

Prom. Nr. 3461

Die Bestimmung der Rückstreu-Querschnitte
von Eis-Wasser-Gemischen bei einer
Wellenlänge von 5,05 cm

VON DER
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE
IN ZÜRICH
ZUR ERLANGUNG
DER WÜRDE EINES DOKTORS DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN

GENEHMIGTE
PROMOTIONSARBEIT

VORGELEGT VON

JÜRIG JOSS
dipl. Elektroingenieur ETH

VON
BERN und OBERBURG

Referent: Herr Prof. Dr. K. Berger

Korreferent: Herr Dr. M. de Quervain

BASEL
Buchdruckerei Birkhäuser AG.
1964

Sonderabdruck aus der
ZEITSCHRIFT FÜR ANGEWANDTE MATHEMATIK UND PHYSIK (ZAMP)
Vol. 15, Fasc. 5 (1964) BIRKHÄUSER VERLAG BASEL Seiten 509-539

INHALT

1. <i>Einleitung</i>	509
2. <i>Faktoren, die den Streuquerschnitt beeinflussen, und Diskussion der geeigneten Wellenlänge</i>	511
3. <i>Messmethode</i>	514
4. <i>Apparatur</i>	
4.1 Der Sender	514
4.2 Die Antennen	514
4.3 Mischstufe und Hilfsoszillator	516
4.4 Logarithmischer Zwischenfrequenzverstärker und Registrierung	516
5. <i>Eichung</i>	
5.1 Absolute Eichung	518
5.2 Relative Eichung	520
6. <i>Problematik der Messung</i>	520
7. <i>Messungen und Resultate</i>	
7.1 Messungen an Schneekugeln	522
7.2 Messungen an Schneekörpern	527
7.3 Messungen an Eis-Wasser-Gemischen, hergestellt im Hagelversuchskanal	527
8. <i>Abschätzung der Streuquerschnitte von Eis-Wasser-Gemischen auf Grund von HERMANS und BATTANS Berechnungen an wasserüberzogenen Eiskugeln</i>	532
9. <i>Diskussion der Resultate</i>	535
10. <i>Zusammenfassung</i>	537
11. <i>Nachwort</i>	538
<i>Literaturverzeichnis</i>	538

Die Bestimmung der Rückstreuquerschnitte von Eis-Wasser-Gemischen bei einer Wellenlänge von 5,05 cm

Von Jürg Joss, Forschungsstelle für Atmosphärenphysik am Osservatorio Ticinese della Centrale Meteorologica Svizzera, Locarno-Monti, Schweiz

1. Einleitung

Neben den elektrischen Entladungen ist ohne Zweifel die Hagelbildung der bedeutsamste Vorgang in Gewitterwolken. Von einer wissenschaftlich allgemein anerkannten Theorie der Hagelbildung ist man noch weit entfernt, was vornehmlich daran liegt, dass man über viel zu wenige sichere und entscheidende Beobachtungstatsachen verfügt. So kann der Meteorologe auf Grund von Wolkenbeobachtungen, Messungen von Luftdruck, Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit mittels Radiosonden und Auswertung von synoptischen Beobachtungen auch heute noch nicht mit Sicherheit entscheiden, ob eine Gewitterwolke hagelführend ist oder nicht.

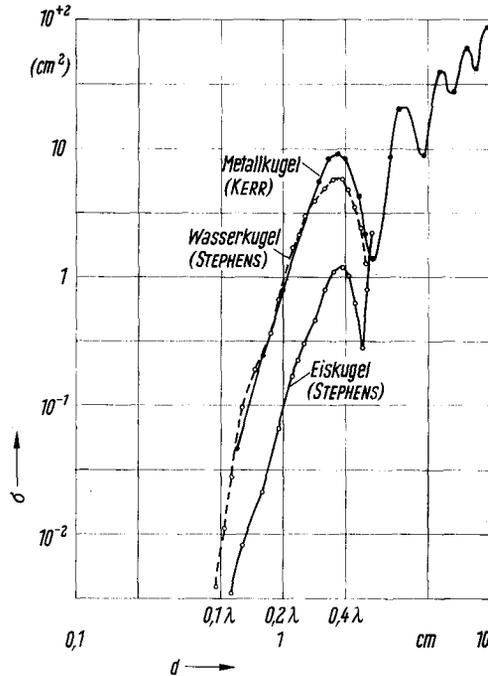
Die erfolgreiche Anwendung der Radartechnik zur Erkennung flüssiger Hydrometeore führte zu intensiven Forschungen über die Reflexionseigenschaften von Hydrometeoren in flüssiger und fester Form (Regen, Schnee, Graupel, Hagel). Eine der Fragen, die man beantworten möchte, lautet: Ist das von einem Radargerät empfangene Echo einer Regenwolke verschieden von dem einer Hagelwolke und worin besteht der Unterschied? Er könnte zum Beispiel in der *Echointensität* bestehen, indem sehr grosse Intensitäten nur von Hagelkörnern herrühren können; würde ein bestimmter Wert überschritten, so dürfte man daraus auf das Vorhandensein von Hagelkörnern in der untersuchten Wolke schliessen.

Am Massachusetts Institute of Technology in Cambridge (USA) konnte man anhand der Korrelation von Echointensitäten mit Hagelbeobachtungen diese Grenze empirisch festlegen [1]¹⁾. Um mehr über den Charakter dieser Grenze zu erfahren, drängt es sich auf, die Streuquerschnitte natürlicher Hagelkörner zu berechnen und zu messen. Der Streuquerschnitt eines Körpers ist ein Mass für sein Reflexionsvermögen und stellt definitionsgemäss die Einfangfläche des idealen isotropen Streuers dar, welche die gleiche Energie wie der Körper zur Antenne zurückschicken würde. Wenn wir somit die Leistungsdichte am Ort des Streuers mit dem Streuquerschnitt multiplizieren, dann erhalten wir die auf den idealen isotropen Streuer einfallende Leistung, die er definitionsgemäss vollständig und gleichmässig wieder in den ganzen Raum verteilt.

Es können aber nur Streuquerschnitte von Kugeln berechnet werden, deren Schalen in bezug auf den Brechungsindex homogen sind. Von STEPHENS [2] und anderen wurden die Streuquerschnitte von homogen sphärischen Eis- und Wasser-

¹⁾ Die Ziffern in eckigen Klammern verweisen auf das Literaturverzeichnis, Seite 538.

körpern berechnet. KERR [3] leitete den Streufaktor (Verhältnis von Streuquerschnitt zu Schattenquerschnitt oder Hauptspant) für Metallkugeln her. Die Resultate, zu denen diese Autoren kamen, sind in Figur 1 in Funktion des Kugeldurchmessers für eine Wellenlänge von $\lambda = 5,05$ cm aufgetragen worden.



Figur 1

Streuquerschnitt in Funktion des Durchmessers für Eis-, Wasser- und Metallkugeln ($\lambda = 5,05$ cm).

ATLAS et al. [4] führten mehrmals Messungen an schmelzenden Eiskugeln aus, die etwa 2 km vom Radargerät entfernt, an einem Ballon aufgehängt wurden. Die Schwierigkeit bestand darin, dass die Messobjekte sich im Wind bewegten, weshalb die Antenne dauernd nachgestellt werden musste. Auch verstrich zwischen dem Aufhängen eines Messobjektes und der Messung verhältnismässig viel Zeit, so dass die Eiskugel selber sich veränderte.

HARPER [5] wendet, um die Streuquerschnitte abgeplatteter Kugeln zu bestimmen, eine elegante auf dem Doppler-Effekt beruhende Methode an. Ein grosser Vorteil seiner Anlage besteht darin, dass die Messungen im Laboratorium ausgeführt und die Messobjekte einfach und rasch ausgewechselt werden können. HARPERS Messungen beziehen sich aber nur auf Probekörper aus Perspex, das einen ähnlichen Brechungsindex wie Eis besitzt.

GERHARDT et al. [6] haben Messungen an Wasserkugeln, trockenen und nassen Eiskugeln im «wellentoten» Raum ausgeführt. Dabei wurde die Reststrahlung der Wände kompensiert.

Von DONALDSON [7] wurden in Neu-England in Wolken ausserordentlich starke Radarechos gemessen und beschrieben, zu deren Erklärung 3–5 cm grosse, kugel-

förmige, trockene Hagelkörner angenommen werden mussten, die aber nur in den seltensten Fällen unter den Hagelwolken am Boden gefunden werden konnten. Hier soll nun geprüft werden, ob solch grosse Echointensitäten nicht auch von kleineren, aber aus einem Eis-Wasser-Gemisch bestehenden Körnern herrühren können.

LIST [8] fand auf Grund von Experimenten, dass Hagelkörner grösstenteils aus einem Eis-Wasser-Konglomerat, dem sogenannten «Schwammeis», bestehen. BATTAN und HERMAN [9] versuchten, den Streuquerschnitt von Schwammeis-Kugeln zu berechnen. Damit die Berechnungen möglich waren, mussten sie ein homogenes Gemisch von Eis und Wasser annehmen, was aber eine allzu vereinfachende Voraussetzung ist.

Mit den hier beschriebenen Messungen sollen nun die theoretischen Voraussagen über die Streuquerschnitte von Eis-Wasser-Gemischen geprüft und überdies Streuquerschnitte von Objekten bestimmt werden, die theoretisch schwer erfassbar sind.

2. Faktoren, die den Streuquerschnitt beeinflussen, und Diskussion der geeigneten Wellenlänge

Der Streuquerschnitt wird durch den Schattenquerschnitt und den Streufaktor f_s bestimmt. Der Schattenquerschnitt F ist für eine Kugel mit Durchmesser d $F = \pi d^2/4$. Der Streufaktor ist in erster Näherung (Brechungsindex unabhängig von der Wellenlänge λ angenommen) eine Funktion von d/λ ; er beträgt im Rayleigh-Gebiet $d \ll \lambda$ für Dielektrika:

$$f_s = 4 (\pi)^4 |K|^2 \left(\frac{d}{\lambda}\right)^4, \quad (1)$$

wobei

$$K = \frac{m^2 - 1}{m^2 + 1} \quad (2)$$

und m gleich dem komplexen Brechungsindex ist. Für Metalle beläuft sich $|K|^2$ nach KERR auf $9/4$. Im *Mie*-Gebiet $d \sim \lambda$ sind die Teilwellen, die von den verschiedenen Punkten des Körpers reflektiert werden, nicht mehr in Phase. Die Teilwellen können sich deshalb gegenseitig verstärken oder auch aufheben. Der Streufaktor für Kugeln im *Mie*-Gebiet ist mit einem sehr grossen Aufwand an Zeit und Hilfsmitteln noch berechenbar. Der Verlauf des Streufaktors zeigt die von den Interferenzen zu erwartenden Maxima und Minima. Kompliziertere Körper als Kugeln können rechnerisch schlecht erfasst werden. Die einfachste Möglichkeit, etwas über deren Streuquerschnitt zu erfahren, besteht in der Ausführung praktischer Messungen. Im Gebiet $d \gg \lambda$ ist der Streufaktor gleich dem Leistungs-Reflexionskoeffizienten:

$$f_s = \left(\frac{m - 1}{m + 1}\right)^2. \quad (3)$$

In der Tabelle 1 findet sich für die verschiedenen Gebiete ein Überblick über den Wert des Streufaktors für Wasser-, Eis- und Metallkugeln, wobei für das *Mie*-Gebiet das absolute Maximum und das absolute Minimum angegeben sind, zwischen denen der Streufaktor schwankt. Figur 1 gibt über die Streuquerschnitte bis $d/\lambda = 0,5$ Auskunft. Die angegebenen Werte wurden aus Angaben von STEPHENS [2] und KERR [3] zusammengestellt und berechnet.

Tabelle 1

Streufaktor f_s für verschiedene Materialien in den drei Gebieten: $d \ll \lambda$, $d \sim \lambda$, $d \gg \lambda$.

	$d \ll \lambda$	$d \sim \lambda$	$d \gg \lambda$
Eis	$77 (d/\lambda)^4$	$0,06 \div 12$	0,078
Wasser	$363 (d/\lambda)^4$	$0,2 \div 2,5$	0,57
Metall	$880 (d/\lambda)^4$	$0,26 \div 3,8$	1

Die grossen Streufaktoren, wie sie für Eiskugeln von etwa 4λ Durchmesser berechnet und gemessen wurden, können nach GLOVER und ATLAS [10] nach den Gesetzen der geometrischen Optik erklärt werden. Die grossen Streufaktoren treten aber, wie HERMAN und BATTAN [11] theoretisch und viele andere experimentell gezeigt haben, nur für ganz durchgefrorene Eiskugeln auf. Nach HERMAN und BATTAN genügt nämlich eine Schicht von nur $1/10$ mm Wasser auf der Eiskugel, um f_s um den Faktor 10 zu verkleinern. Das erklärt sich aus der Tatsache, dass der Real- und Imaginärteil des Brechungsindex für Wasser viel grösser ist als für Eis [$m_E = 1,78 (1-0,00135j)$, $m_W = 7,95 (1-0,277j)$ für $4,7$ cm Wellen]. Die Wellen werden im Eis nicht abgeschwächt; dieses verhält sich somit ähnlich wie das Glas für Lichtwellen. Für Wasser hingegen beträgt, wie Tabelle 2 zeigt, die Eindringtiefe des elektromagnetischen Feldes im Centimeterwellengebiet nur einige Millimeter.

Tabelle 2

Brechungsindex m von Wasser nach HERMAN und BATTAN [11] und Eindringtiefe δ für verschiedene Wellenlängen.

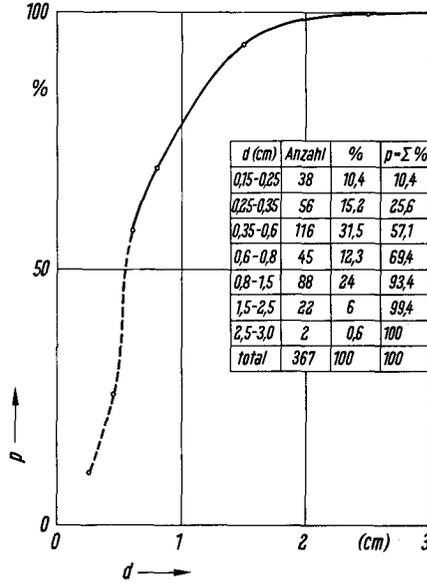
λ	m	δ
3,2 cm	$7,14 (1-0,405j)$	0,9 mm
4,7 cm	$7,95 (1-0,277j)$	1,7 mm
10 cm	$8,99 (1-0,164j)$	5,5 mm

Es ist also hauptsächlich die oberste Schicht an der Streuung beteiligt. Körper, die mit einer dicken Wasserschicht umgeben sind, scheinen für Radarstrahlen undurchsichtig; das Innere spielt praktisch keine Rolle.

Um eine eindeutige Information über die Grösse der Hydrometeore zu erhalten, darf einem Wert des Streufaktors nur *ein* d/λ -Wert zugeordnet werden. Die Durchmesser der Hydrometeore müssen daher kleiner als $0,3 \lambda$ sein. Figur 2 zeigt die in den letzten fünf Jahren (1958–1962) im Kanton Tessin gemeldeten Hagelfälle (in Prozenten aller Hagelfälle), bei denen der grösste Hagelkorn-Durchmesser d einen bestimmten Wert nicht überschritten hat. Aus dieser Kurve können wir zum Beispiel entnehmen, dass in 94% der gemeldeten Hagelunwetter der Korndurchmesser 15 mm nicht überschritten hat und dass nur in 2 von 367 Fällen Hagelkörner mit einem Durchmesser > 25 mm gefunden wurden. Diese Statistik lehrt uns eindeutig folgendes: Unser grösstes Interesse muss den Hagelkörnern unter 25 mm \varnothing gelten. Eine Radarwellenlänge von 10 cm wäre zur sicheren Erfassung aller Hagelfälle zwar wünschenswert, in über 90% der gemeldeten Hagelfälle können aber Untersuchungen mit 5-cm-Wellen auch noch eindeutige Resultate ergeben.

Bei der Wahl der Wellenlänge sind noch weitere Gesichtspunkte zu berücksichtigen. Die Dämpfung der Radarwellen nimmt mit zunehmendem d/λ sehr stark zu.

Rechnung und Messung ergeben bei starken Gewittern bei 10-cm-Wellen vernachlässigbare, bei 5-cm-Wellen zu berücksichtigende und bei 3-cm-Wellen, jedenfalls für wissenschaftliche Untersuchungen, zu grosse Abschwächungen. Das alles spricht für die Verwendung von 10-cm-Wellen. Es ist aber folgendes zu bedenken: Will man eine



Figur 2

Prozentsatz p aller im Kanton Tessin 1958–1962 gemeldeten Hagelfälle in Funktion des grössten, während der Gewitter aufgetretenen Hagelkorn-Durchmessers d .

konstante Antennengüte (Antennengewinn, Strahlöffnungen) erhalten, dann müssen bei Vergrösserung von λ auch alle Antennendimensionen proportional zu λ vergrössert werden; hält man die Antennendimensionen konstant, nimmt das Auflösungsvermögen umgekehrt proportional zur Wellenlänge ab, das heisst grössere Wellenlänge bedeutet grössere Öffnungswinkel des Strahles und grösseres Impulsvolumen. Hierbei müssen wir voraussetzen, dass letzteres immer homogen mit Hydrometeoren des gleichen Grössenspektrums angefüllt ist.

Zusammenfassend seien noch einmal die wichtigsten Punkte festgehalten:

a) Im Rayleigh-Gebiet ($d \ll \lambda$) streuen die Teilchen proportional d^6 . Sobald $d \sim \lambda$ treten Interferenzerscheinungen auf, weil nicht mehr alle Teile des Objektes gleichphasig erregt werden. Die Streuung wird dadurch kompliziert und mehrdeutig.

b) Solange der zu einem Körper gehörende d/λ -Wert ins Rayleigh-Gebiet fällt, nimmt die vom Radargerät empfangene Energie proportional $(1/\lambda)^4$ zu.

c) Dank des reellen Brechungsindex werden Radarstrahlen im Eis selber nicht abgeschwächt; Eis ist für Radarwellen durchsichtig. Wegen des kleineren Brechungsindex reflektieren Eisteilchen, deren Durchmesser kleiner als die halbe Wellenlänge ist, ungefähr fünf mal schwächer als Wasserteilchen gleichen Volumens. Da Wasser die Radarstrahlen sehr stark abschwächt, erscheint es für sie trüb.

d) Die Dämpfung des Radarstrahles in Niederschlagsfeldern nimmt mit zunehmendem d/λ sehr stark zu.

e) Konstante Antennendimensionen vorausgesetzt, nehmen Auflösungsvermögen und Antennengewinn bei zunehmender Wellenlänge stark ab.

Für 5-cm-Wellen lassen sich mit einem vernünftigen Aufwand Antennen bauen, deren Auflösung in dem vom Radar erfassten Gebiet die Annahme zulässt, das Impulsvolumen sei homogen mit Hydrometeoren gefüllt. Die Dämpfung der 5-cm-Wellen kann in den meisten meteorologischen Anwendungen gegenüber anderen Fehlern vernachlässigt werden. Da zudem die meisten Hydrometeore d/λ -Werte aus dem Rayleigh-Gebiet aufweisen – im Rayleigh-Gebiet ist die Zuordnung von Streufaktor und d/λ -Wert eindeutig – scheint ein Radargerät mit 5-cm-Wellen für Gewitteruntersuchungen ein vernünftiger Kompromiss zu sein.

Die Durchmesser der in dieser Arbeit untersuchten Schneekugeln und der künstlichen Hagelkörner betragen 9 bis 25 mm. Das Verhalten dieser Körper lässt Schlüsse auf jenes der kleineren Hydrometeore zu. Damit entsprechen die von uns ausgemessenen Hydrometeore etwa den Hagelkörnern, wie sie bei den Gewittern im Tessin gefunden wurden.

3. Messmethode

Figuren 3 und 4 zeigen die für die Messung der Streuquerschnitte von Eis-Wassergemischen verwendete Apparatur und ihr Blockschema. Das Messobjekt wird von der Sendeantenne aus mit 5,05-cm-Wellen kontinuierlich angestrahlt. Die Empfangsantenne, die unmittelbar neben der Sendeantenne aufgestellt ist, fängt die reflektierte Energie auf und führt sie der Mischstufe zu. Der logarithmische Zwischenfrequenzverstärker verstärkt und demoduliert das Signal, das anschliessend durch ein Drehspulinstrument angezeigt und von einem Schnellschreiber kontinuierlich registriert wird.

Die Messungen mit dieser Apparatur wurden im Freien vorgenommen, es treten daher keine direkten Reflexionen an Wänden auf. Eine Kompensation erübrigt sich und es können auch kleine Streuquerschnitte erfasst werden. In einem Meter Abstand von den Antennen ist ein Nylonfaden aufgespannt an dem die Probekörper leicht und rasch aufgehängt werden können. Diesem Faden entlang können auch Metallkugeln, die ausserhalb der Reichweite des Mikrowellenstrahles hängen, zur Eichung an die Meßstelle geschoben werden; eine vollständige Eichung der Anlage ist so innert kürzester Zeit möglich.

4. Apparatur

4.1 Der Sender

Ein Prüfgenerator Typ TS-621-U, wie er zur Eichung von Radargeräten dient, speist die Sendeantenne. Seine Leistung kann am eingebauten Instrument kontrolliert und mit einem geeichten Abschwächer zwischen 10^{-3} und 10^{-15} Watt reguliert werden. Die relative Einstellgenauigkeit, die, wie wir später sehen werden, für die Versuche wichtig ist, beträgt $\pm 0,5$ db.

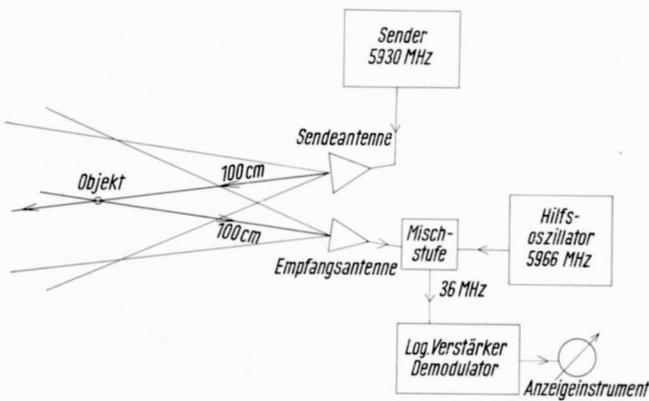
4.2 Die Antennen

Als Sende- und Empfangsantenne dienen zwei Hörner mit den Öffnungen $16,2 \times 12,1$ cm und $11,2 \times 8,3$ cm. Die grösste Phasendifferenz (α) der zum Probekörper ge-



Figur 3

Apparatur zur absoluten Messung von Streuquerschnitten bei einer Wellenlänge $\lambda = 5,05$ cm, aufgestellt auf dem Dach des Institutes für Schnee- und Lawinenforschung, Weissfluhjoch-Davos.



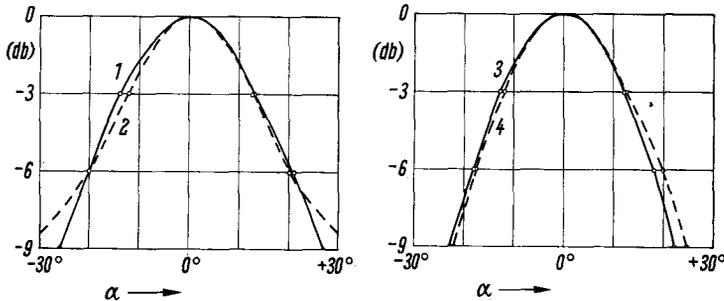
Figur 4

Blockschema der Apparatur.

langenden Teilwellen berechnet sich aus folgender Formel:

$$\alpha = \frac{D^2}{8 r \lambda} 360^\circ \quad (4)$$

wobei D die grösste Abmessung des Hornes, r die Objektdistanz und λ die Wellenlänge bedeuten. Für das erste Horn ergibt sich für $r = 1$ m, $\alpha_1 = 24^\circ$, für das zweite $\alpha_2 = 11^\circ$. Die Messungen werden somit im Fernfeld der Antenne ausgeführt. Die Antennendiagramme können der Figur 5 entnommen werden. Aus ihnen lässt sich berechnen,



Figur 5

Antennendiagramme der Sende- und Empfangsantenne in den zwei Hauptebenen A und B,

- 1 Diagramm der Sendeantenne in der Hauptebene A,
- 2 Diagramm der Sendeantenne in der Hauptebene B,
- 3 Diagramm der Empfangsantenne in der Hauptebene A,
- 4 Diagramm der Empfangsantenne in der Hauptebene B.

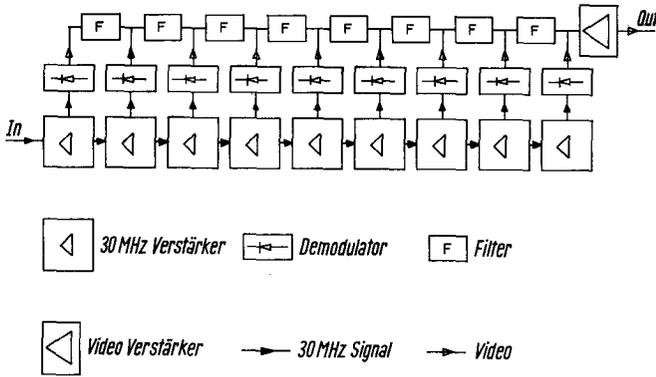
dass das Objekt in einem Meter Abstand in der ungünstigsten Richtung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung mehr als ± 5 cm verschoben werden muss, um eine Echoverkleinerung von 0,5 db gegenüber dem Wert im Schnittpunkt der beiden Strahlen zu erhalten. Dies stimmt mit den Beobachtungen am Gerät selber überein.

4.3 Mischstufe und Hilfsoszillator

Eine Gegentakt-Kristallmischstufe, wie sie zu unserem MPS-4 Radargerät gehört, mischt das Empfangssignal mit dem um 36 MHz höheren des Hilfsoszillators. Das so erhaltene Zwischenfrequenzsignal wird dem logarithmischen Zwischenfrequenzverstärker zugeführt. Als Hilfsoszillator dient ein zum MPS-4 gehörender umgebauter Spektrum-Analysator, Typ UPM-9A.

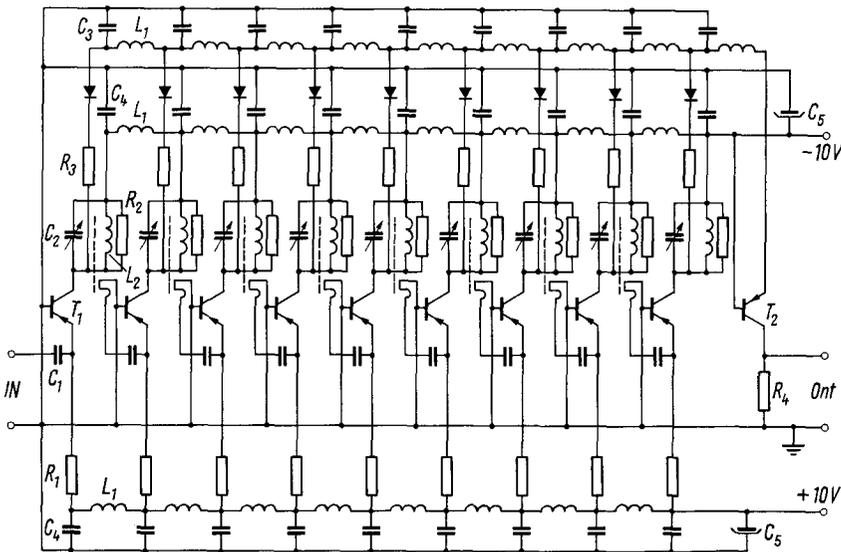
4.4 Logarithmischer Zwischenfrequenzverstärker und Registrierung

Bei den ersten Versuchen mit einem gewöhnlichen, linearen Verstärker zeigten sich Schwierigkeiten. Dieser war entweder übersteuert oder zu unempfindlich, so dass sein Bereich ständig gewechselt werden musste. Deshalb wurde ein logarithmischer Verstärker eingesetzt, der das Umschalten überflüssig macht. Dieser wurde für das Radargerät in Locarno-Monti entwickelt. Sein prinzipieller Aufbau ist schon seit längerer Zeit bekannt. Figur 6 zeigt das Blockschema des hier verwendeten transistorisierten Empfängers. Er besteht aus neun gleich aufgebauten Verstärkerstufen. Nach jeder Stufe wird ein Teil des Signals demoduliert, der Rest – die Verluste abgezogen –



Figur 6
 Blockschema des logarithmischen Verstärkers.

wird an die folgende Stufe weitergegeben. Die Summe der Ausgangssignale der neun Demodulatoren ist proportional zum Logarithmus des Eingangssignals und stellt damit den gewünschten Ausgang des Verstärkers dar. Die Zwischenfrequenztransformatoren, die den hochohmigen Kollektorausgang der vorhergehenden Stufe an den niederohmigen Emittiereingang der folgenden Stufe anpassen, sind alle auf die gleiche Frequenz abgestimmt. Die Bandbreite des Verstärkers beträgt 8 MHz bei einer Mittel­frequenz von 36 MHz. Der Bereich, in dem die logarithmische Beziehung zwischen Ausgang und Eingang des Verstärkers bei einer Genauigkeit von $\pm 0,5$ db gilt, umfasst mehr als 90 db. Figur 7 zeigt das Schaltschema des Verstärkers. Eine weitere Schwierigkeit äusserte sich in der Drift der Frequenzen des Senders und des Hilfs­oszillators, bedingt durch Temperaturänderungen, Netzumspannungsschwankungen



Figur 7

Schaltschema des logarithmischen Verstärkers ($C_1 = 82$ pF; $C_2 = 0,5-12$ pF; $C_3 = 120$ pF; $C_4 = 10$ nF; $C_5 = 50$ μ F; $R_1 = 6,8$ K; $R_2 = 1,2$ K; $R_3 = 2,2$ K; $R_4 = 10$ K; $L = 2,2$ μ H; $T_1 =$ AF 115- $T_2 =$ OC 141).

usw. Abhilfe schufen zwei Mittel: möglichst grosse Bandbreite des Verstärkers und Sägezahnmodulation der Frequenz des Hilfsoszillators. Nun erschien im Takte des Sägezahns am Ausgang des logarithmischen Verstärkers dessen Bandfilterkurve, wobei der Wert des Maximums das gesuchte Signal darstellte. Es war natürlich ein leichtes, dieses elektronisch auszumessen und direkt anzuzeigen. Die so erreichten Grenzen, innerhalb deren das Signal weniger als 0,5 db in bezug auf das Maximum abgefallen ist, betrug nun 21 MHz. Diese waren weit genug, um die Apparatur während eines ganzen Tages nie nachstimmen zu müssen.

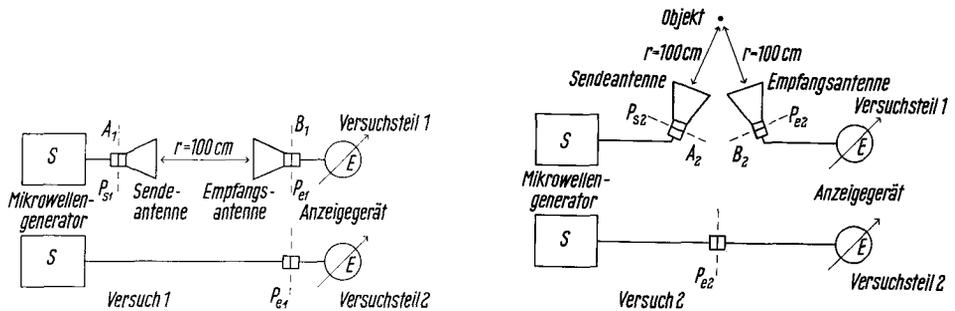
Nach dem logarithmischen Verstärker wurde das Signal so verstärkt, dass man einen beliebigen Ausschnitt von 30 db der vom logarithmischen Verstärker verfügbaren 90 db zur Registrierung auswählen konnte.

5. Eichung

5.1 Absolute Eichung

Der absoluten Eichung liegen die von der Herstellerfirma angegebenen oder von uns durch Messungen festgestellten Antennengewinne G zu Grunde. Diese beruhen somit, im Gegensatz zur relativen Eichung, nicht auf theoretisch berechneten Streuquerschnitten von Eichobjekten.

Mit Hilfe der in Figur 8 dargestellten Versuchsanordnungen (Versuch 1 und 2) kann man einen gesuchten Streuquerschnitt ausmessen.



Figur 8

Anordnungen zur Bestimmung der Mikrowellen-Eigenschaften der Anlage (Versuch 1) und der Messung unbekannter Streuquerschnitte (Versuch 2).

Für die Bestimmung des Produktes $G_1 G_2$ wird im Versuch 1 (Versuchsteil 1) vom Mikrowellengenerator S die Energie P_{s1} ausgesendet und der Teil P_{e1} von der Empfangsanenne aufgenommen. Die Leistung P_{e1} wird durch das Gerät E angezeigt.

Im zweiten Versuchsteil des Versuches 1 werden die Punkte A_1 und B_1 direkt miteinander verbunden. Dann wird die Ausgangsleistung von S so lange reduziert bis das Gerät E die gleiche Leistung anzeigt wie im 1. Versuchsteil. Damit haben wir die in Formel 5

$$\beta_1 = \frac{P_{e1}}{P_{s1}} = \frac{G_1 G_2 \lambda^2}{(4 \pi r)^2} \quad (5)$$

abgeleitete Dämpfung β_1 bestimmt.

Dabei bedeuten:

P_e	Empfangsleistung	(W)
P_s	Sendeleistung	(W)
G_1	Antennengewinn von Antenne 1	15,5 db
G_2	Antennengewinn von Antenne 2	15,2 db
λ	Wellenlänge	5,05 cm
r	Abstand	100 cm
β	Dämpfung	(-)
σ	unbekannter Streuquerschnitt	(m ²)

Jetzt verändern wir die Lage der Antennen, wie sie im ersten Versuchsteil von Versuch 2 dargestellt ist und strahlen das Objekt von A_2 aus an. Die von der Empfangsantenne in B_2 aufgenommene Leistung P_{e2} wird wiederum durch das Gerät E angezeigt.

Analog zum Versuch 1 werden im zweiten Teil des Versuches 2 A_2 und B_2 wiederum direkt miteinander verbunden und in S die Ausgangsleistung so lange reduziert bis das Gerät E die gleiche Leistung anzeigt wie im 1. Versuchsteil. Auf diesem Wege haben wir die in Formel 6

$$\beta_2 = \frac{P_{e2}}{P_{s2}} = \frac{G_1 G_2 \lambda^2}{(4 \pi r)^2} \frac{\sigma}{4 \pi r^2} \quad (6)$$

berechnete Dämpfung bestimmt.

Aus β_1 und β_2 lässt sich der gesuchte Streuquerschnitt σ nach Formel 7 berechnen

$$\sigma = 4 \pi r^2 \frac{\beta_2}{\beta_1}. \quad (7)$$

Es ist zu beachten, dass der Abstand im ersten Versuch von Horn zu Horn, im zweiten jedoch vom Horn zum Objekt gemessen wird. Der Fehler wird bei diesem Messverfahren nur von passiven Elementen (Abschwächer des Mikrowellengenerators, Distanzmessung und Richten der Antennen) bestimmt. Wiederholte, sorgfältig ausgeführte Versuche ergaben, dass die Streuung in den Grenzen von $\pm 0,5$ db liegt. Da der Fehler des Abschwächers von der gleichen Größenordnung ist, beträgt der gesamte, absolute Fehler im ungünstigsten Fall ± 1 db, der relative $\pm 0,5$ db.

Der für β_1 gemessene Wert beläuft sich auf 17,5 db. Setzt man die oben angegebenen Zahlen in die Gleichung (7) ein, so erhält man 17,3 db, was innerhalb der zu erwartenden Abweichung liegt. Damit ergibt sich für den Streuquerschnitt eines in einem Meter Abstand aufgehängten Probekörpers die folgende Formel:

$$\sigma = 705 \beta_2 [m^2]. \quad (7a)$$

Die Apparatur eignet sich also für die Bestimmung des absoluten Streuquerschnittes.

Im nächsten Abschnitt werden wir die Ergebnisse des zweiten Versuches, gemessen an einer Metallkugel von 17,5 mm Durchmesser, beschreiben und sehen, ob der von KERR [3] berechnete Streuquerschnitt mit dem von uns gemessenen übereinstimmt.

5.2 Relative Eichung

Eine Metallkugel von 17,5 mm Durchmesser ergab im Versuch 2 einen β_2 Wert von $10^{-5,94}$, was einem Streuquerschnitt σ von $10^{-3,09 \pm 0,1} \text{ m}^2$ entspricht. Aus KERRS [3] theoretisch hergeleiteten Angaben errechnet sich (vergleiche Figur 1) σ zu $10^{-3,05} \text{ m}^2$. Der Unterschied ist also klein und liegt innerhalb der Fehlergrenzen.

Auf ähnliche Weise wurden nun Streuquerschnitte von Eiskugeln und Wassertropfen bestimmt. Messungen an Eiskugeln verschiedener Grösse stimmten, bei Abweichungen, die kleiner als 1 db waren, gut mit der Theorie überein. Der Streuquerschnitt von Wassertropfen (der aus dem Gewicht bestimmte Durchmesser betrug 4,9 mm) fiel um 3 db kleiner aus, als nach der Theorie zu erwarten war, wobei allerdings zu bemerken ist, dass die messtechnischen Schwierigkeiten mit abnehmendem Streuquerschnitt erheblich zunehmen. Ein Tropfen von 4,9 mm Durchmesser besitzt nämlich einen 1000mal kleineren Streuquerschnitt als eine 15 mm Metallkugel; hier ist also schon die Grenze des in dieser Distanz messbaren Streuquerschnittes erreicht. Dieser Versuch zeigt immerhin, dass grössenordnungsmässig auch diese Streuquerschnitte erfasst werden können. Für genauere Angaben müssten weitere Versuche und wahrscheinlich auch Veränderungen an der Apparatur vorgenommen werden. Diese fallen jedoch ausserhalb des Rahmens der hier gestellten Aufgabe.

Die Metallkugel gibt uns die Möglichkeit, jederzeit auf äusserst einfache Weise eine exakte Eichung der ganzen Apparatur durchzuführen. Bei den anschliessenden Messungen muss nur noch darauf geachtet werden, dass das zu untersuchende Objekt innerhalb von 10 cm am gleichen Ort wie das Eichobjekt aufgehängt wird.

6. Problematik der Messung

Wie schon in der Einleitung hervorgehoben wurde, wird die Grösse des Radarechos durch verschiedene Eigenschaften des streuenden Körpers bestimmt; es sind im wesentlichen die folgenden:

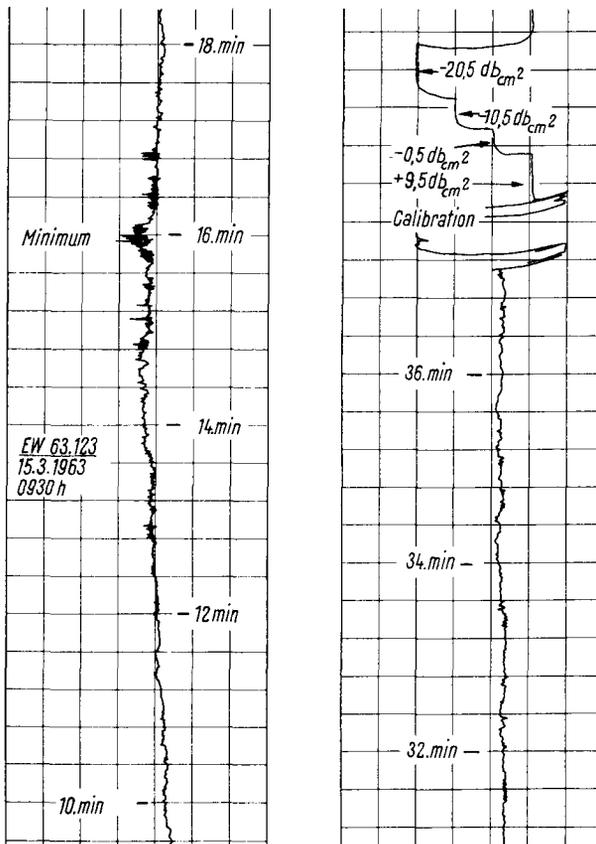
a) Grösse, b) Materialeigenschaften (Brechungsindex), c) Struktur (Anordnung des Materials, zum Beispiel Anordnung in Schichten, feine oder grobe Kristalle), d) Form des Körpers (zum Beispiel Achsenverhältnis) und seine Lage in bezug auf die Antenne.

Um ein Bild über die Streuquerschnitte von natürlichen Hagelkörnern zu gewinnen, müssen wir jeden dieser Einflüsse für sich studieren. Kennen wir diese im einzelnen, so können wir versuchen, ihre Wirkungen zu überlagern und zu prüfen, ob praktische Versuche diese Superpositionen bestätigen.

Welche Einflüsse kennen wir bereits aus Theorie und Experiment? Die Abhängigkeit des Radarechos von a) ist für Kugeln berechnet worden. Für Rotationsellipsoide haben ATLAS und WEXLER [12], HARPER [5] und andere den Einfluss von Achsenverhältnis und Lage gemessen. Besteht der Körper nur aus einem einzigen kompakten Material, kann der Einfluss theoretisch abgeleitet werden. Es verbleibt deshalb die Untersuchung von Materialien, die aus verschiedenen Stoffen unregelmässig zusammengesetzt sind, zum Beispiel Eis-Wasser- oder Eis-Luft-Gemische, wie sie in der Natur tatsächlich vorkommen.

Um den Einfluss der verschiedenen Faktoren auf den Streuquerschnitt möglichst rein zu erfassen, sollten ausser dem zu untersuchenden Einfluss alle anderen weitgehend ausgeschaltet werden können. Die Kugel ist hierfür das geeignetste Objekt.

Natürlich wird der Probekörper immer von der idealen Kugelform abweichen. Man muss deshalb nach einer Hilfsgrösse suchen, die es erlaubt, den Einfluss von a) und eventuell d) zu erfassen. Es liegt nahe, dafür den äquivalenten Durchmesser $d_{\text{äq}}$ einzuführen, den die gedachte kompakte Kugel haben würde, die aus dem Material des Probekörpers besteht. Im Fall eines Eis-Wasser-Gemisches stellte $d_{\text{äq}}$ den Durchmesser der äquivalenten Eiskugel dar, da in den Probekörpern unserer Versuche immer mehr Eis als Wasser vorhanden war. Um die Abhängigkeit des Streuquerschnittes von der Lage des Probekörpers bezüglich des Radarstrahles auszuschalten, wurde der Körper, während der Schnellschreiber die empfangene Leistung registrierte, nacheinander um zwei zueinander senkrechte Hauptachsen in Rotation versetzt. Figur 9 zeigt eine auf diese Art erhaltene Aufzeichnung. Kontrollexperimente ergaben, dass die Schwankungen teils von der Rotation des Probekörpers an der Meßstelle, teils von unregelmässigem Gefrieren herrühren.



Figur 9

Zwei Ausschnitte aus der Registrierung des Gefrierverlaufs eines im Hagelversuchskanal erzeugten Eis-Wasser-Gemisches. Die Schwankungen sind auf die Richtungsabhängigkeit des Streuquerschnittes (sichtbar gemacht durch Rotation des Probekörpers) zurückzuführen. Man beachte, dass die Schwankungen mit abnehmendem Streuquerschnitt zunehmen.

In einer Wolke wird gleichzeitig die Summe der Streuquerschnitte aller Hydrometeore im Impulsvolumen (mindestens 10^5 m^3) gemessen. Will man nun unsere Einzelmessungen auf diese Summe übertragen, so muss man beachten, dass der Einfluss der einzelnen Faktoren durch die Ungleichheit der Hydrometeore verwischt wird. Davon werden nicht alle Eigenschaften in gleicher Weise betroffen. Die unter d) aufgeführte Eigenschaft nimmt zum Beispiel eine Sonderstellung ein, indem Lage und Form der Probekörper sowohl Echovergrößerung als auch -verkleinerung zur Folge haben können. Dieser Einfluss wirkt sich somit bei Einzelmessungen am stärksten aus. Unter natürlichen Verhältnissen tritt er umso schwächer auf, je zufälliger Form und Lage der Hydrometeore im Impulsvolumen sind. Struktur- und Materialeigenschaften können sich nicht kompensieren. Deshalb ist es sinnvoll, sie zu untersuchen, auch wenn sie an einzelnen Probekörpern einen kleineren Einfluss auf den Streuquerschnitt ausüben als Form und Lage einzelner Hydrometeore im Radarstrahl.

Bevor die Versuche selber besprochen werden, seien hier einige Resultate, welche die Grössenordnung der zu erwartenden Einflüsse betreffen, vorweggenommen. Sie beziehen sich auf Körper mit den äusseren Dimensionen zwischen 10 und 25 mm, die mit 5-cm-Wellen bestrahlt werden.

a₁) Bei Veränderung des Kugeldurchmessers um einen Millimeter beträgt die Änderung des Signals bis zu 2,5 db, b₁) reine Eiskugeln zeigen 6 bis 10 db schwächere Rückstreuung als reine Wasserkugeln, c₁) ein Struktur-Einfluss (zum Beispiel Abhängigkeit der Korngrösse der einzelnen Kristalle) konnte nicht festgestellt werden, d₁) Form und Lage (bezüglich der Antenne) der unregelmässigen Schneekörper ergaben einen Variationsbereich des Streuquerschnittes bis zu 20 db.

Aus diesen Resultaten geht hervor, dass die Apparatur mit einem relativen Fehler von $\pm 0,5$ db für unsere Zwecke genau genug arbeitet. Dass kein Einfluss der Struktur nachgewiesen werden konnte, mag daran liegen, dass die anderen Einflüsse nicht klein genug gemacht werden konnten, um diesen allein hervortreten zu lassen. Es bedeutet aber auch, dass die Eis-Struktur kaum einen namhaften Einfluss auf Radarmessungen in Wolken haben wird.

7. Messungen und Resultate

7.1 Messungen an Schneekugeln

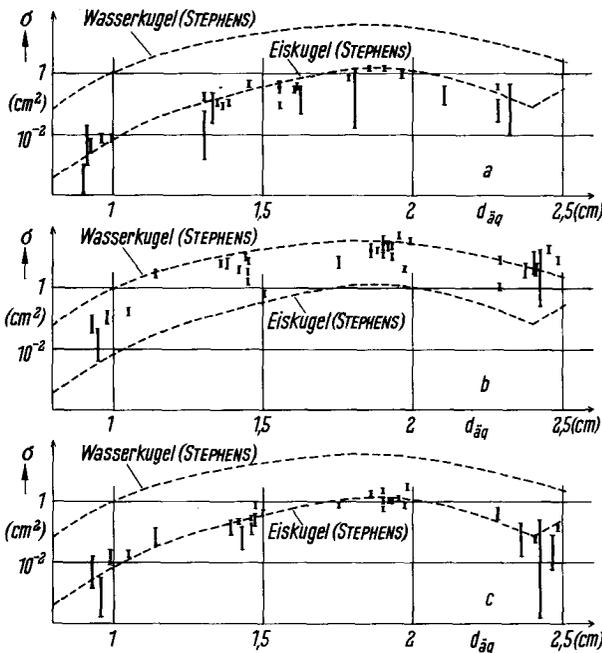
Verschiedene Schneearten wurden in Hohlkugelformen hineingepresst. Auf diese Weise konnten Kugeln erzeugt werden, die aus einem mehr oder weniger dichten Eisgerüst bestanden, wobei die Luftzwischenräume je nach Schneeart und angewendetem Druck 10 und 60% des Gesamtvolumens ausmachten. Um ganz sicher zu sein, dass alles Wasser zwischen den Schneekristallen gefroren war, wurden die Schneekugeln einige Stunden lang im Kältelabor zugedeckt liegen gelassen. Hergestellt wurden Kugeln von 10, 15, 20 und 25 mm Durchmesser, wobei die Abweichungen vom Nenn-durchmesser weniger als 0,5 mm betragen. Dagegen konnten Ungleichmässigkeiten der Luftkonzentration in den Kugeln, bedingt durch verschieden starkes Zusammenpressen des Schnees, nicht vermieden werden. Dadurch wird der Streuquerschnitt des Probekörpers richtungsabhängig.

Unsere kleine Radaranlage wurde auf der Dachterrasse des Eidgenössischen Institutes für Schnee- und Lawinenforschung aufgestellt. Die Lufttemperatur be-

wegte sich je nach Tageszeit zwischen 5 und -10°C . Für die hier beschriebenen Gefrierversuche wurden Tageszeiten mit möglichst tiefen Temperaturen ausgewählt. Die Zuverlässigkeit der Radarmessanlage wurde vor und nach jeder Messung an Schnee- und Eiskugeln mit der bereits erwähnten Metallkugel von 17,5 mm Durchmesser geprüft. Bei jeder der untersuchten 29 Schneekugeln wurden folgende Bestimmungen bzw. Operationen durchgeführt:

a) Durchmesser, b) Gewicht, c) Radarmessung des Streuquerschnittes der trockenen gefrorenen Schneekugel, d) Einspritzung von Wasser (Temperatur 0°C), bis zur Sättigung und anschliessend Messung des Streuquerschnittes, e) Gewicht, f) Durchmesser (Kontrolle).

Aus a) und b) lässt sich der Luftanteil der Schneekugeln bestimmen, der äquivalente Durchmesser berechnet sich aus b). Von der Wassereinspritzung an bis zu dem Zeitpunkt, wo alles Wasser in der Kugel gefroren war, wurde der Streuquerschnitt registriert. Figur 10a zeigt die Streuquerschnitte der trockenen Schneekugeln in Funktion des äquivalenten Durchmessers. Die Variationen der einzelnen Streuquerschnitte sind durch Rotation der Probekörper entstanden und zeigen die bereits erwähnten Ungleichmässigkeiten des Luftgehaltes der Kugeln. In Figur 10 wurden zum Vergleich die Resultate von STEPHENS [2] theoretischen Berechnungen für reine Eis- und Wasserkugeln aufgetragen.



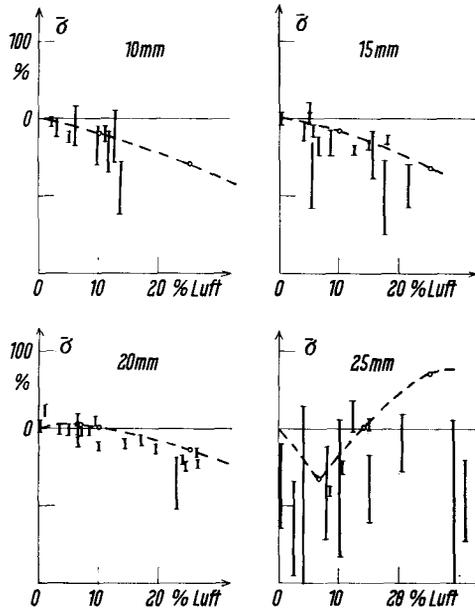
Figur 10

Streuquerschnitte von Schneekugeln, dargestellt in Funktion des äquivalenten Durchmessers.

- a Streuquerschnitte der gefrorenen Schneekugeln vor der Wassereinspritzung (Eis-Luft-Gemisch),
 b Streuquerschnitte nach der Wassereinspritzung (Eis-Wasser-Luft-Gemisch),
 c Streuquerschnitte am Schluss des Gefrierprozesses (Eis-Luft-Gemisch).

Die vertikalen Striche zeigen die experimentell bestimmten Werte während der Rotation des Körpers (vgl. S. 521). Die unterbrochene Linie gibt die von STEPHENS berechneten Streuquerschnitte an.

Aus e) und f) kann der Luftanteil, aus b) und e) der Wasseranteil der Schneekugeln unmittelbar nach der Wassereinspritzung bestimmt werden. Figur 10b zeigt die Streuquerschnitte, wie sie der Schnellschreiber unmittelbar nach der Wassereinspritzung registrierte, und zwar in Funktion des neuen aus dem Gewicht nach der Wassereinspritzung berechneten äquivalenten Durchmessers. Streuquerschnitte der durchgefrorenen Schneekugeln (alles eingespritzte Eiswasser ist gefroren) finden sich



Figur 11

Streuquerschnitte von gefrorenen Schneekugeln mit dem Durchmesser 10, 15, 20 und 25 mm in Abhängigkeit des Luftgehaltes. 100% entsprechen dem Streuquerschnitt der Wasserkugel σ_W , 0% demjenigen der Eiskugel σ_E . Die unterbrochene Linie gibt den berechneten Streuquerschnitt der äquivalenten Eiskugel an. $\bar{\sigma}$ ist nach folgendem Gesetz aufgetragen

$$\bar{\sigma} = 100 \frac{\log(\sigma/\sigma_E)}{\log(\sigma_W/\sigma_E)}.$$

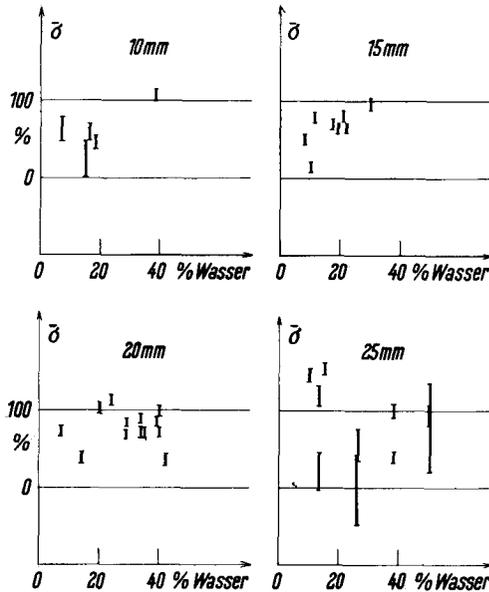
Diese Darstellung erlaubt den Vergleich von Probekörpern verschiedenen Durchmessers.

in gleicher Weise in Figur 10c. Figur 11 zeigt die Resultate aus den Figuren 10a und 10c, getrennt für die vier untersuchten Durchmesser. Wiederum gibt die ausgezogene Kurve den aus STEPHENS [2] Berechnungen ermittelten Streuquerschnitt der äquivalenten Eiskugel an.

Aus den Figuren 10 und 11 geht hervor, dass der äquivalente Durchmesser eine vernünftige Hilfsgrösse darstellt. Wie aus theoretischen Betrachtungen zu erwarten ist, treten bei 25-mm-Kugeln ($d = 0,5 \lambda$) die durch ungleiche Dichte hervorgerufenen Interferenzen am stärksten in Erscheinung.

Figur 10b demonstriert auffallend, dass Wasserinjektionen eine Streuquerschnittszunahme zur Folge haben. In Figur 12 finden sich die gleichen Resultate wie in Figur 10b, hier jedoch in Funktion des Wassergehaltes. Der Maßstab der Ordinate ist logarithmisch. 0% entspricht dem Streuquerschnitt der gewichtsäquivalenten Eis-

kugel, 100% entsprechen demjenigen der äquivalenten Wasserkugel. Diese Darstellung ermöglicht den Vergleich der Streuquerschnitte von Kugeln mit verschiedenem Durchmesser in Funktion des Wassergehaltes. Die Streuquerschnitte liegen ab 5% Wassergehalt bedeutend über demjenigen der äquivalenten Eiskugel. Dies steht im Gegensatz zu den Berechnungen von BATTAN und HERMAN [9] für Eis-Wasser-Gemische. Nach diesen Autoren werden viel höhere Wassergehalte (50 bis 70%) be-

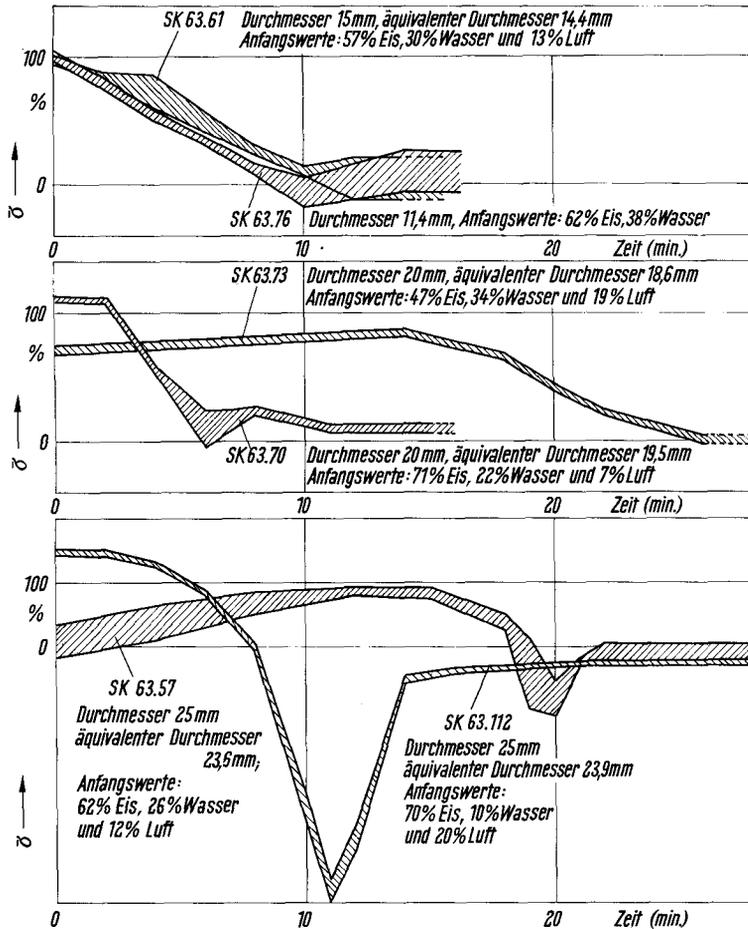


Figur 12

Streuquerschnitte von wassergetränkten Schneekugeln (Durchmesser 10, 15, 20 und 25 mm) in Abhängigkeit des Wassergehaltes. 100% entsprechen dem Streuquerschnitt der äquivalenten Wasserkugel und 0% der äquivalenten Eiskugel. Erklärung von $\bar{\sigma}$ siehe Text Figur 11.

nötigt, um eine gleiche Zunahme des Streuquerschnittes zu erhalten. In einem theoretischen Teil am Schlusse dieser Arbeit wird der Versuch unternommen, die Streuquerschnitte von Eis-Wasser-Gemischen unter Berücksichtigung der Schwammeis-Struktur (Eis-Struktur benetzt oder gefüllt mit Wasser, im Gegensatz zum homogenen Gemisch von Eis und Wasser) abzuschätzen.

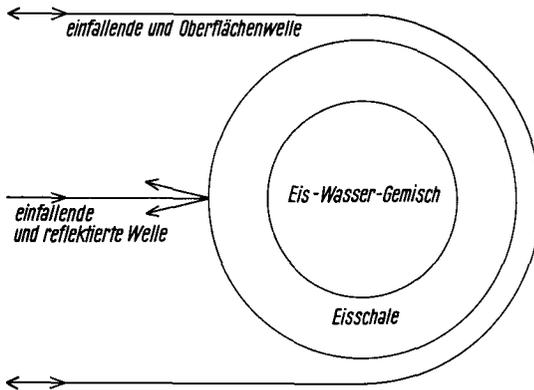
Wie schon bemerkt, wurde der Streuquerschnitt vom Einspritzen des Wassers an bis zum vollständigen Gefrieren registriert. Dabei wächst die Eisschale von aussen nach innen auf Kosten der immer kleiner werdenden Schwammeis-Kugel. Figur 13 zeigt solche Gefriererläufe in Funktion der Zeit. Die Streuquerschnitte sind wiederum bezogen auf diejenigen der äquivalenten Eis- (0%) bzw. Wasserkugel (100%). Die Breite des Bandes in Ordinateenrichtung gibt die während der Rotation des Probekörpers gemessenen Schwankungen des Streuquerschnittes an. Kleine Kugeln weisen den grössten Streuquerschnitt am Anfang auf. Dasselbe gilt auch noch für 20-mm-Kugeln mit kleinerem Wassergehalt als 25% und von 25-mm-Kugeln, deren Wassergehalt 10% nicht überschreitet. In Wasser getränkte Schneekugeln mit mehr als den genannten Wassergehalten weisen in den meisten Fällen ein Maximum des Streu-



Figur 13

Streuquerschnitte von wassergetränkten Schneekugeln während des Gefrierprozesses. 100% entsprechen dem Streuquerschnitt der äquivalenten Wasserkugeln und 0% demjenigen der äquivalenten Eiskugel. Erklärung von $\bar{\sigma}$ siehe Text Figur 11.

querschnittes während des Gefrierprozesses auf, dieses ist aber nicht so gross wie der Anfangs-Streuquerschnitt von Kugeln mit kleinerem Wassergehalt. (Grösster Streuquerschnitt am Anfang, kein Maximum während des Gefrierlaufes.) Der Streuquerschnitt der 25-mm-Kugeln hat in allen gemessenen Fällen vor dem endgültigen Gefrieren ein mehr oder weniger ausgeprägtes Minimum. Dabei haben wir es zweifellos wieder mit einer Interferenzerscheinung zu tun. Grob und anschaulich gesehen, kann man eine direkt reflektierte Welle und eine durch die Schicht anderer Dielektrizitätskonstante geführte Oberflächenwelle unterscheiden (Figur 14), deren Amplitude und Phase durch Grösse der Kugel, Schichtdicke und Dielektrizitätskonstanten gegeben sind. Je nach Phasenlage können sie sich gegenseitig verstärken oder abschwächen. Das Verhältnis des grössten zum kleinsten Streuquerschnitt während des Gefrierprozesses betrug bis zu 30 db (Faktor 1000).



Figur 14

Modell zur Erklärung der Streuquerschnitts-Variationen während des Gefrierprozesses. Das Radarecho setzt sich grob gesehen aus der Summe der direkt reflektierten Welle und der Oberflächenwelle zusammen, deren gegenseitige Phasenlage sich durch ständiges Wachsen der Eisschale während des Gefrierprozesses verändert.

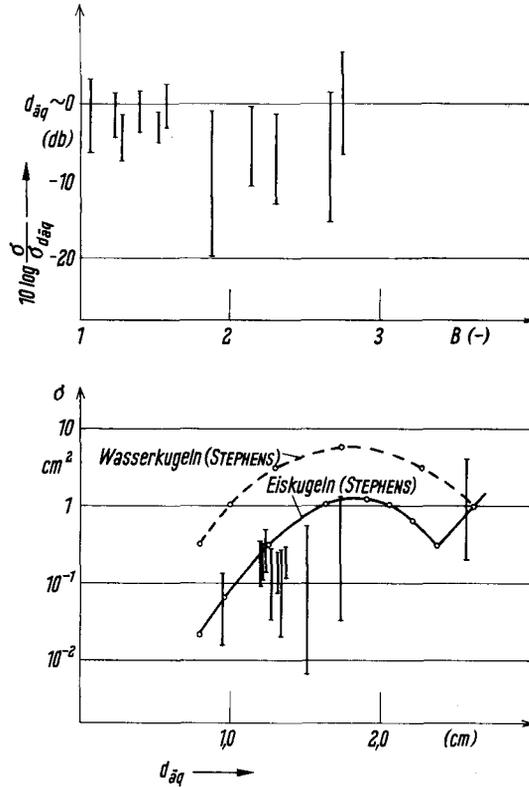
7.2 Messungen an Schneekörpern

Um einen groben Überblick über den Einfluss der Form zu erhalten, wurden Streuquerschnitte von unregelmässigen, gefrorenen Schneekörpern gemessen. Die Resultate finden sich in Figur 15. Der Streuquerschnitt ist als Funktion von B , dem Verhältnis der grössten zur kleinsten Ausdehnung des Schneekörpers, in Figur 15a dargestellt. Die Echounterschiede betragen zwischen 6 und 20 db und nehmen, wie zu erwarten war, mit grösser werdendem B zu. Figur 15b zeigt den Streuquerschnitt der gleichen Körper in Funktion des äquivalenten Durchmessers. Wir finden ein ähnliches Resultat wie bei den Dichteinflüssen der Schneekugeln: Aus dem äquivalenten Durchmesser kann man in brauchbarer Näherung den Streuquerschnitt bestimmen.

Schon aus diesen wenigen Messungen geht eindeutig hervor, dass für Struktur- und Materialuntersuchungen Probekörper verwendet werden sollen, die möglichst wenig von der Kugelgestalt abweichen.

7.3 Messungen an Eis-Wasser-Gemischen, hergestellt im Hagelversuchskanal

Alle bisher beschriebenen Messungen dienten dazu, Vorstellungen von der Grösse der verschiedenen Einflüsse zu erhalten und den Aussagewert des äquivalenten Durchmessers zu prüfen. Die einzelnen Messvorgänge waren dabei nicht reproduzierbar, da sowohl die Dichte einer Schneekugel als auch die Menge des Eiswassers, die sie aufsaugen konnte, nur in groben Grenzen verändert werden konnten. Es blieb also nur der Weg, möglichst viele Kugeln herzustellen, auszumessen und zu versuchen, die Resultate nach plausiblen Gesichtspunkten zu ordnen. Anders steht es mit den in diesem Abschnitt beschriebenen Experimenten. Der Hagelversuchskanal (13) des Eidgenössischen Institutes für Schnee- und Lawinenforschung erlaubt es, Messungen beliebig oft und mit grosser Genauigkeit zu reproduzieren und Wassergehalt, Schichtdichte und Schwammeisstruktur in weiten Grenzen gezielt zu variieren. Um aus der Vielfalt der Erscheinungen einen erfassbaren Anteil herauszulesen, beschränkt sich



Figur 15

Streuquerschnitte von unregelmässigen Schneekörnern (Eis-Luft-Gemische), in Figur 15a dargestellt in Funktion von B , dem Verhältnis der grössten zur kleinsten Abmessung und in Figur 15b in Funktion des äquivalenten Durchmessers d_{0q} , dem Durchmesser der kompakten Eiskugel gleichen Gewichtes.

diese Arbeit darauf, den Einfluss des Wassergehaltes auf die Echointensität bei einer Wellenlänge von $\lambda = 5,05$ cm und einem Kugeldurchmesser von rund 2 cm eingehend zu untersuchen.

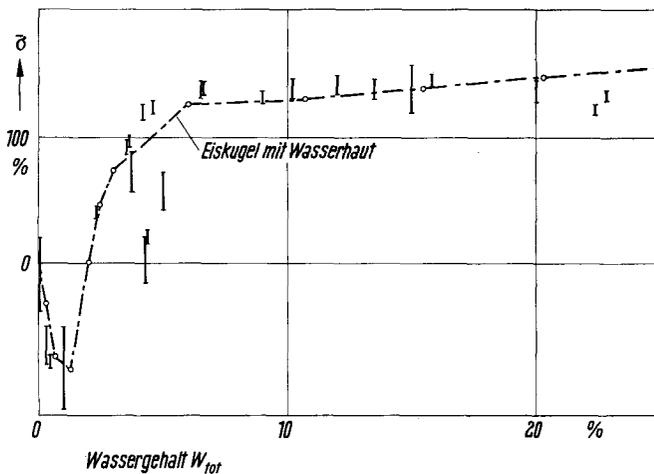
Das Herstellungsverfahren der Probekörper wurde bereits von JOSS und LIST [14] anhand von Beispielen beschrieben. Hier seien nur die wichtigsten Punkte zusammengefasst. Für alle in diesem Kapitel behandelten Versuche wurde von einer homogenen Eiskugel ausgegangen (Durchmesser $19,5 \pm 0,3$ mm). Diese Kugel wurde im Hagelversuchskanal vereist, wobei die Schalendicke des Schwammeises bis zu 3 mm betrug. Der Wassergehalt der Schale konnte zwischen 0 und 40% variiert werden, beeinflusst durch folgende Parameter:

Lufttemperatur, Luftgeschwindigkeit, Vereisungszeit, freier Wassergehalt der Luft in Form von Tröpfchen.

Wenn die oben angegebenen Parameter konstant gehalten werden, können Eis-Wasser-Gemische mit gleichem Wassergehalt, gleicher Schwammeis-Dicke und Struktur erzeugt werden. Für jede Messung werden drei gleiche Probekörper hergestellt. Der erste wird für die Radarmessung verwendet. Der zweite kann zur Bestimmung

des Wassergehaltes auszentrifugiert werden. Ein Dünnschnitt des auszentrifugierten Kornes zeigt die Schwammeis-Struktur. An einem Dünnschnitt durch den dritten nicht zentrifugierten gefrorenen Probekörper kann die Kristallstruktur beobachtet werden. Durch Rotation der Eiskugel im Hagelkanal um eine horizontale Achse wurde eine möglichst gleichmässige Schichtdicke erreicht. Ihre Unregelmässigkeiten zeigen sich wiederum, neben der visuellen Erscheinung, durch die bei Rotation des Probekörpers auftretende Variation des Streuquerschnittes. Um den Einfluss des Wassergehaltes möglichst eindeutig zu erfassen, wurden alle Eis-Wasser-Gemische auch im vollkommen gefrorenen Zustand gemessen. Während des Gefrierens bildete sich bei den Probekörpern mit grossem Wassergehalt eine Wasseransammlung am tiefsten Punkt, die die Asymmetrie natürlich vergrösserte. Zudem tritt beim gefrorenen Korn mehr Mikrowellen-Energie in sein Inneres und wird von der dem Radargerät abgewendeten Fläche teilweise reflektiert, um sich nach dem Austreten, je nach Phasenlage, zu der primär reflektierten Welle zu addieren oder von ihr zu subtrahieren (vergleiche Figur 14). Auch dieser Effekt wirkt sich in einer Vergrösserung der Schwankung des Streuquerschnittes bei der Rotation des Probekörpers aus.

In Figur 16 finden sich nun die Messresultate. Wiederum wurde der Streuquerschnitt (bezogen auf die äquivalente Eiskugel 0% und auf die Wasserkugel 100%) logarithmisch in Funktion des prozentualen Wassergehaltes (bezogen auf das totale Gewicht des Kornes) aufgetragen. Der Streuquerschnitt zeigt von 3% Wassergehalt an einen sehr ausgeprägten Anstieg. Es scheint, dass nicht der prozentuale Wassergehalt der Schicht selber, sondern nur der gesamte Wassergehalt des ganzen Probekörpers für die Grösse des Streuquerschnittes ausschlaggebend ist. Mit anderen Worten, eine dünne nasse Schicht reflektiert in den untersuchten Grenzen gleich wie eine dicke, weniger nasse Schicht gleichen Wassergehaltes. Wäre dies nicht der Fall,



Figur 16

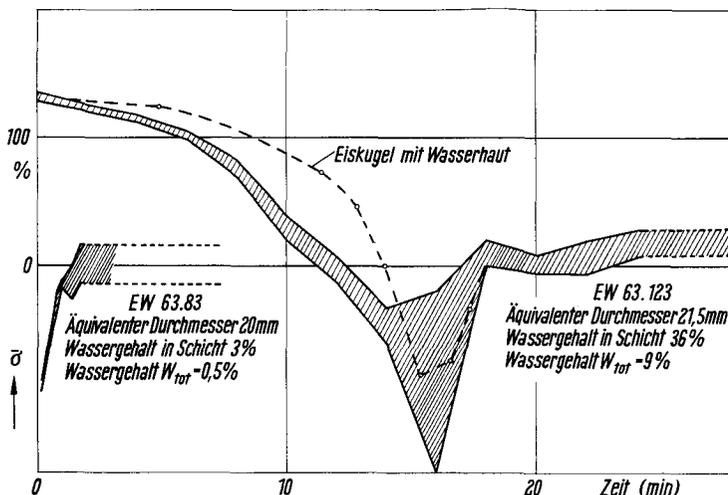
Streuquerschnitte der im Hagelversuchskanal hergestellten Eis-Wasser-Gemische (19,5 mm Eiskugel mit bis 3 mm dicker Schwammeis-Schale), dargestellt in Funktion des Wassergehaltes. 100% entsprechen dem Streuquerschnitt der äquivalenten Wasserkugel und 0% demjenigen der äquivalenten Eiskugel. Zum Vergleich zeigt die unterbrochene Kurve den von HERMAN und BATTAN berechneten Streuquerschnitt einer Eiskugel mit einer Wasserhaut vom gleichen Wassergehalt W_{tot} . Erklärung von σ siehe Text Figur 11.

dann müssten die Streuquerschnitte der dargestellten Eis-Wasser-Gemische (Wassergehalt der Schicht zwischen 0 und 45%) viel mehr streuen. Deshalb ist es naheliegend, den Grenzfall einer Eiskugel, überzogen mit einer Wasserhaut, zu untersuchen. Da aber eine Wasserhaut nur bis zu einer Dicke von 0,1 mm stabil ist, konnte ein solches Experiment nicht durchgeführt werden. Hier hilft uns die Theorie weiter. Wie schon bemerkt, kann der Streuquerschnitt einer reinen Eiskugel, umgeben von einer Wasserschale, berechnet werden. Diese Berechnung des Streuquerschnittes für die vorliegende Wellenlänge und Grösse wurde von HERMAN und BATTAN [11] bereits durchgeführt. Der prozentuale Wassergehalt W_{tot} , bezogen auf das totale Gewicht der Kugel, lässt sich aus der Schichtdicke x , dem Radius R und dem prozentualen Wassergehalt W_{Sch} der Schicht wie folgt berechnen; wobei die Dichte des Eises $\rho_E = 1$ gesetzt wird:

$$W_{tot} = W_{Sch} \left(1 - \frac{1}{[1 + (x/R)]^3} \right). \quad (8)$$

Der unterbrochene Linienzug in der Figur 16 zeigt das Resultat von HERMANS und BATTANS [11] Berechnungen. Diese Kurve fügt sich über Erwarten gut in unsere Messresultate ein, weist sie doch bei einem Wassergehalt $W_{tot} = 1\%$ ebenfalls ein Minimum auf. Drei Messungen, die zu den Eis-Wasser-Gemischen mit einem Wassergehalt zwischen 4 und 5% gehören, fallen aus der Kurve heraus. Sie wurden während eines mässig starken und kalten Windes ausgeführt. Es ist deshalb möglich, dass während des Aufhängens, das etwa 30 Sekunden beanspruchte, ein Teil des Wassers gefror, der wirklich während der Messung vorhandene Wassergehalt also kleiner war. Später wurden diese Messungen nur noch bei sehr günstigen Verhältnissen (Umgebungstemperatur etwa 0°C, wenig Wind) ausgeführt und die fraglichen Punkte neu eingemessen.

Figur 17 zeigt den Gefrierverlauf von Eis-Wasser-Gemischen bei einem Wassergehalt W_{tot} von 9 bzw. 0,5%. Während der Gefrierzeit von 19 Minuten (im ersten Fall) nahm der Wassergehalt der Schwammeis-Schicht (Dicke etwa 1 mm) von 9% des Gewichtes der ganzen Kugel bis 0% ab, wobei sich eine von aussen nach innen wachsende Eisschicht bildete. Wenn der Gefrierprozess linear mit der Zeit erfolgt wäre, was während der Gefrierzeit konstante Lufttemperatur, Feuchtigkeit und vor allem Windgeschwindigkeit erfordert hätte, und das verbleibende Wasser in jedem Moment in einer Haut um die Eiskugel konzentriert gewesen wäre, könnte man HERMANS und BATTANS [11] Berechnungen anwenden und würde dann die in Figur 17 unterbrochen gezeichnete Kurve erhalten haben. Vergleicht man diese mit der Kurve des Gefrierverlaufes des Eis-Wasser-Gemisches, so fällt auf, dass der Anfangsstreuquerschnitt, der Minimalstreuquerschnitt und der Endstreuquerschnitt gut miteinander übereinstimmen. Die Anordnung und die Struktur der Schicht scheinen somit keinen messbaren Einfluss auf den Streuquerschnitt auszuüben. Während des Auftretens des minimalen Streuquerschnittes waren die Schwankungen um den momentanen Mittelwert am grössten (vergleiche Figur 9). Dies gilt für die meisten Messungen und lässt sich folgendermassen erklären: Während des Echominimums wirken mehrere Teilwellen (vergleiche Figur 14) von ungefähr gleicher Intensität gegeneinander, was sich wiederum in einer verstärkten Abhängigkeit von den Unregelmässigkeiten der Form und des Gefrierprozesses äussert.

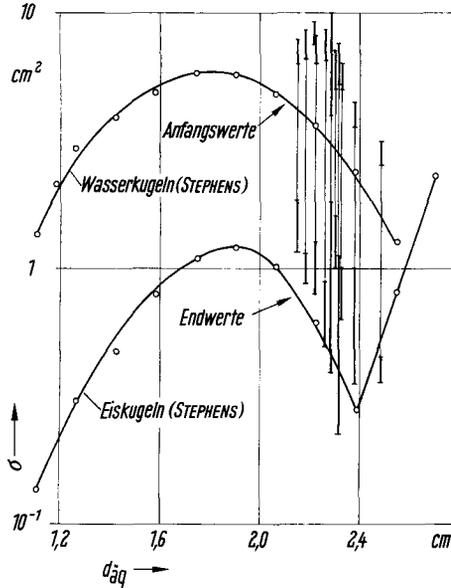


Figur 17

Verlauf des Streuquerschnittes während des Gefrierprozesses der Eis-Wasser-Gemische EW 63.83 und EW 63.123. 100% entsprechen dem Streuquerschnitt der äquivalenten Wasserkugel und 0% demjenigen der äquivalenten Eiskugel. Die unterbrochene Kurve zeigt den aus HERMANS und BATTANS Resultaten berechneten Gefrierverlauf der entsprechenden Eiskugel mit Wasserhaut im Vergleich mit EW 63.123. Erklärung von σ siehe Text Figur 11.

Beim zweiten in Figur 17 aufgetragenen Experiment durchläuft die Gefrierkurve des Eis-Wasser-Gemisches auf Grund des kleinen Wassergehaltes nur Werte zwischen 0,5 und 0% und benötigt daher viel weniger Zeit. Wiederum entspricht das Minimum am Anfang den Berechnungen von HERMAN und BATTAN.

Figur 18 zeigt die Anfangswerte (Eis-Wasser-Gemisch) und die Endwerte (gefrorenes Eis) des Streuquerschnittes jedes künstlichen Hagelkornes mit einem Wassergehalt $W_{tot} \geq 5\%$, aufgetragen in Funktion des äquivalenten Durchmessers. Zum Vergleich sind wiederum die theoretischen Resultate von STEPHENS [2] für Eis und Wasserkugeln aufgetragen worden. Im Mittel beträgt die Differenz zwischen dem Streuquerschnitt in nassem und gefrorenem Zustand 8,7 db; die gemessenen Anfangs-Streuquerschnitte sind im Mittel doppelt so gross als die berechneten der äquivalenten Wasserkugeln. BATTANS und HERMANS [9] Berechnungen für eine Eiskugel von 20 mm Durchmesser, überzogen mit einer 1 mm dicken, im mathematischen Sinne homogenen Schwammeisschicht (Wassergehalt bis zu 50%), ergaben keine nennenswerte Vergrößerung oder Verkleinerung des Streuquerschnittes, verglichen mit dem der reinen Eiskugel. Natürlich stellt sich nun die Frage, wie sich eine solche Diskrepanz erklären lässt. Zu diesem Zweck müssen wir untersuchen, wie BATTAN und HERMAN [9] ihre Berechnungen ausgeführt haben. Wie schon bemerkt, können nur Streuquerschnitte von Körpern berechnet werden, deren Brechungsindex in Kugelschalen konstant ist. Folglich musste das von LIST untersuchte wirkliche Schwammeis (Eisstruktur benetzt oder gefüllt mit Wasser) durch eine für die Berechnung erfassbare homogene Masse ersetzt werden. Um den Brechungsindex dieser Masse zu bestimmen, benützten BATTAN und HERMAN [9] eine von DEBYE (1929) abgeleitete, für ein homogenes Gemisch von zwei Flüssigkeiten mit reellem Brechungsindex gültige Formel.



Figur 18

Messwerte am Anfang (Eis-Wasser-Gemisch) und am Ende (trockenes, gefrorenes Eis) der Streuquerschnitte ($\lambda = 5,05$ cm) aller im Hagelversuchskanal erzeugten Eis-Wasser-Gemische (Eiskugel mit Schwammeis-Schicht) mit einem Wassergehalt $W_{tot} \geq 5\%$ in Funktion des äquivalenten Durchmessers.

Der reelle Brechungsindex von Eis als erste und der komplexe Brechungsindex von Wasser als zweite Komponente, wurden in diese Formel eingesetzt und aus diesen beiden der Brechungsindex von Schwammeis in Funktion des Wassergehaltes abgeleitet. Dies ist das einzige heute bekannte Verfahren, das die rein theoretische Berechnung von Streuquerschnitten von Eis-Wasser-Gemischen erlaubt.

Nur auf Grund von Messungen an wirklichen Eis-Wasser-Gemischen kann man entscheiden, ob die für theoretische Berechnungen notwendigen idealisierenden Annahmen zulässig sind. Unsere Messungen haben das widerlegt. Deshalb soll im nächsten Kapitel versucht werden, Streuquerschnitte von Eis-Wasser-Gemischen auf eine andere Art unter Berücksichtigung der Schwammeisstruktur abzuschätzen.

8. Abschätzung der Streuquerschnitte von Eis-Wasser-Gemischen auf Grund von HERMANS und BATTANS Berechnungen an wasserüberzogenen Eiskugeln

Da sich der Ansatz, beruhend auf dem im mathematischen Sinne homogenen Eis-Wasser-Gemisch nicht bewährte, soll in diesem Kapitel versucht werden, dem inneren Aufbau des Schwammeises Rechnung zu tragen und so Streuquerschnitte von Schwammeis-Kugeln abzuschätzen. Anstelle des homogenen Gemisches denke man sich das Schwammeis aus kleinen Eiskugeln, die mit einer Wasserhaut überzogen sind, aufgebaut. Für einzelne kleinere und grössere Gebilde dieser Art liegen theoretische Berechnungen des Streuquerschnittes in Funktion der Wasserhaut-Dicke von HERMAN und BATTAN [11] vor.

Wenn die Antenne von einer Eiskugel mit dem Durchmesser d die Leistung P_1 empfängt, entspricht das an den Klemmen der Antenne einer induzierten Spannung

U_1 , falls Z die Klemmenimpedanz der Antenne darstellt:

$$U_1 = \sqrt{P_1 Z}. \quad (9)$$

Nehmen wir anstelle dieser einen Kugel im Impulsvolumen deren n an, die phasengleich erregt werden, dann summieren sich die induzierten Spannungen an der Klemmenimpedanz der Antenne linear:

$$U_n = n \sqrt{P_1 Z} \quad (10)$$

daraus berechnet sich die Leistung:

$$P_n = n^2 P_1. \quad (11)$$

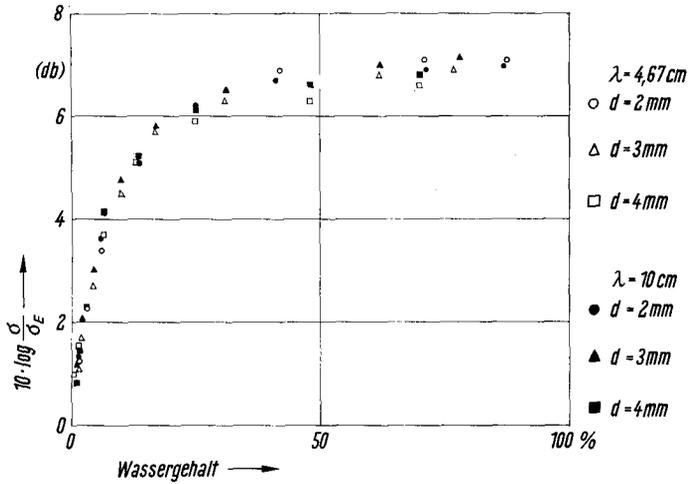
Der äquivalente Durchmesser (Durchmesser der gewichtsäquivalenten Eiskugel) dieser n Kugeln beträgt

$$d_{\text{äq}} = \sqrt[3]{n} d \quad (12)$$

diese Gleichung nach n aufgelöst ergibt in Formel 11 eingesetzt:

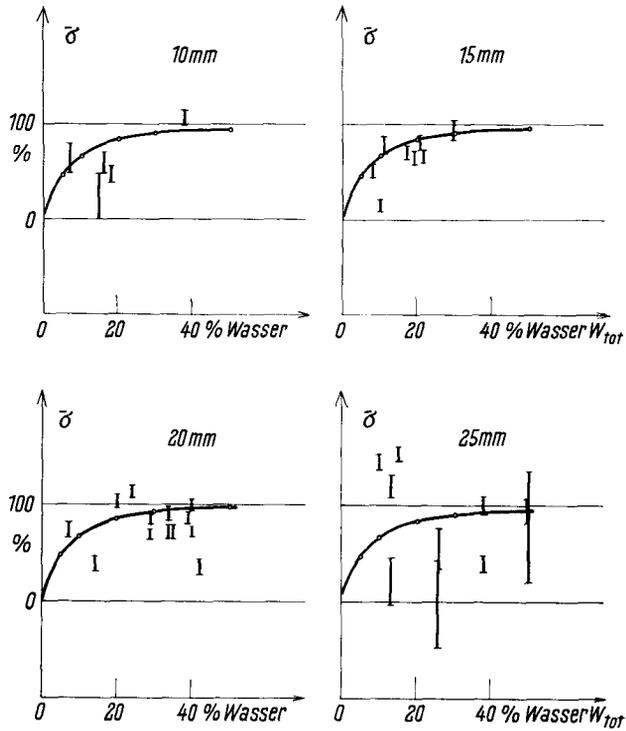
$$P_n = \left(\frac{d_{\text{äq}}}{d} \right)^6 P_1. \quad (13)$$

Dieses Resultat stimmt mit dem Gesetz von Rayleigh überein, das bekanntlich besagt, dass die Echoleistung proportional zur sechsten Potenz des Durchmessers ist ($d_{\text{äq}} \ll \lambda$ stellt ja in unserer Rechnung die Annahme dar, dass alle kleinen mit einer Wasserhaut überzogenen Eiskugeln gleichphasig angestrahlt werden). Nun denken wir uns alle n Kugeln mit einer Wasserhaut überzogen. HERMANS und BATTANS [11] Berechnungen geben Auskunft darüber, wie der Streuquerschnitt σ_1 und damit die Leistung P_1 in Funktion der Wasserhautdicke zunimmt. Die in unserem Gedankenexperiment von den n nassen Eiskugeln, unserem Eis-Wasser-Gemisch, erhaltene Energie P_n und damit sein Streuquerschnitt wird nach Formel 13 um den gleichen Prozentsatz ansteigen wie P_1 . Mit anderen Worten, falls der Durchmesser d , verglichen mit der Wellenlänge, klein ist, muss nach diesem Gesetz die Kurve der prozentualen Streuquerschnitt-Zunahme in Funktion des Wassergehaltes unabhängig vom Durchmesser sein. In Figur 19 ist diese Kurve für 2, 3 und 4 mm grosse Eiskugeln mit Wasserhaut für die Wellenlänge von 4,67 und 10 cm dargestellt. Man sieht, dass unsere Erwartungen zutreffen und dass, da der Brechungsindex bei beiden Wellenlängen ungefähr gleich ist, die Echozunahme in Funktion des Wassergehaltes in einer einzigen Kurve angegeben werden kann. Nach Formel 13 können wir dieses Resultat nun auf Eis-Wasser-Gemische übertragen und damit deren Streuquerschnitte abschätzen. Um das zu verifizieren, sind in Figur 20 noch einmal die gleichen Messungen an Schneekugeln wie in Figur 12 aufgetragen und die aus Figur 19 entnommene Kurve eingezeichnet worden. Trotz der starken Streuung der Messwerte stimmen die Messungen befriedigend mit den Ergebnissen des einfachen Modells überein. Durch die schon im Kapitel 7.1 (Messungen an Schneekugeln) erwähnten Asymmetrien streuen die Messwerte erwartungsgemäss mit zunehmendem Schneekugeldurchmesser immer mehr um den berechneten Mittelwert. Dabei ist die zur Ableitung dieser Kurve benutzte Annahme $d \ll \lambda$ immer weniger erfüllt. Für Messungen in einer Gewitterwolke



Figur 19

Berechnete Streuquerschnitte von Eis-Wasser-Gemischen in Funktion des prozentualen Wasseranteiles bezogen auf den Streuquerschnitt der Eiskugel gleichen Durchmessers. Die aufgetragenen Punkte wurden aus HERMANS und BATTANS Resultaten für wasserüberzogene Eiskugeln für die in der Abbildung angegebenen Durchmesser und Wellenlängen berechnet.



Figur 20

Vergleich der gemessenen Streuquerschnitte von wassergetränkten Schneekugeln (siehe Figur 12) und der berechneten Zunahme (ausgezogene, aus Figur 19 entnommene Kurve) in Funktion des Wassergehaltes. 100% entsprechen dem Streuquerschnitt der äquivalenten Wasserkugel und 0% demjenigen der äquivalenten Eiskugel. Erklärung von $\bar{\sigma}$ siehe Text Figur 11.

wird aber gerade der Mittelwert, den man aus der berechneten Kurve entnehmen kann, von Bedeutung sein, da ja die Streuquerschnitte aller im Impulsvolumen ($> 10^5 \text{ m}^3$) vorhandenen Hydrometeore gesamthaft gemessen werden.

9. Diskussion der Resultate

Welchen Platz nehmen nun die in dieser Arbeit gefundenen Erkenntnisse im gesamten gegenwärtigen Wissen über Radaruntersuchungen in Wolken ein? Man kann grundsätzlich bezüglich Radar vier Gruppen von Hydrometeoren unterscheiden:

a) Regen, b) Schnee, c) trockene Graupel und gefrorener Hagel, d) Eis-Wasser-Gemische (nasser Schnee, nasse Graupel und nasser Hagel).

Über die Bestimmung der Streuquerschnitte von a) bis c) bestand seit langem Klarheit. Für Regen geben die äquivalenten Wasserkugeln, für Schnee und gefrorenen Hagel die äquivalenten Eiskugeln um so bessere Mittelwerte, je weniger sie von der Kugelform abweichen. Dabei muss beachtet werden, dass Regentropfen eines bestimmten Grössenspektrums und gegebener Wassermenge pro m^3 ein 6–10mal grösseres Radarecho geben als Schnee bzw. gefrorener Hagel. Diese Aussagen gelten für Hydrometeore, wie sie nach Untersuchungen im Tessin vorkommen und für Wellenlängen $\lambda \geq 5 \text{ cm}$. Kürzere Wellen wurden auf Grund der bereits aufgeführten Betrachtungen ausgeschlossen. Zweifel bestanden aber darüber, wie gross die Streuquerschnitte von Eis-Wasser-Gemischen sind, das heisst von Hagelkörnern, wie sie nach Beobachtungen in der Natur meistens vorkommen und deren Erkennung mittels Radar daher besonders wertvoll ist. Bis jetzt hat man sie, auf theoretische Berechnungen abstellend, gleich wie äquivalente Eiskugeln behandelt, was in dieser Arbeit als nicht zulässig nachgewiesen wurde. Nach unseren Messungen besitzen ja Eis-Wasser-Gemische (kein Eiskern) mit einem gesamten Wassergehalt von nur $W_{tot} = 10\%$ Streuquerschnitte, die gleich dem geometrischen Mittel aus jenem der äquivalenten Eis- und Wasserkugeln sind. Verhältnismässig noch grössere Streuquerschnitte wurden gemessen, wenn das Eis-Wasser-Gemisch in einer Schale um einen Eiskern angeordnet war. Dann waren sie, von einem Wassergehalt $W_{tot} = 5\%$ an, im Mittel doppelt so gross wie diejenigen der äquivalenten Wasserkugeln. Damit lassen sich die in der Einleitung erwähnten Messungen von DONALDSON [7] mit natürlichen, am Boden aufgefundenen Hagelkörnern erklären. Nach einer privaten Mitteilung von ATLAS ist bereits eine auf unseren Resultaten beruhende Arbeit in Vorbereitung, die mehr über die Untersuchungen von DONALDSON aussagen wird.

Dass Eis-Wasser-Gemische viel stärker als äquivalente Eiskugeln reflektieren, lässt die von uns vermutete Existenz einer Echointensitäts-Grenze als sehr wahrscheinlich erscheinen. Diese Grenze würde es erlauben, Hagel in Gewitterwolken mittels Radar unter besonderen Umständen zu erkennen. Folgende Überlegungen sollen das begründen: Wenn wir uns die freie Wassermenge M (kg/m^3) in einer Gewitterwolke konstant denken und alle Hydrometeore den gleichen Durchmesser besitzen, lassen sich unter Zuhilfenahme ihres spezifischen Gewichtes ρ (kg/m^3) ihre Anzahl n (m^{-3}) und der gesamte auf den m^3 bezogene Streuquerschnitt η (m^{-1}) bestimmen:

$$n = \frac{6 M}{d^3 \pi \rho}, \quad (14)$$

η aus dem Streuquerschnitt σ berechnet

$$\eta = n \sigma \quad (15)$$

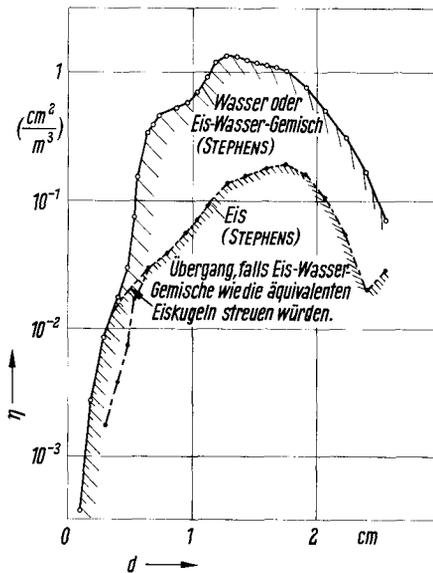
und σ durch den Streufaktor f_s ersetzt

$$\sigma = \frac{\pi d^2}{4} f_s \quad (16)$$

ergibt mit Gleichung 14):

$$\eta = \frac{3}{2} \frac{M}{dQ} f_s \quad (17)$$

Dieser Grösse wäre, falls das Impulsvolumen ganz in der beschriebenen Art angefüllt ist, das vom Radargerät empfangene Signal proportional. In Figur 21 ist η in



Figur 21

Der auf das Volumen bezogene Streuquerschnitt $\eta = (3 M/2 dQ) f_s$ (proportional zum Radarecho) in Funktion des Hydrometeor-Durchmessers d bei konstantem Wassergehalt M in der Wolke ($M = 5 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 5 \text{ cm}$).

Funktion des Durchmessers für 5-cm-Wellen für $M = 5 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^3$ *) aufgetragen. Da Regentropfen in der Atmosphäre nur bis zu einem Durchmesser von 5 mm stabil sein dürften, müsste, falls Eis-Wasser-Gemische wie Eiskugeln reflektieren, η für $d > 5 \text{ mm}$ der Eiskurve folgen (mit strichpunktierter Linie in Figur 21 angedeutet). Unsere Messungen zeigen hingegen, dass die Streuquerschnitte von Eis-Wasser-Gemischen weiter der Wasserkurve folgen, ja diese sogar überschreiten können, was die gewünschte Echointensitätsgrenze noch begünstigen würde. Ein Radarecho, das den für maximalen Wassergehalt (aus anderen meteorologischen Beobachtungen abzuleiten) gültigen Intensitätswert, die Echointensitätsgrenze, überschreitet, müsste als Hagel

*) Anmerkung: Da der auf das Volumen bezogene Streuquerschnitt proportional dem Wassergehalt M ist, würde $M = 5 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ den Wert η um einen Faktor 10 vergrössern und damit alle in der Figur 21 dargestellten Kurven um eine Zehnerpotenz in Ordinateenrichtung verschieben.

gedeutet werden. Dagegen war starker Regen von schwachem Hagel nicht zu unterscheiden.

Der Wert der Grenze wird von verschiedenen Faktoren bestimmt, unter anderem vom Spektrum der Hagelkörner in Abhängigkeit von der Wassermenge M , vom Auflösungsvermögen und von der Wellenlänge des Radargerätes, um nur die wichtigsten zu nennen. Deshalb wird der nächste Schritt darin bestehen, diese Grenze und ihre Parameter näher zu untersuchen.

10. Zusammenfassung

Die beschriebene Apparatur erlaubt ein einfaches, rasches und genaues Bestimmen der Streuquerschnitte von Probekörpern in der Grössenordnung der in der Natur vorkommenden Hagelkörner. Die Stabilität der Apparatur, kontrolliert durch periodisches Einschleusen von Metallkugeln an den Messplatz, war so gut, dass zwischen dem Einschalten am Morgen und dem Ausschalten am Abend keine Nachabstimmung vorgenommen werden musste. Dies ermöglichte zuverlässiges Messen von Gefrierverläufen.

Einleitende Messungen an Schneekörpern und gefrorenen Schneekugeln haben gezeigt, dass der äquivalente Durchmesser einen brauchbaren Mittelwert für die zu erwartenden Streuquerschnitte von unregelmässigen Körpern bildet.

Mit Hilfe des Hagelversuchskanals und weiterer Einrichtungen des Eidgenössischen Institutes für Schnee- und Lawinenforschung war es möglich, Eis-Wasser-Gemische von gewünschter Zusammensetzung reproduzierbar herzustellen und den Einfluss des Wassergehaltes in einer Schwammeis-Schicht um eine Eiskugel (Wellenlänge 5 cm, Durchmesser der Probekörper 2 bis 2,5 cm) auf die Grösse des Streuquerschnittes abzuklären. Dabei wurde festgestellt, dass ein kleiner Wasseranteil W_{tot} von rund 5% in der Schwammeis-Schicht genügt, um den Streuquerschnitt im Mittel gegenüber dem gefrorenen Korn um einen Faktor 8 zu vergrössern. Damit wurden die gemessenen Streuquerschnitte im Mittel doppelt so gross, wie diejenigen von äquivalenten Wasserkugeln. Dies steht im Gegensatz zu theoretischen Berechnungen von BATTAN und HERMAN [9] für diese Art von Eis-Wasser-Gemischen. Die gemessenen Anfangs-Streuquerschnitte und die anschliessenden Gefrierverläufe stimmen mit den Berechnungen von HERMAN und BATTAN [11] für wasserüberzogene Eiskugeln überein. Dieser Vergleich lässt überdies den Schluss zu, dass der Wassergehalt W_{tot} den Haupteinfluss auf den Streuquerschnitt ausübt. Struktur und Anordnung der Schicht (zum Beispiel Eiskern, Eis-Wasser-Gemisch-Schicht, Eisschicht) spielen eine untergeordnete Rolle. Wichtig scheint lediglich, dass Schwammeis eine von Wasserkavernen gefüllte Eisstruktur ist (8) und nicht ein homogenes Gemisch von Eis und Wasser, wie BATTAN und HERMAN [9] es ihren Berechnungen zu Grunde legen mussten.

Von diesen Erkenntnissen ausgehend, wurden auf HERMAN und BATTAN [11] Berechnungen fundierte Überlegungen angestellt, die auf eine Abhängigkeit des Streuquerschnittes der Eis-Wasser-Gemische von ihrem totalen Wassergehalt führten. Messungen an wassergetränkten Schneekugeln zeigten, dass die berechnete Kurve einen guten Anhaltspunkt für den Mittelwert der zu erwartenden Streuquerschnitte in Funktion ihres Wassergehaltes gibt. Das lässt sich nicht mit BATTAN und HERMAN [9] rein theoretischen Berechnungen der entsprechenden homogenen Eis-Wasser-Ge-

mische vereinbaren, die keine Veränderung des Streuquerschnittes bis zu einem Wassergehalt von 50% ergeben haben.

Abschliessend lässt eine kurze Abschätzung der aus Gewittern zu erwartenden Radarechos vermuten, dass es möglich sein wird Regen von Hagel zu unterscheiden, indem Echointensitäten, die einen gewissen Wert überschreiten, nur durch Hagel erzeugt werden können.

11. Nachwort

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen des Forschungsprogrammes an der Forschungsstelle für Atmosphärenphysik des «Osservatorio Ticinese della Centrale Meteorologica Svizzera» in Locarno-Monti (Tessin) und teilweise im Eidgenössischen Institut für Schnee- und Lawinenforschung auf Weissfluhjoch-Davos ausgeführt. Für den grössten Teil der Untersuchung standen Mittel aus Krediten der «Eidgenössischen Kommission zum Studium der Hagelbildung und der Hagelbekämpfung» zur Verfügung. Mikrowellenmessgeräte wurden uns freundlicherweise vom Geophysics Research Directorate (AFCRL), vermittelt durch das European Office, Aerospace Research, United States Airforce, unter Kontrakt AF61 (052)-559 überlassen.

Es ist mir ein Bedürfnis, Herrn J. C. THAMS, Direktor des Osservatorio Ticinese und der Forschungsstelle für Atmosphärenphysik, für seine ständige Hilfe, seinen Rat und sein immerwährendes Wohlwollen herzlich zu danken. Mein Dank gilt auch Herrn Dr. M. DE QUERVAIN, Direktor des Eidgenössischen Institutes für Schnee- und Lawinenforschung, der es mir ermöglichte, auf Weissfluhjoch-Davos zu arbeiten. Dieser Teil der Untersuchungen wäre aber nicht so erfolgreich verlaufen, wenn Herr Prof. Dr. R. LIST und seine Gruppe sich nicht so spontan und aktiv an den Forschungen beteiligt hätten. Ihnen bin ich ganz besonders verbunden.

Herr Prof. Dr. K. BERGER, Eidgenössische Technische Hochschule in Zürich, hat die Entwicklung meiner Arbeit mit grossem Interesse und Anteilnahme verfolgt. Auch ihm möchte ich meinen besten Dank aussprechen.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] GEOTIS, S. G., *Some Radar Measurements of Hailstorms*, J. Appl. Meteor. 2, 270 (1963).
- [2] STEPHENS, J. J., *Radar Cross-Sections for Water and Ice Spheres*, J. Meteor. 18, 348 (1961).
- [3] KERR, D. E., M. I. T. *Radiation Lab. Series*, 13 (McGraw-Hill, New York, 452, 1951).
- [4] ATLAS, D., HARPER, W. G., LUDLAM, F. H., und MACKLING, W. C., *Radar Scatter by Large Hail*, Quart. J. Roy. Met. Soc. 86, 468 (1960).
- [5] HARPER, W. G., *Radar Back Scattering from Oblate Spheroids*, Nubila 5, 60 (1962).
- [6] GERHARDT, J. R., TOLBERT, C. W., BRUNSTEIN, S. A., und BAHN, W. W., *Experimental Determinations of the Back-Scattering Cross Sections of Water Drops and Wet and Dry Ice Spheres at 3,2 Centimeters*, J. Meteor. 18, 340 (1961).
- [7] DONALDSON, R. J., *Radar Reflectivity Profiles in Thunderstorms*, J. Meteor. 18, 292 (1961).
- [8] LIST, R., *On the Growth of Hailstones*, Nubila 4, 29 (1961).
- [9] BATTAN, L. J., und HERMAN, B. M., *The Radar Cross Sections of 'Spongy' Ice Spheres*, J. Geophys. Research 67, 5139 (1962).
- [10] GLOVER, K. M., und ATLAS, D., *On the Back-Scatter Cross Section of Ice Spheres*, Proceedings of the Tenth Weather Radar Conference, Washington D.C. 157 (1963).
- [11] HERMAN, B. M., und BATTAN, L. J., *Calculations of Mie Back-Scattering from Melting Ice Spheres*, J. Meteor. 18, 468 (1961).

- [12] ATLAS, D., and WEXLER, R., *Back-Scatter by Oblate Ice Spheroids*, J. Atmospheric Sci. 20, 48 (1963).
- [13] LIST, R., *Der Hagelversuchskanal*, Z. angew. Math. Phys. 10, 381 (1959).
- [14] JOSS, J., und LIST, R., *Zur Radarrückstrahlung von Eis-Wasser-Gemischen*, Z. angew. Math. Phys. 14, 376 (1963).

Summary

A small 5.05 cm radar set allowed rapid but accurate measuring of the cross section of single targets. Ice-water-mixtures were investigated having dimensions similar to actual hailstones reported in Southern Switzerland. The stability of the set, checked with a metal sphere before and after every measurement, was found to remain within 0.5 db over the period of a day. This allowed reliable determination of the cross section versus time during the freezing process.

Irregularly shaped snow particles, 9 to 25 mm actual diameter, showed mean cross sections similar to those of ice spheres having the same mass (equivalent diameter).

The hailtunnel and other facilities of the Institute for Snow and Avalanches Weissfluhjoch-Davos made it possible to reproduce icewater-mixtures with a given water content and ice structure. This spongy ice was grown on solid ice spheres of about 19.5 mm diameter with final dimensions ranging from 20 to 25 mm diameter. The results showed that a small water content ($W_{tot} \geq 5\%$ of the total weight of the teststone) can be sufficient to increase the mean cross section by a factor of eight compared with the same stone completely frozen, thus increasing the cross section to twice that of the equivalent water sphere. This contradicts theoretical calculations made by BATTAN and HERMAN [9] for particles of the same size and structure.

However the measured initial cross section and the cross section measured during the following freezing process agreed with theoretical calculations by HERMAN and BATTAN in their paper on water-coated ice spheres [11]. Therefore it seems that the liquid water content of the spongy stones, W_{tot} , is significant, but the ice structure in the spongy shell is of little importance as far as the cross section is concerned. Actually spongy ice is an ice structure filled with water caverns and not a homogenous mixture of ice and water as BATTAN and HERMAN had to assume in their calculations [9].

After examining these results, an attempt was made by considering the ice structure and the water caverns of a spongy ice sphere as a number of smaller water-coated ice spheres, to calculate their back-scattering cross section as a function of the total water content by means of the HERMAN and BATTAN data [11].

Measurements were then made with spheres consisting entirely of spongy ice (snow balls drenched in water). From these measurements it was found that for sizes between 10 and 25 mm the mean value of the cross section agreed well with the above calculated curve, showing a sharp increase in the cross section beginning with low water contents. This again contradicts BATTAN'S and HERMAN'S theoretical work on spongy ice spheres [9] with water contents up to 50% where no change in cross section is found.

It must be emphasized that the given results are probably only valid for the d/λ -range of these experiments.

In conclusion, from an estimate of the echo intensity expected in thunderstorms it seems feasible that hail may be distinguished from rain by means of an echo intensity limit.

(Eingegangen: 26. März 1964.)

Lebenslauf

Ich wurde am 15. Januar 1937 in Bern geboren. Meine ganze Schulzeit verbrachte ich an stadtbernischen Schulen. 1956 schloss ich meine Gymnasialzeit mit einer C-Matura ab. Von 1957 an studierte ich an der Eidg. Technischen Hochschule in Zürich und beendete das Studium eines Elektroingenieurs 1961 mit dem Diplom der Studienrichtung Schwachstrom. Die erste Hälfte des Jahres 1962 konnte ich mit einem Stipendium des Schweizerischen Nationalfonds am Massachusetts Institute of Technology in Cambridge (USA) verbringen, um mir dort Kenntnisse auf dem Gebiete der Radarmeteorologie anzueignen. Dies geschah im Hinblick auf meine Tätigkeit am Osservatorio Ticinese in Locarno-Monti, wo ich mich mit Forschungen auf dem Gebiet der Wolkenphysik befasse.