

Messen der Tropfengrößenverteilungen am Arbeitsplatz

Von Torsten Hinz, Braunschweig-Völkenrode*)

Mitteilung aus dem Institut für landtechnische Grundlagenforschung der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode

DK 632.934.1:331.43

Bei der Applikation von Pflanzenbehandlungsmitteln durch Spritzen oder Sprühen gelangen Wirkstoffe in Tropfen gelöst, emulgiert oder suspendiert an den Fahrerplatz. Während beim Spritzen nur Tropfen kleiner $60 \mu\text{m}$ gemessen werden, finden sich beim Sprühen Tropfen im Größenbereich bis zu $600 \mu\text{m}$. Dieser weite Meßbereich sowie eine sehr geringe Tropfenanzahldichte von weniger als 10^5 Tropfen/ m^3 stellen zusammen mit den unterschiedlichen Strömungsbedingungen beim Spritzen und Sprühen die Rahmenbedingungen dar, an denen man sich bei der Auswahl eines geeigneten Meßverfahrens orientieren muß.

Beim Spritzen wurde ein Streulichtanalysator eingesetzt, dem über eine isokinetische Probenahme ein Teilstrom zugeführt werden konnte. Dieses Verfahren ließ sich beim Sprühen nicht verwirklichen. Hier wurden die Tropfen in Silikonöl aufgefangen und anschließend ausgezählt. Bedingt durch die Strömungsverhältnisse wird hierbei der atembare Anteil der Tropfen nicht vollständig erfaßt. Derzeit steht beim Sprühen noch keine Methode zur Verfügung, die den gesamten vorkommenden Tropfengrößenbereich mit hinreichender Genauigkeit abdeckt.

1. Einleitung

Die Belastung eines Menschen am Arbeitsplatz durch luftfremde Stoffe resultiert aus der Exposition, der Expositionsdauer und der spezifischen Wirkung der Stoffe. Je nach Einwirkungsart – dermal, oral oder inhalativ – ist die Belastung in unterschiedlicher Weise vom Aggregatzustand (fest, flüssig, gasförmig) und für teilchenförmige Beimengungen von deren Größe abhängig [1]. Aus diesem Grund reicht zur Beurteilung einer Belastungssituation bei teilchenförmigen luftfremden Stoffen die alleinige Angabe des Wirkstoffmassenstroms nicht aus, sondern es muß die Teilchengrößenverteilung mit herangezogen werden. Dies besonders im Hinblick auf Schutzmaßnahmen, denn die zur Reinigung der Frischluft in einer Kabine eingesetzten Filtrations- oder Waschanlagen trennen teilchengrößenabhängig [2, 3]. Aufgrund der mathematisch nicht vollständig darstellbaren Abhängigkeiten der Ausbreitungsvorgänge hinter einer bodennahen Quelle lassen sich die Teilchengrößen am Arbeitsplatz nicht berechnen, sondern sie müssen meßtechnisch ermittelt werden [4].

Im folgenden werden die Rahmenbedingungen dargestellt, unter denen Messungen beim Ausbringen von Pflanzenbehandlungsmitteln durchzuführen sind. Anhand dieser Rahmenbedingungen werden die Meßmethoden beurteilt, die geeignet erscheinen, die Tropfengrößenverteilungen am Arbeitsplatz zu messen. Die Erfahrun-

gen bei der Durchführung der Messungen beim Ausbringen durch Spritzen und Sprühen und die erzielten Ergebnisse werden diskutiert.

2. Rahmenbedingungen

Pflanzenbehandlungsmittel werden üblicherweise mit einer Trägerflüssigkeit ausgetragen, in der die Wirkstoffe gelöst, suspendiert oder emulgiert enthalten sind [5]. Ein Teil des beim Zerstäuben erzeugten Tropfenstroms gelangt an den Fahrerplatz. Die Anzahl und Größe der Tropfen sind durch die unterschiedlichen Ausbreitungsbedingungen zwischen Quelle und Akzeptor von der Ausbringungsart – Spritzen oder Sprühen – abhängig [1, 4].

Beim Spritzen wird durch den relativen Wind eine dem Querstromsichtverfahren entsprechende Aufteilung des Tropfenstromes vorgenommen [6]. Mit dem Abdriftstrom werden kaum Tropfen mit Durchmessern $d > 60 \mu\text{m}$ an den Arbeitsplatz transportiert. Die Strömungsverhältnisse erlauben eine isokinetische Probenahme zu Meßzwecken.

Beim Sprühen, d.h. dem Ausbringen mit Hilfe eines Trägerluftstromes, findet keine vergleichbare Auswahl der Tropfen nach ihrer Größe statt. Eine Tropfengrößenmessung muß hier den gesamten Bereich bis hin zum größten von der Düse oder durch Koaleszenz während der Transmission erzeugten Tropfen abdecken. Die Tropfengrößenverteilung reicht von feinsten lungengängigen Tropfen ($d < 5 \mu\text{m}$) bis hin zu groben Tropfen mit Durchmessern in der Größenordnung von $500\text{--}600 \mu\text{m}$. Zu dem erheblich weiteren Meßbereich kommt beim Sprühen noch erschwerend hinzu, daß sich durch den Trägerluftstrom die Bewegungsabläufe und Strömungsverhältnisse so komplex gestalten, daß hier im Gegensatz zum Spritzen eine isokinetische Probenahme am Fahrerplatz nicht möglich ist. Eine Probenahme, die nicht die Bedingung geschwindigkeitsgleicher (nach Betrag und Richtung) Teilstromabsaugung erfüllt, beeinflusst durch Beschleunigungseffekte den Tropfenstrom.

Eine weitere wichtige Rahmenbedingung ist die sehr geringe Tropfenanzahldichte am Meßort. Für Spritzen und Sprühen treten hier Anzahlkonzentrationen von weniger als 10^5 Tropfen/ m^3 auf, wobei dies für die Messungen beim Sprühen zusammen mit dem breiten Größenspektrum und den Probenahmebedingungen bedeutsamer ist.

Durch Zerplatzen, Zerlaufen und Koaleszenz verändern sich Tropfengröße und Tropfengrößenverteilung, ferner durch Verdunstung der Trägerflüssigkeit oder des Wirkstoffes [7]. Diese Vorgänge sind bei der Durchführung einer Messung zur Tropfengrößenbestimmung zu vermeiden, denn sie verfälschen das Meßergebnis. So wird z.B. durch die Verdunstung eine Verteilung mit höherem Feinanteil vorgegeben als in Wirklichkeit vorliegt. Bild 1 zeigt die stetige Abnahme der Größe sedimentierender Wassertropfen mit der Zeit bei unterschiedlicher relativer Luftfeuchte [8]. Es ist deutlich zu sehen, daß die Überlebenszeit eines Tropfens stark von seiner Anfangsgröße und der relativen Luftfeuchte abhängig ist. Ein $200 \mu\text{m}$ -Tropfen ist bei 70 % relativer Feuchte nach 36 s, bei 30 % nach 16 s verdunstet, während ein $60 \mu\text{m}$ -Tropfen bereits nach nur 6 s bzw. nach 2,5 s nicht mehr existiert. Die Verdunstung führt nicht nur zu unterschiedlicher Größenveränderung der Tropfen, sondern auch dazu, daß die Stoffe am Arbeitsplatz in allen drei Aggregatzuständen vorliegen können. Die anfängliche Tropfengröße verringert sich bei damit verbundener Konzentrationserhöhung so lange, bis letztlich das Feststoff- oder auch Flüssigkeitsteilchen des Pflan-

*) Dipl.-Ing. T. Hinz ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für landtechnische Grundlagenforschung (Leiter: Prof. Dr.-Ing. W. Batel) der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode.

zenbehandlungsmittels übrigbleibt. Für Suspensionen ist für das kleinste mögliche Teilchen die Primärteilchengröße des Spritzpulvers, bei einer Emulsion nach Abtrocknen der Trägerflüssigkeit die Größe des Wirkstofflösungstropfens vorgegeben. Bei einer Lösung errechnet sich der Durchmesser d des entstehenden Sekundärteilchens aus dem ursprünglichen Tropfendurchmesser d_0 und der volumetrischen Konzentration c des gelösten Stoffes zu [9]:

$$d = \sqrt[3]{c} \cdot d_0 \quad (1)$$

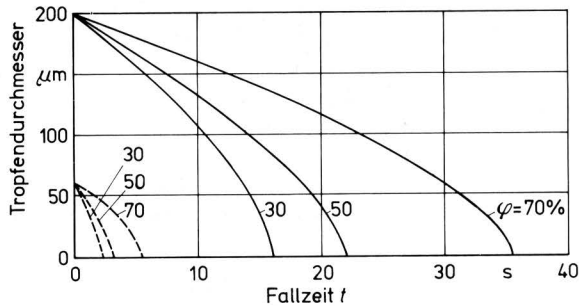


Bild 1. Veränderung der Größe sedimentierender Wassertropfen bei unterschiedlicher relativer Luftfeuchte; nach [8].

3. Meßverfahren

Bei der Messung von Tropfengrößenverteilungen ist man im Vergleich zu den Messungen an Feststoffen in der Auswahl der Meßmethode aus den oben genannten Gründen eingeschränkt [7, 10, 11, 12]. Die Verfahren zur Tropfengrößenanalyse werden zumeist in folgende 3 Gruppen eingeteilt, Tafel 1.

Verfahren	auffangen	fraktionier. abscheiden	optisch	
	<ul style="list-style-type: none"> direkt (Immersionöl) indirekt (Filter, Platten) 	Kaskadenimpaktor	Holographie	Fotographie
			Streulicht <ul style="list-style-type: none"> Laser weißes Licht 	
Meßbereich in µm	5–1000	0,5–20	1–1000	0,05–10 > 4
				1–100

Tafel 1. Verfahren der Tropfengrößenmessung.

3.1 Auffangen in Flüssigkeiten und auf festen Körpern

Bei den Auffangverfahren wird je nach Art der Probenahme zwischen der direkten Methode, bei der die Tropfen im Original vermessen werden, und der indirekten Methode unterschieden, bei der von den Tropfen hinterlassene Spuren ausgewertet werden [12, 13, 14].

Bei der direkten Methode werden die Tropfen in Öl aufgefangen. Hierzu werden in Probenehmern 2 Öle unterschiedlicher Viskosität übereinandergeschichtet. Die obere Ölschicht niedriger Viskosität fängt die Tropfen auf, ohne daß diese zerplatzen oder ihre Form verändern, die untere, höherviskose Schicht verhindert ein zu schnelles Aus sedimentieren, so daß Zeit genug bleibt, die Trop-

fen zu fotografieren. Bewährt hat sich die Verwendung von Silikonölen mit einer Viskosität von 10 cm²/s für die obere und 50 cm²/s für die untere Schicht.

Beim Abscheiden in Pulverschichten (z.B. Magnesiumoxid) oder auf Filterpapier (z.B. Celluloseacetat) hinterlassen Tropfen Spuren in Form von Kratern oder Flecken. Die Durchmesser dieser Spuren sind ein Maß für die Tropfengröße. Der durch die Spreitung bedingte Abbildungsfaktor wird durch Kalibrierung ermittelt.

Mit den Auffangmethoden lassen sich Tropfengrößen im Bereich von ca. 5–1000 µm analysieren, wobei zu berücksichtigen ist, daß bei so gewonnenen Verteilungen der Feianteil in der Anzahl unterrepräsentiert ist. Interessiert die Verteilung des Volumens (Masse), so kann auf die genaue Kenntnis des Feianteils verzichtet werden, da dieser die Gesamtverteilung nur unwesentlich beeinflusst.

Vorteil dieser Methode ist der relativ geringe Aufwand, mit dem eine Tropfengrößenverteilung bestimmt werden kann. Bei der direkten Methode wird durch die Einbettung der Tropfen in Öl eine Größenveränderung durch Verdunstung verhindert.

3.2 Auffangen in Gasströmungen und fraktioniertes Abtrennen

Diese Verfahren sind im Prinzip ebenfalls Auffangverfahren, werden jedoch zumeist als eine eigene Gruppe betrachtet. Sie werden zumeist in der Aerosolmeßtechnik bei der Abscheidung und Klassierung von Feststoffteilchen bzw. Öltropfen mit Durchmessern $d < 20 \mu\text{m}$ eingesetzt [10, 12].

Nach einer isokinetischen Probenahme wird der Teilluftstrom einer fraktionierenden Abscheidevorrichtung z.B. einem Kaskadenimpaktor oder einer Frittenkaskade zugeführt und die Teilchen werden dort auf einer ihrer Größe entsprechenden Stufe (Kaskade) abgeschieden. Über eine Kalibrierung, z.B. mit Latizes, ist jeder Stufe eine mittlere Teilchengröße zuzuordnen.

Für Wassertropfen müßten die Platten eines Kaskadenimpaktors der indirekten Methode entsprechend mit Öl beschichtet oder mit Filterpapier belegt werden, da die Tropfen sonst, selbst bei Messungen mit hoher Luftfeuchte, bis zur Auswertung verdunstet sind. Werden mit Fluorescein angefarbte Wassertropfen in einem Kaskadenimpaktor abgeschieden, so sind die Filterbelegungen der einzelnen Stufen mit einem Fluoreszenzspektrometer zu ermitteln [15].

3.3 Optische Methode

Im Gegensatz zu den oben beschriebenen mechanischen haben die optischen Methoden den Vorteil der berührungslosen Messung am ungestörten Tropfenstrom. (Letzteres gilt jedoch nur in Sonderfällen auch für die Streulichtmethoden.)

3.3.1 Fotografie

Für fotografische Aufnahmen wird ein Abschnitt des Aerosolstromes im Durchlicht vergrößert und aufgenommen. Der Abbildungsraum ergibt sich aus dem Bildausschnitt und der zumeist sehr begrenzten Tiefenschärfe. Die Belichtungszeiten sind abhängig von den Teilchengeschwindigkeiten und liegen oft in der Größenordnung von einigen ns. Soll z.B. ein Tropfen mit einem Durchmesser von 200 µm bei einer Geschwindigkeit von 20 m/s auf 1 % genau gemessen werden, so darf er während der Aufnahme maximal einen Weg von 2 µm zurücklegen. Die Zeitspanne, die er dafür benötigt, beträgt 100 ns. Abhängig vom Auflösungsvermögen, von Kamera und Filmmaterial wird ein unterer Grenz tropfendurchmesser von 3–4 µm angegeben [16]. Die Auswertung erfolgt durch Ausmessen und Auszählen nachvergrößerter Aufnahmen.

3.3.2 Holographie und Laserbeugung

Mit Laserlicht angestrahlte Teilchen beugen das Licht. Dieser Effekt wird auf zweierlei Weise bei der Teilchengrößenmessung genutzt.

Werden bewegte Teilchen mit einem Impulslaser beleuchtet, so bilden sich hinter ihnen aus gebeugtem und nicht gebeugtem Licht Interferenzmuster, die auf einer fotografischen Platte als Hologramm festgehalten werden. Durch Beleuchtung des Hologramms mit einem kontinuierlichen Laser entsteht ein reelles feststehendes räumliches Bild der Teilchenverteilung, das z.B. mittels Fernsehkamera abgefahren und ausgewertet werden kann [10, 11, 12, 17]. Mit der Holographie können schnell strömende Aerosole mit Teilchen im Bereich von 1–1000 μm Durchmesser analysiert werden. P. Dunn u. J.M. Walls [17] berichten über die holographische Messung der Tropfengrößenverteilung einer Ultra-Low-Volume-Sprühvorrichtung. Es wurde ein Rubin-Impulslaser eingesetzt für Einzelimpulse von 20 ns Dauer. Hiermit konnten z.B. noch 50 μm große Tropfen bei einer Geschwindigkeit von 250 m/s aufgenommen werden. Das aktive Meßvolumen betrug 60 cm^3 , so daß sich in jedem Hologramm mehrere hundert Tropfen befanden, aus denen eine Verteilung mit ausreichender statistischer Sicherheit ermittelt werden konnte. Bei den zur Untersuchung anstehenden Messungen am Arbeitsplatz wären in dem ausgedehnten Meßvolumen von 60 cm^3 lediglich ca. 6 Tropfen enthalten. Die Methode ist hier nicht anwendbar. Als genereller Nachteil der Holographie ist der hohe zeitliche, apparative und damit finanzielle Aufwand zu sehen.

Bei dem zweiten Meßverfahren wird das von der Teilchengröße abhängige Beugungsspektrum ausgenutzt. Durch Ausmessen der entstehenden radialsymmetrischen Intensitätsverteilung kann aus dem Beugungsspektrum die Teilchengröße errechnet werden [11, 18]. Diese Methode wurde bisher fast nur zur Messung in Suspensionen benutzt.

3.3.3 Streulichtverfahren

Die Streulichtverfahren [7, 10, 11, 12] nutzen die Intensität des von einem beleuchteten Teilchens gestreuten Lichtes als Maß für die Größe des Teilchens. Geräte mit Lasern sind auf die Messung feiner Teilchen bis ca. 10 μm begrenzt, da nur für diese bei Beleuchtung mit monochromatischem Licht der Wellenlänge λ eine eindeutige Zuordnung der gestreuten Lichtmenge I und der Teilchengröße a gegeben ist, Bild 2. Mit zunehmender Teilchengröße ist festzustellen, daß von Teilchen unterschiedlicher Größe a gleiche Streulichtintensität I hervorgerufen wird. Die Lage von relativen Extremwerten in der Streufunktion $I(a)$ ist u.a. abhängig von der Wellenlänge des einfallenden Lichtes. Bild 2 zeigt dies für die Wellenlängen λ_1 und λ_2 bei konstantem Brechungsindex n . Eine Überlagerung der beiden Kurven führt zu einer Reduzierung der Mehrdeutigkeiten. Durch die Verwendung weißen Lichtes entsteht ein weitgehend geglätteter Kurvenverlauf, der eine eindeutige Ermittlung der Teilchengröße aus der Streulichtintensität zuläßt. Dies wird durch die Registrierung des Streulichtes unter 90° begünstigt [19, 20].

Alle vorgenannten Bedingungen werden von dem Streulichtanalysator HC70 "System Karlsruhe" [20] erfüllt. Die Abgrenzung des Meßvolumens geschieht auf rein optischem Wege durch die 90°-Anordnung von Beleuchtungs- und Empfangsoptik, Bild 3.

Zur eindeutigen Identifizierung der von den Teilchen ausgehenden Streulichtimpulse darf sich immer nur ein Teilchen im Meßvolumen befinden; daher ist für hohe Konzentrationen immer ein kleines Meßvolumen anzustreben. Für einen Koinzidenzfehler von 5 % ergibt sich für die maximal zulässige Teilchenkonzentration c_{max} und das Meßvolumen V_m die Relation

$$c_{\text{max}} = 0,1/V_m \quad (2)$$

Im umgekehrten Bezug steht die geometrische Ausdehnung des Meßvolumens zum größten noch meßbaren Teilchen. Als Richtwert gilt hier, daß der Teilchendurchmesser 20 % der Kantenlänge des kubischen Meßvolumens nicht überschreiten sollte [21]

$$d \leq 0,2 \sqrt[3]{V_m} \quad (3)$$

Die wesentlichen Vorteile der Streulichtmethode sind in ihrer relativ einfachen Handhabung und in der Schnelligkeit zu sehen, mit der eine Tropfengrößenanalyse und -zählung durchgeführt werden kann.

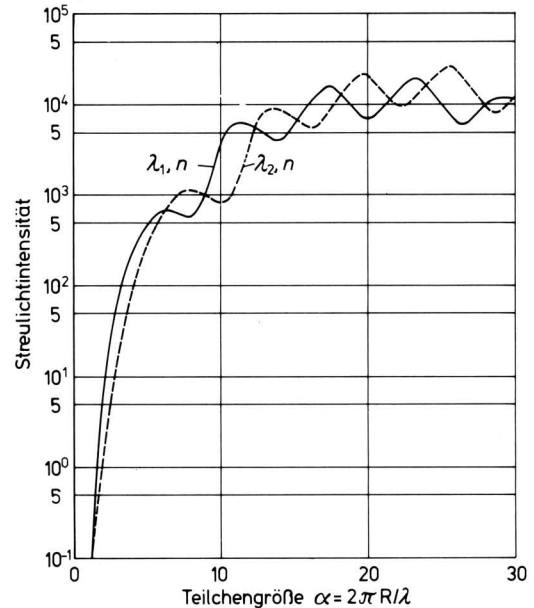


Bild 2. Einfluß der Wellenlänge λ auf die Streulichtintensität.

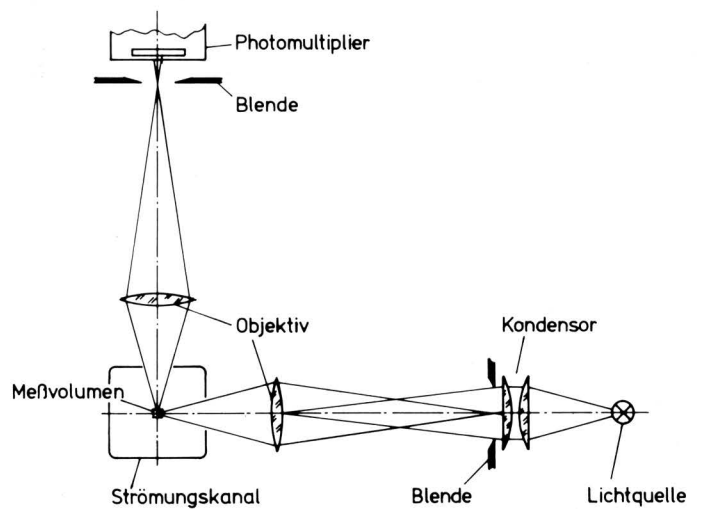


Bild 3. Optischer Teilchenzähler HC70 nach H. Umhauer.

4. Anwendung und Erfahrungen im praktischen Einsatz

Für die Versuche zur Bestimmung der Tropfengrößenverteilung am Arbeitsplatz beim Ausbringen von Pflanzenbehandlungsmitteln werden eine Streulichtmeßeinrichtung mit weißem Licht und die direkte Auffangmethode eingesetzt.

Für eine Analyse mit Impaktoren und mit der Streulichtmethode mit Lasern sind die Tropfen zu groß, für die Kurzzeitfotografie und Holographie die Tropfenzahl in der Meßzeit und dem abbildbaren Volumen zu gering.

4.1 Ausbringen durch Spritzen

Beim Spritzen ist bei den Versuchen im Windkanal und auf dem Versuchsstand eine annähernd isokinetische Probenahme möglich [1], und es treten kaum Tropfen größer 60 μm auf. Hier konnte der Streulichanalyator eingesetzt werden. Die zur statistischen Sicherheit einer Messung notwendige Tropfenanzahl wurde durch eine entsprechend lange Meßzeit erhalten.

Bild 4 zeigt den Durchdringungsbereich von Beleuchtungs- und Empfangsstrahl, der sich bei dem eingesetzten Gerät zu einem Kubus mit der Kantenlänge von 500 μm ergibt. Hiermit sind Tropfen mit Durchmessern im Bereich von 2 bis ca. 100 μm (Gl. (3)) zu messen. Die maximale Tropfenkonzentration entsprechend Gl. (2) beträgt 800 Tropfen pro cm^3 . Aus der Darstellung des Meßvolumens in Bild 4 ist eine Fehlerquelle dieses Meßverfahrens zu sehen. Durch die rein optische Abgrenzung ist es möglich, daß Tropfen das Meßvolumen nicht vollständig durchqueren. Befindet sich ein Tropfen am Rand des Meßvolumens, so wird er entweder nur teilweise beleuchtet (Tropfen 2) oder es gelangt nur ein Teil der Streulichtmenge auf den Photomultiplier (Tropfen 3). In beiden Fällen erhält man als Ergebnis einen zu kleinen Tropfendurchmesser. Dieser Randzonenfehler führt dazu, daß die gemessenen Verteilungen eine Verschiebung zum Feinbereich aufweisen. Selbst für einen Strom monodisperser Teilchen, z.B. beim Kalibrieren der Streulichteinheit, wird nicht nur eine Impulshöhe, sondern ein Impulshöhenspektrum gemessen. **Bild 5** zeigt die Anzahlsummenverteilung von drei Impulsspektren, wie sie für monodisperse Latizes aufgenommen werden. Die Verteilungen werden mit wachsender Teilchengröße breiter, d.h. die Bedeutung dieses Randzonenfehlers nimmt zu [22].

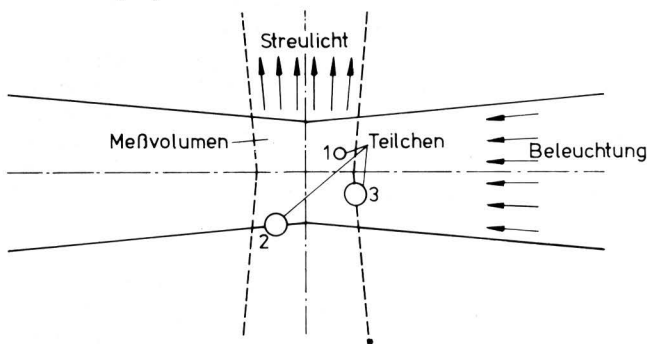


Bild 4. Strahlengang im Meßvolumen des Teilchenzählers HC70.

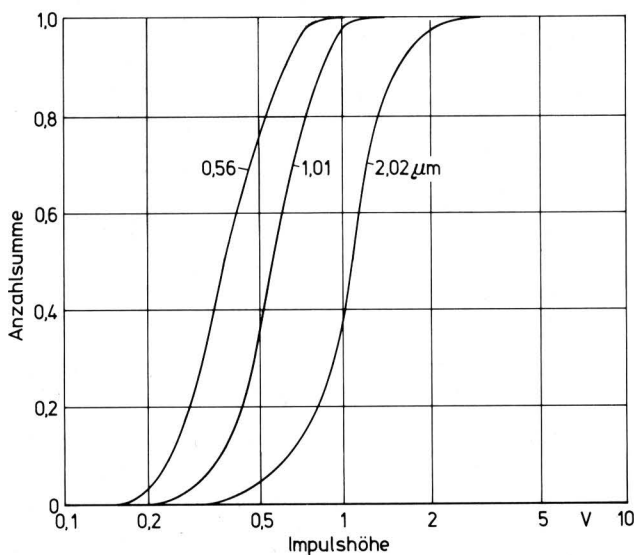


Bild 5. Impulshöhenverteilung von Latexkugeln beim Kalibrieren des Teilchenzählers HC70.

Eine weitere Fehlerquelle bei Messungen an Pflanzenbehandlungsmitteln ist die einleitend schon erwähnte Veränderung der Wirkstoffkonzentration im Tropfen bis hin zur Rekristallisierung. Die vom Tropfen abgegebene Streulichtmenge ist nicht nur von der Tropfengröße, sondern auch von dessen Brechungsindex abhängig [23]. Für kleine Tropfen mit großer Brechungszahl ergeben sich gleiche Impulshöhen für die Auswertelektronik wie für größere Tropfen mit entsprechend kleinerer Brechungszahl. Eine Größenunterscheidung ist hier nicht möglich. Aus diesem Grund muß eine Streulichteinrichtung mit der Substanz kalibriert werden, deren Größenverteilung gemessen werden soll.

Bild 6 zeigt die Kalibrierkurven eines optischen Teilchenzählers für unterschiedliche Brechungsindizes. Für transparente Stoffe, d.h. für Stoffe, deren Brechungszahl reell ist, verlaufen diese Kalibrierkurven alle sehr ähnlich, und es ist zulässig, aus mit Teilchen bekannter Größe und Brechungszahl gemessenen Werten die Kalibrierkurve für andere Substanzen über einen Faktor, der sich aus den beiden Brechungsindizes ergibt, zu berechnen. Die in Bild 6 dargestellten Kurven beziehen sich auf Latex – eine zur Kalibrierung von Teilchengrößenmeßsystemen häufig verwendete Substanz – und Wasser, das am häufigsten verwendete Trägerfluid beim Ausbringen von Pflanzenbehandlungsmitteln. Die auftretenden Abweichungen sind zu akzeptieren, insbesondere da Kalibrierversuche mit einem Berglund-Liu-Aerosolgenerator zeigten, daß diese Abweichungen in der Größenordnung der erzielbaren Meßgenauigkeit liegen.

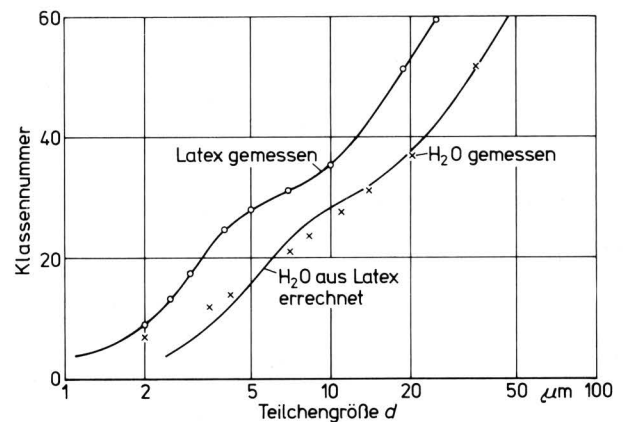


Bild 6. Kalibrierkurven für Teilchenzähler HC70.

In Anwendungsfällen, in denen der Brechungsindex unbekannt ist oder sich während einer Messung verändert, eignet sich die Streulichtmethode nur noch für Relativmessungen, nicht mehr für absolute Aussagen, da als Ergebnis nur noch ein Äquivalentdurchmesser angegeben werden kann. Dem Äquivalentdurchmesser von Latex ($n = 1,58$) $d_L = 10 \mu\text{m}$ entsprechen Tropfen 10 %iger Kochsalzlösung ($n = 1,35$) von ca. 18 μm und kristalline Salzteilechen ($n = 1,54$) von ca. 11 μm Durchmesser.

Von Zerstäuberdüsen erzeugte Tropfenspektren weisen häufig sehr flache Verläufe an den Rändern der Verteilungen auf. Um diese Randgebiete – im Feinen und im Groben – zu erfassen, wird ausgenutzt, daß die Lage der Kalibrierkurve von der Verstärkung des Photomultipliers, d.h. seiner Versorgungsspannung, abhängt. Es wird mit 2 Photomultiplieranspannungen gearbeitet, so daß jeweils ein "Rand" im Meßbereich liegt. Bei der Spannung $U_{PM} = 1150 \text{ V}$ werden Tropfen von 1–54 μm , bei $U_{PM} = 1000 \text{ V}$ der Bereich von 6 bis ca. 120 μm gemessen, **Bild 7**. Die resultierende Gesamtverteilung wird aus den Einzelmessungen errechnet. Zur Kontrolle wurde zusätzlich aus beiden Messungen nur der Bereich von 6–54 μm ausgewertet, den beide Empfindlichkeitsstufen gemeinsam überdecken. Es zeigt sich, daß mit geringen Abweichungen das gleiche Ergebnis erzielt wird. Die Messungen wurden im Windkanal bei einer Luftgeschwindigkeit von 2,2 m/s durchgeführt.

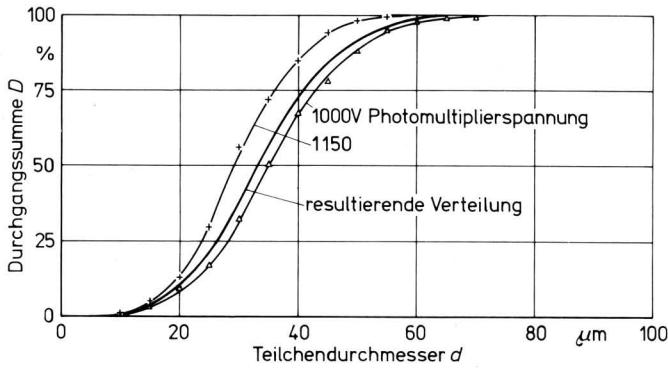


Bild 7. Tropfengrößenverteilung beim Spritzen (Volumen).

4.2 Ausbringen durch Sprühen

Werden die Pflanzenbehandlungsmittel durch das Sprühverfahren ausgebracht, so liegen — im Vergleich zum Spritzen — veränderte Meßbedingungen durch den größeren Meßbereich und im Hinblick auf die Probenahme vor. Eine isokinetische Probenahme ist hier nicht möglich [1].

Um beim Sprühen den Feinanteil des Tropfenkollektivs am Arbeitsplatz mit der Streulichteinheit bestimmen zu können, muß der Anteil großer Tropfen gesondert ermittelt werden. Bei einer Aufteilung des Tropfenstromes in einen groben und einen feinen Teilstrom durch einen Tropfenabscheider ist eine Trenngrenze, bedingt durch den Meßbereich des HC70, in der Größenordnung von 60–100 μm zu fordern.

Für diese Trenngröße sind Umlenkabscheider [24] einsetzbar. Durch die Umlenkung im Abscheider ist aber eine ungleichmäßige Konzentrations- und Größenverteilung der Tropfen über dem Strömungsquerschnitt gegeben, so daß ein repräsentativer Meßort schwerlich bestimmt werden kann, denn es muß gewährleistet sein, daß alle im Kollektiv enthaltenen Tropfengrößen durch das optisch abgegrenzte Meßvolumen gelangen. Dies ist aber nur möglich, wenn keine Entmischung durch Relativbewegung stattfindet, sondern die Bahnkurven der Tropfen den Stromlinien entsprechen, **Bild 8**. Aufgrund ihrer hohen kinetischen Energie werden grobe Tropfen schon bei geringer Strömungsumlenkung aus dem Teilstrom z.B. an die Wand der Sonde getrieben und sind für die Messung verloren. Im Gegensatz zu Feststoffen besteht bei Tropfen keine Möglichkeit, die Größe oder Menge dieser Tropfen z.B. durch ein anderes Verfahren im Anschluß an eine Messung festzustellen, da die Tropfen an der Wand zerlaufen.

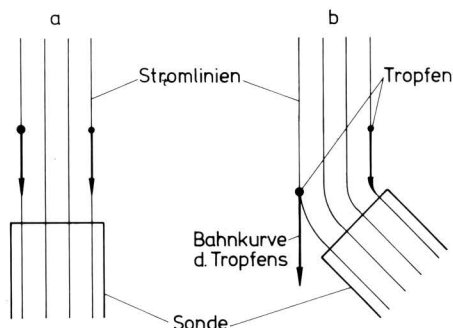


Bild 8. Probenahme von Tropfen ohne (a) und mit (b) Richtungsänderung des Strömungsfeldes.

Soll das Streulichtverfahren ohne Vorabscheidung eingesetzt werden, so ist ein weiteres Meßverfahren für die Tropfen nötig, die größer sind als der Meßbereich des Analysators. Überdecken beide Verfahren einen gewissen Tropfengrößenbereich gemeinsam, so läßt sich die Verteilung aus den beiden Summenkurven der Einzelanalysen berechnen. Eine weitere Möglichkeit der Verknüpfung besteht, da ab einer bestimmten durch den Meßbereich des Streulichtanalysators festgelegten Größe alle Tropfen in der letzten nach oben hin offenen Klasse gezählt werden. Ihr zahlenmäßiger Anteil am Gesamtkollektiv ist somit bekannt, nicht jedoch ihre Größe.

Als Information zur Berechnung der Gesamtverteilung ist jetzt die Verteilung der in dieser letzten Klasse des Streulichtgeräts gezählten Tropfen zu erstellen. Es kann auf einen weiten Überlappungsbereich verzichtet werden. Dies bedeutet eine Zeitersparnis, wenn als zweites Verfahren die Auffangmethode eingesetzt wird, denn es entfällt das mühevoll Auszählen der vielen kleinen Tropfen.

Während des praktischen Einsatzes beim Sprühen zeigte sich, daß es aufgrund der Probenahme und durch die geringe Ausdehnung des Meßvolumens des Streulichtanalysators nicht möglich war, hiermit eine ausreichende Anzahl von Tropfen zu vermessen. Aus den gravimetrisch ermittelten Beladungen und Tropfengrößenanalysen, die über die Auffangtechnik erstellt wurden, errechnen sich Konzentrationen von ca. 10^5 Tropfen/ m^3 . Dies bedeutet, daß ein Tropfenstrom von ca. 100 Tropfen/h in das Meßvolumen des HC70 eintritt.

Zur Bestimmung der Tropfengröße beim Sprühen wurden daher die Tropfen in Silikonöl aufgefangen, fotografiert und ausgezählt. Bei der Auswertung einer Bildvorlage werden die Tropfen gezählt und ihrer Größe nach klassiert. Hierbei wird auf die aus der Korngrößenanalyse bekannten Bildauswertesysteme zurückgegriffen, die, je nach Ausrüstungsniveau, halb- oder vollautomatisch arbeiten. Eine manuelle Auswertung ist auch schon bei relativ geringer Tropfenzahl sehr zeitaufwendig. Für die Ausmessung und Auszählung von ca. 500 Teilchen wird auch von einem geübten Mitarbeiter nahezu 1 Tag benötigt, auch wenn die Klassierung und Berechnung der Verteilungskurven mit einem Computer durchgeführt wird. Andererseits sind die Vollautomaten erheblich teurer in der Anschaffung.

Analysefehler entstehen, wenn große Tropfen kleine abdecken oder viele kleine Tropfen zu einem großen Tropfen ineinander verlaufen. Es ist zu beachten, daß wenige große Tropfen die gesamte Massenverteilung grundlegend verändern. So hat ein 200 μm großer Tropfen die gleiche Masse wie 10^6 Tropfen von 2 μm Durchmesser.

Bild 9 zeigt eine lichtmikroskopische Aufnahme von Wassertropfen, die in Silikonöl aufgefangen wurden. Um kontrastreiche Bildvorlagen zu erhalten, wurde das Wasser mit 0,5 % Wollschwarz angefärbt. Angefärbt werden die Tropfen auch, wenn sie der indirekten Auffangmethode entsprechend auf Filter abgeschieden werden sollen. In diesem Fall ist eine Kalibrierung notwendig, da die Tropfen zerlaufen und die Originalgröße über den Spreitungsfaktor aus dem Abbild zu errechnen ist. Der Spreitungsfaktor k wird aus den Summenverteilungen der auf Filter und in Silikonöl aufgefangenen Tropfen errechnet, wobei unterstellt ist, daß die über Silikonöl ermittelte Funktion das Original wiedergibt. Der im **Bild 10** mit eingetragene Spreitungsfaktor ist für kleine Tropfen nahezu 1 und steigt mit der Tropfengröße linear an.

Mit der direkten Auffangmethode wurde die Tropfengrößenverteilung für verschiedene Abstände s_A vom Sprüherät gemessen. Eine Beschreibung des Versuchsstandes findet sich bei *Batel* [25]. Statt der dort installierten Filterköpfe waren für die Abstände $s_A = 2$ m; 3,5 m; 5 m Petrischalen in einer Höhe von $h_F = 1,8$ m über dem Boden mit Laborhalterungen befestigt. Die Petrischalen von 80 mm Durchmesser waren gefüllt mit 25 ml Silikonöl der Viskosität 50 cm^2/s und darüber geschichtet 10 ml mit 10 cm^2/s . Die Windgeschwindigkeit betrug durchschnittlich 1,3 m/s, die Temperatur 20 $^\circ\text{C}$ (24,8 $^\circ\text{C}$) bei relativen Luftfeuchten von 81 % (66 %). Die Versuchsdauer von anfänglich 10 Sekunden mußte auf 13 Sekun-

den verlängert werden, da sonst für den Abstand $s_A = 2$ m zu wenig Tropfen aufgefangen wurden. Andererseits war für Meßzeiten von mehr als 10 Sekunden der Belag für die Schalen in Abständen von $s_A = 3,5$ m und $s_A = 5$ m zu hoch. Um auszuschließen, daß Anlaufvorgänge von Gebläse und Pumpe die Messungen verfälschen, wurden erst nach Erreichen des stationären Betriebszustandes (> 10 s) die Petrischalen aufgedeckt. Die Schalen wurden gleich anschließend an die Versuche in einer Meßbaracke unter einem Panphot fotografiert. Die anschließenden Nachvergrößerungen (Gesamtvergrößerung 1 : 26,1) wurden ausgemessen, die Daten in einen Commodore-Rechner eingegeben und dort ausgewertet.

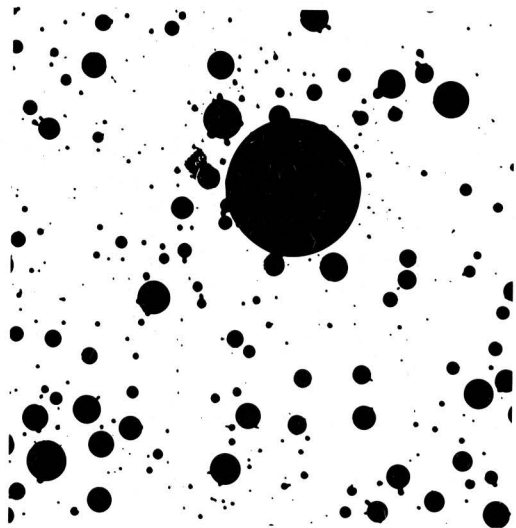


Bild 9. In Silikonöl aufgefangene angefarbte Wassertropfen.

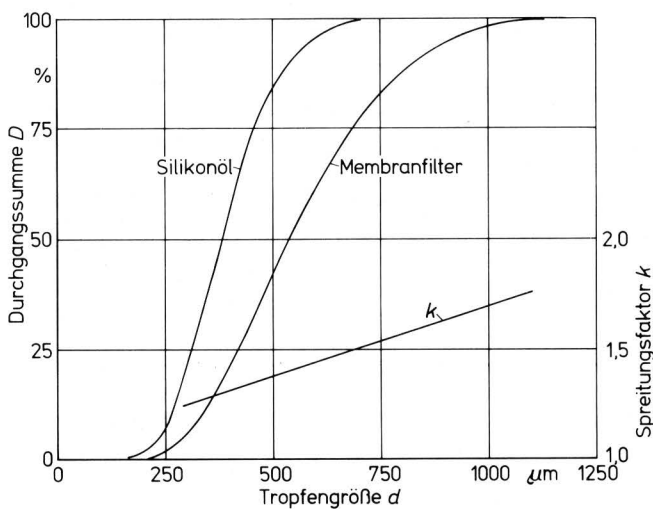


Bild 10. Spreitungsfaktor auf Membranfiltern aufgefangener Tropfen.

Tafel 2 enthält die wichtigsten Größen der Analyse, die 50 %-Werte von Anzahl- und Volumenverteilung (d_{A50} , d_{V50}), das größte Teilchen d_{max} , die Anzahlen der Tropfen, die der jeweiligen Analyse zugrundeliegen, und die Gesamtmasse m , die sich hieraus bei einer Dichte von $\rho = 1$ g/cm³ errechnen läßt.

s_A [m]	d_{A50} [μ m]	d_{V50} [μ m]	d_{max} [μ m]	n	m [mg]
2	154	250	500	237	0,98
3,5	117	298	560	694	2,09
5	113	293	500	770	2,6

Tafel 2. Ergebnisse der Tropfengrößenanalyse beim Sprühen in verschiedenen Abständen s_A vom Sprühgebläse (Auffangverfahren).

In Bild 11 sind die Verläufe von Anzahl- und Volumensumme für eine ausgewertete Tropfenanzahl von $n = 244$ dargestellt. Es werden Tropfen im Größenbereich von etwa 60 bis 500 μ m gemessen, d.h. nahezu der gesamte Anteil atembare Tropfen (< 60 μ m) wird nicht erfaßt. Ursache dafür ist, daß durch die Strömungsverhältnisse am Arbeitsplatz die feineren Tropfen nicht in die Ölschicht gelangen, sondern den Strombahnen folgen, die etwa parallel zur Oberfläche der Auffangschicht verlaufen.

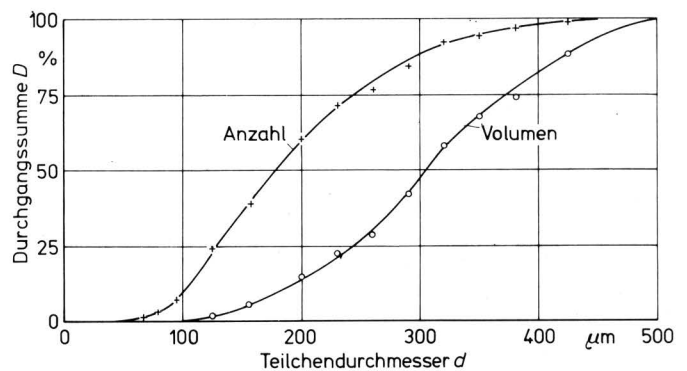


Bild 11. Mit dem Auffangverfahren gemessene Tropfengrößenverteilung beim Sprühen. Tropfenanzahl $n = 244$.

5. Zusammenfassung

Zur Beurteilung der Belastungssituation am Arbeitsplatz beim Ausbringen von Pflanzenbehandlungsmitteln ist u.a. die Kenntnis der Größenverteilung der dort auftretenden Tropfen nötig.

Im Gegensatz zu der Vielzahl von Korngrößenmeßverfahren ist man bei der Ermittlung von Tropfengrößen deutlich eingeschränkt, da Tropfen zerplatzen oder zerlaufen, wenn sie an Berandungsflächen oder gegeneinander stoßen. Desweiteren ist es wichtig, die Verdunstungsvorgänge mit zu berücksichtigen.

Von den bekannten Verfahren scheiden für die Anwendung auf das zugrundeliegende Problem fraktionierende Abscheideverfahren, wie z.B. Kaskadenimpaktoren, wegen der zu großen auftretenden Tropfen aus, während fotografische oder holographische Aufnahmen wegen der geringen Tropfenzahl in der Meßzeit und dem auswertbaren Meßvolumen nicht anwendbar erscheinen.

Die unterschiedlichen Bedingungen beim Spritzen und Sprühen führen auch zum Einsatz unterschiedlicher Meßverfahren. Beim Spritzen tritt eine dem Querstromsichtverfahren entsprechende Entmischung im Tropfenstrom auf. Die an den Fahrerplatz gelangenden Tropfen sind zumeist kleiner als 60 μ m, und der Tropfenstrom kann durch eine annähernd isokinetiche Probenahme einer mit weißem Licht arbeitenden und unter 90° angeordneten Streulichtmeßeinrichtung durchgeführt werden.

Beim Sprühen hingegen reichen weder Meßbereich noch Meßvolumen der Streulichtmeßeinrichtung aus, und zudem ist keine isokinische Probenahme möglich. Die geforderten Analysen werden hier über die Auffangmethode erstellt, daß heißt, die Tropfen werden in Petrischalen, die mit Silikonöl gefüllt sind, aufgefangen, fotografiert und ausgezählt. Da die feinen Tropfen nicht in dem Öl abgeschieden werden, sondern der Strömung folgen, wird mit dieser Methode der atembare Anteil der Tropfen nicht vollständig erfaßt.

Für die Analyse der Tropfengröße am Arbeitsplatz beim Sprühen stehen derzeit, u.a. wegen der Probleme bei der Teilstromentnahme, noch keine Methoden zur Verfügung, die den gesamten vorkommenden Größenbereich mit hinreichender Genauigkeit abdecken.

Schrifttum

Bücher sind durch • gekennzeichnet

- [1] *Batel, W.*: Belastung des Arbeitsplatzes beim Ausbringen von Pflanzenschutzmitteln durch Spritzen und Sprühen. *Grundl. Landtechnik* Bd. 32 (1982) Nr. 4, S. 113/24.
- [2] *Smigerski, H.J.*: Der Einsatz von Entstaubern in der Landtechnik. *Physikalische Grundlagen der Staubabscheidung*. *Grundl. Landtechnik* Bd. 19 (1969) Nr. 6, S. 189/96.
- [3] • *Batel, W.*: Entstaubungstechnik. Berlin/Heidelberg/New York: Springer Verlag 1972.
- [4] *Krause, K.-H.*: Theorie der Ausbreitung von Wirkstoffen nach einer Quelle. *Grundl. Landtechnik* Bd. 34 (1984) Nr. 2, S. 53/59.
- [5] • *Lüders, W.*: Pflanzenschutzmaschinen und deren Einsatz: Stand 1979. Bezugsquelle: Landesanstalt für Pflanzenschutz Stuttgart.
- [6] *Bernotat, S.*: Untersuchung eines Querstromsichtverfahrens. *Diss. TH Karlsruhe* 1975.
- [7] *Schuck, G. u. H. Umhauer*: Messung der Tropfengrößenverteilung von zerstäubtem Wasser. *Verfahrenstechnik* Bd. 14 (1980) Nr. 4, S. 237/41.
- [8] *Seymour, K.G.*: Evaluation of spray drift potential. *Adv. in Chem. Series* Bd. 86 (1960) S. 135/53.
- [9] Instruction manual Berglund-Liu vibrating orifice monodisperse aerosol generator. TSI INC. St. Paul, Mich./USA.
- [10] *Bürkholz, A.*: Meßmethoden zur Tropfengrößenbestimmung. *Chem.-Ing. Technik* Bd. 45 (1973) Nr. 1, S. 1/7.
- [11] *Lauterwasser, D., D. Ondratschek u. K.D. Thomer*: Bestimmung der Tröpfchengröße von Lack-Aerosolen: Stand heutiger Meßverfahren. *Maschinenmarkt* Bd. 85 (1979) Nr. 23, S. 394/98.
- [12] *Davies, R.*: A review of the methods for the particle size analysis of droplets, sprays and mists. *Dechema-Monographien* Nr. 1589–1615, Bd. 79, Teil B, S. 115/34.
- [13] *Zaske, J.*: Tropfengrößenanalyse unter besonderer Berücksichtigung der Zerstäubung im chemischen Pflanzenschutz. *Diss. TU Berlin* 1973.
- [14] *Heidt, H.*: Automatische Tropfengrößen- und Belagsanalyse im chemischen Pflanzenschutz. *Diss. TU Berlin* 1976.
- [15] *Mejer, G.-J.*: Zur Meßtechnik einschließlich Tracermethoden bei der Bestimmung der Wirkstoffkonzentration am Arbeitsplatz. *Grundl. Landtechnik* Bd. 34 (1984) Nr. 2, S. 72/76.
- [16] *Jandl, G.*: Zur fotografischen Tropfengrößenbestimmung bei der Zerstäubung von Heizöl. *Diss. TU Stuttgart* 1975.
- [17] • *Dunn, P. u. J.M. Walls*: Droplet size distributions from an agricultural spray using in-line holography. *Particle size analysis*. Editor: *M.J. Groves*. London, Philadelphia, Rheine: Heyden and Son Ltd. 1978.
- [18] Messung von Partikelgrößenverteilungen im Gas-Feststoff-Freistrahl durch Analyse von Beugungsspektren. *Messe-Mitteilung des Instituts für mechanische Verfahrenstechnik der Technischen Universität Clausthal; Hannover-Messe* 1983.
- [19] *Broßmann, R.*: Die Lichtstreuung an kleinen Teilchen als Grundlage einer Teilchengrößenbestimmung. *Diss. TH Karlsruhe* 1966.
- [20] *Umhauer, H.*: Partikelgrößenbestimmung in Suspensionen mit Hilfe eines Streulicht-Zählverfahrens. *Chem.-Ing. Technik* Bd. 52 (1980) Nr. 1, S. 55/58.
- [21] Bedienungsanleitung Partikelgrößenanalysator HC70. *Polytec Waldbronn-Karlsruhe*.
- [22] *Fissan, H. u. C. Helsper*: Characteristics of a Polytec HC15 Optical Particle Counter. *Gesellschaft für Aerosolforschung* Bd. 8 (1980): *Aerosols in Science, Medicine and Technology*. S. 287/92.
- [23] *Quenzel, H.*: Influence of refractive index on the accuracy of size determining of aerosol particles with light-scattering aerosol counters. *Applied Optics* Bd. 8 (1969) Nr. 1, S. 165/68.
- [24] *Batel, W.*: Der Waschentstauber – Entwicklungsstand und -tendenzen, Teil II: Die Tropfenabscheidung. *Staub-Reinhalt. Luft* Bd. 34 (1974) Nr. 2, S. 52/55.
- [25] *Batel, W.*: Zur Anwenderexposition beim Ausbringen von Pflanzenbehandlungsmitteln durch Spritzen und Sprühen – Eine Zusammenfassung der seitherigen Ergebnisse. *Grundl. Landtechnik* Bd. 34 (1984) Nr. 2, S. 33/53.