

Einfluß physikalischer Flüssigkeitseigenschaften auf die Zerstäubung im Pflanzenschutz

Von Manfred Schmidt, Berlin*)

DK 632.9:632.981.1:532.13:532.61

Das Zerstäubungsverhalten von Düsen wird in der Regel mit Wasser überprüft. Die im Pflanzenschutz eingesetzten Flüssigkeiten weisen jedoch physikalische Eigenschaften auf, die — besonders bei der Verwendung von Additiven — von denen des Wassers recht verschieden sind. Ausgehend von den Grundlagen der Zerstäubung, wird der Einfluß der ermittelten Flüssigkeitsdaten auf den Zerstäubungsvorgang aufgezeigt. Im weiteren werden bekannte Verfahren der Vorausberechnung charakteristischer Tropfendurchmesser auf ihre Anwendbarkeit hin überprüft.

1. Einleitung

Die Zerstäubung von Flüssigkeiten zählt zu den elementaren verfahrenstechnischen Prozessen bei der Applikation von Pflanzenschutzmitteln. Ziel des Vorgangs ist es, das auszubringende Fluid gleichmäßig auf eine große Fläche mit in den meisten Fällen sehr komplizierter Form zu verteilen. An das erzeugte Tropfenspektrum werden je nach Anwendungsfall ganz gezielte Anforderungen gestellt. So dürfen im chemischen Pflanzenschutz die Tropfen nicht so klein werden, daß sie schon bei geringer Luftbewegung davongetragen werden. Andererseits erschweren übermäßig große Tropfen den Anlagerungsvorgang und beeinträchtigen die Gleichmäßigkeit der Bedeckung. Von gleicher Bedeutung ist das Tropfenspektrum für die Fragen der Bestandsdurchdringung.

Neben der Art des Zerstäubers haben die physikalischen Eigenschaften der zu zerteilenden Flüssigkeit einen entsprechenden Einfluß auf den Zerstäubungsprozeß. Weist z.B. bei der Herstellung von Kaffeepulver durch Zerstäubungstrocknung das zu verarbeitende Fluid stets die gleichen Merkmale auf, so wird im chemischen Pflanzenschutz eine Vielzahl von Mitteln unterschiedlicher physikalischer Eigenschaften verarbeitet.

Um unter so vielfältig unterschiedlichen Bedingungen ein möglichst optimales Arbeitsergebnis zu erzielen und — wo möglich — Verbesserungen vornehmen zu können, ist die Kenntnis der physikalischen Grundlagen der Zerstäubung ein nützliches Hilfsmittel.

2. Grundlagen der Zerstäubung

2.1 Physikalische Beschreibung des Zerstäubungsvorgangs

Eine umfassende Übersicht über die verschiedenen Zerstäuberarten gibt Troesch [1]. Für die Gruppe der Druckzerstäuber — die hier nur betrachtet wird — sind zwei unterschiedliche Formen der Flüssigkeitszerteilung charakteristisch. Es sind dies die Prinzipien des Strahl- und des Lamellenzerfalls. Im chemischen Pflanzenschutz kommt davon fast ausschließlich das letztgenannte zur Anwendung, so bei den Flachstrahldüsen (ebene Lamelle) und den Dralldüsen (konische Lamelle). Da sich bei den Zerfallformen die Tropfenbildung nach ähnlichen Instabilitätskriterien vollzieht, soll hier auf beide näher eingegangen werden.

Die zahlreichen Untersuchungen zum Strahlzerfall (Schrifttum u.a. in [1, 2, 3]) reichen bis Rayleigh [4] (1878) zurück. Weber [5] hat die Theorie Rayleighs auf zähe Flüssigkeiten erweitert und dabei den Strahlzerfall ohne und mit Lufteinfluß untersucht.

Nach Rayleigh zerfällt ein zähigkeitsloser Flüssigkeitsstrahl bei geringer Geschwindigkeit unter dem Einfluß rotationsymmetrischer Schwingungen — ausgelöst durch Anfangsstörungen — dann, wenn die Wellenlänge der Schwingung größer wird als der Umfang des ungestörten Strahles, Bild 1, Gebiet I: Zertropfen. Als zerstörende Kraft wirkt hier auf den Strahl ausschließlich die Oberflächenspannung der Flüssigkeit.

Bei einer Steigerung der Strahlgeschwindigkeit wirken die aus der erhöhten Relativgeschwindigkeit resultierenden Luftkräfte unterstützend und beschleunigend auf den Strahlzerfall.

Eine weitere Geschwindigkeitserhöhung führt unter dem steigenden Einfluß der Luftkräfte zu einseitig wellenförmigen Anfangsstörungen, die bestrebt sind, den Strahl zu verbiegen und sich dabei stärker entwickeln als die bereits genannten rotationsymmetrischen Störungen (Gebiet II: Zerwellen).

Zerfallart	Beschreibung des Vorganges	
Abtropfen	Flüssigkeit tropft ohne Strahlbildung, z.B. von einer Pipette, ab.	
Zertropfen mit und ohne Lufteinfluß Gebiet I	Flüssigkeit bildet einen Strahl und zerfällt infolge von — durch Anfangsstörungen in der Düse hervorgerufenen — rotationsymmetrischen Schwingungen in Tropfen. Luftkräfte wirken amplitudenvergrößernd.	
Zerwellen Gebiet II	Der Flüssigkeitsstrahl führt wellenförmige Schwingungen aus, die ihn zum Zerfall bringen.	
Zerstäuben Gebiet III	Der aus einer Düse mit hoher Geschwindigkeit austretende Flüssigkeitsstrahl zerfällt, scheinbar ohne jegliche Gesetzmäßigkeit.	

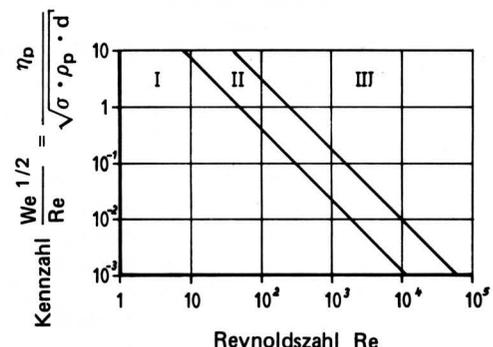


Bild 1. Formen des Strahlzerfalls (nach Weber u. Haenlein zusammengestellt von Troesch) und Diagramm mit Grenzen der Zerfallbereiche (nach v. Ohnesorge).

*) Dipl.-Ing. M. Schmidt ist wissenschaftlicher Assistent am Institut für Maschinenkonstruktion, Landtechnik und Baumaschinen (geschäftsführender Direktor: Prof. Dr.-Ing. H. Göhlich) der TU Berlin.

Erreicht der Strahl schließlich eine sehr hohe Austrittsgeschwindigkeit, so setzt die Art des Strahlerfalls ein, die von *Haenlein* [6] "Zerschmettern" genannt wird, die eigentliche Zerstäubung. Der scheinbar zufällige Prozeß der Tropfenbildung setzt bereits unmittelbar an der Düsenöffnung ein (Gebiet III: Zerstäuben).

Eine Unterteilung der Bereiche für die drei Zerfallsformen stammt von *v. Ohnesorge* [7]. Aus der Weberzahl

$$We = \frac{w_d^2 d \rho_p}{\sigma} \quad (1)$$

und der Reynoldszahl des Strahles

$$Re = \frac{w_d d \rho_p}{\eta_p} \quad (2)$$

wurde die von der Strahlgeschwindigkeit unabhängige Kennzahl

$$Z = \frac{We^{1/2}}{Re} = \frac{\eta_p}{(\sigma \rho_p d)^{1/2}} \quad (3)$$

gebildet und über *Re* aufgetragen, Diagramm in Bild 1.

Bei den angegebenen Grenzen (Gleichungen für diese Grenzen in [2, 3]) gibt es gleitende Übergänge von einem Bereich zum anderen.

Gänzlich anders stellt sich optisch der Lamellenzerfall dar. Bild 2 gibt eine anschauliche Darstellung vom Aussehen einer solchen ebenen Flüssigkeitslamelle.

Die Schichtdicke δ der glatten Lamelle, die sich nach Verlassen der Düse ausbildet, nimmt proportional mit dem Abstand zur Düse ab. Bedingt durch die Instabilität der Lamelle, bilden sich sinusförmige Schwingungen aus, deren Anwachsen an der Stelle der maximalen Amplitude zum Zerreißen der Lamelle in Flüssigkeitsstreifen mit der Breite einer halben Wellenlänge ($\lambda_{opt}/2$) führt [8]. Dieser Flüssigkeitsstreifen bildet sich unmittelbar zu einem schwingenden Flüssigkeitsfaden aus, der — ähnlich wie beim Strahlerfall — in einzelne Tropfen zerfällt.

Wird eine bestimmte Flüssigkeitsaustrittsgeschwindigkeit — die wie bei der Strahlgeschwindigkeit durch die kritische Weberzahl definiert wird — deutlich überschritten, so wird das Zwischenstadium der Lamellenbildung weitgehend übersprungen und der Strahl löst sich unmittelbar an der Düsenöffnung in eine Wolke unregelmäßig geformter Teilchen auf, die unter dem Einfluß der Oberflächenspannung alsbald Kugelgestalt annehmen, Gebiet III in Bild 1.

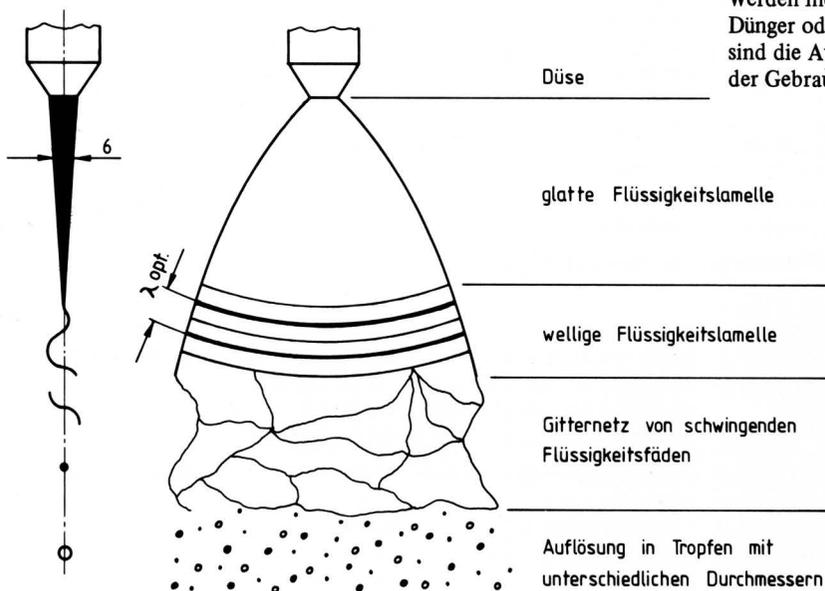


Bild 2. Schematische Darstellung einer ebenen Flüssigkeitslamelle (nach Brauer u. Fraser u.a.).

Die am Tropfenzerfall beteiligten Kräfte lassen sich nach *Troesch* in folgender Form darstellen:

Trägheitskraft der Flüssigkeit: $\rho_p w_d^2 d_{pmax}^2 \quad (4)$

Oberflächenkraft: $\sigma d_{pmax} \quad (5)$

Zähigkeitskraft der Flüssigkeit: $\eta_p w_d d_{pmax} \quad (6)$

Trägheitskraft der Luft: $\rho_L w_d^2 d_{pmax}^2 \quad (7)$

Diese Kräfte wirken unterschiedlich stark auf den Flüssigkeitszerfall ein. Bei sehr großen Ausflußgeschwindigkeiten — die bei der Druckzerstäubung vorherrschen — üben aufgrund der starken Turbulenz die Oberflächen- und Trägheitskräfte einen entsprechend starken Einfluß aus. Für das Verhältnis der Trägheits- und Oberflächenkräfte ist die bereits genannte Weberzahl eine wichtige Kenngröße; daraus resultiert ihre Bedeutung für die Tropfenbildung.

2.2 Physikalische Eigenschaften von Pflanzenschutzmitteln

Aus den oben angegebenen Kräften läßt sich ableiten, daß sowohl die geometrischen und Betriebsdaten der Düsen (Ausflußgeschwindigkeit w_d) als auch die physikalischen Eigenschaften der verwendeten Flüssigkeit für die Beurteilung des Zerstäubungsprozesses von Bedeutung sind. Die erstgenannten Größen sind stets leicht zu ermitteln bzw. ohnehin bekannt. Dagegen sind genaue Kenntnisse über die Flüssigkeitseigenschaften in der Regel nicht vorhanden.

Eigene Messungen an Pflanzenschutzmitteln beschränkten sich bisher auf flüssige Mittel, die mit Wasser Emulsionen oder Lösungen bilden. Gemessen wurden Dichte, Viskosität und Oberflächenspannung sowohl für das Konzentrat als auch für verschiedene Konzentrationen wäßriger Verdünnungen, Tafel 1. Von besonderem Interesse sind in dem hier betrachteten Zusammenhang die Stoffwerte der Flüssigkeiten bei ihrer Gebrauchskonzentration, die in vielen Fällen bei ca. 0,1 % liegt. In diesem Bereich unterscheiden sich Dichte und Viskosität nur unwesentlich von den Werten für Wasser. Die ermittelte Oberflächenspannung jedoch weicht erheblich von der des Wassers ab. Sie liegt in den meisten Fällen zwischen 30 und 40 mN/m und damit etwa bei 50 % des Wertes von Wasser.

Werden mehrere Mittel kombiniert oder ihnen Zusätze wie flüssige Dünger oder sogenannte Anti-Drift-Konzentrate zugegeben, so sind die Auswirkungen dieser Maßnahmen auf die Eigenschaften der Gebrauchsflüssigkeit nur schwer abzuschätzen.

3. Versuchsflüssigkeiten

Zur versuchsmäßigen Bestimmung von Tropfen- und -zahlen an im chemischen Pflanzenschutz verwendeten Düsen wird als Testflüssigkeit in der Regel Wasser eingesetzt. Bei der vielfach verwendeten Immersionsmethode (Auffangen der Tropfen in Flüssigkeiten und anschließendes Fotografieren [9, 10, 11]) wird dem Wasser zusätzlich ein Farbstoff zur Kontrastverstärkung beigegeben. Bei Kenntnis der vorliegenden Daten muß gefragt werden, ob die mit Wasser als Versuchsflüssigkeit ermittelten Ergebnisse bei Zerstäubungsversuchen auf andere Flüssigkeiten übertragen werden können. Der Einsatz echter Pflanzenschutzmittel bei Versuchen verbietet sich in der Regel aus Sicherheitsgründen.

An Versuchsflüssigkeiten, die statt dessen eingesetzt werden können, sind vor allem folgende Anforderungen zu stellen:

Mittel/Hersteller/ Gebrauchskonzentration (GK)/ Farbe/ Wirkstoffanteil (WA)/ Bemerkungen	Konzentration K %	Dichte ρ g/cm ³	dynam. Viskosität η mPa s	Oberfläch- spannung σ mN/m	Mittel/Hersteller/ Gebrauchskonzentration (GK)/ Farbe/Wirkstoffanteil (WA)/ Bemerkungen	Konzentration K %	Dichte ρ g/cm ³	dynam. Viskosität η mPa s	Oberfläch- spannung σ mN/m
Dest. Wasser	100	1,000	1,079	72,83	Dest. Wasser	100	1,000	1,079	72,83
270301 FCP 714 No. 17058 (Modellflüssigkeit) Schering Konzentrat: hellgelb Emulsion: weiß	100	0,856	1,017	31,13	Perfekthan-Fluid (Insektizid) BASF GK: 0,05 % Konzentrat: honiggelb Emulsion: weiß WA: 25 %	100	1,028	2,145	31,20
	10	0,986	1,242	30,83		10	1,004	1,577	33,76
	1	0,997	1,080	31,96		1	0,998	1,089	36,33
	0,1	0,998	1,071	38,53		0,1	0,998	1,078	44,50
Dimethoate "Schering" (Insektizid) Schering GK: 0,1–0,3 % Konzentrat: dunkelblau Emulsion: hellblau-blaßblau WA: 40 % beißender Geruch	100	1,095	24,334	38,53	Thiodan 35 flüssig (Insektizid) Hoechst GK: 0,1–0,75 % Konzentrat: dunkelbraun Emulsion: weiß WA: 35 %	100	1,086	2,628	32,43
	10	1,011	1,403	39,10		10	1,009	1,404	31,30
	1	0,999	1,179	41,76		1	0,999	1,089	33,16
	0,1	0,998	1,077	47,43		0,1	0,998	1,094	42,16
E 605 forte (Insektizid) Bayer GK: 0,02–0,1 % Konzentrat: dunkelblau Emulsion: dunkel- bis hellblau WA: 50 % ölige Flüssigkeit	100	1,160	74,195	37,90	Betanal (Herbizid) Schering GK: 1–1,5 % Konzentrat: honiggelb Emulsion: weiß WA: 16,4 %	100	0,989	21,267	34,70
	10	1,017	1,600	40,50		10	0,998	1,306	32,50
	1	1,002	1,109	40,10		1	0,998	1,117	32,30
	0,1	1,000	1,066	40,66		0,1	0,998	1,091	33,53
Nexion-stark (Insektizid) Celamerck GK: 0,05–0,25 % Konzentrat: goldgelb Emulsion: weiß WA: 30,4 %	100	1,097	3,283	29,63	Hostathion (Herbizid) Hoechst GK: 0,1–0,5 % Konzentrat: dunkelbraun Emulsion: weiß WA: 40 %	100	1,077	18,268	33,13
	10	1,010	1,619	31,00		10	1,009	1,466	32,96
	1	1,001	1,050	29,50		1	0,999	1,091	34,30
	0,1	0,998	1,095	37,96		0,1	0,998	1,063	37,56
Ortho Dibrom (Insektizid) Spiess GK: 0,1 % Konzentrat: goldbraun Emulsion: weiß WA: 48,9 %	100	1,462	11,345	35,7	U 46 D-Fluid (Herbizid) BASF GK: 0,2–0,33 % Konzentrat: dunkelbraun Lösung: goldbraun-wäßrig WA: 500 g/l	100	1,179	14,952	42,06
	10	1,046	1,449	37,16		10	1,019	1,220	33,83
	1	1,004	1,099	37,96		1	0,999	1,092	47,76
	0,1	0,998	1,084	40,20		0,1	0,998	1,091	60,70

Tafel 1. Stoffwerte von Pflanzenschutzmitteln und ihren Verdünnungen mit Wasser; gültig für 20 °C.

1. weitgehende Übereinstimmung der physikalischen Eigenschaften mit denen der Pflanzenschutzmittel
2. Unbedenklichkeit hinsichtlich Handhabung und Umweltschutz
3. langfristige Lagerfähigkeit
4. günstiger Preis.

Dabei ist zunächst zwischen wäßrigen Lösungen und Emulsionen zu unterscheiden. Die Lösungen sind physikalisch stabil, wohingegen den Emulsionen – gebräuchlicher Emulsionstyp ist die "Öl in Wasser" (O/W)-Emulsion [12] – zur Erleichterung der Dispergierung Lösungsvermittler und Emulgatoren sowie zur nachhaltigen Verhinderung der Entmischung Schutzkolloide zugegeben werden [13].

Die Viskosität der O/W-Emulsionen ist jedoch meist gering und kaum von derjenigen einer echten wäßrigen Lösung zu unterscheiden (Tafel 1). Als Viskositäts- und Dichteveränderer, die gleichzeitig mehr oder weniger großen Einfluß auf die Oberflächenspannung ausüben, können zahlreiche Mittel angegeben werden [14].

Zu den in die engere Auswahl gezogenen Fluiden zählen Lösungen von:

Fructose	Haushaltszucker
Glucose	Glycol
Maltose	Zuckersirup
Sucrose	Glukosesirup
Glycerin	Methocel
und weiterhin für die Gruppe der Emulsionen	
Milch	Böhröl.

Die in Voruntersuchungen ermittelten Ergebnisse der Viskositätsmessungen mit Glycerin, Zucker, Fructose, sowie Bohrröl und Vollmilch sind in Bild 3 wiedergegeben. Es zeigt sich, daß außer Vollmilch alle Mittel nur in geringen Konzentrationen angewendet werden müssen, um in den angestrebten Viskositätsbereich von ca. 1,0–2,0 mPas zu gelangen. Gleiches gilt für die Dichte der untersuchten Mittel, Bild 4, [15].

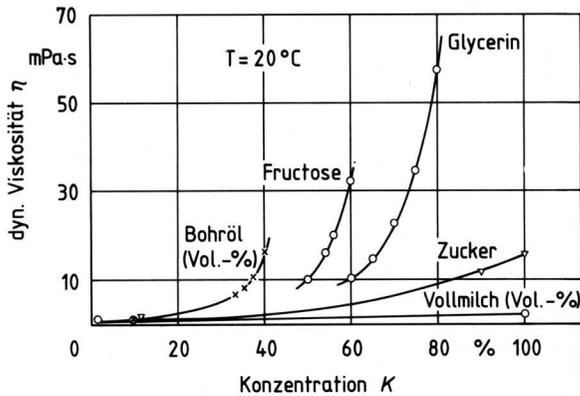


Bild 3. Viskosität verschiedener Flüssigkeiten in Abhängigkeit von der Konzentration (Massen- bzw. Volumenanteil in %).

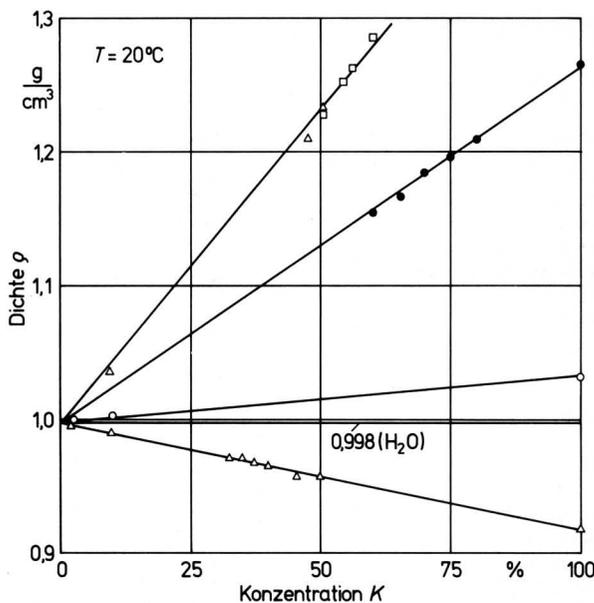


Bild 4. Dichte wässriger Lösungen und Emulsionen in Abhängigkeit von der Konzentration (Massen- bzw. Volumenanteil in %).

- Fructose
- Vollmilch (Vol.-%)
- ▽ Zucker
- △ Bohrröl (Vol.-%)
- Glycerin

Von den untersuchten Flüssigkeiten scheint Glycerin in Wasser gelöst die an eine Versuchsflüssigkeit zu stellenden Anforderungen am besten zu erfüllen, da es in Wasser löslich, chemisch neutral, unbegrenzt lagerfähig, angenehm zu verarbeiten und preiswert ist. Bei keinem der anderen Mittel treffen alle diese Kriterien zu. Lediglich die Oberflächenspannung liegt höher als bei Pflanzenschutzmitteln, Bild 5. Dies kann jedoch durch Zugabe kleinster Mengen oberflächenaktiver Substanzen, sog. Tenside, ausgeglichen werden, ohne dabei Viskosität oder Dichte zu beeinflussen. Dabei ist zu beachten, daß Flüssigkeiten, deren Oberflächenspannung durch Zugabe von Tensiden erniedrigt wird, sich u.U. anders verhalten, als solche, die auch in reinem Zustand eine niedrige Oberflächenspannung besitzen.

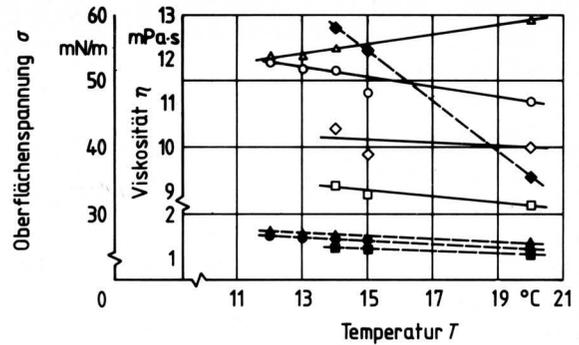


Bild 5. Viskosität und Oberflächenspannung verschiedener Flüssigkeiten in Abhängigkeit von der Temperatur.

- Volle Symbole dynamische Viskosität
- offene Symbole Oberflächenspannung
- ▲△ Glycerin-H₂O (10 % Glycerin)
- Nalco 625-H₂O (0,5 g Nalco/l H₂O)
- Nalco 625-H₂O (0,1 g Nalco/l H₂O)
- ◆◇ Nalco 625-Glycerin-H₂O (0,5 g Nalco/l H₂O + 60 % Glycerin)

Dieser Effekt ist auf den als Adsorption bekannten Vorgang zurückzuführen: Jedes System ist bestrebt, den Zustand mit der kleinsten freien Energie einzunehmen. Bei Tropfen geschieht dies, indem durch Einnahme der Kugelform die Oberfläche minimiert wird. Zusätzlich wandert in Lösungen die Komponente mit der geringeren Oberflächenspannung an die Oberfläche. Dies führt dazu, daß bei sich dauernd erneuernden Oberflächen (Zerstäubungsvorgang) u.U. ein höherer Wert der Oberflächenspannung, die dynamische Oberflächenspannung, wirksam wird als bei stationären Oberflächen, da sich auf der frisch gebildeten Oberfläche die Komponente mit der niedrigeren Oberflächenspannung noch nicht angereichert hat.

Ist die Zeit, die für die Bildung der neuen Oberfläche benötigt wird, kleiner als die Adsorptionszeit ($t_a < 10^{-3}$ s) [16], so ist dann für den Zerstäubungsprozeß doch die statische Oberflächenspannung ausschlaggebend. Im Zweifelsfall muß hier das Experiment klären. Ähnliche Verhältnisse können auch für Pflanzenschutzmittel gelten, da die Formulierungen zahlreiche die Oberflächenspannung beeinflussende Mittel enthalten.

Bemerkenswert ist, daß Wasser-Glycerin-Lösungen zu den wenigen Flüssigkeiten mit einem positiven Temperaturkoeffizienten für die Oberflächenspannung gehören, und zwar bei der Lösung nach Bild 5 von ca. 1,2 %/°C. Dahingegen nimmt bei den meisten Flüssigkeiten die Oberflächenspannung bei steigender Temperatur ab, bei Wasser z.B. um 0,2 %/°C [3]. Bei Versuchen sollte also auf die Temperatur der Testflüssigkeit geachtet werden. Dies ist allerdings nur von Bedeutung, wenn eine wirklich merkbare Abhängigkeit der Flüssigkeitseigenschaften von der Temperatur vorhanden ist. Im Zweifelsfalle kann hier durch Messungen Klarheit gewonnen werden.

Den Einfluß einiger Farbstoffe auf die Oberflächenspannung von Wasser und einer Wasser-Glycerin-Lösung zeigt die Darstellung in Bild 6. Die Oberflächenspannungsänderungen durch Tracer sind zumindest bei Wasser zu beachten, da hier entsprechend große Abweichungen möglich sind. Ist die Oberflächenspannung einer wässrigen Lösung bereits niedriger als die von Wasser, so können Farbstoffe diese sogar erhöhen, wie das Beispiel der Wasser-Glycerin-Lösung zeigt. Viskositäts- oder Dichteänderungen sind bei den üblichen Farbstoffkonzentrationen nicht feststellbar. Weitere Daten über die physikalischen Eigenschaften einiger Flüssigkeiten finden sich bei *Jegatheeswaran* [17].

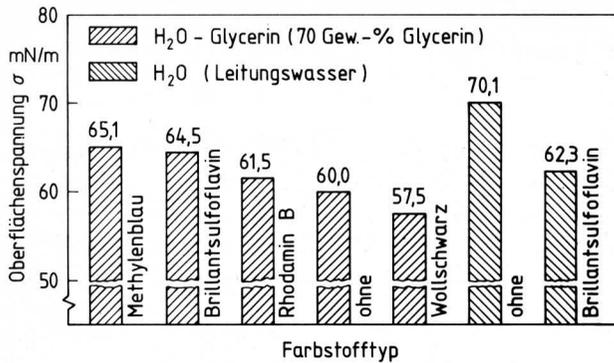


Bild 6. Oberflächenspannung von Wasser und einer Glycerin-Wasser-Lösung bei Zusatz verschiedener Farbstoffe.

Glycerin-Wasser (70 Gew.-% Glycerin) $\rho = 1,181 \text{ g/cm}^3$; $\eta = 22,30 \text{ mPa s}$
 H₂O (Leitungswasser) $\rho = 1,000 \text{ g/cm}^3$; $\eta = 1,00 \text{ mPa s}$
 Farbstoffkonz.: 1 g/1000 ml H₂O; T = 20 °C

4. Additive

Zahlreiche Versuche der Driftreduzierung im Pflanzenschutz bedienen sich der Möglichkeit, über eine Viskositätserhöhung der zu zerstäubenden Flüssigkeit das Tropfenspektrum zu beeinflussen [18 bis 24]. Das Ziel dabei ist, die Bildung der sehr kleinen Tropfen zu unterbinden und dabei möglichst Größe oder Zahl der sehr großen Tropfen nicht zu vermehren.

Die von *Butler, Akesson und Yates* [19] getesteten pulverförmigen Zusätze (Vistik, Dacagin, Norbak) erfüllen zwar die erste Forderung, jedoch wird das gesamte Spektrum in Richtung großer Tropfen verschoben und gespreizt. Zudem weisen die mit diesen Mitteln bereiteten Spritzflüssigkeiten nicht nur ein nicht-newtonsches Fließverhalten auf [19], sondern erfordern in der Anwendung ein hohes Maß an Aufmerksamkeit und Aufwand bei hohen Kosten [20].

Untersuchungen an auf dem deutschen Markt erhältlichen Mitteln (Synergid, Sunöl, Bayeröl, AVD), besonders im Hinblick auf die Verdunstungsminderung, wurden von *Hosseinipour* [25] vorgenommen. Diese flüssigen Zusätze erhöhen ebenfalls die Viskosität der Flüssigkeit bei gleichzeitiger Senkung der Oberflächenspannung. Auch hier macht sich der Einfluß der Additive in einer generellen Verschiebung der Summenhäufigkeitskurven zu größeren Tropfendurchmessern hin bemerkbar. Zusätzlich ist eine deutliche Abnahme der Verdunstungsgeschwindigkeit zu verzeichnen.

Über ein angeblich einfach zu handhabendes und preiswertes flüssiges Additiv (Nalco-trol) wurde mehrfach berichtet [18, 20, 21, 23]. Daten über Viskosität und Oberflächenspannung sowie Tropfenspektren fehlen hier jedoch. Nalco-trol gehört zu den hochmolekularen flüssigen und wasserlöslichen Polymeren (es enthält als Grundsubstanz ca. 30 % Polyvinyl [26]), die – wie z.B. Polyäthylenoxid – z.B. die Eigenschaft haben, in turbulenten Rohrströmungen die Druckverluste zu reduzieren (bezeichnet als Toms-Effekt) [2, 3, 27 bis 29] oder Flüssigkeitsstrahlen zu bündeln. Da Nalco-trol auf dem deutschen Markt normalerweise nicht erhältlich ist, wurde für die eigenen Untersuchungen das Produkt Nalco-625 verwendet.

Es handelt sich um ein Emulsionspolymer auf der Basis von Polyacrylamid. In Bild 5 sind die Oberflächenspannungs- und Viskositäts-Temperatur-Abhängigkeit dreier Nalco-Wasser-Lösungen (0,1 g bzw. 0,5 g Nalco-625/l H₂O; 0,5 g Nalco/l H₂O + 60 % Glycerin) dargestellt, wobei nur die beiden ersteren von ihren physikalischen Eigenschaften her für den Pflanzenschutz in Betracht kommen. (Die hier angegebenen Viskositätswerte sind mit einem Kugelfallviskosimeter ermittelt worden. Da Nalco-625 ein viscoelastisches Fließverhalten aufweist, d.h. die Viskosität vom Schergefälle abhängt, sind die hier ermittelten Werte nur als Vergleichswerte untereinander zu betrachten. Korrekte Fließkurven können nur mit einem Rotationsviskosimeter ermittelt werden. Entsprechende Messungen sind in Vorbereitung.)

Die Anwendung des Additivs erweist sich als nicht so einfach, wie im Schrifttum beschrieben. Das Einbringen in Wasser ist mit Umsicht vorzunehmen, um einer Klumpenbildung vorzubeugen. Mit entsprechenden Einrichtungen zur Direkteinspeisung [30] sind diese Schwierigkeiten jedoch zu beheben.

5. Physikalische Flüssigkeitseigenschaften und Tropfenspektren

Der Einfluß eines Pflanzenschutzmittels auf das Tropfenspektrum einer Flachstrahldüse Teejet 110 03 (bei Drücken von 2,5; 4,0 und 6,0 bar) im Vergleich zu Wasser wird in Bild 7 aufgezeigt¹⁾. Hier wurde ganz bewußt Betanal verwendet, da es eine sehr niedrige Oberflächenspannung aufweist und als kritisches Mittel bekannt ist (10 g Betanal/l H₂O entsprechend einer ca. 1,0 %igen Gebrauchs-konzentration). Bei niedrigen Drücken ist gegenüber Wasser eine deutliche Tendenz zur Verfeinerung des Spektrums zu erkennen, die bei steigenden Drücken jedoch in das Gegenteil umschlägt. Im Vergleich zu Wasser wird der Einfluß des Druckes auf das Spektrum durch Verwendung von Betanal erheblich verringert. Rückwirkungen auf die Querverteilung vor allem bei niedrigen

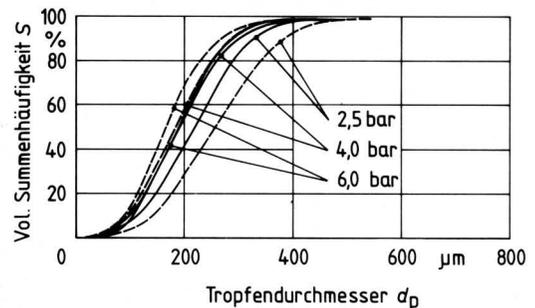


Bild 7. Tropfenspektren einer Betanal-Emulsion im Vergleich zu Wasser (die Flüssigkeiten enthalten 0,1 % Brillantsulfloflavin (BSF)), Flachstrahldüse Teejet 110 03.

——— Betanal-H₂O-Emulsion (10 g Betanal/l H₂O)
 - - - - - H₂O

Drücken könnten der Fall sein. Auffallend ist gerade bei diesen Drücken der optisch feststellbare Unterschied der Strahlbilder, **Tafel 2**.

Ein fast identisches Spektrum stellt sich bei der Verwendung einer 10 %igen Wasser-Glycerin-Lösung ein, **Bild 8**. Allerdings ist ein geringfügig vermehrtes Vorkommen von Tropfen in größeren Durchmesserklassen festzustellen. Insgesamt scheint sich die Eignung von Glycerin-Wasser-Lösungen als Simulationsflüssigkeit für Zerstäubungsversuche zu bestätigen. Ob dies jedoch auch für andere Pflanzenschutzmittel in gleicher Weise gilt, muß noch ermittelt werden.

Schon die Zugabe geringer Mengen des flüssigen Polymers Nalco-625 zu Wasser (0,1 g/l H₂O), **Bild 9**, führt neben einer Verringerung des feintropfigen Anteils am Spektrum zu einer deutlichen Zunahme mittlerer und großer Tropfendurchmesser. Wird die Konzentration des Mittels weiter erhöht (0,5 g/l H₂O), **Bild 10**, so nimmt dieser Effekt überproportional stark zu. Da die Dosierempfehlungen [26] jedoch sowohl den Düsentyp als auch den Spritz-

¹⁾ Gemessen wurden die Tropfengrößen nach der Immersionsmethode. Auf-fangmatrix ist geschichtetes Silikonöl, Methode nach *Heidt* [11], Höhe der Düse über Objektträger 500 mm, Fahrgeschwindigkeit jeweils für ein konstantes Aufwandvolumen von 200 l/ha. Fotografische Erfassung der Tropfen und Auswertung der Aufnahmen durch Bildanalysecomputer Quantimet 720.

	Druck		
	0,3 bar	1,5 bar	4,0 bar
<p>H₂O</p> <p>$\eta = 1,00 \text{ mPa s}$</p> <p>$\sigma = 62,33 \text{ mN/m}$</p> <p>$\rho = 1,000 \text{ g/cm}^3$</p>			
<p>Glycerin-H₂O-Lösung (10 % Glycerin)</p> <p>$\eta = 1,55 \text{ mPa s}$</p> <p>$\sigma = 53,90 \text{ mN/m}$</p> <p>$\rho = 1,022 \text{ g/cm}^3$</p>			
<p>Nalco 625-H₂O-Lösung (0,1 g Nalco/l H₂O)</p> <p>$\eta = 1,27 \text{ mPa s}$</p> <p>$\sigma = 32,90 \text{ mN/m}$</p> <p>$\rho = 1,001 \text{ g/cm}^3$</p>			
<p>Nalco 625-H₂O-Lösung (0,5 g Nalco/l H₂O)</p> <p>$\eta = 1,47 \text{ mPa s}$</p> <p>$\sigma = 51,7 \text{ mN/m}$</p> <p>$\rho = 1,001 \text{ g/cm}^3$</p>			
<p>Betanal-H₂O-Emulsion (10 g Betanal/l H₂O)</p> <p>$\eta = 1,117 \text{ mPa s}$</p> <p>$\sigma = 32,30 \text{ mN/m}$</p> <p>$\rho = 0,998 \text{ g/cm}^3$</p>			

Tafel 2. Einfluß der physikalischen Flüssigkeitseigenschaften auf den Zerstäubungsprozeß einer Flachstrahldüse (Teejet 110 03). (Zugehörige Tropfenspektren im Vergleich zu Wasser Bilder 7 bis 10). Alle Flüssigkeiten enthalten 0,1 % Brillantsulfobflavin.

druck (Ausflußgeschwindigkeit) berücksichtigen, ist hiermit Extremwerten vorgebeugt. Eine übermäßig starke Verschiebung des Spektrums zu großen Tropfen hin ist ja sowohl aus Gründen einer guten Bedeckung und Anlagerung als auch unter dem Gesichts-

punkt einer möglichen Reduzierung des Aufwandvolumens nicht erwünscht [31]. Aus den Maßnahmen zur Driftreduzierung einerseits und zur Verringerung des Aufwandvolumens andererseits ergeben sich hier einander widersprechende Anforderungen.

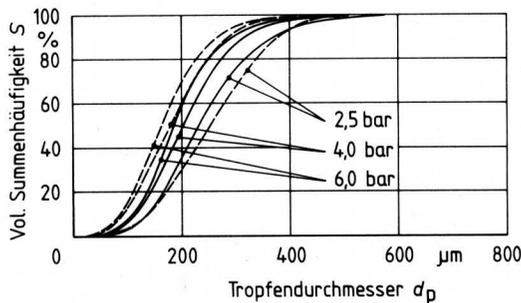


Bild 8. Tropfenspektren einer 10%igen Glycerin-Wasser-Lösung im Vergleich zu Wasser (die Flüssigkeiten enthalten 0,1 % BSF), Flachstrahldüse Teejet 110 03.

— Glycerin-H₂O-Lösung (10 % Glycerin)
 - - - - - H₂O

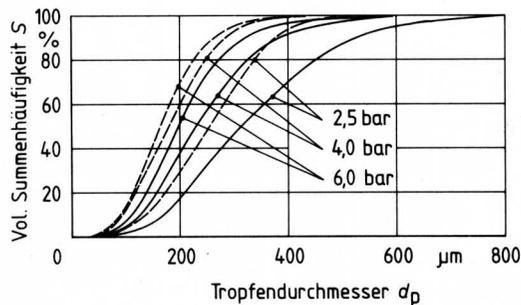


Bild 9. Tropfenspektren einer Nalco 625-H₂O-Lösung im Vergleich zu Wasser (die Flüssigkeiten enthalten 0,1 % BSF), Flachstrahldüse Teejet 110 03.

— H₂O-Nalco 625-Lösung (0,1 g Nalco/l H₂O)
 - - - - - H₂O

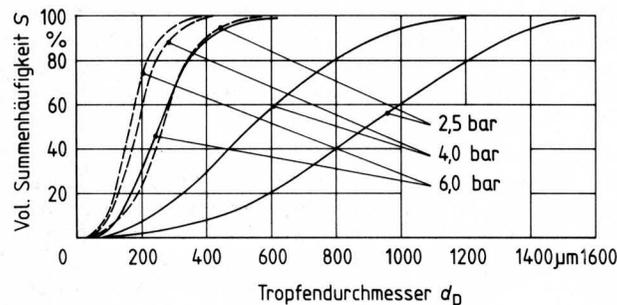


Bild 10. Tropfenspektren einer Nalco 625-H₂O-Lösung im Vergleich zu Wasser (die Flüssigkeiten enthalten 0,1 % BSF), Flachstrahldüse Teejet 110 03.

— Nalco 625-H₂O-Lösung (0,5 g Nalco/l H₂O)
 - - - - - H₂O

6. Berechnung von Tropfenspektren

Zu den Zielvorstellungen der Zerstäubungstechnik gehört seit jeher der Wunsch, das von einer Düse erzeugte Tropfenspektrum oder zumindest einen charakteristischen Durchmesser vorausberechnen zu können.

Die Ergebnisse der Arbeiten *Rayleighs* [4] und *Webers* [5] fließen in zahlreiche weiterführende Untersuchungen ein, die verschiedentlich zu Berechnungsgleichungen etwa für den maximalen Tropfendurchmesser oder den Sauterdurchmesser führen. Es finden sich sowohl Arbeiten über den Strahlzerfall als auch über den Lamellenzerfall.

Dabei besteht zwischen den beiden Zerfallsformen in folgender Hinsicht eine Übereinstimmung: Die Auflösung der beim Lamellenzerfall entstehenden Flüssigkeitsfäden (Bild 2) in Einzeltropfen vollzieht sich nach den gleichen Gesichtspunkten wie der von *Rayleigh* und *Weber* behandelte Strahlzerfall. *Weber* gibt für den Strahlzerfall reibungsbehafteter Flüssigkeiten folgende Gleichung an (in dieser Form zitiert bei *Brauer* [2]):

$$d_p/d = 1,436 \left[1 + 3 \frac{We^{1/2}}{Re} \right]^{1/6} \quad (8)$$

In formaler Hinsicht stimmt Gl. (8) mit der von *Dombrowski u. Johns* [32] angegebenen Beziehung für den Lamellenzerfall überein:

$$d_p/d_F = E \left[1 + 3 \frac{\eta_p}{(\sigma \rho_p d_F)^{1/2}} \right]^{1/6} \quad (9)$$

mit $E = \left[\frac{3\pi}{\sqrt{2}} \right]^{1/3}$ und $Z = \frac{\eta_p}{(\sigma \rho_p d_F)^{1/2}}$

Die Kennzahl $Z = \frac{We^{1/2}}{Re}$, die von *v. Ohnesorge* zur Abgrenzung der Zerfallformen benutzt wurde (Bild 1), tritt in beiden Gleichungen auf, in Gl. (9) wird statt des Düsendurchmessers d der Durchmesser der Flüssigkeitsfäden d_F verwendet. Für diese gilt folgende theoretische Beziehung [32]:

$$d_F = 0,9614 \cdot 10^{-2} \left(\frac{\sigma K}{w_L^2 \rho_p} \right)^{1/3} \left(\frac{\rho_p}{\rho} \right)^{1/6} \cdot \left\{ 1 + 0,625 \cdot 10^4 \left[\frac{K \eta_p^3 \rho^4 w_L^7}{\rho_p^2 \sigma^5} \right]^{1/3} \right\}^{1/5} \quad [m] \quad (10)$$

(Für die eigenen Rechnungen wurde $K = 2 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$ angesetzt).

Dabei wird für die Strahl- bzw. Lamellengeschwindigkeit die Geschwindigkeit im engsten Düsenquerschnitt bzw. am Düsenaustritt angenommen, die aus dem Düsendurchsatz beim jeweiligen Druck oder mittels des Widerstandsbeiwerts der Düse zu ermitteln ist.

Troesch [1] kommt, aufbauend auf den Überlegungen *Webers* zu einer Gleichung für den maximalen Tropfendurchmesser

$$4,8 \cdot 10^{-5} We_{\max} = \left[1 + 10^6 \frac{We_{\max}}{Re_{\max}^2} \right]^{1/12} \left(1 - 0,5 \frac{\rho}{\rho_p} \right) \quad (11)$$

(We_{\max} und Re_{\max} sind mit $d_{p\max}$ definiert)

wobei diese Gleichung nicht die explizite Darstellung des maximalen Tropfendurchmessers zulässt. Die Berechnung muß iterativ vorgenommen werden. Dazu muß die Gl. (11) in geeigneter Weise umgeformt werden.

Mugele [33] gibt ebenfalls eine Berechnungsgleichung für den max. Durchmesser an,

$$d_{p\max}/d = A \left[\frac{d \rho_p w_d}{\eta_p} \right]^B \left[\frac{\eta_p w_d}{\sigma} \right]^C \quad (12)$$

mit: $A = 57$; $B = -0,48$; $C = -0,18$ und d sowie $d_{p\max}$ in cm, w_d in cm/s und η_p in 10^{-2} mPas, ebenso wie *Troesch* davon ausgehend, daß aufgrund des Kräftegleichgewichts an einem im Flug befindlichen Tropfen nur der Tropfen mit dem Durchmesser $d_{p\max}$ erhalten bleiben kann. Größere Tropfen werden entsprechend dieser Überlegung zerfallen.

Tanasawa u. Toyoda [34] haben folgende empirische Gleichung für den mittleren Tropfendurchmesser aufgestellt:

$$d_p/d = F \left(\frac{\sigma g}{\rho_p w_d^4} \right)^{1/4} \left(\frac{\rho_p}{\rho} \right)^{1/4} \left\{ 1 + 3,31 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\eta_p^2}{\sigma \rho_p d} \right)^{1/2} \right\}$$

mit $F = 1,4862$

(13).

Rein formal ist es nicht zulässig, die Berechnungsgleichungen für den Strahlerfall auf die Tropfenbildungsvorgänge bei Flachstrahldüsen anzuwenden. Tut man es aufgrund der Ähnlichkeit der theoretischen Ansätze Gln. (8) und (9) doch, so gelangt man zu den in Bild 11 bis 13 dargestellten Ergebnissen.

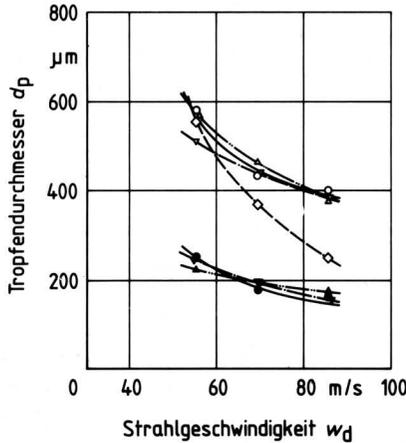


Bild 11. Vergleich gemessener und berechneter Werte von Tropfengrößen; Wasser, Flachstrahldüse Teejet 110 03.

- d_{pmax}
- ○ gemessen
 - · — ▽ gerechnet nach: Mugele (A = 122; B = - 0,48; C = - 0,18)
 - · · — △ Mugele (A = 87; B = - 0,44; C = - 0,50)
 - · — ◇ Troesch
- d_{p50}
- ● gemessen
 - · — ▽ gerechnet nach: Tanasawa u. Toyoda (F = 0,81)
 - · · — ▲ Dombrowski u. Johns (E = 4,70)

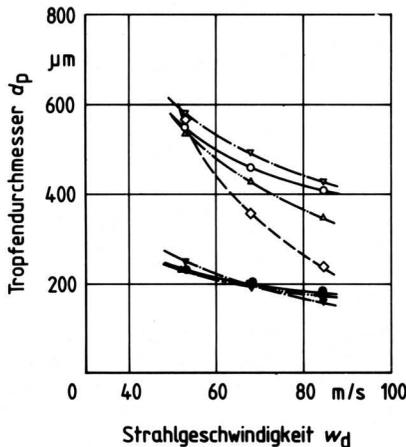


Bild 12. Vergleich gemessener und berechneter Werte von Tropfengrößen; Glycerin-H₂O-Lösung (10 % Glycerin), Flachstrahldüse Teejet 110 03.

- d_{pmax}
- ○ gemessen
 - · — ▽ gerechnet nach: Mugele (A = 122; B = - 0,48; C = - 0,18)
 - · · — △ Mugele (A = 87; B = - 0,44; C = - 0,50)
 - · — ◇ Troesch
- d_{p50}
- ○ gemessen
 - · — ▽ gerechnet nach: Tanasawa u. Toyoda (F = 0,81)
 - · · — ▲ Dombrowski u. Johns (E = 4,92)

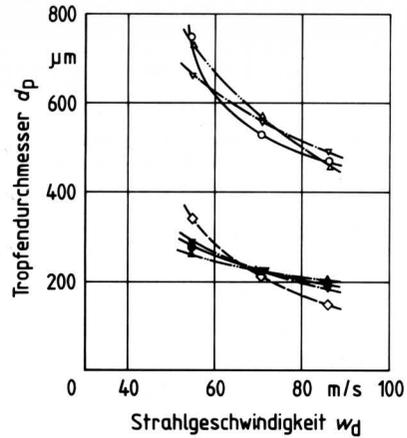


Bild 13. Vergleich gemessener und berechneter Werte von Tropfengrößen; Nalco 625-H₂O-Lösung (0,1 g Nalco/l H₂O), Flachstrahldüse Teejet 110 03.

- d_{pmax}
- ○ gemessen
 - · — ▽ gerechnet nach: Mugele (A = 165; B = - 0,48; C = - 0,18)
 - · · — △ Mugele (A = 165; B = - 0,44; C = - 0,60)
 - · — ◇ Troesch
- d_{p50}
- ○ gemessen
 - · — ▽ gerechnet nach: Tanasawa u. Toyoda (F = 1,10)
 - · · — ▲ Dombrowski u. Johns (E = 6,56)

Der Versuch der Berechnung von d_{pmax} nach Troesch Gl. (11) ergibt in allen Fällen nur eine ungenügende Annäherung an die Meßwerte. Allerdings ist nach Troesch's eigenen Angaben die Anwendung seiner Theorie auf Druckzerstäuber dieser Art nicht zulässig.

Die Ansätze von Mugele Gl. (12), Tanasawa u. Toyoda Gl. (13) und Dombrowski u. Johns Gln. (9) und (10) — nur die Gln. (9) und (10) gelten für den Lamellenzerfall — stimmen jedoch relativ gut mit den Meßergebnissen überein. Es treten maximale Abweichungen von ca. 10 % auf. Allerdings müssen die von den Autoren genannten Konstanten teilweise erheblich geändert werden, um zu dieser Übereinstimmung zu gelangen.

Mit der Messung von drei Tropfenspektren pro Düse und Flüssigkeit ist es möglich, diese Konstanten mit hinreichender Genauigkeit zu bestimmen. Bei Kenntnis der Daten können dann im untersuchten Bereich für jeden beliebigen Druck die Durchmesser d_{pmax} oder d_{p50} berechnet werden. Inwieweit die Berechnung auf andere Klassen des Tropfendurchmessers oder gar auf das gesamte Spektrum ausgedehnt werden kann — einige Verfasser unternahmen diesen Versuch — wurde hier nicht überprüft. Für programmierbare Taschen- oder Tischrechner ist dieses Berechnungsproblem ein ideales Einsatzgebiet.

7. Zusammenfassung

Neben der Düsenart und den Zerstäubungsparametern haben die physikalischen Eigenschaften der zu zerstäubenden Flüssigkeit einen entsprechenden Einfluß auf die Tropfenbildung. Eine 10 %ige Lösung von Glycerin in Wasser scheint eine geeignete Versuchsflüssigkeit als Alternative zur Lösung oder Emulsion von Pflanzenschutzmitteln in Wasser zu sein.

Der Einsatz von Additiven zur Driftreduzierung bietet sich an, doch müssen die spezifischen Probleme beachtet werden. Die Berechnung charakteristischer Tropfendurchmesser bei der Zerstäubung unterschiedlicher Flüssigkeiten mittels Flachstrahldüsen ist für jeden beliebigen Druck nach vorheriger einmaliger Bestimmung der Zerstäubungskonstanten mit ausreichender Genauigkeit möglich.

Verwendete Formelzeichen

A, B, C, E, F	–	Konstanten
K	m ²	Konstante
d	m	Düsendurchmesser, äquivalenter Düsendurchmesser (Flachstrahl.)
d _p	m	Tropfendurchmesser
d _{pmax}	m	max. Tropfendurchmesser
d _{p50}	m	Tropfendurchmesser für 50 Vol.-% Klasse
d _F	m	Flüssigkeitsfadendurchmesser
g	m/s ²	Fallbeschleunigung
Re	–	Reynoldszahl
t _σ	s	Adsorptionszeit
We	–	Weberzahl
w _d	m/s	Strahlgeschwindigkeit
w _L	m/s	Lamellengeschwindigkeit
δ	m	Lamellendicke
η _p	mPa s	Flüssigkeitsviskosität
λ _{opt}	m	optimale Wellenlänge
ρ	g/cm ³	Luftdichte
ρ _p	g/cm ³	Flüssigkeitsdichte
σ	mN/m	Oberflächenspannung

Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [1] *Troesch, H.A.*: Die Zerstäubung von Flüssigkeiten. Chem.-Ing.-Techn. Bd. 26 (1954) Nr. 6, S. 311/20.
- [2] ● *Brauer, H.*: Grundlagen der Einphasen- und der Mehrphasenströmung. Aarau und Frankfurt/M.: Sauerländer 1971.
- [3] ● *Grassmann, P.*: Physikalische Grundlagen der Verfahrenstechnik. Aarau und Frankfurt/M.: Sauerländer 1971.
- [4] *Lord Rayleigh*: On the stability of jets. Proc. London Math. Soc. Bd. 10 (1878) S. 4/13 (zitiert bei Brauer [2]).
- [5] *Weber, C.*: Zum Zerfall eines Flüssigkeitsstrahles. Ztschr. f. angew. Math. und Mech. Bd. 11 (1931) Nr. 2, S. 136/54.
- [6] *Haenlein, A.*: Über den Zerfall eines Flüssigkeitsstrahles. Forsch. Gebiete Ingenieurwes. Bd. 2 (1931) Nr. 4, S. 139/49.
- [7] *v. Ohnesorge, W.*: Die Bildung von Tropfen an Düsen und die Auflösung flüssiger Strahlen. Ztschr. f. angew. Math. und Mech. Bd. 16 (1936) Nr. 6, S. 355/58.
- [8] *Fraser, R.P., P. Eisenklam, N. Dombrowski u. D. Hassan*: Drop formation from rapidly moving liquid sheets. AIChE Journal Bd. 8 (1962) Nr. 5, S. 672/80.
- [9] *Knott, L.*: Teilchengrößenanalysator in der landtechn. Forschung – Ermittlung von Tropfenspektren bei Pflanzenschutzdüsen. Zeiss-Informationen 8/71.
- [10] *Zaske, J.*: Tropfengrößenanalyse unter besonderer Berücksichtigung der Zerstäubung im chemischen Pflanzenschutz. Diss. TU Berlin 1973.
- [11] *Heidt, H.*: Automatische Tropfengrößen- und Belagsanalyse im chemischen Pflanzenschutz. Diss. TU Berlin 1976.
- [12] ● *Martin, H.*: Die wissenschaftlichen Grundlagen des Pflanzenschutzes. 5. Aufl., Weinheim/Bergstr.: Verlag Chemie 1967.
- [13] ● *Ullmanns Encyclopädie der technischen Chemie*. Bd. 10, 3. Aufl., Weinheim/Bergstr.: Verlag Chemie 1976.
- [14] ● *Weast, R.C.*: Handbook of Chemistry and Physics. 56th Edition 1975–1976, Cleveland, Ohio: CRC-Press Inc. 1975.
- [15] *Schmidt, M.*: Direkte Einspeisung und Dosierung von Pflanzenschutzmitteln in einen Flüssigkeitsstrom. Unveröffentlichter 1. und 2. Zwischenbericht an die DFG zum Forschungsvorhaben Go 135/22 (25), 1977 und 1979.
- [16] ● *Freundlich, H.*: Kapillarchemie. Band I, 4. Aufl., Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft 1930.
- [17] *Jegatheeswaran, P.*: Einfluß der physikalischen Eigenschaften von Pflanzenschutzflüssigkeiten auf den Zerstäubungsvorgang. Diplomarbeit TU Berlin 1973.
- [18] *Bode, L.E., B.J. Butler u. C.E. Goering*: Spray drift and recovery as affected by spray thickener, nozzle type and nozzle pressure. Trans. ASAE Bd. 19 (1976) Nr. 2, S. 213/18.
- [19] *Butler, B.J., N.B. Akesson u. W.E. Yates*: Use of spray adjuvants to reduce drift. Trans. ASAE Bd. 12 (1969) Nr. 2, S. 182/86.
- [20] *Butler, B.J. u. C.E. Goering*: Field studies of conventional methods vs. thickening agents for drift control. 8th annual Oklahoma State University agricultural chemical conference, January 29, 1974.
- [21] *Butler, B.J.*: New additives to reduce herbicide drift. Agricultural Engineering Dept., University of Illinois, Urbana.
- [22] Anonym: Control of drift in the application of crop protection chemicals (ohne Quellenangabe).
- [23] *Potter, S.*: Improving aerial fungicide application. Michigan State University.
- [24] Your guide to more effective drift control. (Beiträge verschiedener Autoren) Report der Nalco Chemical Company, Illinois, USA, 1975.
- [25] *Hosseinipour, M.*: Einfluß der Klimabedingungen auf die Drift bei der Zerstäubung von Pflanzenschutzmitteln. Diss. TU Berlin, 1979.
- [26] Nalco-Trol, pesticide drift retardant and deposition aid. Werbescrift der Nalco Chemical Company, Illinois, USA.
- [27] *Virk, P.S., E.W. Marril, H.S. Mickley, K.A. Smith u. E.L. Mollo-Christensen*: The Toms phenomenon: turbulent pipe flow of dilute polymer solutions. J. Fluid Mech. Bd. 30 (1967) Teil 2, S. 305/28.
- [28] *Gadd, G.E.*: Reduction of turbulent friction in liquids by dissolved additives. Nature Bd. 212 (1966) Nr. 5065, S. 874/77.
- [29] *Kresser, A.*: Praktische Anwendung chemischer Additive zur Reduktion des Druckverlustes bei Wasserförderung. 3 R international (Rohre, Rohrleitungsbau und Rohrleitungstransport) Bd. 14 (1975) H. 7, S. 385/88.
- [30] *Schmidt, M.*: Einsatzmöglichkeiten der Direkteinspeisung in der Pflanzenschutztechnik. Vortrag auf der 42. Deutschen Pflanzenschutztagung in Mainz, Okt. 1979.
- [31] *Göhlich, H.*: Zur Problematik verringerter Aufwandmengen und reduzierter Drift. Gesunde Pflanzen Bd. 32 (1980) Nr. 2, S. 25/31.
- [32] *Dombrowski, N. u. W.R. Johns*: The aerodynamic instability and disintegration of viscous liquid sheets. Chem. Eng. Sci. Bd. 18 (1963) Nr. 2, S. 203/14.
- [33] *Mugele, R.A.*: Maximum stable droplets in dispersoids. AIChE Journal Bd. 6 (1960) Nr. 1, S. 3/8.
- [34] *Tanasawa, Y. u. S. Toyoda*: On the atomization of liquid jet issuing from a cylindrical nozzle. The Technology Reports of the Tohoku University Bd. 21 (1955) Nr. 2, S. 135/36 (zitiert bei Brauer [2]).