[6] *Lenker, D.H. u. P.A. Adrian:* Use of x-ray for selecting mature lettuce heads.
Trans. ASAE Bd. 14 (1971) Nr. 5, S. 894/98.

[7] *Madigan, J.J.:* Methods and apparatus for determining the quantitative relationship of components in products by measurement of gammaray penetration.
U.S. Patent No. 2992 332 (1961).

[8] *Belcher, E. u. T.A. Vozzo:* Radiographic analysis of agricultural and forest tree seeds. Contribution No. 31 to the Handbook on Seed Testing.
Assoc. Official Seed Analysts 1979.

[9] *Birth, G.S.:* The light scattering properties of foods.
J. of Food Sci. Bd. 43 (1978) Nr. 3, S. 915/25.

[10] • *Kortüm, G.:* Reflexionsspektroskopie.
Berlin, Heidelberg und New York: Springer-Verlag 1969.

[11] *Chen, P.:* Use of optical properties of food materials in quality evaluation and material sorting.
Boston: 1st. Int. Congress on Engng. and Food, 1976.

[12] *Birth, G.S. u. S.E. Law:* Interaction of light and natural materials.
Athen: Russell Agricultural Research Center, 1977.

[13] *Birth, G.S.:* A nondestructive technique for detecting internal discoloration in potatoes.
Am. Potato J. Bd. 37 (1960) Nr. 2, S. 53/60.

[14] *Finney, F.F. u. K.H. Norris:* Determination of moisture in corn kernel by near-infrared transmittance measurements.
Trans. ASAE Bd. 21 (1978) Nr. 3, S. 581/84.

[15] *Story, A.G. u. G.S.V. Roghavan:* Sorting potatoes from stones and soil clods by infrared reflectance.
Trans. ASAE Bd. 16 (1973) Nr. 2, S. 304/309.

Belastung des Arbeitsplatzes durch Wirkstoffe beim Ausbringen von Pflanzenbehandlungsmitteln [1)]

Von Wilhelm Batel, Braunschweig-Völkenrode*)

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

DK 631.348:614.7

Für die Vorgänge, die zur Belastung des Arbeitsplatzes beim Ausbringen von Pflanzenbehandlungs- und Schädlingsbekämpfungsmitteln führen, gibt es vergleichsweise wenig Grundlagen. Es ist daher Ziel der Untersuchungen, solche Grundlagen und damit auch Voraussetzungen für Belastungsprognosen zu erarbeiten. Die aufgrund der so gewonnenen Unterlagen errechneten Belastungen stimmen recht gut mit den in der Produktion gemessenen überein.
Bei Einhaltung der empfohlenen Aufwandmengen werden mit geeigneten Ausbringungsgeräten die MAK-Werte beim Feldspritzen unterschritten. Ausnahmen sind bei großen Spritzbalkenabständen zum Boden und anderen in der Arbeit genannten Bedingungen möglich. Für solche Fälle stehen Schutzmaßnahmen zur Verfügung. Die Möglichkeit von Belastungsprognosen gibt Entscheidungshilfen für die Entwicklung und Zulassung neuer Pflanzenbehandlungsmittel und Ausbringungsgeräte aber auch für die Anwendungstechnik. Kontrollmessungen sind mit Hilfe von Prüfstandsversuchen möglich, wenn praxisnahe Rahmenbedingungen eingehalten werden.

Inhalt

1. Einleitung und Aufgabenstellung
2. Wirkungsablauf, Begriffe und Grundsätzliches zum Vorgang der Arbeitsplatzbelastung beim Ausbringen von Pflanzenbehandlungs- und Schädlingsbekämpfungsmitteln
   2.1 Wirkungsablauf und Begriffe
   2.2 Erklärungsmodell zur Arbeitsplatzbelastung durch Wirkstoffe bei einer fahrzeuggetragenen Spritzbalkenquelle
3. Versuchsaufbau, Versuchsdurchführung und Meßtechnik
   3.1 Messen des Wirkstoffgehaltes in der Luft am Fahrerplatz bei Spritzarbeiten in landwirtschaftlichen Betrieben
   3.2 Untersuchungen in einem Windkanal
   3.3 Untersuchungen mit Hilfe eines Versuchsstandes
   3.4 Feldmessungen mit Versuchseinrichtungen
   3.5 Meßtechnik
   3.6 Meßgrößen
4. Versuchsergebnisse
   4.1 Wirkstoffbelastung am Fahrerplatz beim Ausbringen von Pflanzenbehandlungsmitteln durch Spritzen in der Produktion
   4.2 Wirkstoffbelastung an einer Referenzstelle im Abdriftstrom (Windkanal)
      – Einfluß der Höhe der Meßstelle, der Windgeschwindigkeit, des Spritzdrucks und der Düsenbauart, des Emissionsstromes, des Luftzustandes, der Eigenschaften der Spritzflüssigkeit
   4.3 Wirkstoffbelastung an der dem Arbeitsplatz entsprechenden Referenzstelle im ungestörten Abdriftstrom unter meteorologischen Bedingungen
      – Einfluß der relativen Windgeschwindigkeit, der Höhe, der Spritzbalkenanordnung, des Windeinfallswinkels
   4.4 Wirkstoffbelastung des Arbeitsplatzes auf einem Spritzfahrzeug, Versuchsstand
   4.5 Wirkstoffbelastung des Arbeitsplatzes auf einem Versuchsfahrzeug unter praktischen Bedingungen in Abhängigkeit von der relativen Windgeschwindigkeit bei verschiedenen Pflanzenbeständen
5. Vorausberechnung der Arbeitsplatzbelastung aus Messungen unter Versuchsbedingungen
6. Maßnahmen zur Minderung der Belastung
7. Beanspruchung des Beschäftigten als Folge der Arbeitsplatzbelastung – einige Hinweise
8. Zusammenfassung

[1)] Pflanzenschutzmittel und Wachstumsregler

Für die Mitarbeit, Unterstützung und Beratung wird allen Beteiligten an dieser Arbeit bestens gedankt. Besonders erwähnt sei Herr *Surburg*, stellvertretend für die Lohnunternehmer.

**) Prof. Dr.-Ing. W. Batel ist Leiter des Instituts für landtechnische Grundlagenforschung der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode.*

1. Einleitung und Aufgabenstellung

Die langfristig angelegten Untersuchungen des Institutes über die Belastung der Beschäftigten in der landwirtschaftlichen Produktion durch Fremdstoffe in der Luft befaßten sich seither im wesentlichen mit festen teilchenförmigen Stoffen, wie Staub beim Bodenbearbeiten, Mähdreschen, Heuwerben, Getreidetrocknen oder Staub aus der Tierproduktion [1]. Es handelt sich hierbei um luftfremde Stoffe, die aus dem bei den jeweiligen Produktionsabschnitten behandelten Material entstehen oder freigesetzt werden. Die Untersuchungen wurden nun auf Stoffgruppen ausgeweitet, die in die Produktion eingebracht werden, nämlich die Pflanzenbehandlungs- und Schädlingsbekämpfungsmittel.

Teilchenförmige feste und flüssige Fremdstoffe in der Luft können zu einer Beeinträchtigung der Leistung und des Wohlbefindens sowie zu einer Gefährdung der Gesundheit führen. Ob solche Wirkungen auftreten, hängt im wesentlichen von der am Arbeitsplatz auftretenden Menge und der stofflichen Zusammensetzung ab. Bei den in die Produktion eingebrachten Stoffen wie den Pflanzenbehandlungsmitteln ist die stoffliche Zusammensetzung bekannt. Fragen der Belastung des Arbeitsplatzes konzentrieren sich dann in erster Linie auf die auftretende Menge. Dies ist auch der Grund, warum das Gesamtgebiet an dieser Schnittstelle gegliedert wurde.

Pflanzenbehandlungs- und Schädlingsbekämpfungsmittel werden in feinverteilter Form, vorwiegend als flüssige, aber auch als feste Teilchen mit Hilfe von Spritz- und Sprühgeräten an die Pflanzen herangebracht oder verteilt. Nach den geltenden Rechtsvorschriften, Pflanzenschutzgesetz vom 10.5.1968 (BGBl I, S. 352) in der Fassung der Bekanntmachung vom 2.10.1975 (BGBl I, S. 2591), geändert durch das Gesetz vom 16.6.1978 (BGBl I, S. 749), dürfen nur solche Pflanzenbehandlungs- und Schädlingsbekämpfungsmittel vertrieben und ausgebracht werden, die von der Biologischen Bundesanstalt Braunschweig im Einvernehmen mit dem Bundesgesundheitsamt zugelassen sind. Durch diese Zulassung ist die chemische Zusammensetzung bekannt. Hiervon abgeleitet, gibt die Gebrauchsanweisung u.a. Hinweise auf Gefahren für Mensch, Tier und Pflanze sowie auf Schutzmaßnahmen für den Anwender.

Über die Belastung der Beschäftigten durch Wirkstoffe beim Ausbringen von Pflanzenbehandlungsmitteln findet man im USA-Schrifttum zahlreiche Hinweise [2, 3]. Wenig bearbeitet dagegen sind die grundlegenden physikalischen Vorgänge, die zur Arbeitsplatzbelastung führen. Daher sind mit dem derzeitigen Stand der Kenntnisse auch keine Vorausberechnungen oder Prognosen über Belastungen bei vorgegebenen Arbeitsbedingungen möglich.

Die Aufgabe dieser und der noch laufenden Arbeit besteht darin, einen Beitrag zur Schließung dieser Wissenslücke zu liefern. Insbesondere interessieren die Einflußfaktoren der Arbeitsplatzbelastung durch Wirkstoffe der Pflanzenbehandlungsmittel und ihre Abhängigkeiten. Hauptziel ist die Erarbeitung von Grundlagen für Belastungsprognosen. – In Verbindung mit den arbeitsmedizinischen Erkenntnissen über die Wirkung von Pflanzenbehandlungsmitteln auf den Menschen lassen sich dann Aussagen über Gefährdungen oder notwendige Schutzmaßnahmen machen –. Dieser erste Bericht beschränkt sich auf das Spritzen mit fahrzeuggetragenen Geräten.

2. Wirkungsablauf, Begriffe und Grundsätzliches zum Vorgang der Arbeitsplatzbelastung beim Ausbringen von Pflanzenbehandlungs- und Schädlingsbekämpfungsmitteln

2.1 Wirkungsablauf und Begriffe

Pflanzenbehandlungs- und Schädlingsbekämpfungsmittel [4] werden sowohl in flüssiger als auch in fester Form durch Spritzen oder Sprühen ausgebracht. Hierbei ist eine Belastung des Arbeitsplatzes

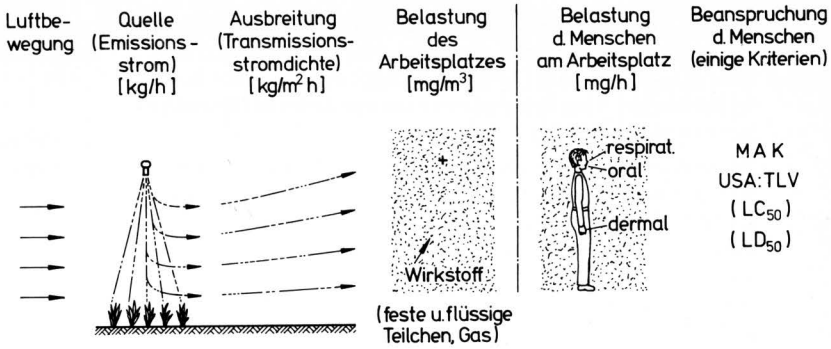


Bild 1. Wirkungsablauf hinsichtlich der Belastung durch Wirkstoffe beim Ausbringen von Pflanzenbehandlungsmitteln.

nur möglich, wenn die Abdrift [5] auf diesen Platz gerichtet ist. Den dabei vorliegenden Wirkungsablauf veranschaulicht **Bild 1**. Die Quelle ist charakterisiert durch die technische Bauart, den Mengenstrom und die Art der Spritzflüssigkeit (Emissionsstrom). Durch Luftbewegungen im Bereich der Quelle (Wind relativ zur Quelle) werden feine Teilchen, die nicht an die Pflanzen und den Boden gelangen, fortgetragen (Abdrift, Ausbreitung, Transmission). Dieser Vorgang verursacht abhängig von der relativen Windrichtung eine bestimmte Wirkstoffmenge am Arbeitsplatz, die sogenannte Arbeitsplatzbelastung. Sie wird im allgemeinen über den Wirkstoff- bzw. Schadstoffgehalt, die Masse des Wirkstoffes in der Volumeneinheit der Luft (mg/m^3), gekennzeichnet.

Im Rahmen der gestellten Aufgabe nimmt diese Arbeitsplatzbelastung als Folge der Emission und Transmission eine zentrale Stellung ein. Die sich aus der Arbeitsplatzbelastung ergebende Frage nach der Belastung des Menschen am Arbeitsplatz und seiner Beanspruchung führt in die Arbeitsmedizin.

Der Übergang der Stoffe auf den Menschen erfolgt im wesentlichen über drei Wege, nämlich respiratorisch, oral und dermal. Es gilt zu ermitteln, welche Wirkstoffmengen auf diese Weise in den Körper oder an die Körperoberfläche gelangen. Diese Vorgänge können in der vorliegenden Arbeit nur hinsichtlich der diesen Transport beeinflussenden physikalischen Parameter angesprochen werden. Die Bestimmung oder Abschätzung der Beanspruchung, die die in den Körper eingedrungenen Stoffe hervorrufen, ist Aufgabe der Medizin [4], ebenso wie auch Aussagen über die zulässigen oder anzustrebenden Grenzbelastungen. Hieraus lassen sich wesentliche Kriterien für technisch zu ergreifende Maßnahmen ableiten.

2.2 Erklärungsmodell zur Arbeitsplatzbelastung durch Wirkstoffe bei einer fahrzeuggetragenen Spritzbalkenquelle

Die Struktur der Quelle, also Menge, Zustand und Bewegung der Spritzflüssigkeit mit den darin verteilten Wirkstoffen, ergibt sich aus der Bauart der Düsen, ihrer Anordnung, dem Spritzdruck, den Eigenschaften der Spritzflüssigkeit, der Wirkstoffmenge in der Spritzflüssigkeit und dem Luftzustand.
Bei jeder Zerstäubung fällt ein Kollektiv von Tropfengrößen an, beim Spritzen z.B. mit den sehr oft verwendeten Düsen der Type FU 11,5/120° Teilchen zwischen etwa 1 und 400 μm mit einer mittleren Teilchengröße von etwa d_{D50} = 280 μm[2]. Die großen Tropfen erreichen fast ausnahmslos die Pflanzen und den Boden, wo sie größtenteils anhaften. Von Ausnahmen abgesehen, besteht fast immer eine Relativbewegung der Luft zum Spritzbalken, im wesentlichen parallel zur Erdoberfläche (unterhalb des Spritzbalkens überlagert sich noch der induzierte Luftstrom). Hierdurch werden sehr feine Teilchen mit dem Luftstrom zwischen Spritzbalken und Boden fortgetragen. Größe und Bewegung der mitge-

[2] Erläuterung der verwendeten Formelzeichen am Schluß der Arbeit

führten Teilchen ergeben sich aus dem angreifenden Kräftesystem, das aus Schwer-, Auftriebs-, Trägheits- und den Schleppkräften der Luft gebildet wird. Die theoretischen Grundlagen zur Beschreibung der Vorgänge sind identisch mit denen des Querstromsichters im Schwerefeld.

Bei einer fahrzeuggetragenen Spritzbalkenquelle sind somit hinsichtlich der Transmission (Vorgänge zwischen Quelle und Akzeptor) zwei Anteile zu unterscheiden. Der größere Anteil des Transmissionsstromes wird dem Produktionsziel entsprechend appliziert, der möglichst klein zu haltende andere Anteil bildet die Abdrift (Abdrift- oder Ausbreitungsstrom) und ist für die Arbeitsplatzbelastung relevant.

Bei Ausbreitungsbeginn ist nur der Querschnitt $b \cdot h_B$ unterhalb des Spritzbalkens mit flüssigen Teilchen in unterschiedlicher Verteilung belegt. Mit der Bewegung in Strömungsrichtung gelangen Teilchen aus diesem Querschnitt durch turbulente Diffusion und Strömungsumlenkungen auch in den Bereich $h > h_B$. Auch seitlich wird die belegte Fläche vergrößert. Abhängig von Wind- und Fahrtrichtung kann der Ausbreitungsstrom den Arbeitsplatz überdecken.

Dieses nur in den Grundsätzen skizzierte Modell zeigt, daß die an einen Arbeitsplatz gelangenden Wirkstoffmengen abhängen von der Größenverteilung der erzeugten Tropfen, ihrer räumlichen Verteilung unter dem Spritzbalken, der Tropfenbewegung, der Wirkstoffmenge in den Tropfen, der mittleren Relativgeschwindigkeit der Luft gegenüber dem Spritzbalken nach Größe und Richtung, dem Turbulenzgrad der Luftströmung, der Gegenwart von Körpern im Ausbreitungsstrom und der geometrischen Zuordnung von Spritzbalken und Fahrerplatz. Neben den genannten Einflüssen sind noch weitere Erscheinungen zu berücksichtigen, so die Tatsache, daß flüssige Teilchen nach dem Austritt aus der Düse während der Transmission durch Verdunstung an Masse verlieren. Pflanzenbehandlungsmittel können somit außer in flüssiger Form auch in gasförmigem oder festem Zustand an den Arbeitsplatz gelangen.

Neben der geschilderten primären Quelle sind auch sekundäre zu berücksichtigen. So können von schon gespritzten Flächen Pflanzenbehandlungsmittel an die Luft abgegeben werden, ebenso von Flächen des Spritzfahrzeuges, der Kleidung und anderen Gegenständen. Auch eine Belastung durch direkten Kontakt mit diesen Flächen oder den Spritzmitteln ist möglich. Diese Kontaktbelastung wird nicht behandelt.

Wie angedeutet, kann eine Belastung des Fahrerplatzes durch die Spritzbalkenquelle nur auftreten, wenn der Ausbreitungsstrom dorthin gerichtet ist. Die Winkelbereiche α, für die dies bei verschiedener Fahrzeugbauart und Anordnung des Spritzgerätes im Grundsatz möglich ist, zeigt **Bild 2**. Bestimmt wird der gefährdete Bereich neben dem Windeinfallswinkel α, durch die Spritzbreite b und den horizontalen Abstand zwischen Spritzbalken und Fahrerplatz.

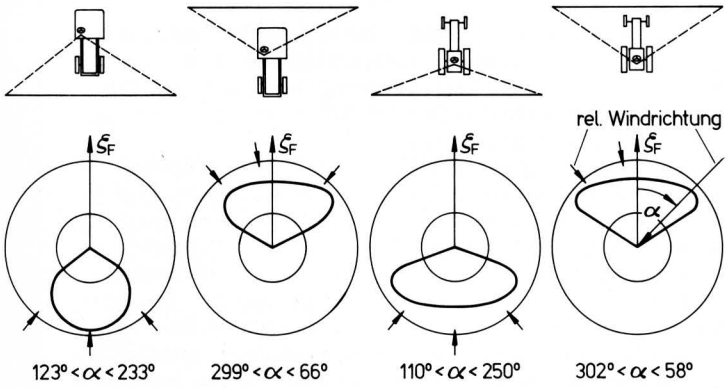


Bild 2. Belastung ζ_F in Abhängigkeit von der relativen Windrichtung für verschiedene Fahrzeuge mit Front- und Heckanbau des Spritzgerätes; Spritzbreite b = 10 m.

3. Versuchsaufbau, Versuchsdurchführung und Meßtechnik

Die Untersuchungen zur Beantwortung der anstehenden Fragen erfolgen auf vier Wegen.

3.1 Messen der Belastung des Arbeitsplatzes beim Ausbringen (Spritzen) von Pflanzenbehandlungsmitteln in landwirtschaftlichen Betrieben. Ziel ist die Ermittlung von Belastungskollektiven.

3.2 Ermitteln der Wirkstoffmenge im Ausbreitungsstrom in Abhängigkeit von der Struktur der Quelle und verschiedenen Ausbreitungsbedingungen in einem Windkanal. Diese Versuche dienen dazu, die grundsätzlichen Zusammenhänge zu klären und unterschiedliche Meßmethoden unter definierten Bedingungen zu vergleichen.

3.3 Messen der Abhängigkeit der Belastung am Fahrerplatz von den wirkenden Einflußfaktoren beim Ausbringen von Pflanzenbehandlungsmitteln unter idealisierten und praxisnahen Bedingungen mit Hilfe eines Versuchsstandes. Diese Versuche beinhalten eine Erweiterung der Windkanalmessungen durch Einbeziehen meteorologischer Turbulenzen und den Übergang zu realen Spritzgeräten einschließlich der Fahrzeuge.

3.4 Messungen mit Spritzgeräten unter praktischen Bedingungen, aber gezielt gewählten Arbeitsabläufen wie z.B. konstanter Windeinfallswinkel.

3.1 Messen des Wirkstoffgehaltes in der Luft am Fahrerplatz bei Spritzarbeiten in landwirtschaftlichen Betrieben

Die Messungen erfolgen bei Spritzarbeiten durch Lohnunternehmen in landwirtschaftlichen Betrieben, um die unter realen Bedingungen auftretenden Belastungen zu ermitteln.

Die hierzu erforderlichen meßtechnischen Methoden sind im Grundsatz identisch mit denen für feste Teilchen, d.h. es wird eine bestimmte Luftmenge im Atembereich entnommen und die in diesem Luftvolumen enthaltene Masse an Pflanzenbehandlungsmitteln (an Wirkstoffen) festgestellt. Die Bestimmung der Masse erfolgt meist über eine Abscheidung der Pflanzenbehandlungsmittel mit anschließender Analyse. Die für Pflanzenbehandlungsmittel geeigneten Abscheide- und Analysenmethoden und insbesondere die dabei gemachten Erfahrungen sind in dem von *R.E. Lee* herausgegebenen Buch umfassend beschrieben [2].

Zur Abscheidung werden im wesentlichen zwei Methoden eingesetzt, nämlich die Ab- und die Adsorption. Zur Absorption wird die Luftprobe durch eine geeignete Flüssigkeit geleitet (Waschflaschen, Impinger), zur Adsorption durch poröse Schichten beispielsweise aus Aktivkohle. Diese Verfahren sind selektiv, d.h. sie müssen auf das verwendete Pflanzenbehandlungsmittel und auch auf die sich anschließende Analyse abgestimmt sein.

Um von diesen stoffspezifischen Bedingungen weniger abhängig zu sein, insbesondere aber im Hinblick auf einen möglichst großen Luftdurchsatz, wurde die wegen des erhöhten Aufwandes weniger gebräuchliche Abscheidung mit Hilfe einer Kältefalle verwendet. Die gesamte Probenahmeeinrichtung ist in **Bild 3** dargestellt [6]. Die am Arbeitsplatz entnommene Luftprobe wird durch eine mit flüssigem Sauerstoff gekühlte Falle geleitet. Dadurch werden die entstehenden oder vorhandenen festen Teilchen mit oder aus den Pflanzenbehandlungsmitteln und auch die auskristallisierte Feuchte der Luft in der Kühlschlange, spätestens jedoch in dem nachgeschalteten Filter abgeschieden. Die in der anschließend verschlossenen Falle befindliche Probe wird zur Analyse durch Lösungsmittel in mehreren Spülvorgängen entnommen. Die analytischen Arbeiten [7, 8], meist mit Gaschromatographen, wurden vom Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde der FAL durchgeführt oder betreut.

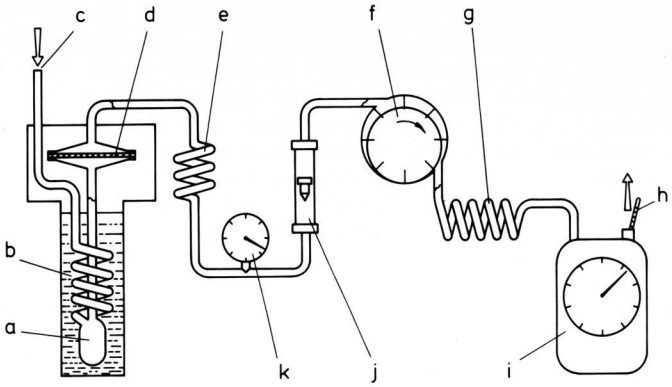


Bild 3. Probenahmeeinrichtung zum Messen der Wirkstoffkonzentration im Atembereich am Arbeitsplatz; Luftdurchsatz 2,2 m^3/h.

a Kältefalle
b flüssiger Sauerstoff
c Probenlufteintritt
d Filter
e Verbindungsschlauch zur Pumpe und zum Wärmeaustauscher
f Flügelzellenpumpe
g Wärmeaustauscher
h Thermometer
i Gasuhr
j Rotameter
k Manometer

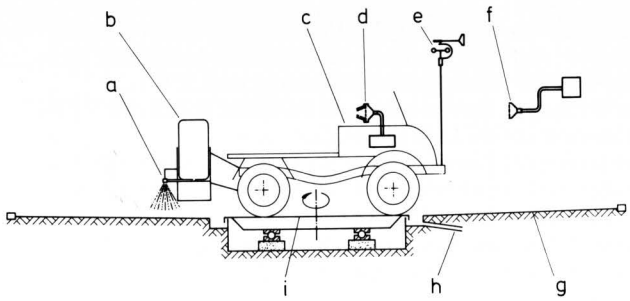


Bild 4. Versuchsstand zum Messen der Arbeitsplatzbelastung.

a Spritzbalken
b Behälter für Spritzflüssigkeit mit Pumpe (verlegbar)
c Spritzfahrzeug oder Sprühgerät
d Probenehmer, z.B. Filterkopf mit Glasfaserfilter
e Einrichtung zum Messen von rel. Windrichtung, rel. Windgeschwindigkeit und Turbulenzgrad
f Filter zum Messen der Grundbelastung (in 15 m Abstand)
g Auffangfolie (Wanne)
h Kanal mit Pumpe und Filter zum Rückgewinnen der Spritzflüssigkeit
i Drehtisch

Man kann davon ausgehen, daß die Abscheidegüte der Falle von dem Dampfdruck des verwendeten Wirkstoffes, der Wirkstoffmenge, der Luftfeuchtigkeit, der Lufttemperatur, dem Luftdurchsatz und der Feinheit der Teilchen abhängt. Es wurde daher in Laborversuchen die Abscheidegüte unter Veränderung dieser Parameter untersucht. Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse erfolgt die Kalibrierung unter praxisnahen Bedingungen. Mit Hilfe einer Zweistoffdüse wird Spritzflüssigkeit in der für die Anwendung empfohlenen Zusammensetzung im Einströmrohr der Falle so zerstäubt, daß die Tropfengröße der am Arbeitsplatz entspricht. In die Abscheidegüte geht auch die Genauigkeit der Analytik mit ein, so daß beide Größen zusammengefaßt werden. Es ergab sich, daß man auch bei Lindan [9] im Mittel die von *Ellwardt* [7] ermittelten Wirkstoffanteile wiederfindet, der für die von ihm untersuchten Stoffe eine Abscheidegüte von 76 ± 3 % angibt. Mit diesem Befund wurden die Analysenergebnisse auf 100 % korrigiert.

3.2 Untersuchungen in einem Windkanal

Da grundlegende Abhängigkeiten mit der erforderlichen hohen Genauigkeit bei Versuchen in der Praxis und in praxisnahen Versuchen nicht oder nur mit beträchtlichem Aufwand zu messen sind, wurde ein Windkanal mit 2,8 m lichter Höhe und für eine Spritzbreite von 1,50 m erstellt. Der Kanal ist als Druckkanal aufgebaut. Auf der Ansaugseite sind 6 Ventilatoren angeordnet, denen im Abstand von etwa 2 m ein Gleichrichter und ein Siebgewebe mit 2 mm Maschenweite nachgeschaltet sind. Hierdurch wird eine für die Versuche ausreichend gleichmäßige Luftgeschwindigkeitsverteilung erreicht. Der Spritzbalken mit 3 Düsen ist 3 m hinter dem Siebgewebe angeordnet und die Meßstelle wiederum in 3,50 m Abstand zum Spritzbalken. Die Luftgeschwindigkeit läßt sich im Bereich von 1–5 m/s verändern. Der Turbulenzgrad beträgt bei 2,2 m/s etwa 3,5 %.

3.3 Untersuchungen mit Hilfe eines Versuchsstandes

Bei dem Versuchsstand, **Bild 4**, handelt es sich um ortsfest aufgestellte handelsübliche Spritzeinrichtungen in verschiedener geometrischer Gestaltung. Das Bild zeigt einen Unimog Typ G 65, ausgerüstet mit einem Spritzbalken von 7,5 m oder 10 m in Heckanbau (auch Frontanbau ist möglich) und einem 400 *l*- oder 600 *l*-Behälter. Mit der Meßeinrichtung e lassen sich der Windeinfallswinkel, die relative Windgeschwindigkeit und der Turbulenzgrad in der Höhe h = 4 m messen. Der Probenehmer ist am Beifahrerplatz angeordnet. Das Fahrzeug, oder andere Anordnungen mit Spritzgeräten, befindet sich auf einem Drehtisch, so daß man beliebige Windeinfallswinkel einstellen und durch Nachführen konstant halten kann.
Auch Sprühgeräte lassen sich auf dem Drehtisch aufstellen.

Für Messungen in einem ungestörten Ausbreitungsstrom wird das Fahrzeug durch einen Tragrahmen für Spritzbalken und Probenehmer ersetzt [6]. Die Probenehmer befinden sich seitlich neben dem Rahmen. Behälter und Pumpe sind etwa 15 m vom Versuchsstand entfernt aufgestellt. Die Versuchsbedingungen entsprechen im Prinzip denen im Windkanal, sie lassen sich aber nicht nach Wunsch vorgeben. Abweichend sind das Geschwindigkeitsprofil und der Turbulenzgrad.

3.4 Feldmessungen mit Versuchseinrichtungen

Bei den Meßfahrzeugen handelt es sich um handelsübliche Schlepper und Spritzgeräte mit Meßeinrichtungen nach Bild 3 und 4. Damit lassen sich die Versuche nach Abschnitt 3.1; 3.3 und 3.4 mit den gleichen Einrichtungen durchführen, wodurch die Vergleichbarkeit erleichtert wird.
Für viele Versuche ist das Fahrzeug so zu fahren, daß ein vorgegebener Windeinfallswinkel und eine bestimmte relative Windgeschwindigkeit eingehalten werden. Hierzu werden entsprechende Pflanzenbestände angelegt oder ausgewählt.

3.5 Meßtechnik

Soweit es die Methode zuläßt, wird als Spritzflüssigkeit eine 10 %ige Kochsalzlösung verwendet, ohne damit diesen Referenzstoff als den vorteilhaftesten zu erklären[3]. Dieser Schritt vereinfacht die Versuche unbeschadet der geringeren Umweltprobleme auch insofern, als eine quantitative Abscheidung des "Wirkstoffes" mit Glasfaserfiltern möglich ist und die Massebestimmung direkt durch Auswiegen erfolgen kann. (Durchgeführt im Klimaraum bei $\varphi = 50$ % und $\vartheta = 20$ °C). Notwendig ist es dabei, die Grundbelastung der Luft bei jeder Messung gleichzeitig zu ermitteln. Aus Gründen der Genauigkeit wird angestrebt, daß die Grundbelastung 10 % der NaCl Belastung nicht überschreitet.

Die Filterköpfe sind so ausgebildet, daß eine nahezu isokinetische Probenahme möglich ist. Der Einströmkanal ist mit Filterpapier ausgekleidet, um auch die dort abgeschiedenen Teilchen zu erfassen.

---

[3] Für Belags- und Abdriftuntersuchungen haben sich z.B. einige Farbstoffe wie Brillant-Sulfoflavin sehr bewährt [2].

Werden im Windkanal, auf dem Versuchsstand oder im Feldversuch handelsübliche Pflanzenbehandlungsmittel eingesetzt, so erfolgt die Probenahme mit der Einrichtung nach Bild 3.
Die Temperatur der Spritzflüssigkeit wird bei Bedarf durch Wärmezu- oder -abfuhr konstant gehalten.
Das Messen der Teilchengrößenverteilung im Ausbreitungsstrom geschieht mit dem Particle-Size-Analyzer HC 70 System Karlsruhe der Fa. Gertsch Zürich [10]. Dieses etwas modifizierte und mit einem Rechner gekoppelte Gerät wird in Abständen mit einer bekannten Tropfengrößenverteilung überprüft.

Die absolute Genauigkeit dieser mit Streulicht arbeitenden Meßeinrichtung liegt nach Überprüfungen mit einem *Berlund-Liu* Tropfengenerator und lichtmikroskopischer Tropfengrößenanalyse bei ± 20 %. Dieser Bereich ergibt sich vor allem durch die Genauigkeit der Kalibrierung der Streulichtimpulse (von der Herstellerfirma gelieferte Eichkurve), Störimpulse z.B. durch Sekundärstreulicht (wirken sich nur im sehr feinen Teilchengrößenbereich aus) und die Grundbelastung. Letztere wird vor und nach jeder Messung ermittelt und so berücksichtigt. Die eigentlich erforderliche Zeitgleichheit ist wegen der örtlichen Bedingungen nicht möglich.

3.6 Meßgrößen

Die verwendeten Meßgrößen und die dafür benutzten Formelzeichen sind am Schluß dieses Aufsatzes zusammengestellt. Zu erläutern ist noch die relative Wirkstoffkonzentration ζ^*. Bei unveränderter Struktur der Quelle und konstanten Ausbreitungsbedingungen ändert sich die Belastung direkt proportional mit dem Emissionsstrom. Es ist daher für viele Zwecke nützlich, von einer relativen Belastung ζ^* auszugehen, die sich bei einem "normierten" Emissionsstrom $\dot{E}_{w1}$ = 1 kg/h je m Spritzbreite ergibt. Die reale Belastung am Fahrerplatz errechnet sich unter der Voraussetzung sonst konstanter Bedingungen zu $\zeta_F = \zeta_F^* \cdot \dot{E}_{w1}$ mit dem aktuellen Wert von $\dot{E}_{w1}$.
Diese Gleichung ist als eine reine Mengenbeziehung aufzufassen. Verändern sich mit $\dot{E}_{w1}$ auch physikalische Einflußgrößen – mit der Wirkstoffkonzentration kann sich beispielsweise die Oberflächenspannung und damit die Tropfengrößenverteilung ändern – so ist die dadurch bedingte Wirkung durch von der Gleichung getrennte Funktionen zu erfassen.
Die Aufgabe der durchzuführenden Messungen läßt sich wie folgt zusammenfassen:

$$\zeta_F^* = f\left\{ a, v_{rw}, h_B, p, \dot{E}_{w1}, \varphi, s_A, b, d_{D50}, \text{Fahrzeugbauart}, \text{Pflanzenbestand, Wirkstoffeigenschaften} \right\}$$

4. Versuchsergebnisse

4.1 Wirkstoffbelastung am Fahrerplatz beim Ausbringen von Pflanzenbehandlungsmitteln durch Spritzen in der Produktion

Die auf Fahrzeugen von Lohnunternehmen am Arbeitsplatz mit der Anordnung nach Bild 3 genommenen Proben und ihre analytische Untersuchung durch *Ellwardt* [7] ergeben Belastungen, die in **Tafel 1** dargestellt sind. Dieses Belastungskollektiv kann wegen der noch recht geringen Anzahl von Meßwerten nur erste Hinweise auf die Größenordnung möglicher Belastungen geben und dies auch nur für die eingesetzten Mittel.

Um weitergehende Abschätzungen vornehmen zu können, sind in Tafel 1 auch die relativen Wirkstoffkonzentrationen ζ^* angegeben. Für diese Bezugsgröße liegt der 50 %-Wert der Summenhäufigkeit bei 32 (μg/m^3)/(kg/m h).

Unter der Annahme, daß sich die Belastung gemäß den mit Abschnitt 3.6 gemachten Voraussetzungen mit der Konzentration der Wirkstoffe in der Spritzflüssigkeit verändert, lassen sich auch für andere Pflanzenbehandlungsmittel Belastungsprognosen mit vertretbarer Genauigkeit geben.

Hätte man bei den in Tafel 1 aufgeführten Arbeiten jeweils Parathion mit $\dot{E}_{w1}$ = 0,5 kg/m h ausgebracht, dann läge mit den für eine solche Annahme notwendigen Voraussetzungen die mittlere Belastung bei ζ_F = 16 μg/m^3 und die maximale bei 53 μg/m^3, d.h. der MAK-Wert von 100 μg/m^3 für Äthyl-Parathion würde in keinem Fall erreicht[4]. Erst bei $\dot{E}_{w1}$ = 1kg/m h, einem für Parathion weit überhöhten Wert, könnten Belastungen im Bereich des Grenzwertes auftreten. Solche Prognosen für andere Pflanzenbehandlungsmittel sind nur dann zulässig, wenn die mit Tafel 1 mitgeteilten Ergebnisse und Bedingungen als hinreichend repräsentativ anzusehen sind.

In Ergänzung zu Tafel 1 interessieren noch zwei Exstremwerte, die in der Praxis nur kurzzeitig oder selten auftreten. Es sind dies die Spitzenbelastung und die höchste Dauerbelastung (100 %-Wert des Belastungskollektivs). Der zuerst genannte Wert tritt für die betrachtete Bauart z.B. bei a = 180° auf und der andere bei einer Folge von Fahrten mit a = 0° und a = 180°. Um Hinweise zu erhalten, wurden entsprechende Versuche mit dem Fahrzeug nach Abschnitt 3.4 durchgeführt. Die Ergebnisse für Lindan mit $\dot{E}_{w1}$ = 0,056 kg/m h und mit a = 180° zeigt **Tafel 2**. Die mögliche maximale Dauerbelastung liegt bei 50 % der in Tafel 2 genannten Werte.

Der MAK-Wert für Lindan von 500 μg/m^3 wird bei den gegebenen Bedingungen weit unterschritten. Erst bei einem Emissionsstrom von etwa $\dot{E}_{w1}$ = 2,2 kg/m h, der bei einer Fahrgeschwindigkeit von 12 km/h zu einem Aufwand von fast 2 kg/ha führt (empfohlener Wert für den Aufwand < 0,1 kg/ha), wird der MAK-Wert erreicht.

4.2 Wirkstoffbelastung an einer Referenzstelle im Abdriftstrom (Windkanal)

In Anlehnung an die geometrischen Verhältnisse beim Spritzen mit einem Unimog wurden alle Messungen im Windkanal in einer vertikalen Ebene mit einem horizontalen Abstand von 3,5 m zum Spritzbalken durchgeführt.

4.2.1 Konzentrationsverteilung über der Höhe

Den Verlauf der Wirkstoffkonzentration und der Teilchengrößenverteilung über der Höhe zeigen **Bild 5 und 6**. Das Ergebnis erklärt sich aus den grundsätzlichen in Abschnitt 2.2 diskutierten Vorgängen. Der relative Luftstrom hat bezüglich der entstehenden Tropfen die Wirkung eines Schwerefeld-Querstromsichters [11]. So ist verständlich, daß der Anteil der Wirkstoffe mit abnehmender Höhe zunächst ansteigt und nach einem Maximum wieder abfällt. Die Konzentration im Bereich $h > h_B$ liegt, im Verhältnis gesehen, niedrig. Dies erklärt sich daraus, daß Teilchen in diesen Bereich nur durch turbulente Diffusion gelangen können (die molekulare Diffusion darf man vernachlässigen).

Auch die Teilchengrößenabnahme für $h > h_B$ erklärt sich aus der turbulenten Diffusion, die Teilchen entgegen der Schwerkraft nach oben transportiert. Das unterschiedliche Ergebnis hinsichtlich der Anzahlverteilung (d_{N50}) bei Wasser und einer 10 %igen NaCl-Lösung ist vorwiegend auf Verdunstungsvorgänge zurückzuführen. Hierdurch können sehr feine Wassertropfen verschwinden. Bei der Lösung dagegen entstehen feste Teilchen.

---

[4] Nach [3] wurde in der Zuluft zur Fahrerkabine beim Ausbringen von Methyl-Parathion (Baumwolle, Sojabohne) ein mittlerer Wirkstoffgehalt von 22,6 μg/m^3 gemessen.

Anwendung	Präparat	Wetterbeding. Wind-richt. °	Wetterbeding. Wind-geschw. m/s	Arbeitsbedingung Fahrge-schw. v_F km/h	Arbeitsbedingung Spritz-breite b m	Arbeitsbedingung Spritzbal-kenhöhe h_B m	Arbeitsbedingung Wirkstoff-Aufwand kg/ha	Quelle Wirkstoff	Quelle Emissions-strom E_{W1} kg/m h **	Belastung am Fahrerplatz ζ_F µg/m³	Belastung am Fahrerplatz ζ_F^* µg/m³ / kg/m h
Unimog und Heckanbau, Düsen FU 11,5/120° – Lohnunternehmen 1979											
W.-Roggen	DPT	270	1	12,0	13,0	0,80	*1,36	*Dichlorprop	1,412	176,19	102,91
"	"	270	1	12,0	13,0	0,80	*1,36	* "	1,720	59,40	34,34
W.-Weizen	"	270	1	12,0	13,0	0,80	*1,36	* "	1,579	126,31	80,00
"	"	270	1	12,0	13,0	0,80	*1,36	* "	1,590	118,93	74,80
W.-Roggen	"	210	2	12,0	13,0	0,80	*1,36	* "	1,594	136,41	85,58
S.-Gerste	"	200	4	12,0	13,0	0,80	*1,36	* "	1,628	100,06	61,46
Hafer	"	200	4	12,0	13,0	0,80	*1,36	* "	1,798	169,35	94,19
S.-Gerste	"	140	5	12,0	13,0	0,80	*1,36	* "	1,523	64,26	42,19
"	"	140	5	12,0	13,0	0,80	*1,36	* "	1,623	101,05	61,92
"	"	140	5	12,0	13,0	0,80	*1,36	* "	1,742	65,69	37,71
Rüben	Betanal	240	5	12,3	13,0	0,70	0,47	Phenmedipham	0,453	3,00	6,62
"	"	240	5	12,3	13,0	0,70	0,47	"	0,489	6,60	13,50
"	"	240	4	12,3	13,0	0,70	0,47	"	0,490	4,40	8,98
"	"	240	4	12,3	13,0	0,70	0,47	"	0,518	0,12	0,23
"	"	240	4	12,3	13,0	0,70	0,47	"	0,493	0,64	1,30
"	"	230	3	11,5	13,0	0,70	0,47	"	0,534	3,80	7,12
"	"	230	3	11,5	13,0	0,70	0,47	"	1,128	7,00	6,21
"	"	230	3	12,3	13,0	0,70	0,47	"	0,511	4,50	8,81
"	"	230	3	12,3	13,0	0,70	0,47	"	0,628	0,90	1,43
"	"	230	3	11,5	13,0	0,70	0,47	"	0,485	10,20	21,03
Kartoffel	Maneb	130	1	10,8	13,0	1,00	1,60	Maneb	1,971	10,10	5,12
"	"	300	4	11,5	13,0	1,40	1,76	"	1,916	38,50	20,09
"	"	300	3	11,5	13,0	1,40	1,76	"	1,937	173,60	89,62
Unimog und Frontanbau, Düsen FU 11,5/120° – Lohnunternehmen 1979											
Saatbeet	Avadex	130	8	6,1	10,0	0,75	1,20	Diallat	0,589	4,35	7,39
"	"	130	8	6,1	10,0	0,75	1,20	"	0,629	2,43	3,86
"	"	130	4	6,1	10,0	0,75	1,20	"	0,665	5,06	7,61
"	"	130	3	6,1	10,0	0,75	1,20	"	0,618	7,48	12,10
"	"	130	3	6,1	10,0	0,75	1,20	"	0,696	28,18	40,49
S.-Gerste	DPT	20	4	10,8	15,0	0,70	*1,36	*Dichlorprop	1,838	99,48	54,13
Kartoffel	Maneb	270	2	8,0	15,0	1,20	2,00	Maneb	2,160	117,30	54,31
"	"	250	2	8,0	15,0	1,20	2,00	"	1,974	209,90	106,33
"	"	250	2	8,0	15,0	1,20	2,00	"	1,953	84,30	43,16
"	"	260	3	8,0	15,0	1,20	2,00	"	1,929	54,90	28,46
"	"	230	1	8,3	15,0	1,20	2,00	"	1,977	76,30	38,59
"	"	230	1	8,3	15,0	1,20	2,00	"	2,161	119,20	55,16

* Wirkstoffanteil im Präparat nach Angaben des Herstellers
** Emissionsstrom ermittelt aus Meßwerten der ausgebrachten Menge und der Spritzdauer

Tafel 1. Belastung am Fahrerplatz beim Ausbringen von Pflanzenbehandlungsmitteln; Lohnunternehmen 1979, Belastungswerte gelten für die reine Spritzzeit.

Spritz-flüssigkeit	rel. Wind-geschw. v_{rw} m/s	Emissions-strom $\dot{E}_{W1}$ kg/m h	Belastung ζ_F µg/m³	Belastung ζ_F^* µg/m³ / kg/m h
	0,5–1,5	0,056	28	506
	0,5–1,5	0,056	22	390
0,025 %	0,5–1,5	0,056	21	376
Lindan	1,0–2,0	0,056	27	476
	1,5–2,5	0,056	25	444
	1,5–2,5	0,056	30	533

Tafel 2. Spitzenbelastung beim Ausbringen von Lindan mit Unimog Typ G 65; Spritzbalken b = 7,5 m, h_B = 0,6 m, Heckanbau, Düsen FU 11,5/120°, 3,5 bar, Probenahme am Beifahrerplatz, Boden mit Bewuchs < 10 cm, Rückenwind (α = 180°).

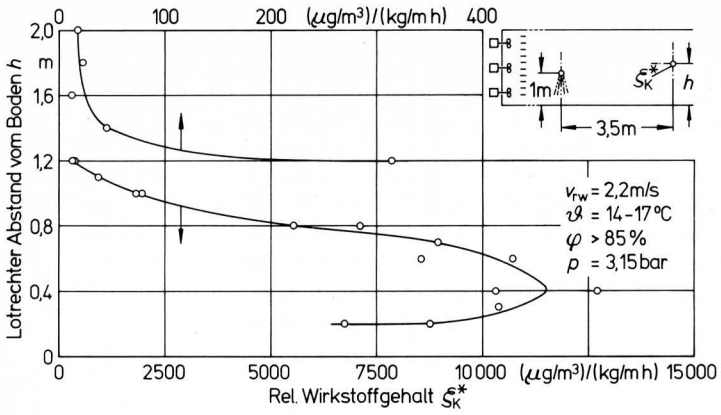


Bild 5. Relativer Wirkstoffgehalt in einer Ebene in 3,5 m Entfernung vom Spritzbalken in Abhängigkeit von der Höhe der Meßstelle; Messungen im Windkanal, Düsen FU 11,5/120°, 10 %ige NaCl-Lösung, $\dot{E}_{w1}$ = 23 kg/m h.

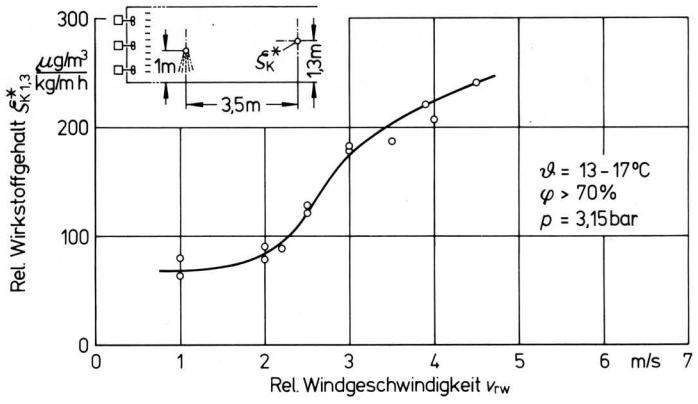


Bild 7. Relativer Wirkstoffgehalt in Abhängigkeit von der relativen Windgeschwindigkeit; Nicht erwähnte Bedingungen wie bei Bild 5.

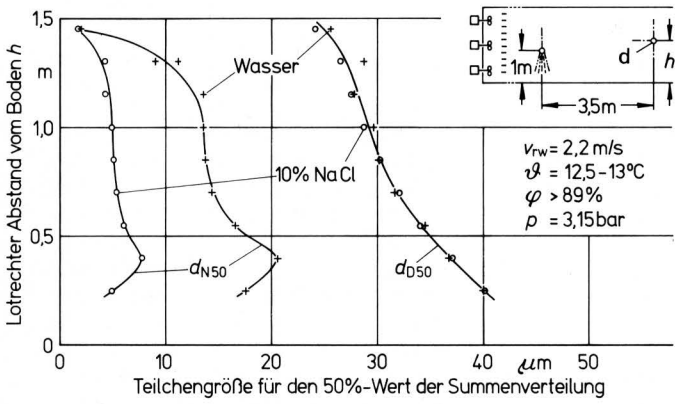


Bild 6. Teilchengröße d_{N50} und d_{D50} in Abhängigkeit von der Höhe der Meßstelle für Wasser und NaCl-Lösung; Bedingungen wie bei Bild 5.

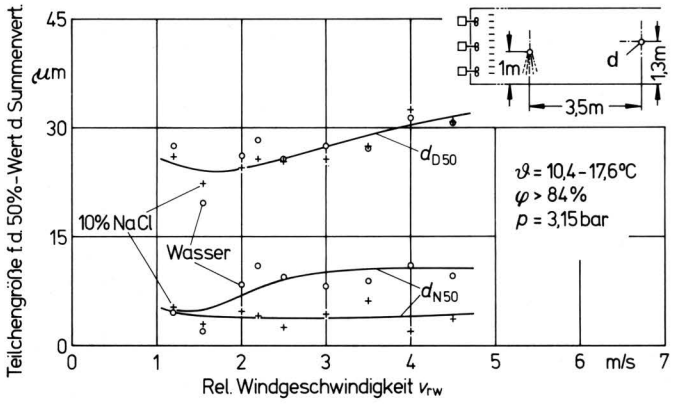


Bild 8. Teilchengröße d_{N50} und d_{D50} in Abhängigkeit von der relativen Windgeschwindigkeit für Wasser und NaCl-Lösung; Bedingungen wie bei Bild 5.

4.2.2 Einfluß der Windgeschwindigkeit

Die Konzentration ζ_K^* in einer Höhe von 1,3 m in Abhängigkeit von der relativen Windgeschwindigkeit zeigt **Bild 7**. Der Verlauf der Kurve weist auf die Auswirkung verschiedener sich überlagernder Vorgänge hin. So steigt mit der Relativgeschwindigkeit v_{rw} die Anzahl der mitgerissenen flüssigen Teilchen und damit die Konzentration. Auf der anderen Seite nimmt das für die Aufnahme der Teilchen angebotene Luftvolumen zu, womit eine Konzentrationsabnahme verbunden ist. Bei $v_{rw} < 1$ m/s macht sich weiter der induzierte Luftstrom bemerkbar.

Über die Größe der Teilchen an der Meßstelle in Abhängigkeit von der Relativgeschwindigkeit v_{rw} gibt **Bild 8** Auskunft. Der 50 %-Wert der Massenverteilung (d_{D50}) steigt mit der relativen Windgeschwindigkeit wegen zunehmender Schleppkräfte leicht an.

4.2.3 Abhängigkeit der Belastung vom Spritzdruck und der Düsenbauart

Die Struktur der Quelle wird in erster Linie von der Düsenbauart und dem Spritzdruck bestimmt. Auch Stoffeigenschaften haben eine Bedeutung. Über diese Zusammenhänge existiert ein breites Schrifttum [12, 13].

Um den Einfluß der Quelle auf die Belastung zu zeigen, wurden sowohl der Druck als auch die Düsenausführung verändert, **Bild 9 und 10.** Mit dem Spritzdruck ändert sich sowohl die Tropfengrößenverteilung als auch der Emissionsstrom. (Bei weitergehenden Betrachtungen ist auch noch der induzierte Luftstrom zu berücksichtigen).

Obwohl die Düse FU 10,8/120° wesentlich feiner zerstäubt als die Düse FU 11,5/120°, liegt die Belastung niedriger. Dies ist im unterschiedlichen Mengendurchsatz begründet. Für gleiche Wirkstoffströme – und nur unter solchen Bedingungen ist eine Bewertung hinsichtlich der Belastung möglich – ergibt sich jedoch ein anderes Ergebnis, Bild 10.

4.2.4 Einfluß des Emissionsstromes

Außer über den Druck oder die Düsenbauart läßt sich der Emissionsstrom auch über die Konzentration der Wirkstoffe in der Spritzflüssigkeit verändern. Den Einfluß eines in dieser Weise veränderten Emissionsstromes auf den Wirkstoffgehalt zeigt **Bild 11.** Im untersuchten Bereich liegen die Abweichungen von einer Geraden im Streubereich der Meßwerte, so daß man näherungsweise von einer linearen Abhängigkeit sprechen kann.

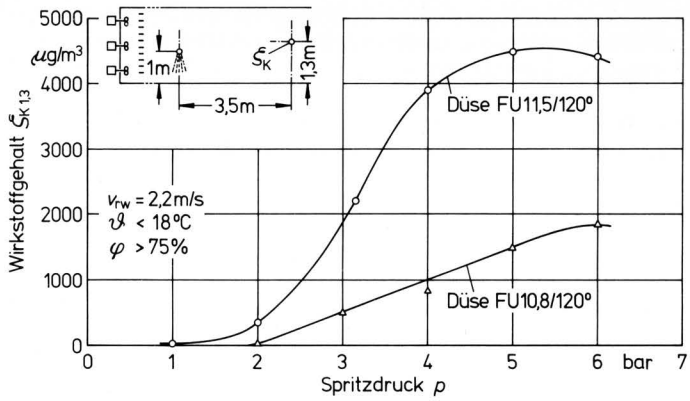


Bild 9. Wirkstoffgehalt in Abhängigkeit vom Spritzdruck bei verschiedenen Spritzdüsen, Messungen mit 10 %iger NaCl-Lösung im Windkanal.

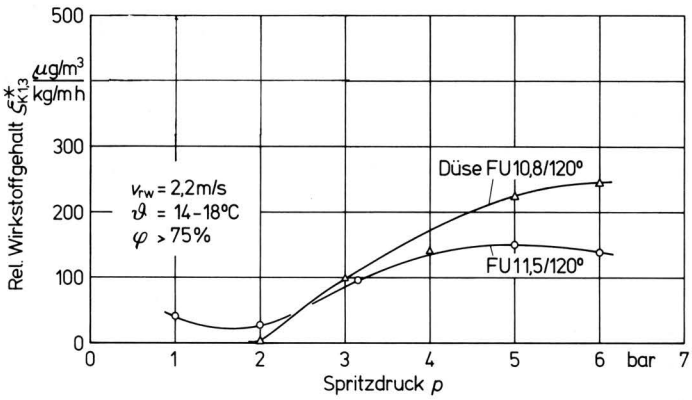


Bild 10. Relativer Wirkstoffgehalt in Abhängigkeit vom Spritzdruck bei verschiedenen Spritzdüsen, Messungen aus Bild 9.

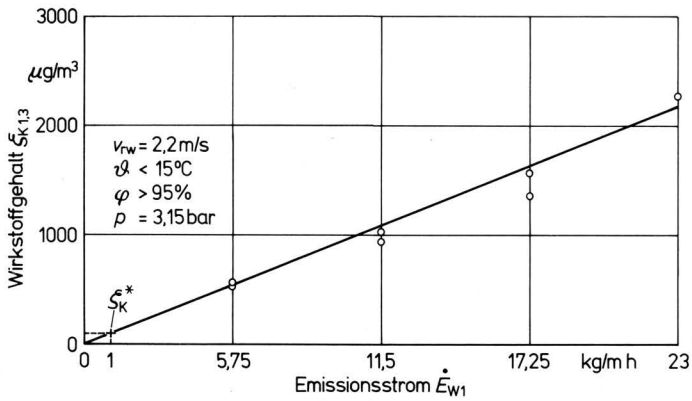


Bild 11. Wirkstoffgehalt als Funktion des Emissionsstromes bei konstantem Flüssigkeitsdurchsatz der Düsen FU 11,5/120°, Messungen mit NaCl-Lösung unterschiedlicher Konzentration im Windkanal.

Mit der Konzentration ändert sich bei NaCl die Zähigkeit und bei Pflanzenbehandlungsmitteln insbesondere die Oberflächenspannung der Spritzflüssigkeit. Diese Größen beeinflussen den Zerstäubungsvorgang [13]. Ihr Einfluß auf die Belastung soll an anderer Stelle gezeigt werden.

4.2.5 Einfluß des Luftzustandes

Einen bedeutenden Einfluß auf die Teilchengröße übt das Partialdruckgefälle aus, weil davon der Verdunstungsvorgang bestimmt wird [14]. Den Einfluß der Luftfeuchtigkeit auf die Belastung zeigt **Bild 12.** Danach steigt die Belastung erst unterhalb von 60 % rel. Luftfeuchte stärker an. Die geringe Abhängigkeit ist zunächst überraschend, erklärt sich aber wie folgt: Die Entscheidung, welche Teilchen in den Atembereich gelangen, fällt im wesentlichen im Bereich kurz unterhalb der Quelle (Spritzbalken). Die Veränderung der vom relativen Wind mitgeführten Wirkstoffmenge – also der Abdrift – durch Verdunstung ist dort für $\varphi > 60$ % nicht sehr groß. Wenn Teilchen sich aber in der Abdrift befinden, verändert die dann noch auftretende Verkleinerung der Tropfen oder auch der Übergang in den gasförmigen Zustand den Transportvorgang nicht mehr wesentlich.

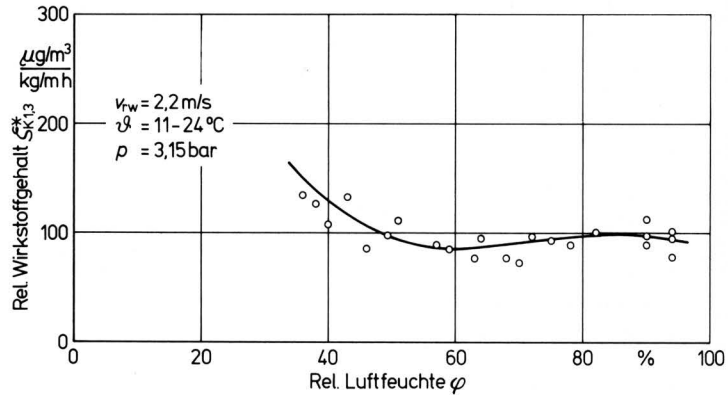


Bild 12. Relativer Wirkstoffgehalt in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte. Nicht genannte Bedingungen wie bei Bild 5.

Die Verdunstung verändert aber in hohem Maße den physikalischen Zustand der Spritzflüssigkeit mit dem Pflanzenbehandlungsmittel. Nach Versuchsergebnissen verändert sich die relative Tropfengrößenverteilung mit abnehmender Luftfeuchtigkeit nur wenig, wohl aber die Tropfenanzahl. In **Bild 13** ist das mit dem HC 70 gemessene, auf das Luftvolumen bezogene Tropfenvolumen dargestellt. Bei 60 % rel. Luftfeuchte liegt dieses Volumen bereits um mehr als die Hälfte niedriger im Vergleich zu dem bei nahezu gesättigter Luft, ohne daß sich die Belastung nennenswert ändert. Durch Verdunstung geht somit ein hoher Anteil der Pflanzenbehandlungsmittel auf dem Weg bis zum Arbeitsplatz in den festen oder auch gasförmigen Zustand über. Ferner kann dadurch der Wirkstoffgehalt in den noch vorhandenen Tropfen ansteigen.

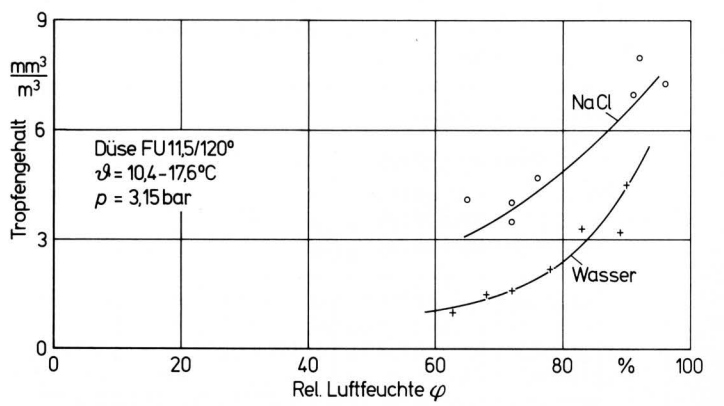


Bild 13. Tropfengehalt im Abdriftstrom in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte, Messungen mit Wasser und NaCl-Lösung im Windkanal an der Stelle h = 1,3 m, s_A = 3,5 m, E_B wie in Bild 12.

4.2.6 Abhängigkeit von den Eigenschaften der Spritzflüssigkeit

Es ist bekannt, daß die Eigenschaften der Spritzflüssigkeit (Dichte, Zähigkeit, Oberflächenspannung) den Zerstäubungsvorgang beeinflussen. Es ist daher zu fragen, ob man die für eine 10 %ige NaCl-Lösung gefundenen Ergebnisse überhaupt auf Spritzflüssigkeiten mit Pflanzenbehandlungsmitteln übertragen kann.

Dazu wurden unter sonst gleichen Bedingungen Lösungen aus NaCl und Lindan untersucht. Die Ergebnisse, Mittelwerte aus mehreren Messungen, zeigt **Tafel 3**. Vergleicht man die Ergebnisse nach Spalte 1 und 4, so ist festzustellen, daß die Belastung, auf gleichen Wirkstoffemissionsstrom bezogen, bei Lindan um etwa 70 % höher liegt als bei einer 10 %igen NaCl-Lösung. Wodurch ist nun dieser Unterschied begründet?

Ein gewisser Anteil ist auf die unterschiedliche Zerstäubung, ein weiterer auf das höhere Partialdruckgefälle bei Lindan zurückzuführen. Ferner ist davon auszugehen, daß bei der Zerstäubung von Emulsionen ein Tropfenzerfall auch an den Phasengrenzflächen erfolgt. Hieraus läßt sich ableiten, daß sehr feine Tropfen z.B. auch aus einem reinen Lindan-Präparat bestehen können (Hypothese). Versuche zu dieser Deutung ergaben folgendes:
Der bei der Zerstäubung anfallende Anteil der Teilchen z.B. $< 60\ \mu m$ ist bei Spritzflüssigkeiten mit 0,1 % Lindan, 10 % NaCl und reinem Wasser verschieden. Der volumetrische Unterschied liegt jedoch unter etwa 20 %, so daß sich hierdurch die höhere Belastung durch Lindan allein nicht erklären läßt. Daß auch die Flüchtigkeit und damit das Partialdruckgefälle einen Einfluß hat, zeigen die Spalten 2 und 3 in Tafel 3. Unter diesen Meßbedingungen wird der in den gasförmigen Zustand übergegangene Anteil an Lindan nicht erfaßt. Dieser Anteil kann etwa 40 % erreichen. Der Wert ist jedoch mit Sicherheit zu hoch, weil die Verdunstung im wesentlichen nach dem Abscheiden auf dem Filter erfolgt. Man kann somit davon ausgehen, daß die höhere Belastung bei Lindan auch oder vor allem dadurch entsteht, daß bei der Zerstäubung der Emulsion Tropfen mit unterschiedlichem Wirkstoffgehalt anfallen, d.h. in den feinen Tropfen der Abdrift ist der Gehalt an Lindan größer als in den großen Tropfen. In Testversuchen zeigte sich dieser Befund.

Aus den Messungen läßt sich folgern, daß Referenzflüssigkeiten für die Bestimmung der Belastung unter Beachtung der Unterschiede geeignet sind. Sie empfehlen sich insbesondere zur Untersuchung bestehender Einflußfaktoren und ihrer Abhängigkeiten. Die effektive Belastung durch Pflanzenbehandlungsmittel läßt sich unmittelbar mit einer Referenzflüssigkeit nicht ermitteln. Dies ist erst dann möglich, wenn die Faktoren, die zu Unterschieden führen, in ihren Auswirkungen meßtechnisch ermittelt sind.

Man kann davon ausgehen, daß nicht für jedes Pflanzenbehandlungsmittel der Unterschied zur Referenzflüssigkeit festgestellt werden muß, weil sich die für die Belastung wichtigsten Merkmale, wie Art der Lösung und Partialdampfdruck, bei vielen Pflanzenbehandlungsmitteln nur wenig unterscheiden, so daß man sie vermutlich zu Gruppen zusammenfassen kann. Dies zu klären ist Ziel geplanter Messungen.

Nr.	1	2	3	4
Spritzflüssigkeit	10 % NaCl	0,0125 % Lindan		
Probenehmer	Filter 250 ϕ		Falle n. Bild 3 ohne Kühlung	mit Kühlung
Belastung $\zeta^*_{K1,3}$ $\frac{\mu g/m^3}{kg/m\,h}$	110	145	130	185

Tafel 3. Relativer Wirkstoffgehalt im Abdriftstrom an der Stelle $s_A = 3{,}5$ m und h = 1,3 m bei unterschiedlicher Probenahme und verschiedenen Spritzflüssigkeiten; Messungen im Windkanal mit Düsen FU 11,5/120°, p = 3,15 bar.

4.3 Wirkstoffbelastung an der dem Arbeitsplatz entsprechenden Referenzstelle im ungestörten Abdriftstrom unter meteorologischen Bedingungen

Die im Windkanal durchgeführten Versuche sind auch mit dem Versuchsstand nach Bild 4 möglich, jedoch erfordern sie einen wesentlich größeren Zeitaufwand. Sie bringen – wie Versuchsreihen zeigen – im Grundsatz die gleichen Ergebnisse. Es gibt aber einen wesentlichen Unterschied zum Windkanal. Die durch meteorologische Vorgänge in Bodennähe verursachte Turbulenz ist wesentlich verschieden von der im Windkanal. Auch mit recht großem Aufwand ist es kaum möglich, solche Turbulenzen im Windkanal zu simulieren. Dies war auch der Grund, beide Versuchssysteme nebeneinander und in Ergänzung zu benutzen.

4.3.1 Abhängigkeit von der relativen Windgeschwindigkeit und Konzentrationsverteilung über der Höhe

Der bedeutende Einfluß der Turbulenz, also der stochastischen Bewegungen relativ zur Hauptbewegung, zeigt sich in der Abhängigkeit zwischen der relativen Windgeschwindigkeit und dem Wirkstoffgehalt sowie in der Konzentrationsverteilung der Wirkstoffe im Ausbreitungsstrom über der Höhe. Die Abhängigkeit der Belastung ζ^*_V in Abhängigkeit von v_{rw} zeigt **Bild 14**, und zwar für die Referenzstelle mit $s_A = 3{,}5$ m und h = 1,8 m. Ein Vergleich mit dem Ergebnis nach Bild 7 macht den wesentlich anderen Verlauf der Kurve deutlich, verursacht u.a. durch die unterschiedliche Turbulenz. Dieser Einfluß zeigt sich auch in der Konzentrationsverteilung über der Höhe, **Bild 15**.

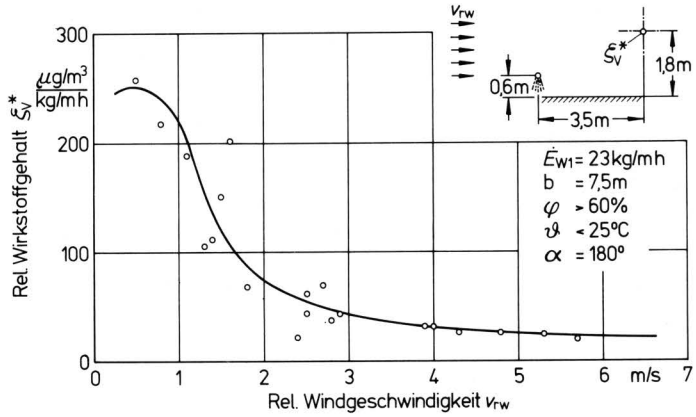


Bild 14. Relativer Wirkstoffgehalt in Abhängigkeit von der relativen Windgeschwindigkeit, Messungen mit 10 %iger NaCl-Lösung auf dem Versuchsstand, Düsen FU 11,5/120°, keine Körper im Ausbreitungsstrom.

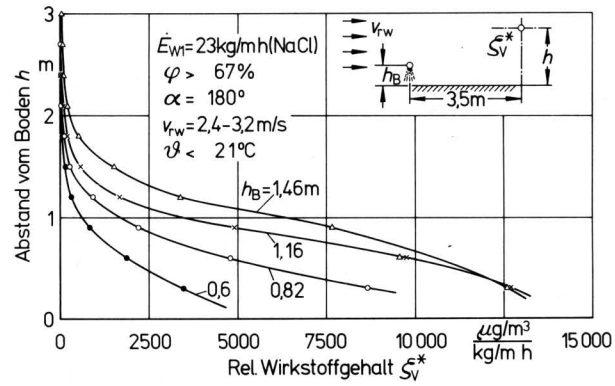


Bild 15. Relativer Wirkstoffgehalt in Abhängigkeit von der Höhe der Meßstelle h bei verschiedenen Spritzbalkenhöhen h_B, nicht genannte Bedingungen wie bei Bild 14.

Der Abdriftstrom im Windkanal enthält nach Bild 5 in 1,8 m Höhe mit $\zeta_K^* = 18$ (μg/m^3)/(kg/m h) wesentlich weniger Wirkstoffe als beim Versuchsstand im Freien mit $\zeta_V^* = 144$ (μg/m^3)/(kg/m h); h_B jeweils 1 m.
Für den unterschiedlichen Verlauf der Kurven sind außer der Turbulenz noch weitere Faktoren zu beachten. Im Windkanal stimmen die Windgeschwindigkeit an der Meßstelle und in Höhe des Spritzbalkens nahezu überein. Demgegenüber bildet sich im Freien ein anderes Geschwindigkeitsprofil aus [15]. Am Spritzbalken liegt die Geschwindigkeit etwa um 30 % niedriger als an der Meßstelle in h = 4 m. Bei sehr niedrigen relativen Windgeschwindigkeiten zeigt sich der Einfluß des induzierten Luftstromes mit seinem beachtlichen Vertikaltransport, Bild 14. Die starke Zunahme der Belastung für $v_{rw} < 1{,}5$ m/s ist vor allem hierauf zurückzuführen. Im Windkanal ist dieser Bereich nicht erfaßt worden.

Noch einige Anmerkungen zur Turbulenz:
Im Windkanal stehen Windgeschwindigkeit und Turbulenzgrad in einem konstanten Verhältnis. Unter meteorologischen Bedingungen jedoch kann die Turbulenz selbst bei gleicher mittlerer relativer Windgeschwindigkeit wetterabhängig sehr unterschiedlich sein. Dies zeigt sich auch in den Meßergebnissen. Nach Bild 14 streuen die Meßwerte für die Belastung ζ_V^* bei $v_{rw} \approx 2{,}5$ m/s um etwa 50 %, bei größeren Geschwindigkeiten dagegen wesentlich weniger. Dies ist darauf zurückzuführen, daß diese Messungen an verschiedenen Tagen bei unterschiedlichen Wetterbedingungen durchgeführt wurden.

Dieser Hinweis erklärt in vielen Fällen die unterschiedlichen Streuungsspektren bei den durchgeführten Versuchen. Messungen bei konstanter Windgeschwindigkeit werden oft in einer engen Zeitspanne und damit bei oft konstantem Turbulenzgrad durchgeführt. In solchen Fällen zeigen die Meßwerte geringere Streuungen.

4.3.2 Einfluß der Spritzbalkenanordnung auf die Belastung

Aus der Konzentrationsverteilung über der Höhe (Meßprotokolle für Bild 15) läßt sich auch der sehr starke Einfluß der Spritzbalkenhöhe auf die Belastung am Fahrerplatz bei freier Ausbreitung entnehmen, **Bild 16**. Erwähnenswert ist die Tatsache, daß sich die Belastung nur wenig ändert, wenn mit dem Spritzbalken auch der Fahrerplatz angehoben wird. Daraus läßt sich schließen, daß die vom Boden reflektierten Teilchen an der Belastung am Arbeitsplatz einen vergleichsweise geringen Anteil haben.

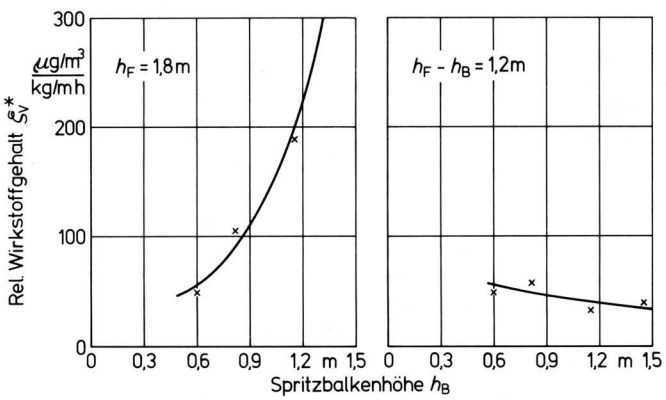


Bild 16. Relativer Wirkstoffgehalt in Abhängigkeit von der Spritzbalkenhöhe bei Probenahme in 1,8 m Höhe (links) und bei konstantem vertikalen Abstand (1,2 m) zwischen Meßstelle und Spritzbalken (rechts), weitere Bedingungen wie bei Bild 15.

Wie sich der Wirkstoffgehalt bei Änderung der horizontalen Entfernung zwischen Arbeitsplatz und Spritzbalken ändert, zeigt **Bild 17**.

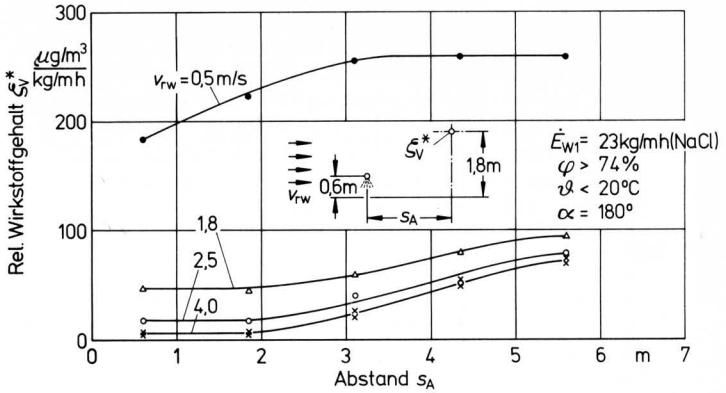


Bild 17. Relativer Wirkstoffgehalt als Funktion des horizontalen Abstands zwischen Spritzbalken und Meßstelle mit der relativen Windgeschwindigkeit als Parameter, nicht genannte Bedingungen wie bei Bild 14.

4.3.3 Auswirkungen des Windeinfallswinkels

Mit Hilfe des Versuchsstandes ist es möglich, den Einfluß des Windeinfallswinkels zu ermitteln, **Bild 18**. Es zeigt sich das qualitativ erwartete Ergebnis.

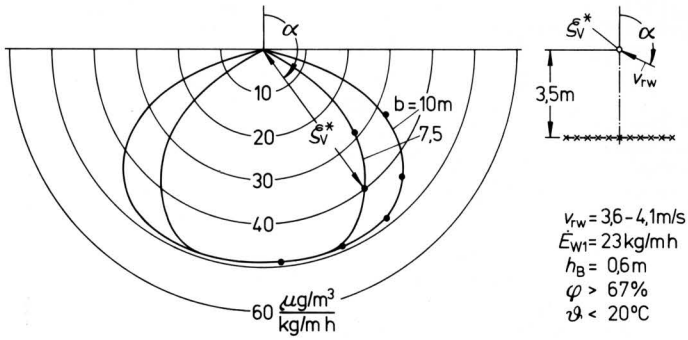


Bild 18. Relativer Wirkstoffgehalt in Abhängigkeit vom Windeinfallswinkel, Messungen mit 10 %iger NaCl-Lösung auf dem Versuchsstand, Düsen FU 11,5/120°, freie Ausbreitung, Lage der Meßstelle zum Spritzbalken entsprechend Unimog mit Heckanbau, d.h. Höhe der Meßstelle über Boden h = 1,8 m, Meßpunkte sind Mittelwerte aus mehreren Messungen.

4.4 Wirkstoffbelastung des Arbeitsplatzes auf einem Spritzfahrzeug, Versuchsstand

Die Wiederholung der Bild 14 und 18 zugehörenden Versuche, jedoch mit einem handelsüblichen Fahrzeug und Spritzgerät, führt zu Ergebnissen, die **Bild 19 und 20** darstellen. Vergleicht man die untere Kurve in Bild 19 mit Bild 14, so zeigt sich nur ein geringer Unterschied bei $1{,}5 < v_{rw} < 5$ m/s.
Durch Strömungsumlenkungen infolge von Fahrzeugbauteilen ist eine höhere Belastung zu erwarten. Andererseits ist daran zu denken, daß sich die Meßstelle hinter der Windschutzscheibe in einem Strömungstotraum mit einem belastungsmindernden Effekt befindet.
Die Belastung steigt aber dann stark an (obere Kurve Bild 19), wenn der Motor in Betrieb genommen wird und sich durch das Kühlgebläse ein sekundärer Luftstrom, insbesondere unterhalb des Fahrzeuges, ausbildet. Diese Luftströmung bewirkt bei α um 180° ein Ablenken des Ausbreitungsstromes nach oben. Bei geringen relativen Windgeschwindigkeiten reicht diese Sekundärströmung bis in den Bereich des Spritzbalkens, so daß sich dort ein Wirbel ausbildet. Wie sich der Einfluß der Kühlluftströmung für verschiedene relative Windrichtungen auswirkt, zeigt Bild 20.

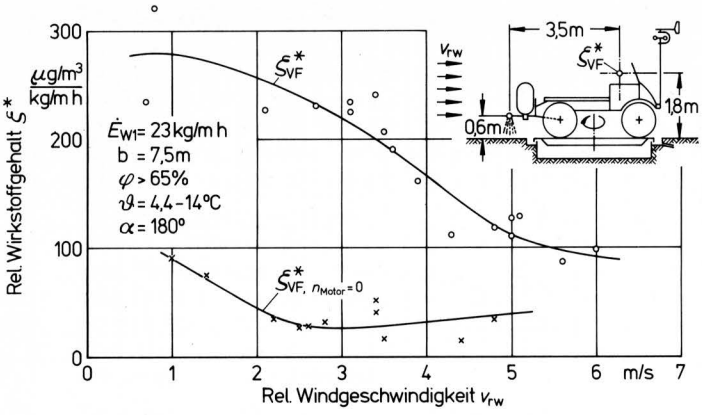


Bild 19. Relativer Wirkstoffgehalt der Luft am Fahrerplatz (Unimog) in Abhängigkeit von der relativen Windgeschwindigkeit bei normalem Betrieb (obere Kurve) und bei Stillstand des Fahrzeugmotors (untere Kurve).

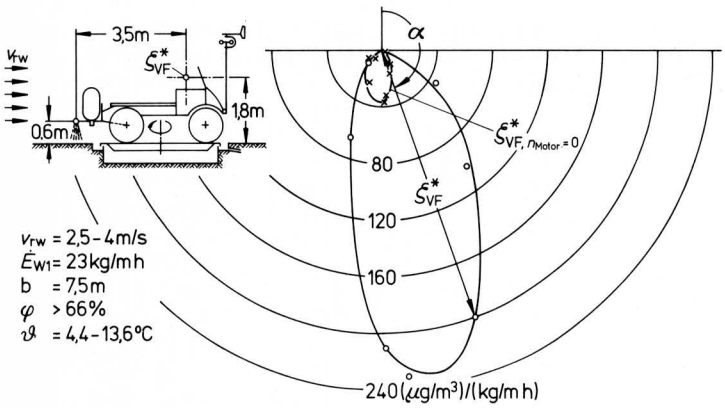


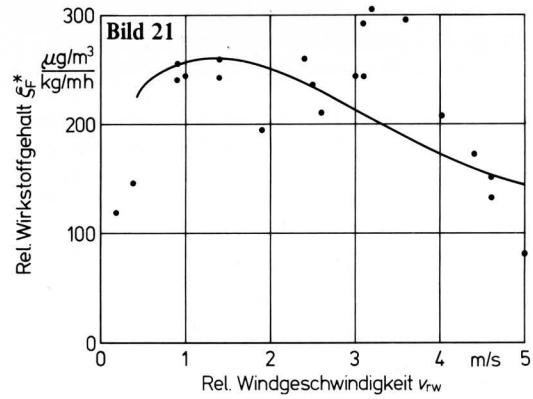
Bild 20. Relativer Wirkstoffgehalt der Luft am Fahrerplatz in Abhängigkeit vom Windeinfallswinkel bei normalem Betrieb (äußere Kurve) und bei Stillstand des Fahrzeugmotors (innere Kurve).

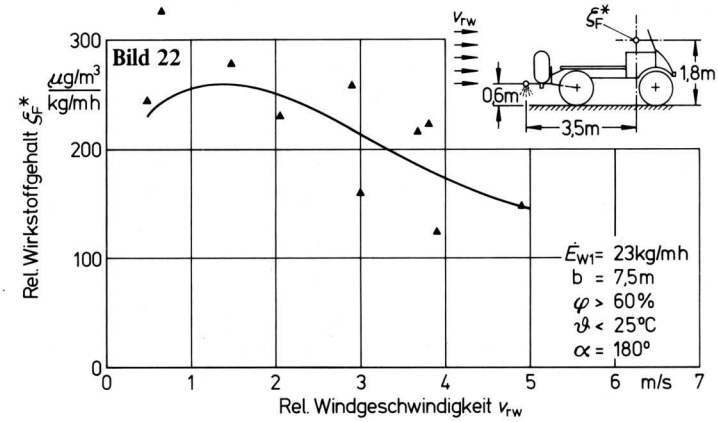
4.5 Wirkstoffbelastung des Arbeitsplatzes auf Versuchsfahrzeugen unter praktischen Bedingungen

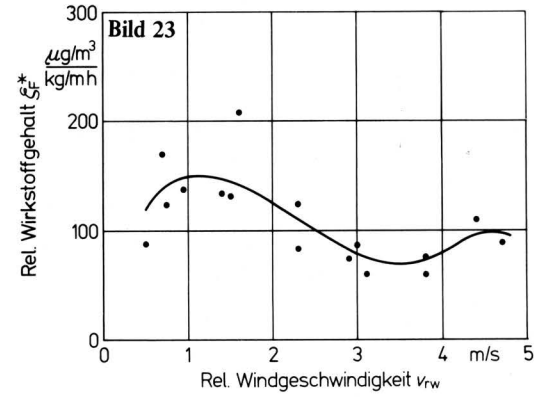
Mit dem Windkanal und dem Versuchsstand lassen sich die Einflußgrößen und ihre Abhängigkeiten zeigen. Ein quantitativer Schluß auf praktische Bedingungen ist jedoch nicht möglich. Dies ist der Grund für Versuche unter gezielten Bedingungen bei den realen Verhältnissen der Produktion. Dazu wird das auf dem Versuchsstand eingesetzte Gerät unverändert verwendet.

Die Ergebnisse sind in den **Bildern 21 bis 24** dargestellt. Hinsichtlich der relativen Windgeschwindigkeit ergeben sich keine neuen Erkenntnisse. Es zeigt sich aber der bedeutende Einfluß des Pflanzenbestandes, der insbesondere die Strömungsverhältnisse im Bereich $h < h_B$ stark verändert. Im Prinzip wirkt sich ein höherer Pflanzenbestand wie eine "Verkleinerung" der Spritzbalkenhöhe aus. Dies bedeutet einen geringeren Abdriftstrom.

Der Einfluß der Fahrgeschwindigkeit auf die Belastung liegt im Bereich der Meßwertstreuungen. Tendenziell erfolgt ein Anstieg mit der Fahrgeschwindigkeit, weil damit eine Zunahme des Turbulenzgrades verknüpft sein kann. Auch ändert sich das Geschwindigkeitsprofil über der Höhe mit v_F.
Wegen der gewählten Versuchsbedingungen ($\alpha = 180^o$) geben diese Ergebnisse für das verwendete System die höchste mögliche Spitzenbelastung an.







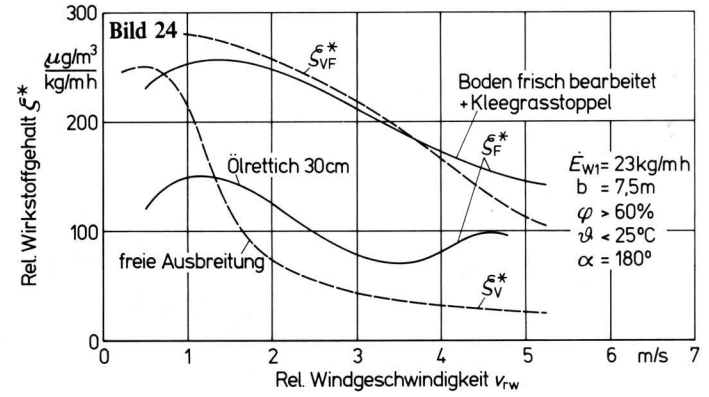


Bild 21 bis 24. Relativer Wirkstoffgehalt am Fahrerplatz in Abhängigkeit von der relativen Windgeschwindigkeit bei verschiedenen Bedingungen. Feldversuche.

Bild 21 bis 23: Spritzen von 10 %iger NaCl-Lösung mit Unimog G 65
Bild 21: v_F = 1,04 bzw. 2,35 m/s; Boden frisch bearbeitet
Bild 22: v_F = 1,04 m/s; Kleegrasstoppel
Bild 23: v_F = 1,04; 1,7 u. 2,3 m/s; Ölrettich, 30 cm hoch
Bild 24: Vergleich der Ergebnisse nach Bild 21 bis 23 mit den Ergebnissen nach Bild 14 (freie Ausbreitung) und Bild 19 (obere Kurve)

Vergleicht man die obere Kurve aus Bild 19 mit den Ergebnissen nach Bild 21 und 22, so zeigen sich nur geringe Unterschiede. Hieraus folgt, daß sich mit einem Versuchsstand entsprechend Bild 4 die Praxis repräsentierende Belastungen ermitteln lassen. Gewisse Probleme bereitet die Simulation von Pflanzenbeständen (Akzeptor).

Zur Frage, inwieweit die Feldversuchsergebnisse mit einer NaCl-Lösung auf Pflanzenbehandlungsmittel übertragbar sind, wurden zum Vergleich Versuche mit Lindan durchgeführt, **Tafel 4**. Danach liegt die relative Wirkstoffbelastung ζ_F^* bei Lindan um etwa 80 % höher als bei einer NaCl-Lösung. Ein in dieser Größenordnung liegendes Verhältnis wurde auch für den Windkanal gefunden (s. Tafel 3) und erklärt.
Mit den bisher vorgestellten Ergebnissen liegen erste Grundlagen zur Vorausberechnung von Belastungen und damit für Prognosen vor.

Spritzflüssigkeit	rel. Windgeschw. v_{rw} m/s	Emissionsstrom $\dot{E}_{w1}$ kg/m h	Belastung ζ_F µg/m³	Belastung ζ_F^* $\frac{\mu g/m^3}{kg/m\ h}$
0,025 % Lindan	0,5–1,5	0,056	28	506
	0,5–1,5	0,056	22	390
	0,5–1,5	0,056	21	376
	1,0–2,0	0,056	27	476
	1,5–2,5	0,056	25	444
	1,5–2,5	0,056	30	533
			Mittelwert ζ_F^* =	454
10 % NaCl	0,5–2,5	23	5700	Bild 21 u. 22
			Mittelwert ζ_F^* =	250

Tafel 4. Relativer Wirkstoffgehalt beim Ausbringen verschiedener Spritzflüssigkeiten mit Unimog Typ G 65; Spritzbalken b = 7,5 m, h_B = 0,6 m, Heckanbau, Düsen FU 11,5/120°, 3,5 bar, Probenahme am Beifahrerplatz, Boden mit Bewuchs < 10 cm, Rückenwind (α = 180°).

5. Vorausberechnung der Arbeitsplatzbelastung aus Messungen unter Versuchsbedingungen

Die mit Abschnitt 4.3 bis 4.5 mitgeteilten Ergebnisse gelten für definierte Bedingungen. Bei der praktischen Arbeit in der Produktion treten solche Bedingungen, insbesondere hinsichtlich relativer Windrichtung und -geschwindigkeit, jedoch in sehr unterschiedlicher Folge und Zusammensetzung auf, so daß nicht ein Belastungswert gilt, sondern ein Kollektiv solcher Werte. Für sehr viele Fragen ist es nicht erforderlich, das gesamte Kollektiv zu kennen, sondern es genügen die charakteristischen Werte wie der 50- und 100 %-Wert der Summenhäufigkeit.

Zur Berechnung solcher Belastungskollektive aus Versuchsstandmessungen oder Feldversuchen ist von der Häufigkeit der Fahrt- und Windrichtungen sowie den Wind- und Fahrgeschwindigkeiten auszugehen. Diesen Werten sind die für die jeweils eingesetzten Geräte aufgrund der vorstehenden Versuche zu erwartenden Belastungen zuzuordnen und dann entsprechend aufzusummieren.

Für die im folgenden mitgeteilte Modellrechnung wird angenommen, daß alle Fahrt- und Windrichtungen gleich häufig auftreten. Für die Windgeschwindigkeit wird die aus meteorologischen Daten zu entnehmende Häufigkeitsverteilung der Monate April und Mai eingesetzt und für die Fahrgeschwindigkeit ein Wert von 12 km/h. In einem weiteren Schritt sind die geltenden Versuchsergebnisse zuzuordnen. Es werden die Belastungskurven nach Bild 18 und 21, 22 gewählt, eine Spritzbalkenbreite b = 10 m und eine Spritzbalkenhöhe h_B = 0,6 m. Für diese Bedingungen errechnet sich abhängig von der angenommenen zulässigen oberen Windgeschwindigkeit eine mittlere relative Wirkstoffbelastung (50 %-Wert) bis ζ_F^* = 22 (µg/m³)/(kg/m h)[5]. Der maximal auftretende Spitzenwert ist aus Bild 21 direkt zu entnehmen und liegt bei etwa 250 (µg/m³)/(kg/m h). Hieraus folgt ein 100 %-Wert von 125 (µg/m³)/(kg/m h). Im günstigsten Fall tritt keine Belastung auf.

Die Belastungen in der Praxis und bei Heckanbau liegen oberhalb der 50 %-Werte, wenn die Fahrten im wesentlichen in Windrichtung erfolgen, dagegen niedriger, wenn seitlicher Wind vorherrscht. Bei Frontanbau ist der Bereich der relativen Windrichtungen, der zu einer Belastung des Arbeitsplatzes beim Unimog führt, größer als bei Heckanbau, wie mit Bild 2 qualitativ gezeigt. Dieser Befund wurde durch Messungen bestätigt. Niedriger dagegen liegt die Spitzenbelastung. Da wegen der Fahrgeschwindigkeit der relative Gegenwind häufiger als der relative Rückenwind auftritt, liegt die Dauerbelastung bei Frontanbau höher.

Aus solchen Rechnungen ergibt sich weiter, daß bei Heckanbau die mittlere Belastung um so niedriger liegt, je höher die Fahrgeschwindigkeit gewählt wird und je geringer die Windgeschwindigkeit bei den Spritzarbeiten ist. Auch das Fahrraster hat einen Einfluß; so ist es günstig, die Arbeiten an der windabgelegenen Seite des Feldes zu beginnen.

Im letzten Schritt ist der Unterschied der Belastung zwischen Referenzflüssigkeit und Pflanzenbehandlungsmittel einzusetzen. Wird Lindan ausgebracht, dann ist eine etwa 70–80 % höhere Belastung zu erwarten, d.h. es gilt für den 50 %-Wert ζ_F^* = 37–40 (µg/m³)/(kg/m h). Zur Überprüfung dieser Aussagen lassen sich die in Abschnitt 4.1 mitgeteilten Ergebnisse heranziehen. Aus Tafel 1 und 2 ergibt sich das im **Bild 25** dargestellte Belastungskollektiv. Danach liegt der 50 %-Wert bei ζ_F^* = 33 (µg/m³)/(kg/m h) und der 100 %-Wert bei 227 (µg/m³)/(kg/m h).

Diese gute Übereinstimmung ist zunächst überraschend, da doch die Bedingungen für das Prognosemodell verschieden sind von denen bei der praktischen Arbeit. So liegt die Spritzbalkenhöhe bei den Arbeiten der Lohnunternehmen zwischen 0,7 und 1,4 m, d.h. die Prognosewerte müßten deutlich niedriger liegen. Andererseits ist beim Prognosemodell kein nennenswerter Pflanzenbestand vorausgesetzt worden. Dies beinhaltet höhere Prognosewerte. Eine Abschätzung mit Hilfe der Ergebnisse nach Bild 16 und 24 sagt aus, daß sich diese gegenläufigen Auswirkungen zum großen Teil aufheben.

Vorstehende Ergebnisse lassen den Schluß zu, daß sich die Belastung des Arbeitsplatzes bei Spritzarbeiten für sehr viele Bedingungen gut abschätzen läßt. Einige Einflüsse sind noch näher zu untersuchen, so insbesondere die der verschiedenen Fahrzeugbauarten.

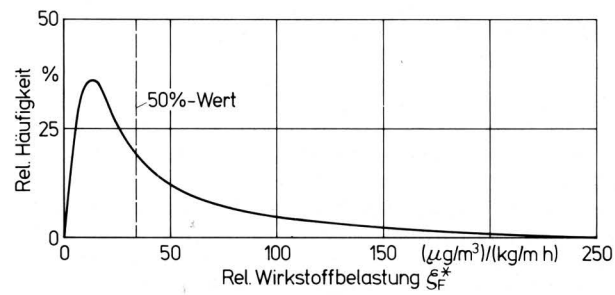


Bild 25. Belastungskollektiv bei Spritzarbeiten durch Lohnunternehmen; Werte und Bedingungen s. Tafel 1, zugehöriger 100 %-Wert s. Tafel 2. Umrechnung auf die jeweils vorliegenden Emissionsströme mit $\zeta_F = \zeta_F^* \dot{E}_{w1}$.

[5] Wird statt Bild 18 Bild 20 zur Prognose herangezogen (Form der Kurve), so ergibt sich eine etwa 20–30 % niedrigere Belastung.

6. Maßnahmen zur Minderung der Belastung

Die versuchstechnisch ermittelten Abhängigkeiten geben auch Hinweise zur Senkung der durch eine Spritzbalkenquelle hervorgerufenen Arbeitsplatzbelastung. Aus der Fülle der Möglichkeiten seien als Auswahl genannt:

1. Eine Senkung des Wirkstoffemissionsstromes ist in dem Umfang möglich, wie es gelingt, die Aktivität der Wirkstoffe je Einheit bei gleicher oder abnehmender Toxizität zu steigern. Dies ist ein grundsätzliches Hauptziel bei den Herstellern von Pflanzenbehandlungsmitteln.
2. Düsenbauart, Flüssigkeitsdruck und andere Faktoren sind im Rahmen des durch die Pflanzenschutzwirkung vorgegebenen Arbeitsbereiches so zu wählen, daß der Anteil sehr feiner Tropfen so gering wie möglich ist (Reduktion der Abdrift).
3. Der vertikale Abstand zwischen Spritzbalken und Arbeitsplatz sollte möglichst groß sein.
4. Überschreitet die Fahrgeschwindigkeit die Windgeschwindigkeit, so herrscht stets Gegenwind, dann tritt bei Heckanbau keine Belastung durch eine Spritzbalkenquelle auf.
5. Ein Anheben des Abdriftstromes durch Wirkungen des Fahrzeugs ist zu vermeiden.
6. Bei Heckanbau liegt die Dauerbelastung niedriger als bei Frontanbau.

Sollten diese und weitere sich aus den Messungen ergebende Maßnahmen nicht ausreichen, um MAK-Werte einzuhalten, was nur für Sonderfälle zu erwarten ist, empfehlen sich technische Schutzmaßnahmen, wie die Atemschutzmaske, der Atemschutzhelm mit einem Aktivkohlefilter in der Zuluft, Schutzkleidung und die geschlossen gehaltene Fahrerkabine mit Überdruck und einem geeigneten Schadstoffabscheider im Zuluftstrom [1].

7. Beanspruchung des Beschäftigten als Folge der Arbeitsplatzbelastung – einige Hinweise

Die Belastung des Arbeitsplatzes ist durch Menge und Zustand der sich auf die Gesundheit auswirkenden Stoffe beschrieben. In diesem Rahmen sind die Schadstoffkonzentration, die Teilchengrößenverteilung und der Anteil der verschiedenen Aggregatzustände von bestimmendem Einfluß. Wie sich nun aus dem so beschriebenen Zustand die Belastung und damit auch die Beanspruchung des Menschen ergibt, hängt insbesondere von den Wirkungen der entsprechenden Stoffe auf den Menschen ab (Toxizität) und damit auch von dem Weg, auf dem die Schadstoffe in den Körper gelangen. Mit der Körperoberfläche als Systemgrenze spricht man von einer respiratorischen, dermalen und oralen Belastung.

Als Hinweis für die Beanspruchung des Menschen als Folge der Belastung kann die aus dem Tierversuch gewonnene letale Dosis, der LD_{50}-Wert (mg/kg), herangezogen werden [16]. Hierbei läßt sich unterscheiden zwischen LD_{50}-Wert bei oraler, dermaler und respiratorischer Belastung. Für letztere Belastung ist auch der LC_{50}-Wert (mg/m^3) üblich. Es ist die Konzentration an Schadstoffen in der Atemluft, die für 50 % der Tiere letal wirkt. Zu beachten ist noch die Einwirkungszeit. So wird zwischen akuter (unmittelbare Wirkung nach einmaliger Verabreichung der Dosis) und chronischer Toxizität unterschieden. Zur Beurteilung der Beanspruchung aus oraler Belastung läßt sich der für die Toxizität der Wirkstoffe in der Nahrungskette verwendete Begriff no effect level (n.e.l.) [mg Wirkstoff pro kg Tiergewicht und Tag] heranziehen. Dieser Wert beinhaltet die beim Tier und täglicher Verfütterung unwirksame Menge (maximale untoxische Menge je Tag). Hieraus läßt sich in Verbindung mit einem Sicherheitsfaktor die für den Menschen annehmbare Tagesdosis ableiten; der acceptable daily intake (a.d.i.) [mg Wirkstoff pro kg Körpergewicht und Tag].

Von diesen Werten zu unterscheiden ist die maximale Arbeitsplatzkonzentration MAK-Wert oder in den USA der TLV-Wert. Dieser gibt an, bis zu welcher Belastung des Arbeitsplatzes eine Beeinträchtigung oder Gefährdung der Gesundheit nicht zu erwarten ist [1, 17].

Es ist noch die Frage zu erörtern, wie aus den Angaben über die Arbeitsplatzbelastung Werte über die Belastung des Beschäftigten zu gewinnen sind.

Die respiratorische Belastung (mg/h) errechnet sich aus dem eingeatmeten Volumen und der Schadstoffkonzentration in der Atemluft. Bei einer mittleren Atemfrequenz geht man von einem eingeatmeten Volumen von 1,75 m^3/h aus. Die so bestimmte respiratorische Belastung gilt für gasförmige Stoffe uneingeschränkt, für teilchenförmige nur dann, wenn die Teilchen atembar sind, also auf Bahnlinien liegen, die in die Atemwege führen.

Nach den Messungen über die Teilchengröße darf man die Tropfen am Arbeitsplatz größtenteils als atembar ansehen. Nur bei höheren Windgeschwindigkeiten beispielsweise $v > 3$ m/s gelangen die größeren Teilchen weniger in die Atemwege.

Die Frage, ob die eingeatmeten Teilchen auch alveolengängig sind, kann man nicht allgemein beantworten. Ein sehr großer Anteil der Tropfen mit Pflanzenbehandlungsmitteln verdunstet während der Ausbreitung, so daß ein mehr oder weniger hoher Anteil in festem Zustand in den Atembereich gelangt.

Einen Hinweis auf die dermale Belastung gibt **Bild 26**. Angegeben sind die auf einer ebenen Fläche abgeschiedenen Mengen. Danach ist die Belastung stark von der Anströmgeschwindigkeit abhängig. Überschlägig läßt sich diese Abscheidung an umströmten Körpern mit den im Schrifttum behandelten Methoden errechnen. So ist es üblich, den Abscheidegrad umströmter Körper für feine Teilchen in Abhängigkeit von der *Stokes*schen Zahl [18, 19] darzustellen. Diese Möglichkeiten befriedigen derzeit aber nur qualitativ. Es zeigt sich, daß die dermale Belastung mit der Teilchengröße, der Teilchendichte und der relativen Windgeschwindigkeit ansteigt. Auch Form und Verteilung der Hautflächen haben einen Einfluß.

Respiratorische und dermale Belastung verlaufen bei konstantem Wirkstoffgehalt ζ oft gegenläufig. So beispielsweise bei Veränderung der relativen Luftfeuchtigkeit (Verdunstung) oder auch der relativen Windgeschwindigkeit.

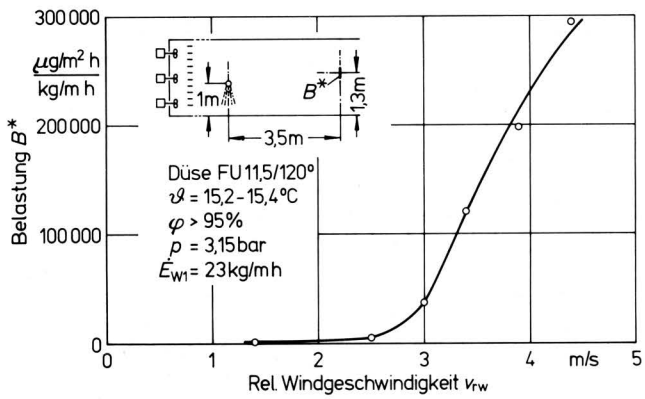


Bild 26. Belastung B* einer senkrecht zu den Stromlinien im Abdriftstrom angeordneten Fläche (Scheibe, 300 mm ϕ) in Abhängigkeit von der relativen Windgeschwindigkeit; Messungen mit 10 %iger NaCl-Lösung im Windkanal.

Für die dermale Belastung werden im USA-Schrifttum folgende Flächen [m^2] genannt:

Gesicht	0,065	Unterarme	0,121	Hals	0,015.
Hände	0,082	Nacken	0,011		

Mit den vorstehend genannten Flächen und den Werten aus Bild 26 sowie einem Atemvolumen von 1,75 m^3/h ergeben sich beispielsweise die in **Tafel 5** dargestellten Belastungen (Windkanal):

Diese Messung zeigt den bedeutenden Einfluß der relativen Windgeschwindigkeit auf die dermale Belastung. Die Werte sind aber nicht direkt auf reale Verhältnisse übertragbar, da sie im Windkanal unter idealisierten Bedingungen ermittelt wurden. Sie geben

aber die Größenordnung richtig wieder. Nach Angaben im USA-Schrifttum [2; S. 140 ff] erreicht die dermale das 50- bis 200fache der respiratorischen Belastung.

v_{rw} [m/s]	$\zeta^*_{resp.}$ [$\frac{\mu g/h}{kg/m\,h}$]	$\zeta^*_{derm.}$ [$\frac{\mu g/h}{kg/m\,h}$]
1	119	205,8
2	147	1176
3	306,2	10913
4	393,7	67914
5	448	99372

Düse FU 11,5/120° ϑ = 13–17 °C
p = 3,15 bar φ > 70 %

Tafel 5. Relative respiratorische und dermale Belastung (ebenes Modell) an einer Referenzstelle im Windkanal (h = 1,3 m, h_B = 1 m).

8. Zusammenfassung

Wichtige Einflußgrößen auf die Arbeitsplatzbelastung beim Ausbringen von Pflanzenbehandlungsmitteln durch Spritzverfahren sind:

1. der Wirkstoffemissionsstrom $\dot{E}_w$ (Durchsatz an Spritzflüssigkeit, Wirkstoffkonzentration in der Spritzflüssigkeit), die Tropfengrößenverteilung (Düsenbauart, Spritzdruck), die Eigenschaften der Spritzflüssigkeit (Art der Lösung oder Emulsion, Flüchtigkeit) und der Luftzustand,
2. der Pflanzenbestand,
3. die relative Windgeschwindigkeit, die relative Windrichtung, der Turbulenzgrad, die geometrische Zuordnung von Spritzbalken und Arbeitsplatz, die Spritzbalkenhöhe, die Spritzbreite, Körper im Abdriftstrom (Bauform des Fahrzeuges) und Strömungsumlenkungen durch sekundäre Luftströmungen.

Der Einfluß dieser Faktoren wurde experimentell untersucht. Damit stehen Grundlagen zur Verfügung, um in Verbindung mit anzusetzenden Arbeitsabläufen Belastungsprognosen zu erstellen. Diese und Messungen unter realen Bedingungen führen zu der Aussage, daß sich MAK-Werte beim Ausbringen von Pflanzenbehandlungsmitteln durch fahrzeuggetragene Spritzbalken im Feldbau bei Beachtung der empfohlenen Aufwandmengen und Verwendung geeigneter Geräte einhalten lassen. Ein Risiko für überhöhte Belastungen besteht bei großen Spritzbalkenhöhen, feintropfig arbeitenden Düsen mit gleichzeitig hohem Durchsatz und bestimmten durch Bauteile oder andere Vorgänge begründeten Strömungsumlenkungen. Hinsichtlich der Dauerbelastung ist der Heckanbau günstiger zu beurteilen als der Frontanbau.

Rein zahlenmäßig liegt die dermale Belastung [mg/h] teilweise um ein Vielfaches höher als die respiratorische.

Die Belastung am Arbeitsplatz läßt sich mit Hilfe von Versuchsstandanordnungen ermitteln, wenn praxisnahe Rahmenbedingungen gegeben sind. Als Referenzmittel ist eine NaCl-Lösung geeignet. Aber auch andere Stoffe sind denkbar und möglicherweise vorteilhafter. Unabhängig von der Wahl eines Referenzstoffes ist der Unterschied der Belastung zu jedem Pflanzenbehandlungsmittel experimentell abzusichern.
Die vorgestellten Zusammenhänge werden durch weitere Messungen verdichtet und auch für Sprühgeräte durchgeführt.

Verwendete Formelzeichen

Immissionen

ζ	$\mu g/m^3$	Wirkstoffgehalt (Schadstoffgehalt) in der Luft (20 °C, 1013 mbar); = Belastung der Luft durch Wirkstoffe der Pflanzenbehandlungsmittel
ζ^*	$\frac{\mu g/m^3}{kg/m\,h}$	relativer Wirkstoffgehalt in der Luft bei $\dot{E}_{w1}$ = 1 kg/m h, sonstige Bedingungen wie bei ζ

Indices für ζ und ζ^*

F		am Fahrerplatz eines Spritzfahrzeuges im Feldeinsatz, Meßstelle Atembereich
K		Windkanal
K1,3		im Windkanal; Meßstelle im Abdriftstrom 1,3 m über dem Boden
V		Versuchsstand
V1,8		Versuchsstand ohne Spritzfahrzeug; Meßstelle im ungestörten Abdriftstrom 1,8 m über dem Boden
VF		Versuchsstand mit Spritzfahrzeug, Meßstelle Atembereich am Fahrerplatz

Emissionen

$\dot{E}_B$	kg/h	Emissionsstrom aus Spritzflüssigkeit
$\dot{E}_w$	kg/h	Emissionsstrom aus Wirkstoff; Wirkstoff = aktiver Bestandteil im Präparat, d.h. im Pflanzenbehandlungs- und Schädlingsbekämpfungsmittel
$\dot{E}_{w1}$	kg/m h	Emissionsstrom aus Wirkstoff pro m Spritzbreite

Luftbewegungen und Luftzustände

v_{rw}	m/s	relative Windgeschwindigkeit
α	°	Windeinfallswinkel (relative Windrichtung), Winkel zwischen Fahrzeuglängsachse und Windrichtung (bei reinem Gegenwind ist α = 0)
φ	%	relative Luftfeuchte
ϑ	°C	Lufttemperatur

Abmessungen

b	m	Spritzbreite = Anzahl der Düsen x Düsenabstand
h	m	lotrechter Abstand vom Boden
h_B	m	Abstand zwischen Boden und Spritzbalken
h_F	m	Abstand zwischen Atembereich Fahrerplatz oder Meßstelle und Boden
s_A	m	horizontaler Abstand zwischen Meßstelle und Spritzbalken
V	m^3	Behälterfüllung

andere Formelzeichen

A_W	kg/ha	Aufwand an Wirkstoff je Hektar
A_E	$kg/m^2\,h$	Abdriftstromdichte, Ausbreitungsstromdichte, Transmissionsstromdichte
c	%	Massenanteil des Wirkstoffes in der Spritzflüssigkeit
d	μm	Tropfen- oder Teilchengröße
d_{D50}	μm	Teilchengröße, die der Durchgangssumme 50 % (Massen- oder Volumenverteilung D) zugeordnet ist (≙ MMD und MVD)
d_{N50}	μm	Teilchengröße, die der Anzahlsumme 50 % (Anzahlverteilung N) zugeordnet ist
p	bar	Spritzdruck – gemessen vor der Düse
t	s, h	Spritzdauer
v_F	m/s, m/h	Fahrgeschwindigkeit
ϑ	°C	Temperatur
ρ	kg/m^3	Dichte

Einige Gleichungen zum Ausbringen von Pflanzenbehandlungsmitteln

$$\dot{E}_w = \dot{E}_{w1} \cdot b = \dot{E}_B \cdot c = \frac{V \cdot \rho}{t} \cdot c$$

$$A_W = \frac{\dot{E}_w}{v_F \cdot b} \left[\frac{kg}{m^2}\right] = \frac{\dot{E}_w}{v_F \cdot b} \cdot 10000 \left[\frac{kg}{ha}\right]$$

$$\dot{E}_{w1} = \frac{A_W \cdot v_F}{10000} \quad \text{mit } A_W \text{ [kg/ha] und } v_F \text{ [m/h]}$$

Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

[1] *Batel, W.:* Staubbelastung und Staubzusammensetzung an Arbeitsplätzen in der landwirtschaftlichen Produktion und daraus abzuleitende Belastungsgrenzen und Staubschutzmaßnahmen.
Grundl. Landtechnik Bd. 29 (1979) Nr. 2, S. 41/54.

[2]●*Lee, R.E. jr.* (Hrsg.): Air pollution from pesticides and agricultural processes.
Boca Raton, Florida: CRC Press INC 1976 (264 Seiten, 12 Verfasser, 995 Schrifttumhinweise).

[3] *Miller, M.L., A.W. Eissler u. J.W. Ackley:* Tractor operator enclosure environment during pesticide application operations.
ASAE-Paper No. 79-1009.

[4]●*Klimmer, O.R.:* Pflanzenschutz- und Schädlingsbekämpfungsmittel.
Hattingen: Verlag Hundt 1971.

[5] *Hosseinipour, M.:* Einfluß der meteorologischen Daten auf die Drift bei der Applikation von Pflanzenbehandlungsmitteln.
Diss. TU Berlin 1979.

[6] *Batel, W.:* Untersuchungen zur Wirkstoffbelastung am Arbeitsplatz beim Ausbringen von Pflanzenbehandlungsmitteln.
FAL-Kolloquium "Humanisierung der Arbeit in der Landwirtschaft" 1979, Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 52, 1980.

[7] *Ellwardt, P.-Chr.:* Messen der Konzentration von Pflanzenbehandlungsmitteln in der Atemluft.
Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 52, 1980, S. 100/108.

[8]●Deutsche Forschungsgemeinschaft: Rückstandsanalytik von Pflanzenbehandlungsmitteln.
Weinheim Bergstraße: Verlag Chemie 1969.

[9]●*Ulmann, E.:* Lindan. Monographie eines insektiziden Wirkstoffs.
Freiburg im Breisgau: Verlag K. Schillinger 1973.

[10] *Umhauer, H.:* Partikelgrößenbestimmung in Suspensionen mit Hilfe eines Streulicht-Zählverfahrens.
Chem.-Ing.-Techn. Bd. 52 (1980) Nr. 1, S. 55/58.

[11] *Blenk, H.:* Die Sortierung von Saatgut mit besonders gleichmäßigem Querwind.
Grundl. Landtechnik H. 2 (1951) S. 5/12.

[12] *Schmidt, P. u. P. Walzel:* Zerstäuben von Flüssigkeiten.
Chem.-Ing.-Techn. Bd. 52 (1980) Nr. 4, S. 304/11.

[13] *Schmidt, M.:* Einfluß physikalischer Flüssigkeitseigenschaften auf die Zerstäubung im Pflanzenschutz.
Grundl. Landtechnik Bd. 30 (1980) Nr. 4, S. 126/34.

[14] *Heidt, H.:* Automatische Tropfengrößen- und Belagsanalyse im chemischen Pflanzenschutz.
Diss. TU Berlin 1976.

[15] *Paeschke, W.:* Mikroklimatische Untersuchungen innerhalb und dicht über verschiedenartigem Bestand.
Bioklim. Beibl. (1937) Heft 4, S. 155/63.

[16] *Herbst, M.:* Toxikologische Untersuchungen von Pflanzenbehandlungs- und Schädlingsbekämpfungsmitteln als Voraussetzung der Risikobeurteilung für Menschen.
Mitt. Biol. Bundesanst. Land-Forstwirtschaft Berlin-Dahlem H. 191 (1979) S. 35/46.

[17] DFG: Maximale Arbeitsplatzkonzentrationen 1980.
Mitt. XVI der Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe.
Boppard: Verlag H. Boldt 1980.

[18] *Schuch, G. u. F. Löffler:* Untersuchungen zur Abscheidung von Staubpartikeln aus einer Luftströmung durch Wassertropfen.
Chem.-Ing.-Techn. Bd. 51 (1979) Nr. 4, S. 301/302.

[19] *Löffler, F. u. W. Muhr:* Die Abscheidung von Feststoffteilchen und Tropfen an Kreiszylindern infolge von Trägheitskräften.
Chem.-Ing.-Techn. Bd. 44 (1972) Nr. 8, S. 510/14.

VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1981
Schriftleitung: Dr. *F. Schoedder,* Braunschweig

Printed in Germany. Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung, vorbehalten. Kein Teil dieser Schriftenreihe darf in irgendeiner Form — durch Photokopie, Mikrokopie oder ein anderes Verfahren — ohne schriftliche Genehmigung des Verlages, auch nicht auszugsweise, reproduziert werden. — All rights reserved (including those of translation into foreign languages). No part of this issue may be reproduced in any print, microfilm, or any other means, without written permission from the publishers. — Herstellung: Druckerei Ruth, Braunschweig.