

Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft
Fachgruppe Anwendungstechnik

Phasen-Doppler-Anemometrie als neues Meßverfahren zur Bestimmung der Tropfengröße an Pflanzenschutzdüsen

Phase doppler anemometry – a new measuring system to determine the droplet size of agricultural nozzles

Von C. Ludewig und H. Ganzelmeier

Zusammenfassung

Zuverlässige und aussagekräftige Tropfengrößenmeßergebnisse sind für die Beurteilung von Pflanzenschutzgeräten unerlässlich. Es wurde daher ein neuartiges Lasermeßverfahren erprobt und auf die speziellen Erfordernisse der Zerstäubung in der Pflanzenschutztechnik abgestimmt. Die Nachteile der bisherigen Tropfengrößenmeßverfahren können damit weitgehend eliminiert und die Einsatzmöglichkeiten der Tropfengrößenmeßtechnik noch wesentlich erweitert werden.

Mit diesem Verfahren können neben der Bestimmung der Tropfengröße und der Tropfengeschwindigkeit an Einzeldüsen auch entsprechende Messungen an Spritz-, Sprüh- und Nebelgeräten durchgeführt werden.

In diesem Beitrag wird das neue Lasermeßverfahren näher erläutert, und Ergebnisse umfangreicher Tropfengrößenmessungen an verschiedenen Typen von Flachstrahldüsen werden dargestellt. Die Tropfengrößenangaben sind zuverlässig und aussagekräftig und mit den betroffenen Düsenherstellern abgestimmt.

Das vorhandene Zahlenmaterial deckt Düsengrößen und Drücke über einen großen Bereich ab, so daß die unterschiedlichen Tropfengrößenangaben aus früheren Messungen insgesamt ersetzt werden können.

Abstract

Reliable and significant droplet size measurement results are essential to evaluate Plant Protection Equipment. Therefore an innovative laser measuring system (Phase-Doppler-Particle-Analyzer) was tested and coordinated to the special requirements of atomization in sprayer techniques.

This measuring system eliminates the disadvantages of existing droplet size measurement systems and has expanded the operational area of droplet size measuring techniques essentially. It measures droplet sizes and droplet velocities at single nozzles and also directly at field sprayers, air assisted sprayers and fogging machines.

This paper explains the new measuring system and presents results of extensive droplet size measurements at different types of flat fan nozzles.

These droplet size information are reliable and significant. They were harmonized with the main nozzle manufacturers. The present numerical data enclose nozzle sizes and pressures within a wide range.

The different results of measurements done in the past can be replaced altogether.

Die Diskussionen um einen sparsamen und umweltschonenden Pflanzenschutz erfassen in gleicher Weise die Technik zur Ausbringung der Pflanzenschutzmittel. Vor dem Hintergrund des wachsenden Umweltbewußtseins sowie der sich verändernden Preis-Kosten-Relationen werden die Anwender von

Pflanzenschutzmitteln zunehmend veranlaßt, die Fortschritte in der Ausbringtechnik zu nutzen.

Eine effektive und möglichst abtrifffarme Anwendung von Pflanzenschutzmitteln wird im wesentlichen durch die Tropfengrößen der ausgebrachten Behandlungsflüssigkeit bestimmt.

Dieses Kriterium konnte bei der Prüfung und Beurteilung von Pflanzenschutzgeräten bzw. deren Zerstäubern bislang jedoch nicht angemessen berücksichtigt werden, weil die eingesetzten Meßverfahren zur Tropfengrößenbestimmung je nach Meßgerätetyp und Meßbedingungen völlig unterschiedliche Ergebnisse lieferten (KOHSEK, 1987; LUDEWIG et al., 1992).

Seit einiger Zeit wird in der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft (BBA) ein neues Lasermeßverfahren zur Lösung der meßtechnischen Probleme in der Tropfengrößenbestimmung eingesetzt.

Dieses Phasen-Doppler-Verfahren der Firma Aerometrics ermöglicht die berührunglose Messung von Tropfengrößen und Tropfengeschwindigkeiten im Spritzstrahl.

Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, Messungen direkt an Spritz-, Sprüh- oder Nebelgeräten durchzuführen. Erste Erfahrungen mit dem Phasen-Doppler-Partikel-Analysator (PDPA) sowie Tropfengrößenergebnisse liegen vor.

Grundlagen der Phasen-Doppler-Anemometrie

Der Phasen-Doppler-Partikel-Analysator (PDPA) zur simultanen Messung von Partikelgrößen und -geschwindigkeiten stellt eine Erweiterung des normalen Laser-Doppler-Anemometers dar.

Das PDPA besteht aus einem optischen System mit Laser, Sende- und Empfangsoptik sowie der Signalverarbeitung mit digitalem Signalprozessor (Abb. 1).

Das Meßprinzip beruht auf der Lichtstreuung am Einzelteilchen. Es kann vereinfachend mit Hilfe eines Interferenzstreifenmodells erklärt werden (BACHALO und HOUSER, 1984).

Der Strahl eines kontinuierlich arbeitenden Lasers wird über ein Glasfaserkabel in eine Sendeoptik geleitet. Dort wird der Laserstrahl mittels Strahlteiler in zwei parallele Teilstrahlen gleicher Intensität aufgeteilt, die durch eine sphärische Linse unter einem definierten Winkel zum Schnitt gebracht werden.

Im Schnittpunkt beider Laserstrahlen entsteht ein Muster planparalleler Interferenzstreifen mit einem bekannten Streifenabstand, der durch die Laserlichtwellenlänge und den Winkel der beiden Strahlen im Überschneidungsgebiet gegeben

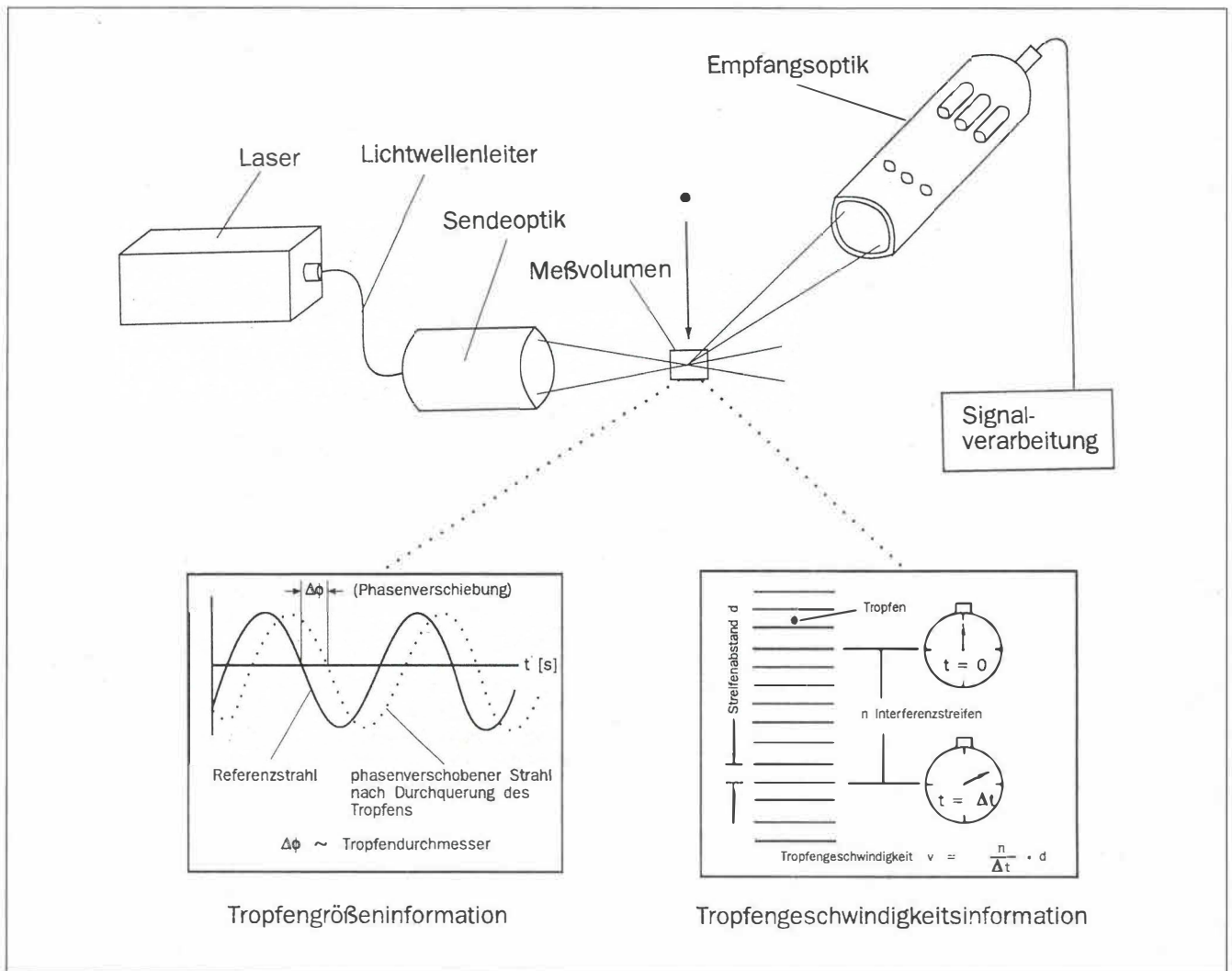


Abb. 1. Typischer Aufbau eines Phasen-Doppler-Partikel-Analysators (PDPA) mit schematischer Darstellung der Strahlinformation zur Tropfengröße und Tropfgeschwindigkeit.

ist. Der Schnittpunkt beider Strahlen stellt zugleich das Meßvolumen dar.

Aufgrund der Gaußschen Intensitätsverteilung der einfallenden Laserstrahlen besitzt das Meßvolumen die Form eines Rotationsellipsoids mit ca. 1 mm³. Sobald sphärische Partikel dieses Meßvolumen durchqueren, wird eine Sequenz von Streulichtsignalen erzeugt, die wegen der Interferenzstreifen amplitudenmoduliert ist. Das heißt, die vom Partikel erzeugte Modulationsfrequenz, auch Dopplerfrequenz genannt, ist abhängig von der Geschwindigkeitskomponente des Partikels senkrecht zum Streifensystem.

Das Streulicht wird in der Empfangsoptik durch eine sphärische Linse gebündelt und von Photodetektoren in ein elektrisches Signal umgewandelt. Die ermittelte Frequenz dieses elektrischen Signals ist proportional zur Teilchengeschwindigkeit.

Die Phasen-Doppler-Anemometrie nutzt im Gegensatz zur herkömmlichen Laser-Doppler-Anemometrie zusätzlich die in der Phasenlage des Streulichts enthaltene Information über die Partikelgröße aus. Betrachtet man die Interferenzstreifen im Meßvolumen, dann werden diese von den transparenten sphärischen Tropfen in den Raum projiziert. Die Tropfen verhalten sich im Meßvolumen wie kleine Linsen. Durchquert ein Tropfen das Meßvolumen, so werden die Interferenzstreifen

phasenverschoben. Diese Phasenverschiebung steht in linearem Zusammenhang zur Größe des Partikels und läßt sich über zwei räumlich versetzt angeordnete Photodetektoren in der Empfangsoptik ermitteln. Unter Zuhilfenahme eines dritten Detektors wird eine Mehrdeutigkeit der Phasenverschiebung (> 360°) ausgeschlossen.

Mittels einer zweiten Laserwellenlänge mit um 90° versetzter Anordnung besteht die Möglichkeit, eine zweite Geschwindigkeitskomponente zu ermitteln. Die zeitliche und räumliche Kohärenz des Laserlichts ermöglicht es, Messungen mit hoher Auflösung durchzuführen. Im Gegensatz zu anderen Meßtechniken beeinflusst das PDPA die ablaufenden Strömungsvorgänge nicht.

Die Phasen-Doppler-Methode ist absolut und erfordert keine Eichung. Die Tropfengrößen- und -geschwindigkeitsermittlung basiert ausschließlich auf optischen Gesetzmäßigkeiten. Zur Kalibrierung des PDPA können Latexkugeln definierter Größe (SANKAR et al., 1991) oder ein Tropfengenerator (BACHAL und HOUSER, 1984) eingesetzt werden. Der Meßbereich des PDPA erstreckt sich von ca. 1 bis 2000 µm. Die PDPA-Software bietet eine menügesteuerte Kontrolle der Datenaufnahme, Datenauswertung und Datenspeicherung. Sämtliche Einstellungen der PDPA-Optik und der Signalprozessoren werden softwaregesteuert durchgeführt. Während

der Datenaufnahme wird das Histogramm der Teilchengröße und der Teilchengeschwindigkeiten auf dem Bildschirm gezeigt.

Nach vorhergehender Festlegung der Meßbereichs-ober- und -untergrenzen für Tropfengröße und Tropfengeschwindigkeiten werden die Meßwerte in 50 Klassen gleicher Klassenbreite gesammelt. Für die Tropfenanzahl und das Tropfenvolumen wird sowohl die Häufigkeitsverteilung als auch die Summenverteilung grafisch und tabellarisch dargestellt.

Um die PDPA-Meßwerte mit Ergebnissen anderer Meßverfahren vergleichen zu können, wird die Rosin-Rammler-Verteilungsfunktion an die gemessenen Tropfengrößen angepaßt. Zusätzlich werden die Tropfengrößen in die Werte einer Spatialverteilung umgerechnet. Die Spatialverteilung kommt einer Momentaufnahme eines bestimmten Sprayabschnitts gleich, die man z. B. durch andere Tropfengrößenmeßverfahren wie Tropfenfotografie, Tropfenholografie oder Laserlichtbeugungssysteme erhält (Abb. 2).

Die spatiale Tropfengrößenverteilung stellt die normierte Anzahldichteverteilung von Größe und Geschwindigkeit der Tropfen dar, die sich zum Zeitpunkt t_1 im Meßvolumen befinden (örtliche Anzahlkonzentration).

Die temporale Tropfengrößenverteilung des PDPA-Verfahrens dagegen gibt die normierte Anzahldichteverteilung von Größe und Geschwindigkeit der Tropfen an, die sich während des Zeitintervalls Δt durch einen bestimmten Meßquerschnitt hindurchbewegen (örtliche Partikelstromdichte).

Da im Spritzstrahl eine mehr oder weniger breite Verteilung der Einzelwerte von Tropfengröße und Tropfengeschwindigkeit vorliegt, weichen beide Verteilungen voneinander ab. Kleinere Tropfen mit durchschnittlich niedrigerer Geschwindigkeit haben eine längere Verweilzeit im Meßvolumen und werden bei der spatialen Betrachtungsweise überbewertet. Bei der temporalen Tropfengrößenbestimmung durch das PDPA-Verfahren dagegen wird jeder Tropfen, der durch den Meßquerschnitt hindurchtritt, unabhängig von seiner Größe, nur einmal gemessen.

Die eine dieser beiden Verteilungen kann jeweils aus der anderen berechnet werden, wenn eine der beiden Geschwindigkeitsverteilungen bekannt ist.

Da neben der Tropfengröße auch die Horizontal- und Vertikalkomponente der Tropfengeschwindigkeit gemessen werden, lassen sich Korrelationen zwischen der Tropfengröße und beiden Geschwindigkeitskomponenten sowie die Korrelation der beiden gemessenen Geschwindigkeiten untereinander erstellen.

Die PDPA-Software gibt weiterhin die resultierende Bahngeschwindigkeit und den Winkel der Tropfenflugbahn an.

Zudem ermöglicht das PDPA-Gerät im Rahmen einer Rohdatenanalyse die Untersuchung von gepulsten und zeitlich veränderten Partikelströmungen. Mit diesem Unterprogramm können Daten als Funktion der Zeit dargestellt werden.

Kalibrierung des Phasen-Doppler-Partikel-Analysators

Um die Meßgenauigkeit des PDPA und die Richtigkeit der optischen Konfiguration zu überprüfen, wurden Messungen an quasi monodispersen Tropfen bekannter Größe, die mit einem Berglund-Liu-Tropfengenerator (Fa. TSI) erzeugt werden, durchgeführt. Ein Vergleich der mittels PDPA gemessenen Tropfengrößen mit den vom Tropfengenerator bekannten Werten zeigt eine gute Übereinstimmung (Abb. 3). Die Abweichungen liegen bei maximal 5,9%.

Das Prinzip des Tropfengenerators basiert auf dem Zerfallsprozeß eines Wasserstrahls, der in Tropfen annähernd gleicher Größe zerfällt, wenn periodische Schwingungen einer bestimmten Frequenz auf einen Flüssigkeitsvollstrahl einwirken (BERGLUND und LIU, 1973).

Durch Veränderung der Erregerfrequenz und die Wahl unterschiedlicher Lochblenden können verschiedene Tropfengrößen von 70–210 μm erzeugt werden.

Reproduzierbarkeit der Meßergebnisse

Differenzen bei der Tropfengrößenbestimmung durch verschiedene Meßverfahren sind häufig zurückzuführen auf die ungenügende Reproduzierbarkeit der Meßergebnisse. Abweichungen sind auch bei verschiedenen Meßgeräten gleichen Typs keine Seltenheit (DOBLE et al., 1985).

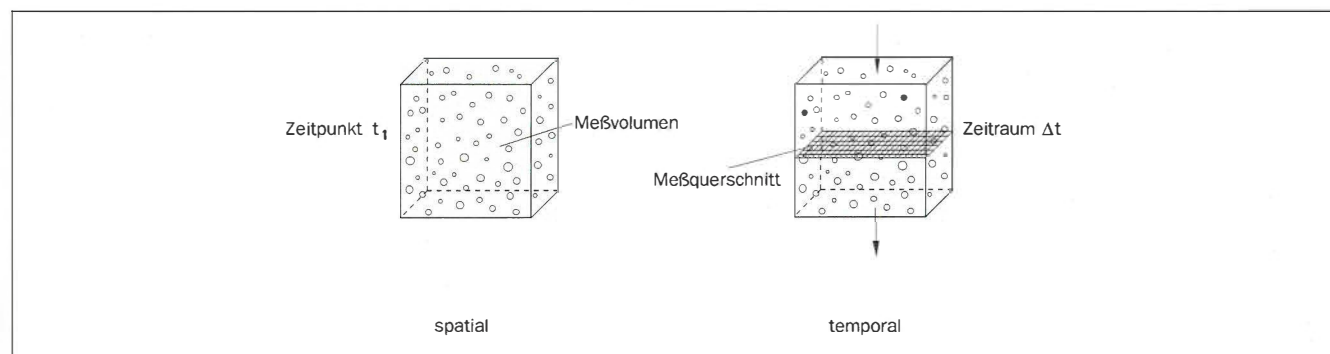
Vielfach werden Meßergebnisse miteinander verglichen, die unter vollkommen unterschiedlichen Bedingungen und mit verschiedenen Meßmethoden erzielt wurden. So weichen z. B. die Orte der Stichprobenentnahme und die Auswertalgorithmen häufig voneinander ab.

Repräsentative Tropfengrößenergebnisse lassen sich nur dann erzielen, wenn eine Tropfengrößenbestimmung über die gesamte Ausdehnung des Spritzstrahls erfolgt. Häufig werden, wie z. B. bei der Tropfenfotografie, nur bestimmte Sprayausschnitte erfaßt. Das PDPA-Gerät mißt punktuell im Strahl. Um eine repräsentative, den gesamten Spritzstrahl kennzeichnende Tropfengrößenbestimmung vornehmen zu können, muß aber der gesamte Spritzfächer vermessen werden.

Nur so kann einer Veränderung der Tropfengröße im Spritzstrahl Rechnung getragen werden (Abb. 4).

Meßreihen zur Beurteilung der Reproduzierbarkeit der PDPA-Ergebnisse wurden an verschiedenen Düsengrößen bei

Abb. 2. Schematische Darstellung der spatialen und temporalen Stichprobenentnahme (spatial \triangleq Messung der örtlichen Anzahlkonzentration; temporal \triangleq Messung der örtlichen Partikelstromdichte).



Tropfengröße Tropfengenerator (μm)	Tropfengröße PDPA (μm)	Abwei- chung (%)
83,2	78,3	-5,9
84,6	82,6	-2,4
106,4	105,2	-1,1
111,1	113,3	+1,8
155,0	157,0	+1,3
178,5	177,1	-0,8
206,4	201,1	-2,6

Abb. 3. Theoretische (vom Tropfengenerator erzeugte monodisperse Tropfengröße) und mit dem PDPA gemessene Tropfengröße im Vergleich (Kalibrierung des PDPA).

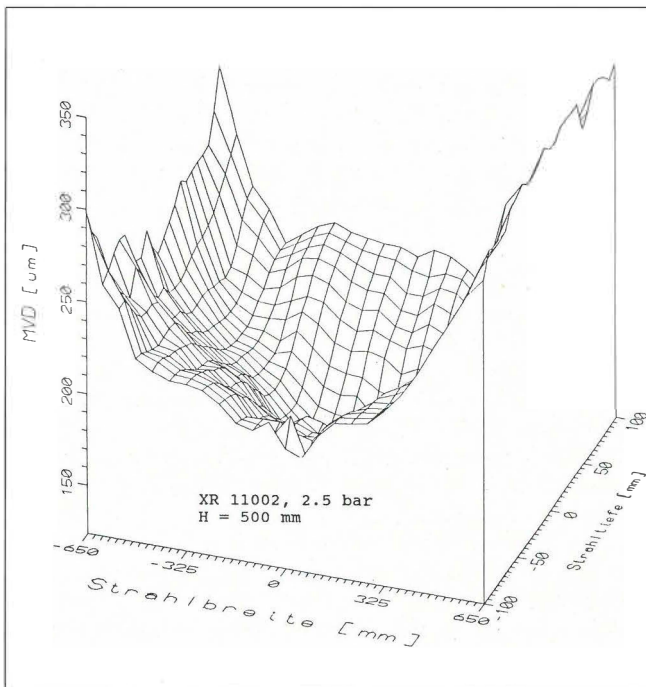


Abb. 4. Tropfengrößenverteilung im Strahlquerschnitt einer Flachstrahldüse.

Düse	Schwankungsbe- reich des MVD (μm)	\bar{x} (μm)	max. Abwei- chung von \bar{x} (%)
LU 120 02, 4 bar	184,7–193,0	188,0	2,7
XR 110 04, 3 bar	273,6–284,1	279,8	2,2
SD 110 05, 3 bar	346,2–372,3	361,5	4,2

Abb. 5. Reproduzierbarkeit von Tropfengrößenmeßergebnissen mittels PDPA.

unterschiedlichem Spritzdruck durchgeführt. Die Messungen zeigen zufriedenstellende Ergebnisse (Abb. 5). Die Abweichungen vom Mittelwert betragen ca. 2–4%.

Auch Vergleichsmessungen mit PDPA-Geräten anderer Institutionen an denselben Düsen, die zwischen den verschiedenen Versuchsanstaltern (Firma Lechler, Firma Spraying Systems, Biologische Bundesanstalt) ausgetauscht wurden, zeigen bei vergleichbaren Rahmenbedingungen eine gute Übereinstimmung (Abb. 6).

Serienstreuung verschiedener Düsentypen hinsichtlich ihrer Tropfengröße

Bei der Betrachtung von Tropfengrößenergebnissen müssen neben der Streuung, die vom Meßverfahren herrührt, auch Abweichungen innerhalb einer Düsenreihe berücksichtigt werden. Messungen an mehreren Flachstrahldüsen einer Düsenreihe zeigen, daß die Tropfengrößen einzelner Düsen bis zu ca. 6% vom Mittelwert der Düsenreihe abweichen (Abb. 7).

Demnach kann die Streuung der Meßergebnisse innerhalb einer Düsenreihe größere Werte annehmen als die Schwankungen seitens des Meßgerätes.

Tropfengrößen von Flachstrahldüsen

Um repräsentative Tropfengrößenangaben für Flachstrahldüsen zu erhalten, muß über die gesamte Sprayellipse gemessen werden. In zahlreichen Versuchen an verschiedenen Düsenreihen und bei unterschiedlichen Betriebsdrücken zeigte sich, daß ein für alle Flachstrahldüsen gleichbleibendes Meßraster zur Tropfengrößenbestimmung verwandt werden kann (Abb. 8). Dabei wird die zu vermessende Düse im Abstand von 50 cm vom Düsenmund in 5 Schritten mit konstanter Geschwindigkeit über das PDPA-Meßvolumen hinwegbewegt. Die Düsenhöhe wird so gewählt, daß eine für statistische Betrachtungen ausreichende Tropfenanzahl erreicht wird.

Unter Verwendung dieses Meßrasters wurden Tropfengrößenmessungen an verschiedenen Düsen durchgeführt.

Neben den bekannten Typen XR (Fa. Spraying Systems) und LU (Fa. Lechler) wurden auch neuartige abtrifftreduzierende Flachstrahldüsen in diese Messungen einbezogen. Die Besonderheit dieser abtrifftreduzierenden Düsen besteht darin, daß im Düsenmundstück ein zusätzlicher Einsatz (Dosierblende) angebracht ist. An diesem Einsatz bildet sich zunächst ein Flüssigkeitsvollstrahl aus, der erst an der zweiten, der eigentlichen Düsenöffnung zerstäubt und zu einem Spritzfächer geformt wird.

Dadurch kann die Austrittsöffnung der abtrifftreduzierenden Düsen im Vergleich zu konventionellen Düsen mit gleichem Ausstoß größer gewählt werden, was eine deutliche Verringerung des Kleintropfenanteils bewirkt.

Die Abbildungen 9–13 zeigen den mittleren volumetrischen Tropfendurchmesser (MVD) verschiedener Flachstrahldüsentypen namhafter Hersteller.

Der MVD ist bekanntlich die Tropfengröße, bei der 50% des Flüssigkeitsvolumens in Tropfen ausgebracht werden, die gleich oder kleiner als der entsprechende Wert sind. Aus den Darstellungen wird deutlich, daß die abtrifftreduzierenden Düsen bei gleichem Ausstoß grobtropfiger sind.

So entspricht z. B. die DG 110015 ungefähr der XR 11003 oder aber die AD 12002 der LU 12005.

Demnach können Pflanzenschutzmittel unter Verwendung der abtrifftreduzierenden Düsen bei halbem Flüssigkeitsaufwand mit gleichem Tropfengrößenspektrum appliziert werden, wie bei Einsatz der konventionellen Flachstrahldüsen mit voller Wassermenge.

In Abbildung 14–16 sind der $D_{10\%}$ -Wert, der MVD sowie der Volumenanteil unter $100 \mu\text{m}$ von Flachstrahldüsen verschiedener Düsenhersteller tabellarisch aufgeführt. Der $D_{10\%}$ -Wert ist die Tropfengröße, bei der 10% des ausgebrachten Flüssigkeitsvolumens in Tropfen zerstäubt werden, die gleich oder kleiner sind als der entsprechende Wert. Der Volumenanteil unter $100 \mu\text{m}$ ist der prozentuale Volumenanteil, der in Tropfen kleiner als $100 \mu\text{m}$ ausgebracht wird.

Düse	MVD* (µm)	Abweichung von \bar{x} (%)	Versuchsansteller
110 02 VS	165,5	-0,7	Spraying Systems
	164,5	-1,3	
	170,2	+2,1	
\bar{x}	166,7		BBA
120 04 C	239,4	+4,4	Spraying Systems
	226,5	-1,2	
	222,1	-3,1	
\bar{x}	229,3		Lechler
110 06	341,4	+7,6	Spraying Systems
	312,8	-1,7	
	297,7	-6,2	
\bar{x}	317,3		Lechler
			BBA

*je 5 Messungen bei 2,5 bar 500 mm unterhalb des Düsenmundes

Abb. 6. PDPA-Tropfengrößenmeßergebnisse verschiedener Versuchsansteller im Rahmen eines Ringversuches.

Düse	Schwankungsbereich des MVD (µm)	\bar{x} (µm)	max. Abweichung von \bar{x} (%)
LU 120 04, 2 bar	273,1–291,3	285,5	4,3
XR 110 02, 4 bar	185,0–207,1	197,2	6,2
SD 110 05, 3 bar	343,1–375,8	355,9	5,6

Abb. 7. Serienstreuung verschiedener Flachstrahldüsen hinsichtlich ihres MVD.

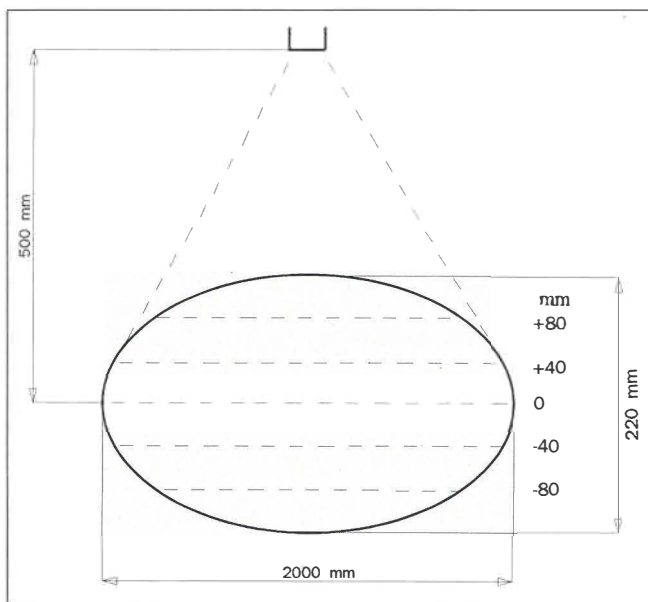


Abb. 8. Meßraster für Flachstrahldüsen zur repräsentativen Erfassung der Tropfengrößenverteilung im Strahlquerschnitt.

Dieser Kennwert hat eine besondere Bedeutung für die Bewertung des abtriftgefährdeten Kleintropfenanteils.

Die ermittelten repräsentativen Tropfengrößenangaben gelten als zuverlässige und aussagekräftige Ergebnisse, die auch für weitergehende Vergleiche bzw. Überlegungen herangezogen werden können.

Die Aufstellung ist mit den Düsenherstellern (Fa. Spraying Systems und Fa. Lechler) abgestimmt und enthält alle Werte, die für den Einsatz der Pflanzenschutzdüsen von Bedeutung sein können.

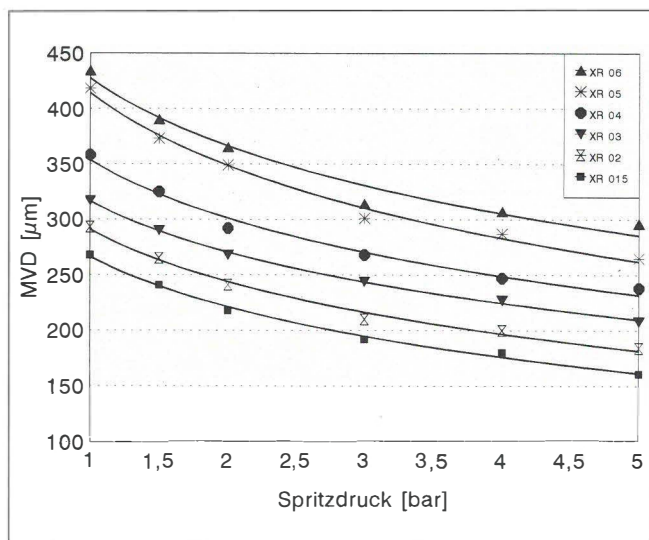


Abb. 9. Mittlerer volumetrischer Tropfendurchmesser von XR-Düsen.

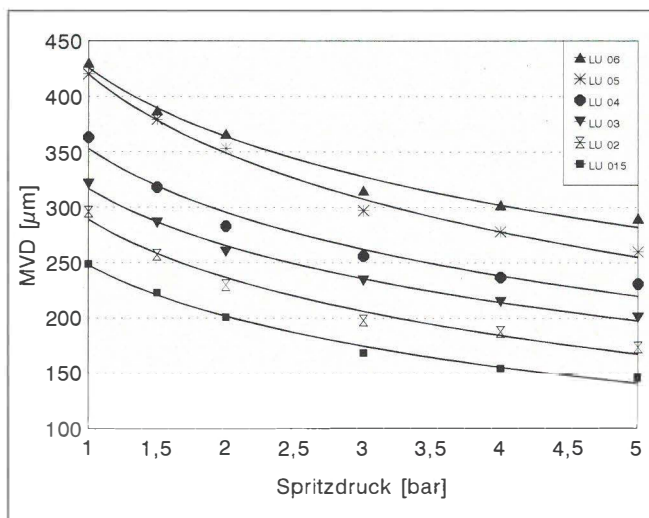


Abb. 10. Mittlerer volumetrischer Tropfendurchmesser von LU-Düsen.

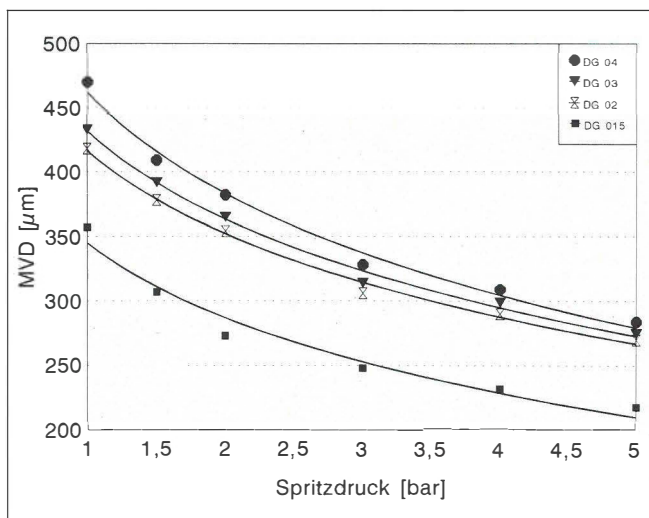


Abb. 11. Mittlerer volumetrischer Tropfendurchmesser von DG-Düsen (Fa. Spraying Systems).

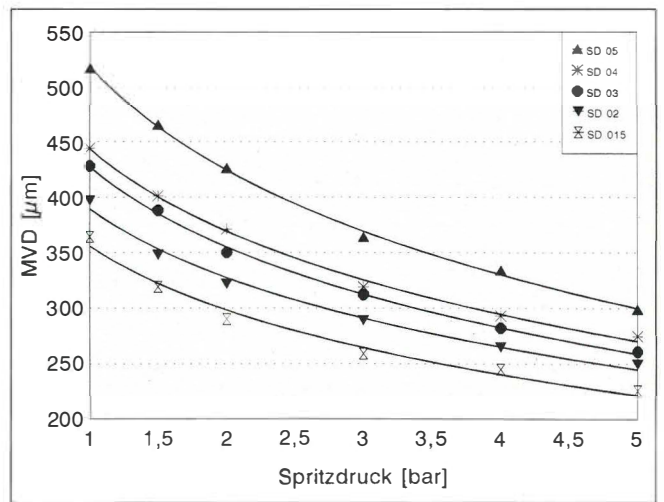
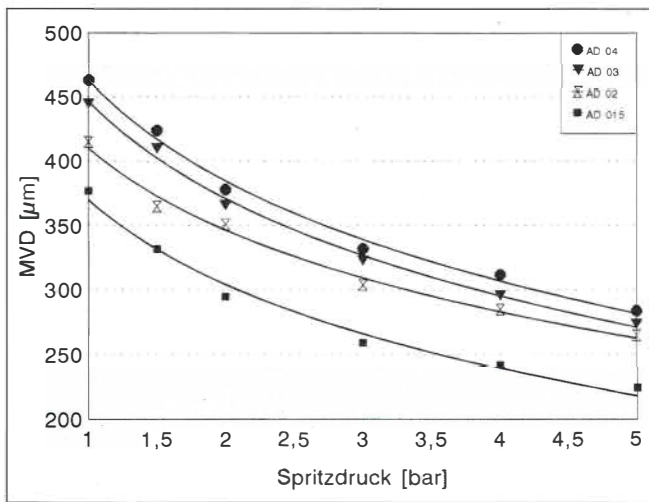


Abb. 12. Mittlerer volumetrischer Tropfendurchmesser von AD-Düsen (Fa. Lechler).

Abb. 13. Mittlerer volumetrischer Tropfendurchmesser von SD-Düsen (Fa. Lurmark).

Düse	D _{10%} (µm)					MVD (µm)					Vol. < 100 µm (%)					
	Druck (bar)	1,5	2	3	4	5	1,5	2	3	4	5	1,5	2	3	4	5
XR 110-015		121	111	95	89	84	241	218	192	180	161	6,2	7,9	11,8	15,6	19,0
XR 110-02		136	122	106	101	93	265	241	210	200	184	5,0	6,1	9,0	10,0	13,0
XR 110-03		155	145	127	119	112	290	268	244	227	208	2,5	3,1	5,1	6,2	8,0
XR 110-04		176	161	147	130	123	325	292	268	247	238	1,7	2,3	3,0	4,5	6,1
XR 110-05		185	173	154	146	126	373	349	301	287	265	0,7	1,1	2,1	3,0	3,9
XR 110-06		199	187	166	156	149	390	365	314	307	296	0,6	0,8	1,9	2,5	3,6
DG 110-015		163	139	125	117	109	307	273	248	232	218	2,0	3,1	4,5	6,0	7,9
DG 110-02		209	190	162	155	143	378	354	306	290	270	1,0	1,4	2,4	3,1	3,8
DG 110-03		218	193	168	160	148	392	365	314	299	275	0,9	1,3	2,2	2,7	3,4
DG 110-04		224	205	179	165	155	409	382	328	309	284	0,8	1,1	1,9	2,4	2,9

Abb. 14. Tropfengrößenmeßwerte für XR- und DG-Düsen.

Düse	D _{10%} (µm)					MVD (µm)					Vol. < 100 µm (%)					
	Druck (bar)	1,5	2	3	4	5	1,5	2	3	4	5	1,5	2	3	4	5
LU 120-015		115	103	88	80	79	223	201	169	155	146	6,7	9,6	14,8	20,7	22,9
LU 120-02		130	116	101	95	88	257	230	198	188	174	5,2	7,0	10,0	11,6	15,4
LU 120-03		144	129	115	108	103	286	260	234	215	201	3,0	4,0	6,2	7,9	9,7
LU 120-04		169	149	138	120	115	318	283	256	237	231	1,9	3,0	4,1	6,1	7,3
LU 120-05		190	177	149	143	128	379	353	297	278	260	0,7	1,0	2,2	3,2	3,8
LU 120-06		199	184	159	150	138	387	366	315	302	290	0,6	0,9	2,1	2,8	3,7
AD 120-015		172	151	130	123	116	332	295	259	242	224	1,7	2,7	4,5	5,0	6,5
AD 120-02		196	184	158	150	140	365	351	304	285	265	1,4	1,7	2,8	3,5	4,1
AD 120-03		230	204	180	167	145	410	366	323	296	274	0,7	1,0	1,8	2,4	3,4
AD 120-04		237	210	189	176	154	424	378	332	312	284	0,7	0,9	1,5	2,2	2,9

Abb. 15. Tropfengrößenmeßwerte für LU- und AD-Düsen.

Düse	D _{10%} (µm)					MVD (µm)					Vol. < 100 µm (%)					
	Druck (bar)	1,5	2	3	4	5	1,5	2	3	4	5	1,5	2	3	4	5
SD 110-015		174	158	134	125	117	319	290	259	245	226	1,7	2,5	4,3	5,0	6,6
SD 110-02		194	172	151	139	128	348	322	289	265	250	1,5	2,3	2,9	3,7	5,0
SD 110-03		217	188	167	151	135	388	350	312	282	261	1,0	1,5	2,2	2,9	3,8
SD 110-04		227	202	178	157	145	401	371	319	293	275	0,7	1,1	1,9	2,7	3,2
SD 110-05		261	235	197	180	158	465	426	364	334	299	0,4	0,5	1,1	1,3	2,1

Abb. 16. Tropfengrößenmeßwerte für SD-Düsen.

Neben den Auswirkungen der Düsengröße und des Spritzdruckes auf die Tropfengröße ($D_{10\%}$, MVD, Vol. $<1\ 100\ \mu\text{m}$) lassen sich aus diesem umfangreichen Zahlenmaterial auch die Vorteile der neuen grobtropfigeren Flachstrahldüsen (AD, DG, SD) hinsichtlich ihrer größeren Abtrifffestigkeit ableiten.

Im Vergleich zu den konventionellen XR- bzw. LU-Düsen steigt der $D_{10\%}$ -Wert der neuen Düsen auf der Basis gleicher Durchsatzwerte um 25–55 % an. Entsprechend verringert sich der abtrifffähigste Kleintropfenanteil unter $100\ \mu\text{m}$ um den Faktor 2 bis 5.

Diese Unterschiede im Kleintropfenbereich finden unzweifelhaft in aktuellen Abtriftmeßergebnissen (RIPKE, 1992) ihren Niederschlag.

Durch die aufgeführten Tropfengrößenmeßergebnisse werden die bisher aufgetretenen großen Unterschiede bei der Angabe von Tropfengrößen durch verschiedene Versuchsansteller ausgeschaltet.

Bislang herausgebrachte Tropfengrößenergebnisse wichen häufig sehr stark voneinander ab. So konnten anhand publizierter Werte Unterschiede bis zu einem Faktor 2 festgestellt werden. Diese Differenzen machten es unmöglich, die Tropfengröße in weitergehende Betrachtungen einzubeziehen. Es ist daher zweckmäßig, zukünftig nur noch mit abgesicherten und abgestimmten Tropfengrößenmeßergebnissen zu arbeiten.

Ausblick

Bislang konnte die Tropfengröße bei der Beurteilung von Pflanzenschutzgeräten nicht entsprechend berücksichtigt werden, weil die Ergebnisse der eingesetzten Meßverfahren nur eine geringe Übereinstimmung zeigten. Zudem waren die Einsatzmöglichkeiten der bisherigen Meßtechnik beschränkt. Mit dem vorgestellten Phasen-Doppler-Partikel-Analysator ist es möglich, repräsentative Tropfengrößenmessungen berührungslos im Strahl durchzuführen. Ein für alle Flachstrahldüsentypen gleichbleibendes Meßraster wurde vorgestellt. Auf dieser Grundlage können Tropfengrößen zuverlässig und aussagekräftig angegeben werden.

Bisher publizierte Tropfengrößen, die überwiegend auf Herstellerangaben basieren und häufig stark voneinander abweichen, können durch die mit den Düsenherstellern abgestimmten repräsentativen Tropfengrößenmeßergebnissen ersetzt werden. Eine Erfassung der Tropfengrößen von Kegelschahldüsen mit entsprechender Meßanleitung ist in Vorberei-

zung. Erste Ergebnisse sollen in nächster Zeit vorgestellt werden. Unter Ausnutzung der Vorteile des PDPA sollen zudem die Einsatzmöglichkeiten der bisherigen Meßtechnik erweitert werden. Durch die hohe zeitliche und räumliche Kohärenz des Laserlichtes ist es möglich, neben Messungen an Einzeldüsen auch Tropfengrößenbestimmungen direkt an Spritz-, Sprüh- und Nebelgeräten durchzuführen.

Somit ist das PDPA-System das einzige Tropfengrößenmeßverfahren, mit dem Tropfengrößen in Zweiphasenströmungen problemlos erfaßt werden können. Die simultane Bestimmung von Tropfengröße und -geschwindigkeit ermöglicht es, eine nahezu komplette Zerstäubungscharakteristik verschiedenster Düsen zu erstellen.

Durch die Erfassung der Tropfengeschwindigkeit bietet sich weiterhin die Möglichkeit, Tropfenspektren einer weitergehenden energetischen Betrachtung auszusetzen.

Ein wesentlicher Vorteil des PDPA liegt in der sicheren Erfassung kleiner Tropfen. Dadurch besteht die Möglichkeit, den abtrifffähigsten Kleintropfenanteil (Tropfen $<100\ \mu\text{m}$) bei der Beurteilung von Düsen exakt zu ermitteln und vor allem für feintropfige Düsen Einsatzbeschränkungen vorzugeben. Das PDPA-Verfahren führt zu zuverlässigen und eindeutigen Meßergebnissen, die eine umfassendere Prüfung und Beurteilung der Pflanzenschutzgeräte hinsichtlich einer möglichst gezielten und umweltschonenden Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln erlauben.

Literatur

1. BACHALO, W. D. and M. J. HOUSER, 1984: Phase doppler spray analyzer for simultaneous measurements of drop size and velocity distributions. *Opt. Eng.* **23**, Nr. 5, S. 585–590.
2. BERGLUND, R. N. and B. Y. H. LIU, 1973: Generation of monodisperse aerosol standards. *Env. Sci. Technol.*, Vol. 7, S. 147–152.
3. DOBLE, S. J., G. A. MATTHEWS, I. RUTHERFORD, and E. S. E. SOUTHCORBE. 1985: A system for classifying hydraulic nozzles and other atomisers into categories of spray quality. *Proceedings BCPC conference-weeds* **3**, S. 1125–1133.
4. KOHSIEK, H., 1987: Messung der Tropfengrößen für den Pflanzenschutz. *Erwerbsobstbau* **29**, Nr. 2, S. 32–36.
5. LUDEWIG, C., U. BUROW und H. GANZELMEIER, 1992: Tropfengrößenmessungen an Pflanzenschutzdüsen mittels Bildanalyse. *Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutzd. (Braunschweig)*, **44** (9), S. 191–197.
6. RIPKE, F. O., 1992: Pflanzenschutzmittelverluste vermeiden! *Zukerrübe* **41**, H. 3, S. 164–171.
7. SANKAR, S. V., B. J. WEBER, D. Y. KAMEMOTO, and W. D. BACHALO, 1991: Sizing fine particles with the phase Doppler interferometric technique. *Appl. Opt.* **30**, Nr. 33, S. 4914–4920.