektrischen Potential geladen, danach wird diese der jeweiligen Tropfengröße entsprechende Ladung an ein Meßgitter abgegeben. Es entstehen Spannungsimpulse, die elektronisch ausgewertet werden können. Über die erste Geräteausführung und ersten Meßergebnisse wurde von SCHMIDT [1966] berichtet. Wesentliche Impulse für die Weiterentwicklung dieser ersten Geräteausführung gingen von Versuchen aus, die am Meteorologischen Institut der Technischen Universität Karlsruhe unter Professor Diem durchgeführt wurden. Am gleichen Institut fanden auch die ersten direkten Vergleiche zwischen der Filterpapiermethode, dem Spektrographen von JOSS und WALDVOGEL und dem Regenanalysator statt DIEM [1969] . Durch eine offensichtliche Fehleichung bei kleinen Tropfendurchmessern bedingt verliefen diese Vergleiche für den Regenanalysator nicht sehr erfolgreich. Aufgrund dieser Karlsruher Untersuchungsergebnisse wurde das Eichverfahren zur Bestimmung des Zusammenhangs zwischen der Tropfengröße und der durch die Tropfen erzeugten Spannungsimpulshöhe entscheidend geändert, so daß hierüber jetzt sehr zuverlässige Angaben gemacht werden können (vgl. Abschnitt 2. 3.).

Drei Regenanalysatoren wurden in der Zeit von Juli 1969 bis Juli 1970 bei den schon erwähnten Untersuchungen zur Dämpfung elektromagnetischer Wellen durch Regen eingesetzt. Störungen traten in diesem Zeitraum nur in dem zur Registrierung der Meßdaten benutzten photographischen System auf. Jedes der Geräte stand auf der Meßstrecke mit einem in seiner Auflösungsfähigkeit gegenüber der auch vom Deutschen Wetterdienst benutzten Standardausführung wesentlich verbesserten Niederschlagsmesser nach Hellmann (Hellmannschreiber) zusammen. Da ja die Regenintensität jeweils auch aus den mit den Analysatoren gemessenen Tropfenspektren zu errechnen ist, konnten umfangreiche direkte Vergleiche zwischen den Anzeigen beider Gerätetypen durchgeführt werden. Da diese Vergleiche zunächst nur einen Eindruck von den erreichten Korrelationen in der Anzeige geben, nicht aber ein Urteil darüber

zulassen, welcher der beiden Gerätetypen nun wenigstens zur Messung der Regenintensität geeigneter ist, wird im Folgenden zusätzlich über die Korrelationen der beiden verschiedenartig gemessenen Regenintensitäten mit den gleichzeitig auf der Meßstrecke registrierten Dämpfungswerten bei den oben angegebenen Wellenlängen berichtet. Schließlich erhält dieser Bericht einen kurzen Überblick über die Untersuchungsergebnisse, die sich direkt auf die gemessenen Tropfenspektren beziehen.

2. Meßprinzip, Aufbau und Eichung der Regenanalysatoren

2.1. Funktionsweise

Die Abb. 1 zeigt den grundsätzlichen Aufbau der Geräte. Die Tropfen fallen durch eine Auffangfläche (1) auf ein Ladegitter (2), an dem die positive Gleichspannung U_L liegt. Sie nehmen hier eine ihrer Größe entsprechende elektrostatische Ladung Q auf, die zu einem zweiten Gitter, dem sogenannten Meßgitter (3) transportiert wird. Das Meßgitter ist mit dem Eingang eines Elektrometer-Verstärkers verbunden. Bei der Annäherung eines Tropfens an dieses Gitter wird in diesem eine negative Ladung induziert, es entsteht ein Spannungsimpuls, dessen Amplitude

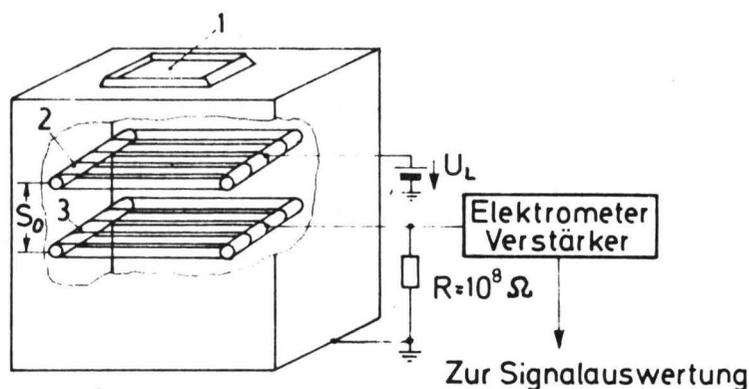


Abb. 1

gemessen und registriert wird.

2.1.1. Spannungsverläufe am Meßgitter und hinter dem Elektrometer-Verstärker

Das elektrische Ersatzschaltbild des Meßaufnehmers nach Abb. 1 ist mit der Abb. 2 gegeben. Eine Ladung Q bewegt sich mit der Geschwindigkeit v zwischen den beiden Platten eines Kondensators. Die obere dieser Platten ersetzt das Ladegitter, die im Abstand s_0 darunter liegende das Meßgitter. Dieses Meßgitter ist über den Widerstand R mit der Masse verbunden, parallel zu R liegt eine Kapazität C , die sich im wesentlichen aus der Kapazität des Meßgitters gegen Masse und der Eingangs-

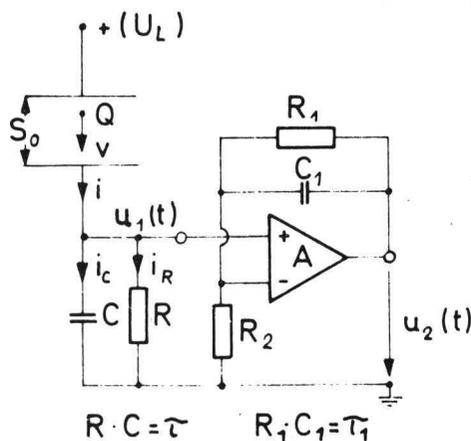


Abb. 2

kapazität des nachfolgenden Differenzverstärkers zusammensetzt. Der Differenzverstärker hat die Leerlauf-Verstärkung A und ist als Tiefpaß geschaltet. Die angegebenen Ströme i , i_c und i_R und Spannungen $u_1(t)$ bzw. $u_2(t)$ sollen sich nur auf die dynamischen Vorgänge beziehen, die mit der Bewegung der Ladung Q zwischen den Kondensatorplatten verbunden sind.

Macht man die Vereinfachungen einer punktförmigen Ladung Q und einer konstanten Geschwindigkeit v , fließt im äußeren Stromkreis während der Laufzeit $t_0 = \frac{s_0}{v}$ der Ladung zwischen den Platten ein konstanter Strom

$$i = Q \frac{v}{s_0} \quad (\text{vgl. z. B. OLLENDORF [1955, S. 23] oder SMYTHE [1950, S. 42]})$$

Es ist

$$\begin{aligned} i &= i_c + i_R \\ &= C \cdot \frac{du_1}{dt} + \frac{1}{R} u_1 = Q \frac{v}{s_0} \end{aligned}$$

Damit erhält man für das Zeitintervall $0 < t < t_0 = \frac{s_0}{v}$

$$u_1(t) = R Q \frac{v}{s_0} (1 - e^{-t/\tau}) \quad (1a)$$

$$\text{mit } \tau = R \cdot C .$$

Zum Zeitpunkt t_0 fällt der Strom i auf den Wert Null zurück, und der Kondensator entlädt sich mit der Zeitkonstanten τ über den Widerstand R .

Für den Zeitraum $t > t_0$ gilt also

$$u_1(t) = R Q \frac{v}{s_0} (1 - e^{-\frac{s_0}{v\tau}}) e^{-\frac{(t-t_0)}{\tau}} \quad (1b)$$

Vernachlässigt man den Eingangsstrom des Differenz-Verstärkers und läßt dessen Leerlaufverstärkung A auf den Wert ∞ anwachsen, gilt für das Verhältnis der Spannungen u_2 und u_1 bei der Kreisfrequenz ω

$$\frac{u_2}{u_1} = 1 + \frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{1}{1 + j\omega\tau_1} \quad \text{mit } \tau_1 = R_1 C_1 .$$

Die Verstärkung \underline{v} bei der komplexen Kreisfrequenz

$$p = \sigma + j\omega$$

beträgt damit

$$\underline{v}(p) = 1 + \frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{1}{1 + p\tau_1} .$$

Die Laplace-Transformierte der Eingangsspannung $u_1(t)$ nach den Gleichungen (1a) und (1b) erhält man über die Beziehung

$$\begin{aligned} \check{u}_1(p) &= \int_0^{\infty} u_1(t) e^{-pt} dt \\ &= \left(\frac{1}{p} - \frac{1}{p + 1/\tau} \right) (1 - e^{-pt_0}) \end{aligned}$$

Damit wird

$$u_2(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{\delta - j\infty}^{\delta + j\infty} \check{u}_1(p) \cdot \underline{v}(p) e^{pt} dp$$

Für den Zeitraum $0 < t < t_0 = \frac{s_0}{v}$ wird demnach

$$\begin{aligned} u_2(t) &= R Q \frac{v}{s_0} \left[\left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) - \left(1 + \alpha \frac{R_1}{R_2}\right) e^{-t/\tau} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\tau_1}{\tau} \alpha \cdot \frac{R_1}{R_2} e^{-t/\tau_1} \right] \end{aligned} \quad (2a)$$

und für $t > t_0$

$$\begin{aligned} u_2(t) &= R Q \frac{v}{s_0} \left[\left(1 + \alpha \frac{R_1}{R_2}\right) (e^{t_0/\tau} - 1) e^{-t/\tau} + \right. \\ &\quad \left. - \frac{\tau_1}{\tau} \alpha \frac{R_1}{R_2} (e^{t_0/\tau_1} - 1) e^{-t/\tau_1} \right] \end{aligned} \quad (2b)$$

mit

$$\alpha = \frac{1}{1 - \tau_1/\tau} \quad .$$

Es ist leicht nachzuprüfen , daß

$$\int_0^{\infty} \frac{u_1(t)}{R} dt = \int_0^{\infty} \frac{u_2(t)}{R(1 + \frac{R_1}{R_2})} dt = Q \quad (3)$$

ist.

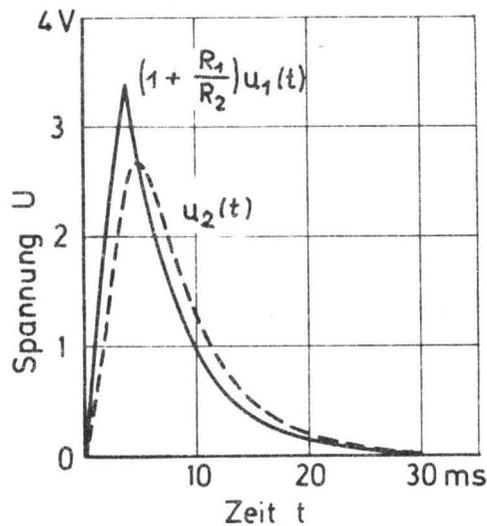


Abb. 3

In der Abb. 3 sind $(1 + \frac{R_1}{R_2}) \cdot u_1(t)$ und $u_2(t)$ für einen Tropfen mit dem Durchmesser $d = 3$ mm gezeichnet worden. Die hier angegebenen Verläufe entsprechen den tatsächlich gemessenen relativ gut. Für die Tropfen-Fallgeschwindigkeit bei $d = 3$ mm gilt bei genügend großen Fallhöhen $v = 8.06 \text{ ms}^{-1}$ (vgl. GUNN und KINZER [1949]). Als durch den Tropfen transportierte Ladung

wurde $Q = 1.5 \cdot 10^{-11}$ As angenommen. Im übrigen gelten die Werte der hier beschriebenen ersten Geräteausführung. Es ist $s_0 = 0.03$ m, $R = 10^8 \Omega$, $R_1 = 15 \cdot R_2 = 15$ k Ω , $\tau = 5$ ms und $\tau_1 = 1.5$ ms. Der Tiefpaß hat damit eine Bandbreite von 100 Hz.

Für die Impulsamplituden \hat{u}_1 bzw. \hat{u}_2 erhält man aus den Gleichungen (1) und (2)

$$\hat{u}_1 = R Q \frac{v}{s_0} (1 - e^{-t_0/\tau}) \quad (3)$$

und

$$\hat{u}_2 = R Q \frac{v}{s_0} \frac{R_1}{R_2} (e^{t_0/\tau_1} - 1) \left[\frac{(e^{t_0/\tau} - 1)}{(e^{t_0/\tau_1} - 1)} \frac{(1 + \frac{R_1}{R_2} \alpha)}{\frac{R_1}{R_2} \alpha} \right] \alpha \quad (4)$$

mit

$$t_0 = \frac{s_0}{v} .$$

In der Abb. 4 sind, ebenfalls für einen Tropfen mit dem Durchmesser $d = 3$ mm,

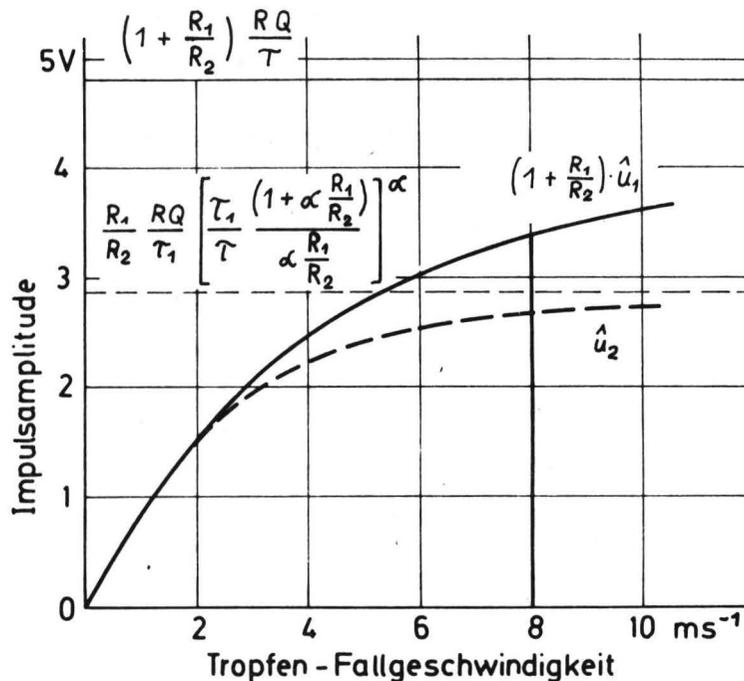


Abb. 4

$(1 + \frac{R_1}{R_2}) \hat{u}_1$ und \hat{u}_2 über der Fallgeschwindigkeit v aufgetragen. Die beiden Kurvenverläufe nähern sich für $v \rightarrow \infty$ asymptotisch den beiden, parallel zur Abszisse eingezeichneten Geraden. Die Abhängigkeit der Impulsamplitude von der Fallgeschwindigkeit wird oberhalb $v = 2 \text{ m s}^{-1}$ (diese gilt für Tropfen mit Durchmessern um 0.5 mm) durch den Tiefpaß beschränkt und ist für große Tropfen, die Geschwindigkeiten bis zu 9.2 ms^{-1} aufweisen, praktisch vernachlässigbar. Der Tiefpaß begrenzt ebenfalls die Wirkung von Störsignalen, die entweder vom Tropfenaufnehmer empfangen werden oder in ihm selbst durch Mikrophonie, d. h. durch mechanische Schwingungen der Drähte des Lade- oder Meßgitters, entstehen. Bei der Festlegung der Tiefpaß-Bandbreite muß jedoch darauf geachtet werden, daß das zeitliche Auflösungsvermögen des Eingangsverstärkers bei gegebener Auffangfläche ausreicht, die durch die einzelnen Tropfen verursachten elektrischen Impulse auch bei hohen Regenintensitäten voneinander zu trennen (vgl. auch Abschnitt 3.).

Bei der Berechnung der hier angegebenen Spannungsverläufe wurde vorausgesetzt, das Q punktförmig und die Geschwindigkeit v des Tropfens zwischen den Gittern konstant ist. Weiterhin wurde die Leerlaufverstärkung A des Differenzverstärkers als unendlich angenommen und sein Eingangsstrom vernachlässigt. Kritisch ist nur die erste dieser vier Annahmen, also die der punktförmigen Ladung. Mit ihr wurde erreicht, daß der durch Q im äußeren Stromkreis induzierte Strom i (vgl. Abb. 2) im Zeitintervall $0 < t < t_0$ als konstant angenommen werden kann. Bei einem Ladungsträger mit räumlicher Ausdehnung werden die sich auf seiner Oberfläche befindenden Teilladungen in anderer Weise gebunden als bei einer punktförmigen Ladung, was Auswirkungen auf den Zeitverlauf von i haben muß. Über die Art dieser Auswirkungen sind keine theoretisch ableitbaren Angaben möglich. Die Annahme kugelförmiger Ladungsträger würde zwar eine (wenn auch sehr aufwendige) Berechnung von $i(t)$ zulassen, jedoch würde auch dies die tatsächlichen Vorgänge nicht

exakt beschreiben, da ja die Tropfen an den feinen Drähten des Ladegitters zerschnitten werden, also sich bestenfalls in Teilkugeln zerlegt dem Meßgitter nähern (vgl. Abb. 5). Oszillogramme zeigen, daß die Spannung direkt am Meßgitter dem angegebenen Verlauf zunächst folgt. Unmittelbar vor dem Auftreffen der Tropfen auf das Meßgitter überlagert sich $u_1(t)$ nach Gl. (1 a) eine kleine Spannungsspitze (vgl. Abb. 6a). Für $t > t_0 = \frac{s_0}{v}$ gilt dann wieder $u_1(t)$ und Gl. (1 b). Die Spannungsspitze im Impulsmaximum wird durch den Tiefpaß geglättet, so daß keine sichtbaren Auswirkungen auf den Verlauf $u_2(t)$ nach Gl. (2) festzustellen sind (Abb. 6 b).

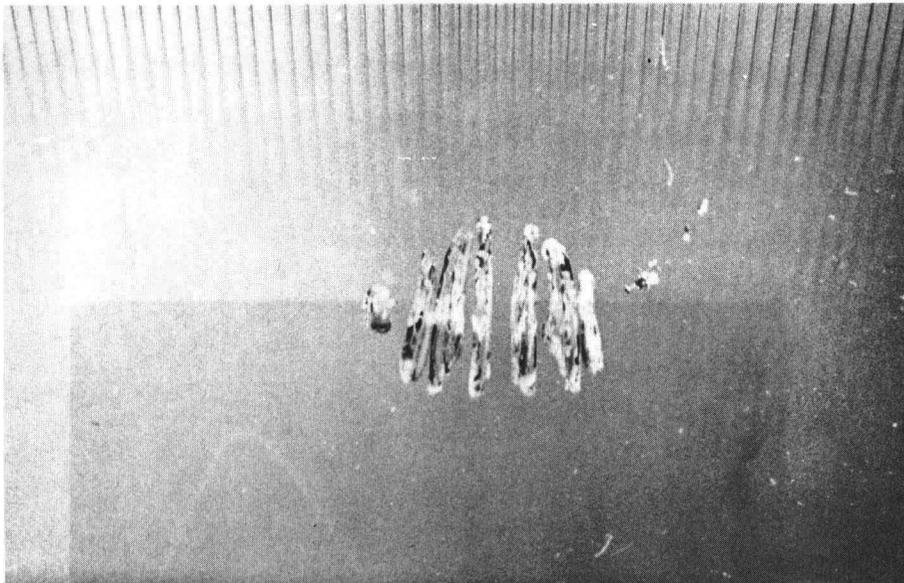


Abb. 5

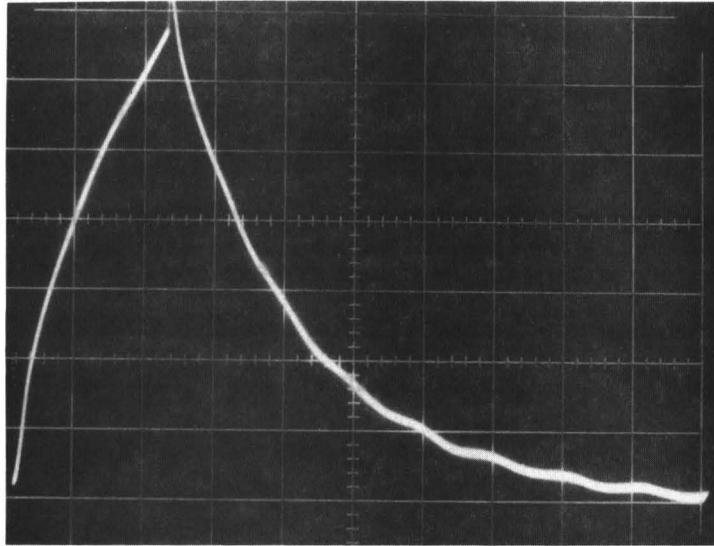


Abb. 6a

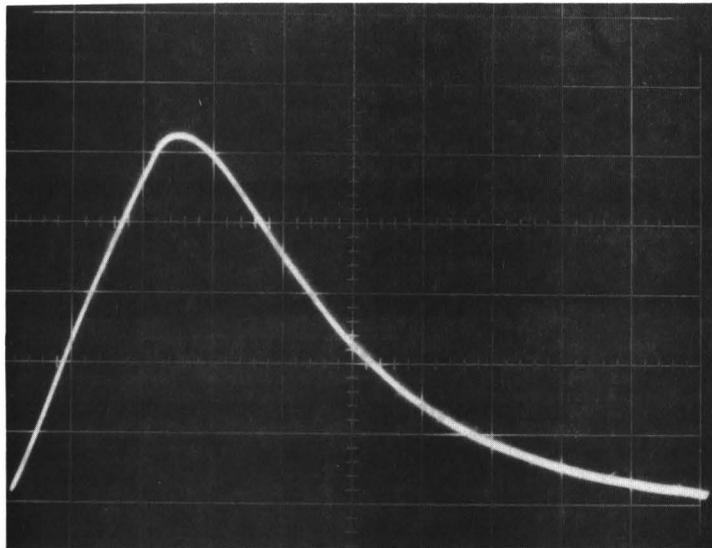


Abb. 6b

2.1.2. Ladungsaufnahme

Bei der Ableitung der Spannungsverläufe $u_1(t)$ und $u_2(t)$ wurde die Kenntnis über die Größe der durch die Tropfen jeweils am Ladegitter aufgenommenen und zum Meßgitter transportierten elektrostatischen Ladung Q vorausgesetzt. Sind C die Kapazität des Tropfens gegen das gleichspannungsmäßig an Masse liegende Meßgitter und das Gehäuse des Tropfenaufnehmers und U_L die am Ladegitter liegende Spannung, gilt für diese Ladung

$$Q = C \cdot U_L .$$

Die Proportionalität zu U_L wird durch keinerlei Störeffekte beeinflusst.

Die Zeitkonstante, mit der Q auf die Tropfen fließt, hat die Größenordnung ϵ_0/κ_w (ϵ_0 - Dielektrizitätskonstante der Luft, κ_w - Leitfähigkeit des Wassers).

Nimmt man als ungünstigsten Fall destilliertes Wasser an, beträgt

$\kappa_w = 2 \cdot 10^{-4} \Omega^{-1} m^{-1}$, womit $\epsilon_0/\kappa_w \approx 44$ ns wird. Demgegenüber beträgt für einen Tropfen mit dem Durchmesser $d = 0.5$ mm und der maximalen Fallgeschwindigkeit von etwa 2 ms⁻¹ die Verweilzeit am Ladegitter $250 \mu s$, so daß jeweils genügend Zeit vorhanden ist, um den Tropfen die ihrer Kapazität entsprechende Ladung aufzuprägen.

Schwierigkeiten bereitet die Bestimmung der Kapazität selbst. Es wurde schon darauf hingewiesen, daß die Tropfen am Ladegitter zerschnitten werden. Entscheidend für die Größe von C ist dann die geometrische Konfiguration der Tropfen in dem Moment, in dem sie bzw. ihre Teile das Ladegitter verlassen (vgl. z.B. Abb. 5). Hierüber sind keine exakten Angaben möglich. Eine erste Annäherung zur Abschätzung von C erhält man aus der Beziehung

$$C = 2 \pi \epsilon_0 d \quad (d - \text{Tropfendurchmesser})$$

Dies ist die Kapazität einer Kugel gegen eine unendlich weit entfernte Masse.

Berücksichtigt man, daß etwa die Hälfte der Tropfenoberfläche in dem Moment, in dem die Tropfen das Ladegitter verlassen, von diesem gegen Masse abgeschirmt wird, würde die Größe der aufgenommenen Ladung

$$Q = \pi \epsilon_0 d U_L$$

betragen. Für Tropfendurchmesser zwischen 0.5 und 5 mm und $U_L = 300$ V erhalte man so Ladungen zwischen $4.2 \cdot 10^{-12}$ bzw. $4.2 \cdot 10^{-11}$ As. Bei großen Tropfen ergibt diese Abschätzung vernünftige Werte, bei sehr kleinen Tropfen liegt die tatsächlich aufgenommene Ladung etwa um eine Zehnerpotenz niedriger. Die Ursache hierfür ist zur Zeit nicht geklärt.

Es ist leicht einzusehen, daß die Art der Zerteilung der Tropfen am Ladegitter von deren Fallgeschwindigkeit abhängig sein muß, womit C und damit auch Q bei gegebenem Tropfendurchmesser ebenfalls Funktionen von v werden. In den Gleichungen (1) - (4) stünde also korrekter an Stelle der Größe Q die Funktion $Q(v)$. Um auch die Größenordnung dieses Effekts anzugeben : Nach Messungen von NEUMANN [1970] beträgt bei einem Tropfen mit dem Durchmesser $d = 2.25$ mm die Ladungsänderung + 6.4 %, wenn sich die Fallgeschwindigkeit des Tropfens von 5 auf 6 m s^{-1} erhöht.

Die Art der Zerteilung der Tropfen ist bei konstanten Tropfendurchmessern und

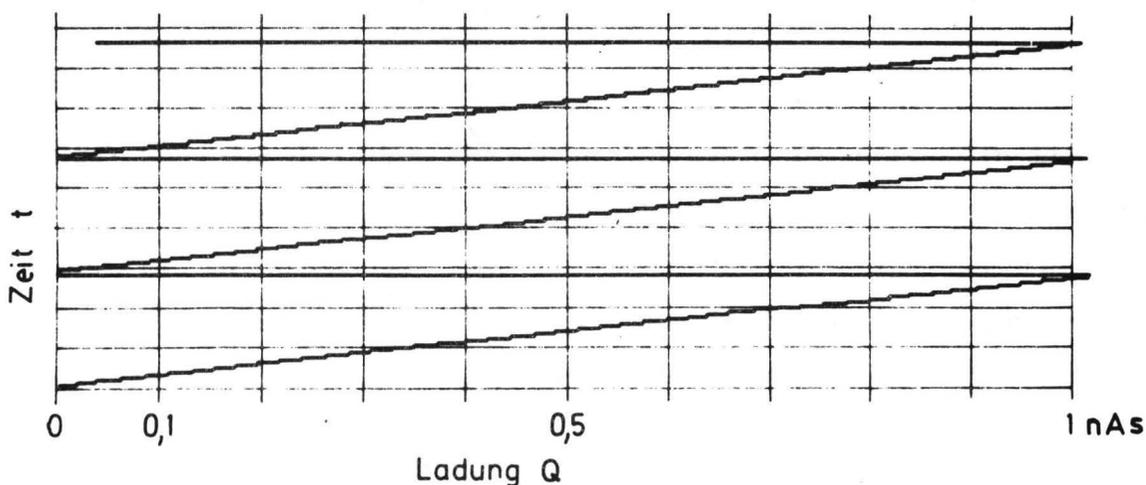


Abb. 7

konstanter Fallgeschwindigkeit sehr gleichmäßig, so daß (unter diesen Bedingungen) keine merkbaren Variationen in der Ladungsaufnahme auftreten. Das demonstriert das in Abb. 7 dargestellte Meßergebnis. Die einzelnen Stufen der drei hier registrierten Treppenkurven bezeichnen jeweils die Ladungsmenge, die ein Tropfen mit dem Durchmesser $d = 3.4 \text{ mm}$ vom Ladegitter zum Meßgitter transportiert ($U_L = 300 \text{ V}$). Der Vollausschlag beträgt (für jede dieser Kurven) $10^{-9} \text{ As} = 1 \text{ n As}$.

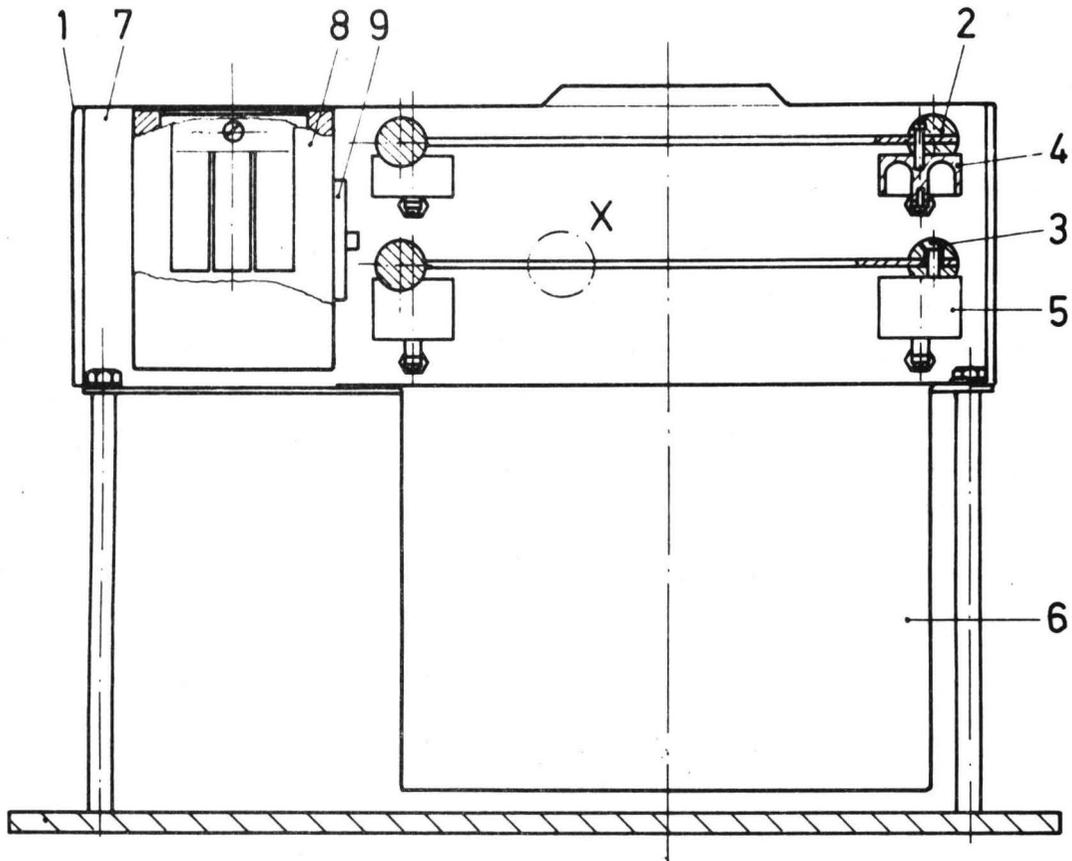
2.2. Geräteaufbau

2.2.1. Mechanischer Aufbau

An dem von SCHMIDT [1966] beschriebenen prinzipiellen Aufbau der Regenanalytoren wurde nichts geändert. Die Apparatur besteht aus dem Tropfenaufnehmer mit Lade- und Meßgitter sowie dem Elektrometer-Verstärker, einem Verbindungskabel und der in einem 19" - Gehäuse untergebrachten Auswerteeinheit. Diese enthält die Netzteile für die Stromversorgung, die Elektronik zur Impulsauswertung und einen Teil der Registriereinrichtung.

Den mechanischen Aufbau des Tropfenaufnehmers bzw. der Auffangeinrichtung zeigt die Abb. 8. In der Abdeckhaube (1) befindet sich die quadratische Auffangfläche mit einer Kantenlänge von 5 cm. Direkt darunter liegen Lade- und Meßgitter (2, 3). Ihre Abmessungen sind so, daß noch Tropfen gemessen werden können, die die Auffangfläche unter einem Winkel von 45° erreichen. Um ausreichende mechanische Stabilität und Korrosionsfestigkeit zu gewährleisten, bestehen die Gitterrahmen aus V2a - Stahl und die Gitterstäbe aus gereinigtem Wolframdraht (Drahtdurchmesser $50 \mu\text{m}$). Der Draht ist wie im Ausschnitt X der Abb. 8 über den Rahmen gespannt. Der Drahtabstand beträgt $l = 0.75 \text{ mm}$, die Versetzung der oberen Gitterdrähte gegenüber den unteren $1/2$; bei senkrechtem Fall ist dies dann auch der Durchmesser des kleinsten Tropfens, der die Gitter mit Sicherheit berührt. Unter dem Meßgitter befindet sich ein herausziehbarer Behälter (6) .

Da der Eingangswiderstand des an das Meßgitter angeschlossenen Elektrometer-



Ausschnitt X
vergrößert

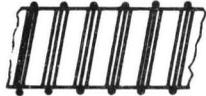


Abb. 8

Verstärkers $10^8 \Omega$ beträgt, muß der Isolationswiderstand dieses Gitters gegen den Gehäuserahmen (7) auch bei Starkregenfällen um mehr als zwei Zehnerpotenzen höher liegen. Dies wird durch die Teflon-Isolatoren (4, 5) und eine aus dem gleichen Material bestehende Durchführung (9) zum Verstärkergehäuse (8) erreicht.

Zwischen den verschiedenen Metallen des Meßgitters und des Gehäuserahmens können sich bei lang anhaltenden Regenfällen über die Isolatoren hinweg elektrochemische Elemente ausbilden. Damit liegen Gleichspannungen parallel zum Eingangswiderstand R des Elektrometer-Verstärkers, die, aufgrund der geringen Belastung durch R, zu nicht unwesentlichen Verschiebungen des Gleichspannungs-Arbeitspunkts führen. Auf eine Ausbildung möglichst langer Isolationsstrecken wurde daher besonderer Wert gelegt. Ein gleichartiger Effekt tritt auf, wenn man den Elektrometer-Verstärker über eine Lötöse mit dem Rahmen des Meßgitters verbindet. Aus diesem Grund wurde der Wolframdraht, aus dem die Gitter gewickelt werden, jeweils direkt, ohne Unterbrechung, in das Verstärkergehäuse hineingezogen. Trotz dieser Maßnahmen ist eine gleichspannungsmäßige Auftrennung zwischen dem Elektrometer-Verstärker und der Auswerteeinheit notwendig, worauf noch in folgendem Abschnitt eingegangen wird.

2.2.2. Elektrischer Aufbau

Die Abb. 9 zeigt die Schaltung des in der Auffangeinrichtung untergebrachten

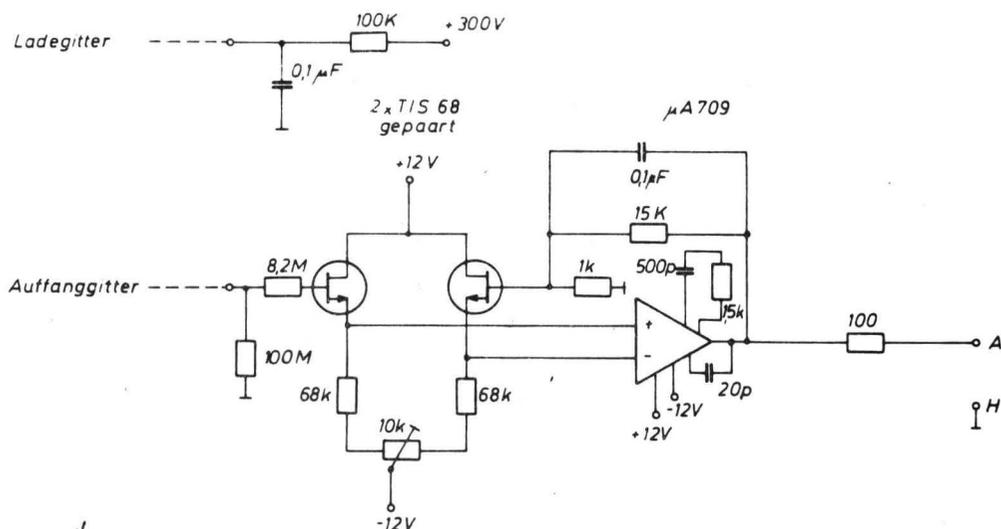


Abb. 9

Elektrometer-Verstärkers. Vor dem eigentlichen Verstärker befindet sich eine Differenzstufe aus gepaarten Feldeffekt-Transistoren, mit der der Meßwiderstand von $10^8 \Omega$ an den vergleichsweise niedrigen Eingangswiderstand des Operations-Verstärkers $\mu A 709$ angepaßt wird. Dieser hat in der angegebenen Schaltung eine Gleichspannungs-Verstärkung von $V = 16$ und eine Grenzfrequenz von 100 Hz. Der Ausgangswiderstand des Verstärkers an den Klemmen A, H liegt zwischen $250-300 \Omega$, womit eine Impulsübertragung über lange Kabel möglich ist.

Die Abb. 10 zeigt ein Blockschaltbild der gesamten Anordnung. Im Eingang der

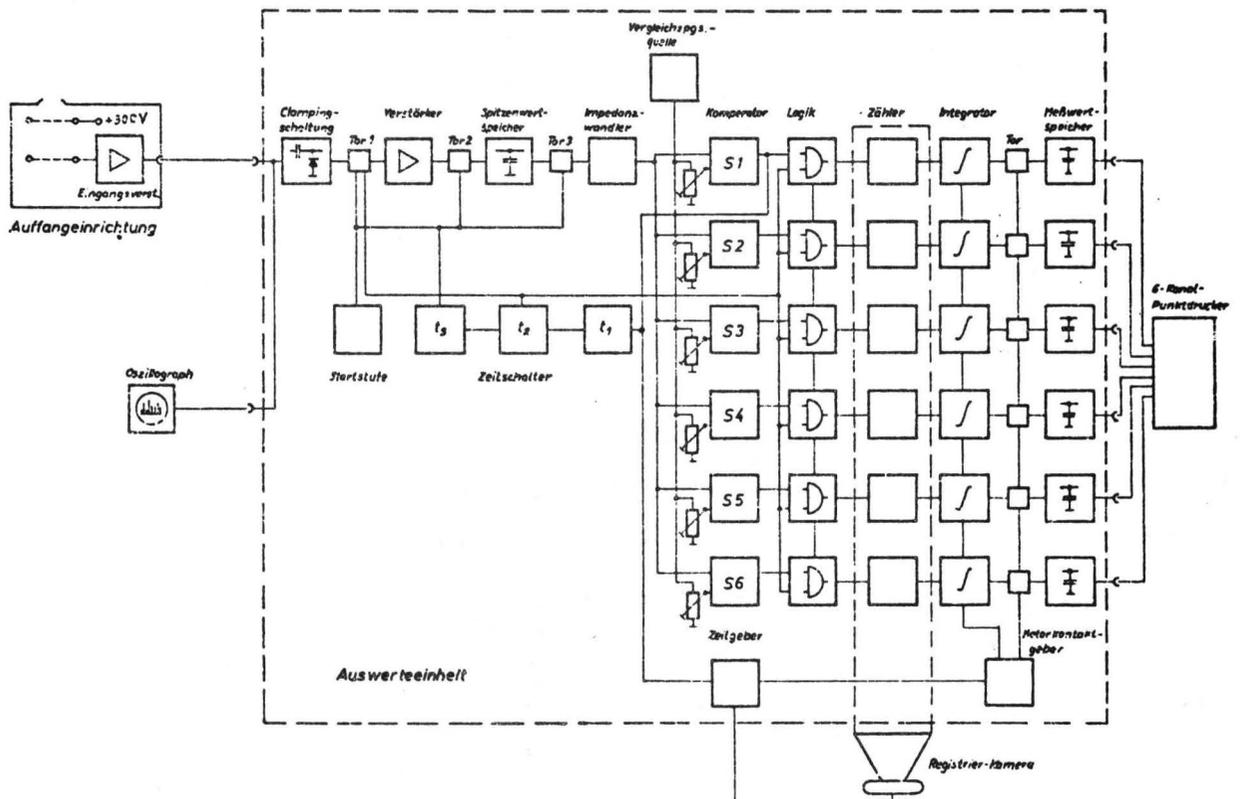


Abb. 10

Auswerteeinheit liegt eine sogenannte Clamping-Schaltung, mit der die Verbindung zur Auffangeinrichtung gleichspannungsmäßig aufgetrennt wird, und zugleich der Bezugswert " Null ", der zur Messung der Impulsamplitude benötigt wird, bei beliebigen Impulsfolgefrequenzen erhalten bleibt. Der Scheitelwert des Impulses wird im Spitzenwertspeicher festgehalten, über einen Impedanzwandler an die Eingänge der Komparatoren $S_1 - S_6$ gelegt und hier mit fest einstellbaren Bezugswerten verglichen. Diese Bezugs- oder Schwellenwerte wachsen mit der laufenden Nummer des Komparators, sie werden bei der Eichung der Geräte eingestellt. Eine nachfolgende logische Schaltung wählt den höchsten, von der angelegten Spannung überschrittenen Schwellenwert aus und legt ihn an den entsprechenden nachfolgenden elektromechanischen Zähler. Die Zählerstände werden in vorgebbaren Zeitintervallen photographisch registriert; sie können über die Kombination Integrator-Tor-Meßwertspeicher zusätzlich analog auf einem 6-Kanal-Punkt drucker ausgegeben werden, womit eine Kontrolle der laufenden Registrierung möglich wird.

Die Abb. 11 zeigt den zur Impulsregistrierung wesentlichen Teil der elektronischen Schaltung, der anhand der in Abb. 12 skizzierten Spannungsverläufe kurz erläutert werden soll. Vor dem Auftreten eines Spannungsimpulses sollen alle sechs in der Schaltung angegebenen Feldeffekt-Transistoren gesperrt sein. Tritt nun ein Impuls ähnlich U_{sig} in Abb. 12 auf, folgt die Spannung hinter dem Spitzenwertspeicher der ansteigenden Impulsspannung bis zum Maximum und bleibt dann konstant. Hinter dem ihm nachgeschalteten Impedanzwandler (Punkt A in Abb. 11) ergibt sich der Spannungsverlauf U_A der Abb. 12. Überschreitet die Spannung U_{sig} den Schwellenwert des ersten Komparators, entsteht an dessen Ausgang (Punkt B) ein Spannungssprung, mit dem der erste der drei unten in Abb. 11 eingezeichneten monostabilen Multivibratoren getriggert wird. Im Punkt C dieses Multivibrators steht für die Zeit t_1 eine positive Spannung U_C ; t_1 ist so bemessen, daß das Maximum von U_{sig} sicher erreicht wird. Hinter jedem Komparator, dessen Schwellenspannung von U_{sig} bzw. U_A überschritten wird, entsteht ein Spannungssprung wie im Punkt B. Nach der Zeit t_1 wird für die Zeit t_2 ein gleichartiger Spannungssprung

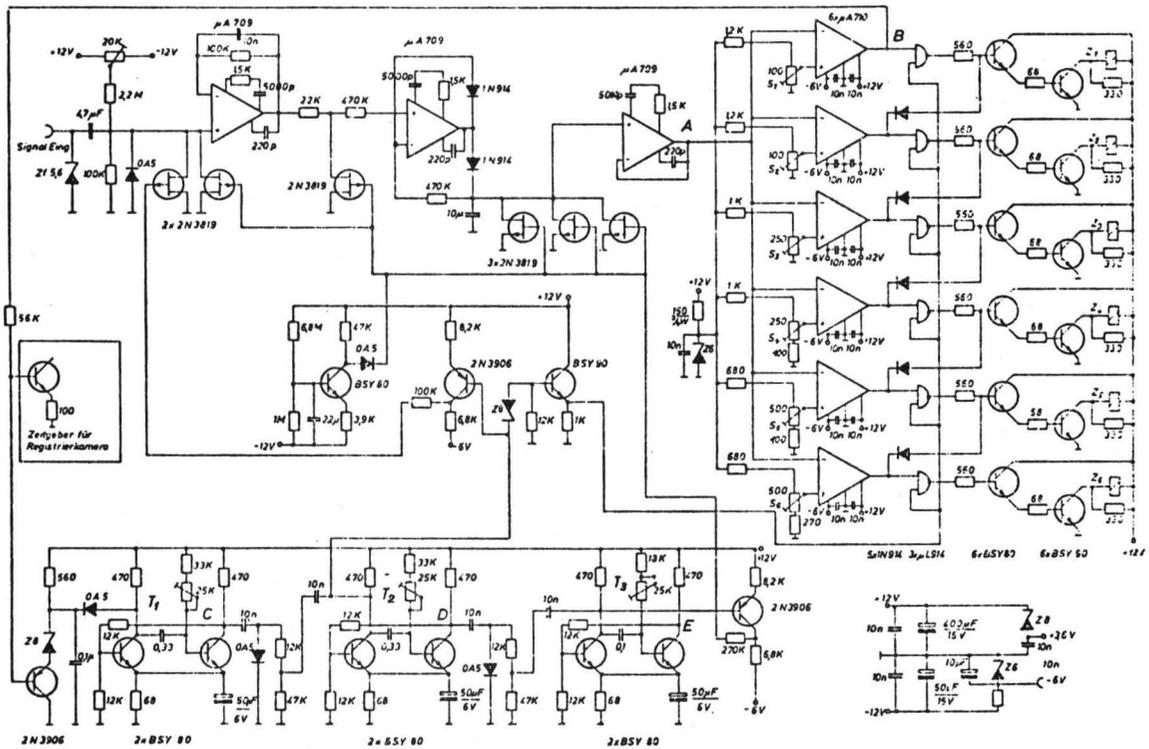
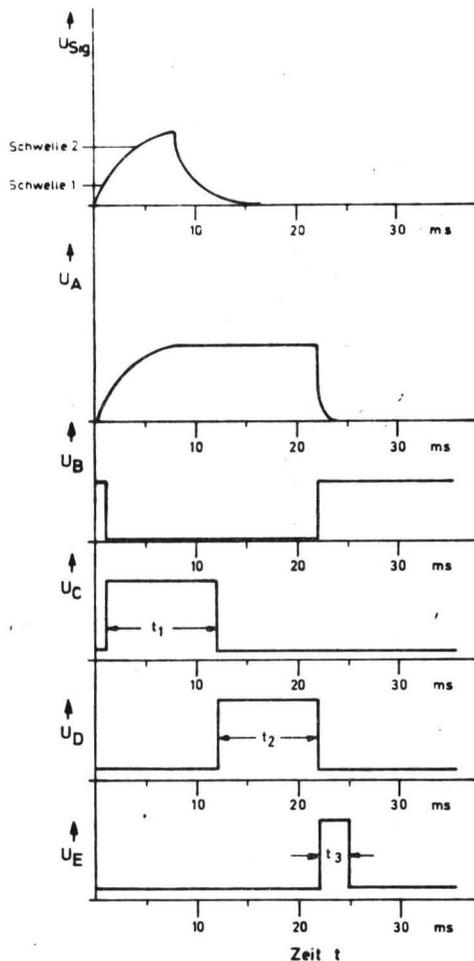


Abb. 11



Spannungsimpuls am
Signaleingang, hervorge-
rufen durch einen
Regentropfen mittlerer
Größe

Spannung nach dem
Spitzenwertspeicher
am Punkt A

Spannung nach dem
1. Komparator am Pkt. B

Spannung am 1. Multivibrator
Pkt. C

Spannung am 2. Multivibrator
Pkt. D

Spannung am 3. Multivibrator
Pkt. E

Abb. 12

von Punkt D aus auf die parallel geschalteten Eingänge der sechs NAND-Gatter hinter den Komparatoren gegeben, so daß jeweils an den Ausgängen der Gatter hinter den durchgeschalteten Komparatoren ein positiver Spannungssprung entsteht, der allerdings wegen der an den Komparator-Ausgängen angeschlossenen Dioden nur bei dem Transistor hinter dem zuletzt durchgeschalteten Komparator wirksam wird. Damit wird auch nur der diesem Transistor nachgeschaltete Zählmagnet Z für die Zeit t_2 durchgeschaltet. Nach der Zeit t_2 wird der dritte Multivibrator angesteuert, an dessen Punkt E für die Zeit t_3 ebenfalls ein positiver Spannungsimpuls entsteht. Während der Zeit ($t_2 + t_3$) wird der Signaleingang über die beiden dort liegenden Feldeffekt-Transistoren niederohmig an Masse gelegt, der Spitzenwertspeicher wird in der Zeit t_3 gelöscht. Erst danach kann ein neuer am Eingang auftretender Impuls registriert werden.

Bei der hier beschriebenen Geräteausführung addierten sich die drei Multivibrator-Schaltzeiten zu 25 ms. Diese Zeit entsprach in etwa der Dauer des längsten zu erwartenden Impulses. Miteiner sich daraus ergebenden Registrierfrequenz von 40 Tropfen pro Sekunde wurde damit gerade die maximale Zählgeschwindigkeit der elektromechanischen Zähler erreicht.

Nach der Gl. (3) des Abschnitts 2.1.1. gilt

$$\frac{1}{R \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)} \int_0^{\infty} u_2(t) dt = Q$$

- R Meßwiderstand
- $\left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)$ Gleichspannungsverstärkung des Elektrometer-Verstärkers
- $u_2(t)$ Spannungsverlauf am Signaleingang der Auswerteeinheit aufgrund des Transports von Q zwischen Lade- und Meßgitter.

Ein auf dieser Beziehung beruhendes elektronisches Auswerteverfahren wurde [1970] von NEUMANN entwickelt. Die Tropfenimpulse werden hierbei bis zum Impulsmaximum integriert. Die Restfläche zwischen $t_0 = \frac{s_0}{v} < t < \infty$ wird jeweils aus dem Impulsmaximum und den Gerätekonstanten errechnet und zur ersten Teil-

fläche hinzuaddiert. Bei diesem Verfahren wird also Q direkt gemessen, womit die in der Gl. (2 b) des Abschnitts 2.1.1. enthaltene Abhängigkeit von der Tropfenfallgeschwindigkeit eliminiert wird. Gleichzeitig wird eine Meß- und Registrierzeit pro Impuls von 25 ms eingehalten. Das Verfahren ist elektronisch sehr aufwendig. Da, wie im Abschnitt 2.1.1. beschrieben, Q tatsächlich eine Funktion nicht nur der Tropfengröße sondern auch der Tropfengeschwindigkeit ist, und dieser Anteil der Geschwindigkeits-Abhängigkeit so nicht erfaßt werden kann, wurde von diesem Verfahren kein Gebrauch gemacht.

2.3. Eichung

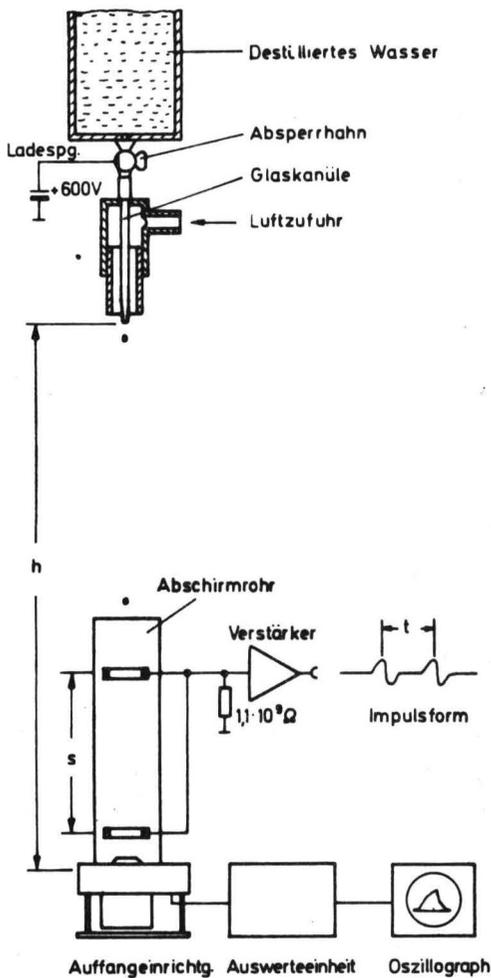


Abb. 13

Zur Eichung der Geräte wurde ein von GUNN et al. [1949] angegebenes Verfahren benutzt. Mit ihm können auch Tropfen mit Durchmessern < 1 mm erzeugt werden, deren Größe kann bestimmt werden, ohne daß Verdunstungseffekte berücksichtigt werden müssen, und schließlich ist kontrollierbar, ob die Tropfen ihre Endfallgeschwindigkeit erreicht haben. Die Abb. 13 zeigt den Eichmeßaufbau. Die Tropfen fallen aus der Höhe h in die Auffangeinrichtung. Sie werden mit Hilfe einer Glaskanüle (bei größeren Tropfen genügen Injektionskanülen) erzeugt, die in einem in seiner Intensität regelbaren Luftstrom liegt. Bei Tropfen mit Durchmessern > 2 mm wurde die Tropfengröße über das Gewicht von mindestens

20 aufgefangenen Tropfen bestimmt. Kleinere Tropfen werden in einem Ölbad (Diffilen) aufgefangen und dort sofort mit einem weichen Pinsel unter die Öloberfläche getaucht. Das sehr saubere, durchsichtige Öl bewahrt die Tropfen vor dem Verdunsten und läßt die Durchmesser-Bestimmung unter einem Meßmikroskop zu.

Wie aus der Abb. 13 zu ersehen ist, transportieren die Tropfen aufgrund der an die Abtropf-Einrichtung angelegten Ladenspannung jeweils eine elektrostatische Ladung. Fallen sie durch die beiden ringförmigen, im Abstand s voneinander angebrachten Elektroden im Abschirmrohr, werden in diesen Spannungen der skizzierten Form erzeugt. Über die Messung von t kann dann die mittlere Geschwindigkeit der Tropfen vor ihrem Auftreffen auf das Ladegitter bestimmt werden. Die Fallhöhe wurde jeweils so gewählt, daß die von GUNN et al. angegebenen

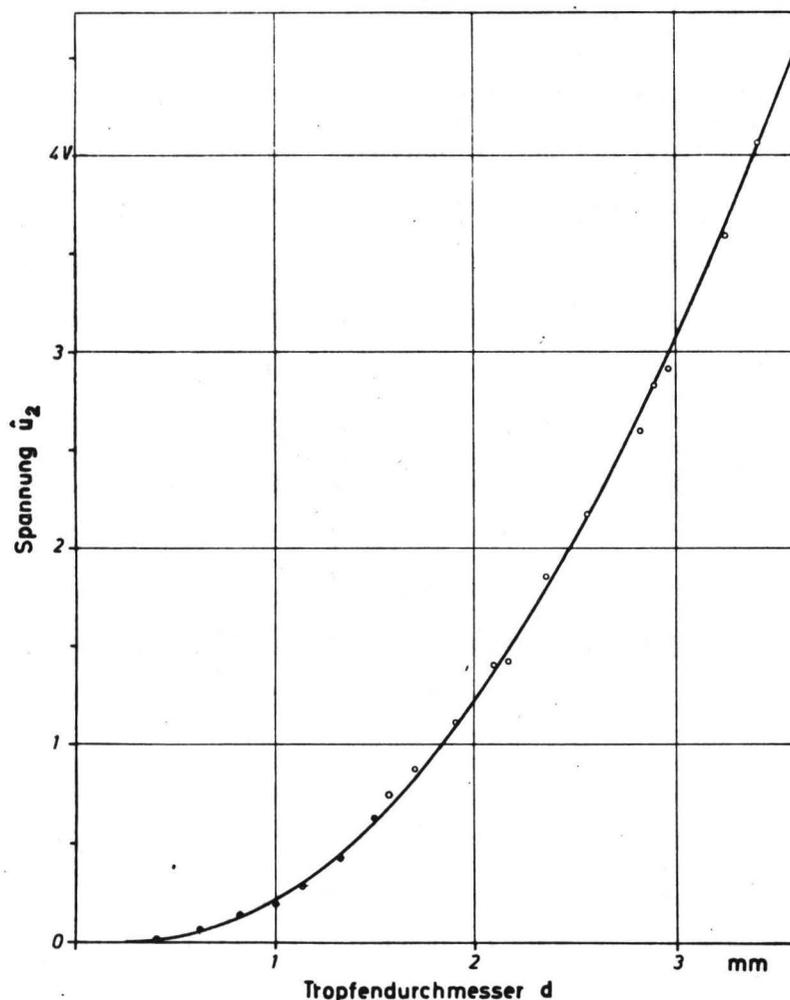


Abb. 14

Endgeschwindigkeiten der Tropfen erreicht waren.

Das hier beschriebene Verfahren funktioniert außerordentlich problemlos und zuverlässig. Die Abb. 14 zeigt mit den dort eingetragenen Meßpunkten das Ergebnis. Für die eingezeichnete Parabel gilt die Beziehung

$$\frac{U}{V} = 0.0474 - 0.2341 \frac{d}{\text{mm}} + 0.4104 \left(\frac{d}{\text{mm}} \right)^2 .$$

Sie ist gültig für den Bereich $0.3 \text{ mm} < d < 5 \text{ mm}$ und wurde nach der Methode der kleinsten quadratischen Abweichungen bestimmt. Es ist darauf hinzuweisen, daß derartige Parabeln nur dann für mehrere Geräte vom gleichen Typ gelten, wenn die in Gl. 2.1.1.(2) enthaltenen Konstanten des mechanischen und elektrischen Aufbaus sorgfältig aufeinander abgestimmt wurden.

3. Diskussion des Meßverfahrens

Die Bestimmung der Tropfengrößen im Regen mit Hilfe der Regenanalysatoren ergibt nach unseren Erfahrungen zuverlässige und gut reproduzierbare Ergebnisse. Die erste dieser beiden Feststellungen gilt, nachdem mit der im Abschnitt 2.3. beschriebenen Eichmethode nach GUNN et al. ein Verfahren gefunden wurde, mit dem der Zusammenhang zwischen der Tropfengröße und der Impulsamplitude eindeutig festgelegt werden kann. Die Geräte sind unempfindlich gegen Verschmutzung, haben keine Verdunstungs- sowie nur sehr geringe Benetzungsverluste und arbeiten ohne Anzeigeverzögerung. Die Temperaturabhängigkeit in der Funktionsweise der verschiedenen elektronischen Bauelemente führt nicht zu entscheidenden Meßfehlern, und die beschriebenen Einflüsse der Tropfen-Fallgeschwindigkeit auf die Größe der Impulsamplituden erbringen für eine Reihe von Anwendungen kaum Nachteile.

Die Geräte können nicht eingesetzt werden, wenn Tropfen gemessen werden sollen, deren Durchmesser d wesentlich unter dem Abstand der Gitterdrähte, also unterhalb 0.325 mm , liegt. Es ist wohl möglich, diesen Abstand weiter zu verkleinern (Versuche wurden nicht durchgeführt). Irgendwann werden aber

die Tropfen eine so geringe kinetische Energie haben, daß sie im Ladegitter hängen bleiben. Bei Messungen, bei denen die Geräte mechanischen Erschütterungen ausgesetzt sind, die zu Mikrophonie führen (etwa bei Windstößen), oder bei denen elektrische Störungen über den Tropfenaufnehmer zur Auswerteeinheit gelangen, wird es notwendig, den Durchmesser des kleinsten meßbaren Tropfens höher zu legen, um Fehlregistrierungen zu vermeiden. Bei Langzeitregistrierungen im Freien sollten aber noch Tropfen mit $d = 0.5$ mm bei einigem Aufwand zuverlässig erfassbar sein. Für unsere über den Zeitraum eines Jahres laufenden Untersuchungen wurden die Geräte so eingestellt, daß Tropfen mit $d \geq 0.75$ mm erfaßt wurden. Das war eine Vorsichtsmaßnahme, da zu Beginn dieser Untersuchungen kaum Erfahrungen mit den Geräten vorlagen. Die so entstehenden mittleren Fehler bei der Berechnung der Regenintensität aus den gemessenen Spektren lassen sich relativ einfach über die Tropfengrößen-Verteilung nach LAWS und PARSONS [1943] abschätzen. Sie betragen bei der Intensität $R = 0.25 \text{ mm h}^{-1}$ 25 %, bei 5 mm h^{-1} 4.7 % und liegen für $R \geq 10 \text{ mm h}^{-1}$ unter 2.5 %.

Eine wesentliche Frage ist, welchen statistischen Aussagewert die gemessenen Spektren haben. Es wurde schon in der Einleitung darauf hingewiesen, daß dieser bei Messungen mit den Regenanalytoren oder mit ähnlichen Geräten, bei denen mit relativ kleinen Meßvolumen oder Meßflächen Stichproben aus der jeweils vorliegenden Tropfengrößen-Verteilung genommen werden, stark begrenzt wird durch die Eigenschaften des Regens selbst. In diesem Zusammenhang wurde u. a. angeführt, daß die Tropfenfolge im Regen statistischen Gesetzen unterliegt, die den Vertrauensbereich derartiger Meßergebnisse einschränken. Nach Untersuchungen von SASYO [1965] sind die Abweichungen der in einem Volumen vorhandenen Tropfenzahlen von dem jeweiligen Mittelwert poisson-verteilt, d. h. die Varianz der Tropfen-Anzahl entspricht ihrem Mittelwert. U. a. von JOSS und WALDVOGEL [1967, 1969] wurden die Konsequenzen dieser Tatsache auf die statistische Relevanz der mit verschiedenen Meßmethoden zur Bestimmung der Tropfengrößen-Verteilung im Regen erzielten Meßergebnisse un-

tersucht. Das Folgende hält sich relativ eng an ihre Darstellung des Problems.

Die mittlere Zahl \bar{z}_i der Tropfen mit dem Radius innerhalb des Bereichs $r_i \pm \frac{\Delta r_i}{2}$ soll für das Volumen V durch die Tropfengrößen-Verteilung nach MARSHALL und PALMER [1948] beschrieben sein (diese Verteilung ist eine exponentielle Näherung der schon zitierten LAWS - und PARSONS-Verteilung) . Damit gilt

$$\bar{z}_i = V N_0 \exp \left[- 8.2 \left(\frac{R}{\text{mmh}^{-1}} \right)^{-0.21} \frac{r_i}{\text{mm}} \right] \Delta r_i \quad (1)$$

mit $N_0 = 16 \cdot 10^3 \text{ m}^{-3} \text{ mm}^{-1}$. R ist die Regenintensität.

Wie bereits erwähnt ist nach SASYO die Wahrscheinlichkeit dafür, daß sich bei \bar{z}_i im Mittel vorhandenen Tropfen tatsächlich z_i Tropfen im betrachteten Volumen befinden, durch die Poisson-Verteilung gegeben. Es ist also

$$W (z_i) = \frac{\bar{z}_i^{z_i}}{z_i !} e^{-\bar{z}_i} \quad (2)$$

mit der Varianz

$$\sigma_i^2 = \bar{z}_i$$

und der Standardabweichung

$$\sigma_i = \sqrt{\bar{z}_i} \quad .$$

Für große \bar{z}_i geht die Poisson-Verteilung in die Normal-Verteilung über. Nach der Definition für die Standardabweichung (oder den Standardfehler) werden dann die aus einer Grundgesamtheit mit dem Mittelwert \bar{z}_i genommenen

Meßwerte in annähernd 68 % der Fälle innerhalb der Grenzen $\bar{z}_i \pm \sigma_i$ liegen.

Bezieht man σ_i auf \bar{z}_i erhält man den relativen Standardfehler

$$\frac{\sigma_i}{\bar{z}_i} = \frac{1}{\sqrt{\bar{z}_i}},$$

für V in Gl. (1) gilt

$$V = F \cdot t \cdot v(r_i)$$

(F - Meßfläche, t - Meßzeit, $v(r_i)$ Fallgeschwindigkeit der Tropfen mit dem Radius r_i), hiermit läßt sich schreiben

$$\frac{\sigma_i}{\bar{z}_i} = \frac{1}{\sqrt{\bar{z}_i}} \sim \frac{1}{\sqrt{F \cdot t}} \quad (3)$$

Soll aus einer gemessenen Zahl der Tropfen in einer Größenklasse i mit einem relativen Standardfehler von weniger als 33 % auf den tatsächlichen Mittelwert der Grundgesamtheit geschlossen werden können, so besagt die Gl. (3) zunächst, daß dies nur dann möglich ist, wenn in der entsprechenden Klasse i im Mittel 10 oder mehr Ereignisse (bzw. Tropfen) auftreten. Will man die Messung der Tropfengrößen-Verteilung nicht nur auf Regenfälle hoher Intensität beschränken, muß das Meßsystem selbst entsprechend ausgelegt werden, was, gemäß der obigen Beziehung, auf dreierlei Art geschehen kann,

1. über eine Erweiterung der Klassenbreite Δr_i , in der die Tropfen gezählt werden,

2. über eine Verlängerung der Meßzeit t

und 3. über eine Vergrößerung der Meßfläche F .

Zu 1.

Es ist offensichtlich, daß Δr_i nicht beliebig groß gemacht werden kann, da mit der Vergrößerung des Radiusintervalls, in dem die Häufigkeit des Auftretens

von Tropfen beobachtet wird, ein Anwachsen der Ungenauigkeit in der Größenbestimmung selbst verbunden ist. Üblich ist z. B. bei der Filterpapiermethode die Auszählung in den folgenden 12 Durchmesser-Bereichen : 0 - 0,75 mm, 0,75 (0,25) 2,50 (0,50) 4,00 mm und > 4 mm (vgl. DIEM [1967]). Bei unseren Untersuchungen wurde der Bereich oberhalb $d = 0,75$ mm in 6 Größenklassen aufgeteilt, was sich bis zu Regenintensitäten von etwa 10 mm h^{-1} als angemessen, darüber hinaus aber als Fehlerquelle erwies. (Bei einer Regenintensität von 25 mm h^{-1} ist z. B. bei der Berechnung von R aus den gemessenen Spektren mit einem mittleren Fehler von $- 10 \%$ zu rechnen). Der Grund dafür ist, daß gemäß Gl. (1) mit den höheren Intensitäten größere Tropfendurchmesser verknüpft sind, also der gesamte zu erfassende Tropfengrößenbereich zunimmt.

Nach unseren Erfahrungen wäre eine analoge Registrierung der Tropfengrößen mit anschließender Anpassung des Auswertemodus an die jeweilige mittlere Regenintensität optimal. In den meisten Fällen werden hierfür jedoch nicht genügend Speicherplatz und Rechenzeit zur Verfügung stehen. Bei unserer neuesten im Abschnitt 5, beschriebenen Geräteausführung wird eine Auszählung der Tropfen in 16 Klassen ab $d = 0,5$ mm vorgenommen. Für bestimmte Untersuchungen können dann je nach errechneter Regenintensität zwei oder mehr Klassen zusammengefaßt werden.

Zu 2.

Die Meßzeit, für die die Verteilungsdichte bestimmt werden kann, wird begrenzt durch die zeitliche Inhomogenität des Regens. Nach unseren Erfahrungen erscheint eine Begrenzung von t auf 60 s als nicht unvernünftig, was nicht heißen soll, daß sich nicht auch während dieses Zeitintervalls wesentliche Änderungen in der Verteilungsdichte ergeben können.

Zu 3.

Einer wesentlichen Vergrößerung der Meßfläche bei den Regenanalytoren steht entgegen, daß bei gegebener Regenintensität die Wahrscheinlichkeit dafür zunimmt,

daß sich mehrere Impulse überlagern und so Fehlmessungen entstehen. (Dies gilt ähnlich auch für einen großen Teil der in der Einleitung skizzierten Meßverfahren). Eine Abschätzung darüber, mit welcher mittleren Impulsfolgefrequenz bei $R = 100 \text{ mm h}^{-1}$ und einer Meßfläche von 25 cm^2 zu rechnen ist, wurde bereits von LAMMERS [1969] gegeben. Setzt man in Gl. (1)

$$V = F \cdot t \cdot v(r_i)$$

und bildet das Integral über alle Tropfengrößen zwischen r_{\min} und ∞ , erhält man die Gesamtzahl der Tropfen \bar{Z} , die (in diesem Größenbereich) im Mittel während der Zeit t auf die Fläche F fallen. Es ist also

$$\bar{Z} = F \cdot t \cdot N_0 \int_{r_{\min}}^{\infty} \exp \left[-8.2 \left(\frac{R}{\text{mmh}^{-1}} \right)^{-0.21} \frac{r}{\text{mm}} \right] v(r) dr \quad (4)$$

Mit $v(r)$ nach GUNN et al. [1949] kann Gl. (4) numerisch ausgewertet werden.

Für verschiedene Regenintensitäten sind in der Tabelle 1 die Werte für \bar{Z} angegeben worden, und zwar für $F = 25 \text{ cm}^2$ sowie $t = 1 \text{ s}$ und 25 ms . ($F = 25 \text{ cm}^2$ ist die Meßfläche und $t = 25 \text{ ms}$ die Meß- und Registrierzeit für einen Tropfen bei der hier beschriebenen Geräteausführung).

\bar{Z} für $F = 25 \text{ cm}^2$

$\frac{R}{\text{mm h}^{-1}}$	$t = 1 \text{ s}$		$t = 25 \text{ ms}$		$\frac{W}{F} \%$
	$r_{\min} = 0$	$r_{\min} = 0.25 \text{ mm}$	$r_{\min} = 0$	$r_{\min} = 0.25 \text{ mm}$	
6.25	9.9	6.0	0.25	0.15	1.1
12.50	13.1	8.8	0.33	0.22	2.0
25.00	17.4	12.6	0.44	0.32	4.0
50.00	23.0	17.7	0.58	0.44	8.2
100.00	30.1	24.4	0.75	0.61	12.5

Tabelle 1

Bei Vernachlässigung aller durch Tropfen mit $d < 0.5$ mm verursachten Spannungsimpulse ist also z. B. bei einer Regenintensität von 50 mm h^{-1} im Mittel mit 0.44 Tropfen im Zeitintervall von 25 ms zu rechnen. Abweichungen von dieser mittleren Tropfen-Folgefrequenz werden, wie bereits erwähnt, durch die Poisson-Verteilung nach Gl. (2) beschrieben. Hieraus bestimmt sich auch, mit welcher Wahrscheinlichkeit mehr als 1 Tropfen in 25 ms bei den in der Tabelle angegebenen Mittelwerten auftreten. Bezeichnet man diese "Fehlwahrscheinlichkeit" mit W_F , gilt für ganzzahlige Z

$$\begin{aligned} W_F &= \sum_{Z=2}^{\infty} W(Z) \\ &= 1 - W(0) - W(1) \end{aligned} \tag{5}$$

Die entsprechenden Werte für W_F sind ebenfalls in der Tabelle 1 angegeben. Bei $R = 50 \text{ mm h}^{-1}$ ist also damit zu rechnen, daß in 8.2 % der Fälle mehr als 1 Tropfen während der Zeit, die zu seiner Registrierung benötigt wird, auftritt. -

Abschätzungen, wie sie oben mit Gl. (3) für den relativen Standardfehler bei der Messung der Tropfenzahl in einer bestimmten Größenklasse i gemacht wurden, lassen sich auf Größen (wie z. B. die Regenintensität) erweitern, die aus einer gemessenen Tropfengrößen-Verteilung errechnet werden sollen (vgl. JOSS et al.). Auch die hierbei auftretenden Standardfehler sind der Größe $\frac{1}{\sqrt{F \cdot t}}$ proportional. Bei den Regenanalysatoren betrug bei einer Meßzeit von $t = 60 \text{ s}$ $F \cdot t = 0.15 \text{ m}^2 \text{ s}$. Die sich hier aus ergebenden relativen Standardfehler $\frac{\sigma_R}{R}$ bei der Bestimmung der Regenintensität zeigt die Tabelle 2. Um diese Fehler zu halbieren, muß die Auffangfläche vervierfacht werden, wie das bei der im Abschnitt 5. beschriebenen neuesten Geräteausführung getan wurde. Gleichzeitig mußte allerdings auch

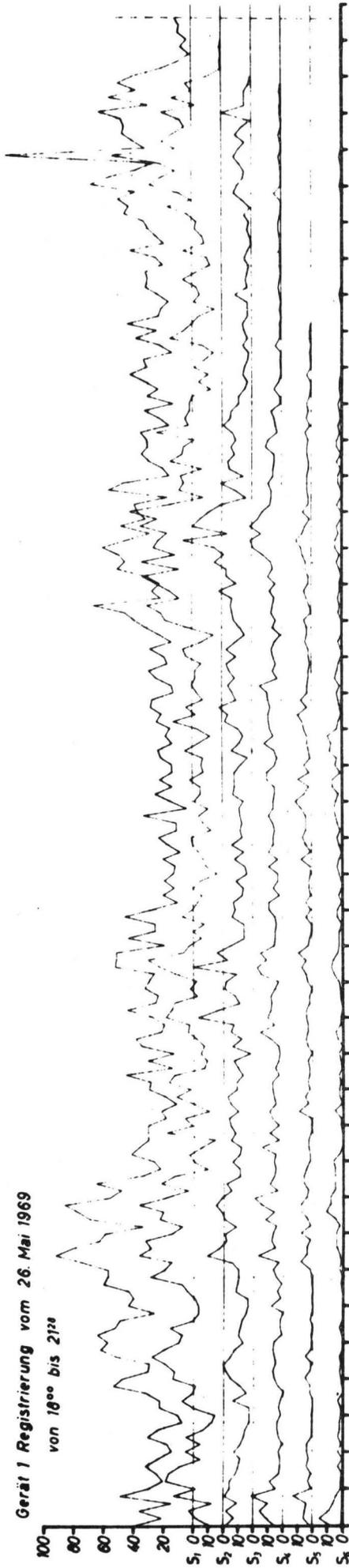
das zeitliche Auflösungsvermögen der Geräte wesentlich gesteigert werden, um die in Tabelle 1 angegebenen Fehlwahrscheinlichkeiten in etwa einzuhalten.

$\frac{R}{\text{mm h}^{-1}}$.25	1.25	2.5	5.	12.5	25	50.	100.
$\frac{\sigma_R}{R}$ in %	22.6	16.1	14.	12.2	10.2	8.9	7.8	6.9

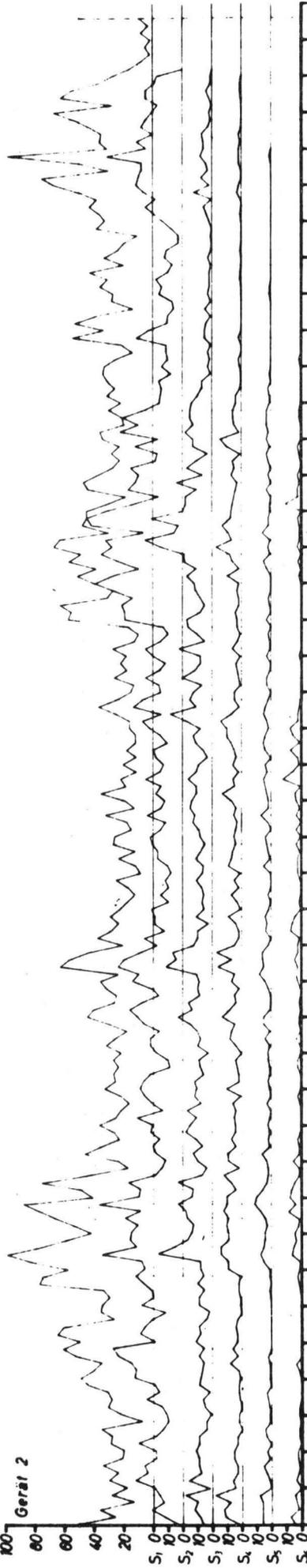
Tabelle 2

Wie Meßergebnisse mit den Regenanalysatoren aussehen können, wenn allein die im zweiten Teil dieses Abschnitts diskutierten statistischen Abweichungen der tatsächlich meßbaren Tropfengrößen-Verteilung im Regen von ihrem Mittelwert wirksam werden, zeigt die Abb. 15. Dargestellt ist hier eine 3 1/2-stündige Registrierung mit drei Geräten, die in einem gegenseitigen Abstand von 0.5 m aufgestellt waren. In der Abszisse ist die Meßzeit aufgetragen, in den Ordinaten die pro Minute und Größenklasse gemessenen Tropfenzahlen. Der besseren Übersicht wegen wurden die Klassen $S_6 - S_1$ jeweils um 20 Tropfen gegeneinander versetzt eingetragen. Für die Eichung der 6 Größenklassen gilt (bei S_1 angefangen) $d = 0.75$ (0.25) 1 (0.5) 3 mm und > 3 mm. Diese Messung wurde durchgeführt, um zu testen, ob die Geräte in ihrer Eichung übereinstimmten. Das Ergebnis war, daß die Abweichungen der mit den drei Geräten gemessenen Tropfenzahlen von den jeweiligen Mittelwerten in jeder der sechs Klassen die Annahme einer Poisson-Verteilung bestätigen. Die maximale Regenintensität während der Registrierzeit betrug ca. 12 mm h^{-1} . Es ist zu erkennen, wie sich z. B. um 20¹⁰ und 20²⁰ Uhr die Tropfengrößen-Verteilung kurzzeitig wesentlich ändert. Die Besetzung von S_2 überschreitet die von S_1 um 20.

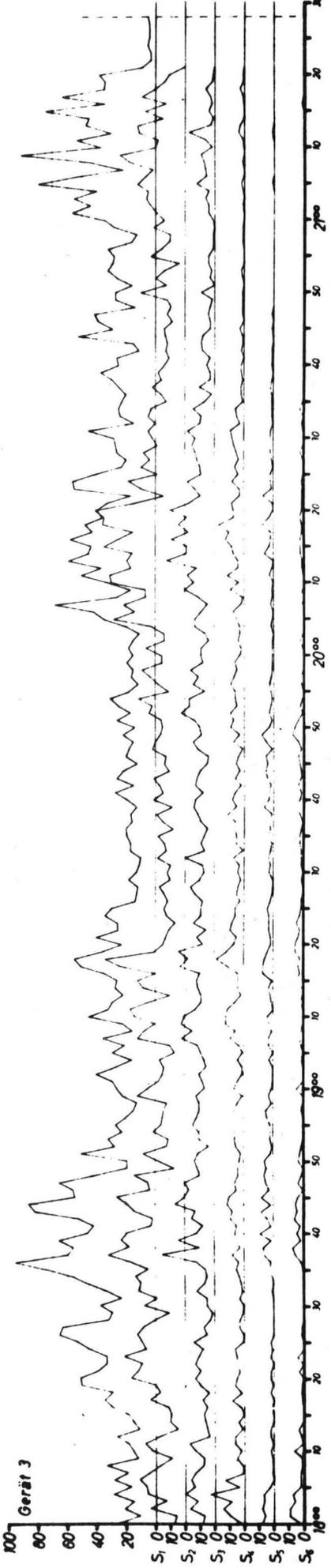
Gerät 1 Registrierung vom 26. Mai 1969
von 18⁰⁰ bis 21³⁰



Gerät 2



Gerät 3



4. Meßergebnisse

Dieser Abschnitt enthält nur eine relativ kurze Zusammenfassung der im Rahmen dieses Berichts interessierenden Ergebnisse aus den schon erwähnten Untersuchungen zur Dämpfung sehr kurzer elektromagnetischer Wellen durch Regen, die zwischen dem Juli 1969 und Juli 1970 an unserem Institut durchgeführt wurden. Die Auswerteverfahren, auf denen diese Ergebnisse beruhen, werden jeweils nur kurz angedeutet. Eine eingehendere Diskussion des Aussagegewerts dieser Verfahren, ihre Grenzen sowie die mit ihnen verbundenen Annahmen findet sich bei SANDER [1972].

Den Meßaufbau für die Untersuchungen zeigt die Abb. 16. Die Meßstrecke verlief in einer Höhe von 60 m über dem Erdboden. Sie wurde von den HF-Signalen zweifach durchlaufen, mehr zum Prinzip der 52, 90.8 und 150 GHz Sende- und Empfangsanlagen interessiert für das Folgende nicht. Unter der Meßstrecke befanden sich drei Meßstellen zur Erfassung der Regenintensität und der Tropfengrößen-Verteilung. Die Anordnung dieser Meßstellen nach Abb. 16 ist nicht optimal, konnte aber wegen der örtlichen Verhältnisse nicht besser gewählt werden.

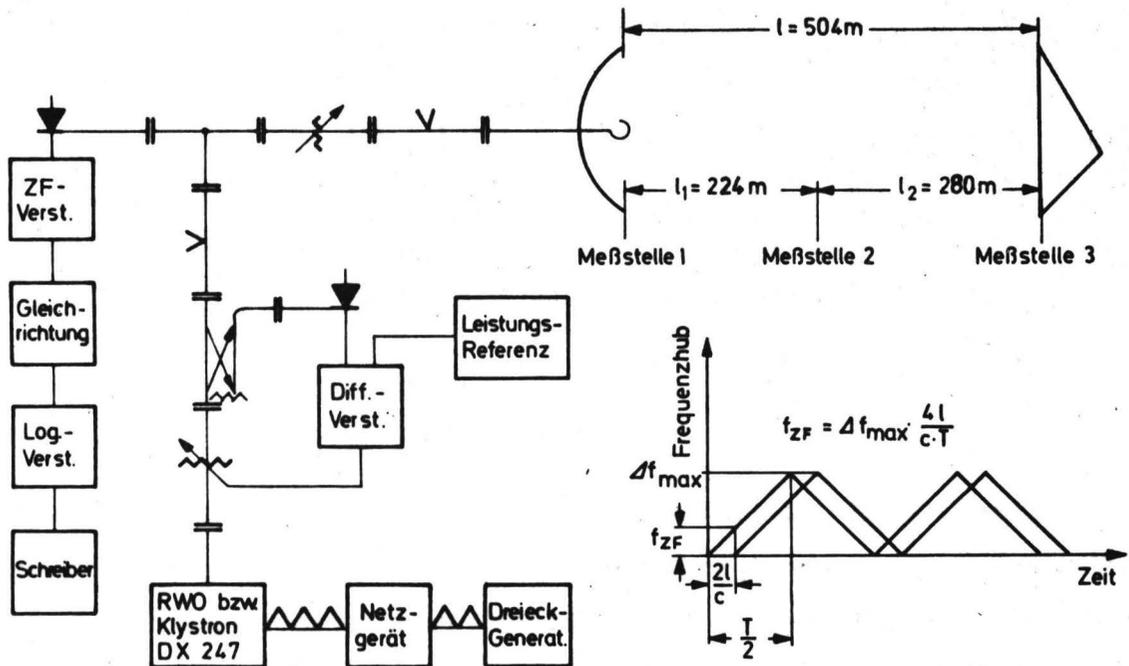


Abb. 16

An jeder der Meßstellen stand neben dem Regenganalysator ein Niederschlagsmesser nach Hellmann (Hellmannschreiber), der im Vergleich zu der auch vom Deutschen Wetterdienst benutzten Standardausführung mit einer auf 1000 cm^2 vergrößerten Auffangfläche und einem auf die Netzfrequenz synchronisierten 1 Stunden-Umlauf ausgestattet war.

Ausgewertet wurden ca. 60 Stunden mit Regen. Hierbei wurden die jeweils in 60 s - Abständen gemessenen Dämpfungen bis 52, 90.8 und 150 GHz sowie die über 60s - Intervalle um diese Meßzeitpunkte gemittelten Regenintensitäten und Tropfengrößen-Verteilungen miteinander korreliert. Berücksichtigt wurden alle die Meßwerte, bei denen ein Versagen der entsprechenden Geräte nicht eindeutig nachgewiesen werden konnte, eine spezielle " Ausreißer " - Theorie wurde also nicht verwendet.

4.1. Korrelation zwischen den mit den Hellmannschreibern und Regenganalysatoren gemessenen Regenintensitäten

Der Korrelationskoeffizient (r_{korr}) von n Wertepaaren x_i, y_i einer normal verteilten, zweidimensionalen Grundgesamtheit berechnet sich nach der Beziehung

$$r_{\text{korr}} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right]^{1/2}} \quad (1)$$

mit $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_i$ und $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum y_i$.

Für das Folgende ist $x_i = R_H$, das ist die an einer der drei Meßstellen über das Zeitintervall von 60s mit einem Hellmannschreiber gemessene Regenintensität, und $y_i = R_A$ die an der gleichen Meßstelle und über das gleiche Zeitintervall mit einem Regenganalysator ermittelte Intensität. R_H und R_A haben die Dimension mm h^{-1} .

r_{korr} wurde jeweils für zusammenhängende Meßstunden berechnet, wenn hier 50 und mehr Meßwertepaare vorlagen. Zur Verdeutlichung zeigt die Abb. 17 zwei Rechnerausdrucke. Im oberen Bild entspricht dem Zahlenwert 50 an Abszisse und Ordinate eine Regenintensität von 2.5 mm h^{-1} , im unteren Bild beträgt die maximale Regenintensität 25 mm h^{-1} . Die Meßpunkte sind als Kreuze eingetragen. MD ist die Zahl der Doppelpunkte in einer Reihe. Die gepunktet eingezeichnete Gerade ist die Korrelationsgerade. Nach der Theorie sollen 90 % der Meßpunkte innerhalb der angedeuteten Ellipse liegen (vgl. z. B. HALD [1962] ab Seite 585).

Die nach Gl. (1) errechneten Korrelationskoeffizienten wurden nach der Größe der in den entsprechenden Meßzeiten mit den Analysatoren im Mittel festgestellten Regenintensität \bar{R}_A ($\hat{=} YAV$ in den Rechnerausdrucken) geordnet, transformiert nach der Beziehung

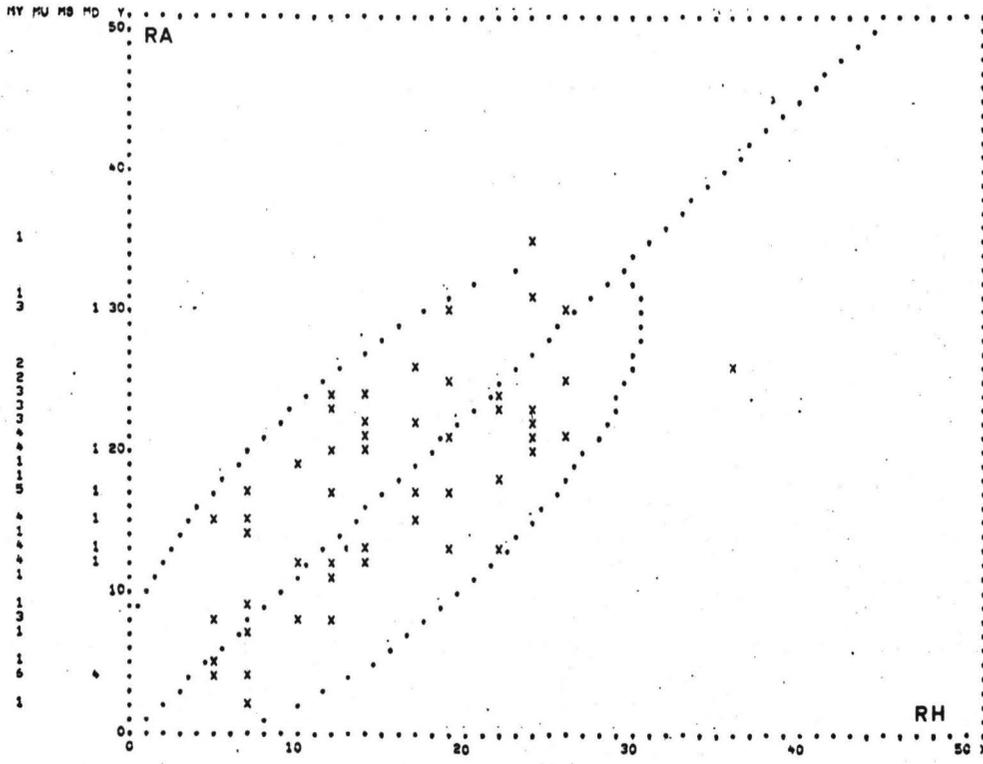
$$r'_{\text{korr}} = \frac{1}{2} \ln \frac{r_{\text{korr}}^{-1}}{r_{\text{korr}} + 1} \quad (2)$$

und dann in 6 Intensitätsbereichen gemittelt. (Mit der Transformation wurde berücksichtigt, daß die r'_{korr} annähernd normalverteilt sind [HALD 1962, S. 608].) Nach einer Rücktransformation erhält man für die mittleren Korrelationskoeffizienten in Abhängigkeit von \bar{R}_A die Werte der Tabelle 3.

\bar{R}_A in mm h^{-1}	\bar{r}_{korr}	Zahl der Meßstunden
0 - 0.25	0.62	10
0.25 - 0.50	0.71	8
0.50 - 0.75	0.82	11
0.75 - 1.00	0.79	13
1.00 - 2.50	0.87	9
> 2.50	0.95	8

Tabelle 3

INTERVALLGRENZEN 2881 2940
ZAHL DER MERKEPAARE MXY= 60
KORR-KOEFF. RCORR= .7575
MITTELWERTE XAV= .7440 YAV= .8359
PARAMETER DER 90-PROZENT-ELLIPSE
AXA= 1.0932 AXB= .4037 TGBETA= 1.1317 AXX= 3.8128 AYY= 3.1605 AXY=-2.6297 VX= 12.0520 VY= 13.2375
XMAX= 2.5000 YMAX= 2.5000 SCALY= 20.0000



INTERVALLGRENZEN 3001 3060
ZAHL DER MERKEPAARE MXY= 60
KORR-KOEFF. RCORR= .9747
MITTELWERTE XAV= 5.3860 YAV= 5.6212
PARAMETER DER 90-PROZENT-ELLIPSE
AXA= 12.6963 AXB= 1.4372 TGBETA= 1.0162 AXX= .2490 AYY= .2413 AXY= -.2389 VX=137.7065 VY=139.8808
XMAX= 25.0000 YMAX= 25.0000 SCALY= 2.0000

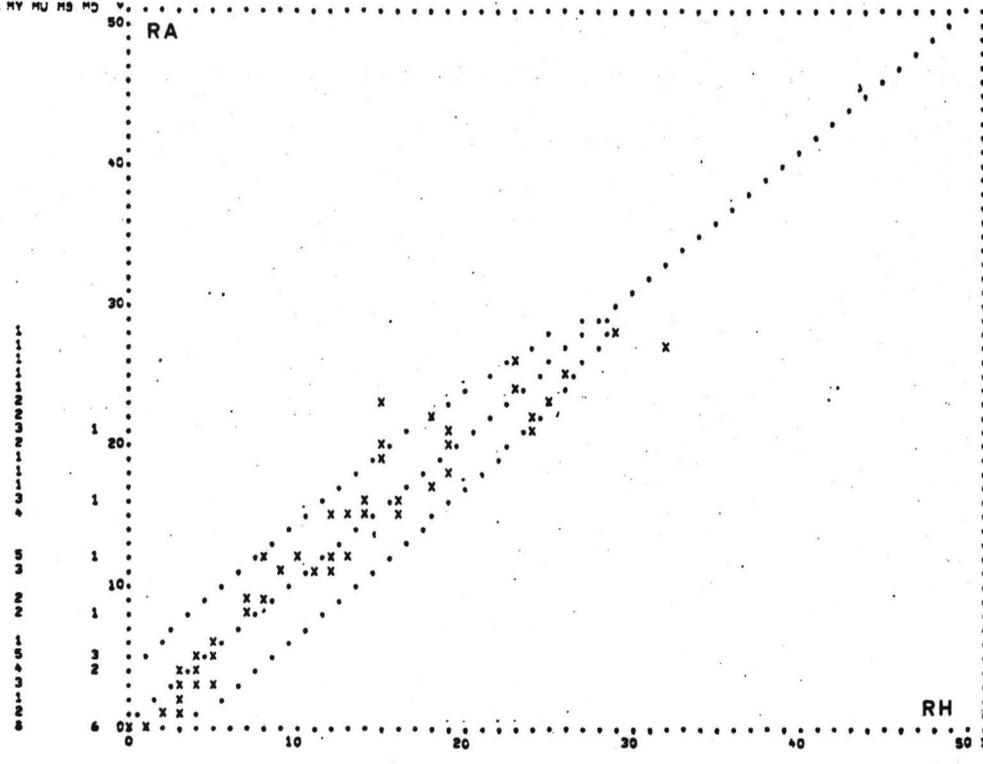


Abb. 17

Das Anwachsen des mittleren Korrelationskoeffizienten mit \bar{R}_A war nach den Ausführungen im zweiten Teil des Abschnitts 3. zu erwarten (vgl. z.B. die Tabelle 2). Die Werte zeigen, daß die beiden Ausdrücke der Abb. 17 für die gemessenen Verhältnisse typisch sind.

Mit der Anordnung der drei Meßstellen nach Abb. 16 und den dort in Minutenabständen gemessenen Regenintensitäten R_1 , R_2 und R_3 wird die mittlere Intensität auf der Meßstrecke

$$R = \frac{l_1 R_1 + (l_1 + l_2) R_2 + l_2 R_3}{2 l} \quad (3)$$

In den folgenden Darstellungen der Meßergebnisse sind R_H und R_A die nach dieser Beziehung bestimmten und mit den Hellmannschreibern bzw. Regenanalysatoren gemessenen Regenintensitäten, es wurden also nur Ergebnisse berücksichtigt, bei denen alle drei Meßgrößen R_1 , R_2 und R_3 vorlagen.

In der Abb. 18 sind die während der experimentellen Untersuchungen zur Regendämpfung gleichzeitig ermittelten R_H - und R_A - Werte für $R_H, R_A \geq 0.2 \text{ mm h}^{-1}$ als Meßpunkte eingetragen. Die Achsenteilung ist logarithmisch, die Anzahl der Meßpunkte beträgt 775. Zusätzlich eingezeichnet wurde die theoretische 45° -Gerade (die Steigung der Korrelationsgeraden beträgt 43.6°). Der Korrelationskoeffizient beträgt bei einem Ausgleich in der logarithmischen Ebene 0.86 und bei einem linearen Ausgleich 0.88, er wird also in der logarithmischen Ebene etwas unterschätzt.

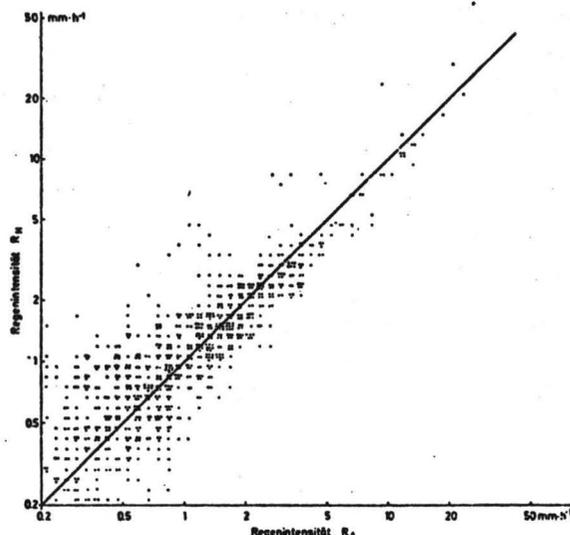


Abb. 18

4.2. Korrelation zwischen den gemessenen Dämpfungs-Koeffizienten bei 52, 90.8 und 150 GHz und den zur gleichen Zeit mit den Hellmannschreibern und Regenanalysatoren ermittelten Regenintensitäten

Aus den Angaben der Tabelle 3 und der Abb. 18 ist zwar zu ersehen, daß die Hellmannschreiber und Regenanalysatoren im Mittel gleiche Ergebnisse bringen, es ist aber nicht zu entscheiden, welches der beiden Geräte zur Bestimmung der Regenintensität geeigneter ist. Dies wird erst möglich durch zusätzliche Korrelationen mit den gleichzeitig bei 52, 90.8 und 150 GHz gemessenen Dämpfungskoeffizienten. Der Grad dieser Korrelationen braucht nicht in der gleichen Größenordnung zu liegen, wie der zwischen R_H und R_A , da Dämpfungskoeffizienten und Regenintensität nur mittelbar miteinander verbunden sind.

Einen Eindruck von der Art des Zusammenhangs zwischen den Dämpfungskoeffizienten und der Regenintensität geben die Abbildungen 19 und 20. In diesen "Korrelogrammen" werden die bei 90.8 GHz ($\lambda = 3.3$ mm) mit den Hellmannschreibern und den Regenanalysatoren gemessenen Abhängigkeiten einander gegenübergestellt (R_H und R_A nach Gl. 4.1. (3)). Die Teilung der Achsen ist wiederum logarithmisch. Mit den beiden parallelen, gestrichelt gezeichneten Geraden wurden jeweils die theoretischen Grenzen minimaler und maximaler Dämpfung über der (als richtig gemessen betrachteten) Regenintensität angegeben. Die zwischen diesen beiden Geraden verlaufende, gestrichelt gezeichnete Kurve beschreibt den theoretischen Zusammenhang zwischen D und R bei der Annahme der Tropfengrößen-Verteilung nach LAWS et al. [1943]. Die beiden durchgezogen eingezeichneten Kurvenverläufe sind aus den Meßdaten bestimmte Regressionskurven, ihr Abstand ist ein Maß für den Grad der Korrelation.

Die Zahl der Meßpunkte liegt in den Diagrammen $D - R_A$ um ca. 23 % höher als in den Darstellungen $D - R_H$. Dies ist im wesentlichen auf die unterschiedliche Meßwerterfassung bei den Hellmannschreibern und Regenanalysatoren zurück-

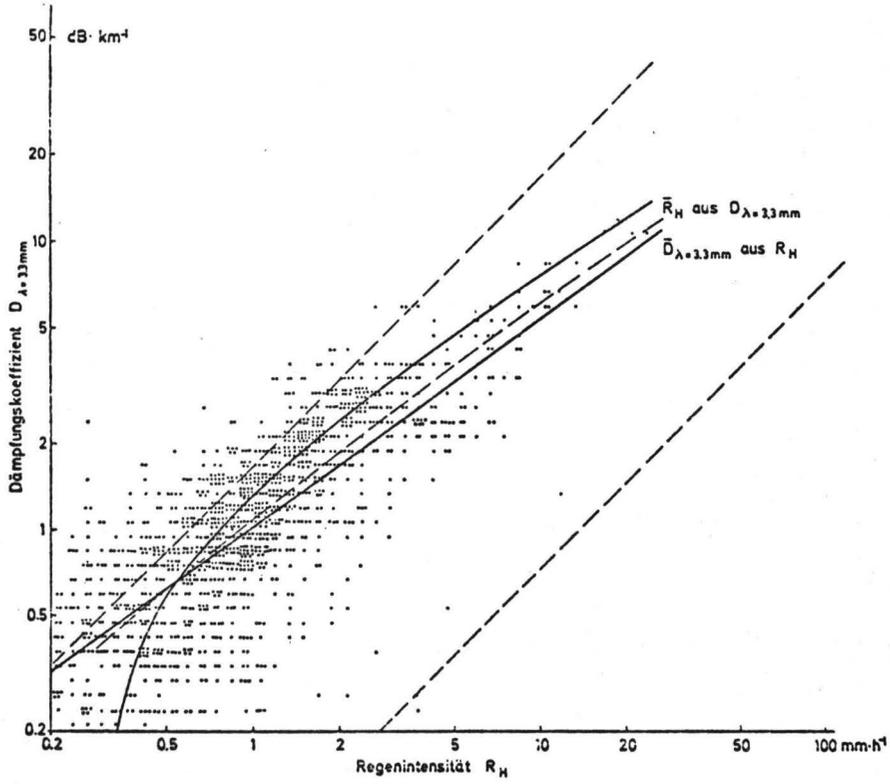


Abb. 19

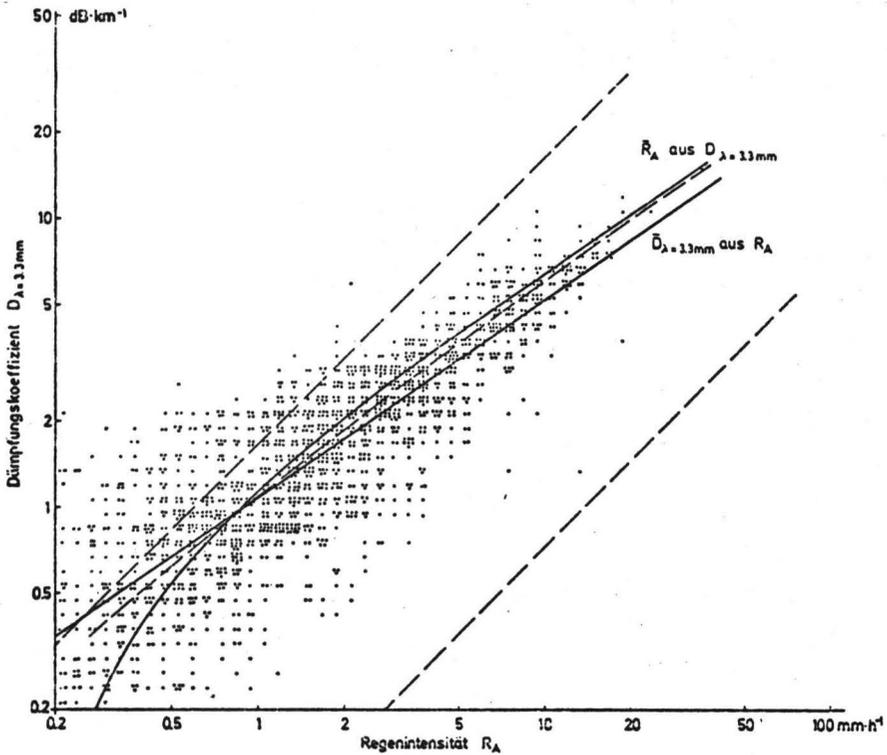


Abb. 20

zuführen : An sehr windigen Tagen oder bei mehrere Stunden lang anhaltenden Regenfällen waren die Registrierstreifen der Hellmannschreiber denen der anderen Geräte nicht immer eindeutig zuzuordnen.

Um einen zahlenmäßigen Vergleich der Korrelationsunterschiede zwischen den beiden hier gezeigten Diagrammen und denen bei den beiden anderen Frequenzen zu ermöglichen, wurden in der Tabelle 4 die entsprechenden Korrelationskoeffizienten angegeben. $r_{\text{korr s}}$ ist dort der sogenannte Spearman'sche Rangkorrelations-Koeffizient (vgl. z. B. VAN DE WAERDEN [1965]) . Er ist im Vergleich zu r_{korr} nach Gl. 4.1. (1) nicht an lineare Abhängigkeiten zwischen beiden Meßgrößen gebunden, unabhängig vom Maßsystem und relativ unempfindlich gegen " Ausreißer ". Im Fall einer zweidimensionalen Normalverteilung und bei großen Stichprobenumfängen geht $r_{\text{korr s}}$ in r_{korr} über.

Korrelation zwischen	$r_{\text{korr s}}$
$D_{\lambda} = 5.77 \text{ mm u. } R_H$	0.78
$D_{\lambda} = 5.77 \text{ mm u. } R_A$	0.83
$D_{\lambda} = 3.3 \text{ mm u. } R_H$	0.78
$D_{\lambda} = 3.3 \text{ mm u. } R_A$	0.84
$D_{\lambda} = 2 \text{ mm u. } R_H$	0.64
$D_{\lambda} = 2 \text{ mm u. } R_A$	0.75

Tabelle 4

Die Tabelle 4 demonstriert (wie auch die Abbildungen 19 und 20), daß mit den Regenganalysatoren offensichtlich bessere Korrelationen erzielt wurden

als mit den Hellmannschreibern. Die Gründe hierfür dürften hauptsächlich in dem vergleichsweise langsamen zeitlichen Auflösungsvermögen der Hellmannschreiber und in ihren relativ hohen Benetzungsverlusten zu suchen sein.

4.3. Mit den Regenanalysatoren im Untersuchungszeitraum gemessene mittlere Tropfengrößen-Verteilung im Regen

Unsere Untersuchungsergebnisse zum Zusammenhang Dämpfungskoeffizient - Regenintensität wiesen auf eine der LAWS - und PARSONS - Verteilung ähnliche mittlere Tropfengrößen -Verteilung während des Untersuchungszeitraumes hin. Dies war über die mit den Regenanalysatoren gemessenen Spektren zu bestätigen.

Mit der Bezeichnung $R_{L.P.}$ für die Regenintensitäten, bei denen die gesuchte mittlere Verteilung mit der LAWS - und PARSONS - Verteilung verglichen werden sollte, wurden aus dem Kollektiv der Meßwertepaare $D - R_A$ diejenigen Intensitäten herausgesucht, für die gilt $R = R_{L.P.} \pm 10\%$. Hierbei wurden die an den 3 Meßstellen der Versuchsstrecke ermittelten Regenintensitäten getrennt bewertet. Die diesen Intensitäten zugrunde liegenden Tropfenspektren wurden gemittelt und auf die Verteilungsdichte im Volumen über den Meßstellen umgerechnet über die Beziehung

$$n(d_i) = \frac{1}{F \cdot t} \cdot \frac{\bar{N}_i}{\Delta d_i \cdot v_i} \quad (1)$$

\bar{N}_i ist die bei $R_{L.P.} \pm 10\%$ ermittelte mittlere Tropfenzahl in der Größenklasse i . Δd_i ist die Klassenbreite, d_i der mittlere Tropfendurchmesser der in ihr gezählten Tropfen und v_i deren Fallgeschwindigkeit nach GUNN et al. [1949]. $F \cdot t$ ist das Produkt aus Auffangfläche und Meßzeit für die Analysatoren.

Die gemessenen Verteilungsdichten wurden in der Abb. 21 der LAWS- und PARSONS -

Verteilung gegenübergestellt. Rechts oben im Diagramm ist

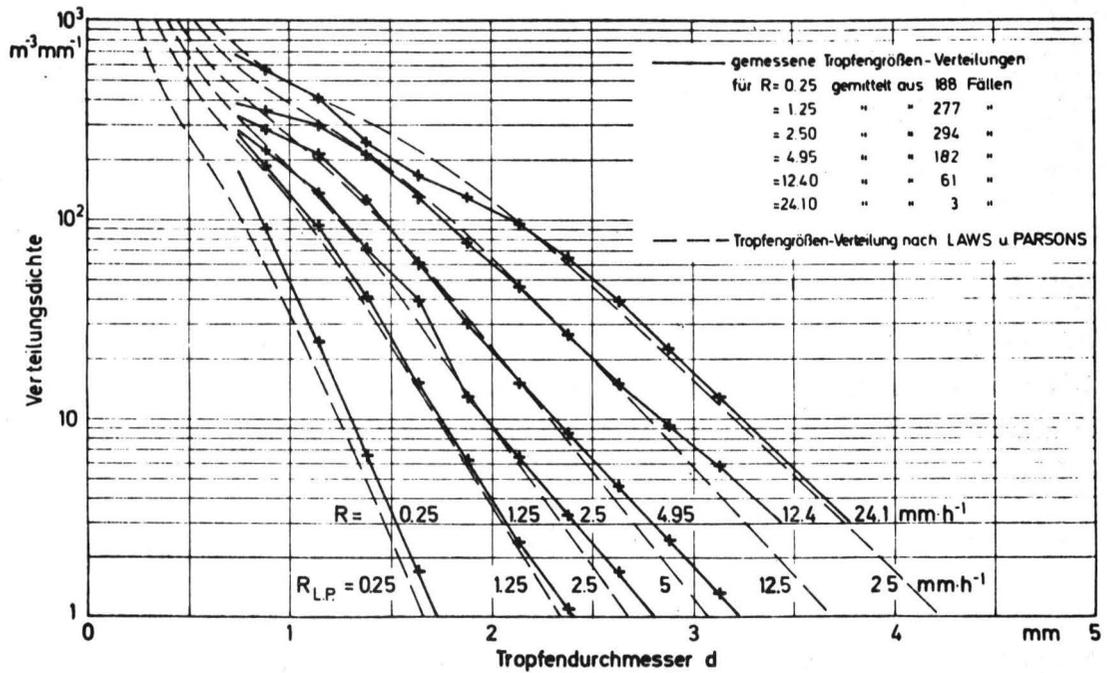


Abb. 21

die Anzahl der Fälle angegeben, aus denen sie errechnet wurden. Sie wurden in diese Darstellung jeweils mit 10 Meßpunkten eingetragen und nicht mit 6, wie nach der Anzahl der Größenklassen zu erwarten gewesen wäre, da die Analytoren nach etwa der Hälfte der Meßperiode umgeëicht wurden, um eine gleichmäÙigere Besetzung der einzelnen Größenklassen zu erreichen. Um das Gesamt-Mittel zu erhalten, waren also zwei Teilverteilungen miteinander zu verbinden, wobei die in Abb. 21 erscheinenden d_i -Werte willkürlich gewäht werden konnten.

Die Differenz zwischen der gemessenen und der LAWS- und PARSONS-Verteilung bei $R = 0.25 \text{ mm h}^{-1}$ ist auf die schon im Abschnitt 3, erwähten Fehler bei der Berechnung der Regenintensität durch Vernachlässigung der Tropfen mit Durchmessern $< 0.75 \text{ mm}$ zurückzuführen. Bei hohen Regenintensitäten macht sich u. U. die geringe Zahl der Größenklassen bemerkbar. Im übrigen ist natürlich nicht zu erwarten, daß beide Verteilungen deckungsgleich sind. Wie schon in der Einleitung erwäht, wurde die LAWS- und PARSONS-Verteilung mit einem Verfahren ermittelt, bei dem die durch das Auftreffen der Regentropfen auf

eine Mehlschicht entstehenden Kugeln getrocknet und danach mit Sieben in verschiedene Größengruppen getrennt wurden. Das Verfahren war hierbei nur für Tropfendurchmesser ≥ 1.19 mm geeicht, die Eichwerte für kleinere Tropfen wurden extrapoliert. So gesehen ist die in Abb. 21 demonstrierte Übereinstimmung eher überraschend. Sie gibt einen weiteren Anhaltspunkt für die Berechtigung der Vermutung von LAWS et al., daß die von ihnen gemessene Beziehung zwischen dem mittleren Tropfendurchmesser und der Regenintensität allgemein gültig sein könnte, wobei bei kurzzeitigen Messungen mit erheblichen Abweichungen von diesen Mittelwerten gerechnet werden müsse.

5. Neueste Geräteausführung

Die im Abschnitt 3, beschriebenen Zusammenhänge zwischen der Meßgenauigkeit der Analysatoren und dem Produkt Meßfläche \times Meßzeit sowie die in den Abschnitten unter 4. dargestellten Untersuchungsergebnisse haben gezeigt (und es wurde schon mehrfach darauf hingewiesen), daß eine Verbesserung der ersten Geräteausführung vorwiegend in zwei Punkten wünschenswert wäre: Einmal sollte die Anzahl der Klassen erhöht werden, in denen die Tropfen gezählt werden, zum anderen müßte versucht werden, die Auffangfläche selbst zu vergrößern.

Die Erfüllung der ersten dieser beiden Forderungen ist kein Problem, die in der Abb. 11, Seite 21 , gezeigte elektronische Auswerteschaltung ist beliebig zu erweitern. Schwieriger ist es, die Auffangfläche zu vergrößern. Hierbei muß die Konstruktion der Meß- und Ladegitter geändert werden, um ihre ursprüngliche Spann-Festigkeit zu erhalten, darüber hinaus ist die Zeitdauer der Spannungsimpulse herabzusetzen, um die in der Tabelle 1, Seite 30, angegebenen Fehlerwahrscheinlichkeiten in etwa beizubehalten. Die Abb. 22 zeigt die Zusammenstellungs-Zeichnung für die Auffangeinrichtung eines Regenanalysators mit 100 cm^2 - Auffangfläche. Die geänderte Gitterkonstruktion geht hieraus nicht hervor. Meß- und Ladegitter werden wie im Ausschnitt X der Abb. 8, Seite 17 , gewickelt. Zwischen den

beiden Gitterebenen liegen jetzt quer zu den Drähten zwei Spannstäbe mit rechteckigem Querschnitt, die nach dem Wickeln um 90° verdreht werden können. Der Abstand s_0 zwischen Lade- und Meßgitter wurde von 30 auf 20 mm herabgesetzt,

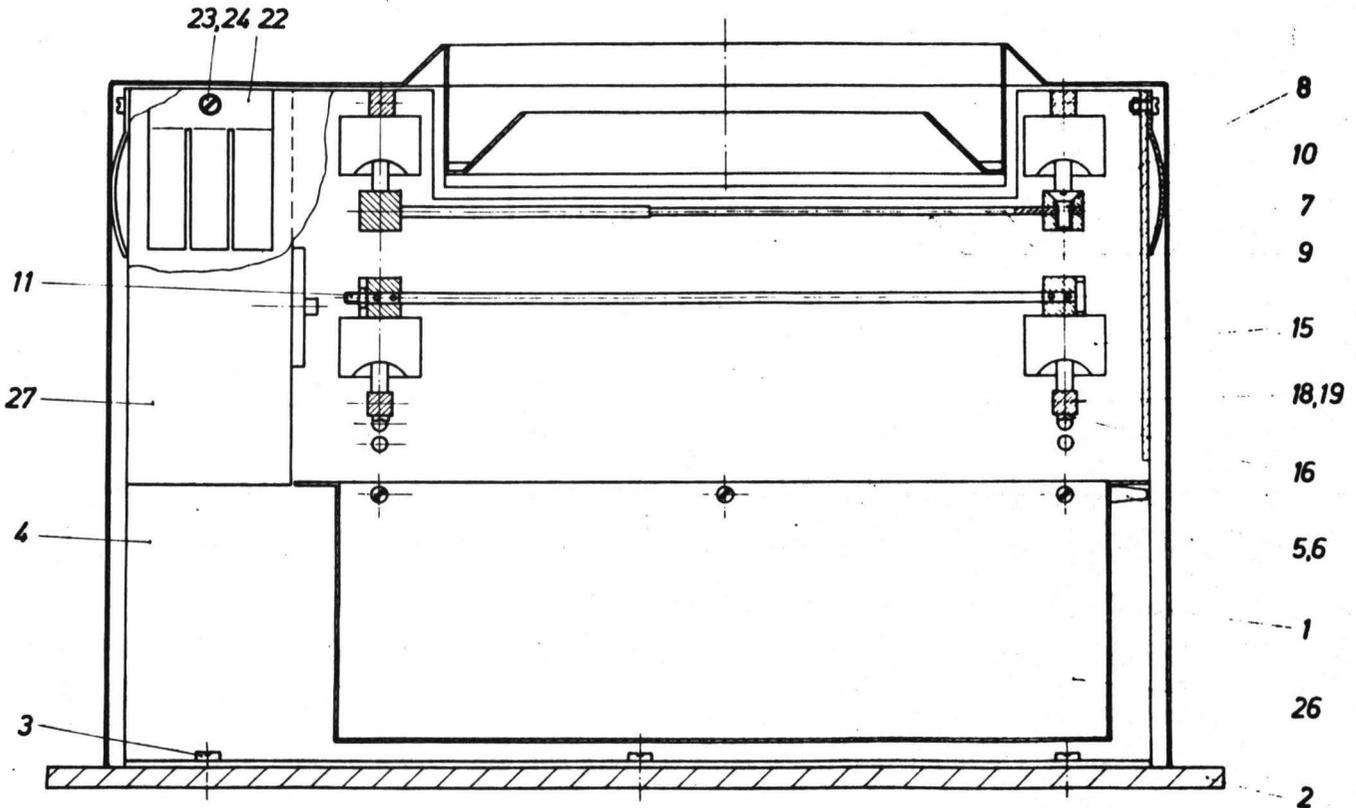


Abb. 22

womit die Anstiegszeit der Impulse um $\frac{1}{3}$ verkürzt wurde (vgl. Abschnitt 2.1.1.). Nachteilig ist, daß zugleich die Eingangskapazität C (vgl. Abb. 2, Seite 6) zunimmt. Um die Eingangszeitkonstante zu verkleinern, wurde der Meßwiderstand von 10^8 auf $10^7 \Omega$ herabgesetzt. Die grundsätzliche Schaltung des Elektrometer-Verstärkers wurde beibehalten, nur seine Verstärkung wurde um den Faktor 10 erhöht. Durch diese Maßnahmen wurde die mittlere Impulslänge von 25 ms auf 9.5 ms herabgesetzt. Die sich jetzt ergebenden Fehlwahrscheinlichkeiten in Ab-

hängigkeit von der Regenintensität R zeigt die Tabelle 5.

$\frac{R}{\text{mm h}^{-1}}$	$\frac{W_F}{\%}$
6.25	2.2
12.50	4.3
25.00	8.3
50.00	14.0
100.00	23.0

Tabelle 5

Mehrere dieser Geräte sollen in den nächsten Jahren bei Langzeituntersuchungen zur Störung der Wellenausbreitung bei 11.6 GHz durch Regen eingesetzt werden. Es wurde schon erwähnt, daß die Auszählung der Tropfen in 16 Größenklassen vorgenommen werden wird, hierbei werden die pro Minute in den einzelnen Klassen registrierten Tropfenzahlen auf Lochstreifen gespeichert. Parallel dazu besteht die Möglichkeit, aus den gemessenen Tropfengrößen die Regenintensität zu berechnen und anzuzeigen. Sechs Regenanalysatoren dieser zweiten Ausführung werden vom Fernmeldetechnischen Zentralamt der Deutschen Bundespost in Darmstadt bei ähnlichen Untersuchungen eingesetzt werden.

Die Entwicklung der Regenganalysatoren wurde im Rahmen von Forschungsvorhaben durchgeführt, die von der Deutschen Forschungsgemeinschaft finanziell unterstützt wurden. Dem Leiter des Meteorologischen Instituts der Universität Karlsruhe, Herrn Professor Dr. Diem, danken wir sehr für kritischen Rat. Bei der Entwicklung der elektronischen Schaltungen zur Impulsauswertung und - Registrierung besteht seit langem eine für uns nützliche Zusammenarbeit mit der Fa. Vogt u. Co., Berlin.

Literaturverzeichnis

- Bentley, W. A. 1904 Studies of raindrops and raindrop phenomena.
Mon. Wea. Rev. 32, 450 - 456.
- Diem, M. 1967 Zur Struktur der Niederschläge. I
Die Genauigkeit von Regenmessungen.
Arch. Met. Geophy. Biokl. B 15 (1-2),
39 - 51.
- _____ 1969 Physik der Niederschlagsbildung .
Met. Rdsch. 22 (5), 1-5.
- Dingle, A. N. 1962 The description of rain by means of
Hardy, K. R. sequential raindrop-size distributions.
Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 88, 301-314 .
- Dingle, A. N. 1962 A research instrument for the study
Schulte, H. F. of raindrop-size spectra.
J. appl. Meteor. 1, 48 - 59 .
- Donnadieu, G. 1969 Un pluviomètre photo-électrique pour
Dubosclard, G. la détermination simultanée des spectres
Godard, S. L. dimensionnel et de vitesse de chute de gouttes
de pluie.
J. Rech. Atmos. 4, Jan.-März.
- Godard, S. L. 1970 Propagation of centimeter and millimeter
wavelengths through precipitation.
IEEE Trans. AP-18, 530-534.
- Gunn, R. 1949 The terminal velocity of fall for water
Kinzer, G. D. droplets in stagnant air.
J. Meteorol. 6, 243-248.
- Hald, A. 1962 Statistical theory with engineering applica-
tions.
Wiley, New York, London.

- Hardy, K. R. 1963 The development of raindrop-size distributions and implications related to the physics of precipitation. J. Atmosph. Sc. 20 (4), 299-312.
- Jones, D. M. A. 1953 A raindrop camera. Illinois State Water Survey Res. Rep. 3, Urbana, Ill.
- Dean, L. A.
- Joss, J. 1967 Ein Spektograph für Niederschlags- Waldvogel, A. tropfen mit automatischer Auswertung. PAGEOPH 68, 240-246.
- _____ 1969 Raindrop size distribution and sampling size errors. J. Atmosph. Sc. 26 (3), 566-569
- Lammers, U.-H. W. 1969 Electrostatic analysis of raindrop distributions. J. Appl. Meteorol. 8 (3), 330 - 334.
- Laws, J. O. 1943 The relation of raindrop-size to in- Parsons, D. A. tensity. Trans. Am. Geophys. Union 24, 452-460.
- Marshall, J. S. 1948 The distribution of raindrops with size. Palmer, W. Mck. J. Meteorol. 5, 165-166.
- Neumann, J. 1970 Studienarbeit Nr. 466 am Lehrstuhl für HF-Technik der TU-Berlin.
- Ollendorf, F. 1955 Elektronik des Einzelelektrons. Springer-Verlag, Wien.
- Sander, J. 1972 Untersuchungen zur Dämpfung elektromagnetischer Wellen durch Regen bei 52, 90.8 und 150 GHz. Dissertation an der TU Berlin (D 83). Auch als Techn. Ber. Nr. 153 des Heinrich-Hertz-Instituts, Berlin.

- Sasyo, Y. 1965 On the probabilistic analysis of precipitation particles.
Proc. Int. Conf. Cloud Phys., 254-259.
- Schmidt, F. 1966 Der Regenanalysator, ein elektronisches Gerät zum Messen und Registrieren der Tropfengrößen im Regen.
Techn. Ber. Nr. 91 des Heinrich-Hertz-Instituts, Berlin.
- Smythe, W.R. 1950 Static and dynamic electricity.
Mc Graw-Hill. New York.
- Waerden, van de B.L. 1965 Mathematische Statistik.
Springer, Berlin, Heidelberg.
- Wiesner, J. 1895 Beiträge zur Kenntnis des tropischen Regens.
Sitz.-Ber. Akad. Wiss. math-naturw. Kl. Wien, 1397.

