

In-situ Messung großer Hydrometeore mit Hilfe der In-line-Holographie

Dissertation
zur Erlangung des Grades
„Doktor der Naturwissenschaften“
am Fachbereich Physik
der Johannes Gutenberg-Universität Mainz

Hermann-Josef Vössing
geboren in Wiesbaden

Mainz 2001

Datum der mündlichen Prüfung: 4. Oktober 2001

**In-situ Messung großer Hydrometeore
mit Hilfe der In-line-Holographie**

Hermann-Josef Vössing

Mainzer Dissertation
D77

Mainz 2001

für Christine

Zusammenfassung

Die vorliegende Dissertation beschreibt die Entwicklung und Erprobung einer Apparatur zur holographischen In-situ-Messung großer Hydrometeore (HODAR).

Dazu wird ein etwa 500 dm³ großes Meßvolumen in der freien Atmosphäre mit der In-line-Holographie aufgezeichnet. Das HODAR macht eine dreidimensionale Momentaufnahme eines definierten Meßvolumens. In dieser Aufnahme kann die Größe und Form einzelner Hydrometeore, aber auch ihre Position im Meßvolumen ausgemessen werden. Daraus sind Größen- und Abstandsverteilungen der Hydrometeore zu bestimmen. Mit Hilfe von Doppelbelichtungen lassen sich zusätzlich auch ihre Geschwindigkeiten ermitteln.

Die Kenntnis dieser physikalischen Eigenschaften der Hydrometeore ist eine wichtige Voraussetzung für die Fernerkundungsverfahren, wie das RADAR, und für das Verständnis der Wolken- und Niederschlagsbildung. In-situ-Messungen sind unverzichtbar zur Validierung und Verbesserung der theoretischen Modelle und der unter vordefinierten Bedingungen ablaufenden Laborexperimente.

Im Verlauf dieser Arbeit werden zunächst die Hydrometeore vorgestellt. Die theoretischen Möglichkeiten einer Apparatur zur In-situ-Messung werden aus den Eigenschaften des holographischen Bildes entwickelt. Anschließend wird der verwirklichte Aufbau des HODAR erläutert. Kalibrierung und Test, sowie Messungen, die die Fähigkeiten des HODAR unter Beweis stellen, werden beschrieben:

Es werden Größenverteilungen der Regentropfen aus Landregenereignissen gezeigt. Ein Vergleich mit dem Distrometer wird vorgenommen. Dieses scheint den Anteil kleiner Tropfen ($r < 500 \mu\text{m}$) zu unterschätzen. Es zeigen sich Abweichungen der Fallgeschwindigkeit der Regentropfen von ihrer theoretischen Endfallgeschwindigkeit von bis zu 30%. Die Form und das Achsenverhältnis der Regentropfen ist bestimmbar und wird mit Laborexperimenten verglichen. Dabei muß jedoch das Problem der Oszillation der Regentropfen berücksichtigt werden. Die Regentropfen liegen dichter benachbart als angenommen. So waren in einer Messung über 20% der Tropfen näher als 50 Radien aneinander. Eine Artunterscheidung der Hydrometeore in kalten Niederschlägen kann vorgenommen werden. In einer Messung werden 3 Arten von Hydrometeoren klassifiziert. Schließlich werden die Möglichkeiten der Detailuntersuchung von Schneeflocken dargestellt und einige holographische Aufnahmen dazu gezeigt.

Insgesamt kann die Entwicklung einer Apparatur zur In-situ-Messung großer Hydrometeore als gelungen betrachtet werden und die Apparatur steht für weitere Messungen bereit.

INHALT

1	EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG	1
2	HYDROMETEORE	7
2.1	Niederschlagsbildung	7
2.2	Wesentliche Charakteristika von Hydrometeoren	10
2.2.1	Wolkentröpfchen	10
2.2.2	Nebeltröpfchen	11
2.2.3	Nieseltröpfchen	13
2.2.4	Regentropfen	13
2.2.5	Eiskristalle und Schnee	14
2.2.6	Graupel	17
2.2.7	Hagel und Eiskörner	18
2.2.8	Überblick über die Charakteristika der Hydrometeore	20
2.3	Messung von Hydrometeoren	22
2.3.1	Distrometer	23
2.3.2	Pluviospektrometer	24
2.3.3	Guttalgor	25
2.3.4	Vergleich dieser Meßmethoden mit der Holographie	27
3	HOLOGRAPHISCHE METHODE	29
3.1	Prinzip der Holographie	30
3.1.1	Zweistrahloholographie (Off-axis-Technik)	31
3.1.2	Einstrahlholographie (In-line-Technik)	33
3.2	Eigenschaften des holographischen Bildes	35
3.3	Grundsätzliche Überlegungen zum optischen Aufbau des HODAR	42
3.3.1	Abbildungsgleichung des gewählten Aufbaus	43
3.3.2	Energiebedarfsrechnung	45
3.3.3	Pulsdauer	45
3.3.4	Filmauflösung	46
3.3.5	Minimalauflösung	47
3.3.6	Speckle	48
3.3.7	Aufnahmebereich	48
3.3.8	Filmformat	49
3.3.9	Laserkohärenz	50
3.3.10	Probleme dieses Meßverfahrens	51
		IX

4	AUFBAU DES HODAR	53
4.1	Aufnahmeapparatur	53
4.1.1	Container	56
4.1.2	Laser	57
4.1.3	Aufweitungsoptik	57
4.1.4	Umlenkspiegel	58
4.1.5	Holokameras	60
4.1.6	Objektiv der Kamera für das große Meßvolumen	61
4.1.7	Meßvolumen	62
4.2	Photochemische Entwicklung der Photoplatten	64
4.3	Rekonstruktionsapparatur	66
4.3.1	Laserquelle	68
4.3.2	Graukeil	68
4.3.3	Strahlaufweitung	68
4.3.4	Mikropositioniertisch	68
4.3.5	Videokameras	69
4.3.6	Bildanalysesystem	71
4.4	Zusammenstellung der technischen Daten	72
5	TEST UND ERPROBUNG DES HODAR	73
5.1	Test der Apparatur - Kalibrierung des HODAR	73
5.1.1	Eignungstest des Aufnahmeobjektivs	73
5.1.2	Kalibrierung durch Objekte bekannter Größe	74
5.1.3	Probleme der automatischen Auswertung von Hologrammen mit großen Hydrometeoren	78
5.2	Messungen mit dem HODAR	81
5.2.1	Meteorologische Daten der ausgewerteten Hologramme	82
5.2.2	Größenverteilungen	84
5.2.3	Vergleich der Größenverteilungen mit Distrometerdaten	88
5.2.4	Fallgeschwindigkeit der Regentropfen	90
5.2.5	Form und Achsenverhältnis fallender Tropfen	94
5.2.6	Tropfenoszillationen	96
5.2.7	Oszillation und Fallgeschwindigkeit	99
5.2.8	Abstände zwischen den Hydrometeoren	100
5.2.9	Artunterscheidung der Niederschlagsteilchen	104
5.2.10	Eiskristalle und Schneeflocken	107

6	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	111
	ANHANG	113
A	Umrechnung von Niederschlag/Fläche/Zeit auf Anzahl/Volumen	113
B	Fehlerbetrachtung	114
B.1	Abbildungsmaßstab	114
B.2	Monitorkalibrierfaktoren	114
B.3	Bildgröße eines Objektes	115
B.4	Positionsbestimmung der Hydrometeore im Bildvolumen	115
B.5	Bestimmung der Originalgröße der Hydrometeore aus der Bildgröße	115
B.6	Meßvolumen	116
B.7	Anzahlkonzentrationen	117
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	119
	TABELLENVERZEICHNIS	124
	VERZEICHNIS DER SYMBOLE UND ABKÜRZUNGEN	125
	LITERATUR	127

1 EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG

Wolken und die darin enthaltenen Wasserteilchen, die Hydrometeore, haben eine entscheidende Bedeutung für das Wettergeschehen und den Wasserkreislauf, aber auch für andere Stoffkreisläufe in der Atmosphäre. So existieren nur zwei Möglichkeiten, Stoffe, die einmal in die Atmosphäre gelangt sind, wieder aus ihr zu entfernen, die trockene und die nasse Deposition (Ablagerung).

Die trockene Deposition ist nur für wasserunlösliche und große Aerosolteilchen nennenswert, da kleine Teilchen ($r < 1 \mu\text{m}$) so geringe Depositionsraten haben, daß sie ohne die nasse Deposition monatelang ($>10^2 \text{ d}$) in der Atmosphäre suspendiert bleiben (Jaenicke, 1988). Deshalb kommt der nassen Deposition die Hauptbedeutung zu.

Nasse Deposition bedeutet jedoch, daß die Substanzen entweder in Tröpfchen gelöst oder aber vom Wasser umlagert werden. Diese Umlagerung ist ein wichtiger Faktor bei der Entstehung von Wolkenströpfchen: Feste Aerosolteilchen dienen dabei als Kondensationskeime. Diese werden von kondensierendem Wasser umlagert. Es entstehen kleine Tröpfchen. Einige dieser Tröpfchen wachsen durch Kondensation und Kollision weiter an, bis sie so groß sind, daß sie durch die Schwerkraft zu Boden sinken bzw. fallen. Im Hinabfallen fangen sie noch zusätzliche Aerosolteilchen und kleine Tropfen auf (Impaktion) und wachsen zu Regentropfen heran. Die umschlossenen bzw. gelösten Stoffe werden so zum Boden transportiert (Auswaschung, engl. scavening, so z.B. im Sauren Regen).

Für das Verständnis dieses Prozesses und auch der Wolken- und der Niederschlagsbildung insgesamt ist die Kenntnis der Mikrophysik der Tröpfchen und Tropfen bzw. Eisteilchen, kurz der Hydrometeore, wichtig. Modellrechnungen zur Wolkenbildung und moderne Fernerkundungsverfahren, wie RADAR, LIDAR und Satellitentechnik, benötigen dieses detaillierte Wissen, um exaktere Ergebnisse zu liefern.

Laboruntersuchungen z.B. im Windkanal (Diehl, 1995; Vohl et al., 1996) oder in akustischen Schwebefallen (Bauerecker und Neidhart, 1998) vertieften bereits das Wissen über die Eigenschaften einzelner Hydrometeore, bedürfen jedoch der Überprüfung durch Feld- oder In-situ-Messungen (Tokai und Beard, 1996; Murakami und Matsuo, 1990; Black und Willis, 1996; Beeck und Riethmüller, 1995). Nur diese geben Aufschluß über die in der Atmosphäre auftretenden Eigenschaften der Hydrometeore und die dabei vorherrschenden Bedingungen. Von diesen Messungen gibt es aber immer noch zu wenige. Auch die Untersuchungen ganzer Kollektive von Hydrometeoren hat bisher noch kaum stattgefunden, insbesondere bei den großen Hydrometeoren. Deshalb ist das Ziel dieser Arbeit die Entwicklung und Erprobung einer Apparatur zur In-situ-Messung großer Hydrometeore.

EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG

Zum Beispiel sind Regentropfen keine einfachen Gebilde aus Wasser, die in der sogenannten „Tropfen- oder Tränenform“ zu Boden fallen (Steward, 1996). Im Gegenteil ist ihre Form eher ein oblates Sphäroid (ungefähr die Form einer Dicken Bohne, d.h. sie sind breiter als hoch).

Die Regentropfen zeigen ein komplexes dynamisches Verhalten:

Regentropfen sind nicht alle gleich groß. Unterschiedlich große Tropfen fallen aber mit verschiedenen Geschwindigkeiten zu Boden, was zu Kollisionen unter den Tropfen führt (Brenn und Frohn, 1990). Aufgrund der Fallbewegung werden die Tropfen zu einem oblaten Sphäroid verformt (Green, 1975; Beard und Chuang, 1987). Diese Form bewirkt eine Abbremsung, die Regentropfen fallen also langsamer als volumengleiche starre Kugeln (Berry und Pranger, 1974; Brazier-Smith, 1992). Die Verformung verursacht eine Vergrößerung der Oberfläche und eine Erhöhung der Aufnahmeeffizienz für chemische Substanzen und die Impaktionsrate kleiner Partikel, wie Aerosolteilchen und kleiner Tröpfchen. Darüber hinaus bildet sich im Tropfen eine Zirkulation aus (Le Clair et al. 1972), die an der Oberfläche aufgenommene Stoffe in den Tropfen transportiert, was eine Steigerung der Aufnahmeeffizienz bewirkt. Kleine Störungen, wie z.B. die Wirbelablösung der turbulenten Umströmung des Tropfens, regen eine Oszillation des Tropfens um die nichtsphärische Gleichgewichtsform an (Beard et al., 1983).

Das komplexe Verhalten der Regentropfen ist bei weitem noch nicht vollständig verstanden.

Von den vielen offenen Fragen zu den Regentropfen seien hier ausgewählt:

- Welche Größenverteilung der Regentropfen tritt auf?
- Welche Form besitzen in der Atmosphäre fallende Regentropfen?
- Mit welcher Endgeschwindigkeit fallen diese Regentropfen zu Boden?
- Wie sind Regentropfen im Raum verteilt?
- Wie sind all diese Größen miteinander verknüpft?
- Gibt es Abweichungen der In-situ-Messungen gegenüber Labormessungen?

Um diese Fragen zu den Regentropfen und ähnliche zu den anderen großen Hydrometeoren, wie Schneeflocken, Graupel und Hagelkörnern untersuchen zu können, wird für die vorliegende Arbeit die holographische Methode zur In-situ-Aufnahme angewendet.

Die Holographie bietet die Möglichkeit die Hydrometeore detailliert abzubilden. Sie liefert im Vergleich zur Photographie nicht nur eine dauerhafte Abbildung des Objektes, sondern auch von dessen räumlicher Position im Probevolumen. Mit Hilfe von Doppelbelichtungen können sogar die Geschwindigkeitsvektoren der einzelnen Objekte bestimmt werden.

EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG

So lassen sich mit der Holographie:

- die Größe der einzelnen Hydrometeore, und damit eine Größenverteilung,
- die Form und Art der Hydrometeore,
- die Geschwindigkeitsvektoren der Hydrometeore und
- die räumliche Verteilung der Hydrometeore

gleichzeitig bestimmen.

In der Partikelmeßtechnik ist die Holographie seit langem etabliert (Thompson, 1967; Bexon et al., 1976; Trolinger, 1985). Sie ist das einzige Verfahren mit dem die räumliche Verteilung der Partikel im Probevolumen direkt festgehalten werden kann. In neuerer Zeit sind sogenannte PIV-Systeme (Particle Imaging Velocimetry) auf den Markt gekommen, die allerdings nur 2-dimensionale Schnitte durch das Meßvolumen mit Hilfe eines Videosystems aufnehmen, jedoch eine Echtzeitauswertung mit dem Computer zulassen. Die Bildauswertung bei Hologrammen ist nach wie vor noch ein Problem, da ein realer 3-dimensionaler Bildraum abgetastet werden muß, was erstens zu einer Datenflut führt, die sinnvoll reduziert werden muß und zweitens große mechanische Verschiebungen in der Rekonstruktionsapparatur erforderlich macht, die viel Zeit kosten. Drittens muß das dreidimensionale Beugungsbild des Objektes erkannt und von anderen unfokussierten unterschieden werden, was bei der Beschränkung auf zwei Dimensionen entfällt.

Die allermeisten der holographischen Anlagen untersuchen Partikelensembles innerhalb einer Meßapparatur, so zum Beispiel den Sprühkegel einer Einspritzdüse (Arndt, 1990; Anders et al., 1991). Viele Veröffentlichungen stammen aus der Untersuchung von Dampfblasen in Wasser, wie sie besonders bei der Kavitation entstehen (Hausmann und Lauterborn, 1980). Da diese spontan im starken Schallfeld gebildet werden, kann ihre Position im Meßvolumen nicht vorher bestimmt werden, so daß hierzu die Holographie besonders geeignet ist. Auch unter Wasser ist die Holographie zur Partikelanalyse angewendet worden (Carder et al., 1982).

Mit der Messung atmosphärischer Teilchen mit Hilfe der Holographie befassen sich nur wenige Wissenschaftler. Dazu gehören die an unserem Institut durchgeführten Arbeiten von Borrmann et al. (2001) und Uhlig et al. (1998). Flugzeuggetragene Messungen wurden von Conway et al. (1982), Brown (1989) und in neuerer Zeit von Lawson und Cormack (1995) durchgeführt.

Innerhalb des Sonderforschungsbereiches 233 „Chemie und Dynamik der Hydrometeore“ der deutschen Forschungsgemeinschaft wurden in zwei dieser Arbeit vorangegangenen Dissertationen (Borrmann, 1991 und Uhlig, 1996) die physikalischen Eigenschaften kleiner Hydrometeore wie Wolken und Nebeltröpfchen untersucht, soweit sie der Messung mittels In-line Holographie zugänglich sind.

Dazu wurde die HODAR (HOlographic Droplet and Aerosol Recording) genannte Apparatur mit einem Meßvolumen von 1 dm³ (im folgenden kleines Meßvolumen oder kleine Version genannt) aufgebaut.

EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG

Von diesen Erfahrungen ausgehend wurde für diese Arbeit ein modifiziertes HODAR für die großen Hydrometeore, wie Regentropfen und Schneeflocken, entwickelt und erprobt. Diese erfordern jedoch ein wesentlich größeres Meßvolumen als die Wolkenröpfchen, da ihre Anzahlkonzentration viel geringer ist. Sie beträgt bei Wolkenröpfchen ($r \approx 10 \mu\text{m}$) etwa 300 Tröpfchen/cm³, bei Regentropfen ($r \approx 1 \text{ mm}$) aber nur 1 Tropfen/dm³. So wurde das Meßvolumen auf etwa 500 dm³ (200 mm Durchmesser und 12,4 m Länge) vergrößert (im folgenden auch großes Meßvolumen oder große Version genannt) (Vössing et al., 1998).

Das HODAR arbeitet, auch in der neuen Konfiguration, in zwei Schritten:

1. In-situ-Aufnahme mit einem gepulsten Rubinlaser,
2. Rekonstruktion des aufgenommenen Hologramms mit einem CW-He-Ne-Laser im Labor.

Abbildung 1.1 zeigt die Aufnahmeapparatur im Einsatz auf dem zart schneebedeckten Kleinen Feldberg im Taunus. Das Meßvolumen befindet sich zwischen den Schienen im Mittelgrund und dem Gestell im Hintergrund.

Die neue Apparatur wurde so gestaltet, daß auch weiterhin Nebelhologramme mit einem kleinen Volumen aufgenommen werden können. So stehen heute zwei Apparaturen in einer bereit: die großvolumige zur Aufnahme von großen Hydrometeoren wie Regentropfen und Schneeflocken und die kleinvolumige zur Aufnahme von Nebel bzw. aufliegenden Wolken.

Alle bisher bekannten Apparaturen zur Aufnahme von atmosphärischen Teilchen arbeiten mit kleinen Volumina unter 1 Liter oder sogar nur im Kubikzentimeterbereich (z.B. Lawson und Cormack: 5·5·5 mm³). So dürfte das HODAR in seiner heutigen Konfiguration mit einem Aufnahmevolumen von circa 500 Litern weltweit einmalig sein.

Im folgenden zweiten Kapitel werden einige Aspekte der Hydrometeore vorgestellt. Im dritten Kapitel wird das Prinzip der Holographie und theoretische Eigenschaften des optischen Aufbaus erläutert. Die Apparatur selbst wird in Kapitel 4 beschrieben. Für diese Arbeit durchgeführte Messungen zeigen in Kapitel 5, daß die oben gestellten Fragen mit der Apparatur untersucht werden können. Kapitel 6 bringt eine Zusammenfassung mit einem Ausblick auf die weiteren Entwicklungsmöglichkeiten.



Abbildung 1.1: Das HODAR in seiner neuen Konfiguration mit einem großen Meßvolumen von bis zu 500 Litern auf dem schneebedeckten Kleinen Feldberg im Taunus.

2 HYDROMETEORE

Das Wort Hydrometeor ist zusammengesetzt aus dem griechischen Wort Hydro (Wasser) und dem griechischen Wort Meteor, das heißt vom Himmel her. Hydrometeore sind alle Teilchen, die aus Wasser (bzw. hauptsächlich aus Wasser) bestehen und sich in der Atmosphäre befinden, also alle Wolken- und Niederschlagsteilchen. Die Hydrometeore kann man in zwei Gruppen aufteilen:

1. Die Flüssigen: Sie unterteilen sich nach ihrer Größe bzw. ihrem Entstehen in Wolken- oder Nebeltröpfchen, Nieseltröpfchen und Regentropfen.
2. Die Festen: Bei den Eisteilchen können diverse Eiskristalle, Schneeflocken (Zusammenballungen von Eiskristallen), Hagel, Graupel und gefrorener Regen unterschieden werden.

Alle diese Hydrometeore können durch atmosphärische Prozesse ineinander umgewandelt werden oder bilden notwendige Vorstufen voneinander. Abbildung 2.1 gibt einen Überblick über die komplexen Beziehungen zwischen den Hydrometeoren. Sie sind in der Abbildung mit ihrem typischen Umriß dargestellt. Ihre Größe nimmt von oben nach unten zu. Links sind die flüssigen (grau) und rechts die festen Hydrometeore angeordnet. Der positive Temperaturbereich ist grau schattiert. Die Pfeile zwischen den Hydrometeoren geben jeweils den Umwandlungsprozeß und die Umwandlungsrichtung an.

2.1 Niederschlagsbildung

Die Bildung des Niederschlags (List, 1977) läßt sich anhand von Abbildung 2.1 verfolgen:

Aus Wasserdampf entstehen in der Regel durch heterogene Nukleation, d.h. durch Keime wie Aerosolteilchen und Eiskeime, kleine Wolkenröpfchen und Eiskristalle. Diese wachsen weiter an, teils durch Kondensation und Sublimation weiteren Wasserdampfes, teils durch Koagulation. Die größeren Tröpfchen wachsen durch Koagulation weiter, werden zu Niesel- und schließlich zu Regentropfen. Ab einer Größe von 4 mm im Durchmesser zerplatzen Regentropfen bei Kollisionen (Break up)(Lane, 1951; Magarvey und Taylor, 1956). Gefrieren Regentropfen entstehen Eiskörner. Beim Gefrieren behalten sie oft ihre Form bei, drehen sich allerdings um.

Die Eiskristalle wachsen durch Sublimation weiter an, bis sie zu fallen beginnen. Durch Zusammenhaften bilden sich schließlich Schneeflocken. Diese schmelzen oft schon im Fallen, so daß sie als Regentropfen den Boden erreichen. Gerät eine Schneeflocke in einen Teil der Wolke mit unterkühlten Wolkenröpfchen, frieren diese bei Kollisionen auf ihr fest. Es bildet sich ein Überzug aus gefrorenen Wolkenröpfchen. Dies wird Riming genannt. Lagern sich

HYDROMETEORE

sehr viele Tröpfchen an, so daß das Ursprungspartikel nicht mehr erkennbar ist, hat sich ein Graupelpartikel gebildet.

Durch mehrmaliges Gefrieren oder Anfrieren von Wolkentröpfchen und anschließendem Antauen, wie dies mit einem Partikel in den Zirkulationen einer Gewitterwolke passiert, entsteht Hagel. Oft ist in einem Hagelkorn das Ursprungsteilchen, der Embryo noch identifizierbar.

Die Bildung des Niederschlags kann nicht durch reine Kondensation des Wasserdampfes stattfinden. In der Regel reicht die Übersättigung der Luft mit Wasserdampf nicht aus, daß die Tröpfchen bis zu Regentropfen heran wachsen können. Daher müssen andere Prozesse die Niederschlagsbildung bedingen. Auch muß die Bildung des Niederschlags, wie die Beobachtung zeigt, in zwei verschiedenen Prozessen stattfinden, nämlich mit Beteiligung der Eisphase (dies ist in den mittleren Breiten typisch) und ohne Beteiligung der Eisphase, wie z.B. bei tropischen Regenfällen. (List, 1977) Diese beiden Möglichkeiten werden von zwei Theorien beschrieben: der Wegner-Findeisen-Bergeron-Theorie und der Koaleszenz-Theorie.

Die Wegener-Findeisen-Bergeron-Theorie setzt das Vorhandensein von Eiskristallen voraus. Beim Wachstum durch Kondensation werden besonders die Eiskristalle bevorzugt, da über diesen ein geringer Sättigungsdampfdruck für die weitere Anlagerung von Wasser ausreicht. Durch diesen Unterschied des Sättigungsdampfdruckes über Eis und Wasser können die Eiskristalle auf Kosten der Tröpfchen anwachsen und da sie in geringerer Anzahl vorhanden sind, ausreichend groß werden, um nach unten zu fallen. Dabei lagern sie durch Kollision mit Wolkentröpfchen weiter Wasser an, was entweder zu Kristallwachstum oder zu Graupelbildung führt. Zerfällt ein solches Graupelteilchen, werden die gefrorenen Wolkentröpfchen vom Aufwind wieder in die Höhe getragen und können erneut und vervielfältigt als Eiskerne weiterwachsen. Durch Kollision der Eiskristalle untereinander können sich Schneeflocken bilden, die weiter nach unten fallen, schmelzen und als Regen zum Boden gelangen können.

Die Koaleszenz-Theorie geht davon aus, daß die Tröpfchen bei Kollisionen zusammenschmelzen können und so bis zur Regentropfengröße heranwachsen. Sind erst einmal einige größere Tröpfchen vorhanden, so folgen diese nicht mehr den Luftströmungen innerhalb der Wolke, so daß sie mit kleineren Tröpfchen kollidieren und sich mit diesen zu größeren vereinigen können. Auf diese Weise können die Tropfen schließlich eine Größe erreichen, die nicht mehr in der Schwebe gehalten werden kann, und sie beginnen zu Boden zu fallen. Dabei wachsen sie durch weitere Kollisionen zusätzlich an, um dann als Regen den Boden zu erreichen. Bei gleich großen Tropfen geht diese Koaleszenz jedoch wegen geringer Kollisionswahrscheinlichkeiten so langsam voran, daß eine Niederschlagsbildung in realistischen Zeiträumen nicht möglich ist. Nimmt man aber einige zufällig entstandene Riesentropfen an, können diese schnell wachsen. Zerplatzen sie, entstehen mehrere Tropfen (Komabayasi et al., 1964), die wieder sehr rasch anwachsen können. So entstehen in kurzer Zeit ausreichend große Tropfen, die als Regentropfen zu Boden fallen können.

HYDROMETEORE

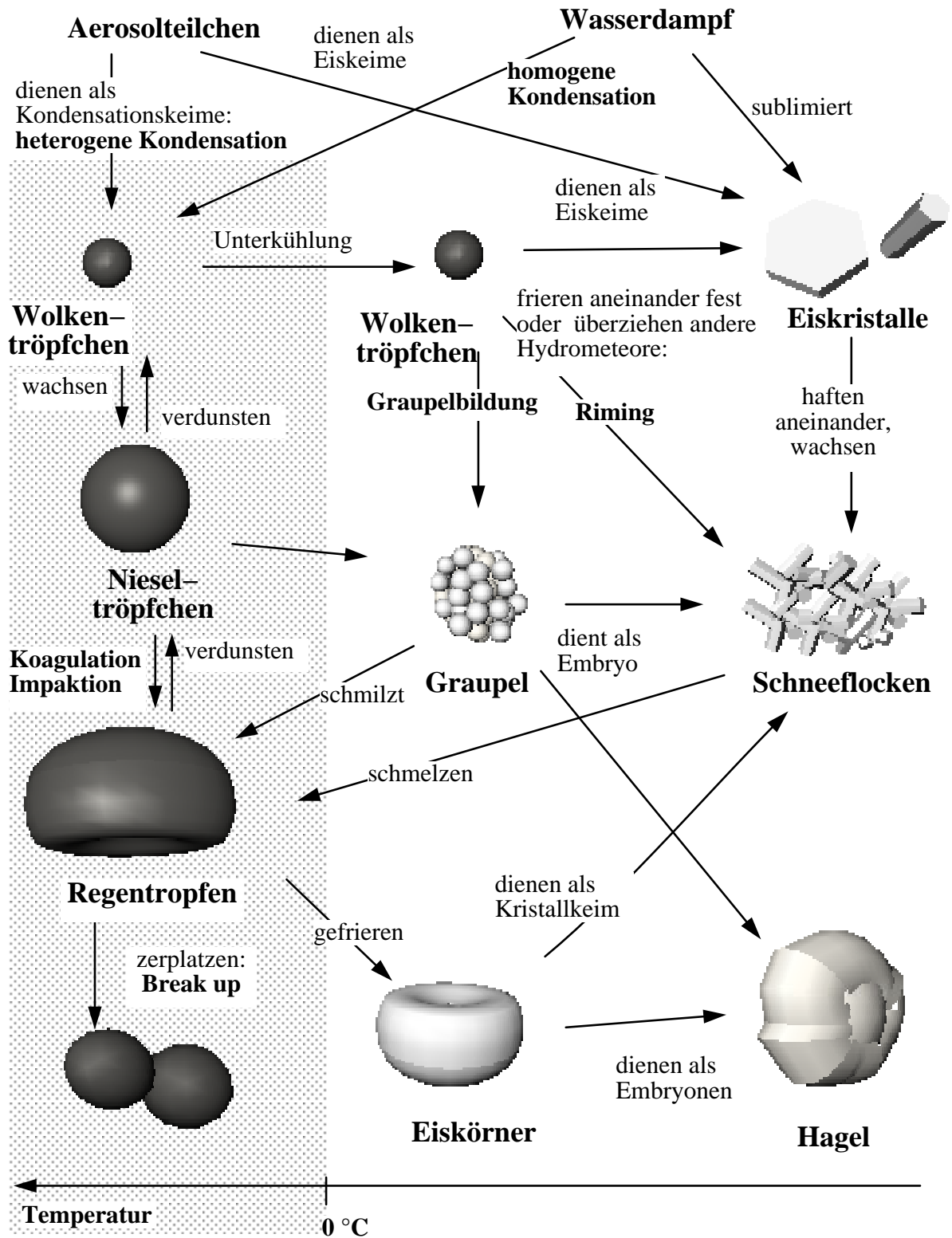


Abbildung 2.1: Die Beziehungen zwischen den Hydrometeoren. Die Hydrometeore sind mit ihrem typischen Umriß dargestellt. Die Flüssigen sind grau angefärbt. Der positive Temperaturbereich ist grau schattiert. Die Pfeile geben die Umwandlungsrichtung und den jeweiligen Umwandlungsprozeß an.

HYDROMETEORE

Beide Prozesse können natürlich auch zusammenwirken. Sie sind zwar im groben abgesteckt und anerkannt, lassen aber noch viele Detailfragen offen. In den letzten Jahren wurde viel an deren Verständnis gearbeitet und einige Modelle entwickelt. Die Beobachtung und die Messung dieser Prozesse sind aber sehr schwierig. So können nur über indirekte Messungen weitere Details aufgeklärt werden, wie z.B. die Messung der Größenverteilung von Niederschlag möglichst dicht unter oder in der Wolke selbst.

2.2 Wesentliche Charakteristika von Hydrometeoren

Im folgenden sollen die verschiedenen Hydrometeore kurz vorgestellt werden, auch mit Rücksicht auf die Schwerpunkte dieser Arbeit. Detailliertere Diskussionen der Eigenschaften einiger Hydrometeore, die für diese Arbeit relevant sind, erfolgen darüber hinaus in Kapitel 5.

2.2.1 Wolkentröpfchen

Die Wolkentröpfchen haben bis 50 μm Durchmesser und sind völlig rund. Sie folgen fast völlig der Luftströmung. Schon geringe Aufwinde kompensieren ihre Fallgeschwindigkeit von höchstens einigen 10 cm/s. Diese läßt sich für Tröpfchen bis etwa 20 μm unter Annahme des Stokeschen Gesetzes für den Luftwiderstand berechnen. Ein 50 μm großes Tröpfchen hat bei 900 mbar und 0° C eine Fallgeschwindigkeit von 26,5 cm/s.

Bis zu -40°C können die Wolkentröpfchen als unterkühlte Tröpfchen existieren, die dann bei weiterer Abkühlung spontan gefrieren. Die großen unter ihnen gefrieren jedoch schon bei bedeutend geringerer Unterkühlung. Gefrorene Wolkentröpfchen überziehen oft Eiskristalle mit einer Kruste, was als Riming bezeichnet wird. Frieren viele Wolkentröpfchen aneinander fest, so daß das Ursprungsteilchen nicht mehr erkennbar ist, entsteht ein Graupelartikel.

Eine Wolke enthält ein ganzes Größenspektrum von Wolkentröpfchen, da die Tröpfchengröße von vielen Faktoren wie Übersättigung, Vertikalbewegung, Turbulenz und Temperatur der umgebenden Luft und der Aufenthaltszeit darin, usw. abhängt (Liljequist und Cihak, 1994). Die Form des Spektrums hängt vom Wolkentyp ab. Von einer orographischen Wolke über eine Stratusbewölkung hin zu einem Cumulus wird das Spektrum immer schmäler (Laube und Höller in Landolt-Börnstedt, 1988). Dabei gilt im allgemeinen, die Spektren kontinentaler Wolken sind schmäler als die entsprechender maritimer Wolken. Eine hohe Konzentration und ein schmales Spektrum finden sich bei kontinentalen, eine niedrige und ein breites für maritime Wolken (Pruppacher und Klett, 1997).

Die troposphärischen Wolken besitzen eine Dichte von etwa 300 Tröpfchen pro Kubikzentimeter, diese schwankt allerdings stark von Wolkentyp zu Wolkentyp, ja selbst innerhalb einer Wolke. Einen Eindruck davon gibt Tabelle 2.1 mit Beobachtungsdaten, entnommen aus Mason, 1972.

HYDROMETEORE

Der mittlere Tropfenradius liegt zwischen 5 und 10 μm , nur bei Cumuli zwischen 20-25 μm . Es wurden aber auch bis zu 100 μm große Tropfen in Cumulonimbuswolken beobachtet.

Der Wassergehalt w_L kleiner Cumuli bleibt unter 1 g/m^3 , große Cumuli congestus erreichen bis zu 4 g/m^3 . Stratuswolken enthalten nur 0,05 - 1,3 g/m^3 .

Wolkenart	Zahl der Tröpfchen im cm^3	Tröpfchenradius, μm			Quelle
		Mittelwert	Häufigster	Kleinster und größter	
Schönwettercumulus	300	9	6	3-33	Weickmann, aufm Kampe (1953)
	-	-	3,5	1-10	Diem (1948)
Cumulus congestus	64	24	6	3-83	Weickmann, aufm Kampe (1953)
	150-600	-	5,5	2-40	Zaitsev (1950)
Cumulonimbus	72	20	5	2-100	Weickmann, aufm Kampe (1953)
Stratocumulus	350	4	3,5	1-12	Diem (1948)
	500	-	-	3-25	Frith (1951)
Altostratus	450	5	4,5	1-13	Diem (1948)
Nimbostratus	330	6	4	1-20	Diem (1948)
Stratus	260	6	4	1-22	Diem (1948)
	-	-	7	2-40	Neiburger (1949)

Tabelle 2.1: Die Größe und Anzahlkonzentration der Wolkenröpfchen in verschiedenen Wolkentypen. Diese Werte wurden experimentell ermittelt (nach Mason, 1971).

2.2.2 Nebelröpfchen

Die Tröpfchen selbst unterscheiden sich kaum von Wolkentropfen. Sie sind ebenso kugelförmig. Jedoch zeigten Beobachtungen in den sechziger Jahren, daß im Gegensatz zu Wolken im Nebel ein niedriger Wassergehalt ($w_L < 0,5 \text{ g/m}^3$), kleine Tropfengrößen ($r = 2,5\text{-}50 \mu\text{m}$, mit Maximum bei 10-20 μm) und geringe Anzahlkonzentrationen ($C = 1\text{-}300 /\text{cm}^3$) auftreten (Pruppacher und Klett, 1997).

Kunkel (1982) kategorisiert die Größenverteilungen $n(D)$ und den Flüssigwassergehalt $w_L(D)$ in drei Klassen (Abbildung 2.2). Am häufigsten sind hohe Konzentrationen von kleinen Tropfen zwischen 0,5 und 2,5 μm Radius mit Tropfendichten von einigen 1000 $/\text{cm}^3$. Kunkel hält diese für gequollene, aber

HYDROMETEORE

noch nicht aktivierte Aerosolpartikel, was einige andere auch beobachteten (Low et al., 1979).

Nach Kunkel (1982) und Low (1975) lassen sich drei Entwicklungsstufen innerhalb eines Nebelereignisses unterscheiden:

1. Formation des Nebels mit ansteigender Anzahlkonzentration und ansteigendem Flüssigwassergehalt, während die mittlere Tropfengröße nicht oder nur gering zunimmt.
2. Reifestadium mit um konstante Mittel stark schwankenden Werten von Anzahlkonzentration, mittlerer Tropfengröße und Flüssigwassergehalt.
3. Auflösungsstadium mit abnehmenden Werten von Anzahlkonzentration, mittlerer Größe und Flüssigwassergehalt.

Über die vertikale Struktur eines Nebels ist noch wenig bekannt. Lediglich das Tropfenspektrum wird mit zunehmender Höhe flacher, und der mittlere Tropfenradius nimmt leicht ab, während der Flüssigwassergehalt in einer mittleren Höhe ein Maximum erreicht.

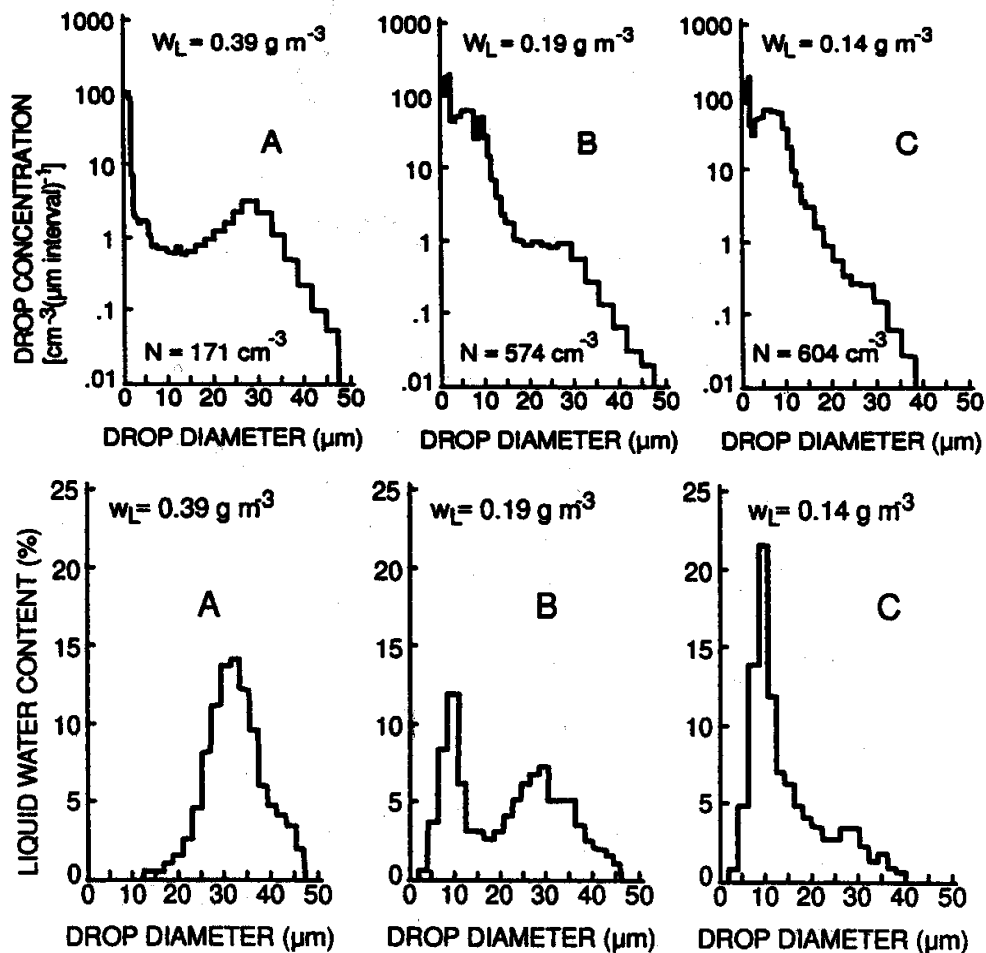


Abbildung 2.2: Nebeltypen nach Kunkel, 1982. Typ A zeigt ein Maximum bei 30 µm, Typ C eines bei 10 µm. Typ B stellt eine Mischform aus A und B dar.

2.2.3 Nieseltröpfchen

Die Nieseltröpfchen haben einen Radius von 50 µm bis 250 µm, sind aber immer noch rund. Sie folgen nur noch teilweise der Luftströmung und ihre Fallgeschwindigkeit beträgt bis zu 2 m/s. Ihre Häufigkeit liegt in der Größenordnung von 1 Nieseltröpfchen pro Kubikzentimeter.

Nieselregen fällt meist aus Stratuswolken ohne Eisphase mit schwachen Aufwinden. Sie entstehen daher wohl durch Koaleszenz. Auch im Nebel fallen oft Nieseltröpfchen, dieser wird dann als nässender Nebel bezeichnet. Nieselregen ist charakteristisch für feuchte Warmluftmassen, die über eine kalte Unterlage strömen. Dadurch ist die relative Feuchte am Boden so hoch, daß die Nieseltröpfchen nicht verdunsten, was Tropfen dieser Größe beim Fall aus einer gewöhnlichen Regenwolke tun würden (Liljequist und Cehak, 1994).

2.2.4 Regentropfen

Regentropfen haben ab 250 µm bis etwa 2 mm Radius, es wurden aber auch bis zu 8 mm Durchmesser beobachtet (Black und Willis, 1996, Beard et al., 1986; Rauber et al., 1991). Normalerweise brechen allerdings Tropfen mit großen Durchmessern auseinander, so daß ihre Größe auf etwa 2 bis 3 mm Durchmesser begrenzt wird (Fournier und Hidayetulla, 1955, Low und List, 1982, Kamra et al., 1991). Die Fallgeschwindigkeit der Regentropfen steigt schnell bis zu 9 m/s und erreicht dort ihr Maximum (Berry und Pranger, 1974, Pruppacher und Klett, 1997). Die Regentropfen sind nicht mehr rund, sondern werden mit zunehmender Größe immer flacher und ihre Basis beginnt sich nach innen einzuwölben, so daß ein nierenförmiger Querschnitt entsteht (Pruppacher und Pitter, 1971, Beard und Chuang, 1987). Deshalb wird für ihre Größe der Äquivalentdurchmesser (D_0) angegeben, das ist der Durchmesser einer mit dem Regentropfen volumengleichen Kugel. Ab 500 µm Radius beginnen Regentropfen zu oszillieren, vermutlich durch die Ablösung von Wirbeln der umströmenden Luft oder durch Kollisionen angeregt (Tanaka, 1969; Beard et al., 1983). Die großen Tropfen besitzen eine innere Zirkulation, die ebenso durch die Umströmung angeregt wird und eine gute Durchmischung bewirkt (Le Clair et al., 1972; Schmitt, 1995). Durch die schnelle Fallbewegung haben die großen Tropfen eine hohe Impaktionsrate für kleine Tröpfchen und Aerosole. Die dadurch verursachte Auswaschung, auch Scavenging genannt, bewirkt eine effiziente Reinigung der Atmosphäre unterhalb der Wolke, obwohl sich selbst in starkem Regen nur etwa 1 Tropfen pro dm^3 findet (Willis, 1984).

Für die Größenverteilung der Regentropfen stellten Marshall und Palmer (1948) eine erste exponentielle Modellverteilung auf:

$$n(D_0) = n_0 \exp(-\Lambda D_0) \text{ in } [\text{m}^{-3} \text{ mm}^{-1}], \quad 2.1$$

wobei $n(D_0)$ die Anzahldichte im Größenintervall um D_0 [mm] bezeichnet. Die Parameter n_0 und Λ [mm^{-1}] können als Funktion der Regenrate R [mm/h] dargestellt werden.

Die Regenrate R ist definiert als:

$$R = 6\pi \cdot 10^{-4} \int_0^{\infty} D_0^3 n(D_0) U_{\infty}(D_0) dD_0 \quad 2.2$$

mit der Endfallgeschwindigkeit U_{∞} in [m/s].

Auf die Größenverteilung, die Fallgeschwindigkeit, die Form und auch die Oszillation von Regentropfen wird noch näher in Kapitel 5 eingegangen.

Die typischen Regenwolken der mittleren Breiten sind Nimbostratus und Cumulonimbus (Liljequist und Cehak, 1994). In beiden Wolkentypen existiert eine Eisphase. Daher kann eine Niederschlagsbildung gemäß der Wegener-Findeisen-Bergeron-Theorie stattfinden.

2.2.5 Eiskristalle und Schnee

Eiskristalle entstehen, wenn Wasserdampf (meist an einem Eiskern) sublimiert. Je nach Übersättigung und Temperatur werden bevorzugt andere Kristallformen gebildet. Magono und Lee (1966) klassifizierten die verschiedenen Typen (Abbildung 2.3) und registrierten die dafür typischen Umweltbedingungen (Abbildung 2.4). Oft gelangen die Kristalle aus einem Bereich der Wolke in einen anderen, so daß das Kristallwachstum dann in einer anderen Form vor sich geht und Mischtypen gebildet werden. Ein Eiskristall kann also seine Entstehungsgeschichte konservieren, so daß am Boden auf die Bedingungen in der Wolke zurückgeschlossen werden kann. Die Größe der Eiskristalle reicht von wenigen μm bis zu 4 mm. Ihre Fallgeschwindigkeit beträgt bis etwa 2 m/s (Böhm, 1989; Nakaya, 1954).

Schneeflocken sind Aneinanderballungen von Eiskristallen. Dabei ist oft nicht zu sagen, ob einzelne Eiskristalle gleichzeitig auf einem Kern aufwuchsen oder die Schneeflocke durch Agglomeration entstand. Schneeflocken werden am besten bei 0°C gebildet. Sie können durchaus die Größe eines 5-Markstückes erreichen. Ihre Fallgeschwindigkeit bleibt aber dennoch wegen ihres hohen Luftwiderstandes sehr gering, ähnlich der von den Eiskristallen bis etwa 2 m/s. Wie oben erwähnt beginnt Niederschlag oft mit Schnee, der in tieferen Schichten der Atmosphäre schmilzt. Auch deshalb ist die hohe Sammeleffizienz der Schneeflocken für die Entfernung von Aerosolen und Gasen aus der Atmosphäre wichtig (Diehl, 1995). Für Schneeflocken wurden Größenverteilungen, ähnlich der Marshall-Palmer-Verteilung für Regentropfen, gefunden (Laube und Höller, 1988).

HYDROMETEORE



























	N1a Elementary needle		C2b Combination of columns		P4b Dendritic crystal with 12 branches
	N1b Bundle of elementary needles		P1a Hexagonal plate		P5 Malformed crystal
	N1c Elementary sheath		P1b Crystal with sectorlike branches		P6a Plate with spatial plates
	N1d Bundle of elementary sheaths		P1c Crystal with broad branches		P6b Plate with spatial dendrites
	N1e Long solid column		P1d Stellar crystal		P6c Stellar crystal with spatial plates
	N2a Combination of needles		P1e Ordinary dendritic crystal		P6d Stellar crystal with spatial dendrites
	N2b Combination of sheaths		P1f Fernlike crystal		P7a Radiating assemblage of plates
	N2c Combination of long solid columns		P2a Stellar crystal with plates at ends		P7b Radiating assemblage of dendrites
	C1a Pyramid		P2b Stellar crystal with sectorlike ends		CP1a Column with plates
	C1b Cup		P2c Dendritic crystal with plates at ends		CP1b Column with dendrites
	C1c Solid bullet		P2d Dendritic crystal with sectorlike ends		CP1c Multiple capped column
	C1d Hollow bullet		P2e Plate with simple extensions		CP2a Bullet with plates
	C1e Solid column		P2f Plate with sectorlike extensions		CP2b Bullet with dendrites
	C1f Hollow column		P2g Plate with dendritic extensions		CP3a Stellar crystal with needles
	C1g Solid thick plate		P3a Two-branched crystal		CP3b Stellar crystal with columns
	C1h Thick plate of skeleton form		P3b Three-branched crystal		CP3c Stellar crystal with scrolls at ends
	C1i Scroll		P3c Four-branched crystal		CP3d Plate with scrolls at ends
	C2a Combination of bullets		P4a Broad branch crystal with 12 branches		S1 Side planes

Abbildung 2.3: Klassifikation der Eiskristalle nach Magono und Lee, 1966. Die natürlichen Eiskristalle zeigen eine enorme Vielfalt. (Fortsetzung nächste Seite) (Mit freundlicher Genehmigung der Hokkaido University Japan)

HYDROMETEORE



























	S2 Scalelike side planes		R3a Groupelike snow of hexagonal type		I3b Rined broken branch
	S3 Combination of side planes, bullets and columns		R3b Groupelike snow of lump type		I4 Miscellaneous
	R1a Rined needle crystal		R3c Groupelike snow with nonrined extensions		G1 Minute column
	R1b Rined columnar crystal		R4a Hexagonal groupel		G2 Germ of skeleton form
	R1c Rined plate or sector		R4b Lump groupel		G3 Minute hexagonal plate
	R1d Rined stellar crystal		R4c Cone-like groupel		G4 Minute stellar crystal
	R2a Densely rined plate or sector		I1 Ice particle		G5 Minute assemblage of plates
	R2b Densely rined stellar crystal		I2 Rined particle		G6 Irregular germ
	R2c Stellar crystal with rined spial branches		I3a Broken branch		

Abbildung 2.3: Klassifikation der Eiskristalle, Magono und Lee, 1966. (Fortsetzung)

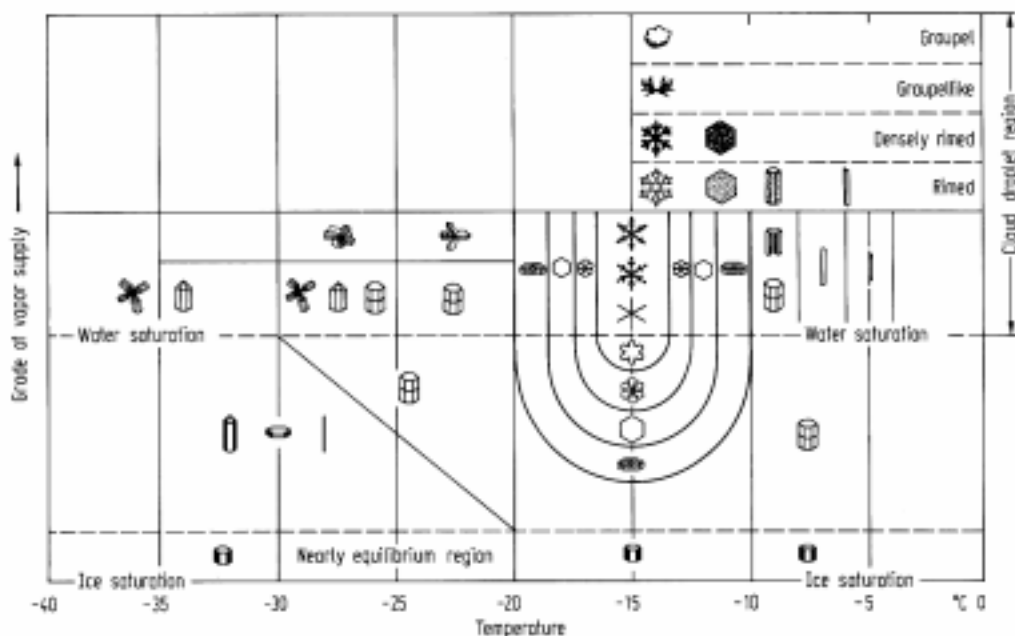


Abbildung 2.4: Temperatur- und Feuchtebedingungen für das Wachstum verschiedener Typen von Eiskristallen (Magono und Lee, 1966). Die Ursprungsform ist das hexagonale Prisma. (Mit freundlicher Genehmigung der Hokkaido University Japan)

HYDROMETEORE

2.2.6 Graupel

Lagern sich unterkühlte Wolkentröpfchen an Gefrierkerne, wie Eiskristalle, Eiskörner, Eiskeime oder schon spontan gefrorene Wolkentröpfchen, an, frieren sie fest. Heften sich viele Wolkentröpfchen an, so daß die ursprüngliche Form des Embryos nicht mehr sichtbar ist, bildet sich ein Graupelpartikel. Graupelpartikel haben oft eine konische oder projektilartige Form, manchmal sind sie aber auch einfach unregelmäßig rund (Abbildung 2.5). Sie können etwa Erbsengröße (5 mm Durchmesser) erreichen, oft ist jedoch der Graupel so locker aus Tröpfchen zusammengesetzt, daß er bald wieder zerfällt oder beim Auftreffen auf den Boden auseinander bricht. Die Anzahlkonzentration von Graupelpartikeln liegt zwischen 1 und 1000 /m³. Die Dichte von Graupel schwankt stark und reicht von 0,05 bis zu 0,89 g/cm³ (Pruppacher und Klett, 1997, S. 71).




























	Rimed crystal	Hexagonal graupel	Conelike graupel
Without tumbling (rotation)	a ₁ 	a ₂ 	a ₃ 
	b ₁ 		b ₂ 
	c ₁ 		c ₂ 
	d ₁ 		d ₂  x
	e ₁ 		e ₂  y
	f ₁ 		f ₂  y
With tumbling (rotation)	Rimed crystal	Lump graupel	
	g ₁ 	g ₂  x	
	h ₁ 	h ₂  y	
	i ₁ 	i ₂  y	


Abbildung 2.5: Klassifikation von Graupelpartikeln aufgrund ihrer Entstehung (aus Harimaya, 1976). Die mit x gekennzeichneten Partikel wurden bisher noch nicht beobachtet. Bei den mit y gekennzeichneten Partikeln wurde der Embryo noch nicht gefunden. (Mit freundlicher Genehmigung der Meteorological Society Japan)


2.2.7 Hagel und Eiskörner


Eispartikel, die größer als 5 mm sind, heißen Hagelkörner. Sie sind rundlich oder irregulär geformt. Hagel besteht aus einem gefrorenen Kern (Embryo), oft einem Eis- oder einem Graupelkorn, und einer daran angefrorenen Hülle aus Eis oder Eiskristallen. Es lassen sich zwei Typen von Hagel unterscheiden, nämlich solcher mit einer kompakten Hülle aus Eis und solcher mit einer porösen Hülle aus Kristallen und Wasser (Abbildung 2.6, Federer und Waldvogel, 1978).


Type	Centre unit	Initial growth layer	Growth mode of embryo	Shape of embryo	Remarks
 1A	None, embryo is entire hailstone	Opaque ice with large (length ~500 µm) bubbles, small crystals	Dry at low air temperature $T_a \approx -20^\circ\text{C}$	Spheroidal axis ratio > 0.8	Evidence for dry growth: small crystals and large nonspherical bubbles which are structural (accretion of cloud droplets), downward trajectory
 1B	Spheroidal, small crystals	Large radial crystals, clear ice	Dry growth, origin at low T_a , growth at $T_a > -20^\circ\text{C}$, near wet limit	Spheroidal	Downward trajectory
 1C	Porous rime, often spongy from later soaking [58 L2, 75 H3]	Large radial crystals interrupted by small crystalline arcs	Growth at $T_a > -20^\circ\text{C}$ with fluctuating deposit temperature T_d	Typical conical graupel [73 K3]	Upward trajectory, starting at $-10^\circ\text{C} < T < -15^\circ\text{C}$ [76 R3, 73 K3]
 2A	Clear ice, large crystals or single crystal, some frozen drops, recognizable cracks	Clear ice, large crystals, abrupt transition to opaque, then to small crystals	Frozen drop grown at $T_a > -20^\circ\text{C}$ and $T_d \approx -5^\circ\text{C}$	Sphere	Single upward trajectory
 2B	Transparent ice, large crystals, cracks	Transparent ice, large crystals, abrupt transition to opaque and to small crystal	Frozen drop grown at $T_a > -20^\circ\text{C}$ and near wet limit	Sphere	Single upward trajectory
 2C	Transparent ice, some frozen drops, recognizable cracks	Transparent ice, large bubbles (drainage from sponge), large crystals of random orientation, cracks	Frozen drop grown wet at $T_a > -20^\circ\text{C}$	Lump	Low trajectory without much change
 2D	Clear ice, large crystals or single crystal, half-spheres	Opaque ice, small crystals	Frozen drop grown at $T_a < -20^\circ\text{C}$ in an updraught increasing with height	Cerical	Single upward trajectory

 Clear

 Opaque

 Transparent with large bubbles

 Large crystals

 Small crystals

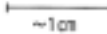
 ~ 1 cm

Abbildung 2.6: Klassifikation von Hagelkörnern von Federer und Waldvogel, 1978. (Mit freundl. Genehmigung des Q. J. R. Meteorol. Soc.)

HYDROMETEORE

Hagel entsteht, wenn ein Kern aus warmen Schichten der Wolke wiederholt in die Höhe getragen wird, so daß Schmelzen und Wiedergefrieren sich abwechselnd wiederholen können. Dabei kann das Trockene Wachsen, bei dem das ganze angelagerte Wasser gefriert und das Nasse Wachsen, bei dem das angelagerte Wasser bei großen Wachstumsraten und hohen Temperaturen nur teilweise gefriert, unterschieden werden. Hagel kann sehr groß werden, so sind schon golfballgroße Hagelkörner gefunden worden (Abbildung 2.7). Seine Entstehung zu begreifen und besser vorhersagen zu können, ist von großem Interesse, da Hagel große Schäden in der Landwirtschaft aber auch an Fahrzeugen und Gebäuden anrichten kann. Für die Anzahlkonzentration des Hagels kann bei 1 mm maximaler Länge 1000 pro m³ und für 40 mm maximaler Länge 1 pro 1000 m³ angenommen werden (Laube und Höller,1988).

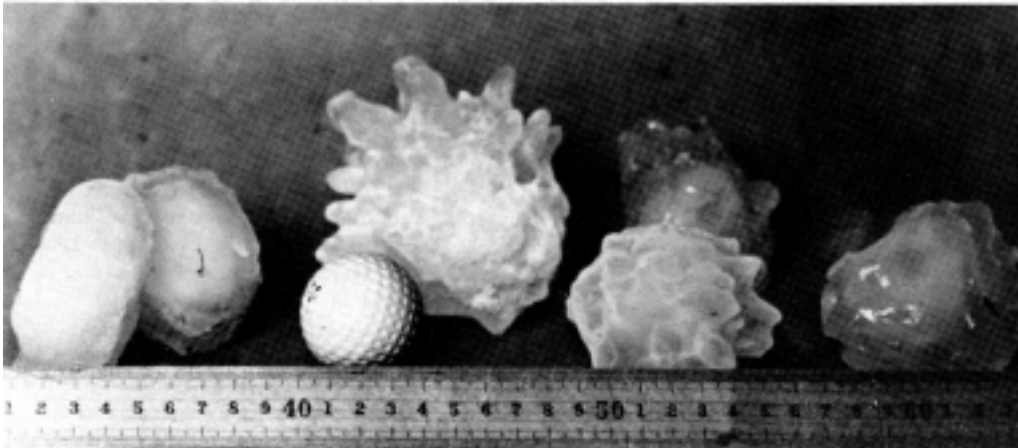


Abbildung 2.7: Hagelsteine mit einigen Zentimetern maximaler Länge aus Cumulonimbuswolken über Nordamerika und ein Golfball als Größenvergleich (entnommen aus Liljequist und Cehak, 1994). (Mit freundl. Genehmigung des US Weather bureau)

Eiskörner hingegen sind gefrorene Regentropfen, die beim Durchfallen einer kalten Luftschicht oder bei plötzlichen Aufwinden in einer Gewitterwolke entstehen können. Sie haben dieselbe Größe wie Regentropfen. Nach dem Gefrieren drehen sich jedoch die Tropfen um, so daß Eiskörner quasi auf dem Rücken zu Boden fallen, wie Windkanalstudien gezeigt haben (Pruppacher und Klett, 1997).

2.2.8 Überblick über die Charakteristika der Hydrometeore

Abschließend gibt Tabelle 2.2 einen Überblick über die oben beschriebenen Hydrometeore.

Die Form der Hydrometeore wird mit einem Stichwort charakterisiert. Ein typischer Größenbereich und die Anzahlkonzentration oder Häufigkeit werden aufgelistet. Von den mikrophysikalischen Eigenschaften werden auch die maximale Fallgeschwindigkeit und die damit verbundene Lebenszeit der Hydrometeore angegeben. Alle diese Werte sind nur als Angabe der Größenordnung zu verstehen, da es im Einzelfall erhebliche Abweichungen davon geben kann. Auf der linken Seite der Tabelle wird die Entstehung der Hydrometeore, ihre Schlüsselrolle in den atmosphärischen Prozessen und wichtige Aspekte für die Wolkenchemie mit Schlagworten beleuchtet.

In der letzten Spalte werden einige gebräuchliche In-situ-Meßgeräte für die physikalischen Parameter der Hydrometeore angegeben. Ihrer Vielzahl halber können nur einige Vertreter verschiedener Meßmethoden aufgezählt werden. Diese Auswahl ist nicht wertend und ohne Anspruch auf Vollständigkeit zu verstehen.

HYDROMETEORE

Tabelle 2.2: Hydro- meteore	Form	Radius, bzw. max. Länge, ca.	Häufig- keit, ca.	Fallge- schwin- digkeit, ca.	Lebens- zeit, ca.	Entstehung	Schlüsselrolle	wichtige Aspekte für die Wolkenchemie	einige In-situ- Messgeräte zur Spektrenbestim- mung
Wolken- tröpfchen	perfekte Kugeln	bis 50 µm, 10 µm typ.	100-300 /cm ³	< 100 cm/s	einige h	durch Kondensationskerne	Wolkenbildung	„Reagenzgläschen für chemische Prozesse“	Streulichtsonden, HODAR
Nebel- tröpfchen	perfekte Kugeln	bis 50 µm, 2,5 µm typ.	100-1000 /cm ³	< 100 cm/s	einige h	durch Kondensationskerne	Nebelbildung	„Reagenzgläschen für chemische Prozesse“	Streulichtsonden, HODAR
Nieseltropfen	rund	50-250 µm Radius	1 /cm ³	< 2 m/s	10 min	aus Wolkentropfen oder verdunstenden Regentropfen	Übergang zwischen Wolken- und Regentropfen		Streulichtsonden, HODAR
Regentropfen	oblates Sphäroid mit flacher Basis	250-4000 µm Radius, typ. 500 µm- 1500 µm	1 /dm ³	2-9 m/s	einige min	aus Schnee oder koagulierende Wolkentröpfchen	Niederschlag, Scavenging	Impaktion, Aufnahme von Spurenstoffen, Mischung durch innere Zirkulation	Distrometer, Video- sonden, HODAR, RADAR, 2D-Array- Sonden
Eiskristalle	vielgestal- tig	1-4000 µm max. Länge	1-1000 /dm ³	< 2 m/s	einige h	durch Eiskeime	Niederschlagsbildung Kondensstreifen, Cirren		2D-Array-S, Repli- kator, HODAR
Schnee	vielgestal- tig	1-50 mm max. Länge	1-1000 /m ³	< 2 m/s	10 min	Zusammenballung von Eiskristallen	Niederschlag, Scavenging	hohe Impaktionsrate, große Oberfläche, lange Fallzeiten	Videosonden, HODAR, RADAR
Hagel	rund, irre- gulär	bis einige cm max. Länge	1-1000 /m ³	5-12 m/s	1 h	Anlagerung von Wasser und späterem Gefrieren	verursacht große Schäden		Videosonden, HODAR, RADAR
Graupel	konisch, golfball- artig	8000 µm max. Länge	1-1000 /m ³	< 2 m/s	1/2 h	Anlagerung von Wolkentröpfchen an Eiskristalle	Interaktion von Hydro- meteooren mit Wolken- tröpfchen		Videosonden, HODAR

2.3 Messung von Hydrometeoren

Entsprechend der Vielfalt der Eigenschaften der Hydrometeore und des Größenbereichs, der sich über mehrere Dekaden erstreckt, sind die Meßgeräte in ihren Methoden sehr vielfältig. Die Spanne reicht von optischen Partikelsonden (Knollenberg, 1981), die in erster Linie eine Anzahlkonzentration als Funktion der Größe liefern, über Impaktoren und Sammelgeräte verschiedenster Art, die größenabhängig Hydrometeore oder deren Wasser sammeln, um sie der Analyse zugänglich zu machen, bis zu Videosonden (Murakami und Matsuo, 1990; Frank, Härtl und Tschiersch, 1994).

Besonders die modernen Fernerkundungsverfahren, wie das Wetterradar benötigen als Voraussetzung eine detaillierte Kenntnis der Mikrophysik, d.h. der Größen- und Anzahlverteilungen innerhalb der Wolken, aber auch der Form und Art und der daraus resultierenden Eigenschaften der Hydrometeore, wie Beugungs- und Reflexionsverhalten (Beard, 1984; Beard und Johnson, 1984; Jameson, 1983).

In dieser Arbeit soll eine Apparatur zur In-situ-Messung der Mikrophysik von großen Hydrometeoren entwickelt werden. Dazu müssen entsprechend der Tabelle 2.2 im vorangegangenen Abschnitt einige Rahmenbedingungen erfüllt sein. Für Regentropfen und Schneeflocken sollte der Meßbereich der Apparatur zwischen 100 und 10000 μm liegen. Regentropfen sind nicht sphärisch, somit ist eine Bestimmung ihrer Form sinnvoll. Da ihre Fallgeschwindigkeit von der Größe abhängt, sollte auch deren Bestimmung möglich sein.

Auch das Kollektiv und die Wechselwirkungen der Hydrometeore sollen untersucht werden können, dazu müssen deren Abstände untereinander bestimmbar sein. Es sollte also eine gleichzeitige Messung eines Ensembles von Hydrometeoren stattfinden. Große Hydrometeore sind in bedeutend kleinerer Häufigkeit anzutreffen als kleine, mit etwa 1 Teilchen pro dm^3 . Um auch die festen Hydrometeore zu untersuchen, muß bei Temperaturen unter 0° Celsius gearbeitet werden können.

Damit sind die wichtigsten Rahmenbedingungen einer Meßapparatur gegeben.

Nun werden einige der Methoden, die eine Feldmessung der physikalischen Mikrostruktur einzelner Hydrometeore ermöglichen, an Beispielen näher erläutert. Ihre Eigenheiten und Unterschiede werden dargelegt und in Bezug zur Holographie gesetzt.

Hier sollen das Distrometer (Joss und Waldvogel, 1967), da es am weitesten verbreitet ist, das Pluviospektrometer (Frank, Härtl und Tschiersch, 1994) als ein Vertreter der Videosonden und der Guttalgor (Bächmann et al., 1993), mit dem eine größenfraktionierte Sammlung der Regentropfen möglich ist, näher erläutert werden.

2.3.1 Distrometer

Das Distrometer ist wohl das verbreitetste Meßgerät zur größenabhängigen Registrierung von Regen aufgrund seiner einfachen Bedienung und der schnellen Meßwerterfassung. Es wurde von Joss und Waldvogel 1967 entwickelt. Das Distrometer ist vom Prinzip her wie ein Mikrophon aufgebaut (Abbildung 2.8).

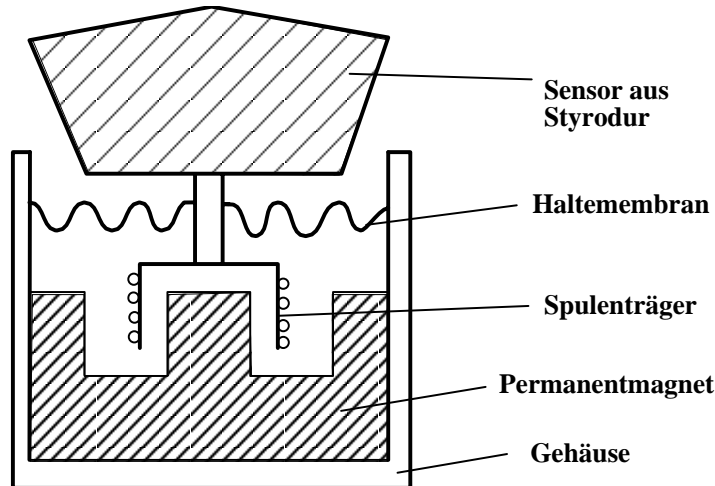


Abbildung 2.8: Prinzipskizze des Distrometers. Es arbeitet ähnlich wie ein Mikrophon. Ein auftreffender Tropfen löst durch eine Spule, die in ein Magnetfeld taucht, einen Strompuls aus. Dieser ist der Tropfenmasse und der Auftreffgeschwindigkeit proportional.

Unter einer Kappe aus Styrodur, die an einer Haltemembran vertikal beweglich aufgehängt ist, befindet sich eine Spule. Diese taucht in ein Magnetfeld ein, wenn ein Tropfen auf die Kappe fällt. Es entsteht ein Strompuls proportional zum Impuls des auftreffenden Regentropfens. Eine Elektronik verarbeitet diesen Strompuls weiter, so daß am Ausgang des Meßgerätes ein digitaler Wert zwischen 0 und 127 zur Verfügung steht. Diese digitalen Werte der Tropfenimpulse können direkt in einen PC eingelesen und in Größenkanälen aufsummiert werden. Eine ausführliche Beschreibung des Distrometers ist zum Beispiel bei Lehmann (1995) zu finden.

Aufgrund seines Meßprinzips kann das Distrometer nur Größenverteilungen von Regentropfen aufnehmen. Die Messung von Niesel, Eispartikeln oder Schneeflocken ist nicht möglich, da diese einen zu geringen Impuls oder keine eindeutige Größen-Impuls-Relation besitzen. Eine detaillierte Vermessung einzelner Objekte kann nicht vorgenommen werden.

Der Meßbereich des Distrometers reicht von 0,3 mm (Rauschschwelle) bis 5 mm Durchmesser der Regentropfen.

Das Meßvolumen, das die Regentropfen umschließt, muß bekannt sein, um eine Anzahlkonzentration ermitteln zu können. Für das Distrometer ist dieses Meßvolumen bestimmt durch die Sensorfläche und die maximale Fallhöhe der Hydrometeore, das ist das Produkt aus Fallgeschwindigkeit und Meßzeit. Das

HYDROMETEORE

Meßvolumen ist daher abhängig von der Größe der Hydrometeore. Auf diesen Umstand wird im Anhang A näher eingegangen.

Da die Tropfen nacheinander gezählt werden müssen, benötigt das Distrometer mindestens 5 bis 15 Minuten Meßzeit, um eine statistisch ausreichende Anzahl Tropfen zu zählen (Joss und Waldvogel, 1969), was eine Zeitauflösung des Niederschlagsereignisses begrenzt. Bei heftigen Regenfällen kann das Distrometer erhebliche Koinzidenzfehler durch nahezu gleichzeitiges Auftreffen mehrerer Tropfen aufweisen. Weiterhin wird für die Größenbestimmung angenommen, daß die Tropfen Endgeschwindigkeit (Terminal Settling Velocity, kurz TSV) erreichen, was, wie später gezeigt wird, für die Bodennähe aufgrund der atmosphärischen Turbulenz nicht immer erfüllt ist. Bei größeren Windgeschwindigkeiten sind mit dem Distrometer keine genauen Messungen möglich, da durch den flachen Auftreffwinkel der Tropfenimpuls nicht vollständig übertragen wird.

Das Distrometer stellt ein geeignetes Meßgerät dar, ist nur eine gleitende mittlere Größenverteilung eines Regenereignisses gesucht.

2.3.2 Pluviospektrometer

Das Pluviospektrometer (Frank, Härtl und Tschiersch, 1994) ist ein In-situ-Meßgerät zur automatischen visuellen Analyse von Hydrometeoren, insbesondere zur Erfassung von Größenverteilungen von Regentropfen. Wie Abbildung 2.9 zeigt, besteht es aus einem Videosystem, das ein bestimmtes Volumen quasi kontinuierlich aufzeichnet. Eine Projektionsleuchte, bestehend aus einer Halogenlampe und einem Kondensorsystem mit Fresnellinsen, beleuchtet die Hydrometeore von hinten. Daher erscheinen sie dunkel auf hellem Hintergrund. Die Videobilder können bei niedriger Bildrate direkt von einem PC automatisch ausgewertet werden oder mit der üblichen Videobildrate von 24 Bildern pro Sekunde auf Video aufgezeichnet werden.

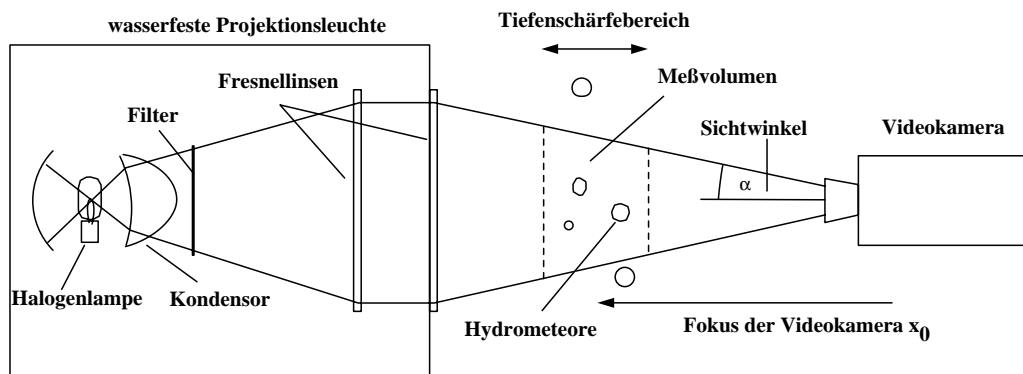


Abbildung 2.9: Das Pluviospektrometer nach Frank, Härtl und Tschiersch, 1994. Das Meßvolumen wird mit einer Projektionsleuchte von hinten beleuchtet und mit einer Videokamera von vorne beobachtet. Das Videobild wird mit Hilfe digitaler Bildverarbeitung analysiert und die Tropfen in mehreren Größenklassen gezählt.

HYDROMETEORE

Der Meßbereich des Gerätes wird von den Autoren mit 0,1 mm bis 6 mm Tropfendurchmesser angegeben. Die Größe des Meßvolumen wird wie bei allen derartigen Geräten von der Tiefenschärfe der Optik und der Bilderkennung beeinflusst. Daher ist sie von der Tropfengröße abhängig und liegt zwischen 11,9 cm³ für Tropfen der Größe 0,1 - 0,158 mm und 293 cm³ für Tropfen der Größe 4 - 6 mm.

Durch die geringe Tiefenschärfe der optischen Anordnung ist das Meßvolumen so klein, daß Meßzeiten von 5 Minuten ähnlich denen des Distrometers benötigt werden. Das Meßvolumen ist in der Tiefe nur unscharf begrenzt, was zu Fehlern in der resultierenden Anzahlkonzentration führen kann.

Das Meßvolumen ist für schnelle Objekte nicht lückenlos, es existiert eine Art Stroboskopeffekt: Um scharfe Bilder zu erhalten, muß die Belichtungszeit sehr kurz sein. Die Bildwiederholrate ist jedoch viel kleiner als der Kehrwert der Belichtungszeit. Dadurch ist die Kamera die meiste Zeit „blind“. Fällt nun in dieser „blinden“ Zeit ein Tropfen vorbei, wird er gar nicht registriert. Ein Beispiel: Die Kameraverschlußzeit sei 1/10000 s und die Bildwiederholrate 24 Bilder/s. Die Zeit zwischen zwei Bildern beträgt also 1/24 - 1/10000 s, in dieser Zeit hat sich ein Tropfen mit 8 m/s um ungefähr 33 cm bewegt. Ist das Meßvolumen aber nur 10 cm hoch, kann der Tropfen unbemerkt vorbeifallen. Um dies zu verhindern, muß der Bildausschnitt groß genug gewählt werden. Die Anzahl großer Tropfen wird also eher unterschätzt. Kleine Tropfen hingegen werden bei hohen Bildwiederholraten mehrfach gezählt, denn in einer 1/24 Sekunde fällt ein 0,1 mm Tropfen nur ca. 1 cm weit.

Mit dem Pluviospektrometer lassen sich neben Größenverteilungen auch die Geschwindigkeiten der Hydrometeore bestimmen. Bei langen Verschußzeiten entstehen statt Tropfenbildern Streifen auf dem Videobild deren Länge als Maß der Geschwindigkeit dienen kann. Dazu ist allerdings eine genaue Kenntnis der Verschußzeit erforderlich.

Eine Artunterscheidung der Hydrometeore kann vorgenommen werden. Auch Schneeflocken und Eiskristalle können ausgemessen werden. Eine detaillierte Untersuchung der Hydrometeoren ist aber nur möglich, so fern sie sich nicht zu schnell bewegen, da sonst das Videobild für die Formbestimmung zu stark verschmiert ist. Ein Regentropfen mit 1 mm Durchmesser fällt in 1/ 10000 s etwa 0,5 mm weit, das ist bereits die Hälfte seiner Größe.

Das Pluviospektrometer ist also ein Meßgerät zur Bestimmung der Größenverteilung von Regentropfen. Ihre Fallgeschwindigkeit läßt sich ermitteln und mit Einschränkungen auch die Form von langsam fallenden Hydrometeoren.

2.3.3 Guttalgor

Der Guttalgor ist ein Sammelgerät zur größenfraktionierten Sammlung von Regentropfen (Bächmann et al., 1993). Die Regentropfen fallen in ein Dewargefäß mit flüssigem Stickstoff, werden schockgefroren und in eingehängten Sieben entsprechend ihrer Größe aufgefangen (Abbildung 2.10). Die Tropfen stehen dann zur chemischen Analyse bereit (Bächmann et al., 1996).

HYDROMETEORE

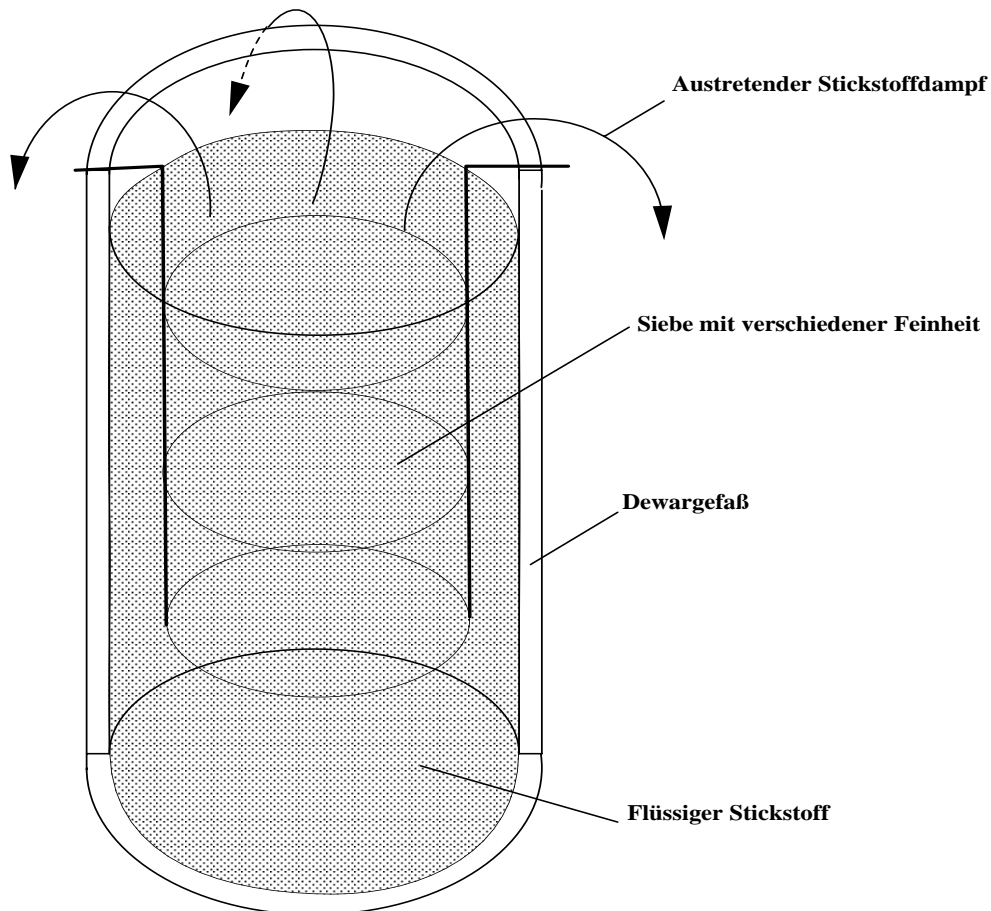


Abbildung 2.10: Der Guttalor (Bächmann et al., 1993) besteht aus einem mit flüssigem Stickstoff gefüllten Dewargefaß, in das Siebe verschiedener Maschenweite eingehängt sind. Die schockgefrorenen Regentropfen werden so nach ihrer Größe sortiert und können zur weiteren Analyse entnommen werden.

Mit dem Guttalor lassen sich mit etwas Aufwand auch Größenverteilungen von Regentropfen bestimmen. Jedoch ist eine Formbestimmung der Regentropfen nicht möglich, da diese beim Gefriervorgang durchaus verändert wird. Eine Geschwindigkeitsmessung kann nicht durchgeführt werden.

Verfälschungen der gemessenen Größenverteilung können dadurch verursacht werden, daß kleine Tropfen durch den ausströmenden Stickstoffdampf nicht in das Sammelgefäß gelangen oder daß große Tropfen beim Gefrieren zerplatzen und die Bruchstücke in den kleineren Größenklassen mitgezählt werden.

Eine Sammlung von Schneeflocken ist möglich, aber die Größensortierung schwierig. Sie muß außerhalb des Gerätes manuell vorgenommen werden.

Ist die chemische Analyse der Regentropfen von Interesse, stellt der Guttalor größenfraktionierte Stichproben der Regentropfen bereit.

2.3.4 Vergleich dieser Meßmethoden mit der Holographie

Mit den anhand der Meßgeräte vorgestellten Methoden kann entweder eine einfache Messung der Größenverteilung der flüssigen Hydrometeore oder eine Detailuntersuchung erfolgen. Eine Untersuchung von festen Hydrometeoren ist mit dem Pluviospektrometer und dem Guttalgor möglich. Alle Methoden besitzen ein von den Eigenschaften der Hydrometeoren abhängiges Meßvolumen. Sie lassen keine Mehrfachauswertung desselben Meßvolumen zu. Keine der Methoden ist geeignet, Aussagen über die Abstände der Hydrometeore untereinander zu machen.

Alle vorgestellten Methoden liefern eine Zeitreihe der Meßdaten, wobei aus einem längeren Meßintervall auf eine Größenverteilung in einem Volumen zurückgerechnet wird. Die Holographie hingegen macht eine Momentaufnahme eines realen Meßvolumens, so daß eine hohe zeitliche Auflösung erreicht werden kann und somit eine rasche zeitliche Entwicklung eines Niederschlagsereignisses untersucht werden kann (z.B. Gewitterschauer) Dieser Unterschied der Methoden wirkt auf die Meßergebnisse und die dazu nötigen Voraussetzungen ein, so daß für die verschiedenen Geräte oft beträchtliche Differenzen auftreten (Raasch und Umhauer, 1977).

Mit der Holographie lassen sich die räumlichen Positionen von Objekten innerhalb dieses Meßvolumens bestimmen, und eine visuelle Analyse der Objekte selbst ist möglich. Es wurden bereits Volumina bis etwa 6 m³ holographisch aufgenommen (Webster et al., 1979). Die mit der Holographie bisher aufgezeichneten Objektgrößen liegen zwischen einigen Metern Länge bis zu Submikrometerpartikeln (Royer, 1977). Wird ein gepulster Laser hoher Leistung als Lichtquelle verwendet, können auch bewegte Objekte wie Menschen (Siebert, 1967) oder frei fallende Objekte aufgenommen werden (Tyler und Thompson, 1976). Mit der Holographie lassen sich über Doppelbelichtungen auch die Geschwindigkeiten der Hydrometeore ermitteln. Sie benötigt keine Vorausannahme einer Größen-Geschwindigkeitsrelation zur Größenbestimmung der Hydrometeore wie das Distrometer.

Die Holographie bietet als einzige Methode die Möglichkeit Größe, Form, Geschwindigkeiten und Abstände von vielen Hydrometeoren gleichzeitig zu bestimmen und echte Volumenverteilungen sowohl von Regen, als auch von gefrorenem Niederschlag zu ermitteln. Deshalb wurde hier die holographische Meßmethode gewählt.

Trotz dieser Eigenschaften ist die Holographie nur für kleine Hydrometeore in kleinen Meßvolumina angewendet worden (Borrmann und Jaenicke, 1993; Uhlig et al., 1998).

3 HOLOGRAPHISCHE METHODE

Mit der Holographie läßt sich ein Meßvolumen zu einem Zeitpunkt 3-dimensional abbilden. Diese Möglichkeit nutzt die wissenschaftliche Methode der Holographie in einem ersten Schritt, um eine 3-dimensionale Szene wie z.B. ein Meßvolumen mit Partikeln (Barlett und Adams, 1972; Thompson, 1974) oder Kavitationsblasen (Hausmann und Lauterborn, 1981) aufzuzeichnen. In einem zweiten Schritt wird das Bildvolumen optisch rekonstruiert und die Eigenschaften der aufgezeichneten Objekte ausgemessen. Diese prinzipielle Aufteilung in zwei Schritte wird auch in dieser Arbeit beibehalten. Entsprechend besteht das hier entwickelte Meßgerät HODAR (Holographic Droplet and Aerosol Recording) aus zwei Teilapparaturen:

- Zuerst wird ein Hologramm eines freien Atmosphärenvolumens von etwa 500 Litern mit darin enthaltenen Hydrometeoren aufgenommen. Die dazu benötigte **Aufnahmeapparatur** ist mobil und stand für die Hologrammaufnahmen dieser Arbeit auf dem Kleinen Feldberg im Taunus. Das Hologramm wird dann wie gewöhnliches Photomaterial in einer Dunkelkammer entwickelt.
- Das fertige Hologramm wird im zweiten Schritt in einer **Rekonstruktionsanlage** im Labor rekonstruiert. Das 3-dimensionale Bildvolumen wird mit Hilfe einer Videokamera in einer Sequenz von 2-dimensionalen Schnitten abgetastet und in einen Computer eingelesen. Dort werden die Bilder der Hydrometeore vermessen.

(Diese beiden Apparaturen werden im Kapitel 4 näher beschrieben.)

Die Anwendbarkeit dieser Methode auf die In-situ-Messung der großen Hydrometeore hängt von den Eigenheiten der Holographie und den bereits in Kapitel 2 formulierten Anforderungen an eine Apparatur ab:

- Der Meßbereich des HODAR soll zwischen 100 μm und einigen mm Größe der Hydrometeore liegen.
- Das Meßvolumen muß über 300 dm^3 fassen, da die großen Hydrometeore nur in geringer Anzahlkonzentration auftreten ($\approx 1/\text{dm}^3$).
- Die Apparatur muß für Fallgeschwindigkeiten der Hydrometeore bis zu 9 m/s scharfe Bilder liefern..

Deshalb stellt der erste Teil dieses Kapitels zunächst das Prinzip der Holographie kurz vor. Anschließend werden im zweiten Teil die Eigenschaften des holographischen Bildes erläutert. Im dritten Teil werden dann die sich daraus ergebenden Konsequenzen für den Aufbau der Meßapparatur dargelegt.

3.1 Prinzip der Holographie

Zur Holographie im Allgemeinen sind zahlreiche Veröffentlichungen und Monographien erschienen (Collier et al., 1971; Eichler, 1993; Hariharan, 1996; Kiemle und Röss, 1969), aber auch zu speziellen wissenschaftlichen Anwendungen wie der Partikelmeßtechnik (Trolinger, 1985; Vikram, 1992). Deshalb kann hier die Beschreibung der Holographie sehr beschränkt bleiben:

1. Licht kann als elektromagnetische Welle mit Amplitude und Phase beschrieben werden. Damit bei der Wiedergabe eines Hologrammes die gesamte Wellenfront wieder rekonstruiert werden kann und ein echt räumliches Bild entsteht, muß nicht nur Information über die Amplitude, sondern auch über die Phase auf dem Hologramm festgehalten werden.
2. Photomaterial ist nur empfindlich für die Intensität des Lichtes, die nur von der Amplitude abhängt. Deshalb ist eine Photographie nur 2-dimensional, da keine Information gespeichert werden kann, woher das Licht kam. Dennoch wird ein Hologramm auf photographischen Medien aufgezeichnet, aber mit einem besonderen Verfahren.

Um die Richtung aus der ein Signal kam, zu bestimmen, wird allgemein ein Laufzeitverfahren benutzt. In der Seismik verwendete Geophone können (analog zum Photomaterial) nur die Amplitude der Erdbebenwelle messen, dennoch kann durch Laufzeitunterschiede der Wellen die Position des Erdbebenherdes bestimmt werden.

Die Holographie nutzt als Zeitnormal zur Laufzeitmessung eine Referenzlichtwelle, die mit der Lichtwelle, die vom Objekt ausgeht, überlagert wird. Dadurch entsteht ein Interferenzmuster, das sowohl von der Amplitude als auch von der Phase des Objektlichtes abhängt. Dieses Interferenzmuster wird photographisch aufgezeichnet. Damit ein zeitlich konstantes Interferenzmuster entsteht, müssen beide Wellen eine feste Beziehung zwischen ihren Phasen aufweisen, d. h. sie müssen kohärent sein.

Das Hologramm stellt also ein Interferenzmuster aus dem Objektlicht und dem Referenzlicht dar. Wird das fertige Hologramm mit dem Referenzlicht beleuchtet, so entsteht durch Beugung am Hologramm eine Lichtwelle, die der des Objektlichtes entspricht.

Es können im wesentlichen zwei Haupttechniken der Holographie unterschieden werden:

1. die Zweistrahl- oder Off-axis-Technik und
2. die für das HODAR verwendete Einstrahl- oder In-line-Technik.

3.1.1 Zweistrahlholographie (Off-axis-Technik)

Abbildung 3.1 zeigt den prinzipiellen Aufbau zur Aufnahme eines Hologramms bei der Zweistrahlholographie: Um zwei kohärente Strahlen zu erhalten, teilt ein Strahlteiler einen Laserstrahl. Anschließend werden beide Teilstrahlen aufgeweitet. Der eine Teil, auch Objektstrahl genannt, dient der Beleuchtung des Objektes. Das vom Objekt reflektierte Licht wird mit dem anderen Teil des Ausgangsstrahls, dem Referenzstrahl, überlagert und das entstehende Interferenzmuster als Hologramm auf einer Photoplatte aufgezeichnet.

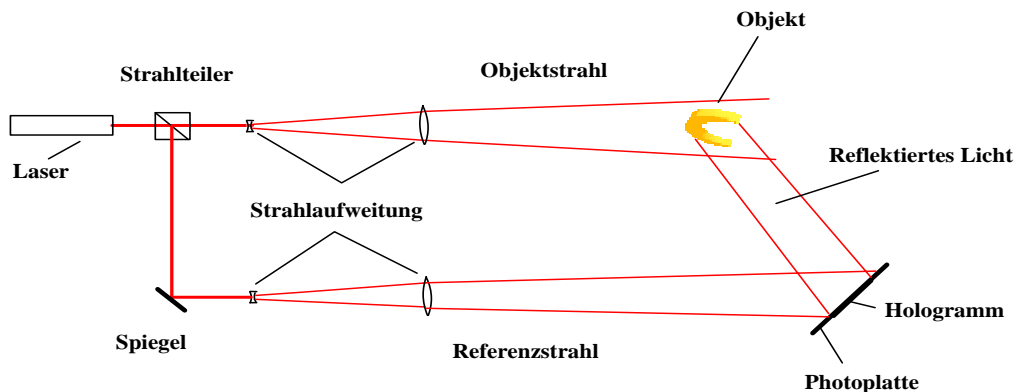


Abbildung 3.1: Prinzip des Aufbaus zur Aufnahme mit der Zweistrahlholographie. Das durch Überlagerung von Objekt- und Referenzstrahl entstehende Interferenzmuster wird als Hologramm auf einer Photoplatte aufgezeichnet.

Wird das entwickelte Hologramm mit dem Referenzstrahl beleuchtet (Abbildung 3.2), entstehen durch Beugung am Hologramm zwei Bilder: ein reelles Bild vor der Hologrammplatte (vom Betrachter aus gesehen) durch den konvergenten Anteil (-1. Ordnung) des gebeugten Lichtes und ein virtuelles Bild hinter der Hologrammplatte durch den divergenten Anteil (1.Ordnung) des gebeugten Lichtes, außerdem geht ein Teil des Lichtes ungebeugt hindurch.

In der mathematischen Beschreibung kann das Licht nach der Beugung am Hologramm in mehrere Terme aufgespalten werden: einen ungebeugten Anteil, der als 0. Ordnung bezeichnet wird, einen konvergenten (-1. Ordnung) und einen divergenten (1. Ordnung) Anteil, sowie weitere Terme höherer Ordnung, die die Abbildungsfehler beschreiben (Borrmann, 1991).

Bei der Aufnahme werden Referenzstrahl und Objektstrahl unter verschiedenen Winkeln zur Hologrammplatte überlagert, daher stammt auch die englische Bezeichnung Off-Axis-Technik. Dadurch werden bei der Rekonstruktion der ungebeugte Anteil des Rekonstruktionsstrahls und die beiden Bilder voneinander getrennt und können einzeln betrachtet werden.

Mit der Zweistrahlholographie sind eine Durchleuchtung, bei der das durch das Objekt hindurchtretende und das an ihm gebeugte Licht aufgenommen wird oder auch eine Beleuchtung des Objektes, bzw. des Objektvolumens möglich, wobei das vom Objekt reflektierte Licht aufgenommen wird.

HOLOGRAPHISCHE METHODE

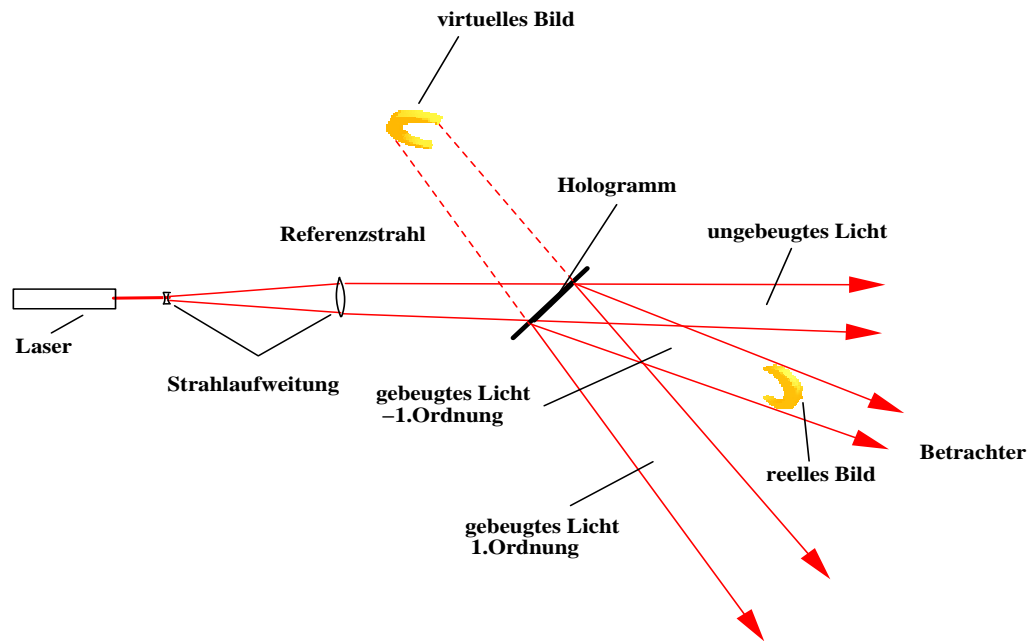


Abbildung 3.2: Rekonstruktion eines Zweistrahlhologramms. Es entstehen zwei Bilder, ein reelles und ein virtuelles Bild, die jeweils einzeln betrachtet werden können.

3.1.2 Einstrahlholographie (In-line-Technik)

Der wesentliche Unterschied zur Zweistrahlholographie ist, daß bei der Einstrahlholographie beide Teilstrahlen kollinear (englisch: In-line) sind und damit zu einem einzigen Strahl werden (Abbildung 3.3). Das am Objekt ungestört vorbeigehende Licht wird als „Referenzstrahl“ und das vom Objekt gebeugte Licht wird als „Objektstrahl“ benutzt. Dadurch kann der Aufbau wesentlich vereinfacht werden, es wird ja nur noch eine Strahlaufweitung benötigt. Allerdings lassen sich nur Objekte im Durchlicht aufnehmen, die auch ausreichend viel Licht ungestört vorbei lassen. Die Hydrometeore sind solche Objekte.

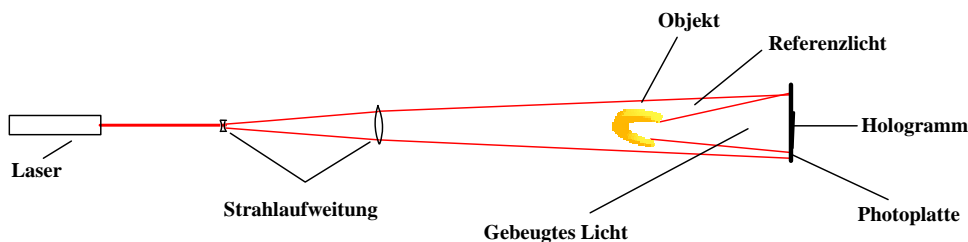


Abbildung 3.3: Prinzipieller Aufbau zur Aufnahme mit der Einstrahl- oder In-line-Holographie. Das am Objekt vorbei gehende Licht wird als Referenzstrahl benutzt. Deshalb lassen sich nur kleine Objekte aufnehmen, die ausreichend viel Licht vorbei lassen.

Mit einer speziellen Technik, der Denisyuk-Technik ist es auch möglich das reflektierte Objektlicht aufzunehmen (Abbildung 3.4). Jedoch läßt diese nur eine geringe Tiefenabbildung zu.

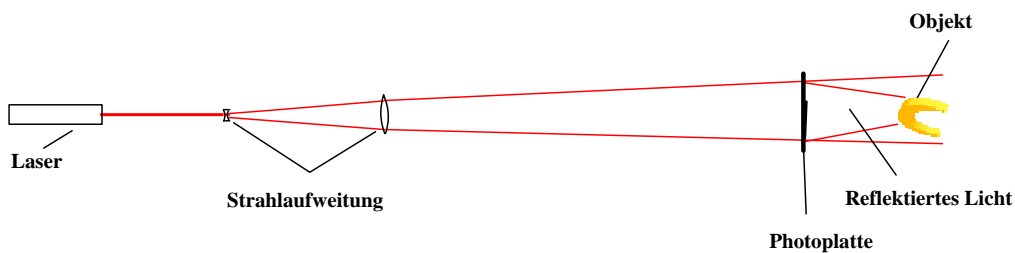


Abbildung 3.4: Denisyuk-Aufbau. Damit ist es möglich mit nur einem Strahl das reflektierte Objektlicht aufzunehmen. So können auch größere und kompakte Objekte aufgenommen werden.

Rekonstruiert man ein Einstrahlhologramm (Abbildung 3.5), entstehen ebenso wie bei der Zweistrahlholographie zwei Bilder. Diese beiden Bilder und das ungebeugte Licht liegen auf einer Achse und lassen sich nicht getrennt betrachten. Dadurch liegt das reelle Bild vor einem Hintergrund, der aus der Überlagerung der Lichtquelle und des unscharfen virtuellen Bildes entsteht, das jedoch eine geringere Intensität als das reelle Bild besitzt. So ist das reelle Bild noch sichtbar, aber kontrastreduziert. Das Betrachten mit dem bloßen Auge ist nicht möglich, da direkt in den Strahl geblickt werden müßte. Deshalb muß das

HOLOGRAPHISCHE METHODE

reelle Bild auf einer Mattscheibe oder der lichtempfindlichen Schicht einer Kamera aufgefangen werden, wobei die Dreidimensionalität des Bildes verloren geht. Durch Verschieben dieser Ebene (der Mattscheibe bzw. der Sensorschicht der Kamera) im Bildraum läßt sich allerdings die Tiefeninformation wiedergewinnen.

Da die Objekte von hinten (von der Photoplatte aus gesehen) beleuchtet werden, können, wie bei gewöhnlichen Gegenlichtaufnahmen der Photographie, nur die Umrisse opaker Objekte aufgezeichnet werden, jedoch werden deren Positionen im Raum festgehalten.

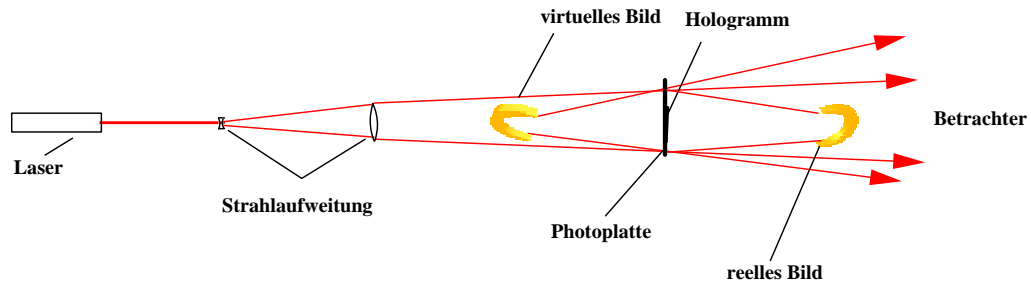


Abbildung 3.5: Rekonstruktion eines In-line-Hologramms. Die beiden Bilder liegen hintereinander und auf einer Achse mit der Lichtquelle.

Trotz dieser Nachteile wurde für das neue HODAR die In-line-Technik gewählt, denn sie hat auch Vorteile: Der Aufbau ist wesentlich einfacher und stabiler und es wird fast das gesamte Licht zur Belichtung der Photoplatte benutzt. Darüber hinaus können weiterhin Aufnahmen von einem kleinen Volumen (wie bei Borrmann, 1991) gemacht und rekonstruiert werden.

3.2 Eigenschaften des holographischen Bildes

Für die weiteren Überlegungen zum Aufbau des HODAR sind einige Eigenschaften des holographischen Bildes wichtig:

Wird ein Objekt mit Licht beleuchtet, entsteht immer ein Beugungsbild. Dieses ist normalerweise bedingt durch die gewöhnlich inkohärente Beleuchtung nicht sichtbar. In kohärentem Licht aber ist das Objekt deutlich von hellen und dunklen Ringen umgeben (siehe auch Abbildung 3.7). Bei der Holographie wird dieses Beugungsbild mit dem dazu kohärenten Referenzlicht überlagert und so auf einer Photoplatte aufgezeichnet. Dieses Bild kann als Überlagerung vieler einzelner Beugungsbilder der einzelnen Objektpunkte (Superpositionsprinzip) betrachtet werden. Im Falle eines Punktobjektes entsteht ein Bild entsprechend einer Fresnel'schen Zonenplatte (Abbildung 3.6).

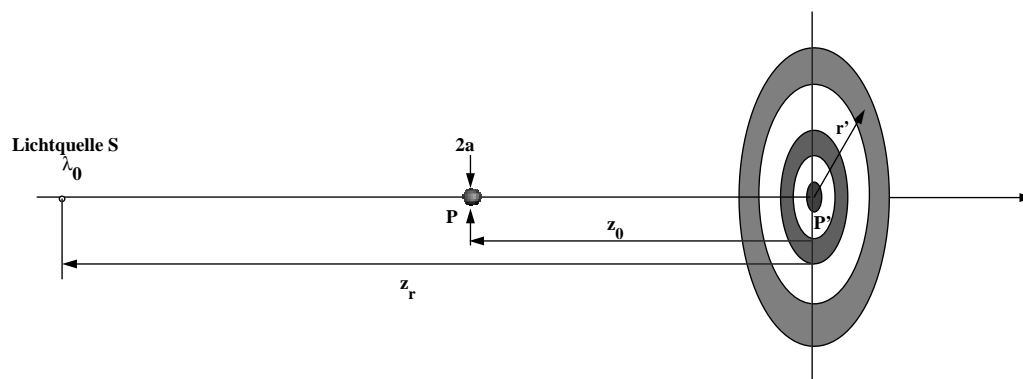


Abbildung 3.6: Beugungsbild eines Punktobjektes mit Radius a : Im Querschnitt entspricht es einer Fresnel'schen Zonenplatte, besitzt allerdings keine scharfen Übergänge von hell zu dunkel. Es ist über den ganzen Raum ausgedehnt, auch in Längsrichtung. Die Bezeichnungen werden im Verlauf des Kapitels erläutert.

Wie bei dieser, die ja sowohl als sammelnde als auch zerstreue Linse wirkt, entstehen zwei Bilder des Objektes, ein reelles und ein virtuelles Bild. Das komplette Beugungsmuster ist natürlich nicht nur in der Hologrammebene sondern im ganzen Raum zu finden. Dies läßt sich, wie Abbildung 3.7 zeigt, beim Fokussieren eines aufgenommenen Tropfens beobachten und zum Auffinden der Tropfenpositionen ausnutzen (Borrmann, 1991).

In Abbildung 3.7 wird der Abstand der Schärfeebene des Kamerabildes gegenüber einem holographisch aufgenommenen Tropfen mit $900\ \mu\text{m}$ Durchmesser variiert. Dessen Beugungsbild ändert sich mit dem Abstand vom Focus, der Position des Tropfens im Bildraum. Der Rand des Tropfens wird schnell unscharf. Der Radius der hellen und dunklen Ringe wird langsam größer und der Kontrast zwischen ihnen immer kleiner, bis sie kaum noch zu sehen sind. Aber auch innerhalb des Tropfenquerschnittes entstehen Ringe, die sich zu einem dunklen Fleck zusammenziehen, dem Poissonschen Fleck.

HOLOGRAPHISCHE METHODE

Deutlich ist auch das Beugungsmuster eines auf der Photoplatte liegenden Staubkorns rechts neben dem Tropfen zu sehen, das immer kleiner und schärfer wird, bis der Umriß des kleinen Korns sichtbar wird. Im Hintergrund von Bild d) sind noch weitere Körnchen zu entdecken. So kann das Beugungsmuster auch zur Detektion kleiner Tröpfchen benutzt werden.

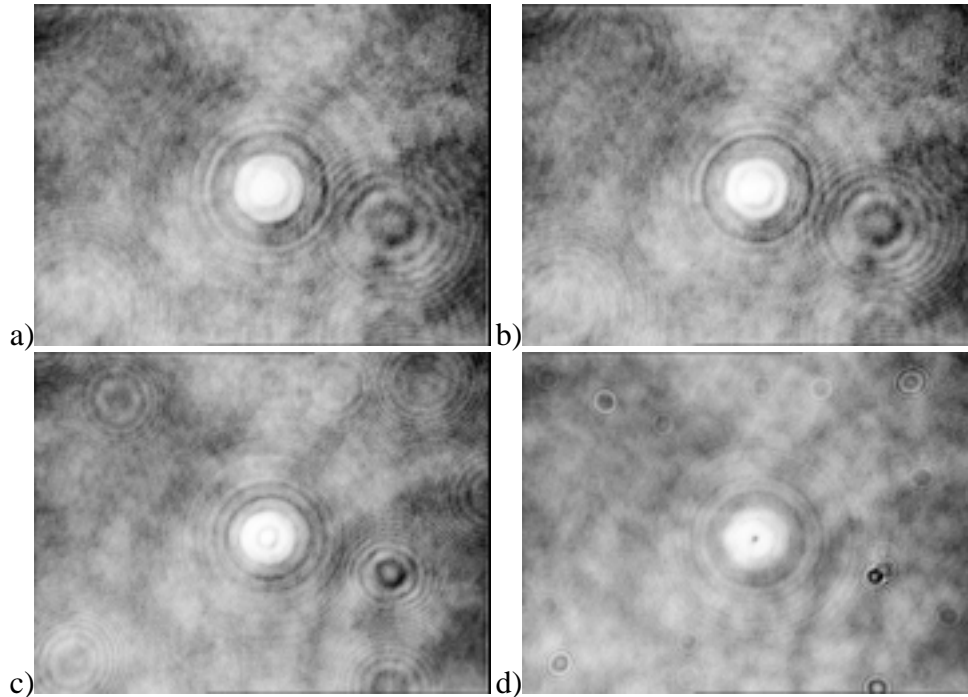


Abbildung 3.7: Beugungsbild eines Tropfens (900 µm) in verschiedenen Entfernungen vom Tropfen: a) im Focus (0 cm entfernt), b) 2 cm entfernt, c) 10 cm entfernt, d) Poissonscher Fleck in 14 cm Entfernung.

Die Intensitätsverteilung ψ des Beugungsbildes auf der Aufnahmeebene des Hologramms (Photoplatte) kann näherungsweise berechnet werden.

Ist das Objekt ein Punktobjekt mit Radius a im Abstand z_0 von der Photoplatte und wird von der Lichtquelle S im Abstand z_r mit der Wellenlänge λ_0 beleuchtet, entsteht ein Ringmuster entsprechend Abbildung 3.6 mit Zentrum in P' und einem Ringradius r' .

Ist das Objekt ausgedehnt (in transversaler Richtung), wird die Beschreibung komplexer (Abbildung 3.8). Sie kann aber als Überlagerung der Lösung einzelner Randpunkte betrachtet werden (Vikram, 1992):

Das Objekt an der Stelle (ξ, η, z_0) werde mit Licht der Wellenlänge λ_0 von einer Quelle S an der Stelle $(0, 0, z_R)$ mit der Amplitude:

$$E_0 = B \exp \left[- \frac{ik_0 (\xi^2 + \eta^2)}{2(z_R - z_0)} \right] \quad 3.1$$

mit der willkürlichen Konstante B in V/m beleuchtet (Abbildung 3.8). $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$

ist die Wellenzahl in m^{-1} .

HOLOGRAPHISCHE METHODE

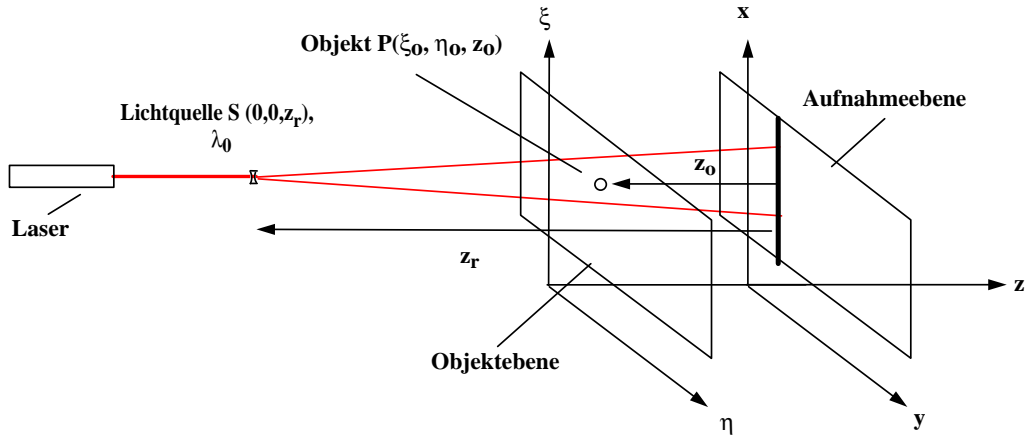


Abbildung 3.8: Koordinatensystem für die Berechnung der Intensitätsverteilung am Aufnahmeort (x,y -Ebene) bei Beleuchtung eines in der ξ,η -Ebene ausgedehnten Objektes durch eine Punktlichtquelle S mit Wellenlänge λ_0 .

Das Objekt sei durch die Objektfunktion $A(\xi,\eta)$ hinreichend beschrieben. Für ein opakes Objekt gilt $A = 1$ innerhalb und $A = 0$ außerhalb des Objektquerschnitts.

Mit dem Huygens-Fresnel-Prinzip (Born und Wolf, 1980) ergibt sich die Feldverteilung ψ an der Aufnahmeebene (Vikram, 1992) als Überlagerung der Wellenfelder der einzelnen Objektpunkte:

$$\psi(x, y) = \frac{iB}{\lambda_0 z_0} \exp(-ik_0 z_0) \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \left\{ [1 - A(\xi, \eta)] \exp\left[-\frac{ik_0}{2z_0} \left((x - \xi)^2 + (y - \eta)^2\right)\right] \right. \\ \left. \exp\left[-\frac{ik_0}{2} \frac{(\xi^2 + \eta^2)}{(z_R - z_0)}\right] \right\} d\xi d\eta \quad 3.2$$

Der Teil des Integral ohne $A(\xi,\eta)$ kann aufgelöst werden:

$$\psi(x, y) = -\left(\frac{B}{m_0}\right) \exp(-ik_0 z_0) \exp\left[-\frac{ik_0}{2} \frac{(x^2 + y^2)}{z_R}\right] * \\ \left(1 - \frac{im_0}{\lambda_0 z_0} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} A(\xi, \eta) \exp\left[-\frac{ik_0}{2z_0} \left((x - \xi)^2 + (y - \eta)^2\right)\right] * \right. \\ \left. \exp\left[-\frac{ik_0}{2} \frac{(\xi^2 + \eta^2)}{(z_R - z_0)}\right] \exp\left[\frac{ik_0}{2} \frac{(x^2 + y^2)}{z_R}\right] d\xi d\eta \right) \quad 3.3$$

$$\text{mit: } m_0 = \left(1 - \frac{z_0}{z_R}\right)^{-1} \quad 3.4$$

Für den Parallelstrahl gilt $z_R = -\infty$ und damit $m_0 = 1$.

HOLOGRAPHISCHE METHODE

Mit einer Koordinatentransformation nach dem Mittelpunkt des Objektes P bzw. der Beugungsfigur P':

$$x' = x - x_0 \quad 3.5$$

$$y' = y - y_0 \quad 3.6$$

$$\xi' = \xi - \xi_0 \quad 3.7$$

$$\eta' = \eta - \eta_0 \quad 3.8$$

und der Fernfeldbedingung:

$$\frac{(\xi'^2 + \eta'^2)_{\max}}{\lambda_0 |z_0|} \ll 1 \quad 3.9$$

$$\frac{(\xi'^2 + \eta'^2)_{\max}}{\lambda_0 |z_R - z_0|} \ll 1 \quad 3.10$$

ergibt sich:

$$\begin{aligned} \psi(x, y) &= - \left(\frac{B}{m_0} \right) \exp(ik_0 |z_0|) \exp \left[- \frac{ik_0 (x^2 + y^2)}{2 z_R} \right] * \\ &\quad \left\{ 1 + \frac{im_0}{\lambda_0 |z_0|} \exp \left[\frac{ik_0 (x'^2 + y'^2)}{2 m_0 |z_0|} \right] \tilde{A} \left(\frac{x'}{\lambda_0 |z_0|}, \frac{y'}{\lambda_0 |z_0|} \right) \right\} \\ &= - \left(\frac{B}{m_0} \right) \exp(ik_0 |z_0|) \exp \left[- \frac{ik_0 (x^2 + y^2)}{2 z_R} \right] * \\ &\quad \left\{ 1 + \frac{im_0}{\lambda_0 |z_0|} \exp \left[\frac{ik_0 (x'^2 + y'^2)}{2 m_0 |z_0|} + i\Phi \left(\frac{x'}{\lambda_0 |z_0|}, \frac{y'}{\lambda_0 |z_0|} \right) \right] \tilde{A}_0 \left(\frac{x'}{\lambda_0 |z_0|}, \frac{y'}{\lambda_0 |z_0|} \right) \right\} \end{aligned} \quad 3.11$$

Hier ist berücksichtigt, daß z_0 eine negative Größe ist. \tilde{A} ist die Fouriertransformierte der Objektfunktion $A(\xi, \eta)$ und $\Phi(\xi, \eta)$ die Phasenfunktion:

$$\begin{aligned} \psi(x, y) &= \int \int_{-\infty}^{+\infty} A(\xi', \eta') \exp \left\{ -2\pi i \left[\left(\frac{x'}{\lambda_0 |z_0|} \right) \xi' + \left(\frac{y'}{\lambda_0 |z_0|} \right) \eta' \right] \right\} d\xi' d\eta' \\ &= \tilde{A}_0 \left(\frac{x'}{\lambda_0 |z_0|}, \frac{y'}{\lambda_0 |z_0|} \right) * \exp \left[i\Phi \left(\frac{x'}{\lambda_0 |z_0|}, \frac{y'}{\lambda_0 |z_0|} \right) \right] \end{aligned} \quad 3.12$$

Aus Gleichung 3.11 folgt die Intensitätsverteilung für ein 2-dimensionales Objekt:

$$\begin{aligned}
 I(x', y') &= |\psi(x', y')|^2 \\
 &= \left(\frac{B}{m_0} \right)^2 \left\{ 1 - \frac{2m_0}{\lambda_0 |z_0|} \left[\sin \left(\frac{\pi r'^2}{\lambda_0 m_0 |z_0|} \right) * \operatorname{Re} \tilde{A} \left(\frac{x'}{\lambda_0 |z_0|}, \frac{y'}{\lambda_0 |z_0|} \right) \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + \cos \left(\frac{\pi r'^2}{\lambda_0 m_0 |z_0|} \right) * \operatorname{Im} \tilde{A} \left(\frac{x'}{\lambda_0 |z_0|}, \frac{y'}{\lambda_0 |z_0|} \right) \right] + \left(\frac{m_0}{\lambda_0 |z_0|} \right)^2 \left| \tilde{A} \left(\frac{x'}{\lambda_0 |z_0|}, \frac{y'}{\lambda_0 |z_0|} \right) \right|^2 \right\}
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

wobei:

$$r'^2 = x'^2 + y'^2 \tag{3.14}$$

Für ein opakes Objekt mit rundem Querschnitt $2a$ kann \tilde{A} ausgerechnet werden:

$$\begin{aligned}
 \tilde{A} \left(\frac{x'}{\lambda_0 |z_0|}, \frac{y'}{\lambda_0 |z_0|} \right) &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} A(\xi', \eta') \exp \left\{ -2\pi i \left[\left(\frac{x'}{\lambda_0 |z_0|} \right) \xi' + \left(\frac{y'}{\lambda_0 |z_0|} \right) \eta' \right] \right\} d\xi' d\eta' \\
 &= \pi a^2 \left[\frac{2J_1 \left(\frac{2\pi a r'}{\lambda_0 |z_0|} \right)}{\frac{2\pi a r'}{\lambda_0 |z_0|}} \right]
 \end{aligned} \tag{3.15}$$

dabei ist J_1 die Besselfunktion 1. Ordnung und

$$A(\xi', \eta') = \operatorname{circ} \left(\frac{r'}{a} \right) = \begin{cases} 1 & r' \leq a \\ 0 & r' > a \end{cases} \tag{3.16}$$

In Gleichung 3.13 eingesetzt ergibt sich damit für die Intensität an der Hologrammplatte für ein rundes Objekt mit Radius a :

$$I(x', y') = \left(\frac{B}{m_0} \right)^2 \left\{ 1 - \frac{2m_0 \pi a^2}{\lambda_0 |z_0|} \sin \left(\frac{\pi r'^2}{m_0 \lambda_0 |z_0|} \right) \left[\frac{2J_1 \left(\frac{2\pi a r'}{\lambda_0 |z_0|} \right)}{\frac{2\pi a r'}{\lambda_0 |z_0|}} \right] + \left(\frac{2m_0 \pi a^2}{\lambda_0 |z_0|} \right) \left[\frac{2J_1 \left(\frac{2\pi a r'}{\lambda_0 |z_0|} \right)}{\frac{2\pi a r'}{\lambda_0 |z_0|}} \right]^2 \right\} \tag{3.17}$$

Abbildung 3.9 zeigt einen Plot der auf B normierten Intensität I in Abhängigkeit vom Abstand r' vom Zentrum der Beugungsfigur P' für ein Objekt mit Radius $a = 50 \mu\text{m}$ im Abstand $z_0 = 10 \text{ cm}$ von der Hologrammplatte bzw. Aufnahmeebene, das von einem Parallelstrahl ($m_0 = 1$, $z_r = \infty$) mit der Wellenlänge $\lambda_0 = 694,3 \text{ nm}$ (Rubinlaser) beleuchtet wird.

Es zeigt sich, daß die breiten Ringe, die auf Abbildung 3.7 zu erkennen sind, in viele schmale Ringe unterteilt sind. Die Besselfunktion stellt im wesentlichen die Einhüllende der Sinusfunktion dar. Der Bereich bis zur ersten Nullstelle ist das zentrale Maximum der Beugungsfigur. Die weiteren von Null verschiedenen Bereiche sind die Nebenmaxima.

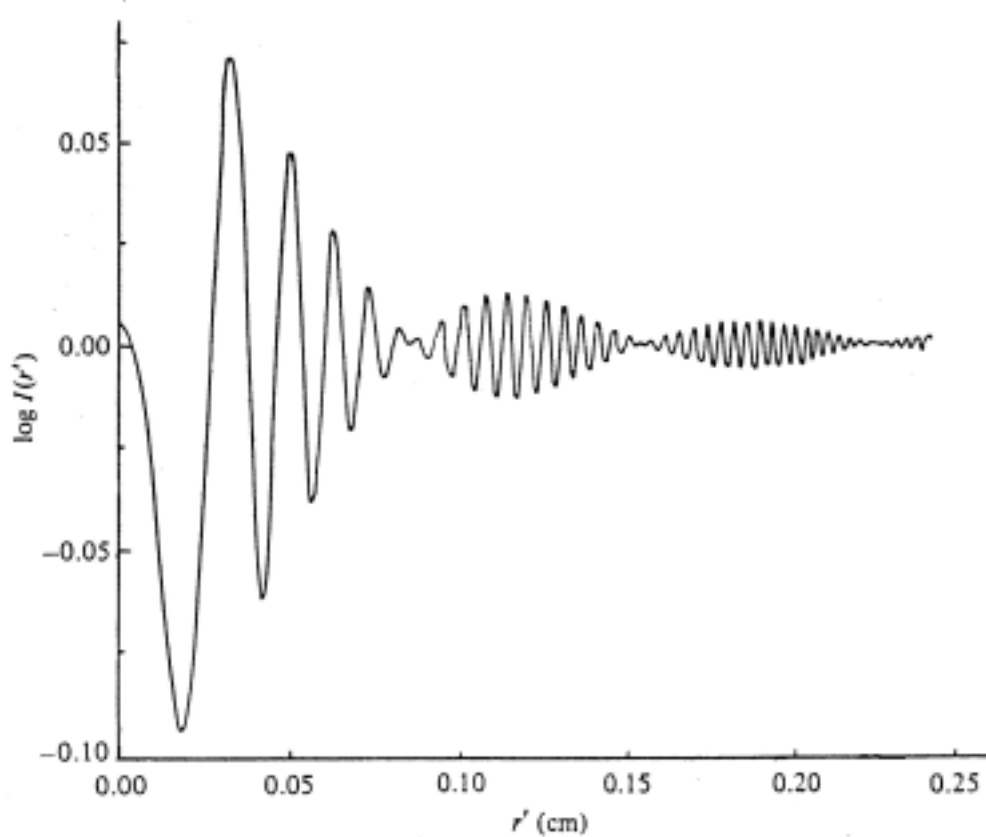


Abbildung 3.9: Änderung von $\log I(r')$ in Abhängigkeit von r' mit $m_0 = 1$ (Parallel-strahl), $\lambda_0 = 0,6943 \mu\text{m}$ (Rubinlaser), $a = 50 \mu\text{m}$ und $z_0 = 10 \text{ cm}$. $I(r')$ ist die normierte Intensität $I(x',y')/(B/m_0)^2$ für ein rundes Objekt mit Radius a (entnommen aus Vikram, 1992). (Mit freundlicher Genehmigung von Cambridge University Press)

Die Intensität $I(x,y)$ an der Hologrammebene wird auf einer Photoemulsion aufgezeichnet. Dabei ist das Auflösungsvermögen der Emulsion zu berücksichtigen (siehe Kapitel 3.3.4). Hier soll dieser Aspekt unberücksichtigt bleiben.

Im Allgemeinen wird dazu eine negative Emulsion verwendet. Deren Lichtdurchlässigkeit T (Transmittanz) nach der Entwicklung nimmt bei Vergrößerung der Belichtung ab. Die Belichtung ist das Produkt aus Intensität I und der Belichtungsdauer t . In der linearen Näherung wird $T(x,y)$ mit der Materialkonstanten K angesetzt:

$$T(x,y) = \tau_b - KI(x,y) = \tau_b - K|\psi(x,y)|^2 \quad 3.18$$

Die Hersteller von Photoemulsionen sind bestrebt diesen linearen Bereich der Schwärzungskurve zur Kontrastverbesserung möglichst weit auszudehnen. Eine Über- bzw. Unterbelichtung und damit das Verlassen des linearen Bereichs muß vom Anwender vermieden werden.

HOLOGRAPHISCHE METHODE

Wird das entwickelte Hologramm mit Licht der Wellenlänge λ_c von der Quelle $S(0,0,z_c)$ rekonstruiert, kann die Amplitude geschrieben werden als:

$$E_c = C \exp\left(\frac{ik_c(x^2 + y^2)}{2z_c}\right), \quad 3.19$$

mit $k_c = 2\pi/\lambda_c$.

Mit dem Huygens-Fresnel-Prinzip folgt für die Beobachtungsebene (μ, ν) im Abstand z vom Hologramm:

$$\psi(\mu, \nu) = -\frac{i}{\lambda_c z} \exp(ik_c z) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_c T(x, y) \exp\left\{\frac{ik_c}{\lambda} [(\mu - x)^2 + (\nu - y)^2]\right\} dx dy \quad 3.20$$

Im allgemeinen Fall führt das Einsetzen der Gleichungen 3.3, 3.18 und 3.19 zu einem komplizierten Ausdruck, der hier nur gekürzt wiedergegeben werden soll:

$$\psi(\mu, \nu) = -\frac{iCB'}{\lambda_c z} \exp(ik_c z) (I_1 + I_2 + I_3 + I_4) \quad 3.21$$

mit $B' = \tau_b - K(B/m_0)^2$. Die ausführliche Gestalt der Integrale I_{1-4} und eine weitergehende Betrachtung findet sich bei Vikram (1992).

Integral I_1 stellt den ungebeugten, aber abgeschwächten Teil der Referenzwelle dar. Hinter Integral I_2 verbirgt sich die rekonstruierte Objektwelle, je nach Beobachtungsebene das reelle oder virtuelle Bild. Integral I_3 , der Anteil des jeweils anderen Bildes und Integral I_4 stören im allgemeinen das holographische Bild. Dies führte zur Entwicklung der Zweistrahlholographie. Im Fernfeld werden die Anteile der Integrale I_3 und I_4 vernachlässigbar klein. Für kleine Objekte wie die Hydrometeore ist die Fernfeldbedingung in der Praxis immer erfüllt.

3.3 Grundsätzliche Überlegungen zum optischen Aufbau des HODAR

An die Optik des HODAR werden folgende Anforderungen gestellt:

Um Hologramme aufzeichnen zu können, muß die optische Apparatur in der Größenordnung von 1000 Linien/mm auf geeignetes Filmmaterial abbilden können. Die Laserlichtquelle sowohl der Aufnahme als auch der Rekonstruktion muß ausreichende Kohärenz besitzen.

Regentropfen fallen mit bis zu 9 m/s und haben etwa 1 mm Radius, es muß also ein gepulster Laser mit kurzem Lichtpuls benutzt werden.

Auch die asphärische Abweichung der Regentropfen von der Kugelgestalt ist hier von Interesse und besonders bei Schneeflocken treten feine Konturen auf, die noch zu sehen sein sollen. So sollen in diesem Volumen möglichst kleine Details in der Größenordnung von 100 µm noch aufgelöst werden können.

Es wurde ebenso wie von Borrmann (1991), wo 1 Liter Nebelluft holographisch aufgezeichnet wurde, als Aufnahmeverfahren die In-line Holographie (Abbildung 3.3) gewählt. Um ein sehr viel größeres Volumen von 500 Litern aufnehmen zu können, muß eine Linse in den Strahlengang eingefügt werden (Abbildung 3.10). Diese bewirkt eine Verkleinerung m_H des Bildvolumens.

Die verkleinerte Abbildung des Meßvolumens muß aus zwei Gründen stattfinden:

1. Der Durchmesser des Meßvolumens muß an die Größe einer handelsüblichen Photoplatte angepaßt werden.
2. Die Länge des Meßvolumens darf die im Labor zur Verfügung stehende Länge der Rekonstruktionsapparatur (3,1 m) nicht überschreiten.

Der Verkleinerungsfaktor m_H sollte gering gewählt werden, um möglichst kleine Hydrometeore aufnehmen zu können.

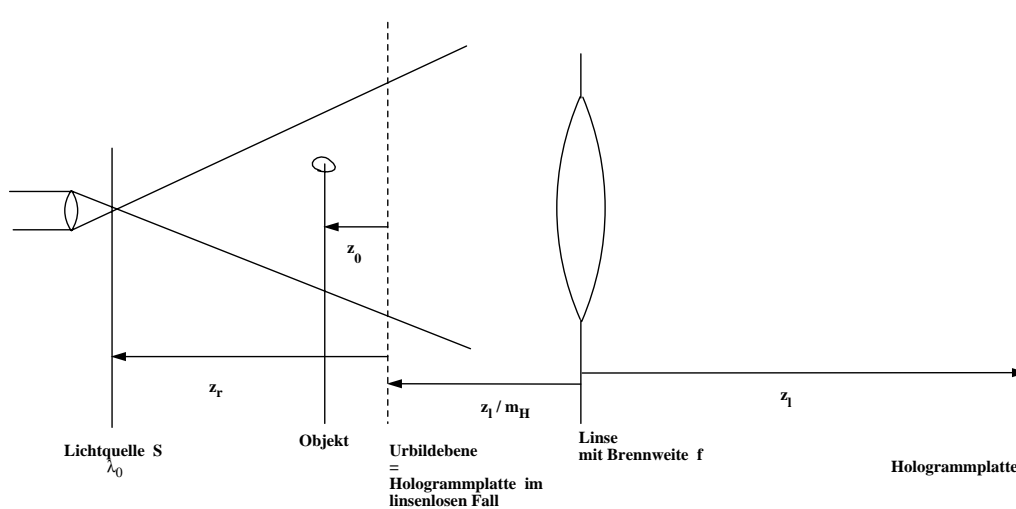


Abbildung 3.10: Prinzipieller Strahlengang des gewählten Aufbaus für die Aufnahme von Hologrammen mit dem HODAR. Zum einfachen In-line-Aufbau (links) wurde eine verkleinernde Linse (rechts) hinzugefügt, um ein großes Volumen aufzeichnen zu können.

3.3.1 Abbildungsgleichung des gewählten Aufbaus

Den schematischen Strahlengang der Aufnahmeapparatur zeigt Abbildung 3.10: Das Meßvolumen mit den Objekten wird genau wie im einfachen In-line-Aufbau von hinten durch einen aufgeweiteten Laserstrahl beleuchtet. Jedoch wird das Interferenzmuster nicht direkt auf eine Photoplatte aufgezeichnet, sondern dieses zuerst mit Hilfe einer Linse verkleinert abgebildet.

Wird zunächst die Verkleinerungslinse der Kamera weggelassen, dann besteht der In-line-aufbau für die Aufnahme aus einer kohärenten Lichtquelle S mit Wellenlänge λ_0 auf der optischen Achse im Abstand z_r von der Hologrammplatte (Urbildebene). Ein Objekt befindet sich im Abstand z_0 vor der Hologrammplatte (Abbildung 3.10, linke Seite).

Wird die Linse hinzugenommen, ändern sich die Verhältnisse:

Die Linse mit Brennweite f im festen Abstand z_l von der Hologrammplatte stellt ein Verkleinerungssystem dar (Abbildung 3.10, rechts). Dieses bildet eine Ebene (Urbildebene) auf die Hologrammplatte ab.

Das Interferenzmuster, das im linsenlosen Fall direkt auf der Hologrammplatte aufgezeichnet wurde, liegt jetzt in der Urbildebene des Verkleinerungssystems und wird nun durch die Linse auf die Hologrammplatte verkleinert abgebildet. Diese Verkleinerung m_H wird bestimmt durch den Abstand Hologrammplatte - Linse z_l und deren Brennweite f (Abbildung 3.10), entsprechend der Linsenformel:

$$m_H = \frac{f}{z_l - f} \tag{3.22}$$

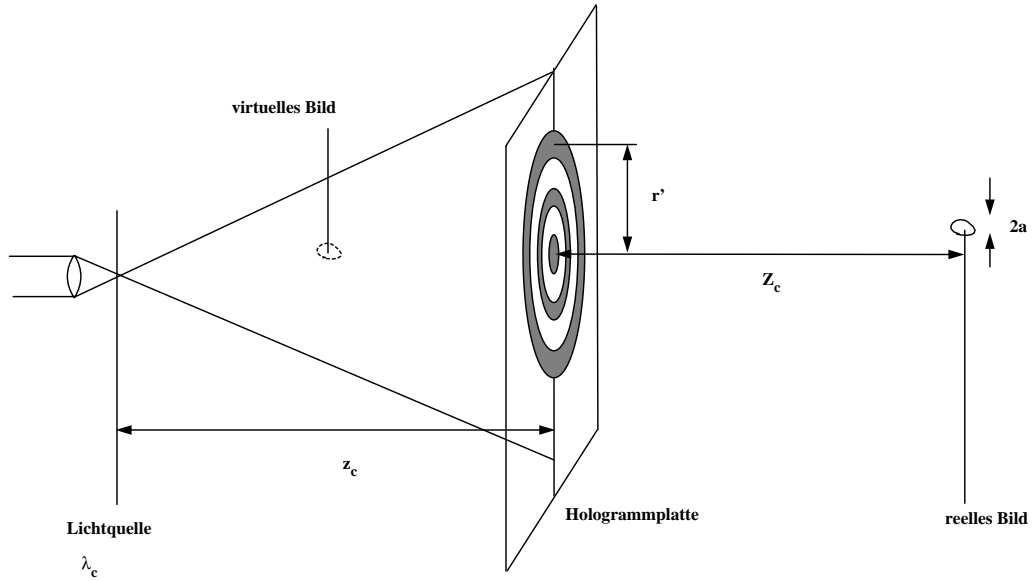


Abbildung 3.11: Rekonstruktion eines Hologramms mit einer Lichtquelle mit Wellenlänge λ_c im Abstand z_c . Der Durchmesser des Bildes sei $2a$ und der Radius eines Beugungsrings mit r' bezeichnet (siehe Kapitel 3.3.4).

Wird mit einer Lichtquelle mit Wellenlänge λ_c im Abstand z_c rekonstruiert (Abbildung 3.11) und das Wellenlängenverhältnis n zwischen Aufnahmewellenlänge λ_0 und der Rekonstruktionswellenlänge λ_c :

$$n = \frac{\lambda_0}{\lambda_c} \quad 3.23$$

eingeführt, ergibt sich nach längerer Rechnung (Meier, 1965) mit den Bezeichnungen in Abbildung 3.10 für das gesamte Aufnahmesystem die transversale Vergrößerung:

$$M_c = \frac{m_H}{1 - \frac{m_H^2 z_0}{nz_c} - \frac{z_0}{z_r}} \quad 3.24$$

und die longitudinale Vergrößerung:

$$M_{long} = - \frac{M_c^2}{n} . \quad 3.25$$

Bei Aufnahme und Rekonstruktion mit einem parallelen Strahl (d.h. $z_c, z_r = \infty$) wird dies vereinfacht zu:

$$M_c = m_H \quad 3.26$$

und

$$M_{long} = - \frac{m_H^2}{n} . \quad 3.27$$

Man beachte, daß dann die Vergrößerungen M_c und M_{long} von der Partikelposition unabhängig sind.

HOLOGRAPHISCHE METHODE

In dem für das HODAR verwendeten Aufbau sorgt ein Aufweitungssystem für einen Parallelstrahl. Die Verkleinerung m_H durch die Linse wurde zu $m_H = 0,5$ gewählt. Es wurde eine Linse mit Brennweite f vom 700 mm verwendet. Als Aufnahmelaser wird ein Rubinlaser (694,3 nm) und als Rekonstruktionslaser ein He-Ne-Laser (632,8 nm) benutzt.

Somit ergibt sich in diesem konkreten Fall:

- das Wellenlängenverhältnis $n = 0,91$,
- die transversale Vergrößerung $M_c = 0,5$,
- die longitudinale Vergrößerung $M_{\text{long}} = -0,227$ und
- der Abstand zwischen Linse und Objektebene $z_l/m_H = 2,1$ m.

3.3.2 Energiebedarfsrechnung

Der hier aus Gründen der Kompatibilität mit der kleinen Version des HODAR gewählte In-line- oder Transmissionsaufbau (Abbildung 3.10) bringt den Vorteil, daß fast das gesamte Laserlicht die Photoplatte erreicht.

Zur Verfügung steht ein Rubinlaser mit einer Pulsenergie von 30 mJ maximal.

Das hier verwendete Aufnahmematerial AGFA 10E75 HD hat eine minimale Empfindlichkeit von $2 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ (Herstellerangabe, AGFA). Also lassen sich theoretisch 15000 cm^2 (Kreis mit 1,4 m Durchmesser) maximal belichten. Für einen brauchbaren Kontrast sind jedoch mindestens $10 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ nötig, das entspricht 3000 cm^2 (ca. 60 cm Durchmesser) belichtbare Fläche. Berücksichtigt man Verluste durch die Reflexionen der Aufweitungsoptik und Streuung durch die Atmosphäre und natürlich auch der Meßobjekte, reduziert sich der mögliche Durchmesser des Meßvolumens weiter auf etwa 20 bis 30 cm.

Da das Meßvolumen um den Faktor zwei verkleinert aufgenommen werden muß, wenn es rekonstruierbar bleiben und auf einer 10,16 cm 12,7 cm (4 in.·5 in.) großen Photoplatte aufgezeichnet werden soll, gewinnt man durch die Sammelwirkung der Linse einen Faktor vier in der Intensität, so daß die Belichtung bei einem Durchmesser des Meßvolumens von 20 cm keine Probleme bereiten sollte.

3.3.3 Pulsdauer

Um bewegte Teilchen auf einem Photo oder Hologramm festzuhalten, muß mit ausreichend kurzen Belichtungszeiten gearbeitet werden. Wie Crane et al. (1983) zeigten, sind scharfe Bilder nur zu erwarten, wenn die Objektverschiebung innerhalb der Belichtungszeit nicht größer als ein Zehntel des Objektdurchmessers ist. Für einen Regentropfen mit 1 mm Radius sollte sie also nicht größer als $2/10$ mm sein. Bewegt dieser sich mit maximaler Geschwindigkeit für Regentropfen von 9 m/s, so folgt eine Belichtungszeit von maximal $1/50000$ s oder 2 μs .

Der hier verwendete Laser hat eine Pulsdauer von nur 30 ns, dies ist etwa sechzigmal kürzer.

3.3.4 Filmauflösung

Die Auflösung des Bildes hängt von der erfolgreichen Aufnahme der Intensitätsverteilung in der Aufnahmeebene ab.

Nach dem Rayleigh'schen Auflösungskriterium (Vikram, 1992) gilt bei der Rekonstruktion des Hologramms für das Bild eines Objektes mit Radius a :

$$a|_{\text{Bild}} = \frac{1,22 \lambda_c z_c}{2r'}, \quad 3.28$$

wobei $2r'$ die Apertur des Hologramms in mm, z_c der Abstand des Bildes von der Hologrammplatte in mm und λ_c die Rekonstruktionswellenlänge in nm ist (Abbildung 3.11).

Mit Hilfe des Abbildungsmaßstabs M_c (Gleichung 3.20) und Gleichung 3.24 ergibt sich für das Objekt bei der Aufnahme die Beziehung:

$$a|_{\text{Objekt}} = \frac{1,22 \lambda_0 |z_0| M_c}{2r'}. \quad 3.29$$

Das bedeutet, es existiert für die Aufnahme eines Objektes mit Radius a eine minimale Apertur r'_{\min} des Hologramms in Abhängigkeit von Entfernung und Aufnahmewellenlänge:

$$2r'_{\min} = \frac{1,22 \lambda_0 |z_0| M_c}{a}. \quad 3.30$$

Wird dies in das Argument der Besselfunktion J_1 der Intensitätsverteilung des Beugungsbildes eines kreisförmigen Objektes (Gleichung 3.17) eingesetzt, ergibt sich der Wert 3,83. Dies ist gerade die erste Nullstelle der Besselfunktion, es muß nach dem Rayleigh'schen Auflösungskriterium also mindestens das zentrale Maximum des Beugungsbildes aufgenommen werden.

Besser ist, weitere Beugungsringe mitaufzunehmen:

Eine grobe Abschätzung der Besselfunktion J_1 für Werte X ungleich Null ist:

$$J_1(X) = \sqrt{\frac{2}{\pi X}} \cos\left(X - \frac{3\pi}{4}\right). \quad 3.31$$

Für den m -ten Beugungsring (m -tes Maximum) gilt:

$$X - \frac{3\pi}{4} = \left(m + \frac{1}{4}\right)\pi. \quad 3.32$$

Wird X durch das Argument der Intensitätsverteilung ersetzt, ergibt sich für den Zusammenhang der minimalen Apertur mit dem m -ten aufzunehmenden Beugungsring:

$$2r'_{\min} = \frac{(1+m)\lambda_0 |z_0|}{a}. \quad 3.33$$

Die genaue Betrachtung der Intensitätsverteilung (Gleichung 3.17, Abbildung 3.5) zeigt, daß die Besselfunktion lediglich die Einhüllende der Intensitätsverteilung darstellt. Um die feine Struktur der Ringe des Beugungsbildes zu be-

rücksichtigen, kann das Argument des Sinusters auf der rechten Seite von Gleichung 3.17 benutzt werden. Für den Unterschied 2π zwischen dem Argument des Sinusters des n-ten und des n+1-ten Ring gilt:

$$2\pi = \frac{\pi r'_{n+1}{}^2}{\lambda_0 m_0 |z_0|} - \frac{\pi r'_n{}^2}{\lambda_0 m_0 |z_0|}. \quad 3.34$$

Dies kann für wenig verschiedene r'_{n+1} und r'_n genähert werden:

$$r'_{n+1}{}^2 - r'_n{}^2 \approx 2r' \Delta r' = 2\lambda_0 m_0 |z_0|. \quad 3.35$$

Mit Gleichung 3.28 folgt für $\Delta r'$:

$$\Delta r' = \frac{2a m_0}{(1+m)}. \quad 3.36$$

Wird die Aufzeichnung bis zum dritten Maximum ($m=3$) als ausreichend betrachtet, ergibt sich:

$$\Delta r' = \frac{a m_0}{2}. \quad 3.37$$

Die Frequenz $\frac{2}{a m_0}$ muß also vom Film aufgelöst werden.

Nach dem Samplingtheorem sollte die Abtastfrequenz zweimal oder besser viermal höher sein. Damit ergibt sich für den Film eine Auflösung von $\frac{8}{a m_0}$.

Mit einem Parallelstrahl ($m_0 = 1$) wird für ein $5 \mu\text{m}$ Objekt eine Auflösung von 3200 Linien/mm benötigt.

Das Filmmaterial AGFA 8E75 HD hat nach Herstellerangaben eine Auflösung von 5000 Linien/mm. Es ließe sich also theoretisch ein Objekt von $1,6 \mu\text{m}$ auflösen.

3.3.5 Minimalauflösung

Entsprechend dem oben angeführten kann nach dem Rayleigh'schen Auslöschungslimit auch die minimale rekonstruierbare Objektgröße bei einer vorgegebenen Hologrammapertur angegeben werden (vgl. Gleichung 3.24):

$$a'_{\min} = \frac{3,83 l_c z_c M_c}{\pi r'} = \frac{1,22 l_c z_c M_c}{r'}, \quad 3.38$$

mit a'_{\min} Radius des minimal aufzulösenden Objektes.

Beim HODAR wird mit einem He-Ne-Laser ($\lambda_c = 632 \text{ nm}$) rekonstruiert. Die maximale Länge der Rekonstruktionsapparatur ist $z_c = 3,5 \text{ m}$ und die maximale Apertur des Hologramms $2r' = 80 \text{ mm}$, da nur ein Teil des Hologramms mit 80 mm Durchmesser beleuchtet wird.

Damit ergibt sich eine Minimalgröße der Objekte:

$$a'_{\min} = \frac{1,22 * 632\text{nm} * 3,5\text{m} * 2}{80\text{mm}} = 67,4\mu\text{m}.$$

Bei maximaler Entfernung von 12 m läßt sich noch ein Objekt mit 67,4 μm Radius theoretisch auflösen. Dies ist zwar die Größe eines Wolkentröpfchens, aber diese Auflösung ist ausreichend, da in dieser Arbeit große Hydrometeore ab einer Größe von 100 μm Radius aufgenommen werden sollen. Kleinere Objekte sind auch zahlreicher, so daß die kleine Version des HODAR ausreicht. Für dieses gibt Borrmann (1991) für den Objektradius eine untere Grenze von 3 μm an.

3.3.6 Speckle

Die kohärente Beleuchtung, die für die Holographie verwendet werden muß, verursacht aufgrund verschiedener Streuzentren, wie z.B. minimale Oberflächenrauigkeiten der Optik, ein Fleckenmuster, das als Speckle bekannt ist. Diese Speckle machen sich bei der Betrachtung und Auswertung der Hologramme störend bemerkbar. Denn dadurch entsteht ein ungleichmäßiger, mit hellen Flecken übersäter Hintergrund. In Abbildung 3.6 ist dieser auch zu sehen.

Nach D. Gabor (1970) kann die minimale Größe des Speckle σ_S bestimmt werden:

$$\sigma_S = \frac{\lambda_c z_c}{r'}, \tag{3.39}$$

wobei hier r' den Radius der beleuchteten Fläche des Hologramms, also der Apertur, bedeutet, λ_c die Rekonstruktionswellenlänge und z_c den Abstand vom Hologramm. Für das große Volumen dieser Arbeit ergibt sich mit $r' = 40\text{ mm}$, $\lambda_c = 632,8\text{ nm}$ und $z_c = 3,5\text{ m}$ als maximalen Abstand vom Hologramm: $\sigma_S = 55,37\ \mu\text{m}$.

Dies ist die Größe eines Wolkentröpfchens und in der Nähe der Größe der kleinsten Meßobjekte.

Für das kleine Volumen der Apparatur sinkt dieser Wert auf $\sigma_S = 4,7\ \mu\text{m}$, da bei sonst gleichen Abmessungen der maximale Abstand nur etwa 30 cm beträgt.

3.3.7 Aufnahmebereich

Da sich bei Rekonstruktion eines Hologramms der In-line-Technik die beiden entstehenden Bilder überlagern, sollte der minimale Abstand z_0 (Objekt - Photoplatte) einige Fernfeldlängen δ betragen. Die Fernfeldlänge δ kann bestimmt werden aus dem Grenzfall der Gleichheit in der Fraunhofer Bedingung:

$$\delta \gg \frac{d^2}{\lambda_0}, \tag{3.40}$$

mit der Objektgröße d . Für ein rundes Objekt gilt $d = 2 a$ mit Objektradius a .

HOLOGRAPHISCHE METHODE

Die praktische Erfahrung zeigt jedoch, daß für die Partikelholographie schon eine Fernfeldlänge δ oder auch Bruchteile davon einen ausreichenden Abstand darstellen können (Vikram, 1992). Für die kleinen Teilchen ist die Fraunhofer Bedingung fast immer erfüllt und bei den größeren Teilchen spielt die Störung des (bei der Rekonstruktion gewünschten) reellen Bildes durch das virtuelle Bild nur eine untergeordnete Rolle, so daß schon Bruchteile ausreichen, denn das Objekt läßt sich auch aus dem Nahfeld rekonstruieren.

Mit $\lambda_0 = 694,3$ nm ergibt sich für die Fernfeldlänge δ für einen Regentropfen ($d = 1$ mm):

$$\delta = \frac{1 \cdot 10^{-6}}{693,4 \cdot 10^{-9}} \text{ m} = 1,44 \text{ m}.$$

Für ein $100 \mu\text{m}$ Tröpfchen beträgt die Fernfeldlänge $\delta = 1,44$ cm und für ein $500 \mu\text{m}$ Tröpfchen ist $\delta = 36$ cm.

Die Maximalentfernung, aus der noch aufgenommen werden kann, kann nicht so einfach berechnet werden, da in der Praxis doch zu viele Faktoren eine Rolle spielen. Die Erfahrung zeigt, daß 100 Fernfelder mit einem Parallelstrahl durchaus brauchbar abgebildet werden können (Thomson, 1967). Für kleine Objekte wurden auch schon 2800 Fernfelder erfolgreich aufgenommen. Für Regentropfen ($\delta = 1,44$ m) sind 100 Fernfelder 144 m!

Diese Entfernung wird mit dem HODAR für große Hydrometeore nicht überschritten und kleinere Objekte ($100 \mu\text{m}$) sind zahlreicher vorhanden, so daß eine mögliche Einschränkung des Aufnahmebereichs ($1,44$ m) kein Hindernis darstellt. Sind in der Atmosphäre die kleinen Teilchen sehr zahlreich, ist die Sicht ohnehin so weit eingeschränkt, daß nur das kleine Volumen aufgenommen werden kann, da durch das große Volumen keine 80 % des Lichtes die Kamera ungestreut erreichen. Diese 80% sind aber notwendig, um einen Referenzstrahl und eine ausreichende Schwärzung des Photomaterials zu gewährleisten (Trolinger, 1975).

3.3.8 Filmformat

Das Format des holographischen Filmes stellt die maximale Apertur des Hologramms dar. Diese wächst nach Gleichung 3.28 mit der Entfernung des Objekts von Film und der Anzahl der aufzuzeichnenden Beugungsmaxima. Wird die Entfernung in Vielfachen N der Fernfeldlänge δ (Gleichung 3.35) angesetzt und in Gleichung 3.28 eingesetzt, liefert dies die minimale Größe für das Filmmaterial $2r'_{\min}$:

$$2r'_{\min} = 2(1+m)Nd \quad . \quad 3.41$$

Für die Aufnahme von drei Seitenmaxima ($m=3$), ergibt sich:

$$2r'_{\min} = 8Nd \quad . \quad 3.42$$

HOLOGRAPHISCHE METHODE

Bei verschiedenen großen Objekten sollte die minimale Filmbreite nach Vikram (1992, Kapitel 4.4) entweder:

- mit N gleich der größten Anzahl Fernfelder der kleinsten Objekte oder
- der kleinsten Anzahl Fernfelder der größten Objekte bestimmt werden.

Die maximale Länge des HODAR - Meßvolumens beträgt 14 m. Mit den im vorangegangenen Kapitel bestimmten Fernfeldlängen ist das minimale Filmformat $2r'_{\min}$ für 1 mm große Objekte 80 mm, für 500 μm große Objekte 160 mm und für 100 μm große Objekte 800 mm groß.

Durch die Verwendung einer Verkleinerungslinse wird jedoch das effektive Filmformat der Photoplatte (100 mm Durchmesser) auf 200 mm Durchmesser vergrößert, so daß mit dem hier beschriebenen Aufbau 14 m entfernte 400 μm große Objekte noch mit drei Seitenmaxima aufgezeichnet werden können.

3.3.9 Laserkohärenz

Die Kohärenzlänge des verwendeten Rubinlaserlichtes beträgt maximal die von ihm während der Pulsdauer zurückgelegte Strecke, das sind $30 \text{ ns} \cdot 300000 \text{ km/s} = 9 \text{ m}$. Selbst im schlechtesten Fall hat der hier verwendete Laser noch eine Kohärenzlänge von 1 m (Herstellerangabe). Die In-line-Technik stellt aber keine so hohe Anforderung: Der größte Gangunterschied Δs zwischen zwei Teilstrahlen tritt bei der In-line-Technik auf, wenn das Teilchen sich direkt vor der Photoplatte befindet und das Licht senkrecht zur Strahlrichtung streut (Abbildung 3.12). Deshalb ist der größte Gangunterschied Δs gleich dem maximalen Durchmesser der Photoplatte, der hier 10 cm beträgt, also noch weit weniger als die minimale Kohärenzlänge des Lasers.

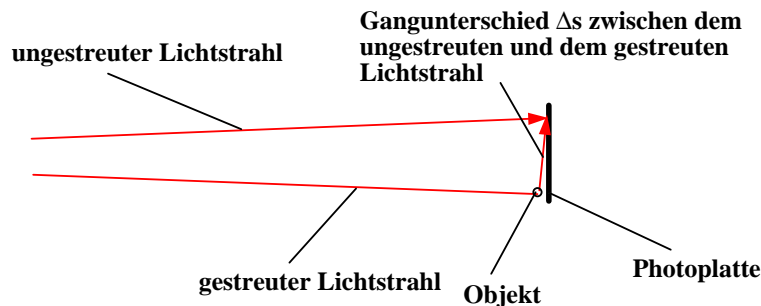


Abbildung 3.12: Der maximale Gangunterschied des Lichtes im In-line-aufbau entspricht dem Durchmesser des Strahls an der Photoplatte.

3.3.10 Probleme dieses Meßverfahrens

Die In-line-Holographie als Meßverfahren hat einige prinzipielle Probleme, die hier angesprochen werden sollen.

1. Bedingt durch die Beleuchtung im Durchlicht, läßt sich nur der Umriß der Objekte im Raum aufzeichnen, ähnlich einer Gegenlichtaufnahme, die nur den Umriß einer Person zeigt. Dies macht eine Verwechslung von prolaten und oblaten Formen möglich, da nur zwei Achsen eines Ellipsoides bestimmt werden können. Regentropfen sind jedoch im allgemeinen rotations-symmetrisch bezüglich einer vertikalen oder fast vertikalen Achse, so daß dieser Fehler hier mit hoher Wahrscheinlichkeit auszuschließen ist.
2. Bei der Rekonstruktion eines Hologramms entstehen zwei Bilder, ein reelles und ein virtuelles Bild. Diese beiden liegen im Fall der In-line-Holographie hintereinander, so daß das eine vor dem Hintergrund des anderen unfokussierten Bildes betrachtet werden muß. Werden große Objekte in geringem Abstand zur Hologrammplatte aufgenommen, überlagern sich beide Bilder sehr stark. Im Falle kleiner Aerosolteilchen oder Hydrometeore spielt dies allerdings keine Rolle da diese im Verhältnis zu ihrer Größe immer weit von der Platte entfernt sind. Bei Regentropfen stimmt dies im großen ganzen auch noch, die Überlagerung der Bilder führt hier aber schon zu einer Kontrastreduktion, da das Beugungsbild eines Regentropfens schon sehr weit sichtbar bleibt. Die Sichtbarkeitslänge sei hier definiert als die Entfernung vom fokussierten Tropfenbild, in der das Beugungsbild gerade keinen ausreichenden Kontrast zum Hintergrund hat und daher nicht mehr sichtbar ist. Sie ist abhängig von der Größe der Objekte. Aus den Hologrammen wurde experimentell die Sichtbarkeit für unterschiedlich große Tropfen ermittelt (Tabelle 3.1).

Tropfendurchmesser	Sichtbarkeitslänge
100 µm	20 cm
300 µm	60 cm
600 µm	>3 m
1mm	>3 m

Tabelle 3.1: Das Beugungsmuster eines holographischen Tropfenbildes verliert sich mit zunehmendem Abstand im Hintergrundspeckle. Der Abstand bis zum Verschwinden sei als Sichtbarkeitslänge bezeichnet. Hier sind einige mit dem HODAR experimentell gefundene Werte der Sichtbarkeit unterschiedlich großer Objekte eingetragen.

3. Beim In-line-Aufbau kann das Meßvolumen nur von einer Seite betrachtet werden. Dadurch ist eine Abschattung bzw. Abdeckung einzelner Tropfen durch andere möglich: Ein Aerosolpartikel oder Regentropfen, der mit In-line-Holographie abgelichtet wird, erzeugt nicht nur ein Bild des Tropfens

an der Stelle x_0 , sondern auch eine Beugungsfigur, die sowohl vor als auch nach dem Tropfen zu sehen ist. Diese stört die Bilder anderer, besonders aber kleiner Tropfen, so daß diese unter Umständen nicht mehr fokussierbar sind oder gar nicht mehr abgebildet werden, falls sie komplett verdeckt sind. Das Beugungsbild entspricht in ausreichender Entfernung einer Kegelschar heller und dunkler Zonen, die mit zunehmendem Abstand an Kontrast und damit an Einfluß auf die Umgebung verlieren. In einer groben Abschätzung ist das eigentlich kegelförmige Beugungsbild ein Zylinder mit $2d$ Durchmesser und kompletter Länge des Probevolumens. Jedes Teilchen deckt dann den Bruchteil $A_T = \pi \cdot d^2 / A$ der Hologrammfläche $A = \pi \cdot D^2$ ab. Bei einem Objektdurchmesser $d = 2$ mm und einem Hologrammdurchmesser von $D = 20$ cm ergibt sich $A_T = 1/20000$. Das heißt die Wahrscheinlichkeit P_2 , daß das zweite Teilchen hinter dem Ersten liegt, ist $1/20000$.

Die Wahrscheinlichkeit P_{n+1} , daß erst das $n+1$ -te Teilchen abgedeckt ist, ergibt sich als Produkt aus dem Bruchteil der bereits bedeckten Fläche und dem Komplement der Wahrscheinlichkeit P_n , d. h. daß das n -te Teilchen nicht bedeckt ist:

$$P_{n+1} = \frac{nA_T}{A} (1 - P_n)$$

3.43

oder in nicht rekursiver Darstellung:

$$P_{n+1} = \sum_{k=1}^n \binom{n}{k} \left(\frac{A_T}{A} \right)^k (-1)^{k-1}$$

$$P_{n+1} = \frac{nA_T}{A} - n(n-1) \left(\frac{A_T}{A} \right)^2 + n(n-1)(n-2) \left(\frac{A_T}{A} \right)^3 - \dots$$

3.44

Wenn der Bruchteil $\frac{A_T}{A}$ sehr klein ist, kann schon der quadratische Term vernachlässigt werden. Bei 300 zufällig verteilten Teilchen mit 2 mm Durchmesser ergibt sich die Wahrscheinlichkeit P_{301} , daß das 301. Teilchen verdeckt ist, zu $300/20000$. Das sind 1,5 %. Es kann daher angenommen werden, daß bei 300 gefundenen Teilchen 1,5% verdeckt waren und deshalb nicht gezählt wurden.

4 AUFBAU DES HODAR

Gemäß den im vorangegangenen Kapitel formulierten Forderungen an ein holographisches System zur Aufnahme von Regen- oder Schneefällen werden die Details der beiden Teile des HODAR, der Aufnahmeapparatur und der Rekonstruktionsanlage, beschrieben und ihre funktionellen Notwendigkeiten erörtert.

4.1 Aufnahmeapparatur

In-situ-Aufnahmen von Regentropfen und Schneeflocken stellen gewisse Anforderungen an die Apparatur:

- Die Apparatur muß wetterfest und regendicht sein, denn die Meßbedingungen sind strömender Regen, Schneefall und auch Temperaturen unter 0° C.
- Die Apparatur sollte an verschiedenen Meßorten einsetzbar sein.
- Wie jede Meßanordnung sollte die Apparatur die Meßobjekte nicht beeinflussen und möglichst wenig Einfluß auf die Umgebung haben.
- Da sich die Windverhältnisse direkt am Boden sehr stark ändern, sollte sie so weit wie möglich vom Boden entfernt sein.

Weiterhin sollen auch Aufnahmen mit dem kleinen Volumen entsprechend der Vorgängerapparatur aufgenommen werden können und die vorhandene Rekonstruktionsanlage sollte möglichst für beide Aufnahmeapparaturen verwendet werden können.

Die bereits von Borrmann (1991) erstellte Apparatur zur Aufnahme von Nebel- und Wolkentröpfchen erfüllt die wesentlichen Anforderungen der Meßumgebung. Auch zeigten Strömungsrechnungen von Külzer (1995), daß die Luftströmung bei Queranströmung der Apparatur mit Geschwindigkeiten unter 10 m/s nicht signifikant verändert wird.

Regentropfen folgen bei niedrigen Windgeschwindigkeiten nicht mehr der Strömung, so daß der Einfluß der Apparatur als Strömungshindernis für die Messung von Regentropfen vernachlässigt werden kann. Die Geschwindigkeit der Regentropfen ist so groß, daß kaum Zeit für Wärmeaustausch mit der direkten Umgebung der Apparatur bleibt, so daß ein thermischer Einfluß der Apparatur nicht erwartet wird. Darüber hinaus liegt der größte Teil des Meßvolumens sehr weit von der Apparatur entfernt.

Abbildung 4.1 zeigt ein Foto der realen Apparatur auf dem Kleinen Feldberg im Taunus. Das Foto ist von der Meßplattform des Frankfurter Taunusobservatoriums in Richtung Norden aufgenommen. Im Vordergrund ist der fahrbare Container zu sehen, aus dem auf Schienen ein Wagen herausgefahren werden

AUFBAU DES HODAR

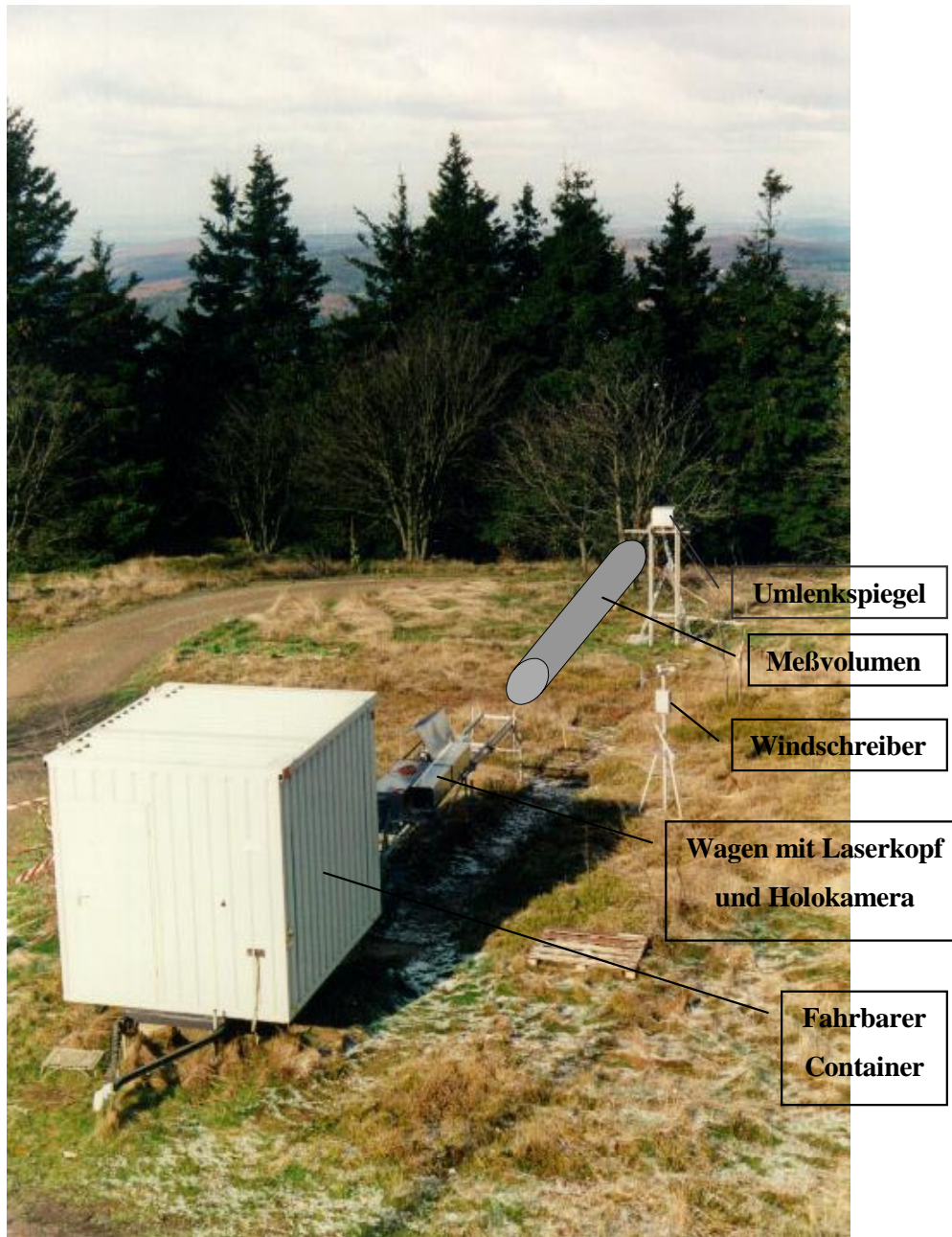


Abbildung 4.1: Die Aufnahmeapparatur auf dem Kleinen Feldberg im Taunus.

kann (im Mittelgrund des Bildes). Dieser Wagen beinhaltet den Laserkopf in einer Aluminiumbox (links hinten am Wagen, die davor angeordnete Strahlaufweitung ist gerade aufgeklappt). Auf der rechten Seite des Wagens befindet sich die Kamera für das große Volumen. Ein Umlenkspiegel, der den Laserstrahl faltet, ist in dem Gestell im Hintergrund angebracht. Der Dreibein rechts im Mittelgrund trägt einen Windschreiber, der die Windverhältnisse direkt am Meßvolumen aufzeichnet.

Die Aufnahmeapparatur besteht im Kern aus einem Rubinlaser, der Strahlaufweitung, einem Umlenkspiegel und der Hologrammkamera. Abbildung 4.2 gibt einen Überblick über die Details der Anordnung.

AUFBAU DES HODAR

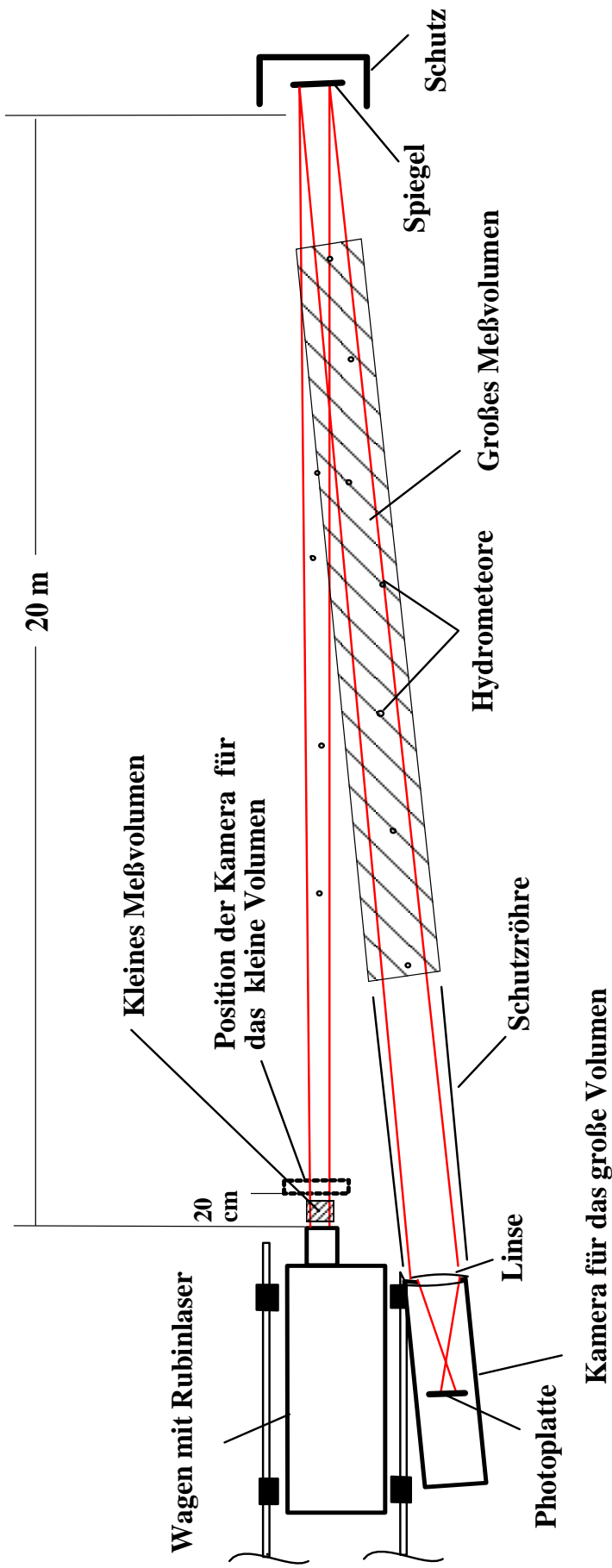


Abbildung 4.2: Schema des Aufbaus der Aufnahmeapparatur des HODAR. Das kleine und das große Meßvolumen des HODAR sind schraffiert hervorgehoben.

AUFBAU DES HODAR

4.1.1 Container

Die Hauptteile der Aufnahmeapparatur mit dem Rubinlaser wurden in einem fahrbaren Container untergebracht, um die Apparatur mobil zu halten. Der Container dient auch der wettergeschützten Lagerung der äußeren Teile der Apparatur und kann als mobile Dunkelkammer vor Ort dem Wechsel der Photoplatten und deren Entwicklung dienen. Der Container muß beheizt werden, um das Eindringen von Feuchtigkeit und im Winter das Einfrieren des Kühlwassers des Rubinlasers zu verhindern. So stellt der Container eine Wärmequelle und wegen seiner großen Ausmaße auch ein wesentliches Strömungshindernis in der nächsten Umgebung des Meßvolumens dar. Um diese Beeinflussung zu minimieren, wurde schon von Borrmann (1991) der Laserkopf zusammen mit der Aufweitungsoptik in einem Wagen untergebracht, der auf Schienen 8 m aus dem Container herausgefahren werden kann (Abbildung 4.3). Dieser ist nur im hinteren Teil schwach beheizt, um den Laserkopf thermisch zu stabilisieren.



Abbildung 4.3: Der herausfahrbare Wagen mit dem Schutzgehäuse für den Laserkopf (rechts) und dem Gehäuse für die Aufweitungsoptik (links). Darin ist die 4-Stangenbank und der (weiße) Tubus zu sehen. Ganz links ist die Kamera für das kleine Volumen an den Wagen herangeklappt (hinter dem Tubus, unter der Plastikfolie).

4.1.2 Laser

Der Laser ist ein wassergekühlter gepulster Rubinlaser ($\lambda = 694,3 \text{ nm}$) Typ HLS1 der Firma JK Lumonics. Er ist über eine Pockelszelle gütegeschaltet und hat eine Energie von maximal 30 mJ pro Puls bei einer Pulsdauer von 30 ns. Zwei Etalons sorgen für reinen TEM₀₀ Betrieb. Dies gewährleistet räumliche Kohärenz über das gesamte Strahlprofil. Die Kohärenzlänge des Lasers beträgt mehr als einen Meter. Invarstäbe stabilisieren den Resonator und die Etalons sind auch durch das Kühlwasser temperiert, so daß der Laser mechanisch und thermisch sehr stabil ist. Von diesem Laser können auch Doppelpulse von je 15 mJ mit 1 bis 800 μs zeitlichem Abstand abgegeben werden. Weitere Details finden sich bei Borrmann (1991), Borrmann und Jaenicke (1993).

4.1.3 Aufweitungsoptik

Die Aufweitungsoptik konnte in ihrer bisherigen Form (Borrmann, 1991) beibehalten werden, kann doch durch Dejustieren deren Galilei-Teleskopaufbaus eine leichte Divergenz des Strahls erreicht werden (Abbildung 4.4). Sie weitet den Laserstrahl auf einen Durchmesser von 8 cm auf und besteht aus einer zerstreuen Eingangslinse ($f = -16 \text{ mm}$, $\varnothing = 5 \text{ mm}$) und einer sammelnden Ausgangslinse ($f = 600 \text{ mm}$, $\varnothing = 100 \text{ mm}$), um die Belastung der Optiken durch die hohe Pulsleistung gering zu halten.

Der mechanische Aufbau besteht aus einer 4-Stangenmechanik (Makrobank der Fa. Spindler und Hoyer). An ihrem Ende ist ein 60 cm langer Tubus angeordnet, der störende Reflexe von der Sammellinse ausblendet und das Eindringen von Regen und die Deposition von Tröpfchen auf der Sammellinse verhindert. 30 cm hinter diesem Tubus befindet sich die Kamera für das kleine Volumen, die für großvolumige Aufnahmen entfernt werden kann.

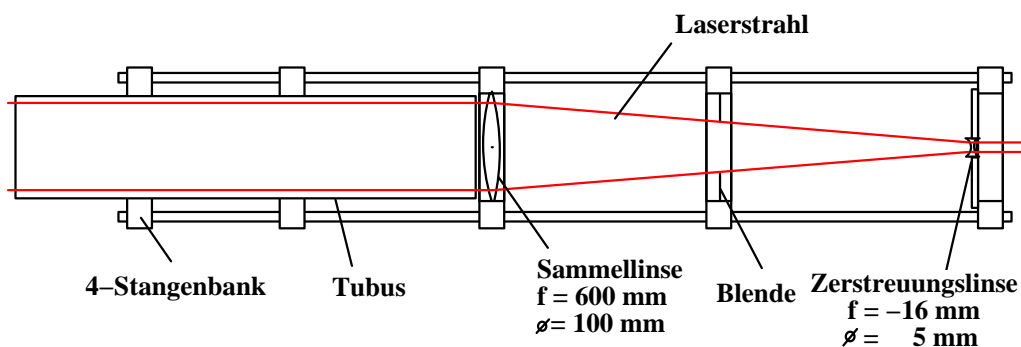


Abbildung 4.4: Die Aufweitungsoptik besteht aus einer Zerstreuungslinse (rechts) und einer Sammellinse (links) in einer 4-Stangenbank. Der Tubus am linken Ende verhindert die Deposition von Tröpfchen auf der Sammellinse und blendet störende Reflexe aus.

4.1.4 Umlenkspiegel

Von der Aufweitungsoptik erreicht der Laserstrahl nach 20 m den Umlenkspiegel (Abbildung 4.5). Dieser ist auf einem Gestell in einer Aluminiumbox untergebracht. Zwei nach oben klappende Deckel dienen als Schlagregenschutz und machen den Spiegel von vorne für den optischen Strahlengang und von hinten für die Justage zugänglich.



Abbildung 4.5: Der Umlenkspiegel ist in einem Aluminiumkasten mit aufstellbaren Deckeln auf einem Gestell mit Schraubfüßen angebracht. So läßt er sich leicht an den Aufstellort anpassen und in der Höhe einjustieren.

AUFBAU DES HODAR

Der Spiegel selbst ist ein oberflächenbeschichteter Spiegel mit 150 mm Durchmesser und einer Planität besser als 2λ (Fa. Spindler und Hoyer), um Vielfachreflexionen und damit Interferenzstreifen auf dem Hologrammhintergrund zu verhindern. Um den Spiegel justieren zu können, ist dieser dreh- und kippbar gelagert und diese Halterung auf einer Dreikantschiene horizontal verschiebbar (Abbildung 4.6). Das gesamte Gestell kann mit Schraubfüßen in der Höhe verstellbar werden.

Damit möglichst wenig Staub und Feuchtigkeit auf den Spiegel gelangen, ist vor dem Spiegel ein elektromagnetischer Verschluss angebracht, der zeitgleich mit dem Kamerverschluss und dem Laserblitz öffnet und so den Spiegel nur kurze Zeit frei gibt. Deshalb ist ein kleiner Justierspiegel vor dem Verschluss angeordnet, der zur Seite weggeschoben werden kann. Weiterhin ist der Spiegel durch eine Heizmatte von hinten beheizt, so daß keine Feuchtigkeit auf ihm kondensieren kann.

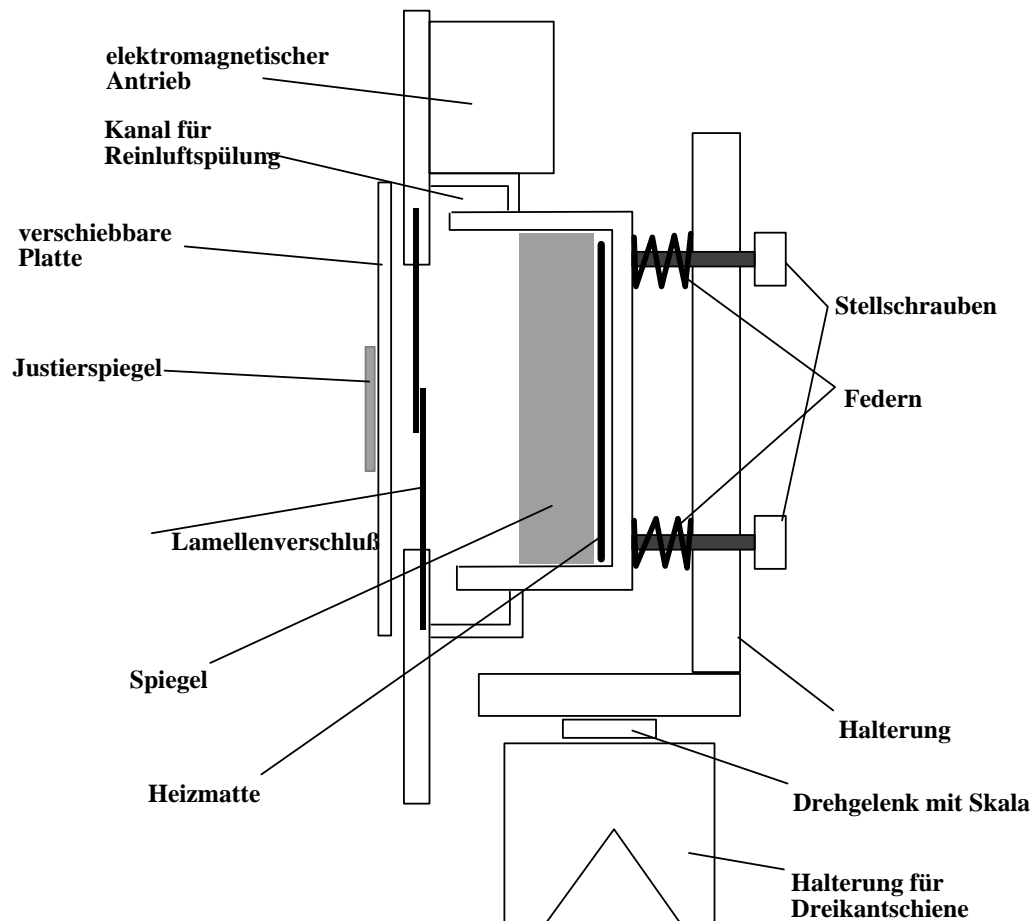


Abbildung 4.6: Der Umlenkspiegel ist dreh- und kippbar gelagert und durch einen elektromagnetischen Verschluss gegen Staub und Feuchtigkeit geschützt. Zusätzlich ist er von hinten beheizt, um Kondensation auf seiner Oberfläche zu verhindern.

4.1.5 Holokameras

Die Kamera für das kleine Volumen (Abbildung 4.3 ganz links) besteht aus einem lichtdichten Gehäuse mit einem elektromagnetischen Verschuß von 100 mm Durchmesser, hinter dem ein Tageslichtfilter (Rotfilter) und die Photoplatte ihren Platz finden. Sie ist detailliert in Borrmann (1991) beschrieben.

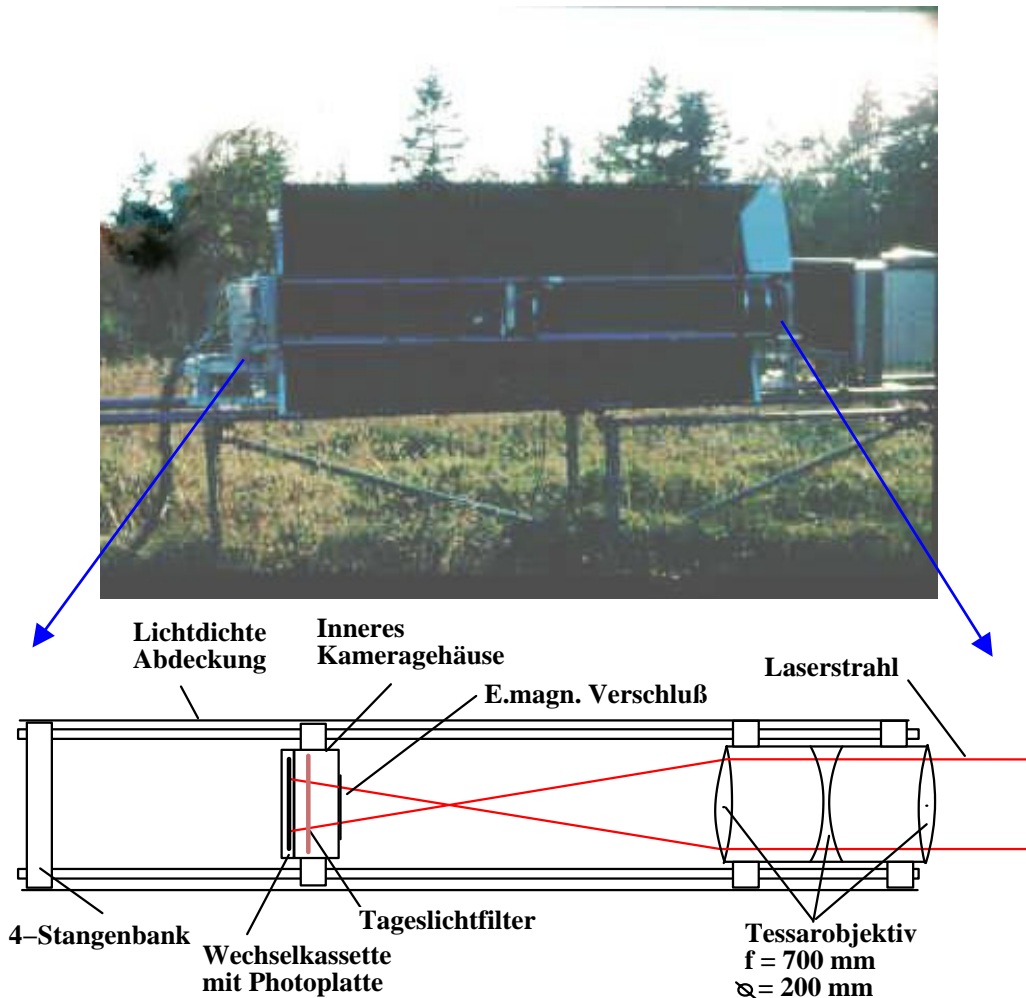


Abbildung 4.7: Die Kamera für das große Volumen des HODAR ist an der linken Seite des Wagens für den Laserkopf befestigt und kann mit diesem in den Container zurückgeschoben werden.

Die Kamera für das große Volumen ist an der linken Seite des Wagens für den Laserkopf angeordnet (Abbildung 4.7). Sie besteht aus einer großen 4-Stangenbank, die die optischen Elemente trägt und lichtdicht verkleidet ist. Diese Verkleidung läßt sich nach unten aufklappen und läßt eine Justage der Optik auch bei Regen zu. Um optimalen Zugang zu haben, wenn eine Komplettjustage oder der Ausbau eines Teiles nötig ist, können die anderen Seiten vollständig nach oben weggeklappt werden.

Ganz vorne ist eine Öffnung, in die das Objektiv eingesetzt ist. Dieses läßt sich mit sechs Schrauben seitlich verschieben und auch leicht verkippen, so daß es genau auf die Achse der optischen Bank einjustierbar ist. Am anderen Ende der

AUFBAU DES HODAR

Bank sitzt die Plattenhalterung, in der eine herausziehbare lichtdichte Metallkassette die Fotoplatte hält. Vor dieser kann der Tageslichtfilter eingeschoben werden. Der elektromagnetische Verschluss ist zwischen der Fotoplatte und dem Objektiv angeordnet.

Die Fotoplatte sitzt in der Metallkassette in einer Art Schublade exakt positioniert und läßt sich mit dieser in eine Dunkelkammer (Container) transportieren und leicht im Dunkeln wechseln (Abbildung 4.8). Dazu wird mit etwas Übung weniger als eine Minute benötigt.

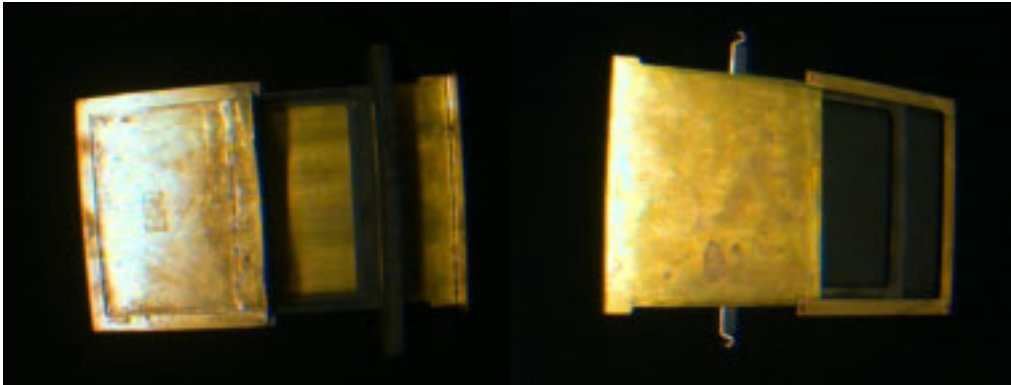


Abbildung 4.8: Die Fotoplatte wird mit einer lichtdichten Metallkassette in die Kamera eingeschoben. In dieser kann sie zum Wechseln in eine Dunkelkammer transportiert werden.

4.1.6 Objektiv der Kamera für das große Meßvolumen

Um das Meßvolumen im Labor rekonstruieren zu können, muß es verkleinert aufgenommen werden. Dies wird wie bei einem normalen Fotoapparat mit einer Linse erreicht, die das holographische Interferenzmuster verkleinert auf die Fotoplatte abbildet. Für einen In-line-aufbau mit parallelem Strahl muß diese Linse mindestens den Durchmesser des Meßvolumens haben (Abbildung 3.10). Bei einem großen Meßvolumen muß sie also sehr groß sein. Ein großes Tessarobjektiv (200 mm Apertur, 700 mm Brennweite) der Firma Leitz (Wetzlar) das in einem Epidiaskop verwendet wurde, stand zur Verfügung. Tessarobjektive von Epidiaskopen sind für eine hohe Lichtstärke und ein großes Bildfeld konstruiert. Dieser Objektivtyp zeichnet sich durch eine geringe Bildfeldwölbung über einen möglichst großen Blickwinkel aus (Flügge, 1955). Bei der Hologrammaufnahme muß das ebene Interferenzmuster möglichst unverzerrt auf die Fotoplatte abgebildet werden, damit im rekonstruierten Hologramm Größe und Lage der Objekte korrekt wiedergefunden werden können. Dies entspricht dem ursprünglichen Zweck eines Tessars, ein ebenes Objekt (Buchseite) möglichst verzerrungsfrei auf eine Projektionswand abzubilden. Daher erschien das Tessarobjektiv mit seinen optischen Daten für Aufbau einer Holokamera geeignet. Da seine Abbildungstreue für das HODAR sehr wichtig ist, wurde es einem Test unterzogen, der in Abschnitt 5.1.1 beschrieben ist.

Bei der Verwendung einer abbildenden Linse für die Aufnahme von Hologrammen mit Hydrometeoriten tritt folgendes Problem auf (Abbildung 4.9): Bei der Rekonstruktion eines Hologramms entstehen zwei Bilder, ein reelles und

AUFBAU DES HODAR

ein virtuelles Bild (Abbildung 3.5). Befinden sich Hydrometeore vor der Objektebene der Abbildungslinse, werden die Bilder dieser im spiegelgleichen Abstand sowohl vor als auch hinter der Hologrammplatte rekonstruiert. Für Hydrometeore hinter der Objektebene gilt dies entsprechend. Befinden sich Hydrometeore vor und hinter der Objektebene, ist es bei der Rekonstruktion nicht mehr möglich, zu entscheiden, ob sich der jeweilige Hydrometeor vor oder hinter der Objektebene befunden hat. Deshalb wurde eine Schutzröhre zwischen der Linse und der Objektebene angebracht, die verhindert, daß Hydrometeore in diesen Zwischenraum gelangen. Somit müssen sich alle Objekte vor der Abbildungsebene befinden haben (Abbildung 4.2).

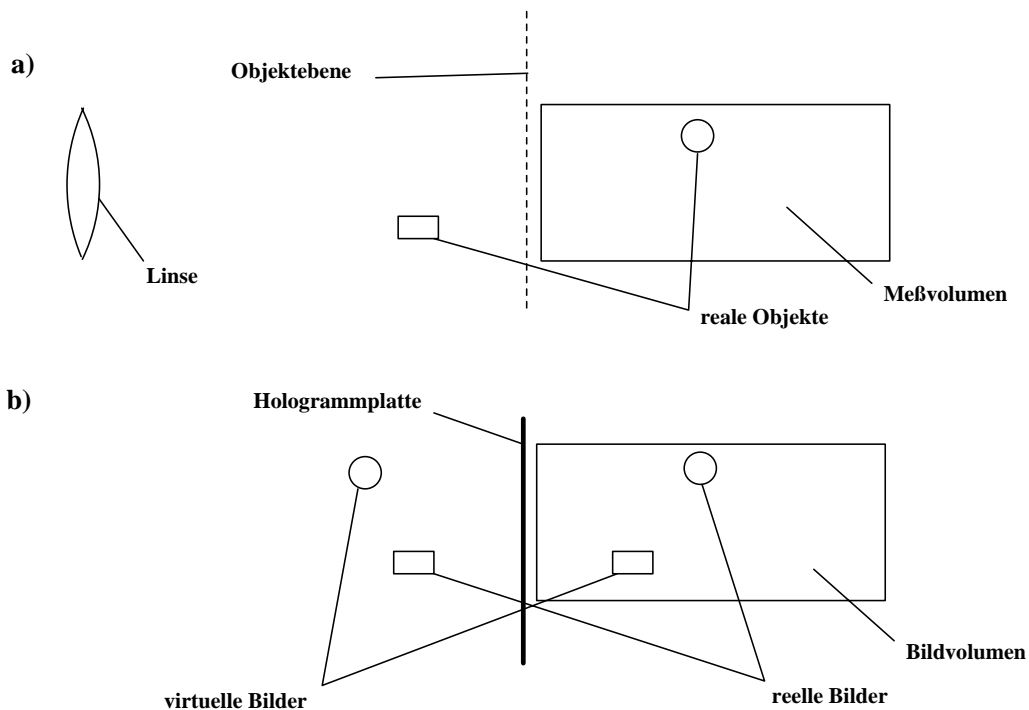


Abbildung 4.9: Mehrdeutigkeit durch Benutzung einer Linse zur Abbildung des Meßvolumens. a) die Verhältnisse bei der Aufnahme, b) die Verhältnisse bei der Rekonstruktion des Hologramms. Das Viereckige Objekt befindet sich in der Originalszene vor der Objektebene der Linse, das runde Objekt dahinter. Bei der Rekonstruktion sind beiden keine eindeutigen Positionen mehr zuzuordnen.

4.1.7 Meßvolumen

Wie in Abschnitt 3.3.1 dargestellt, führt parallele Beleuchtung des Meßvolumens bei der Hologrammaufnahme zu einem von der Objektposition unabhängigen Abbildungsmaßstab.

Diese parallele Beleuchtung würde aber in der Praxis eine Austrittslinse der Strahlaufweitung erfordern, die genauso groß ist wie die Eintrittslinse der Kamera. Da Linsen mit 20 cm Durchmesser eine hohe Aberration haben und deshalb teuer korrigiert werden müssen, wurde hier ein anderer Weg gewählt: Das Meßvolumen des HODAR wird quasiparallel beleuchtet, d. h. der Laserstrahl ist leicht divergent. Somit wird nur eine große Linse in der Kamera benötigt.

AUFBAU DES HODAR

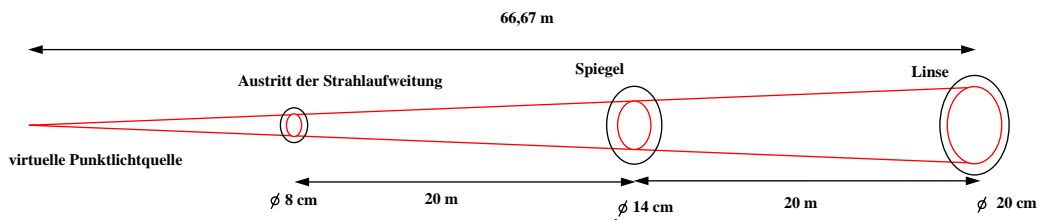


Abbildung 4.10: Das große Meßvolumen des HODAR ist genau betrachtet ein Konus.

Daher ist das Meßvolumen des HODAR genau betrachtet ein Konus (Abbildung 4.10). Dieser hat einen kleinen Durchmesser von 8 cm, einen großen Durchmesser von 20 cm und eine Länge von 40 Meter. Durch die leichte Divergenz des Laserstrahls entsteht ein endlicher Abstand der Lichtquelle des HODAR von 66,67 m. Der Öffnungswinkel α beträgt nur:

$$\alpha = 2 \arctan\left(\frac{10 \text{ cm}}{66,67 \text{ m}}\right) = 0,17^\circ = 3 \text{ mrad} . \quad 4.1$$

Da das Volumen konisch ist, werden weit entfernte Tropfen etwas vergrößert. Mit der Abbildungsgleichung 3.20 (Abbildung 3.10):

$$M_c = \frac{m_H}{1 - \frac{m_H^2 z_0}{z_c} - \frac{z_0}{z_r}} , \quad 4.2$$

einer Vergrößerung durch die Linse von $m_H = 0,5$ und der Rekonstruktion mit einem Parallelstrahl ($z_c = \infty$) ergibt sich damit ein Abbildungsmaßstab von:

$$M_c = \frac{0,5}{1 - \frac{z_0}{66,67 \text{ m}}} , \quad 4.3$$

mit der Objektentfernung z_0 in m.

Für eine maximalen Entfernung der Tropfen von 14 m ergibt sich eine Vergrößerung M_c :

$$M_c = \frac{0,5}{1 - \frac{14 \text{ m}}{66,67 \text{ m}}} = 0,63, \quad 4.4$$

anstelle einer Vergrößerung von 0,5 für den parallelen Fall. Das entspricht einem maximalen Fehler von 26 %. Dieser Fehler wird im weiteren Divergenzfehler genannt.

4.2 Photochemische Entwicklung der Photoplatten

Für die Holographie wurden verschiedene spezielle Aufnahmematerialien entwickelt, Filme ebenso wie Platten. Der Hauptunterschied zu normalem Fotomaterial besteht in einer wesentlich höheren Auflösung des holographischen Materials zwischen 3000 und 5000 Linien pro mm. Die Materialien untereinander variieren in ihrer Empfindlichkeit und sind für verschiedene Laserwellenlängen optimiert.

Für diese Arbeit wurden AGFA 10E75NAHD Glasplatten verwendet, die besonders im roten Spektralbereich zwischen 600 und 800 nm empfindlich sind, da zur Aufnahme ein Rubinlaser mit rotem Licht der Wellenlänge 694,3 nm verwendet wird. Sie haben eine minimale Empfindlichkeit von $2 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ (Siehe auch Abschnitt 3.3.2).

Es wurde Glasplatten der Vorzug vor Film gegeben, da Platten viel einfacher zu handhaben sind als Film. Dieser verformt sich leicht, was zu Verzerrungen des Bildes führt und die Abbildungstreue verschlechtert. Um die Fehler zu minimieren, müssen nach Borrmann (1991) alle optischen Komponenten, insbesondere die Photoplatte auf 1° genau zur Strahlachse justiert werden. Dies ist mit Filmmaterial schwerlich zu erreichen.

Die Entwicklung der Hologrammplatten wird genauso durchgeführt wie die Entwicklung gewöhnlichen Fotomaterials. Da die hier verwendeten Photoplatten für rot empfindlich sind, muß im kompletten Dunkel oder aber in grünem Dunkelkammerlicht gearbeitet werden.

Die Energie des Rubinlasers variiert von Puls zu Puls und die Streuung an den atmosphärischen Teilchen ist bei jeder Aufnahme verschieden, so daß nicht einfach nach einer festgelegten Zeit entwickelt werden kann. Außerdem hängt die Entwicklungszeit von der Temperatur und dem Alter des Entwicklers ab. Um dennoch eine optimale Entwicklung zu erreichen, wird die Fotoplatte so lange unter leichtem Bewegen in AGFA Refinal Feinkornentwickler entwickelt, bis die Schwärzung der eines gut entwickelten Vergleichshologramms entspricht, etwa einer fotografischen Dichte von 0,5. Die Schwärzung sollte während des Entwickelns öfter kontrolliert werden, da zuerst wenig geschieht, dann aber die Schwärzung schnell zunimmt. Wird im kompletten Dunkel gearbeitet, kann dazu eine Unterlage aus phosphoreszierendem Papier benutzt werden, auf die das Vergleichshologramm und das zu entwickelnde gelegt wird.

Anschließend wurden die Hologramme für 2 min in destilliertem Wasser gewässert, um alle Reste des Entwicklers zu beseitigen. Danach wird das Hologramm mit Tetenal Universal Fixierer 5 min fixiert. Zum Schluß wird das fixierte Hologramm nochmals für 10 min in frischem destilliertem Wasser gewässert.

Die hier angefertigten Hologramme sind Transmissionshologramme, die nicht gebleicht werden müssen, so daß ein bei anderen Holographie-Techniken nötiges Bleichbad hier entfallen konnte. Abbildung 4.11 zeigt ein entwickeltes Hologramm in normalem Licht.

AUFBAU DES HODAR

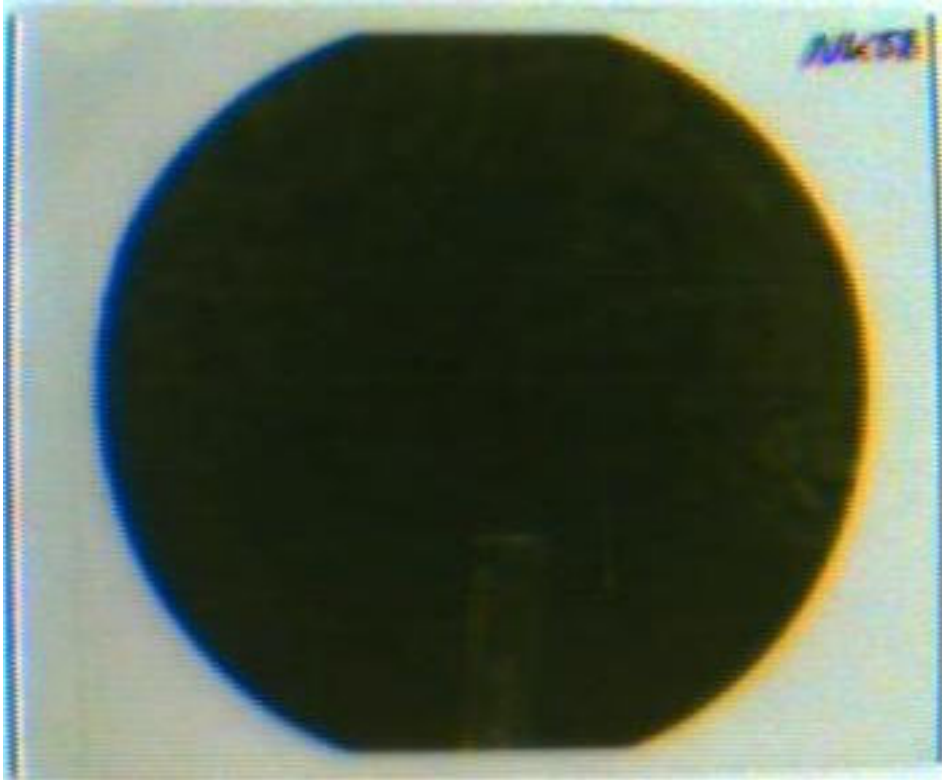


Abbildung 4.11: Foto eines entwickelten Hologramms.

Um Trockenränder zu vermeiden, wurden die Hologramme mit sauberer Preßluft trocken geblasen. Sie können auch mit einem Gummiwischer abgestreift werden.

Ganz wichtig bei der Entwicklung ist, genau zu wissen, auf welcher Seite der Glasplatte sich die Photoemulsion befindet und diese in den Fotoschalen nach oben zu drehen, sonst wird die Emulsion unweigerlich verkratzt und das Hologramm unbrauchbar. Um auch im völligen Dunkeln festzustellen, wo die Emulsion ist, kann die Ecke der Glasplatte vorsichtig zwischen die feuchten Lippen gebracht werden. Die Seite mit der Emulsion klebt leicht an einer Lippe an.

Um die fertig entwickelten Hologramme völlig trocknen zu lassen, werden diese am besten in eine der schwarzen Lieferboxen gestellt und abgedeckt, damit kein Staub auf der feuchten Emulsion kleben bleibt.

Eine digitale Aufzeichnung der Hologramme, die diesen Schritt abkürzen würde, ist aufgrund der hier benötigten hohen Auflösung und großen Apertur noch nicht möglich.

4.3 Rekonstruktionsapparatur

Im zweiten Schritt des Verfahrens wird das In-situ aufgenommene Hologramm mit einem CW-He-Ne-Laser optisch rekonstruiert, so daß das Bildvolumen mit einem Videosystem analysiert werden kann. Diese Analyse kann auch mehrmals mit unterschiedlichen Parametern wiederholt werden. Dies ist ein Vorteil gegenüber anderen Verfahren mit direkter Auswertung während der Messung.

Zur optischen Rekonstruktion des Hologrammes wird dieses mit einem aufgeweiteten Laserstrahl entsprechend dem Referenzstrahl der Aufnahme beleuchtet. Dadurch entsteht ein reelles Bildvolumen hinter dem Hologramm (Abbildung 3.5). Dieses Bildvolumen wird mit einer Videokamera abgetastet. Dazu gibt es zwei Möglichkeiten: entweder die Kamera wird durch das Bildvolumen bewegt oder das Hologramm und mit ihm das Bild wird gegenüber der Kamera verschoben. Hier wurden wegen des großen Bildvolumens beide Möglichkeiten kombiniert, während bei Borrmann (1991) die zweite Möglichkeit gewählt wurde. Abbildung 4.12 zeigt den Aufbau der Rekonstruktionsanlage des HODAR.

Der Laserstrahl des He-Ne-Lasers kann mit einem Graukeil abgeschwächt werden, wird dann raumgefiltert und aufgeweitet, um das Hologramm zu beleuchten. Das Hologramm ist auf einem Mikropositioniertisch in alle drei Raumrichtungen verschiebbar befestigt. Zusätzlich kann die Kamera auf einer optischen Bank in Richtung der optischen Achse verschoben werden, damit das gesamte Bildvolumen in mehreren Schritten mit Hilfe des Mikropositioniertisches abgetastet werden kann. Dieser wird von einem eigenen Mikroprozessor gesteuert und kann so das Volumen mit einem für diese Arbeit selbstgestellten Programms selbständig oder durch einen Computer kontrolliert abfahren. Das Videobild wird mit einer Framegrabberkarte in diesen Computer eingelesen und kann dort vermessen werden. Das Bildauswerteprogramm DROPCAT erlaubt eine automatische Auswertung von Hologrammen mit sphärischen Tröpfchen bei gleichmäßigem Bildhintergrund.

AUFBAU DES HODAR

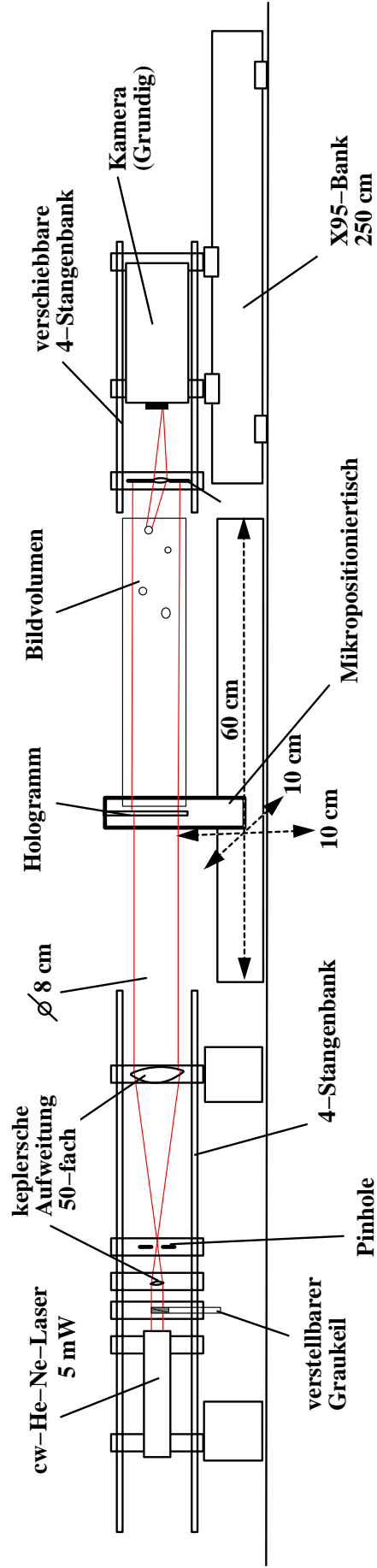


Abbildung 4.12: Die Rekonstruktionsapparatur des HODAR. Links befindet sich der He-Ne-Laser und die Strahlaufweitung. In der Mitte ist der Mikropositioniertisch angeordnet. Rechts wurde eine optische Bank eingebaut, auf der die Kameras längs der optischen Achse verschoben werden können.

4.3.1 Laserquelle

In der Pulsholographie kann das Hologramm nicht mit dem Aufnahmelaser rekonstruiert werden. Es muß mit einem kontinuierlich emittierenden Laser der Betrachtung bzw. Analyse zugänglich gemacht werden. Dieser Rekonstruktionslaser sollte eine möglichst ähnliche Wellenlänge wie der Aufnahmelaser haben, um Verzerrungen zu vermeiden. Da die Hologramme mit einem Rubinlaser (694,3 nm) aufgenommen werden, werden sie mit einem roten He-Ne-Laser (632,8 nm) rekonstruiert. Hier findet ein 5 mW He-Ne-Laser der Firma Aerotech Verwendung.

4.3.2 Graukeil

Im Verlauf der Arbeit zeigte sich, daß auch der schwächste zur Verfügung stehende (5 mW) He-Ne-Laser für große Bildausschnitte und damit für große Objekte zu hell für die Kamera ist, so daß die ersten Hologramme von Regentropfen nicht betrachtet werden konnten. Um die Helligkeit des Laserstrahls zu verringern, wurde zwischen dem He-Ne-Laser und dem Raumfilter ein verschiebbarer Graukeil eingefügt, der stufenlos bis zu 70% der Laserleistung absorbiert (Abbildung 4.12). Damit kann die Helligkeit des rekonstruierten Bildes so angepaßt werden, daß der gesamte Empfindlichkeitsbereich der Videokamera genutzt werden kann und damit der Kontrast des Videobildes optimiert wird. Die zeitliche und räumliche Kohärenz des Laserstrahl wird dadurch nicht beeinflusst, da der Strahl nach dem Passieren des Graukeils raumgefiltert wird.

4.3.3 Strahlaufweitung

Da die Leistung des He-Ne-Lasers klein ist, kann der Laserstrahl wie bei einem galileischen Teleskop mit zwei Sammellinsen aufgeweitet werden. Zwischen den Linsen entsteht ein Brennpunkt, in dem der Strahl raumgefiltert werden kann: Im Brennpunkt entsteht die Fouriertransformierte der Intensitätsverteilung des eintretenden Lichtstrahls. Wird eine Blende, ein sogenanntes Pinhole, dorthin gebracht, werden die äußeren Komponenten der Fouriertransformierten abgedeckt. Diese aber entsprechen den höheren räumlichen Frequenzen, die durch ungewollte Raummoden des Lasers, Staub und Linsenmängel entstehen. So entsteht nach der Aufweitung ein gleichmäßiger Strahlquerschnitt von 8 cm Durchmesser mit gaußförmiger Intensitätsverteilung und hoher räumlicher Kohärenz. Das hier verwendete fünfzigfache Aufweitungssystem mit Raumfilter wurde von der Fa. Spindler und Hoyer gefertigt. Es wird von einer 4 Stangenbank der gleichen Firma (Makrobank) gehalten (Abbildung 4.12).

4.3.4 Mikropositioniertisch

Wie oben angegeben, wurde ein Aufbau mit verschiebbarer Hologrammplatte gewählt. Dabei ist es ausreichend bei der Rekonstruktion nur einen Teil des Hologramms auszuleuchten. Somit kann für ein größeres Meßvolumen eine größere Fläche der Photoplatte belichtet und abgescannt werden, ohne den Durchmesser des Rekonstruktionsstrahls zu vergrößern.

AUFBAU DES HODAR

Die Hologrammplatte wird reproduzierbar in einer Klemme eingespannt, die auf dem in allen drei Raumrichtungen verschiebbaren Mikropositioniertisch befestigt ist (Abbildung 4.12). Dieser läßt sich mit einer Mikroprozessorsteuerung in den Richtungen quer zum Rekonstruktionsstrahl um jeweils 10 cm und in Richtung des Rekonstruktionsstrahls um 60 cm verschieben. Die Positionsgenauigkeit für alle Achsen beträgt $1\ \mu\text{m}$, das heißt die Position eines Objektes läßt sich im besten Falle auf $1\ \mu\text{m}$ genau bestimmen. Diese Positionsgenauigkeit wurde schon von Borrmann (1991) bestätigt. Der Mikropositioniertisch besteht aus drei Lineartischen der Firma Aerotech Inc.. Die Kontrollereinheit, Unidex 400, ist von der gleichen Firma. Sie wird von einem eigenen Mikroprozessor gesteuert und ist programmierbar. Die Kontrollereinheit läßt sich auch über eine serielle Schnittstelle von einem Computer fernsteuern.

4.3.5 Videokameras

Die Videokamera läßt sich auf einer optischen Bank des X95 Systems von Spindler & Hoyer um 250 cm in Richtung der optischen Achse verschieben, so daß im rekonstruierten Bild zusammen mit dem Verschiebeweg des Positioniertisches eine Tiefe von 310 cm abgefahren werden kann. Da bei der Aufnahme das Hologramm um einen Faktor zwei verkleinert wird, verkürzt sich das Bildvolumen in der Querrichtung auf die Hälfte, in der Tiefe jedoch auf ein Viertel der wahren Länge (Gleichung 3.21). So entsprechen den 310 cm im Bildvolumen 1240 cm im Aufnahmevervolumen.

Es stehen zwei verschiedene Kameras zur Verfügung:

1. Die schon von Borrmann und Uhlig verwendete Grundig Videokamera mit einer Ultriconröhre, die für das Rot des He-Ne-Lasers besonders empfindlich ist. Diese Kamera bietet den besten Kontrast für die Analyse kleiner Teilchen. Jedoch ist sie sehr lichtempfindlich, so daß bei größer gewähltem Bildausschnitt die Lichtleistung des Lasers mit einem Graukeil reduziert werden mußte. Weiterhin besitzt sie eine automatische Helligkeitsregelung. Diese bewirkt, daß große Objekte, die mehr als die Hälfte des Bildschirms bedecken, dunkler aufgenommen werden als sie sind. Dies macht sich vor allem bei der automatischen Auswertung störend bemerkbar, da dem Auswerteprogramm ein fester Helligkeits-Schwellwert vorgegeben werden muß (Abschnitt 5.1.3). Wurde dieser an einem kleinen Tropfen optimiert, so bewirkt die Helligkeitsregelung, daß ein großer Tropfen dunkler dargestellt und damit für die Automatik unsichtbar wird. Wurde sie auf einen großen Tropfen optimiert, wird, wenn kein Tropfen im Bild ist, der Hintergrund so weit heller, daß Bildstörungen über den Schwellwert geraten und von der Automatik als Objekte erkannt werden (Abbildung 4.13).

AUFBAU DES HODAR

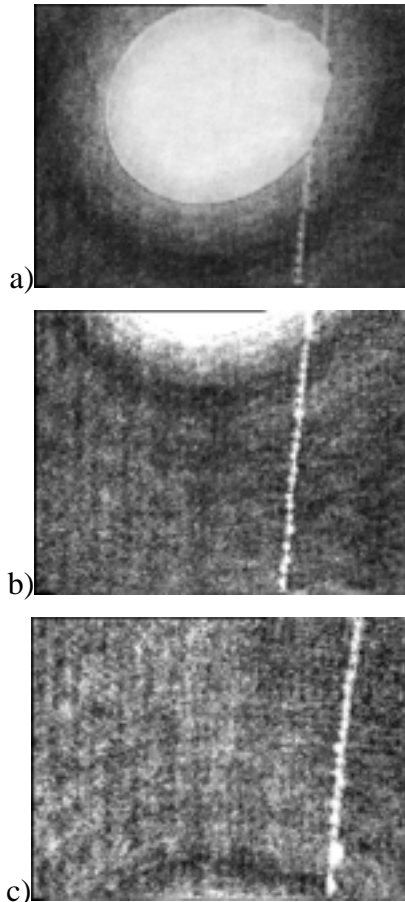


Abbildung 4.13: Die automatische Helligkeitsregelung der Grundig-Kamera führt dazu, daß auch große Objekte von der automatischen Auswertung nicht erkannt werden.

a) Eine Silicaperle füllt fast das ganze Bild.

b) Es ragt nur ein kleiner Teil der Perle ins Bild. Die Helligkeitsregulierung hat sich angepaßt: Der Teil der Perle ist heller als in Bild a).

c) Die Perle ist nicht mehr im Bildausschnitt. Die Helligkeitsregulierung verstärkt den Hintergrund noch weiter.

2. Eine $\frac{3}{4}$ inch CCD-Kamera von Hitachi. Sie besitzt eine Auflösung von $756 \cdot 581$ Pixeln. Die Verschlusszeit und damit die Bildhelligkeit läßt sich mit einem Dip-Schalter in weiten Grenzen verändern, so daß sogar die unbelichtete Photoplatte und Eichskalen auf einem Glasträger betrachtet werden können. Ein Zoomobjektiv gestattet eine schnelle Veränderung der Vergrößerung. Diese kann so klein gewählt werden, daß nahezu die gesamte Hologrammplatte abgebildet werden kann. Damit lassen sich die groben Positionen großer Tropfen in kürzerer Zeit finden, um dann mit größerer Vergrößerung oder der Ultricon-Kamera genauere Untersuchungen vorzunehmen. Denn leider bringt die CCD-Kamera bei weitem keinen so guten Kontrast wie die Röhrenkamera.

4.3.6 Bildanalyzesystem

Von der Videokamera wird das eingelesene Bild an einen IBM-kompatiblen Personal Computer (PC) (Intel Pentium I Prozessor, 166 MHz) und eine Workstation von Silicon Graphics (Indy), übermittelt. Die direkte Kontrolle des Videobildes mit Hilfe zweier Analogmonitore ist ebenso möglich und bei manueller Bedienung des Mikropositioniersystems sehr hilfreich.

Im PC ist eine Bildverarbeitungskarte PCVISION Plus mit 30 Bilder pro Sekunde, 255 Graustufen und 512·512 Pixeln eingebaut. Diese wird von der Bildverarbeitungssoftware DROPCAT der Firma Breuckmann gesteuert, mit der sowohl eine interaktive als auch eine automatische Auswertung der Hologramme erfolgen kann.

Die Workstation besitzt einen Eingang (Vino-Option), der das direkte Einlesen eines Videobildes in den Speicher und eine Livedarstellung auf dem Bildschirm ermöglicht. Es können entsprechend dem Fernsehstandard CCIR 24 Bilder pro Sekunde eingelesen werden. Weiterhin wurde sie mit einer Galilei-Videokarte ausgestattet, das neben einem Eingang mit CCIR Standard auch die Ausgabe weiterbearbeiteter Bilder als Analogsignal z.B. auf einen Videorecorder ermöglicht. Die zum IRIX-Betriebssystem der Workstation gehörende Software „Capture“ bietet die Möglichkeit, per „Drag-and-Drop“ Einzelbilder und kurze Videoclips einzulesen. Diese können dann mit weiteren Bildverarbeitungsprogrammen weiterbearbeitet werden.

Die automatische Auswertung von Hologrammen mit Hilfe der Software DROPCAT ist von Uhlig (1996) bereits im Detail beschrieben worden. Leider konnte diese automatische Auswertung für die Hologramme großer Hydrometeore nicht angewendet werden, so daß zu einer halbautomatischen Auswertung, ähnlich der von Borrmann (1991) zurückgekehrt werden mußte. Die Verwendbarkeit der DROPCAT Software für die Auswertung großvolumiger Hologramme wird im Kapitel 5.1 weiter diskutiert.

Die halbautomatische Auswertung wurde für diese Arbeit komplett auf der Kontrollereinheit Unidex 400 des Mikropositioniertisches programmiert. Mit dieser ist ein systematischer Scan des Probevolumens möglich, der beim Erkennen eines Objektes durch den Operator zur Positions- und Größenbestimmung unterbrochen werden kann. In einem zweiten Schritt können dann die gefundenen Positionen erneut angefahren und die Objekte im Detail untersucht werden. Diese Strategie erscheint als die günstigste, da sich zeigte, daß der Hauptaufwand der Auswertung im Auffinden der Tropfen im sonst sehr leeren Raum besteht. Sollen im großen Volumen auch kleine Tropfen von 100 µm Radius gefunden werden, werden vom Operator etwa 70-80 h Auswertezeit pro Hologramm benötigt.

4.4 Zusammenstellung der technischen Daten

Tabelle 4.1 gibt zum Abschluß einen Überblick über die technischen Daten des HODAR für die Konfiguration mit dem kleinen bzw. dem großen Volumen. Die Konfiguration des HODAR mit dem kleinen Volumen wurde bereits von Borrmann (1991) und Uhlig (1996) erläutert, so daß hier auf eine ausführliche Darstellung verzichtet wurde. Da Messungen mit dieser Konfiguration des HODAR aber immer noch möglich sind, werden ihre Eigenschaften in Tabelle 4.1 mitaufgelistet.

Tabelle 4.1: Technische Daten des HODAR		
HODAR – Aufnahme	Kleines Volumen	Großes Volumen
Prinzip	In-line-Holographie	
Lasertyp	Rubinlaser JK Lumonics HLS1, 30 mJ Pulsenergie, gütegeschaltet mit Pockelszelle, 30 ns Pulsdauer, Wiederholrate 10 / min, doppel-pulsfähig mit Zeitverzögerung zwischen 0 und 800 µs	
Fotomaterial	AGFA 10E75 NADH, Glasplatte, 10,16 cm x 12,7 cm (4 x 5 inches)	
Meßvolumen	Ca. 1000 cm ³	ca. 500 dm ³
Objekte	Nebel-, Wolkentröpfchen, Eiskristalle	Regentropfen, Eiskristalle, Graupel, Schneeflocken
Größenbereich	3 bis 250 µm Radius	100 µm bis 10 mm Radius
Objekthäufigkeit	100 bis 300 pro cm ³	1 pro dm ³
Aufnahmezeit	30 ns Puls, 1 min zum Wechseln der Glasplatte	
Temperaturbereich	- 10° bis 25° C	
Tageslichtbetrieb mit Tageslichtfilter möglich		
HODAR Rekonstruktion		
Lichtquelle	cw He-Ne-Laser, 5 mW, raumgefiltert, Abschwächer	
Mikropositioniertisch	1 µm Positionsgenauigkeit, Kontrollereinheit Unidex 400, Mikroprozessor kontrolliert	
TV- Kamera	Grundig FA 76, mit Ultricon Röhre und Hitachi KP-M1 E/K, CCD 3/4 inch	
Datenauswertezeit	ca. 40 h	ca. 70 - 80 h

5 TEST UND ERPROBUNG DES HODAR

Im ersten Abschnitt dieses Kapitels werden die Tests beschrieben, die durchgeführt wurden, um die abbildenden Eigenschaften des HODAR zu überprüfen.

Der zweite Abschnitt zeigt anhand von Messungen die Möglichkeiten des HODAR auf: Zunächst werden die durchgeführten Messungen und ihre meteorologischen Daten beschrieben. Dann werden die daraus gewonnenen Größenverteilungen, räumliche Verteilungen, sowie Auswertungen bezüglich Art, Form und Fallgeschwindigkeit der aufgenommenen Hydrometeore dargestellt.

5.1 Test der Apparatur - Kalibrierung des HODAR

Mit dem HODAR sollen quantitative Messungen für jeden einzelnen Hydrometeor innerhalb des holographisch aufgezeichneten Meßvolumens möglich sein. Das heißt aus dem Bild eines aufgenommenen Objekts muß seine Position und seine Abmessungen in der Realität bestimmbar sein. Deshalb muß das HODAR kalibriert werden. Zum direkten Größenvergleich wurde bei Borrmann (1991) in die HODAR-Kamera ein kleiner Glasträger mit einer Mikrometerskala eingebaut, so daß eine Abbildung in Originalgröße davon auf jedem Hologramm zu sehen ist. Dies wurde auch für den neuen hier verwendeten Aufbau übernommen. Das Prinzip der Rekonstruktion und der Bildauswertung bleibt dasselbe wie bei Borrmann (1991) und Uhlig (1996). Dort werden bereits die weiteren Kalibrierprozeduren der Rekonstruktionsanlage näher beschrieben, so daß hier darauf verzichtet werden kann. Im weiteren werden daher nur die für das große Aufnahmevolumen nötigen Verfahren beschrieben.

5.1.1 Eignungstest des Aufnahmeobjektivs

Wie in den vorangegangenen Kapiteln deutlich wurde, erfordert die Aufnahme eines großen Volumens die Verwendung einer verkleinernden Linse als Objektiv im Aufbau der HODAR-Kamera. Deren Qualität ist entscheidend für die Abbildungseigenschaften und das Auflösungsvermögen des HODAR. Bei der Aufnahme des großen Volumens muß das entstehende Interferenzmuster verkleinert auf die Photoplatte abgebildet werden, dies erfordert ein hohes Auflösungsvermögen der Abbildungsoptik.

Als Objektiv wurde für die HODAR-Kamera ein Tessarobjektiv (Abschnitt 4.1.6) gewählt. Läßt sich mit diesem Objektiv ein schon vorhandenes Hologramm abbilden, das ein Interferenzmuster mit hoher Auflösung darstellt, so sollte sich auch das bei einer Aufnahme entstehende Interferenzmuster damit auf die Photoplatte abbilden lassen.

Also wurde ein vorhandenes Hologramm mit Mikrometerskala zunächst direkt rekonstruiert (Abbildung 5.1a). Dann wurde, wie in Abbildung 4.12 gezeigt, die Linse in den Strahlengang der Rekonstruktionsanlage gebracht, so daß das Hologramm 1:1 abgebildet wurde (Abbildung 5.1b). Vergleicht man beide Bilder von Abbildung 5.1, ist zwar ein Kontrastverlust zu erkennen, aber die Mikrometerteilung ist gut zu sehen. Die Mikrometerteilung besteht aus $10\ \mu\text{m}$ breiten und $50\ \mu\text{m}$ von einander entfernten Strichen. Es wurden also die Interferenzmuster von Objekten in der Größenordnung von $10\ \mu\text{m}$ erfolgreich abgebildet. Daher sollte die Qualität der Linse ausreichen, um als abbildende Linse in der Aufnahmeapparatur für $100\ \mu\text{m}$ große Hydrometeore dienen zu können.

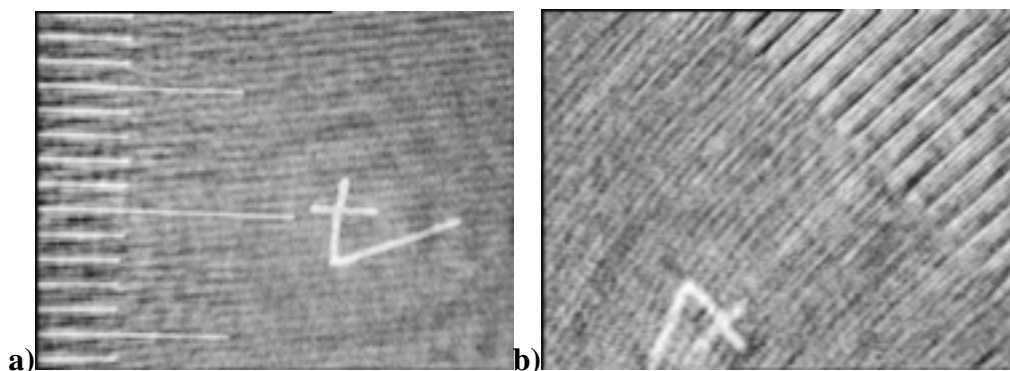


Abbildung 5.1: Zum Test des Aufnahmeobjektivs wurde ein vorhandenes Hologramm direkt rekonstruiert (a). Anschließend wurde dasselbe Hologramm zuerst mit dem Tessarobjektiv 1:1 abgebildet und dann rekonstruiert (b).

5.1.2 Kalibrierung durch Objekte bekannter Größe

Nach der Fertigstellung der Apparatur wurde das Meßvolumen zwischen Spiegel und Kamera (siehe Abbildung 4.2) einigen Tests unterzogen:

Bei der holographischen Aufnahme mit einem Parallelstrahl sollte nach Kapitel 3 der Abbildungsmaßstab unabhängig von der Entfernung zwischen Photoplatte und Objekt sein. Da in unserem Falle noch zusätzlich eine Linse eingefügt wurde, sollte der Abbildungsmaßstab entsprechend unabhängig von der Distanz Linse - Objekt sein.

Um dies zu überprüfen, wurde ein dünner Nylonfaden (Durchmesser $0,25\ \text{mm}$), in jeweils einem Meter Abstand mit aus Messingdraht gebogenen Ziffern markiert. Dieser wurde diagonal in das Meßvolumen gespannt, wie in Abbildung 5.2 skizziert.

TEST UND ERPROBUNG DES HODAR

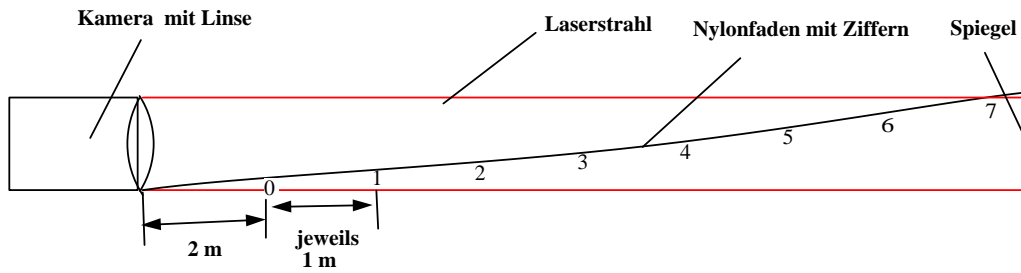


Abbildung 5.2: Ein dünner Nylonfaden (250 µm dick), an dem in jeweils 1 m Abstand Drahtziffern befestigt waren, wurde durch das Meßvolumen gespannt. Die Ziffer 0 befand sich in der Objektebene der Linse.

Um den realen Verhältnissen nahe zu kommen, wurde nun bei leichtem Nebel, der bei Niederschlagsereignissen auf dem kleinen Feldberg häufig auftritt, dieser Faden holographisch aufgenommen. Dieses Hologramm wurde dann im Labor rekonstruiert und der Abstand sowie die Zifferngröße der abgebildeten Ziffern ausgemessen und mit dem Original verglichen (Tabelle 5.1). Daraus kann die tatsächliche transversale Vergrößerung M_C und die longitudinale Vergrößerung M_{long} bestimmt werden. Die theoretische Vergrößerung m_H nur der Linse betrug in diesem Fall $0,50 \pm 0,1$. Es findet sich eine gute Übereinstimmung mit den rechnerischen Werten für M_C und M_{long} entsprechend Gleichung 3.20 und 3.21.

Ziffer	Bildgröße (±50 µm)	Originalgröße (±0,1 mm)	M_C	Bildabstand (±100 µm)	Originalabstand	M_{long}	theoretisches M_{long}
1	6,96 mm	12,0 mm	0,58	0 cm	0 m	-	0,37
2	6,99 mm	11,7 mm	0,60	44,8 cm	100 ±1 cm	0,45	0,39
3	7,47 mm	12,0 mm	0,62	93,2 cm	200 ±2 cm	0,47	0,42
4	8,73 mm	14,4 mm	0,61	143,6 cm	300 ±3 cm	0,48	0,41
5	7,92 mm	13,0 mm	0,64	193,0 cm	400 ±4 cm	0,48	0,45
6	8,37 mm	12,7 mm	0,66	243,6 cm	500 ±5 cm	0,49	0,48

Tabelle 5.1: Aus einem Hologramm wurden Bildgrößen und Bildabstände von 12 mm großen Drahtziffern ermittelt, die in je 1 m Abständen an einem Faden befestigt und durch das Meßvolumen gespannt wurden (Abbildung 5.2). Das Verhältnis Bildgröße zu Originalgröße bzw. Bildabstand zu Originalabstand liefert die transversale (M_C) bzw. die longitudinale (M_{long}) Vergrößerung der Apparatur. In der letzten Spalte ist die theoretische transversale Vergrößerung (M_{long}) gemäß Gleichung 3.21 angegeben.

TEST UND ERPROBUNG DES HODAR

Als weitere Testobjekte wurden Silicaperlen mit 2 mm Durchmesser ausgewählt, da sie in der Größe ähnlich wie Regentropfen, ebenso lichtdurchlässig und nicht ganz rund sind. Sie wurden an Zahnseidefasern geklebt, die über Drahtreifen gespannt waren. Der Durchmesser der Fasern wurde mit dem Mikroskop zu 15 μm bestimmt. Die Reifen wurden an mehreren Stellen in das Meßvolumen gebracht (Abbildung 5.3).

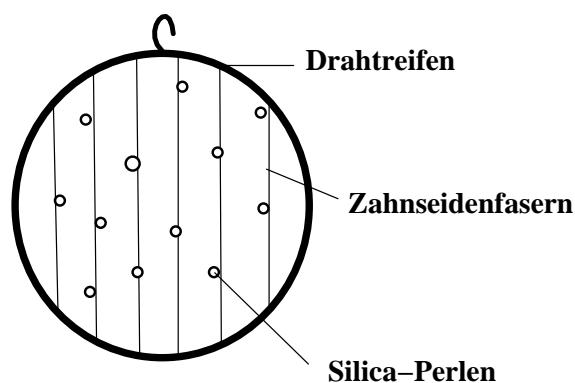


Abbildung 5.3: Mit dünnen Fasern (\varnothing 15 μm) bespannte Drahtreifen wurden an mehreren Stellen in das Meßvolumen gebracht. An die Fasern wurde Silicaperlen mit 2 mm Durchmesser geklebt.

Ihre schon bekannte Position im Meßvolumen wurde noch einmal in einer holographischen Aufnahme mit dem HODAR bestimmt (Tabelle 5.2). Hier macht sich das in 4.1.6 bereits erläuterte Problem der Mehrdeutigkeiten der Positionen von Objekten bemerkbar. Drahtreifen 2 befand sich 50 cm vor der Linse der HODAR-Kamera, also 160 cm vor der Schärfenebene des Objektivs. Sein holographisches Bild findet sich aber auch hinter der Hologrammplatte im scheinbaren Abstand von $158,13 \pm 1$ cm. Deshalb wurde bei späteren Aufnahmen ein Tunnel aus Blech angebracht, der das Volumen vor der Objektebene der Linse umgibt, so daß in dieses keine Hydrometeore hinein gelangen können. Damit kann ihre Position wieder eindeutig bestimmt werden.

Positionen der Drahtreifen	mit dem HODAR bestimmter Abstand von der Objektebene	Originalabstand von der Objektebene im Meßvolumen
1	$198,6 \pm 0,1$ cm	200 ± 1 cm
2	$158,1 \pm 0,1$ cm	-160 ± 1 cm
3	$514,1 \pm 0,1$ cm	510 ± 1 cm

Tabelle 5.2: Die Positionen der mit Silicaperlen behängten Drahtreifen im Meßvolumen und die mit dem HODAR bestimmten Positionen (Abbildung 5.3).

TEST UND ERPROBUNG DES HODAR

Bei der Rekonstruktion der Hologramme konnten die abgebildeten Silicaperlen mit den Originalen verglichen werden. Es wurde wie bei den Ziffern unter realistischen Meßbedingungen aufgenommen, das heißt es wurden Aufnahmen bei leichtem Nebel gemacht.

Auf Abbildung 5.4 sieht man daher nicht nur die Silicaperle und die Zahnseidefaser sondern auch 100 μm kleine Wassertröpfchen, die wie eine Perlenkette an der Faser haften. Unterhalb der Silicaperle hat sich ebenfalls Wasser angelagert. Diese Aufnahme belegt die Fähigkeit des HODAR 100 μm große Objekte abzubilden. Der Faden selbst ist sogar nur 15 μm dick.

Abbildung 5.5 zeigt eine andere Perle, 5 m von der Objektebene der Linse entfernt. Auf dieser Abbildung macht sich der störende Einfluß der feinen Nebeltröpfchen bemerkbar, die aber zu klein sind, um im Hintergrundspeckle identifiziert werden zu können. Dennoch ist die Silicaperle gut sichtbar.

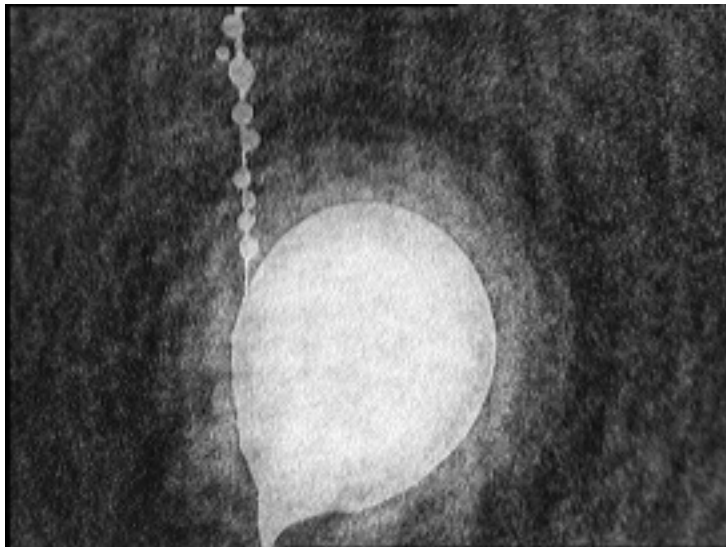


Abbildung 5.4: Silicaperle 2 m von der Objektebene der Aufnahmelinse entfernt. An der Seidenfaser (15 μm dick) haben sich 100 μm große Kondenswassertröpfchen gebildet.

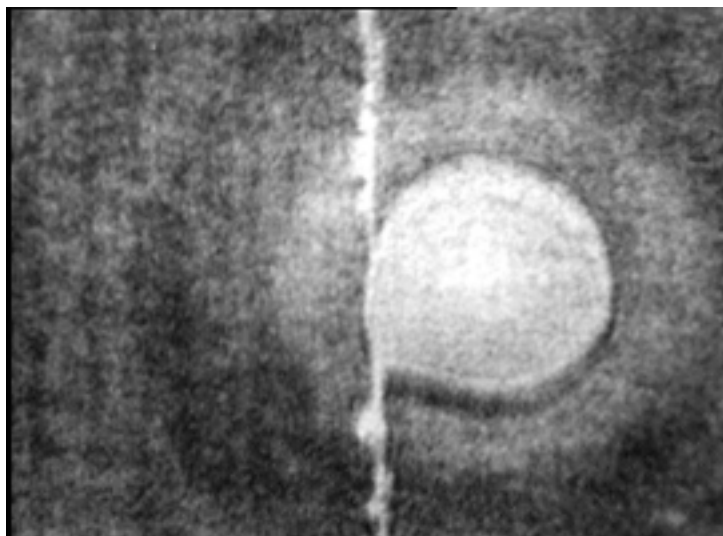


Abbildung 5.5: Silicaperle 5 m von der Objektebene der Kameralinse entfernt. Der störende Einfluß der Nebeltröpfchen macht sich hier im Vergleich zu Abbildung 5.4 deutlich bemerkbar.

5.1.3 Probleme der automatischen Auswertung von Hologrammen mit großen Hydrometeoren

Zur automatischen Auswertung von Hologrammen vom kleinen Meßvolumen des HODAR steht das Computerprogramm DROPCAT zur Verfügung (Uhlig, 1996). Es erlaubt das automatische und interaktive Abscannen des Bildvolumen und eine automatische Tropfenerkennung durch den Computer. Dieser bestimmt die Positionen und effektiven Durchmesser der als Tropfen erkannten Objekte, sowie einen Rundheitsparameter, der eine Information über die Kugelgestalt der erkannten Objekte geben soll. Die Software DROPCAT zur automatischen Auswertung von Hologrammen wurde von der Firma Breuckmann (1989/92) auf der Grundlage des Modulpaketes zur Bildverarbeitung OPTIMA entwickelt. Es wurden die speziellen Funktionen DROPLET zur interaktiven, halb- und vollautomatischen Hologrammauswertung und PLOT zur Erzeugung von Statistiken aus den Tropfendaten als Sonderfunktionen implementiert. Eine detaillierte Beschreibung findet sich bei Uhlig (1996).

Die Bildsegmentierung (Ahlers und Warnecke, 1991), das ist die Unterscheidung des Bildes in Hintergrund und Objekte, wird in DROPCAT anhand der Bildhelligkeit, ähnlich wie bei Lauterborn und Hausmann (1980), mit Hilfe eines Schwellwert- und eines Randschärfekriteriums vorgenommen. Diese Kriterien sind aber für eine einwandfreie Segmentierung der Tropfen nicht ausreichend, wie Uhlig (1996) bereits an den kleinvolumigen Aufnahmen des HODAR feststellte. Deshalb ist eine manuelle Kontrolle unerlässlich, die von der Software DROPCAT mit der Routine DELDROP allerdings nur unzureichend unterstützt wird. Diese Unzulänglichkeit der Kriterien verursacht eine hohe Fehlsegmentierung. So waren bei Uhlig (1996) 25% der erkannten Objekte unfokussierte Tropfen und 16% davon Bildsegmente des Hintergrundes. Zur Verminderung der Fehlsegmentierung des Hintergrundes schlug Uhlig (1996) vor, den minimalen Durchmesser, der als Tröpfchen erkannt wird,

deutlich über die Speckle-Größe zu vergrößern. Vielleicht sollten stärker Konturorientierte Verfahren eingesetzt werden (Bässman und Beselich, 1989). Goudail und Réfrégier (1996) schlugen zu diesem Problem ein wirkungsvolles Verfahren vor.

Die Hologramme vom großen Meßvolumen des HODAR zeigen zum einen größere Speckle als die des kleinen Volumens (siehe Kapitel 3.3.6) und zum anderen deutlich höhere Helligkeitsvariationen des Hintergrundes durch einen größeren Bildausschnitt, der wegen der größeren Objekte notwendig ist. Außerdem weisen die großen Hydrometeore im Inneren ihres Bildes eine größere Helligkeitsvariation auf, die bei einem hohen Schwellwert eine Zerteilung des Tropfens durch die Bilderkennung in kleinere Teile bewirkt.

Dies führt dazu, daß das Schwellwertkriterium zur Bildsegmentierung bei weitem nicht ausreicht. Das zusätzliche Randschärfekriterium kann die Bildsegmentierung nicht verbessern und verursacht andere Probleme:

Da die großen Hydrometeore nicht nur einen größeren Querschnitt als die Wolkentropfen haben, sondern auch eine größere Tiefe besitzen, sind sie im praktischen Sinne keine 2-dimensionalen Objekte mehr, wie dies meist in der Theorie der In-line-Holographie vorausgesetzt wird. Dies führt zu einer Randunschärfe der großen Tropfen, die als Überlagerung mehrerer Beugungsbilder von 2-dimensionalen Querschnitten desselben Tropfens betrachtet werden kann (Abbildung 5.6). Der Querschnitt Q eines großen Tropfens verändert sich über die Tiefe Δz nur geringfügig im Vergleich zu einem kleinen Tropfen der komplett innerhalb von Δz liegt. Ein streifender Lichtstrahl wird im ganzen Bereich

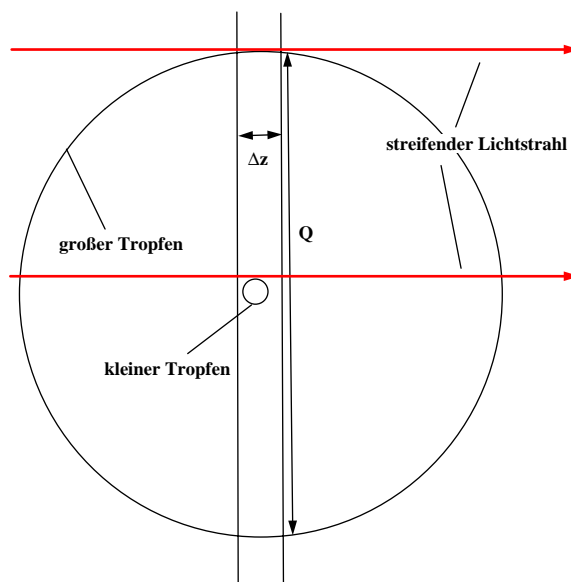


Abbildung 5.6: Größere und damit auch tiefere Objekte besitzen eine größere Randunschärfe als kleine, da sich der Querschnitt Q im Tiefenbereich Δz kaum verändert im Gegensatz zu kleinen Tropfen, die z.B. komplett innerhalb von Δz liegen.

Δz gebeugt. So entsteht im In-line-Hologramm ein Bild, das aus der Überlagerung der Bilder aller Querschnitte Q innerhalb des Tiefenbereichs Δz entsteht.

TEST UND ERPROBUNG DES HODAR

Diese Bilder überlagern einander und erzeugen eine größere Randunschärfe als bei kleinen Tropfen, deren Querschnitt eindeutiger bestimmt ist.

Dies führt dazu, daß große Tropfen durch das Randschärfekriterium meist nicht als Tropfen erkannt und vom Computer verworfen werden. Leider ist eine Anpassung des Randschärfekriteriums an die Tropfengröße nicht möglich, sie kann in DROPCAT nur global festgelegt werden.

Die Kriterien können nur an einem ausgewählten Bildausschnitt so eingestellt werden, daß möglichst nur alle tatsächlich vorhandenen Objekte erkannt werden. Die so gewonnene Einstellung ist nicht für alle Teile des Hologrammes optimal. Oft wird dabei mit angeschaltetem Randschärfekriterium kein einziger Tropfen erkannt, ohne Randschärfekriterium wiederum werden beträchtliche Teile des objektfreien Hintergrundes als Objekte klassifiziert.

Ein an einem Bildausschnitt optimal eingestellter automatischer Scan eines Teilvolumen des Hologramms NK25 lieferte 5700 erkannte Tropfen (Tabelle 5.3). Nach Uhlig (1996) kann der Fehler der DROPCAT-Software mit 10% für große Tropfen abgeschätzt werden. Diese hohe Zahl an Tropfen ist unrealistisch. Auf dem ganzen Hologramm befinden sich, wie die manuell ermittelte Größenverteilung (Abbildung 5.9) zeigt, 40 Tropfen. Es wird auch hier ein Detektionsfehler durch den Operator von 10 % unterstellt (Borrmann, 1991). Eine Überprüfung von 75 der automatisch erkannten Tropfen zeigte, daß nur 5 davon richtig erkannt wurden, das sind 6 %. Auf alle Tropfen hochgerechnet, ergibt sich damit eine „wahre“ Tropfenzahl von 342. Das liegt nicht einmal in der Größenordnung des Ergebnisses bei manueller Auswertung. Deshalb mußte für die Auswertung der Hologramme dieser Arbeit auf eine automatische Tropfenerkennung verzichtet werden und alle Hologramme mußten manuell analysiert werden.

NK 25	
manuelle Auswertung	Automatische Auswertung
40 ± 4 Tropfen	5700 ± 570 Tropfen

Tabelle 5.3: Manuelle und automatische Auswertung des Hologramms NK25 mit Regentropfen zeigt die extrem hohe Fehlerquote der automatischen Auswertung mit DROPCAT bei den Hologrammen des großen Meßvolumens. Eine Überprüfung der ersten 75 der 5700 Tropfen ergab, daß nur 5 davon richtig erkannt wurden, das sind 6 %.

5.2 Messungen mit dem HODAR

Mit der Konfiguration des HODAR für das große Volumen sind 59 Hologramme aufgenommen worden. Darunter Regen-, Schnee- und Doppelpulshologramme von Regen und Schnee zur Bestimmung der Fallgeschwindigkeit.

Die ersten Hologramme wurden auf der Meßkampagne FELDEX (Feldbergexperiment) im November 1995 aufgenommen. Die übrigen wurden über die Jahre 96 bis 98 verteilt aufgenommen, hauptsächlich in den Frühjahrs- und Herbstmonaten.

Alle Hologramme wurden auf dem kleinen Feldberg im Taunus (825 m ü. N.N., 53°13' nördliche Breite und 8°36' östliche Länge) aufgenommen. Die Ausrichtung des HODAR wurde quer zur Hauptwindrichtung NW wie bei Uhlig (1996) beibehalten.

Das HODAR nimmt in der großen Volumenkonfiguration ein Meßvolumen von ca. 500 dm³ mit einem Bodenabstand zwischen 1,10 m und 3 m auf. Dieses liegt in der atmosphärischen Grenzschicht, die eine veränderte Turbulenzcharakteristik gegenüber der freien Atmosphäre zeigt.

Durch die Höhe des Kleinen Feldbergs beträgt der Abstand zur Wolkenunterkante bei Niederschlagsereignissen nur wenige Meter, oft liegt der Gipfel sogar direkt in der Wolke. Dann wird das Niederschlagsspektrum beim Durchfallen der Luft unterhalb der Wolke nur gering verändert und die gewonnenen Verteilungen können auch als für die Wolkenbasis gültig betrachtet werden. Deshalb wurden alle Hologramme bei großräumiger Bewölkung, die eine Unterseite meist um 800 m hatte, aufgenommen. So stammen alle aufgezeichneten Hydrometeore aus Stratus- und Nimbostratusbewölkung. In dieser fanden sich keine Tropfen größer als 3 mm Durchmesser, was auch zu erwarten ist (Pruppacher und Klett, 1997).

Es wurde eine Auswahl der aufgenommenen Hologramme getroffen und nur ein kleiner Teil ausgewertet, da sich die vorhandene Bildanalysesoftware als ungeeignet zur automatischen Auswertung des großen Volumens herausstellte und deshalb nur manuell ausgewertet werden konnte (Kapitel 5.1.3).

5.2.1 Meteorologische Daten der ausgewerteten Hologramme

In diesem Abschnitt erfolgt eine kurze Beschreibung der Wetterlage und der meteorologischen Daten zum Zeitpunkt der Hologrammaufnahme. Die Wetterlage und Bewölkung wird aufgrund der Berliner Wetterkarte und eigenen Aufzeichnungen beschrieben.

Für die vorliegende Arbeit wurden folgende Hologramme ausgewählt und ausgewertet:

- die Hologramme NK16 und NK20, bei einem Kaltfrontdurchgang am 15. und 16.11.95 im Rahmen des FELDEX aufgenommen, mit Regen später in Schnee übergehend,
- das Regenhologramm NK25 vom 20.1.97 aus einem Landregen,
- das Doppelpulshologramm NK37 vom 12.2.97 mit Regen,
- und das Regenhologramm NK46 vom 8.10.97 aus einem Landregen mit gleichzeitiger Vergleichsmessung mit dem Distrometer.

NK16 und NK20

Diese Hologramme wurden im November 1995 im Rahmen der Meßkampagne FELDEX des Sonderforschungsbereiches 233, „Chemie und Dynamik der Hydrometeore“ aufgenommen. In dieser Kampagne sollten die Prozesse innerhalb von auf dem kleinen Feldberg aufliegender Wolken (Bodenwolken) studiert und die Inhaltsstoffe der Luftmassen, die in die Wolke einströmten und aus ihr herausströmten, gemessen werden.

Wetterlage:

Die beiden Tiefs Julia I und II über dem Atlantik und den britischen Inseln rückten weiter nach Osten vor und ein Tiefausläufer überquerte in der Nacht vom Mittwoch, dem 15.11.95 zum Donnerstag, dem 16.11.95 Westdeutschland. In dessen Begleitung zogen Schauer über Westdeutschland hinweg und gingen in den Höhenlagen in Schnee über. Auf der Rückseite der Front drang Kaltluft nach Deutschland vor und kündigte einen Kaltlufteinbruch auf der Rückseite des Tiefs Julia I an, der am Wochenende Schneefall brachte. (Berliner Wetterkarte)

Aufnahmebedingungen:

Am Abend des 15.11.95 um 19:03 UTC wurde NK16 bei leichtem Regen und 2°C aufgenommen. Am folgenden Morgen um 10:05 UTC wurde NK20 bei leichtem Schneefall und -1°C aufgenommen. Der Feldberg lag zu beiden Zeitpunkten dicht unter der Wolkenunterkante in klarer Sicht. Die Bewölkung bestand aus einer Stratuswolkendecke. Es war schwach windig. Die Hologrammaufnahmen wurden mit Einzelpulsen von 15 mJ Energie gemacht. Bei der Aufnahme von NK20 wurde ein Rotfilter verwendet, um das Tageslicht fernzuhalten.

NK25

Wetterlage:

Ein Hochdruckkeil erreichte am 19.1.97 vom Atlantik her England. Das Tief Sylvia wich nach Süden aus. Eine davon ausgehende Okklusion überquerte Deutschland und brachte in der Nacht Regen. (Berliner Wetterkarte).

Aufnahmebedingungen:

Am 19.1.97 regnete es den ganzen Tag. Dies ließ auch in der Nacht kaum nach. NK25 wurde bei Regen am 20.1.97 um 0:45 MEZ bei einer Temperatur von 4° Celsius aufgenommen. Der Kleine Feldberg lag kurz unter der Stratuswolken-decke. Es herrschte in Böen auffrischender schwacher Wind. NK25 wurde ohne Rotfilter mit einem Einzelpuls von 15 mJ aufgenommen.

NK37

Wetterlage:

Am 11.2.97 wanderte der Wirbel Zacharias über Nordeuropa hinweg und erreichte morgens mit seinem Kern Finnland. Dessen Sturmfeld erfaßte auch Norddeutschland mit Böen um Windstärke 8. Von Südwesten wehte milde Luft heran und eine Warmfrontwelle zog schnell ostwärts über Südwestdeutschland hinweg. Das zugehörige Tief Ariane überquerte Frankreich und in der Nacht vom 11.2.97 zum 12.2.97 Südwestdeutschland und brachte Niederschlag und Windböen mit. (Berliner Wetterkarte).

Aufnahmebedingungen:

In der Nacht vom 11.2.97 zum 12.2.97 regnete es hin und wieder. NK37 wurde mit einem Doppelpuls mit jeweils 15 mJ und einem zeitlichen Abstand von 800 µs am 12.2.97 um 1:55 MEZ aufgenommen. Die Temperatur lag bei 5°C. Der Wind war in Böen frisch, jedoch herrschte in größeren Pausen Windstille. In einer solchen wurde NK37 aufgenommen.

NK46

Wetterlage:

Am Dienstag, dem 7.10.97 strömte warme Meeresluft aus der Biscaya nach Mitteleuropa. Diese Luftmasse sorgte für Temperaturen zwischen 19 und 24 °C. Es setzte schon am Dienstag Nachmittag Gewittertätigkeit ein. Es fielen Niederschläge bis 8 l/m². Die Schauer und Gewitter verlagerten sich langsam nach Osten. (Amtsblatt des DWD).

Aufnahmebedingungen:

In der Nacht vom 8.10.97 regnete es immer noch am Kleinen Feldberg, allerdings mit nachlassender Intensität. Um 22:50 MEZ wurde NK46 mit einem Doppelpuls von jeweils 15 mJ und einem zeitlichen Abstand von 800 µs aufgenommen. Es war schwach windig.

5.2.2 Größenverteilungen

Normalerweise sind Regentropfen bis $D_0 < 3$ mm groß. Nur bei Gewittern oder tropischen Regenfällen mit Regenraten >50 mm/h können größere Tropfen gefunden werden. Es wurden schon Tropfen bis 8 mm D_0 beobachtet (Beard et al., 1986, Black und Willis, 1996). Da die Regentropfen gegen den Aufwind fallen, sollte es eine minimale Größe für die Tropfen geben, die die Wolke verlassen können. Die Beobachtung zeigt, daß diese Tropfen in der Regel wenigstens 200 μ m Durchmesser haben. Auf dem weiteren Weg nach unten wird diese Größengrenze verwischt, denn durch Verdunstung, Zerschneiden und Kollisionen werden kleinere Tropfen erzeugt.

Am Anfang eines Regenereignisses kann eine bimodale Verteilung mit einem Maximum bei großen Tropfen (größere Fallgeschwindigkeit) und einem bei kleinen (hohe Verdunstungsrate) erwartet werden (Pruppacher und Klett, 1997).

Unter Größenverteilungen seien hier Anzahlgrößenverteilungen verstanden. In diesen ist die Tropfenzahl $N(D_i)$ bzw. $N(r_i)$ pro Volumen V innerhalb einer Größenklasse, definiert als das Intervall $[D_{0min}(i), D_{0max}(i)]$ bzw. $[r_{min}(i), r_{max}(i)]$, gegen den mittleren Durchmesser D_i bzw. Radius r_i aufgetragen. Bei logarithmischen Verteilungen ist dies der geometrische Mittelwert der Intervallgrenzen. Es ist üblich bei Anzahlgrößenverteilungen $dN/d\log r$ gegen r in doppeltlogarithmischer Darstellung aufzutragen und es gilt:

$$\frac{dN}{d\log r}(r_i) = \frac{N(r_i)}{V} \frac{1}{d\log r}, \quad 5.1$$

wobei $d\log r = \log\left(\frac{r_{max}(i)}{r_{min}(i)}\right)$ ist.

Oft wird die Anzahldichte auch mit $n(r_i) = \frac{N(r_i)}{V \Delta r_i}$ bezeichnet.

Es gibt mehrere Modellverteilungen für Regentropfenverteilungen. Die am weitesten verbreitete ist die Marshall-Palmer-Verteilung (Marshall und Palmer, 1948):

$$n(D_0) = n_0 \exp(-\Lambda D_0), \quad 5.2$$

wobei $n(D_0)$ in $m^{-3} mm^{-1}$ und D_0 in mm angegeben ist. Die Verteilung ist mit der Konstante n_0 und dem Parameter Λ bestimmt. Λ ist abhängig von der Regenrate R . Marshall und Palmer fanden: $\Lambda = 4,1 R^{-0,21} mm^{-1}$ und $n_0 = 8 \cdot 10^3 m^{-3} mm^{-1}$, mit R in mm h⁻¹. Später wurde die Konstante n_0 als abhängig vom Regenereignis erkannt (Waldvogel, 1974).

Weiterhin kann die Größenverteilung der Regentropfen mit der Gamma-Verteilung (Willis und Tattelman, 1989):

$$n(D_0) = n_0 D_0^\beta \exp(-\Lambda D_0) \quad 5.3$$

mit den Parametern Λ in mm^{-1} und β

oder der Best-Verteilung (Best, 1950a):

$$1 - F = \exp\left[-\left(\frac{D_0}{A}\right)^m\right], \quad 5.4$$

mit $m = 2.25$ und $A = 1.30 R^{0.232}$, D_0 in mm und R in mm h^{-1} , modelliert werden.

Alle diese Verteilungen liefern nur eine teilweise Übereinstimmung mit den Meßdaten und geben auch nur eine Langzeitmittelung wieder, denn die Größenverteilung der Regentropfen variiert innerhalb eines Regenereignisses. Oft erreichen Gruppen von Regentropfen gleicher Größe gleichzeitig den Boden. Auch ist bei einigen Regenereignissen eine zeitliche Entwicklung zu bemerken. Zu Anfang eines Regenschauers werden besonders große Tropfen beobachtet (Joss und Gori, 1978). Diese Erscheinungen verursachen eine erhebliche Abweichung eines Momentanspektrums von Langzeitmittelungen.

Mit dem HODAR werden Momentanspektren aufgezeichnet und damit Untersuchungen der zeitlichen Entwicklung eines Regenereignisses möglich.

Abbildung 5.7 zeigt zwei mit dem HODAR bestimmte Größenverteilungen der Hologramme NK16 und NK25. Auf der waagrechten Achse ist der Äquivalenzradius der Tropfen in μm und auf der senkrechten $dN/d \log r$ in l^{-1} aufgetragen. Die Fehlerbalken geben den Gesamtfehler wieder, der sich im wesentlichen aus dem statistischen Fehler $\Delta N = \sqrt{N}$, dem Volumenfehler ΔV und dem Dektionsfehler der Tropfenerkennung zusammensetzt (siehe Anhang B).

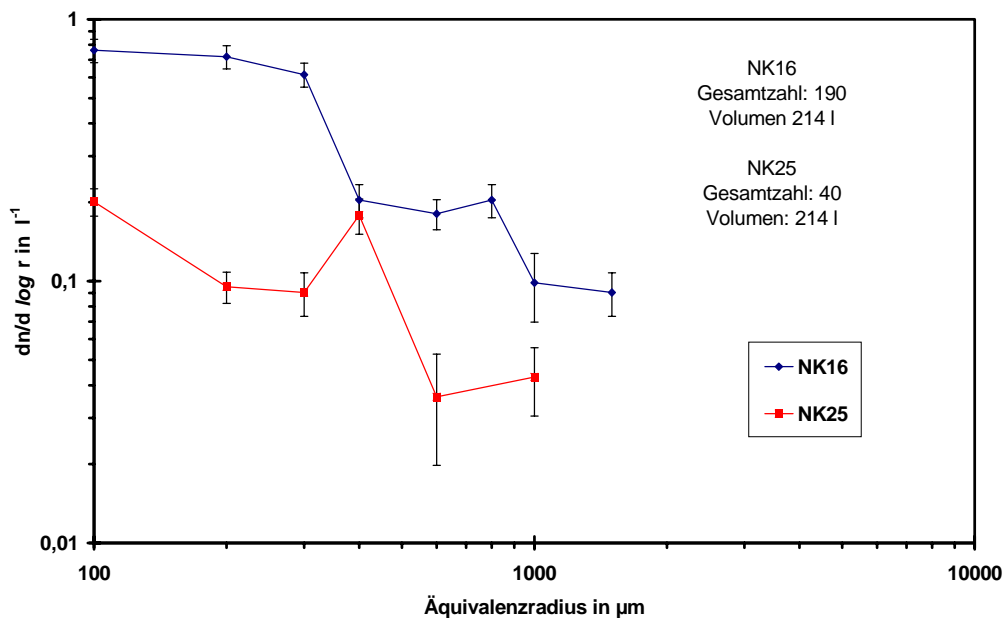


Abbildung 5.7: Mit dem HODAR bestimmte Größenverteilungen der Hologramme NK16 und NK25. Beide Hologramme wurden bei Landregenereignissen aufgenommen. Es zeigen sich jedoch Unterschiede in der Form der Verteilungen.

TEST UND ERPROBUNG DES HODAR

Beide Hologramme stammen von Landregenereignissen, weisen aber starke Unterschiede in der Form der Verteilung auf. In beiden Fällen wurden nur Tropfen mit $r_0 < 1500 \mu\text{m}$ gefunden. In NK16 wurden in 214 dm^3 190 Tropfen gezählt, in NK25 in einem gleichgroßen Volumen nur 40 Tropfen. NK25 zeigt bei $400 \mu\text{m}$ ein Maximum, dort liegt bei NK16 ein Minimum der Verteilung. Wird von den Maxima und Minima abgesehen zeigt sich bei beiden Verteilungen der gleiche Abfall der Anzahlkonzentration zu großen Tropfen hin. So ist für beide Ereignisse ein zeitliches Mittel gemäß der Marshall-Palmer-Verteilung vorstellbar.




Strantz et al. stellten 1971 ein empirisches Schema (Tabelle 5.4) auf, nachdem die Regenereignisse durch die auftretenden Extrema klassifiziert werden können, gibt aber keine analytische Beschreibung an. Die Spektren werden in 3 Gruppen eingeteilt: Gruppe 1 zeigt einen Abfall zu großen Radien hin, aber kein Maximum bei kleinen Radien, Gruppe 2 besitzt neben dem Abfall zu größeren Radien hin ein Maximum bei kleinen Radien und Gruppe 3 sind alle Spektren, die sich nicht Gruppe 1 oder 2 zu ordnen lassen. Gruppe 1 wird weiter unterteilt in Typ 1.1: kein weiteres Maximum, Typ 1.2 ein Maximum bei mittleren Radien und ein Minimum verschieden von Null, Typ 1.3 ein Maximum bei mittleren Radien und ein Minimum gleich Null. Gruppe 2 wird entsprechend unterteilt.




Am Ende der Tabelle findet sich eine Angabe über die Häufigkeit der einzelnen Spektrentypen in jeweils 1000 Landregen-, Schauer- oder Gewitterereignissen.

Nach diesem Schema gehören sowohl NK16 als auch NK25 zum Typ 1.2 Niederschlag. Dieser besitzt nur ein Maximum und ein von Null verschiedenes Minimum. Dieser Typus tritt nach Strantz bei Landregen nur in 8,6 % der Ereignisse auf, bei Gewittern aber zu 53,6 %.

TEST UND ERPROBUNG DES HODAR

Gruppe	Eigenschaft	
1	$N_3 > N_2$	
2	$N_1 \leq N_4$ und $N_4 > N_3$	
3	Das Spektrum hat nicht die Eigenschaft der Gruppe 1 oder 2	

Typ	Eigenschaft	Symbol
1.1	$N_i > N_{i+1}$ für $N_i > 0$ $N_i = N_{i+1}$ für $N_i = 0$ $i = 1 \dots 19$	
1.2	In einer Klasse $k > 2$ tritt ein 1. Maximum auf. Zwischen N_i und N_k liegt kein Minimum gleich Null.	
1.3	In einer Klasse $k > 2$ tritt ein 1. Maximum auf. Zwischen N_i und N_k liegt ein Minimum gleich Null.	

Typ	Eigenschaft	Symbol
2.1	$N_i > N_{i+1}$ für $N_i > 0$ $N_i = N_{i+1}$ für $N_i = 0$ $i = 2 \dots 19$	
2.2	In einer Klasse $k > 3$ tritt ein 2. Maximum auf. Zwischen N_i und N_k liegt kein Minimum gleich Null.	
2.3	In einer Klasse $k > 3$ tritt ein 2. Maximum auf. Zwischen N_i und N_k liegt ein Minimum gleich Null.	

	Spektrientyp							
	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	3	E
Landregen	775	86	78	61	—	—	—	1000
Schauer	352	348	211	59	11	8	11	1000
Gewitter	146	536	219	43	40	13	3	1000

Tabelle 5.4: Klassifikation der Regenereignisse nach Strantz, 1971. Die Spektren werden in 3 Gruppen eingeteilt, von denen zwei weiter unterteilt werden. Strantz gibt auch Häufigkeiten für die Beobachtung der verschiedenen Typen an.

5.2.3 Vergleich der Größenverteilungen mit Distrometerdaten

Die in 5.2.2 gezeigten wie auch alle anderen mit dem HODAR gewonnenen Größenverteilungen stellen echte Momentaufnahmen dar. Im Gegensatz zu anderen Meßgeräten, die auch Größenverteilungen bestimmen, wie dem Distrometer (Kapitel 2.3.1) oder Streulichtsonden, z. B. dem FSSP 100 (Forward Scattering Spektrometer Probe), zeichnet das HODAR ein Meßvolumen in einem Augenblick auf und Konzentration und Größenverteilung innerhalb dieses Volumens können bestimmt werden. Die anderen Geräte hingegen registrieren einzelne Objekte nacheinander in einem gewissen Zeitraum, aus dem ein virtuelles Meßvolumen errechnet wird. Dies führt zu Abweichungen der ermittelten Größenverteilungen beim Vergleich zwischen diesen Arten der Messung, wenn sich die Meßgrößen über die Zeit ändern (Raasch und Umhauer, 1977).

Dennoch wurden Vergleichsmessungen mit dem Distrometer nach Joss und Waldvogel (1967) vorgenommen. Dabei stand das Distrometer direkt neben dem Meßvolumen des HODAR. Die Distrometerdaten wurden in eine Anzahlgrößenverteilung umgerechnet (Anhang A), da sonst ein Vergleich nicht möglich wäre.

In Abbildung 5.8 wird eine Größenverteilung des HODAR (NK46, 8.10.97 22:50 MSZ) und die Verteilungen des Distrometers, die aus 5 min oder 30 min Meßzeit gewonnen wurden, gegenübergestellt. Innerhalb des Meßzeitraums von 5 Minuten wurde die holographische Aufnahme gemacht. Der Fehler be-

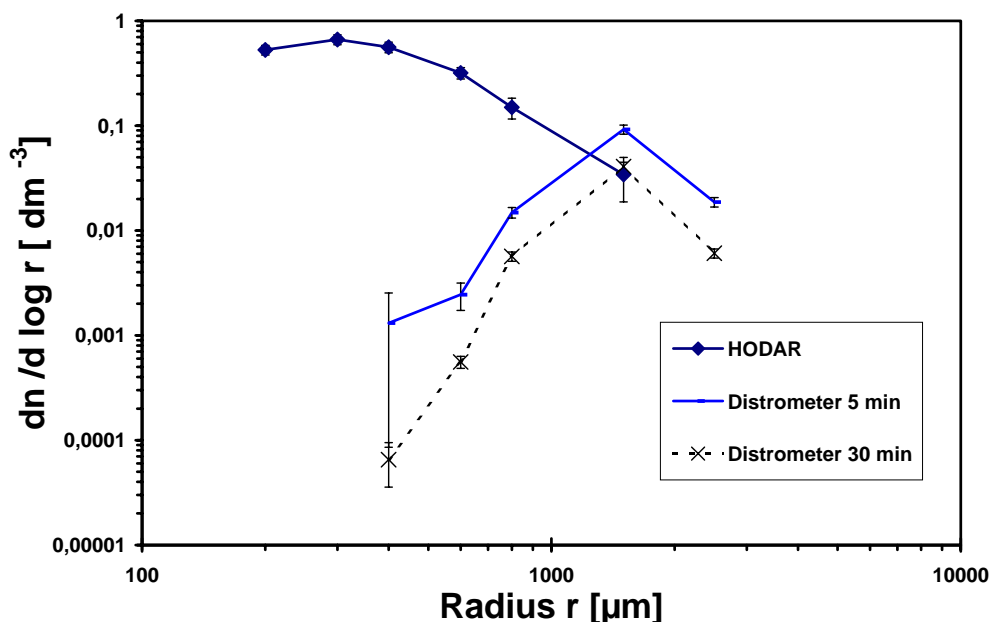


Abbildung 5.8: Vergleich einer Größenverteilung des HODAR mit zwei Größenverteilungen aus zeitgleich aufgenommenen Distrometerdaten mit 5 bzw. 30 min Mittelung.

TEST UND ERPROBUNG DES HODAR

stimmt sich im wesentlichen wieder aus dem zählstatistischen Fehler $\Delta N = \sqrt{N}$ und aus dem Detektionsfehler bzw. den Gerätefehlern des Distrometers (Lehmann, 1996; Siehe auch Anhang A und B).

Es zeigen sich große Unterschiede im überlappenden Größenbereich der beiden Meßgeräte. Das Spektrum des HODAR läßt sich dennoch gut mit der Kurzzeitmessung des Distrometers zu den großen Tropfen fortsetzen. Die Unterschiede bleiben auch bei längeren Meßzeiten des Distrometers unverändert. Insbesondere werden kleine Tropfen vom Distrometer unterschätzt. Dessen Zuverlässigkeit wird gerade für kleine Tropfen sehr gering.

Die kleinen Tropfen liefern einen Beitrag zur Niederschlagsmenge. In Abbildung 5.9 sind die aus den Größenverteilungen von Abbildung 5.8 ermittelten kumulativen Volumenanteile am Gesamtniederschlag dargestellt. In der Größenverteilung des HODAR tragen die kleinen Tropfen mit 20 % zur Niederschlagsmenge bei, in der 5min-Verteilung des Distrometers mit nur 2%.

Es bedarf eingehender Untersuchungen der Frage, ob das Distrometer systematisch die kleinen Tropfen und deren Beitrag zum Niederschlag unterschätzt.

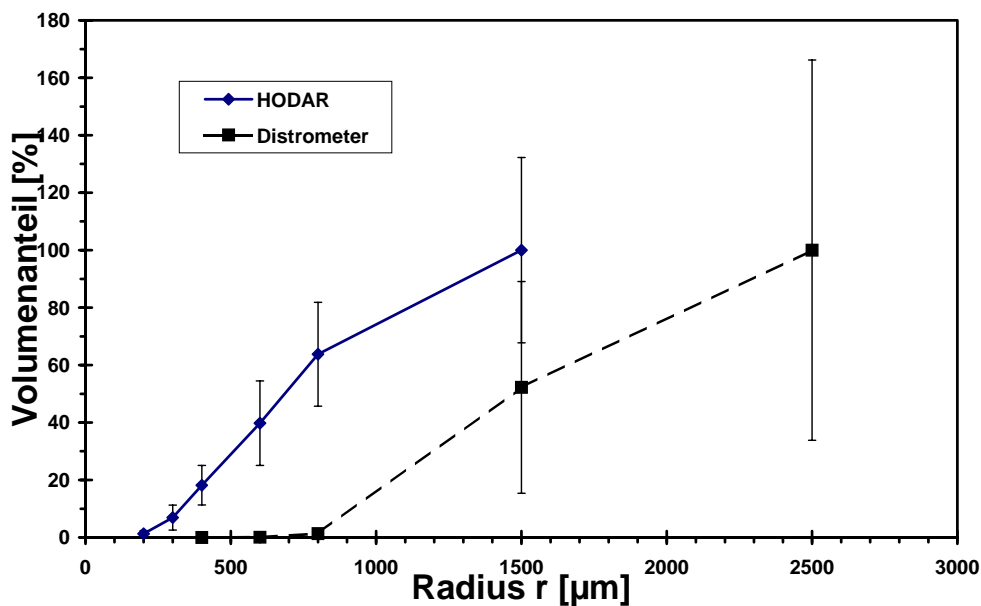


Abbildung 5.9: Aus den Größenverteilungen von Abbildung 5.8 bestimmte Prozen-te der Niederschlagsmenge in Abhängigkeit von der Tropfengröße.

5.2.4 Fallgeschwindigkeit der Regentropfen

Beginnt ein Regentropfen zu fallen, beschleunigt er so lange bis ein Gleichgewicht zwischen Luftreibung und dem um den Auftrieb verringerten Gewicht des Tropfens entstanden ist. Nun hat der Tropfen die sogenannte Endfallgeschwindigkeit oder Terminal Settling Velocity (TSV) erreicht.

Regentropfen zeigen deutliche Abweichungen vom Verhalten von festen Kugeln im laminaren Luftstrom. Erstens erreichen die Tropfen Geschwindigkeiten in denen die Turbulenz nicht mehr vernachlässigbar ist. Zweitens hängt der Luftwiderstand auch von der Form der Tropfen ab. Diese sind aber ab etwa 1 mm Durchmesser, bedingt durch die Umströmung, nicht mehr rund und werden sogar zu Oszillationen angeregt. Bei Größen zwischen 3 mm und 8 mm Äquivalentdurchmesser D_0 führen diese Oszillationen im Windkanal zu Schwankungen der Fallgeschwindigkeit (Vohl, 1989). In wie weit die innere Zirkulation der Tropfen einen Einfluß auf Fallgeschwindigkeit und Oszillation ausübt oder durch die Oszillation unterdrückt wird, ist noch ungeklärt.

Pruppacher und Beard (1969) führten Rechnungen zur Fallgeschwindigkeit aus:

Die Endfallgeschwindigkeit U_∞ in m/s eines Tropfens mit Äquivalentradius a_0 ergibt sich danach zu:

$$U_\infty = \frac{\eta_a N_{Re}}{2\rho_a a_0} \quad 5.5$$

mit η_a dynamische Viskosität der Luft in poise, N_{Re} Reynoldszahl und ρ_a Dichte des Tropfens in g/cm^3 (Pruppacher und Klett, 1997, S. 417).

Erste Experimente zur Fallgeschwindigkeit von Regentropfen machten Gunn und Kinzer (1945) in einem Fallschacht. Windkanalexperimente führten Beard und Pruppacher (1969) durch. In neuerer Zeit wurden In-situ-Messungen der Fallgeschwindigkeit meist mit Film- oder Videokameras durchgeführt (Beard und Tokay, 1995). Dazu wurden in der Regel die Fallstreifen auf den Bildern ausgemessen, da die Belichtungszeiten nicht kurz genug gewählt werden konnten, um die schnellen Regentropfen scharf abzubilden.

In diesen Messungen traten Abweichungen der In-situ-Geschwindigkeiten von Labor- und Windkanalmessungen auf.

Die Größenabhängigkeit der Fallgeschwindigkeit spielt bei Messungen mit dem Distrometer eine Rolle. Um die Meßsignale überhaupt interpretieren zu können, ist die Annahme einer Geschwindigkeitsrelation notwendig. Diese Annahme ist auch unumgänglich, wenn volumenbezogene Größenverteilungen zu berechnen sind (Anhang A).

Mit dem HODAR läßt sich die Fallgeschwindigkeit von Regentropfen in Abhängigkeit von ihrer Größe in-situ messen. Dazu wird eine Doppelbelichtung vorgenommen, so daß jeder Tropfen zweimal abgebildet wird (Abbildung 5.10). Da der zeitliche Abstand der Laserblitze bekannt ist, kann aus dem Abstand der Tropfenbilder der momentane Geschwindigkeitsvektor des Tropfens

TEST UND ERPROBUNG DES HODAR

bestimmt werden. Größen- und Geschwindigkeitsverteilung können gleichzeitig angegeben werden.

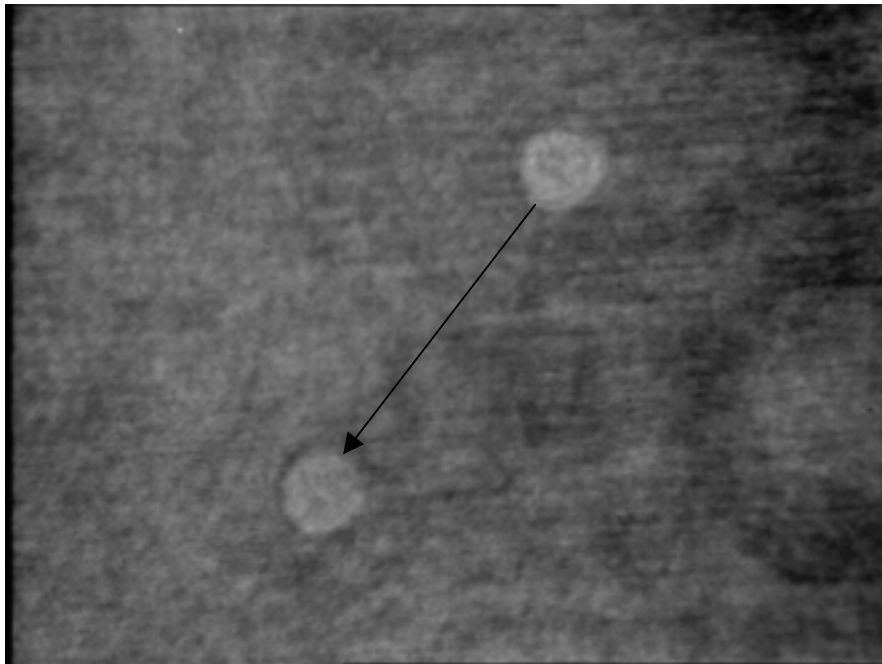


Abbildung 5.10: Doppelbelichtung eines Tropfens zur Bestimmung seiner Fallbewegung. Der Tropfen mit 360 µm Radius hat sich in 800 µs um 2289 µm bewegt.

Abbildung 5.11 zeigt die aus dem Hologramm NK37 bestimmten Fallgeschwindigkeiten der Regentropfen im Vergleich mit der vom Distrometerhersteller zur Größenbestimmung verwendeten empirischen Formel nach Atlas et al. (1973). Eingetragen sind die Fehler in der Geschwindigkeitsbestimmung, der aus dem Positionsfehler resultiert und der Fehler der Größenbestimmung (Anhang B).

Wir finden eine breite Streuung der Meßwerte der einzelnen Tropfen um die empirische Formel herum. Diese Streuung wird vermutlich durch die Turbulenz der Atmosphäre verursacht, die die Tropfen entweder beschleunigt oder abbremst, so daß sie die erwartete Endgeschwindigkeit nicht halten. Auch gibt es Veränderungen der Fallgeschwindigkeit aufgrund der Oszillation der Regentropfen (siehe Abschnitt 5.2.6).

Das HODAR liefert im Bereich $r < 1$ mm Daten, die im Windkanal nur schwer oder gar nicht zu ermitteln sind, da die Tropfen zwischen 500 µm und 1000 µm Radius stark oszillieren und eine instabile Flugbahn haben, so daß sie nicht im Windkanal ausgeschwebt werden können (Mitra, 1997, private Mitteilung).

Die Variationen der Fallgeschwindigkeit sind beträchtlich, wie Abbildung 5.12 zeigt. Dort ist die prozentuale Abweichung von der empirischen Endgeschwindigkeit nach Atlas et al. (1973) gegen die Tropfengröße aufgetragen. Es finden sich für einzelne Tropfen Abweichungen von über 30% der erwarteten Geschwindigkeit. Eine Relation zwischen dem Äquivalenzradius und dieser Abweichung läßt sich daraus aber nicht ableiten.

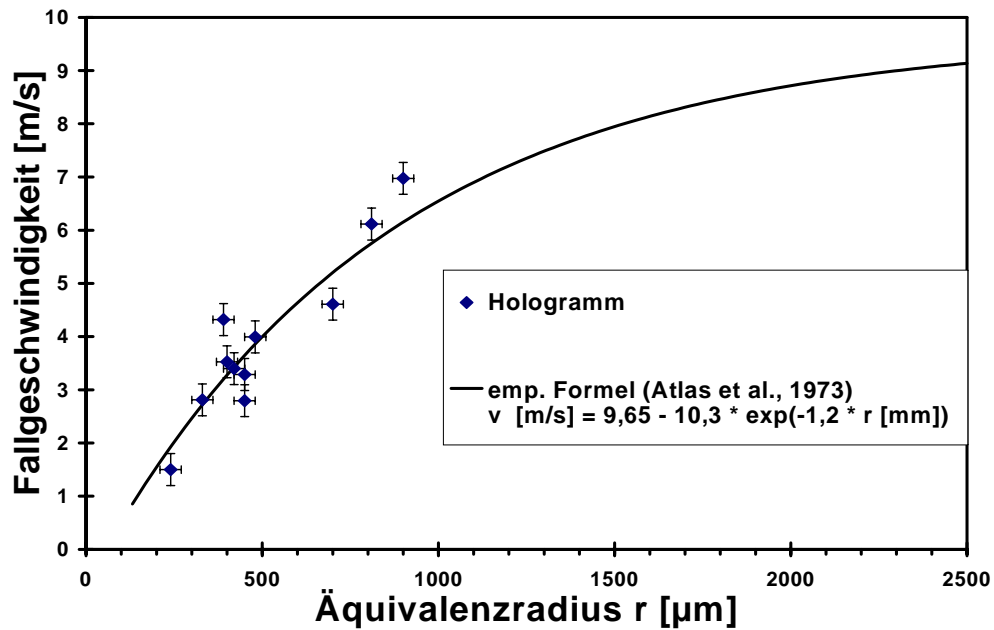


Abbildung 5.11: Die aus NK37 bestimmten Fallgeschwindigkeiten einiger Regentropfen im Vergleich mit der vom Distrometer Hersteller verwendeten Formel von Atlas et al. (1973).

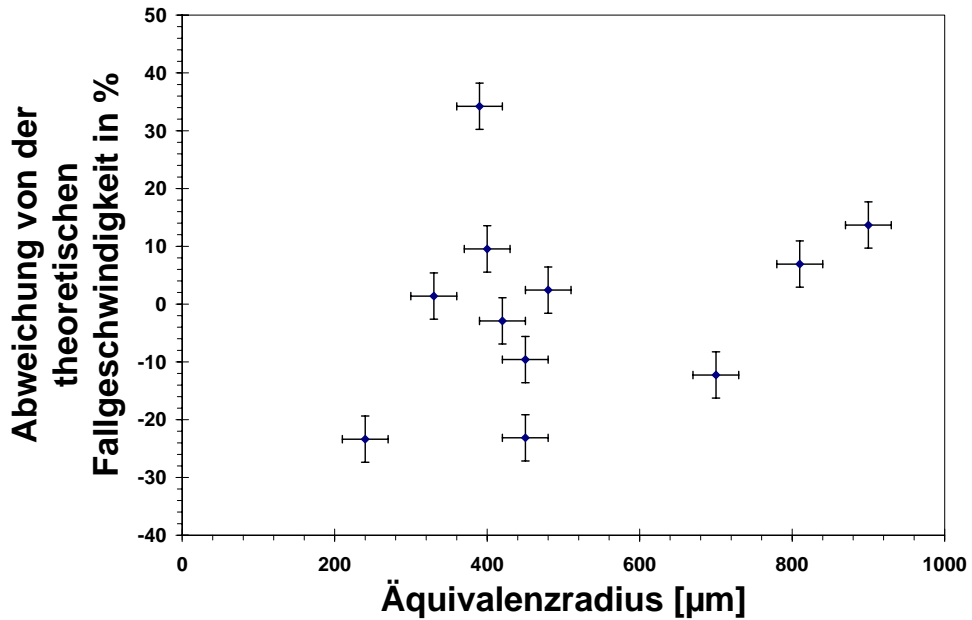


Abbildung 5.12: Die prozentuale Abweichung der experimentellen Fallgeschwindigkeit von der theoretischen in Abhängigkeit von der Tropfengröße.

TEST UND ERPROBUNG DES HODAR

Die Abweichung von der TSV bleibt für die Genauigkeit des Distrometers nicht ohne Konsequenzen:

Das Distrometer mißt den Impuls p des Regentropfens. Dieser wird in ein elektrisches Signal proportional seiner Größe gewandelt. Zwei Tropfen der Geschwindigkeit v_i (m/s) und der Masse m_i (kg) rufen das gleiche Signal hervor, wenn beide den gleichen Impuls haben:

$$m_1 v_1 = m_2 v_2. \quad 5.6$$

Mit der Dichte $\rho_i = \frac{m_i}{V_i}$ (mg/mm³) und $\rho_1 = \rho_2$ ergibt sich:

$$V_1 v_1 = V_2 v_2.$$

Betrachten wir nun den Äquivalenzradius a_{0i} (mm) der Tropfen, d. h. den Radius der mit dem Tropfen volumengleichen Kugel, gilt die Beziehung:

$$\frac{4}{3}\pi a_{01}^3 v_1 = \frac{4}{3}\pi a_{02}^3 v_2. \quad 5.7$$

Dies läßt sich umformen zu:

$$a_{01} = \sqrt[3]{\frac{v_2}{v_1}} a_{02}. \quad 5.8$$

Das heißt die Radien der beiden impuls gleichen Tropfen verhalten sich umgekehrt wie die dritte Wurzel des Verhältnisses der Geschwindigkeiten zueinander. Sei nun $\frac{\Delta v}{v} = 30\%$ (Abbildung 5.12), dann ist $\frac{v_2}{v_1} = 1,3$ und es folgt

$\frac{a_{01}}{a_{02}} = 9\%$. Aus einer Abweichung der Geschwindigkeit von 30 % folgt also eine Abweichung von 9 % in der Größenbestimmung der Tropfen.

Sind über die Größenverteilung hinaus volumenbezogene Anzahlverteilungen gesucht, muß die Abweichung in der Geschwindigkeit auch noch bei der Meßvolumenbestimmung berücksichtigt werden. Da das Meßvolumen V durch die Fallhöhe innerhalb der Meßzeit t multipliziert mit der Sensorfläche A bestimmt ist, ergibt sich:

$$V = A t v, \quad 5.9$$

So folgt für den Volumenfehler des Distrometers ebenso $\frac{\Delta V}{V} = 30\%$.

5.2.5 Form und Achsenverhältnis fallender Tropfen

Wie in Kapitel 2 erwähnt sind Regentropfen nicht rund (siehe auch Abbildungen 5.16 a und b). Aufgrund ihrer Fallbewegung werden die Tropfen von Luft umströmt. Diese Strömung verformt mit zunehmender Geschwindigkeit den Tropfen, der durch die Oberflächenspannung möglichst Kugelform annehmen will. Der Tropfen wird mit zunehmender Größe und Fallgeschwindigkeit immer breiter und flacher und nimmt im Querschnitt eher Nierenform an, d.h. er ist an der Unterseite eingezogen und an der Oberseite gewölbt (Abbildung 5.13 und 5.14).

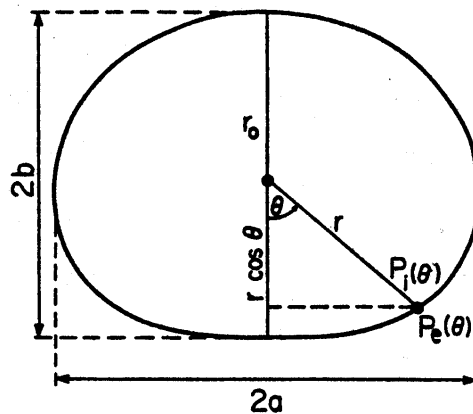


Abbildung 5.13: Schema eines deformierten Regentropfens. Er hat ab einer gewissen Größe als Querschnitt eine Nierenform. Seine Form kann mit den Halbmessern a und b angenähert beschrieben werden (Pruppacher und Pitter, 1971). (Mit freundl. Genehmigung des J. Atm. Sci.)

Diese Form entsteht im Gleichgewicht der Kräfte, die am Tropfen angreifen: das sind die Gewichtskraft, vermindert um den Auftrieb des Tropfens in der Luft; die Oberflächenspannung und die aerodynamische Kraft, die durch die Umströmung entsteht.

Für diese Gleichgewichtsform entwickelten Pruppacher und Pitter (1971) ein Modell:

Das Druckgleichgewicht an jeder Stelle der Tropfenoberfläche kann beschrieben werden in der Form (Bezeichnungen siehe auch Abbildung 5.13):

$$\sigma \left[\frac{1}{R_1(\theta)} + \frac{1}{R_2(\theta)} \right] = p_i(\theta) - p_e(\theta) \quad 5.10$$

θ = Winkel gemessen vom vorderen Stagnationspunkt

p_i = innerer Druck des Tropfens (N/cm²)

p_e = aerodynamischer Druck an der Tropfenoberfläche (N/cm²)

R_1, R_2 = Hauptkrümmungsradien der Tropfenoberfläche (mm)

σ = Oberflächenspannung von Wasser (N mm/cm²)

TEST UND ERPROBUNG DES HODAR

Pruppacher und Pitter (1971) setzen für den inneren Druck:

$$p_i = p_i(\theta = \pi) + g(\rho_w - \rho_a)(r_0 - r \cos \theta) + p_{ic}(\theta) \quad 5.11$$

mit

p_{ic} = Beitrag zum inneren Druck aufgrund der inneren Zirkulation

ρ_w = Dichte von Wasser

ρ_a = Dichte von Luft

r = Abstand des Oberflächenpunktes von Ursprung

$r_0 = r(\pi=0)$

g = Schwerebeschleunigung

und erhielten:

$$\sigma \left[\frac{1}{R_1(\theta)} + \frac{1}{R_2(\theta)} \right] = g(\rho_w - \rho_a)(r_0 - r \cos \theta) - [p_e(\theta) - p_\infty] + p_{ic}(\theta) + [p_i(\theta = \pi) - p_\infty]$$

5.12

Um diese Gleichung lösen zu können, müssen einige Vereinfachungen vorgenommen werden und die Druckverteilung genähert werden. Beard et al. (1989) verbesserten dieses Modell weiter, insbesondere mit Berücksichtigung der experimentell beobachteten eingezogenen Basis von großen Tropfen. Abbildung 5.14 zeigt die von Beard et al. (1989) berechnete Tropfenform. Es sind gestrichelte Kreise mit den angegebenen Radien zum Vergleich unterlegt.

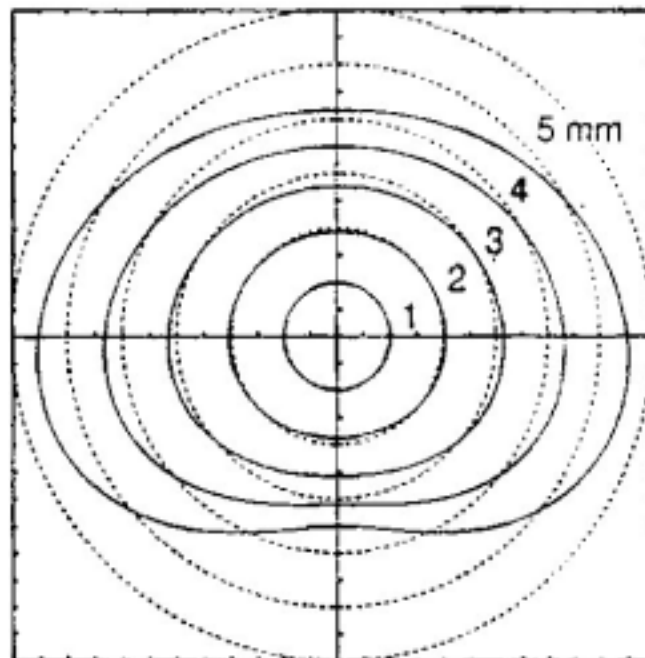


Abbildung 5.14: Die Tropfenform nach Beard et al. (1989). Die gestrichelten Linien geben Kreise mit dem entsprechenden Äquivalentdurchmesser D_0 an. (Mit freundl. Genehmigung des J. Atm. Sci.)

Im Experiment wird meist nur das Achsenverhältnis b/a , d. h. kleine Halbachse b zu großer Halbachse a , bestimmt (Abbildung 5.13). Green (1975) gab eine einfache Modellrechnung zur Bestimmung von b/a , die gute Übereinstimmung mit den experimentellen Daten liefert. Mit dem HODAR ist auch eine Bestimmung der Tropfenform und des Achsenverhältnisses möglich. Dabei muß jedoch bedacht werden, daß die Tropfen meist oszillieren und mit dem HODAR nur ein Schnappschuß der Tropfenoszillation und nicht unbedingt die Gleichgewichtsform der Tropfen aufgenommen wird (siehe auch Abbildung 5.17).

5.2.6 Tropfenoszillationen

Bei diesen Überlegungen ist bisher die Tatsache vernachlässigt worden, daß die Tropfen ab etwa 1 mm Durchmesser anfangen zu oszillieren (Chandrasekar et al., 1988). Rayleigh (1879) bestimmte unter der Annahme einer Potentialströmung um eine Wasserkugel in Luft (Radius a_0 in mm) deren Oszillationsfrequenzen f in (kHz) für kleine Amplituden. Die Grundmode ergibt sich zu:

$$f_{\text{Rayleigh}} = \left(\frac{2\sigma}{\pi^2 \rho_w a_0^3} \right)^{1/2}, \quad 5.13$$

mit der Oberflächenspannung σ in (N/m) und der Dichte von Wasser ρ_w in (g/cm^3).

Das heißt ein Tropfen mit $a_0 = 1$ mm oszilliert mit 121 Hz (Nelson und Gokhale, 1972).

Diese Oszillationen werden durch die Wirbelablösung der turbulenten Umströmung des Tropfens angeregt (Feng und Beard, 1991) und sind bei Resonanz mit der Wirbelablösung besonders ausgeprägt. Sie können beträchtliche Werte erreichen (Trinh und Wang, 1982). Dies kann zum Aufplatzen der Tropfen führen (O'Brien, 1961). Die Oszillation der Tropfen verursacht in einem Windkanal Schwierigkeiten, so daß sich Tropfen im Resonanzfall dort nicht stabil ausschweben lassen. Abbildung 5.15 zeigt nach Beard et al. (1991) die Oszillationsfrequenzen der Schwingungsmoden 2 bis 4 in Abhängigkeit vom Tropfendurchmesser. Der grauunterlegte Bereich markiert die Ablösefrequenzen der hinter dem Tropfen entstehenden Wirbel. Im Bereich von etwa $1,0 \text{ mm} < D_0 < 1,3 \text{ mm}$ überschneiden sich die Oszillationsfrequenz der Grundmode mit der Frequenz der Wirbelablösung und ermöglichen eine Resonanz. Für größere Tropfen ist der Mechanismus noch unklar. Kubesh und Beard (1993) schlagen entweder Resonanzen der Wirbelablösung mit höheren Harmonischen der Oszillation oder eine Frequenzrückkopplung durch Formänderung des Tropfens vor, um eine Anregung durch Wirbel zu ermöglichen. Auch Tropfenkollisionen führen zur Oszillation der beteiligten Tropfen (Johnson und Beard, 1984). Beard et al. (1983) zeigten, daß diese für die Oszillation der Tropfen mit Durchmessern $D_0 > 3 \text{ mm}$ verantwortlich sind. Ebenso können stark turbulente Luftschichten die hindurchfallenden Regentropfen zu Oszillationen anregen (Jones, 1959).

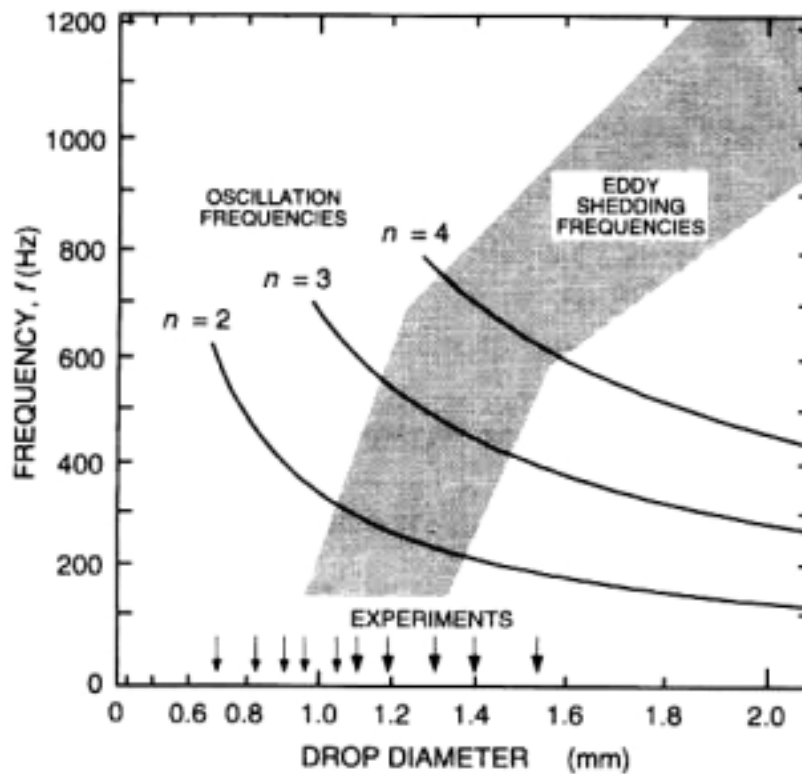


Abbildung 5.15: Oszillationsfrequenzen in Abhängigkeit von der Tropfengröße nach Beard et al. (1991). (Mit freundl. Genehmigung des J. Atm. Sci.)

Bei den mit dem HODAR aufgenommenen Regentropfen lassen sich die Halbachsen a und b direkt ausmessen, geben jedoch einen Momentanwert der Oszillation an, der meistens nicht mit dem Gleichgewichtswert übereinstimmen wird.

Abbildung 5.16 zeigt zwei mit dem HODAR aufgenommene Regentropfen (NK16) mit $280 \mu\text{m}$ und 3 mm Durchmesser. Der kleine Tropfen ist praktisch rund, der große hingegen deutlich deformiert.

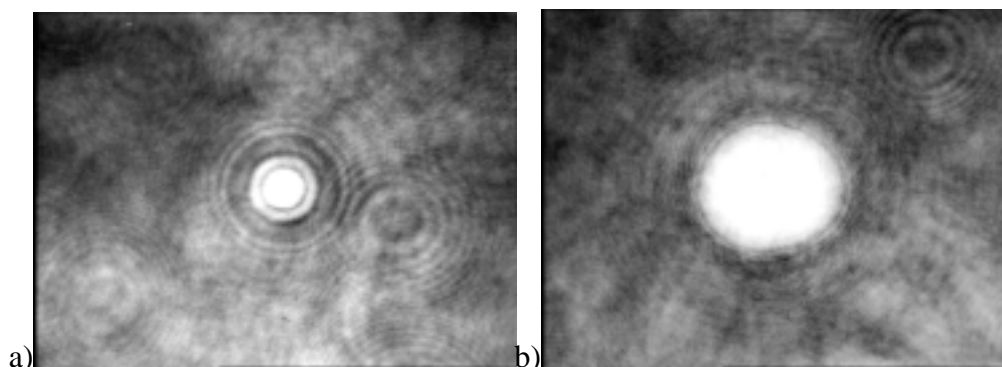


Abbildung 5.16: Ein kleiner Regentropfen mit $280 \mu\text{m}$ Durchmesser (a) und ein großer Regentropfen mit 3 mm Durchmesser (b). Der kleine ist noch rund, der große dagegen schon abgeplattet.

TEST UND ERPROBUNG DES HODAR

Abbildung 5.17 zeigt den Regentropfen mit 3 mm Durchmesser im Vergleich zum Modell von Beard et al.(1989). Es zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung. Die Aufnahme wurde bei Windstille gemacht und der Tropfen oszillierte nur schwach oder gar nicht, so daß er die Gleichgewichtsform annahm.

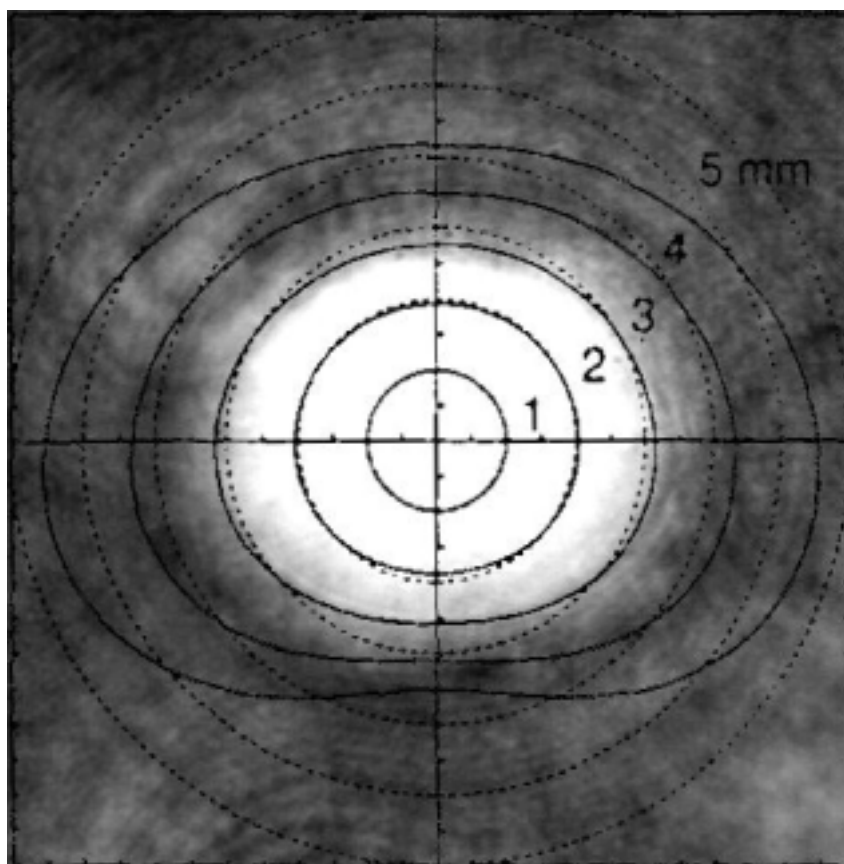


Abbildung 5.17: Vergleich eines Regentropfens aus Hologramm NK16 mit der Gleichgewichtsform nach dem Modell von Beard et al. (1989). Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung des 3 mm großen Tropfens mit dem Modell.

Für die großen Tropfen aus NK16 und NK37 wurden die b/a - Werte bestimmt. Obwohl dies Momentanwerte der Tropfenoszillation sind, wurden sie zum Vergleich in ein Diagramm, entnommen aus Pruppacher und Klett (1997), mit dem Gleichgewichtsverhältnis in Abhängigkeit von der Tropfengröße eingetragen (Abbildung 5.18). Darin sind die experimentellen und theoretischen Ergebnisse für das Gleichgewichtsverhältnis von mehreren Forschergruppen dargestellt. Einige Meßwerte des HODAR liegen sehr nahe an den Gleichgewichtswerten. Hingegen zeigen sich im Bereich zwischen 1 und 2 mm Durchmesser große Abweichungen nach oben und unten, dort sind die größten Schwingungsamplituden zu erwarten. Die Abweichungen betragen bis zu 14,4 %.

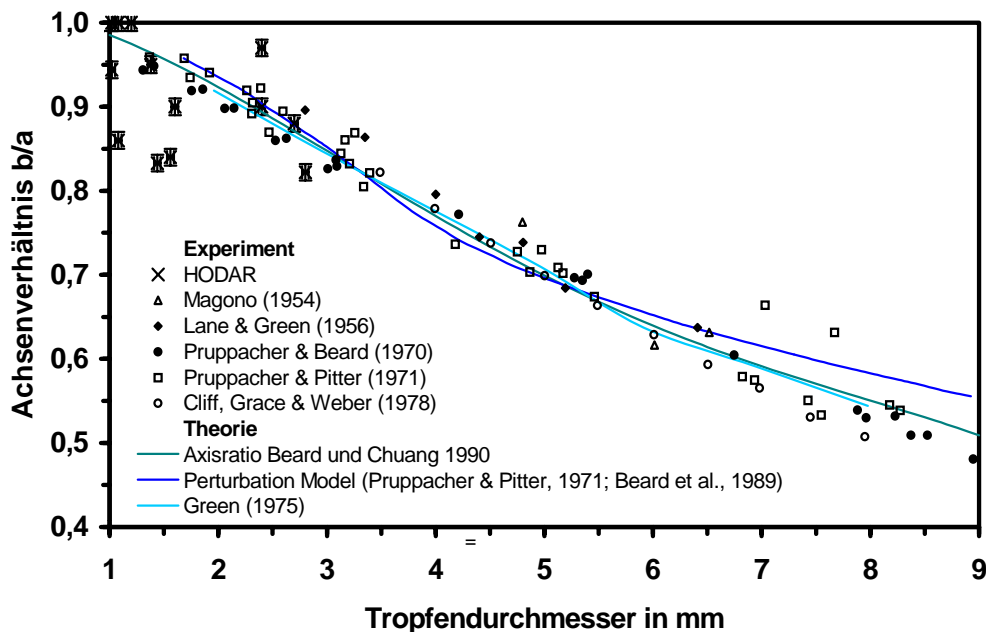


Abbildung 5.18: Achsenverhältnisse b/a von Regentropfen. Die Abbildung wurde Pruppacher und Klett, 1997 entnommen und Werte, die mit dem HODAR bestimmt wurden zusätzlich eingetragen. Es ist wegen der Übersichtlichkeit nur der Fehler des HODAR für das Achsenverhältnis dargestellt. Dabei ist zu beachten, daß die Grafik b/a für die Gleichgewichtsform der Tropfen darstellt, die Messung mit dem HODAR jedoch nur Momentanwerte der Tropfenszillation liefert. Dennoch kann damit gezeigt werden, daß in-situ große Abweichungen von der Gleichgewichtsform d.h. große Schwingungsamplituden auftreten.

5.2.7 Oszillation und Fallgeschwindigkeit

Es liegt nahe, daß die Oszillation eines Tropfens auch auf seine Fallgeschwindigkeit zurückwirkt. So sollte der Tropfen stärker gebremst werden, wenn er stärker als die Gleichgewichtsform abgeplattet ist. Diese Abbremsung bewirkt jedoch eine Verminderung der Abplattung. Ist hingegen der Tropfen zu rund, also zu gering abgeplattet, sollte er schneller fallen und durch die größere Reibung stärker abgeplattet werden.

Da der Tropfen selbst schon ein schwingungsfähiges System ist, stellt dies eine Selbststeuerung dar, die je nach Parameterlage zur Selbsterregung, Stationarität oder Dämpfung der Tropfenszillation führen kann.

In Abbildung 5.19 ist die Abweichung der Fallgeschwindigkeit gegen das Achsenverhältnis für die Tropfen aus NK37 aufgetragen. Die Fehlerbalken resultieren aus dem Größen- und dem Positionsfehler des HODAR (siehe Anhang B).

Es läßt sich aufgrund dieser Daten nicht auf einen Zusammenhang schließen. So ist hier wohl der Einfluß der atmosphärischen Turbulenzen auf die Fallgeschwindigkeit größer als der Einfluß des Achsenverhältnisses.

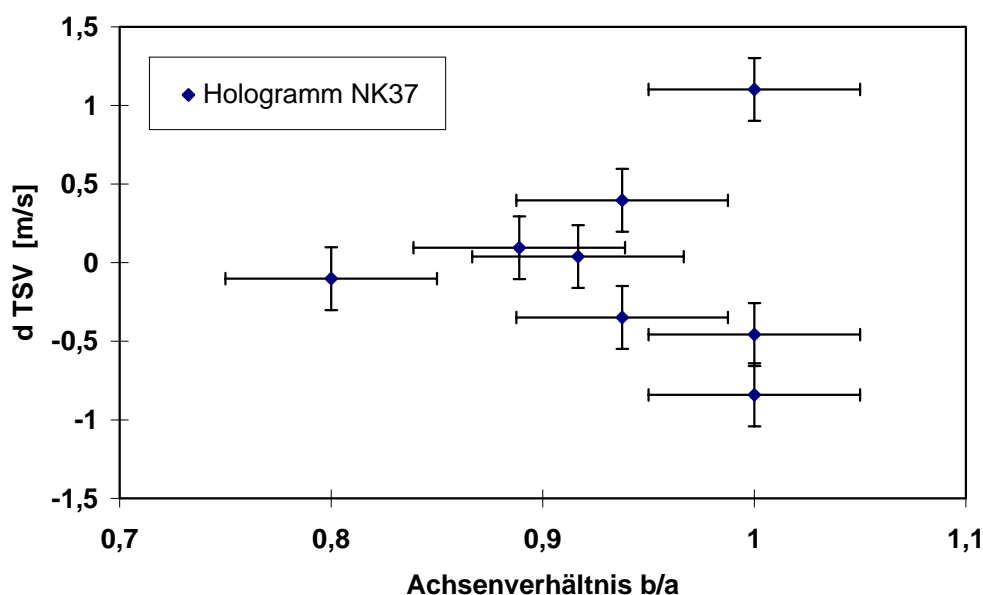


Abbildung 5.19: Abweichung von der Fallgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Achsenverhältnis b/a.

5.2.8 Abstände zwischen den Hydrometeoren

Als einziges Verfahren ist die Holographie in der Lage die tatsächlichen Abstände der Hydrometeore in allen drei Raumrichtungen zu bestimmen und genauere Aussagen über die räumliche Struktur von Wolkenvolumina (Borrmann, Jaenicke und Neumann, 1993, Uhlig, 1996) oder Niederschlagsereignissen zu machen. Abbildung 5.20 zeigt für das Regenhologramm NK16 Projektionen des Meßvolumens auf die waagrechte und senkrechte Längsebene und auf die Querschnittsfläche.

Die Abstandsangaben beziehen sich auf die Entfernung der Objekte von der optischen Achse bzw. der Objektebene der Abbildungslinse.

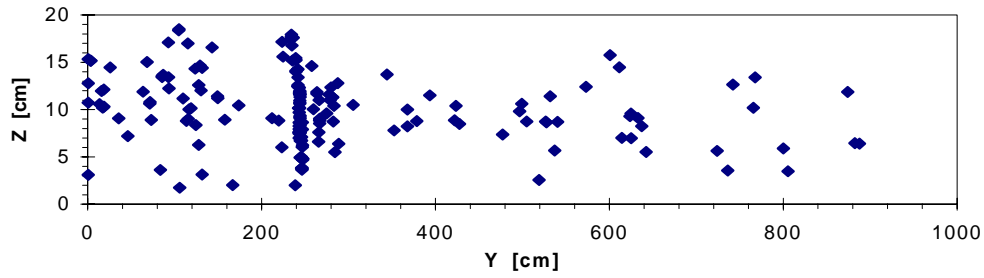
Die Konzentration auf die Mitte der jeweiligen Fläche resultiert aus der Zylinderform des Meßvolumens. Dessen Dicke ist in der Mitte viel größer als am Rand und beinhaltet somit auch mehr Objekte.

Deutlich ist eine höhere Konzentration im vorderen Bereich des Volumens ($0 < y < 220$) zu sehen. Diese entsteht durch die in Abschnitt 4.3 beschriebenen virtuellen Bilder der Objekte zwischen der Linse der Aufnahmeapparatur und deren Urbildebene. Die scheinbare Lage der Linsenfläche im Meßvolumen ($y = 220$) ist in Abbildung 5.20 auch deutlich zu erkennen. Auf dieser fanden sich viele deponierte Tropfen.

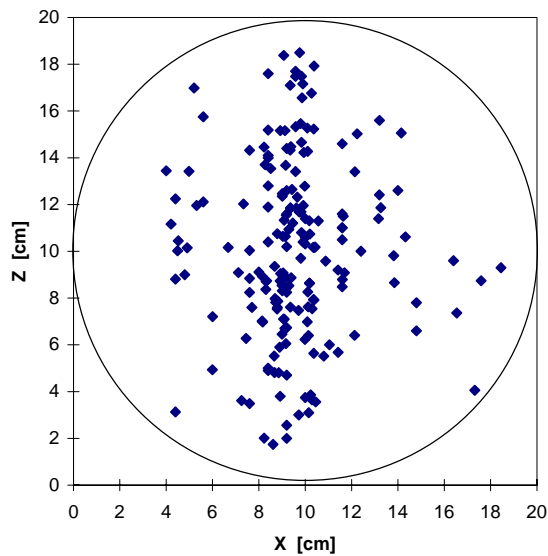
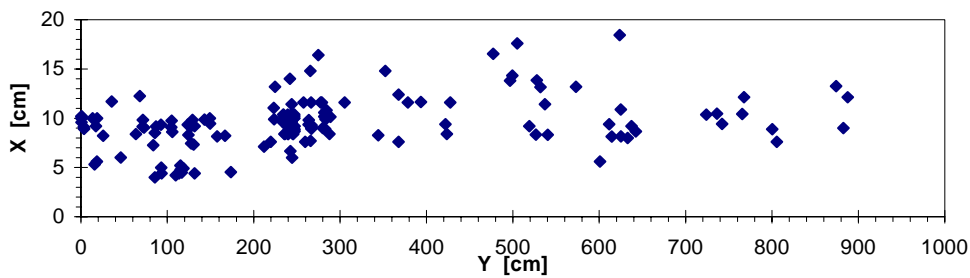
Im hinteren Teil jenseits des Überlappungsbereiches ($y > 220$) zeigt sich eine deutliche Ballung der Tropfen in einzelne Gruppen. Bedingt durch den Abbildungsmaßstab scheinen die Tropfen innerhalb dieser sehr nah zusammen zu sein. Die Vergrößerung eines Ausschnittes (Abbildung 5.21) stellt den tatsächlichen Sachverhalt dar.

TEST UND ERPROBUNG DES HODAR

a)



b)



c)

Abbildung 5.20: Projektionen des HODAR-Meßvolumens von Hologramm NK16. a) Seitenansicht, b) Draufsicht und c) Querschnitt.

Wie eigene Beobachtungen von Regenfällen zeigten, weisen diese besonders in Böen eine deutlich inhomogene Verteilung der Tropfen im Raum auf. So wechseln oft dichte Bereiche mit lichterem ab. Dieser Umstand müßte die Kollisionswahrscheinlichkeit der Tropfen deutlich erhöhen (Vohl et al., 1996).

TEST UND ERPROBUNG DES HODAR

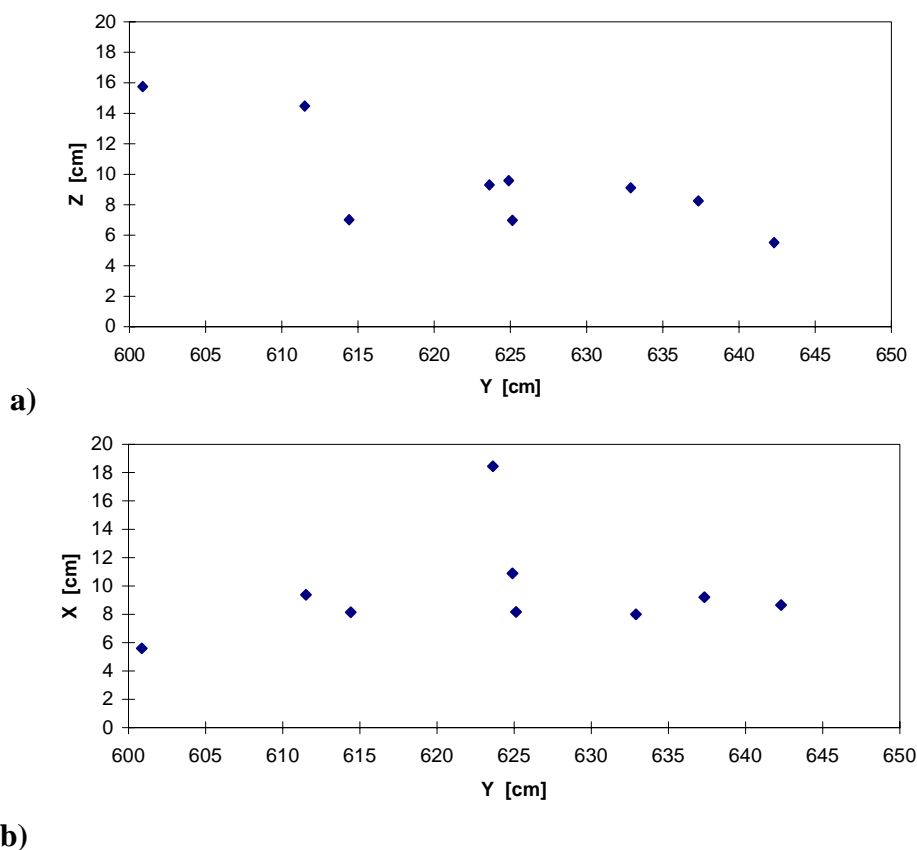


Abbildung 5.21: Ausschnittvergrößerung aus Abbildung 5.21, a) Draufsicht, b) Ansicht.

Aus der Tropfenanzahl N und dem Meßvolumen V kann die mittlere Konzentration C der Tropfen bestimmt werden:

$$C = \frac{N}{V} \quad 5.14$$

Der Kehrwert von C ist das Volumen, das jeden Tropfen umgeben würde, wenn alle Tropfen gleichmäßig verteilt wären. Daraus ergibt sich der mittlere Abstand der Tropfen:

$$a_m = \sqrt[3]{\frac{1}{C}} \quad 5.15$$

Für NK16 beträgt $C = 0,65$ Tropfen pro dm^3 . Das entspricht einem mittleren Abstand a_m von 11,8 cm. Dies ist mehr als der Radius des Meßvolumens, so daß sich der nächste Nachbar oft außerhalb des Meßvolumens befindet. Dies wird als Wandeffekt bezeichnet.

Der relative Abstand $a_{k,rel}$ der Tropfen untereinander ist der Quotient aus dem Abstand zum nächsten Nachbarn a_i und dem Radius r_i des Tropfens i :

$$a_{i,rel} = \frac{a_i}{r_i} \quad 5.16$$

TEST UND ERPROBUNG DES HODAR

Abbildung 5.22 gibt die kumulativen Verteilungen der relativen Abstände $a_{k,rel}$ der nächsten und der übernächsten Nachbarn aus NK16 und NK25 wieder. Für NK16 wurden die Abstände im korrigierten Fall nur von den Tropfen berücksichtigt, deren Position eindeutig festgelegt werden kann. Im unkorrigierten Teil wurden auch die Tropfen einbezogen, die sich auch vor der Objektebene der Kameralinse befinden haben können. Auch im korrigierten Fall liegt ein großer Teil der Tropfen (über 25 %) näher als 50 Radien zusammen. Für NK25 werden insgesamt größere Abstände gefunden und der größte Teil der Tropfen (90%) liegt weiter als 100 Radien auseinander. Die beobachteten Gruppierungen können durch das Aufplatzen größerer Tropfen entstanden sein.

Diese Betrachtungen zeigen nur die Möglichkeiten der Holographie auf. Streng genommen ist die Zahl der untersuchten Tropfen zu klein und das Volumen so eng begrenzt, daß Wandeffekte eine deutliche Rolle spielen (Neumann, 1992). Dieser Befund sollte aber weiter untersucht und in neuen Modellrechnungen berücksichtigt werden, da bisher davon ausgegangen wurde, daß die Tropfen Abstände über 100 Radien voneinander haben und sich daher nicht gegenseitig beeinflussen.

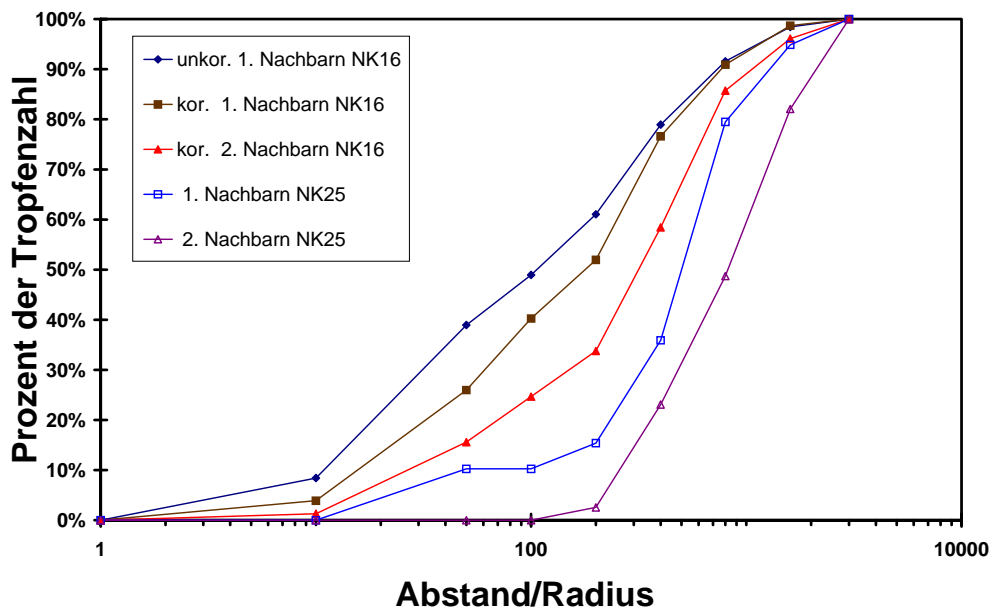


Abbildung 5.22: Relative Abstände der nächsten und übernächsten Nachbarn in NK16 und NK25. Es wird der prozentuale Anteil der Tropfen angegeben, die näher als 10, 50, 100, usw. Radien benachbart sind.

5.2.9 Artunterscheidung der Niederschlagsteilchen

Bei der Entstehung von Niederschlag wird zwischen „kalten“ und „warmen“ Prozessen unterschieden, je nachdem ob in der Wolke die Eisphase auftritt oder nicht. Oft treten in unseren Breiten die „kalten“ Niederschlagsereignisse auf, bei denen dann sowohl flüssiger als auch gefrorener Niederschlag fallen kann, so zum Beispiel Gewitterschauer mit Hagel im Sommer oder in Regen übergehender Schnee in Frühjahr und Herbst. Auch reine Eisniederschläge beinhalten eine große Variation von Niederschlagsteilchen, wie Graupel, Eiskörner und verschiedenste Arten von Eiskristallen, wie schon Tabelle 2.4 (Magono und Lee, 1965) zeigt. Die Modellierung kalter Wolkenphysik ist schwierig, da sich Eisteilchen und Tropfen stark im Verhalten unterscheiden und die Interaktionsmöglichkeiten der Teilchen miteinander stark ansteigen, so müssen z. B. Phasenübergänge wie das Gefrieren und das Schmelzen der Teilchen berücksichtigt werden. Auch liegen nicht genügend Beobachtungsdaten für viele Prozesse vor, um die Modelle zu validieren oder neue Modellansätze zu entwickeln. Daher ist es wichtig, Meßverfahren zu entwickeln, die in der Lage sind die verschiedenen Typen von Niederschlagsteilchen zu unterscheiden.

Ein reines Regeninstrument wie das Distrometer ist nicht in der Lage derartige Niederschlagsereignisse zu messen, da Eiskristalle andere Dichten und erheblich andere Fallgeschwindigkeiten haben als Regentropfen. Somit kann ein Zählimpuls des Gerätes nicht mehr eindeutig identifiziert werden.

Mit dem HODAR ist eine solche Artunterscheidung der Hydrometeore möglich. Derzeit muß dann auf eine automatische Auswertung verzichtet werden, jedoch ist prinzipiell auch eine automatische Identifizierung der Eisteilchen denkbar.

Im November 1995 wurde während der FELDEX - Meßkampagne ein „kaltes“ Niederschlagsereignis auf den Hologrammen NK15 bis NK20 festgehalten: Beim Durchzug einer Kaltfront ging der Niederschlag von Regen (Hologramm NK16, 15.11.95, 19:03 UTC) in Schnee (Hologramm NK20, 16.11.95, 10:02 UTC) über.

In der Eisphase auf Hologramm NK20 konnten drei verschiedene Typen von Hydrometeoriten identifiziert werden: Graupel, Eisnadeln und Schneeflocken. Die Abbildungen 5.23 bis 5.25 zeigen jeweils einen Vertreter dieser Typen. Die Abbildungen 5.23 und 5.25 zeigen, daß trotz gleicher Maximallänge erhebliche Volumenunterschiede der einzelnen Hydrometeore auftreten können.

Abbildung 5.26 zeigt die Größenverteilungen, die für diese Typen in Hologramm NK20 bestimmt werden konnten. Es wurde ein Volumen von 140,7 dm³ ausgewertet. Darin befanden sich insgesamt 437 Eisteilchen, davon waren 64 Schneeflocken, 345 Graupel und 28 Eisnadeln. Da die Eisteilchen nicht rund sind, wurde nicht der Radius, sondern die maximale Objektlänge als Ordinatenachse gewählt.



Abbildung 5.23: Eine Eisnadel mit 1000 μm Länge, 2m vor der Kamera.

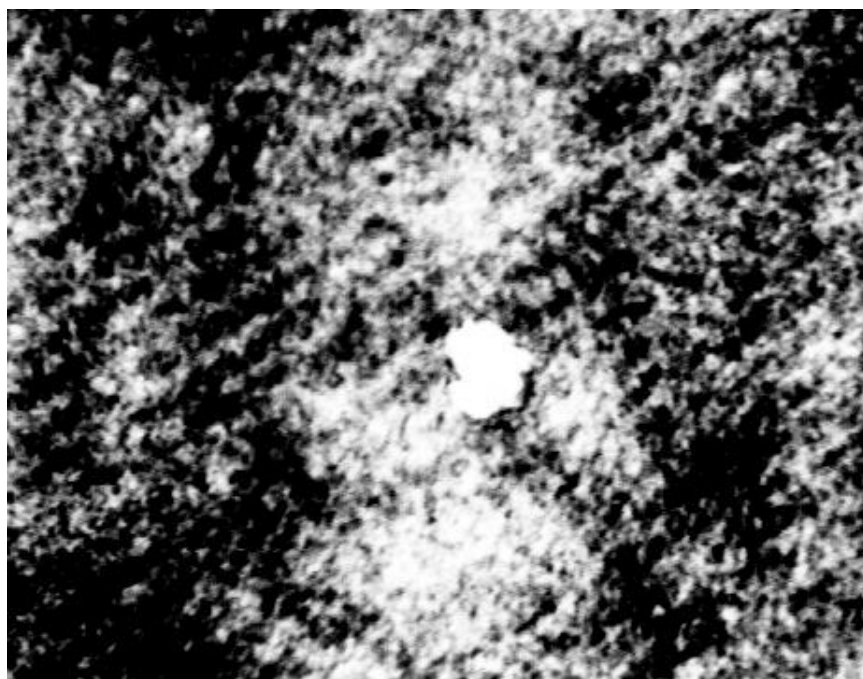


Abbildung 5.24: Ein Graupelartikel mit einem maximalen Durchmesser von 1000 μm , 2,30 m von der Kamera entfernt.

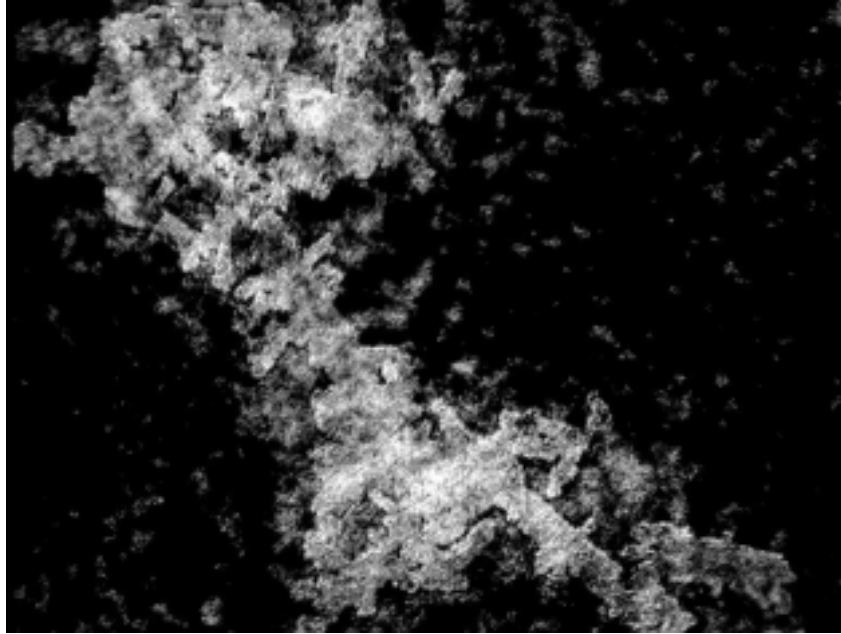


Abbildung 5.25: Eine Schneeflocke mit einer maximalen Länge von 11 mm, 2,50 m vor der Kamera. Es sind deutlich Teile der Schneeflocke zu erkennen, die nicht in der Schärfenebene der Abbildung liegen.

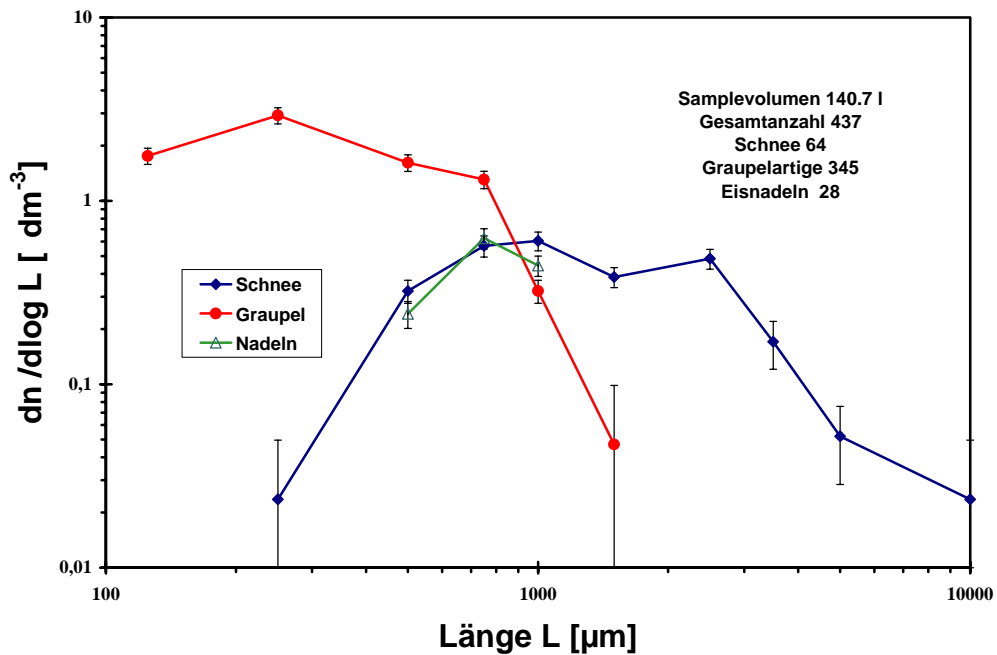


Abbildung 5.26: Größenverteilung der drei in NK20 identifizierten Typen von Eisteilchen. Der Fehler resultiert im wesentlichen aus dem Zählstatistischen fehler $\Delta N = \sqrt{N}$.

Der Größenbereich der Schneeflocken erstreckt sich von 250 μm bis zu 10 mm und weist ein Maximum bei 1000 μm und ein weiteres bei 3000 μm auf.

Die Größe der Graupelteilchen reicht von 150 μm bis 1500 μm , erreicht ihr Maximum aber bei 250 μm , das ist ein wesentlich kleinerer Wert als der der Schneeflocken. Möglicherweise konnten die Graupel nicht so lange vom Aufwind getragen werden, da sie viel kompakter sind als die Schneeflocken und das kritische Gewicht bei kleineren Abmessungen erreichen.

Die Eisnadeln haben Längen zwischen 500 μm und 1000 μm bei gleichen Dicken von etwa 100 μm . Ihr Maximum liegt bei 750 μm . Längere Nadeln als 1000 μm scheinen nicht mehr stabil zu sein und zu zerbrechen. So bestanden die gefundenen Schneeflocken oft aus solchen Nadeln, die daher als Ursprungsform dieser Schneeflocken gelten können.

5.2.10 Eiskristalle und Schneeflocken

Wie schon in Kapitel 2.2.5 dargelegt ist die Morphologie der Eiskristalle und deren Zusammenballungen, den Schneeflocken, sehr vielgestaltig (siehe auch Pruppacher und Klett, 1997, Magono und Lee, 1966). So lassen sich nur schwer aussagefähige Maße zur Beschreibung einer Schneeflocke finden. Die maximale Länge, die Masse oder das Volumen sind nur sehr unzulängliche Begriffe. Besser geeignete wie die fraktale Dimension oder eine querschnittsbezogene Massenverteilung sind allerdings komplizierte Maße, die im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr behandelt werden können. Deshalb soll hier an einigen Bildern aus Hologrammen von Schneeflocken nur veranschaulicht werden, was aus mit dem HODAR aufgenommenen Hologrammen ermittelt werden könnte.

(Einen Überblick über die ganze Breite der mit Schneeflocken verbundenen Problemstellungen vermitteln z.B. die Kapitel 2.2 und 10.5 aus Pruppacher und Klett (1997).)

Abbildung 5.25 zeigt eine Schneeflocke mit maximaler Länge von 10 mm. Ihre Unterstruktur ist deutlich erkennbar, sie besteht aus nadelförmigen Eiskristallen von einigen 100 μm Länge. Ihre Lage im Raum ist ungefähr 40° gegen die Horizontale geneigt. Im Bild erkennt man scharfe und unscharfe Bereiche, die hier in 2-dimensionaler Abbildung die Tiefeninformation wiedergeben. Bewegt man den Kamerafokus durch das Hologramm werden wieder andere Bereiche scharf und die Tiefenausdehnung der Schneeflocke kann daraus ermittelt werden. Aus den 3-dimensionalen Daten ließe sich dann ihr Schwerpunkt und z.B. der Angriffspunkt des Strömungswiderstandes bestimmen.

Eine wesentlich kompaktere Schneeflocke (7 mm) mit einigen antennenartigen Auswüchsen ist auf Abbildung 5.27 zu sehen. Ein ähnliches Beispiel ist Abbildung 5.28. Auf den Abbildung 5.29 ist eine gänzlich andere Art von Eiskristall zu finden, eine hexagonale Platte (700 μm) mit kleinen fingerartigen Aufwüchsen. Ein fragileres Gebilde ist die Schneeflocke auf Abbildung 5.30. Sie besteht aus stäbchenförmigen Kristallen und sieht aus wie ein Ballontier. Abbildung 5.31 zeigt ein Einzelteil von Abbildung 5.30, einen stäbchenförmigen Kristall. Auf ihm sind deutlich fingerartige Aufwüchse zu erkennen. Ein anderes Fundstück ist Abbildung 5.32, ein kastanienartiges Objekt. Möglicherweise ist es

TEST UND ERPROBUNG DES HODAR

biologischen Ursprungs und kein Hydrometeor. Ein Graupelkorn mit golfballähnlicher Oberfläche (500 μm) zeigt Abbildung 5.33.

Mehrfachbelichtungen von Schneeflocken können auch deren Fallgeschwindigkeiten und Drehbewegungen festhalten. Abbildung 5.34 zeigt dazu ein Beispiel: Eine recht kompakte Schneeflocke (Höhe ca. 1000 μm) ist deutlich erkennbar zweimal abgelichtet. Ihre Fallbewegung war nur translatorisch ohne Rotation.

Ihre Fallgeschwindigkeit kann mit etwa $1200 \pm 30 \mu\text{m} / 800 \pm 10 \mu\text{s} = 1,5 \pm 0,03 \text{ m/s}$ bestimmt werden.

Mit dem HODAR wurden in 12 m Entfernung von der Kamera noch 1000 μm große Schneeflocken gefunden. An diesen waren Details in der Größenordnung von 100 μm erkennbar. 100 μm große Teilchen selbst konnten vom Hintergrund-Speckle nicht mehr unterschieden werden.

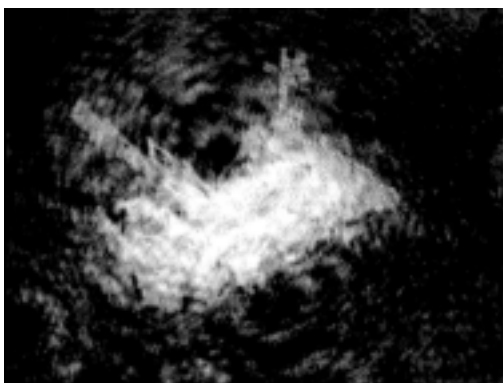


Abbildung 5.27: Eine Schneeflocke mit antennenartigen Auswüchsen, 7 mm breit, 4,50 m vor der Kamera.

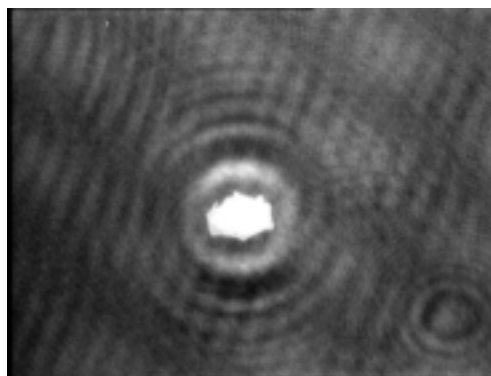


Abbildung 5.29: Ein Eiskristall: Eine hexagonale Platte mit fingerartigen Auswüchsen, 700 μm breit, 15 cm vor der Kamera.

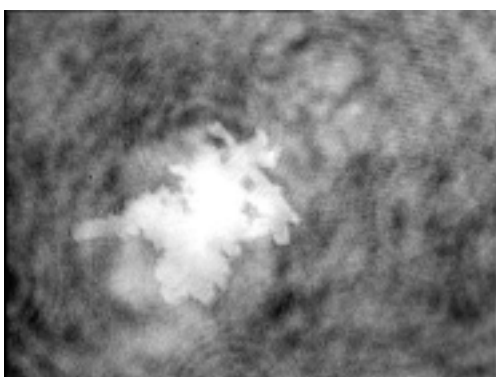


Abbildung 5.28: Eine Schneeflocke, 5 mm hoch, 4 m vor der Kamera.

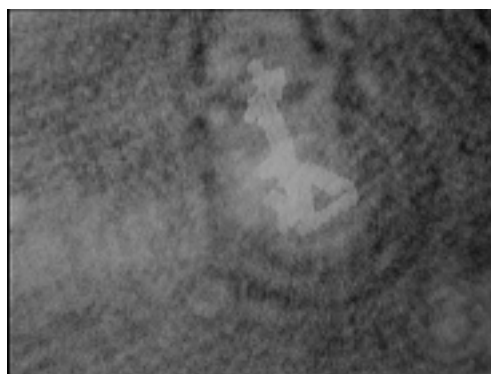


Abbildung 5.30: Eine Schneeflocke aus stäbchenförmigen Kristallen zusammengesetzt, 6 mm hoch, 6,40 m vor der Kamera.

TEST UND ERPROBUNG DES HODAR

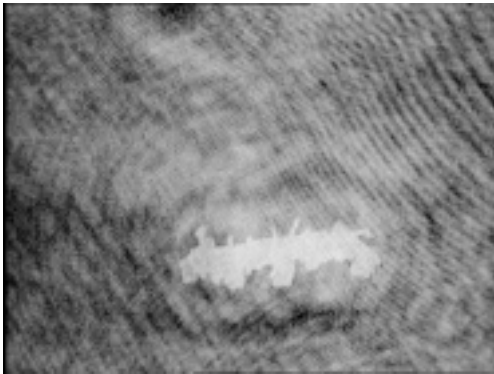


Abbildung 5.31: Fingerartige Anwüchse auf einem stabförmigem Kristall (1500 μm). 1,50 m vor der Kamera.

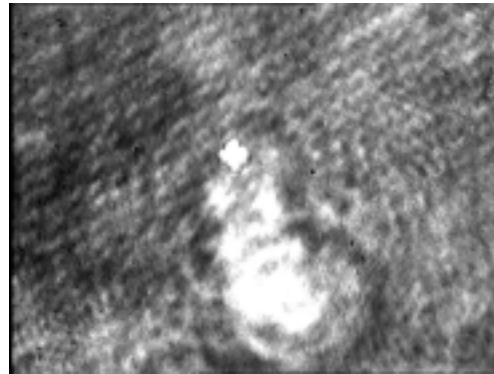


Abbildung 5.33: Ein golfballartiges Graupelkorn, 500 μm groß, 1 m vor der Kamera. Im Hintergrund eine weitere unfokussierte Schneeflocke.

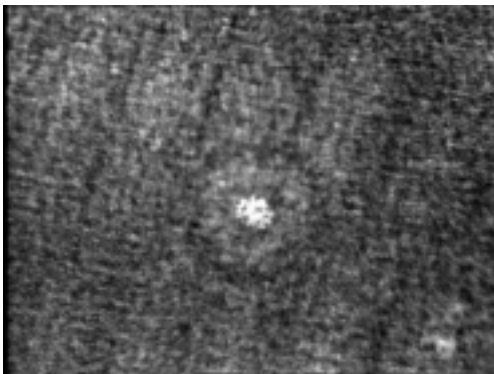


Abbildung 5.32: Ein kastanienartiges Objekt, 500 μm lang, 25 cm vor der Kamera, biologischen Ursprungs?

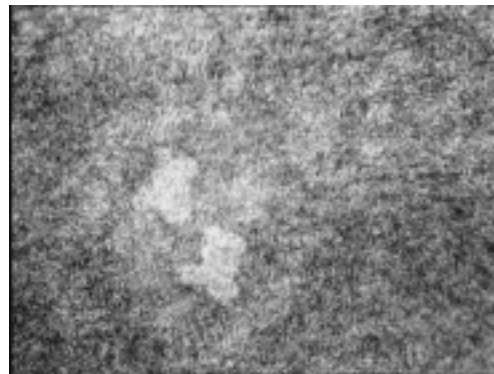


Abbildung 5.34: Doppelbelichtung einer Schneeflocke 1000 μm , 7,5 m vor der Kamera. Ihre Fallbewegung war rein translatorisch ohne Rotation.

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In der vorliegenden Arbeit wird ein Meßgerät beschrieben, das in einem Volumen von etwa 500 Litern große Hydrometeore (100 μm bis einige 10 mm) in-situ holographisch aufnehmen kann.

Mit der holographischen Methode ist die Aufnahme von Größen- und Geschwindigkeitsverteilungen innerhalb eines definierten Meßvolumens zu einem Zeitpunkt möglich. Es wurden dazu als Beispiele die Größenverteilungen der Hologramme NK16, NK20, NK25 und die Geschwindigkeitsverteilungen der Hologramme NK46, NK37 angeführt.

Ein Vergleich mit dem Distrometer nach Joss und Waldvogel (1967) zeigte starke Unterschiede in den resultierenden Größenverteilungen, obwohl die Distrometerdaten auch bei längerer Mittelung stabil blieben. Kleine Tropfen wurden vom Distrometer im Vergleich zum HODAR unterschätzt. Eine weitere Untersuchung dieses Umstandes ist von großer Bedeutung für die Niederschlagsmessung.

Durch Doppelbelichtungen ist die Bestimmung der Geschwindigkeitsvektoren der holographierten Tropfen möglich. Damit kann die Fallgeschwindigkeit von Regentropfen in Abhängigkeit von ihrer Größe untersucht werden. In ersten Messungen fand sich eine breite Streuung der Einzelwerte um die mittlere TSV, die erhebliche Abweichungen der In-situ-Geschwindigkeiten von Labor- und Windkanalmessungen vermuten läßt. Diese Abweichungen und ihre Ursachen sollten näher erforscht werden.

Eine Formbestimmung der aufgenommenen Objekte, auch schnell fallender Regentropfen ist möglich: So wurden die Form und das Achsenverhältnis fallender Regentropfen an einigen Beispielen erläutert. Dabei ist jedoch zu beachten, daß das HODAR Momentaufnahmen der Tropfenoszillation liefert und daher meist nicht die Gleichgewichtsform der Tropfen aufgenommen wird. Eine weitere Untersuchung des Achsenverhältnisses und der Schräglage der Tropfenbasis bei Seitenwind (Canting) ist von Bedeutung für die Radarmeteorologie: Die Radarreflektivität der Tropfen hängt direkt vom Achsenverhältnis ab. Der Radarstrahl ist jedoch linearpolarisiert, so daß nur die senkrechte Komponente des Achsenverhältnisses sich auf die Reflektivität auswirkt. Deshalb muß das Radarsignal bei stärkeren Windverhältnissen entsprechend interpretiert werden.

Gleichzeitig zum Achsenverhältnis kann auch die Fallgeschwindigkeit der Tropfen bestimmt werden, so daß eine Untersuchung des Zusammenhangs von Tropfenform und Fallgeschwindigkeit möglich wird.

Die Holographie ist das einzige Verfahren mit dem die Abstände der Hydrometeore direkt bestimmt werden können. Auswertungen der Abstände in mit dem HODAR gewonnenen Hologrammen zeigen, daß bis zu 50% der Regen-

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

tropfen dichter als 100 Radien von einander entfernt sind. Auch von den zweiten Nachbarn liegen noch bis zu 25% innerhalb des 100-Radien-Abstandes. Eine Beeinflussung der Tropfen untereinander ist also recht wahrscheinlich. Weitere Untersuchungen des Abstandes müssen den Einfluß der Wandeffekte klären und sollten eine genauere Kenntnis des – im Modell bisher nur angenommenen – unabhängigen Wachstums der einzelnen Tropfen voneinander und der Koaleszenz- und Kollisionswahrscheinlichkeiten ermöglichen.

Weiterhin können Messung von Ereignissen mit Hydrometeoren in verschiedenen Phasen, wie Schneeregen, aufschmelzende Graupel, Gewitterschauer mit Hagel, etc. durchgeführt werden. In diesen ist eine Artunterscheidung der Hydrometeore möglich. In Hologramm NK20 konnten drei verschiedene Typen von Eisteilchen identifiziert werden: Eisnadeln, Graupelteilchen und Schneeflocken aus Eisnadeln. Solche Messungen liefern Informationen zur Entstehung von kalten Niederschlagsereignissen (d.h. mit Beteiligung der Eisphase).

Die Eigenschaften von Schneeflocken können mit Hilfe des HODAR detailliert untersucht werden. So lassen sich z.B. aus Fluglage und Massenverteilung, die aus den holographischen Aufnahmen gewonnen werden können, die aerodynamischen Eigenschaften der Schneeflocken bestimmen. Diese haben Auswirkungen auf Umströmung und Fallzeit, die wichtige Parameter für die Stoffaufnahme durch Schneeflocken sind (Diehl, 1995).

Eine wichtige Grundlage für alle weiteren Untersuchungen ist die technische Weiterentwicklung der Apparatur in zweierlei Hinsicht:

1. Eine schnellere automatische Auswertung auch für nicht runde und unscharf begrenzte Objekte führt zu einer Verbesserung der Datengrundlage. Da heute deutlich mehr Rechenleistung zur Verfügung steht, könnten auch kompliziertere Algorithmen zur Objekterkennung herangezogen werden (Bässman und Beselich, 1989, Pavlidis, 1992). Beachtenswerte Möglichkeiten bieten auch Vikram (1996) und Widjaja (1998). Ein mehr würfelförmiges Meßvolumen würde dabei die Randfehler verkleinern und auch die Bildqualität verbessern, was bei der automatischen Auswertung Vorteile bieten würde.
2. Ein kleinerer Aufbau (besonders der Versorgungseinheiten des Lasers) würde die Mobilität der Anlage erhöhen und ihren Flugzeugeinsatz ermöglichen. So könnten bestimmte Wetterereignisse wie z.B. Gewitterwolken leichter aufgenommen oder sogar verfolgt werden. Hydrometeore in verschiedenen Höhen innerhalb und unterhalb von Wolken könnten im Flugzeugeinsatz aufgenommen und anschließend ihre Eigenschaften verglichen werden.

Die Holographie atmosphärischer Teilchen kann auch in Zukunft wichtige Einblicke in die Eigenschaften der Hydrometeore bringen, die unser Wetter und Klima entscheidend bestimmen.

ANHANG

A Umrechnung von Niederschlag/Fläche/Zeit auf Anzahl/Volumen

Die meisten Meßgeräte für Niederschlag messen entweder ohne Größendifferenzierung mm/m²h oder wie das Distrometer größen aufgelöst in Anzahl/m²h (im folgenden Flächenverteilung genannt).

Das HODAR mißt aber direkt Größenverteilungen der Tropfen, die auf ein Volumen bezogen sind (Volumenverteilungen). Daher müssen zu Vergleichen die Flächenverteilungen in Volumenverteilungen umgerechnet werden oder umgekehrt.

Um aus Flächenverteilungen eine Anzahl pro Volumeneinheit in Abhängigkeit von der Größe der Tropfen zu bestimmen, müssen Fläche und Zeiteinheit in ein adäquates Meßvolumen, aus dem die registrierten Tropfen stammen, umgerechnet werden. Dazu muß die Fallgeschwindigkeit der Tropfen berücksichtigt werden, da diese die Höhe der Fallsäule einer Tropfengrößenklasse für eine bestimmte Meßzeit festlegt. Das bedeutet: Die großen Tropfen, die sehr schnell fallen, sind in der Flächenverteilung gegenüber der Volumenverteilung überrepräsentiert, da sie aus einem wesentlich größeren Volumen stammen als die kleineren. Dadurch ändert sich die Form der Verteilung beim Übergang von der Fläche zum Volumen wesentlich.

Das zur Flächenverteilung gehörige Probevolumen $V(r)$ (m³) einer Tropfengröße r (mm) erhält man mit:

$$V(r) = t A v(r) \quad \text{A.1}$$

mit Meßzeit t (s), Meßfläche A (m²) und Fallgeschwindigkeit $v(r)$ (m/s).

Da der Meßwert des Distrometers $n_{Dis} = \frac{n(r)}{A \cdot t}$ schon bezogen auf die Einheitsfläche und das Zeitintervall ist, muß nur noch durch $v(r)$ dividiert werden, um die Anzahldichte $n(r)$ pro Volumen zu erhalten: Dabei wird die mittlere Geschwindigkeit v_m des Radiusintervalls $[r_{min}, r_{max}]$ angenommen. Will man außerdem wie üblich $\frac{dn}{d \log r}$, also die logarithmische Anzahldichte, muß auch noch durch $\log(r_{max}/r_{min})$ dividiert werden:

$$\frac{dn}{d \log r} = \frac{n(r)}{A \cdot t} \cdot \frac{1}{v_m \cdot \log\left(\frac{r_{max}}{r_{min}}\right)} \quad \text{A.2}$$

B Fehlerbetrachtung

Für die in dieser Arbeit vorgestellte Apparatur lassen sich die Meßfehler wie im folgenden abschätzen:

B.1 Abbildungsmaßstab

Von grundlegender Bedeutung für die Messung ist der Abbildungsmaßstab M_C und M_{long} bei der Hologrammaufnahme. Dieser läßt sich mit Hilfe von Eichkörpern eingrenzen wie in Kapitel 5.1 beschrieben.

B.2 Monitorkalibrierfaktoren

Bei der Größenbestimmung von Objekten mit dem HODAR spielen die Kalibrierfaktoren des Monitorbildes eine Rolle. Diese lassen sich mit einem Eichgitter im Strahlengang der Rekonstruktionsanlage bestimmen. Anders als bei Uhlig (1996) wurde jedoch nicht mit einer festen Monitorvergrößerung gearbeitet, sondern von Fall zu Fall eine veränderte Vergrößerung des Videosystems benutzt, so daß diese immer neu bestimmt werden mußte. Dazu wurde ein markantes Objekt auf dem Hologramm vom linken zum rechten bzw. vom oberen zum unteren Bildrand verschoben. Vorher und nachher wurde die Position des Positioniertisches ausgelesen. Aus der Differenz der beiden Werte Δx und der horizontalen bzw. vertikalen Pixelanzahl P des Monitors läßt sich die Videovergrößerung V_{video} bestimmen. Dabei wird der Positionsfehler des Positioniertisches mit $1\mu\text{m}$ und der Pixelanzahl mit 1 Pixel angenommen (Borrmann, 1991; Uhlig, 1996):

$$V_{\text{video}} = \frac{\Delta x \pm 1}{P \pm 1} \mu\text{m} / \text{Pixel} \quad \text{B.1}$$

Im ungünstigsten Fall folgt also:

$$\begin{aligned} 2\Delta V_{\text{video}} &= \frac{\Delta x + 1}{P - 1} - \frac{\Delta x - 1}{P + 1} \mu\text{m} / \text{Pixel} \\ &= \frac{P(\Delta x + 1) + (\Delta x + 1) - P(\Delta x - 1) + (\Delta x - 1)}{P^2 - 1} \mu\text{m} / \text{Pixel} \\ &= 2 \frac{P + \Delta x}{P^2 - 1} \mu\text{m} / \text{Pixel} \\ \Delta V_{\text{video}} &= \frac{P + \Delta x}{P^2 - 1} \mu\text{m} / \text{Pixel} \end{aligned} \quad \text{B.2}$$

Für eine Pixelanzahl $P = 640$ und eine Verschiebung $\Delta x = 3200 \mu\text{m}$ ergibt sich:

$$\begin{aligned} V_{\text{video}} &= \frac{3200}{640} \mu\text{m} / \text{Pixel} = 5 \mu\text{m} / \text{Pixel} \\ \Delta V_{\text{video}} &= \frac{640 + 3200}{640^2 - 1} \mu\text{m} / \text{Pixel} = \frac{3840}{409600 - 1} \mu\text{m} / \text{Pixel} \approx 0,01 \mu\text{m} / \text{Pixel} \end{aligned} \quad \text{B.3}$$

B.3 Bildgröße eines Objektes

Die Bildgröße d_{Bild} eines Objektes mit Pixelanzahl P_{Objekt} am Bildschirm läßt sich bestimmen mit:

$$d_{\text{Bild}} = P_{\text{Objekt}} V_{\text{Video}} \quad \text{B.4}$$

Für den Fehler der Bildgröße gilt:

$$\Delta d_{\text{Bild}} = \Delta P_{\text{Objekt}} V_{\text{Video}} + P_{\text{Objekt}} \Delta V_{\text{Video}} \quad \text{B.5}$$

Da $\Delta P_{\text{Objekt}} = 1$ folgt:

$$\Delta d_{\text{Bild}} = V_{\text{Video}} + P_{\text{Objekt}} \Delta V_{\text{Video}} \quad \text{B.6}$$

So ergibt sich mit einer Bildschirmbreite $\Delta x = 3200 \mu\text{m}$, einer Pixelzahl $P = 640$ und einer Pixelanzahl des Objektes von 15 Pixeln:

$$V_{\text{Video}} = 5 \pm 0,01 \mu\text{m/Pixel} \text{ und } d_{\text{Bild}} = 75 \pm 5,15 \mu\text{m}.$$

B.4 Positionsbestimmung der Hydrometeore im Bildvolumen

Die Position eines Objektes im Bildvolumen (x, y, z) kann als Abstand zu einem willkürlich gewählten Koordinatenursprung betrachtet werden. Dieser ist durch die Genauigkeit des Positioniertisches $\pm 1 \mu\text{m}$ bestimmt. Entsprechend dem obigen Abschnitt gilt für einen Abstand Δx_{Bild} innerhalb der Bildschirmenebene (x, z - Ebene):

$$\Delta x_{\text{Bild}} = V_{\text{Video}} + P_x \Delta V_{\text{Video}} \quad \text{B.7}$$

Für die Position in der Tiefe (y - Richtung) muß die Fokusebene des Objektes ermittelt werden. Der Fokussierfehler kann mit 9% des Objektdurchmessers abgeschätzt werden.

B.5 Bestimmung der Originalgröße der Hydrometeore aus der Bildgröße

Wie in Kapitel 5.1.2 erläutert ist der Abbildungsmaßstab des Hologramms nicht ganz einheitlich über die gesamte Länge des Meßvolumens. Die transversale (M_C) und die longitudinale (M_{long}) Vergrößerung des Objekts können aus der Objektposition (x_T, y_T, z_T) im Bildraum nach Gleichung 3.20 und 3.21 bestimmt werden. Mit den Vergrößerungen folgt dann die originale Größe und Position des Hydrometeors zu:

$$d_{\text{real}} = M_C^{-1} d_{\text{Bild}} \quad \text{B.8}$$

$$x_{\text{real}} = M_C^{-1} x_{\text{Bild}}$$

$$z_{\text{real}} = M_C^{-1} z_{\text{Bild}} \quad \text{B.9}$$

$$y_{\text{real}} = M_{\text{long}}^{-1} y_{\text{Bild}}$$

Die Positionsbestimmung im Bildraum sei mit dem Fehler ($\Delta x_{\text{Bild}}, \Delta y_{\text{Bild}}, \Delta z_{\text{Bild}}$) gegeben.

ANHANG

Dann folgt für die Größe und Position im realen Meßvolumen:

$$\Delta d_{real} = M_C^{-1} \Delta d_{Bild} \quad \text{B.10}$$

$$\Delta x_{real} = M_C^{-1} \Delta x_{Bild}$$

$$\Delta z_{real} = M_C^{-1} \Delta z_{Bild} \quad \text{B.11}$$

$$\Delta y_{real} = M_{long}^{-1} \Delta y_{Bild}$$

Und schließlich Δr zu:

$$\Delta r = \sqrt{(2x_{real} \Delta x_{real})^2 + (2y_{real} \Delta y_{real})^2 + (2z_{real} \Delta z_{real})^2} \quad \text{B.12}$$

Sei $M_C = m_H = 0,5$, so folgt mit $n = 0,91$ $M_{long} = 0,227$ (Kapitel 3.3.1). Sei weiter $d_{Bild} = 75 \pm 5,15 \mu m$, dann ist $d_{real} = 150 \pm 10,3 \mu m$.

Das Objekt befinde sich im Bildraum an der Stelle $x_{Bild} = 50000 \mu m$, $z_{Bild} = 50000 \mu m$ und $y_{Bild} = 150 \mu m$. Diese Position sei mit $\pm 1 \mu m$ Genauigkeit bekannt. Weiter sei $P_x = 640$ Pixel, $P_z = 480$ Pixel, dann ergibt sich:

$$\Delta x_{real} = 11 \mu m$$

$$\Delta z_{real} = 10 \mu m$$

$$\Delta y_{real} = 13 \mu m$$

$$\Delta r_{real} = 7800 \mu m$$

B.6 Meßvolumen

Das Meßvolumen V des HODAR ist ein Konus und nach Kapitel 4.1.7 bestimmt durch die Größe der Austritts- ($r_a = 4$ cm) und der Eintrittsöffnung ($r_e = 10$ cm) der Optik der HODAR-Aufnahmeapparatur und deren Abstand ($l = 40$ m) voneinander, sowie die Länge der Rekonstruktionsapparatur ($z_{max} = 310$ cm), die die abfahrbare Länge des holographischen Bildes beschränkt. Es kann nur der hintere Teil des aufgezeichneten Volumens mit einer Länge $l_a = 12,40$ m analysiert werden. Aus den Strahlensätzen ergibt sich ein maximaler Radius am Ende des analysierbaren Bereichs zu:

$$r_m = 10 \text{ cm} - \frac{12,40 \text{ m}}{40 \text{ m}} 6 \text{ cm} = 8,14 \text{ cm} \quad \text{B.13}$$

Und damit ein Meßvolumen V :

$$V = \frac{\pi}{3} l_a (r_a^2 + r_m^2 + r_a r_m) = 321,592 \text{ l} \quad \text{B.14}$$

ANHANG

Sind diese Größen mit einer begrenzten Genauigkeit gegeben, die jeweils mit einem Δ vor der entsprechenden Größe bezeichnet wird, dann ergibt sich mit dem Fehlerfortpflanzungsgesetz nach längerer Rechnung:

$$\frac{\Delta V}{V} = \sqrt{\frac{\Delta^2 l_a}{l_a^2} + \frac{\left(2 + \frac{r_m}{r_a}\right)^2}{\left(1 + \frac{r_m}{r_a} + \frac{r_m^2}{r_a^2}\right)^2} \frac{\Delta^2 r_a}{r_a^2} + \frac{\left(2 + \frac{r_a}{r_m}\right)^2}{\left(1 + \frac{r_a}{r_m} + \frac{r_a^2}{r_m^2}\right)^2} \frac{\Delta^2 r_m}{r_m^2}} \quad \text{B.15}$$

Mit einem relativen Fehler von 2% für die Längenmessungen ergibt sich:

$$\frac{\Delta V}{V} = \sqrt{0,02^2 (1 + 1,29 + 2,78)} = 4,5\% \quad \text{B.16}$$

B.7 Anzahlkonzentrationen

Der Fehler der Anzahlkonzentration $C = \frac{N}{V}$ der Hydrometeore wird gemäß Gleichung B.16 bestimmt. Dabei wird für die Anzahl N der zählstatistische Fehler $\Delta N = \sqrt{N}$ angesetzt. Der Detektionsfehler bei der Hologrammauswertung, d.i. der Anteil der durch den Operator oder die Automatik nicht erkannten Objekte, wird mit 10% abgeschätzt (Borrmann, 1991; Uhlig, 1996).

$$\frac{\Delta C}{C} = \left(\frac{\Delta C}{C}\right)_{\text{Detektion}} + \frac{\Delta V}{V} + \frac{\Delta N}{N} \quad \text{B.17}$$

Für die Anzahlgrößenverteilung der Hydrometeore muß der zählstatistische Fehler, der Volumenfehler und der Fehler der Größenbestimmung berücksichtigt werden (Uhlig, 1996):

$$\Delta \left(\frac{dN}{d \log r} (r_i) \right) = \frac{1}{d \log r_i} \sqrt{(\Delta N_i)^2 + (\Delta d)^2 + (\Delta V)^2} \quad \text{B.18}$$

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1.1: Das HODAR in seiner neuen Konfiguration mit einem großen Meßvolumen von bis zu 500 Litern auf dem schneebedeckten Kleinen Feldberg im Taunus.	5
Abbildung 2.1: Die Beziehungen zwischen den Hydrometeoren. Die Hydrometeore sind mit ihrem typischen Umriß dargestellt. Die Flüssigen sind grau angefärbt. Der positive Temperaturbereich ist grau schattiert. Die Pfeile geben die Umwandlungsrichtung und den jeweiligen Umwandlungsprozeß an.	9
Abbildung 2.2: Nebeltypen nach Kunkel, 1982. Typ A zeigt ein Maximum bei 30 µm, Typ C eines bei 10 µm. Typ B stellt eine Mischform aus A und B dar.	12
Abbildung 2.3: Klassifikation der Eiskristalle nach Magono und Lee, 1966. Die natürlichen Eiskristalle zeigen eine enorme Vielfalt. (Fortsetzung nächste Seite)	15
Abbildung 2.4: Temperatur- und Feuchtebedingungen für das Wachstum verschiedener Typen von Eiskristallen (Magono und Lee, 1966). Die Ursprungsform ist das hexagonale Prisma.	16
Abbildung 2.5: Klassifikation von Graupelpartikeln aufgrund ihrer Entstehung (aus Harimaya, 1976). Die mit x gekennzeichneten Partikel wurden bisher noch nicht beobachtet. Bei den mit y gekennzeichneten Partikeln wurde der Embryo noch nicht gefunden.	17
Abbildung 2.6: Klassifikation des Hagelembryos von Federer und Waldvogel, 1978.	18
Abbildung 2.7: Hagelsteine mit einigen Zentimetern maximaler Länge aus Cumulonimbuswolken über Nordamerika und ein Golfball als Größenvergleich (entnommen aus Liljequist und Cehak, 1994).	19
Abbildung 2.8: Prinzipskizze des Distrometers. Es arbeitet ähnlich wie ein Mikrophon. Ein auftreffender Tropfen löst durch eine Spule, die in ein Magnetfeld taucht, einen Strompuls aus. Dieser ist der Tropfenmasse und der Auftreffgeschwindigkeit proportional.	23
Abbildung 2.9: Das Pluviospektrometer nach Frank, Härtl und Tschiersch, 1994. Das Meßvolumen wird mit einer Projektionsleuchte von hinten beleuchtet und mit einer Videokamera von vorne beobachtet. Das Videobild wird mit Hilfe digitaler Bildverarbeitung analysiert und die Tropfen in mehreren Größenklassen gezählt.	24
Abbildung 2.10: Der Guttalgor (Bächmann et al., 1993) besteht aus einem mit flüssigem Stickstoff gefüllten Dewargefäß, in das Siebe verschiedener Maschenweite eingehängt sind. Die schockgefrorenen Regentropfen werden so nach ihrer Größe sortiert und können zur weiteren Analyse entnommen werden.	26
Abbildung 3.1: Prinzip des Aufbaus zur Aufnahme mit der Zweistrahlholographie. Das durch Überlagerung des Objekt- und des Referenzstrahl entstehende Interferenzmuster wird als Hologramm auf einer Photoplatte aufgezeichnet.	31

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 3.2: Rekonstruktion eines Zweistrahlhologramms. Es entstehen zwei Bilder, ein reelles und ein virtuelles Bild, die jeweils einzeln betrachtet werden können.	32
Abbildung 3.3: Prinzipieller Aufbau zur Aufnahme mit der Einstrahl- oder In-line-Holographie. Das am Objekt vorbei gehende Licht wird als Referenzstrahl benutzt. Deshalb lassen sich nur kleine Objekte aufnehmen, die ausreichend viel Licht vorbei lassen.	33
Abbildung 3.4: Denisyuk-Aufbau. Damit ist es möglich mit nur einem Strahl das reflektierte Objektlicht aufzunehmen. So können auch größere und kompakte Objekte aufgenommen werden.	33
Abbildung 3.5: Rekonstruktion eines In-line-Hologramms. Die beiden Bilder liegen hintereinander und auf einer Achse mit der Lichtquelle.	34
Abbildung 3.6: Beugungsbild eines Punktobjektes mit Radius a : Im Querschnitt entspricht es einer Fresnel'schen Zonenplatte, besitzt allerdings keine scharfen Übergänge von hell zu dunkel. Es ist über den ganzen Raum ausgedehnt, auch in Längsrichtung. Die Bezeichnungen werden im Verlauf des Kapitels erläutert.	35
Abbildung 3.7: Beugungsbild eines Tropfens ($900 \mu\text{m}$) in verschiedenen Entfernungen vom Tropfen: a) im Focus (0 cm entfernt), b) 2 cm entfernt, c) 10 cm entfernt, d) Poissonscher Fleck in 14 cm Entfernung.	36
Abbildung 3.8: Koordinatensystem für die Berechnung der Intensitätsverteilung am Aufnahmeort (x,y -Ebene) bei Beleuchtung eines in der ξ,η -Ebene ausgedehnten Objektes durch eine Punktlichtquelle S mit Wellenlänge λ_0 .	37
Abbildung 3.9: Änderung von $\log I(r')$ in Abhängigkeit von r' mit $m_0 = 1$ (Parallelstrahl), $\lambda_0 = 0,6943 \mu\text{m}$ (Rubinlaser), $a = 50 \mu\text{m}$ und $z_0 = 10 \text{ cm}$. $I(r')$ ist die normierte Intensität $I(x',y')/(B/m_0)^2$ für ein rundes Objekt mit Radius a . (Entnommen aus Vikram, 1992)	40
Abbildung 3.10: Prinzipieller Strahlengang des gewählten Aufbaus für die Aufnahme von Hologrammen mit dem HODAR. Zum einfachen In-line-aufbau (links) wurde eine verkleinernde Linse (rechts) hinzugefügt, um ein großes Volumen aufzeichnen zu können.	43
Abbildung 3.11: Rekonstruktion eines Hologramms mit einer Lichtquelle mit Wellenlänge λ_c im Abstand z_c . Der Durchmesser des Bildes sei $2a$ und der Radius eines Beugungsringes mit r' bezeichnet (siehe Kapitel 3.3.4).	44
Abbildung 3.12: Der maximale Gangunterschied des Lichtes im In-line-aufbau entspricht dem Durchmesser des Strahls an der Photoplatte.	50
Abbildung 4.1: Die Aufnahmeapparatur auf dem Kleinen Feldberg im Taunus.	54
Abbildung 4.2: Schema des Aufbaus der Aufnahmeapparatur des HODAR. Das kleine und das große Meßvolumen des HODAR sind schraffiert hervorgehoben.	55
Abbildung 4.3: Der herausfahrbare Wagen mit dem Schutzgehäuse für den Laserkopf (rechts) und dem Gehäuse für die Aufweitungsoptik (links). Darin ist die 4-Stangenbank und der (weiße) Tubus zu sehen. Ganz links ist die Kamera für das kleine Volumen an den Wagen herangeklappt (hinter dem Tubus, unter der Plastikfolie).	56
Abbildung 4.4: Die Aufweitungsoptik besteht aus einer Zerstreulinse (rechts) und einer Sammellinse (links) in einer 4-Stangenbank. Der Tubus am linken Ende verhindert die Deposition von Tröpfchen auf der Sammellinse und blendet störende Reflexe aus.	57
Abbildung 4.5: Der Umlenkspiegel ist in einem Aluminiumkasten mit aufstellbaren Deckeln auf einem Gestell mit Schraubfüßen angebracht. So	

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

läßt er sich leicht an den Aufstellort anpassen und in der Höhe einjustieren.	58
Abbildung 4.6: Der Umlenkspiegel ist dreh- und kippbar gelagert und durch einen elektromagnetischen Verschuß gegen Staub und Feuchtigkeit geschützt. Zusätzlich ist er von hinten beheizt, um Kondensation auf seiner Oberfläche zu verhindern.	59
Abbildung 4.7: Die Kamera für das große Volumen des HODAR ist an der linken Seite des Wagens für den Laserkopf befestigt und kann mit diesem in den Container zurückgeschoben werden.	60
Abbildung 4.8: Die Photoplatte wird mit einer lichtdichten Metallkassette in die Kamera eingeschoben. In dieser kann sie zum Wechseln in eine Dunkelkammer transportiert werden.	61
Abbildung 4.9: Mehrdeutigkeit durch Benutzung einer Linse zur Abbildung des Meßvolumens. a) die Verhältnisse bei der Aufnahme, b) die Verhältnisse bei der Rekonstruktion des Hologramms. Das Viereckige Objekt befindet sich in der Originalszene vor der Objektebene der Linse, das runde Objekt dahinter. Bei der Rekonstruktion sind beiden keine eindeutigen Positionen mehr zuzuordnen.	62
Abbildung 4.10: Das große Meßvolumen des HODAR ist genau betrachtet ein Konus.	63
Abbildung 4.11: Foto eines entwickelten Hologramms.	65
Abbildung 4.12: Die Rekonstruktionsapparatur des HODAR. Links befindet sich der He-Ne-Laser und die Strahlaufweitung. In der Mitte ist der Mikropositioniertisch angeordnet. Rechts wurde eine optische Bank eingebaut, auf der die Kameras längs der optischen Achse verschoben werden können.	67
Abbildung 4.13: Die automatische Helligkeitsregelung der Grundig-Kamera führt dazu, daß auch große Objekte von der automatischen Auswertung nicht erkannt werden.	70
Abbildung 5.1: Zum Test des Aufnahmeobjektivs wurde ein vorhandenes Hologramm direkt rekonstruiert (a). Anschließend wurde dasselbe Hologramm zuerst mit dem Tessarobjektiv 1:1 abgebildet und dann rekonstruiert (b).	74
Abbildung 5.2: Ein dünner Nylonfaden (250 μm dick), an dem in jeweils 1 m Abstand Drahtziffern befestigt waren, wurde durch das Meßvolumen gespannt. Die Ziffer 0 befand sich in der Objektebene der Linse.	75
Abbildung 5.3: Mit dünnen Fasern (\varnothing 15 μm) bespannte Drahtreifen wurden an mehreren Stellen in das Meßvolumen gebracht. An die Fasern wurde Silicaperlen mit 2 mm Durchmesser geklebt.	76
Abbildung 5.4: Silicaperle 2 m von der Objektebene der Aufnahmelinse entfernt. An der Seidenfaser (15 μm dick) haben sich 100 μm große Kondenswassertröpfchen gebildet.	77
Abbildung 5.5: Silicaperle 5m von der Objektebene der Kameralinse entfernt. Der störende Einfluß der Nebeltröpfchen macht sich hier im Vergleich zu Abbildung 5.4 deutlich bemerkbar.	78
Abbildung 5.6: Größere und damit auch tiefere Objekte besitzen eine größere Randunschärfe als kleine, da sich der Querschnitt Q im Tiefenbereich Δz kaum verändert im Gegensatz zu kleinen Tropfen, die z.B. komplett innerhalb von Δz liegen.	79
Abbildung 5.7: Mit dem HODAR bestimmte Größenverteilungen der Hologramme NK16 und NK25. Beide Hologramme wurden bei	

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Landregenereignissen aufgenommen. Es zeigen sich jedoch Unterschiede in der Form der Verteilungen.	85
Abbildung 5.8: Vergleich einer Größenverteilung des HODAR mit zwei Größenverteilungen aus zeitgleich aufgenommenen Distrometerdaten mit 5 bzw. 30 min Mittelung.	88
Abbildung 5.9: Aus den Größenverteilungen von Abbildung 5.8 bestimmte Prozenzte der Niederschlagsmenge in Abhängigkeit von der Tropfengröße.	89
Abbildung 5.10: Doppelbelichtung eines Tropfens zur Bestimmung seiner Fallbewegung. Der Tropfen mit 360 μm Radius hat sich in 800 μs um 2289 μm bewegt.	91
Abbildung 5.11: Die aus NK37 bestimmten Fallgeschwindigkeiten einiger Regentropfen im Vergleich mit der vom Distrometer Hersteller verwendeten Formel von Atlas et al. (1973).	92
Abbildung 5.12: Die prozentuale Abweichung der experimentellen Fallgeschwindigkeit von der theoretischen in Abhängigkeit von der Tropfengröße.	92
Abbildung 5.13: Schema eines deformierten Regentropfens. Er hat ab einer gewissen Größe als Querschnitt eine Nierenform. Seine Form kann mit den Halbmessern a und b angenähert beschrieben werden (Pruppacher und Pitter, 1971).	94
Abbildung 5.14: Die Tropfenform nach Beard et al. (1989). Die gestrichelten Linien geben Kreise mit dem entsprechenden Äquivalentdurchmesser D_0 an.	95
Abbildung 5.15: Oszillationsfrequenzen in Abhängigkeit von der Tropfengröße nach Beard et al. (1991).	97
Abbildung 5.16: Ein kleiner Regentropfen mit 280 μm Durchmesser (a) und ein großer Regentropfen mit 3 mm Durchmesser (b). Der kleine ist noch rund, der große dagegen schon abgeplattet.	97
Abbildung 5.17: Vergleich eines Regentropfens aus Hologramm NK16 mit der Gleichgewichtsform nach dem Modell von Beard et al. (1989). Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung des 3 mm großen Tropfens mit dem Modell.	98
Abbildung 5.18: Achsenverhältnisse b/a von Regentropfen. Die Abbildung wurde Pruppacher und Klett, 1997 entnommen und Werte, die mit dem HODAR bestimmt wurden zusätzlich eingetragen. Es ist wegen der Übersichtlichkeit nur der Fehler des HODAR für das Achsenverhältnis dargestellt. Dabei ist zu beachten, daß die Grafik b/a für die Gleichgewichtsform der Tropfen darstellt, die Messung mit dem HODAR jedoch nur Momentanwerte der Tropfenoszillation liefert. Dennoch kann damit gezeigt werden, daß in-situ große Abweichungen von der Gleichgewichtsform d.h. große Schwingungsamplituden auftreten.	99
Abbildung 5.19: Abweichung von der Fallgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Achsenverhältnis b/a.	100
Abbildung 5.20: Projektionen des HODAR-Meßvolumens von Hologramm NK16. a) Seitenansicht, b) Draufsicht und c) Querschnitt.	101
Abbildung 5.21: Ausschnittvergrößerung aus Abbildung 5.21, a) Draufsicht, b) Ansicht.	102
Abbildung 5.22: Relative Abstände der nächsten und übernächsten Nachbarn in NK16 und NK25. Es wird der prozentuale Anteil der Tropfen angegeben, die näher als 10, 50,100, usw. Radien benachbart sind.	103

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 5.23: Eine Eisnadel mit 1000 μm Länge, 2m vor der Kamera.	105
Abbildung 5.24: Ein Graupelpartikel mit einem maximalen Durchmesser von 1000 μm, 2,30 m von der Kamera entfernt.	105
Abbildung 5.25: Eine Schneeflocke mit einer maximalen Länge von 11 mm, 2,50 m vor der Kamera. Es sind deutlich Teile der Schneeflocke zu erkennen, die nicht in der Schärfenebene der Abbildung liegen.	106
Abbildung 5.26: Größenverteilung der drei in NK20 identifizierten Typen von Eisteilchen. Der Fehler resultiert im wesentlichen aus dem Zählstatistischen Fehler $\Delta N = \sqrt{N}$.	106
Abbildung 5.27: Eine Schneeflocke mit antennenartigen Auswüchsen, 7 mm breit, 4,50 m vor der Kamera.	108
Abbildung 5.28: Eine Schneeflocke, 5 mm hoch, 4 m vor der Kamera.	108
Abbildung 5.29: Ein Eiskristall: Eine hexagonale Platte mit fingerartigen Aufwüchsen, 700 μm breit, 15 cm vor der Kamera.	108
Abbildung 5.30: Eine Schneeflocke aus stäbchenförmigen Kristallen zusammengesetzt, 6 mm hoch, 6,40 m vor der Kamera.	108
Abbildung 5.31: Fingerartige Anwüchse auf einem stabförmigem Kristall (1500 μm). 1,50 m vor der Kamera.	109
Abbildung 5.32: Ein kastanienartiges Objekt, 500 μm lang, 25 cm vor der Kamera, biologischen Ursprungs?	109
Abbildung 5.33: Ein golfballartiges Graupelkorn, 500 μm groß, 1 m vor der Kamera. Im Hintergrund eine weitere unfokussierte Schneeflocke.	109
Abbildung 5.34: Doppelbelichtung einer Schneeflocke 1000 μm, 7,5 m vor der Kamera. Ihre Fallbewegung war rein translatorisch ohne Rotation.	109

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2.1: Die Größe und Anzahlkonzentration der Wolkentröpfchen in verschiedenen Wolkentypen. Diese Werte wurden experimentell ermittelt (Mason, 1972).	11
Tabelle 2.2: Hydrometeore	21
Tabelle 3.1: Das Beugungsmuster eines holographischen Tropfenbildes verliert sich mit zunehmendem Abstand im Hintergrundspeckle. Der Abstand bis zum Verschwinden sei als Sichtbarkeitslänge bezeichnet. Hier sind einige mit dem HODAR experimentell gefundene Werte der Sichtbarkeit unterschiedlich großer Objekte aufgetragen.	51
Tabelle 4.1: Technische Daten des HODAR	72
Tabelle 5.1: Aus einem Hologramm wurden Bildgrößen und Bildabstände von 12 mm großen Drahtziffern ermittelt, die in je 1 m Abständen an einem Faden befestigt und durch das Meßvolumen gespannt wurden (Abbildung 5.2). Das Verhältnis Bildgröße zu Originalgröße bzw. Bildabstand zu Originalabstand liefert die transversale (M_C) bzw. die longitudinale (M_{long}) Vergrößerung der Apparatur. In der letzten Spalte ist die theoretische transversale Vergrößerung (M_{long}) gemäß Gleichung 3.21 angegeben.	75
Tabelle 5.2: Die Positionen der mit Silicaperlen behängten Drahtreifen im Meßvolumen und die mit dem HODAR bestimmten Positionen (Abbildung 5.3).	76
Tabelle 5.3: Manuelle und automatische Auswertung des Hologramms NK25 mit Regentropfen zeigt die extrem hohe Fehlerquote der automatischen Auswertung mit DROPCAT bei den Hologrammen des großen Meßvolumens. Eine Überprüfung der ersten 75 der 5700 Tropfen ergab, daß nur 5 davon richtig erkannt wurden, das sind 6 %.	80
Tabelle 5.4: Klassifikation der Regenereignisse nach Strantz, 1971. Die Spektren werden in 3 Gruppen eingeteilt, von denen zwei weiter unterteilt werden. Strantz gibt auch Häufigkeiten für die Beobachtung der verschiedenen Typen an.	87

VERZEICHNIS DER SYMBOLE UND ABKÜRZUNGEN

a	μm	Objektradius
$\tilde{A}(\xi, \eta)$		Fouriertransformierte von $A(\xi, \eta)$
$A(\xi, \eta)$		Objektfunktion
B		willkürliche Amplitude des Aufnahme-lichts
d	$= 2a$	Durchmesser des Objekts
D_0	μm	Äquivalenzradius, d.i. der Radius der volumengleichen Kugel
F		Parameter einer Modellverteilung
f	mm	Brennweite
i		imaginäre Einheit, $i^2 = -1$
Im		Imaginärteil einer komplexen Zahl
J_1		Besselfunktion der 1. Ordnung
m_0		inhärente Vergrößerung
M_c		transversale Vergrößerung
m_H		Vergrößerung durch eine Linse
M_{long}		longitudinale Vergrößerung
N		ganzzahliges Vielfaches
n		Verhältnis von Aufnahme- zu Rekonstruktionswellenlänge
n_0	$\text{m}^{-3}\text{mm}^{-1}$	Parameter einer Modellverteilung
N_{Re}		Renoldszahl einer Strömung
P		Position des Objekts im Aufnahmevolumen
P'		Projektion von P auf die Aufnahmeebene
P_i		Wahrscheinlichkeit
R	mm/h	Regenrate
r'	mm	Radius eines Beugungsringes
Re		Realteil einer komplexen Zahl
TEM_{00}		erste nur longitudinale Mode im Laserresonator

VERZEICHNIS DER SYMBOLE UND ABKÜRZUNGEN

TSV	m/s	Terminal settling velocity – Endfallgeschwindigkeit eines Tropfens
U_{∞}	m/s	Endfallgeschwindigkeit eines Tropfens
V	cm ³	Volumen
v	m/s	Geschwindigkeit
w_L	g/m ³	Flüssigwassergehalt
X		Argument der Besselfunktion
x, y		laterale Koordinaten der Aufnahmeebene
z_0		Abstand zwischen Objekt und Aufnahmeebene
z_1	m	Abstand zwischen Linse und Photoplatte (Aufnahmeebene)
z_r		Abstand zwischen Aufnahmeleuchtquelle S und Aufnahmeebene
β		Parameter einer Modellverteilung
δ	m	Fernfeldlänge
$\psi(x, y)$		Wellenfunktion in der Aufnahmeebene
Λ	m ⁻¹	Parameter einer Modellverteilung
η_a		Viskosität der Luft
λ_0	nm	Aufnahmewellenlänge
λ_c	nm	Rekonstruktionswellenlänge
ρ_a	g/cm ³	Dichte der Luft
ρ_w	g/cm ³	Dichte des Wassers
σ_S	μm	Speklegroße
ξ, η		laterale Koordinaten der Objektebene

LITERATUR

- Ahlers, R.-J. und H. J. Warnecke, 1991: *Industrielle Bildverarbeitung*. Addison-Wesley, Bonn.
- Anders, K., N. Roth und A. Froh, 1991: Simultaneous in situ measurements of size and velocity of burning droplets. *Particles and Particle Systems Characterisation* **8**, S. 136-141.
- Anderson, W.L. und R. E. Beissner, 1971: Counting and classifying small objects by far-field light scattering. *Applied Optics* **10**, S. 1503-1508.
- Arndt, S., 1990: Holographische Sprayanalyse und Partikelmeßtechnik, In: Marwitz, H.: *Praxis der Holographie – Grundlagen, Standards und Spezialverfahren*. Expert-Verlag, Ehningen bei Böblingen.
- Atlas, D., R. C. Srivastava, R. S. Sekhon, 1973: Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence. *Rev. Geophys. Space Phys.* **11**, S. 1-35.
- Bächmann, K., I. Haag und A. Roeder, 1993: A field study to determine the chemical content of individual raindrops as a function of their sizes, *Atmospheric Environment* **27A**, S. 1951-1958.
- Bächmann, K., P. Ebert, I. Haag und T. Prokop, 1996: The chemical content of raindrops as a function of drop radius-I: Field measurements at the cloud base and below the clouds. *Atmospheric Environment* **30**, S. 1019-1025.
- Bächmann, K., P. Ebert, I. Haag. T. Prokop und K. Steigerwald, 1996: The chemical content of raindrops as a function of drop radius-II. Field experiment study on the scavenging of marked aerosol particles by raindrops sampled as a function of drop size. *Atmospheric Environment* **30**, S. 1027-1033.
- Bartlett, J. T. und R. J. Adams, 1972: Development holographic technique for sampling particles in moving aerosol. *Microscope* **20**, S. 375-384.
- Bässman, H. und P. W. Beselich, 1989: *Konturorientierte Verfahren in der digitalen Bildverarbeitung*. Springer, Berlin.
- Bauerecker, S. und B. Neidhart, 1998: Formation and growth of ice particles in stationary ultrasonic fields. *Journal of Chemical Physics* **109**, S. 3709-3712.
- Beard, K. V., J. Q. Feng und C. Chuang, 1989: A Simple Perturbation Model for the Electrostatic Shape of Falling Drops, *Journal of the Atmospheric Sciences* **46**, S. 2404-2418.
- Beard, K. V. and C. Chuang, 1987: A new model for the equilibrium shape of raindrops. *Journal of the Atmospheric sciences* **44**, S. 1509-1524.

LITERATUR

- Beard, K. V. and D. B. Johnson, 1984: Raindrop axial and backscatter ratios using a collisional probability model. *Geophysical Research Letters* **11**, S. 65-68.
- Beard, K. V., 1984: Oscillation models for predicting raindrop axis and backscatter ratios. *Radio Science* **19**, S. 67-74.
- Beard, K. V., 1984: Raindrop oscillations: Evaluation of a potential flow model with gravity. *Journal of the Atmospheric Sciences* **41**, S. 1765-1774.
- Beard, K. V., und A. Tokay, 1991: A field study of small raindrop oscillations. *Geophysical Research Letters* **18**, S. 2257-2260.
- Beard, K. V., and R. J. Kubesh, 1991: Laboratory measurements of small raindrop distortion. Part II: Oscillation frequencies and modes. *Journal of the Atmospheric Sciences* **48**, S. 2245-2264.
- Beard, K. V., D. B. Johnson and A. R. Jameson, 1983: Collisional forcing of raindrop oscillations, *Journal of the Atmospheric Sciences* **40**, S. 455-462.
- Beard, K. V., D. B. Johnson und D. Baumgardner, 1986: Aircraft observations of large raindrops in warm, shallow, convective clouds. *Geophysical Research Letters* **13**, S. 991.
- Beard, K. V., Harry T. Ochs III, und Rodney J. Kubesh, 1989: Natural oscillations of small raindrops, *Nature* **342**, S. 408-410.
- Beard, K. V., R. J. Kubesh, und H. T. Ochs III, 1991: Laboratory measurements of small raindrop distortion. Part I: Axis ratios und fall behaviour, *Journal of the Atmospheric Science* **48**, S. 698-710.
- Beeck, J. P. A. J. van und M. L. Riethmuller, 1995: Nonintrusive measurements of temperature and size of single falling raindrops. *Applied Optics* **34**, S. 1633-1639.
- Berry, E. X. und M. R. Pranger, 1974: Equations for calculating the terminal velocities of water drops. *Journal of Applied Meteorology* **13**, S. 108-113.
- Best, A. C., 1950: The size distribution of raindrops. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **76**, S. 16.
- Bexon, R., M. G. Dalzell und M. C. Stainer, 1976: In-line holography and the assessment of aerosols. *Optics and Laser Technology*, S. 161.
- Bexon, R., J. Gibbs und G. D. Bishop, 1976: Automatic assessment of aerosol holograms. *Journal of Aerosol Science* **7**, S. 397-407.
- Black, A. R. und P. T. Willis, 1996: Giant drops observed from large aircraft. *Proceedings of the 12th Conference on Clouds and Precipitation Zurich*, Vol.1, S.27-30.
- Böhm, H. P., 1989: A general equation for the terminal fall speed of solid hydrometeors. *Journal of the Atmospheric Sciences* **46**, S. 2419-2427.
- Born, M. und E. Wolf, 1975: *Principles of Optics*. Pergamon Press, Oxford.
- Borrmann, S. und R. Jaenicke, 1993: Application of microholography for ground-based in-situ measurements in stratus cloud layers: a case study. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **10**, S. 277-293.

LITERATUR

- Borrmann, S. und R. Jaenicke, P. Neumann, 1993: On spatial distributions and interdroplet distances measured in stratus clouds with in-line holography. *Atmospheric Research* **29**, S. 229-245.
- Borrmann, S., H.-J. Vössing, E.-M. Uhlig und R. Jaenicke, 2001: In-situ measurements of the cloud microphysical structure using holography. In: R. Jaenicke, 2001: *Dynamics and Chemistry of Hydrometeors*, Wiley-VCH Verlag, Weinheim, S. 196.
- Borrmann, Stephan, 1991: *On sizes and spatial distributions of cloud droplets measured in-situ by Fraunhofer in-line holography*. Dissertation, Mainz.
- Bradley, S. G. und C. D. Stow, 1979: On the production of satellite droplets during collisions between water drops falling in still air. *Journal of the Atmospheric Sciences* **36**, S. 494-500.
- Brazier-Smith, P. R., 1992: On the shape and fall velocities of raindrops. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **118**, S. 749-766.
- Brenden, B. B., 1981: Miniature multiple-pulse Q-switched ruby laser holocamera for aerosol analysis. *Optical engineering* **20**, S. 907-911.
- Brenn, G. und A. Frohn, 1990: Tropfenkollisionen. *Spektrum der Wissenschaften*, Dezember, S. 116.
- Brown, P. R. A., 1989: Use of holography for airborne cloud physics measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **6**, S. 293-306.
- Carder, K. L., R. G. Steward und P. R. Betzer, 1982: In situ holographic measurements of the sizes and settling rates of oceanic particulates. *Journal of Geophysical Research* **87**, S. 5681-5685.
- Chandrasekar, V., W. A. Cooper, und V. N. Bringi, 1988: Axis ratios and oscillations of raindrops. *Journal of the Atmospheric Sciences* **45**, S. 1323-1333.
- Collier, R. J., C. B. Burckhardt und L. H. Lin, 1971: *Optical holography*. Academic Press, New York und London.
- Conway, B. J., S.J. Caughey, A. N. Bentley, und J.D. Turton, 1982: Ground based and airborne holography of ice and water clouds. *Atmospheric Environment*. **16**, S. 1193-1207.
- Crane, J., P. Dunn, P. H. Malyak und B. J. Thompson, 1983: Particulate velocity and size measurements using holographic and optical processing methods, in: *High Speed Photography and Photonics*, Proc. SPIE **348**, S. 634-42.
- Diehl, K., 1995: *Eine experimentelle Untersuchung zur Aufnahme von Schadstoffgasen durch Schneekristalle*. Dissertation Mainz, Verlag Shaker, Aachen.
- Dodd, K. N., 1960: On the disintegration of water drops in an air stream. *J. Fluid Mech.* **9**, S. 175-182.
- Eichler, J., 1993: *Holographie*. Springer, Berlin.

LITERATUR

- Federer, B. und A. Waldvogel, 1978: Time-resolved hailstone analysis and radar structure of Swiss storms. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **104**, S. 69 .
- Feng, J. Q., und K. V. Beard, 1991: A perturbation model of raindrop oscillation characteristics with aerodynamic effects. *Journal of the Atmospheric Sciences* **48**, S. 1856-1868.
- Flügge, J., 1955: *Die wissenschaftliche und angewandte Photographie, Band I: Das photographische Objektiv*. Springer, Wien.
- Fournier d'Albe, E. M., und M. S. Hidayetulla, 1955: The break-up of large water drops falling at terminal velocity in free air. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **81**, S. 610-613.
- Frank, G., T. Härtl und J. Tschiersch, 1994: The pluvispectrometer: classification of falling hydrometeors via digital image processing. *Atmospheric Research* **34**, S. 367-378.
- Gabor, D., 1970: Laser speckles and its elimination. *IBM Journal of the Research Division* **14**, S. 509-514.
- Goudail, F. und P. Réfrégier, 1996: Optimal detection of a target with random grey levels on a spatially disjoint background noise. *Optics letters* **21**, S. 495-497.
- Green, A. W., 1975: An approximation for the shape of large raindrops. *Journal of Applied Meteorology* **14**, S. 1578-1583.
- Gunn, R. und G. Kinzer, 1948: The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air. *Journal of Meteorology* **6**, S. 243- 248.
- Harihanan, P., 1996: *Optical Holography*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Harimaya, T., 1976: The embryo and formation of graupel. *Journal of the Meteorological Society of Japan* **54**, S. 42.
- Hausmann, G. und W. Lauterborn, 1980, Determination of size and position of fast moving gas bubbles in liquids by digital 3-D image processing of hologram reconstruction. *Applied Optics* **19**, S. 3529-3535.
- Jaenicke, R., 1988, in Landolt-Börnstein, G. Fischer(Herausg.): *Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology Vol. 4: Meteorology Subvolume b: Physical and Chemical Properties of Air*, New Series V/4b, Springer, S. 426.
- Jameson A. R. und K. V. Beard, 1982: Raindrop axial ratios. *Applied Meteorology* **21**, S. 257-259.
- Jameson, A. R., 1983: Microphysical interpretation of multi-parameter radar measurements in rain. Part I: Interpretation of polarization measurements and estimation of raindrop shapes. *Journal of the Atmospheric Sciences* **40**, S. 1792-1802.
- Johnson D. B., und K. V. Beard, 1984: Oscillation energies of colliding raindrops. *Journal of the Atmospheric Sciences* **41**, S. 1235-1241.
- Jones, D. M., 1959: *Journal of Meteorology* **16**, S. 504.

LITERATUR

- Joss, J. und A. Waldvogel, 1967: Ein Spektrograph für Niederschlagstropfen mit automatischer Auswertung. *Pure and applied Geophysics* **68**, S. 240-246.
- Joss, J. und A. Waldvogel, 1969: Raindrop size distributions and sampling size errors. *Journal of the Atmospheric Sciences* **26**, S. 566-569.
- Joss, J. und E. Gori, 1978: shape of raindrop size distributions. *Journal of Applied Meteorology*, **17**, S. 1054.
- Kamra A. K., R. V. Bhalwankar, und A. B. Sathe, 1991: Spontaneous break-up of charged and uncharged water drops freely suspended in a wind tunnel. *Journal of Geophysical research* **96**, S. 17159-17168.
- Kiemle, H. und D. Röss, 1969: *Einführung in die Technik der Holographie*. Aka Verlagsgesellschaft, Frankfurt/Main.
- Knollenberg, R. G., 1981: Techniques for probing cloud microstructure. In: Hobbs, P.V. und A. Deepak (Hrsg.): *Clouds: Their formation, optical properties and effects*. Academic Press, New York.
- Komabayasi, M., T. Gonda, und K. Isono, 1964: Life time of water drops before breaking and size distribution of fragment droplets. *Journal of the Meteorological Society of Japan* **42**, S. 330-340.
- Kruis, F. E., J. van Denderen, H. Buurman und B. Scarlett, 1994: Characterisation of agglomerated and aggregated aerosol particles using image analysis. *Particles and Particle Systems Characterization* **1**, S. 426-435.
- Krupp, C., 1991: Holographische Messungen an Eiskristallen in Cirruswolken während des Internationalen Cirrus Experiments ICE. Diplomarbeit, Institut für Physik GKSS- Forschungszentrum Geesthaacht GmbH.
- Kubesh, R. J., und K. V. Beard, 1993: Laboratory measurements of spontaneous oscillations for moderate-size raindrops. *Journal of the Atmospheric Sciences* **50**, S. 1089-1093.
- Külzer, S., 1994: Erweiterung des dreidimensionalen Stadtklimamodells MISKAM auf Unterströmungseffekte. Diplomarbeit, Institut für Physik der Atmosphäre, Johannes-Gutenberg Universität, Mainz.
- Kunkel, N., 1982: . Research Report 767, AFGL-TR-82-0026, Meteorological Division Air Force Geophysical Laboratory, Hanscomb A713, Massachusetts.
- Lane, W. R., 1951: Shatter of drops in streams of air. *Inda. Engineer. Chem.* **43**, S. 1312-1317.
- Laube und Höller, 1988, in Landolt-Börnstein, G. Fischer(Herausg.): *Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology Vol. 4: Meteorology Subvolume b: Physical and Chemical Properties of Air*, New Series V/4b, Springer, S. 9-27 und S. 82-93.
- Lawson, R. P. und R. H. Cormack, 1995: Theoretical design and preliminary tests of two new particle spectrometers for cloud microphysics research. *Atmospheric Research* **35**, S. 315-348.
- LeClair, B. P., A. E. Hamielec, H. R. Pruppacher und W. D. Hall, 1972: A theoretical and experimental study of the internal circulation in water-

LITERATUR

- drops falling at terminal velocity in air. *Journal of the Atmospheric Sciences* **29**, S. 728-740.
- Lehmann, A., 1996, Vergleich physikalischer Parameter von Ombrometer und Distrometer. Diplomarbeit, Institut für Physik der Atmosphäre der Universität Mainz.
- Liljequist, G. H. und K. Cihak, 1994: *Allgemeine Meteorologie*. 3. Auflage, Vieweg Verlag, Wiesbaden.
- List, R., 1977: The formation of rain. *Transactions of the Royal Society of Canada* **15**, S. 333 - 347.
- Liu, D. D. und F. Hussain, 1995: Off-axis holographic technique for particle image velocimetry using a Fourier-transformation lens. *Optics Letters* Vol. **20**, S. 327-329.
- Low, R. D. H. und R. List, 1982: Collision, Coalescence and break up of raindrops. Part I: Experimental established Coalescence efficiencies and fragment size distributions in break up. *Journal of Atmospheric Sciences* **39**, S. 1591-1607.
- Low, R. D. H., 1975: Microphysical evolution of fog. *Journal de Recherché Atmosphérique* **9**, S. 23.
- Low, R. D. H., L. D. Duncan und Y. Y. Hsiao, 1979: Research Report ASL-TR-DO34.
- Magarvey, R. H., und B. W. Taylor, 1956: Free fall break-up of large drops. *Journal of Applied Physics* **27**, S. 1129-1135.
- Magono, C. und C. W. Lee, 1966: Meteorological classification of natural snow crystals. *Journal of the Faculty of Science, Hokkaido University, Japan, Serie VII*, **2**, S. 321-335.
- Marshall, J. S. und W. Mc K. Palmer, 1948: The distribution of raindrops with size. *Journal of Meteorology* **5**, S. 165-166.
- Mason, 1971: *Physics of clouds*, Oxford Uni. Press, Oxford.
- McDonald, J. E., 1954: The shape and aerodynamics of large raindrops. *Journal of Meteorology* **11**, S. 478-494.
- Meier, 1965: Magnification and third-order aberrations in holography. *Journal of the Optical Society of America* **55**, S. 987-92.
- Murakami, M., und T. Matsuo, 1990: Development of the hydrometeor videosonde. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **7**, S. 613 - 620.
- Nakaya, U., 1954: *Snow Crystals*. Harvard University Press.
- Nelson, A. R. und N. R. Gokhale, 1972: Oscillation frequencies of freely suspended water drops. *Journal of Geophysical Research* **77**, S. 2724-2727.
- Neumann, P., 1992: Impulsholographische Untersuchungen disperser Phasen in Strömungen. Dissertation, Technische Hochschule Karlsruhe.
- O'Brein, Vivian, 1961: Why raindrops break up - vortex instability. *Journal of Meteorology*, S. 549-552.

LITERATUR

- Ochs III, H. T., D. E. Schaufelberger und J. Q. Feng, 1991: Improved coalescence efficiency measurements for small precipitation drops. *Journal of the Atmospheric Sciences* **48**, S. 946-951.
- Pavlidis, T., 1992: *Algorithmen zur Grafik und Bildverarbeitung*. Hannover, Heise.
- Pruppacher, H. R. und J. D. Klett, 1997: *Microphysics of Clouds and Precipitation*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London (Atmospheric and Oceanographic Sciences Library **18**).
- Pruppacher, H. R. und K. V. Beard, 1970: A wind tunnel investigation of the internal circulation and shape of water drops falling at terminal velocity in air. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **96**, S. 247.
- Pruppacher, H. R. und R. L. Pitter, 1971: A semi-empirical determination of the shape of cloud and raindrops. *Journal of the Atmospheric Sciences* **28**, S. 86-94.
- Raasch, J. und H. Umhauer, 1977: Grundsätzliche Überlegungen zur Messung der Verteilung von Partikelgröße und Partikelgeschwindigkeit disperser Phasen in Strömungen. (in gekürzter Form in: *Zeitschrift Chemie-Ingenieur-Technik* **49** Nr. 12, S. 931-941), Sonderforschungsbereich 62: Verfahrenstechnische Grundlagen der Wasser- und Gasreinigung, Universität Karlsruhe.
- Rauber, R. M., K.V. Beard und B. M. Andrews, 1991: A mechanism for giant raindrop formation in warm, shallow, convective clouds. *Journal of Atmospheric Sciences* **48**, S. 1791.
- Rayleigh, J. W., 1879: On the capillary phenomena of jets. *Proc. R. Soc. Lond.* **29**, S. 71-97.
- Rinehart, R. E., 1983: Out-of-level instruments: errors in hydrometeor spectra and precipitation measurements. *Journal of Climate and Applied Meteorology* **22**, S. 1404 - 1410.
- Royer, H., 1977: Holographic velocimetry of submicron particles. *Optics Communications* **20**, S. 73-75.
- Schmitt, J., 1995: Eine Windkanaluntersuchung der Tropfenform, Oszillation und inneren Zirkulation. Diplomarbeit, Institut für Physik der Atmosphäre, Universität Mainz.
- Siebert, L. D., 1967: . *Appl. Phys. Letters* **11**, S. 326-328.
- Steward, Ian, 1996: Die Form einer Träne. *Spektrum der Wissenschaft*, März, S. 10.
- Strantz, R., 1971: Typen der Regentropfenspektren. *Meteorologische Rundschau* **24**, S. 19-23.
- Tanaka, H., 1969: On breakings and oscillations of water drops. *Journal of the Meteorological Society of Japan* **47**, S. 384-389.
- Thomson, B. J., 1967: Application of hologram techniques for particle size analysis. *Applied Optics* **6**, S. 519.
- Thomson, B. J., 1974: Holographic particle sizing techniques. *Journal of Physics E: Scientific Instruments* **7**, S. 781.

LITERATUR

- Tokay, A. und K. V. Beard, 1996: A field study of raindrop oscillations, Part I: Observations of size spectra and evaluation of oscillation causes. *Journal of Applied Meteorology* **35**, S. 1671-1687.
- Trinh, E. H. und T. G. Wang, 1982: Large amplitude drop shape oscillations. *Proceedings 2nd Conference on Drops and Bubbles*, Monterey, NASA Publ., S. 143-150.
- Trolinger, J. D., 1975: Particle field holography. *Optical Engineering* **14**, S. 383-92.
- Trolinger, J. D., 1985: Particle and flow field holography: A critical survey. *SPIE* **532**, S. 40-61.
- Tyler, G. A. und B. J. Thompson, 1976: Fraunhofer holography applied to particle size analysis. A reassessment. *Optic Acta* **23**, S. 685-700.
- Uhlig, E.-M., 1996: *Holographische Untersuchungen der Wolkenmikrostruktur unter Anwendung eines automatischen Bildanalyseystems*. Dissertation, Universität Mainz, Shaker Verlag, Aachen.
- Uhlig, E.-M., S. Borrmann und R. Jaenicke, 1998: Holographic in-situ measurements of the spatial droplet distribution in stratiform clouds. *Tellus* **50B**, S. 377-387.
- Vikram, Chandra S., 1996: Image power for size analysis in in-line Fraunhofer holography. *Optics letters* **21**, S. 1073-1074.
- Vikram, Chandra, 1992: *Particle field holography*. Cambridge Studies in modern optics **11**, Cambridge University Press.
- Vohl, O., S. K. Mitra und H. R. Pruppacher, 1996: A wind tunnel investigation of the effects of turbulence on the collision growth of cloud drops. *Proceedings of the 12th Conference on Clouds and Precipitation Zurich*, Vol.1, S. 49-52.
- Vössing, H.-J., S. Borrmann und R. Jaenicke, 1998: Holographische in-situ Messungen von Hydrometeoren. *Konferenzband der Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Verhandl. DPG (VI)* **33**, S. 1080.
- Vössing, H., S. Borrmann und R. Jaenicke, 1998: In-line holography of cloud volumes applied to the measurement of raindrops and snowflakes. *Atmospheric Research* **49**, S. 199-212.
- Waldvogel, A., 1974: The N_0 jump of raindrop spectra. *Journal of Atmospheric Sciences* **31**, S. 1067.
- Webster, J. M., B.A. Tozer und C. R. Davis, 1979: Holography of large volumes using holographic scatter plates. *Optics and Laser Technology*, June, S. 157-159.
- Widjaja, J., 1998: Automatic holographic particle sizing using wavelet-based joint transform correlator. *Optics* **107**, S. 132-134.
- Willis, P. T., 1984: Functional fits of observed drop size distributions and parameterisation of rain. *Journal of the Atmospheric Sciences* **41**, S. 1648.
- Willis, P. T. und P. Tattelman, 1989: Drop-size distributions associated with intense rainfall. *Journal of Applied Meteorology* **28**, S. 3-15.

