

# Messungen zum zeitlichen Verlauf des Wirkstoffgehaltes von Pflanzenbehandlungsmitteln in Luft, Boden und auf Pflanzen insbesondere als Datenbeitrag für Umweltmodelle

Von Wilhelm Batel, Braunschweig-Völkenrode\*)

DK 632.981.1:632.95.028

Zur Abschätzung des gesundheitlichen Risikos durch Pflanzenbehandlungsmittel in der Umwelt und am Arbeitsplatz empfehlen sich kausalanalytisch gestützte Modelle über den Wirkstoffverbleib in den Kompartimenten. Als Beitrag hierzu wurde der zeitliche Verlauf des Wirkstoffgehaltes in der Luft, im Boden und auf den Pflanzen nach der Applikation für ein beispielhaftes System ermittelt und bilanziert. Es zeigt sich u.a., daß der LINDAN-Gehalt in der Luft bei 25 °C nach etwa 3 Std., auf den Pflanzen nach etwa 10 Std. und im Boden nach etwa 400 bis 500 Std. (aus Extrapolation) aufgrund sehr unterschiedlicher Vorgänge auf die Hälfte des Anfangswertes abgesunken ist.

## 1. Einleitung

Zur Abschätzung des Gesundheitsrisikos durch Pflanzenbehandlungsmittel in der Umwelt und der Nahrungskette werden Luft, Boden, Wasser und Nahrungsmittel auf den Wirkstoffgehalt analysiert. Durch Vergleich dieser Werte mit toxikologischen Daten erhält man Hinweise auf Gefahrenpotentiale und Unterlagen zur Festlegung von Grenzwerten. Für diesen Bereich steht international gesehen ein sehr umfangreiches Datenmaterial zur Verfügung.

Die genannten Analysendaten sind auch für ein gezieltes Handeln zur Verringerung oder zur Begrenzung einer Exposition durch Wirkstoffe hilfreich. Dennoch können sie nur begrenzt befriedigen, weil durch sie nur bestimmte Zustände beschrieben werden. Man versucht daher, diesen Wissensstand derart zu erweitern, daß allgemein gültige Voraussagen möglich sind. Geeignet hierzu sind Modelle, die die Wirkstoffströme und den Wirkstoffverbleib beschreiben. Solche Modelle haben den Vorteil, daß sie Prognosen ermöglichen und auch die Wege zeigen, wie man die Belastung der Kompartimente im erwünschten Sinne begrenzen oder vermindern kann.

In den nachfolgend mitgeteilten Untersuchungen stehen Messungen im Mittelpunkt, die als Beitrag zur Datengrundlage für die angesprochenen meist noch in der Entwicklung stehenden Modelle dienen können. Die Messungen unter vorgebbaren und praxisnahen Bedingungen haben zum Ziel, den zeitlichen Verlauf der Wirkstoffmengen in den Kompartimenten Luft, Pflanze und Boden in Abhängigkeit von der Temperatur und anderen Einflußfaktoren direkt nach der Applikation zu ermitteln, und dies derart, daß sich eine zeitlich bezogene Gesamtbilanz erstellen läßt. Diese Untersuchungen wurden mit dem Wirkstoff LINDAN durchgeführt, weil über diesen Stoff ein umfangreiches Datenmaterial vorliegt [1]. Übertragbare grundlegende Untersuchungen zu dem behandelten Thema findet man in den Aufsätzen von Figge, Klahn u. Koch [2], auf die besonders hingewiesen sei.

## 2. Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Als Versuchsraum dient ein geschlossenes, doppelwandiges Folien-gewächshaus mit einer Grundfläche von 12 x 7 m und einer mittleren Höhe von 2,3 m. Das Volumen liegt bei 195 m<sup>3</sup>. Der Mittelgang ist 0,8 m breit, an der Eingangsseite (Schleuse) befindet sich ein Quergang, so daß die nutzbare Bodenfläche 66 m<sup>2</sup> beträgt. Um Randeffekte auszuschneiden, wird die Versuchsfläche auf 10 m Länge, d.h. auf 60 m<sup>2</sup>, begrenzt, Bild 1.

Die Innenwandungen des Versuchsraumes bestehen aus PE-Folien. Das gegenüber der handelsüblichen Ausführung zusätzlich sorgfältig abgedichtete Haus ist in einer Halle aufgestellt, in der sich die Temperatur durch Beheizen einstellen und konstanthalten läßt. Die Temperatur in der Halle liegt geringfügig oberhalb der Solltemperatur im Versuchsraum. Durch diese Art der Beheizung bilden sich an den raumumschließenden Innenwänden keine Kondensate, so daß die Wirkstoffmengen an den Wänden sehr niedrig liegen. Diese Beläge werden laufend überprüft. Im Mittel wurden Werte von 5 µg/m<sup>2</sup> nicht überschritten, so daß diese Mengen für die Gesamtbilanz meist zu vernachlässigen sind. Die Bodentemperatur, etwa 2 cm unter der Bodenoberfläche gemessen, liegt im Mittel 2 °C unter der Lufttemperatur. Bei dem Boden handelt es sich um einen sandigen Schluff mit — bezogen auf die Trockenmasse — 44 % Grobschluff, 12 % Mittelschluff, 2 % Feinschluff, 7 % Ton, der Rest ist Sand; der Wassergehalt betrug im Mittel 12 %.

Aussagen zur Wirkstoffbilanz erfordern Angaben über die Dichtigkeit des Versuchsraumes. Zu diesem Zweck wurde der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Luft auf 4 % gebracht und die zeitliche Abnahme während einer Woche gemessen. Es zeigte sich, daß die CO<sub>2</sub>-Abnahme innerhalb von 24 h weniger als 3 % betrug. Durch häufiges Begehen des Raumes über die Schleuse kann sich dieser Wert auf 5 % erhöhen. Der Einfluß der Undichtigkeiten auf den Wirkstoffgehalt in der Luft ist daher unter den gegebenen Bedingungen in der Bilanz meist zu vernachlässigen.

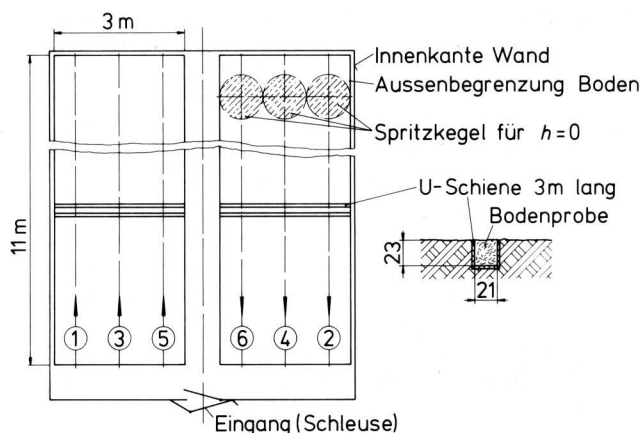


Bild 1. Grundriß des Versuchsraumes und der genutzten Bodenfläche mit Bewegungsrastrer der Spritzdüse und Anordnung zur Entnahme von Bodenproben.

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

Für jede Versuchsreihe werden unbelasteter Boden und unbelastete Pflanzen eingebracht. Als Modellpflanzen wurden u.a. Pelargonien von etwa 30 cm Höhe und Buschbohnen gewählt. Die Bodenbedeckung durch diese Pflanzen lag, wenn nicht anders erwähnt, bei etwa 55 %.

Die Spritzflüssigkeit mit einer Wirkstoffkonzentration von  $c_w = 0,025\%$  wird bei einem regelten Druck von 3 bar mit einer Rundstrahldüse bei bestimmter Düsenhöhe und einer Horizontalgeschwindigkeit von  $v = 0,19\text{ m/s}$  im Raster nach Bild 1 ausgebracht. Der Aufwand an Wirkstoff liegt bei  $20\text{ mg/m}^2$ .

Die Probenahme der Luft geschieht mittels einer Kältefalle, die schon an anderer Stelle beschrieben wurde [3]. Da die Halle über einen Keller verfügt, kann eine Luftprobenahme auch von hier erfolgen. Dabei ist die Höhe der Sondenöffnung über dem Boden einstellbar. Für die Bodenprobe sind U-Schienen gemäß Bild 1 im Boden eingelegt. Sie liefern eine Querschnittsprobe von etwa 1,5 kg. Diese Probe wird nach der Entnahme in einem geschlossenen Behälter vermischt. Dann werden daraus mehrere Einzelproben von je 50 g gezogen und mit Aceton überschichtet.

Bei den Pflanzen werden jeweils 50 g Pflanzenteile als Probe entnommen und ebenfalls mit Aceton überschichtet. Um die Analyseergebnisse auf den Pflanzenbestand beziehen zu können, sind die Blattfläche der Pflanzen je  $\text{m}^2$  Bodenfläche ( $A_{OP}$ ) sowie die Blattfläche der Probe zu ermitteln. Zur Kennzeichnung des Pflanzenbestandes wird weiter die Bodenbedeckung, d.i. die Projektionsfläche der Pflanzen auf dem Boden ( $A_{PB}$ ), bestimmt.

Die chemische Analyse der Proben erfolgt gaschromatographisch durch die LUFA in Hameln. Die jeweiligen Wiederfindungsraten für LINDAN werden für jede Versuchsreihe durch Kalibrierungsversuche ermittelt. Dabei ist anzumerken, daß die Wiederfindungsraten im Boden von der Wirkstoff- und Feuchtigkeitsverteilung sowie weiteren Faktoren abhängen können.

Der zeitliche Ablauf der Messungen beginnt mit der Applikation, die einschließlich der Unterbrechungen beim Wenden im Mittel 9 Minuten dauert. Als Bezugspunkt zur Festlegung der Zeitachse wird das Applikationsende  $t_{Ae}$  gewählt. Die für  $t = 0,1\text{ h}$  nach Beginn bzw. 3 min vor Ende der Applikation in den Bildern angegebenen Werte des Wirkstoffgehaltes in der Luft beziehen sich auf den Atembereich des Anwenders, d.h. die Probenahme ist ortsveränderlich. Diese Werte geben damit auch die mittlere inhalative Belastung während der Applikation an, woraus sich die entsprechende Exposition berechnen läßt [3].

Bei allen ortsfesten Messungen zum Wirkstoffgehalt der Luft erfolgt die Probenahme in der Mittellinie des Versuchsraumes in 2,5 m Abstand von der geschlossenen Stirnseite, wenn nicht anders angegeben. Die Dauer der Luftprobenahme beträgt jeweils 10 min. Der Meßwert wird für  $t > t_{Ae}$  der Mitte des jeweiligen Zeitintervalls zugeordnet. Vorstehende Ausführungen gelten sinngemäß auch für die Entnahme der Boden- und Pflanzenproben. Zur Bilanzierung werden die in den Kompartimenten gemessenen Wirkstoffmengen auf die als eben gedachte Bodenoberfläche (Bodenfläche) bezogen.

### 3. Versuchsergebnisse

#### 3.1 Luft- und Bodenbelastung bei verschiedenen Temperaturen

Die ersten Versuchsreihen wurden bei verschiedenen Solltemperaturen ohne Pflanzenbestand durchgeführt, um einen Einblick in den Verlauf des Wirkstoffgehaltes in den Kompartimenten Luft und Boden zu erhalten.

Die entsprechenden Ergebnisse für die Luft sind in Bild 2 bis 4 dargestellt. Für die Luft zeigt sich, daß nach der Applikation – infolge der Ausbreitung – der Wirkstoffgehalt im Atembereich (Bild 2) ansteigt, um nach einem Maximum abzufallen. Während der Applikation befindet sich der Wirkstoff, soweit man nur die Luft betrachtet, zunächst im Bereich zwischen Düse und Bodenoberfläche. Von hier werden Wirkstoffanteile durch turbulente Ausbreitung nach oben transportiert. Ein gewisser Anteil des

Anstieges ist auch durch Verdunstung von der Bodenoberfläche begründet. Die Abnahme nach dem Maximum erklärt sich vor allem aus der Adsorption an der Bodenoberfläche.

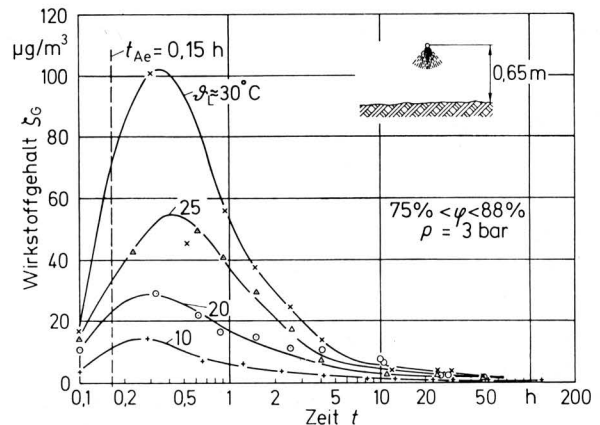


Bild 2. Wirkstoffgehalt (LINDAN) in der Atemluft ( $h = 1,55\text{ m}$ ) als Funktion der Zeit bei verschiedenen Lufttemperaturen; Versuchsraum ohne Pflanzen; Ort der Probenahme: während der Applikation ( $t < t_{Ae}$ ) in Nähe des Anwenders (ortsveränderlich), nach der Applikation ortsfest in der Mittellinie des Versuchsraumes.

Befindet sich der Ort der Probenahme unmittelbar über der Bodenoberfläche, Bild 3, dann ergibt sich erwartungsgemäß ein anderer Kurvenverlauf und anfangs auch ein deutlich höherer Wirkstoffgehalt. Den Verlauf des Wirkstoffgehaltes der Luft über der Höhe für einen bestimmten Zeitpunkt nach der Applikation zeigt Bild 4. Mit solchen Kurven läßt sich die für eine Bilanzierung erforderliche gesamte Wirkstoffmenge in der Luft näherungsweise bestimmen.

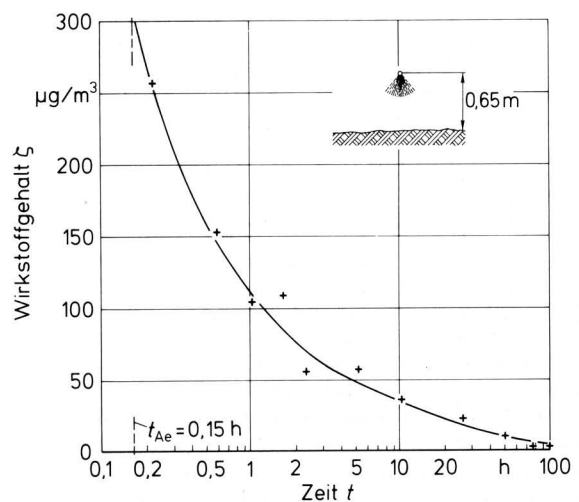
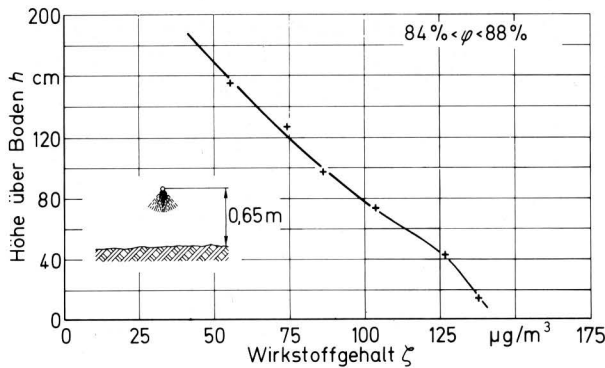


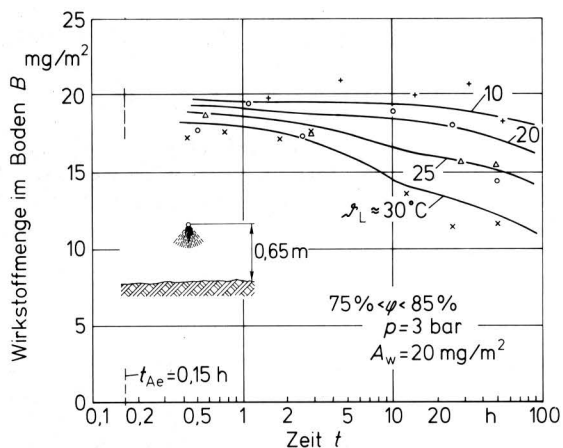
Bild 3. Zeitlicher Verlauf des Wirkstoffgehaltes in der Luft direkt über dem Boden ( $h = 0,05\text{ m}$ ); Versuchsraum ohne Pflanzen;  $\vartheta_L \approx 25\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $79 < \varphi < 84\%$ ,  $A_w = 20\text{ mg/m}^2$ ,  $p = 3\text{ bar}$ ,  $\vartheta_B \approx 23\text{ }^\circ\text{C}$ ; Probenahmeort 1,5 m neben der Mittellinie.



**Bild 4.** Wirkstoffgehalt der Luft als Funktion der Höhe im Zeitpunkt 0,3 h nach Applikationsende; Bedingungen wie bei Bild 3.

Der zeitliche Verlauf des LINDAN-Gehaltes im Boden ist in Bild 5 dargestellt. Um die Streuungen zu zeigen, sind die Meßpunkte angegeben, die jeweils einer Versuchsreihe mit der entsprechenden Temperatur entstammen. Für die Darstellung der Kurven wurden die Ergebnisse mehrerer Versuchsreihen – auch aus verschiedenen Jahren – herangezogen. Die für die gezeichneten Kurven anzunehmende Schwankungsbreite ist kleiner als  $\pm 10\%$ .

Der Gradient der Wirkstoffabnahme im Boden resultiert aus mehreren sich überlagernden Vorgängen wie Verdunstung, Adsorption und Abbau, die stark temperaturabhängig sind. Dieser Komplex von Einflußfaktoren ist im Schrifttum wiederholt behandelt worden, so daß sich auf eine Diskussion verzichten läßt [1].



**Bild 5.** Zeitlicher Verlauf der flächenbezogenen Wirkstoffmenge im Boden; Versuchsraum ohne Pflanzen; Bodentemperatur im Mittel  $2^\circ\text{C}$  niedriger als Lufttemperatur.

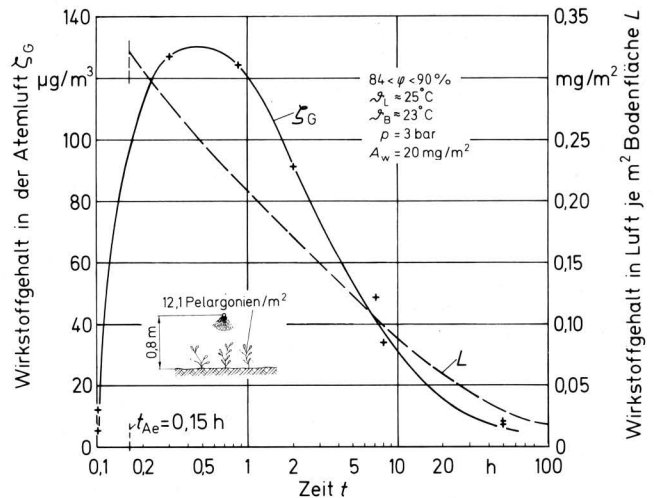
### 3.2 Versuche mit Pflanzenbestand

Die Ergebnisse über den zeitlichen Verlauf des Wirkstoffgehaltes in Luft, Pflanze und Boden zeigen Bild 6 bis 8. Die Luftbelastung (Bild 6) liegt über den Werten beim Spritzen ohne Pflanzenbestand (Bild 2). Dies erklärt sich durch Abspritzvorgänge beim Auftreffen der Tropfen auf Blattflächen sowie durch die stärkere Verdunstung durch die größeren kontaminierten Oberflächen.

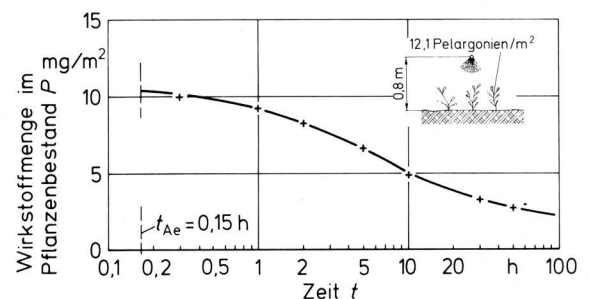
Die Abnahme der Wirkstoffmenge auf den Pflanzenoberflächen (Bild 7) ist vorwiegend durch Verdunstung begründet, zu einem gewissen Teil auch durch Abbau. Die Bodenbelastung (Bild 8) steigt nach der Applikation deutlich an, und zwar infolge der Adsorption aus der Luft. Diese Adsorption findet deswegen besonders an der Bodenoberfläche statt und nicht an den raumumschlie-

ßenden Wänden, weil die Bodentemperatur bei den Versuchen, um den Bedingungen in der Praxis zu entsprechen, um einige  $^\circ\text{C}$  unter der Lufttemperatur liegt.

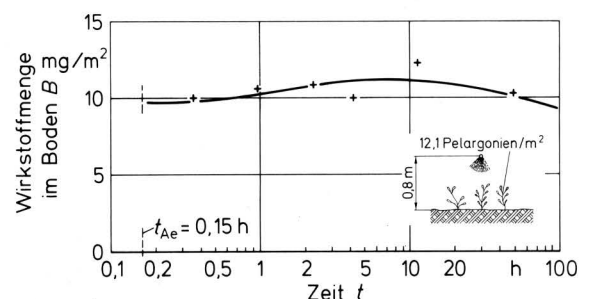
Der anfängliche Anstieg des Wirkstoffgehaltes im Boden nach der Applikation bei ruhender Luft und Pflanzenbestand wurde zusätzlich dadurch abgesichert, daß während der Ausbringung sorgfältig abgedeckte Bodenproben auf den Wirkstoffgehalt analysiert wurden.



**Bild 6.** Wirkstoffgehalt der Luft im Atembereich als Funktion der Zeit; Versuchsraum mit Pelargonien von etwa 0,3 m Höhe, Bodenbedeckung  $A_{PB} \approx 0,55$ ; die flächenbezogene Wirkstoffbelastung der Luft  $L$  wurde näherungsweise berechnet.



**Bild 7.** Wirkstoffmenge auf den Pflanzen, bezogen auf die Bodenfläche, in Abhängigkeit von der Zeit; Bedingungen wie bei Bild 6.



**Bild 8.** Wirkstoffmenge im Boden, auf Bodenoberfläche bezogen, in Abhängigkeit von der Zeit; Bedingungen wie bei Bild 6.

### 3.3 Gesamtbilanz

Eine Gesamtbilanzierung der Wirkstoffmengen bzw. -verläufe in absoluten Werten zeigen Bild 9 und Tafel 1, in relativen Werten – bezogen auf den Anfangswert im jeweiligen Kompartiment – Bild 10, und dort in zwei verschiedenen geteilten Koordinatensystemen. Bei der Bewertung ist daran zu denken, daß bei logarithmischer Teilung die Kurven wenig anschaulich sind. Legt man die reinen Zahlenwerte zugrunde, so zeigt sich, daß die Abnahme des Wirkstoffgehaltes insgesamt gesehen unmittelbar nach der Applikation am stärksten ist und sich dann abschwächt. Hieraus ist zu schließen, daß die Abnahme, die in der Gesamtbilanz nur durch Abbau bedingt sein kann, in der Anfangsphase am höchsten ist. Welche Folgerungen ergeben sich aus diesen Ergebnissen?

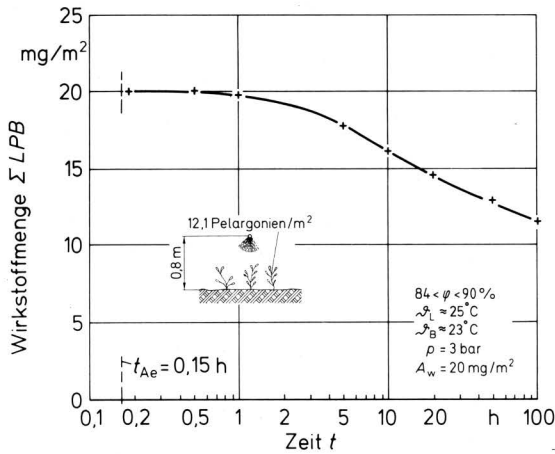


Bild 9. Zeitlicher Verlauf der flächenbezogenen gesamten Wirkstoffmenge in Luft (L), Pflanze (P) und Boden (B) –  $\Sigma$  LPB – aus Bild 6 bis 8.

Zeit nach Applikationsende h	Wirkstoffmenge				Gesamt ( $\Sigma$ LPB) mg/m <sup>2</sup>	%
	Luft (L) mg/m <sup>2</sup>	Pflanzen (P) mg/m <sup>2</sup>	Boden (B) mg/m <sup>2</sup>			
0	0,322	10,5	9,2	20,0	100	
1	0,208	9,0	10,4	19,6	98	
5	0,123	6,4	11,3	17,8	89	
10	0,089	4,8	11,2	16,1	80,5	
50	0,031	2,7	10,2	12,9	64,5	
100	0,0187	2,2	9,3	11,5	57,5	

Tafel 1. Wirkstoffmengen (bezogen auf die Bodenoberfläche) in den Kompartimenten Luft, Pflanze und Boden nach dem Ausbringen von LINDAN in ruhender Luft in Abhängigkeit von der Zeit;  $84\% < \varphi < 90\%$ ,  $\theta_L \approx 25\text{ °C}$ ,  $\theta_B \approx 23\text{ °C}$ ,  $p = 3\text{ bar}$ ,  $A_W = 20\text{ mg/m}^2$ ,  $A_{PB} \approx 0,55$ .

#### 4. Folgerungen aus den Meßwerten

1. In ruhender Luft gehen während der Applikation durch Spritzen im Feldbau weniger als 1 % des Wirkstoffes unmittelbar in die Luft. Bei Luftströmungen wie Wind kann dieser Anteil nach Messungen im Freien bis auf etwa 10 % und mehr ansteigen. Dabei spielt die Tropfengrößenverteilung, die Spritzbalkenhöhe und die jeweilige Temperatur eine maßgebliche Rolle.

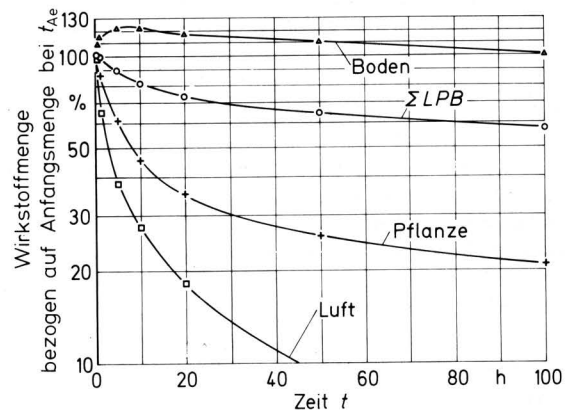
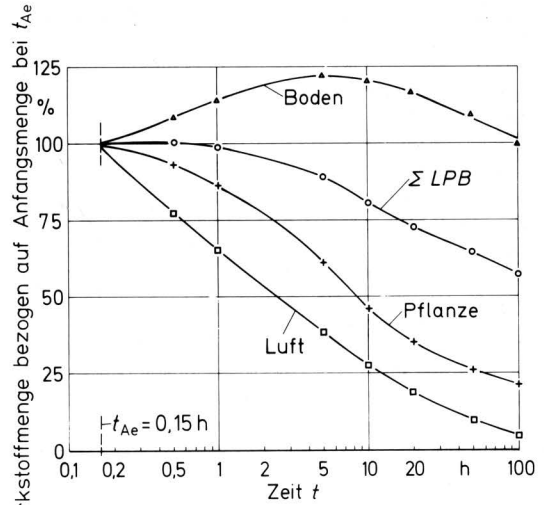


Bild 10. Zeitlicher Verlauf der Wirkstoffmengen in Luft (L), Pflanze (P) und Boden (B) sowie insgesamt  $\Sigma$  LPB (aus Bild 6 bis 9), bezogen auf die jeweilige Menge im Kompartiment direkt nach der Applikation.

oben: log. geteilte Abszisse  
unten: log. geteilte Ordinate

2. Der Belag auf den Pflanzen ist bei den gewählten Versuchsbedingungen und bezogen auf den Aufwand etwa proportional der Bodenbedeckung. Bei den durchgeführten Versuchen lag diese bei etwa  $A_{PB} = 55\%$ . Der von den Pflanzen aufgenommene Anteil steigt anteilig mit der Höhe des Pflanzenbestandes, so daß man für die Bestimmung des Pflanzenbelages zum Zeitpunkt  $t = t_{Ae}$  von der Beziehung:

$$P = A_W A_{PB} F$$

ausgehen kann.

Hierbei ist F ein Korrekturfaktor, mit dem der Einfluß der Pflanzenhöhe erfaßt wird. Bei den Versuchen war  $F \approx 1$ . Es war erwartet worden, daß der Faktor deutlich über 1 liegt. Daß dies unter den Versuchsbedingungen nicht der Fall war, ist darauf zurückzuführen, daß durch Abtropfen der Spritzflüssigkeit von den Pflanzen sowie durch Abspritzen beim Auftreffen von Tropfen auf den Flächen letztlich weniger angelagert wird.

3. Die Bodenbelastung ist etwa proportional dem Anteil der nicht beschatteten Fläche:

$$B = A_W (1 - A_{PB} F)$$

4. LINDAN gilt als recht persistent. Es ist deshalb überraschend, daß dennoch eine beachtliche Abnahme mit der Zeit festzustellen ist, die in der Luft und auf den Pflanzenoberflächen relativ gesehen deutlich höher liegt als im Boden.  
Für die Pflanzenbelastung ist, wie bekannt, die Flüchtigkeit ein sehr aufschlußreiches Kriterium. Im Freien wird die Abnahme des Wirkstoffgehaltes auf den Pflanzen wegen der Sonneneinstrahlung, stärkeren Luftbewegungen und durch Niederschläge deutlich höher liegen, so daß die gemessenen Werte für Umweltmodelle hinsichtlich der Pflanzenbelastung den ungünstigsten Fall der Abnahme beschreiben.
5. Für die Abnahme des Wirkstoffgehaltes in den Kompartimenten und im untersuchten Zeitbereich läßt sich eine eindeutige Halbwertszeit nicht angeben, weil sich mehrere Vorgänge mit unterschiedlichen Halbwertszeiten überlagern. In einem entsprechenden Koordinatennetz würden sich mehrere Geraden ergeben, die zusammengefaßt zu einer Kurve führen. Es sind daher nur Abschätzungen möglich. – Unter den gewählten Bedingungen ( $\vartheta_L = 25\text{ °C}$ ,  $\vartheta_B \approx 23\text{ °C}$ ) liegt die Halbwertszeit für den Wirkstoffgehalt in der Luft bei 3 h und für den auf den Pflanzen bei etwa 10 h. Für den Boden läßt sich durch Extrapolation ein Wert zwischen 400 und 500 h abschätzen. Im Schrifttum findet man vergleichbare, aber auch deutlich höhere Werte.
6. Für den zeitlichen Verlauf der Belastung von Pflanzen, Boden und Luft durch Pflanzenbehandlungsmittel ist die Persistenz der Mittel von bestimmendem Einfluß. Die Messungen bestätigen, daß diese Größe von vielen Faktoren abhängt. Zur Ermittlung repräsentativer Werte fehlen nach Schrifttumrecherchen noch hinreichend einfache und dennoch aussagefähige Testverfahren.
7. Es ist davon auszugehen, daß der Hauptanteil der Pflanzenbehandlungsmittel in den Boden gelangt, wie auch die Modellversuche von *Figge, Klahn u. Koch* [2] zeigen.

Die Untersuchungen geben Einblick in die zeitliche Verteilung der Wirkstoffe beim und nach dem Applizieren von Pflanzenbehandlungsmitteln in und zwischen den Kompartimenten Pflanze, Boden und Luft. Damit stehen weitere Daten für Prognosemodelle zur Verfügung. Als Beitrag zur Klärung der kausalen Zusammenhänge sind sie geeignet, die Entwicklung und Prüfung von Modellen zu unterstützen. Der gemessene Wirkstoffgehalt in der Luft gibt Hinweise auf die Anwenderexposition.

#### Verwendete Formelzeichen

$A_{OP}$	$m^2/m^2$	gesamte Blattfläche der Pflanzen je $m^2$ Pflanzenbestand
$A_{PB}$	$m^2/m^2$	Bodenbedeckung, Projektionsfläche der Pflanzen auf dem Boden bei senkrechtem Lichteinfall je $m^2$ Pflanzenbestand
$A_W$	$mg/m^2$	Aufwand, ausgebrachte Wirkstoffmenge je $m^2$ Bodenfläche
$B$	$mg/m^2$	Wirkstoffmenge im Boden bezogen auf $1\text{ m}^2$ Bodenfläche
$F$		Korrekturfaktor
$h$	m	Höhe über Boden
$h_D$	m	Höhe der Spritzdüse über Boden
$L$	$mg/m^2$	Wirkstoffmenge in der Luftsäule oberhalb eines $m^2$ Bodenfläche
$P$	$mg/m^2$	Wirkstoffmenge auf den Pflanzen je $m^2$ Bodenfläche im Pflanzenbestand
$p$	bar	Spritzdruck (vor der Düse)
$t$	h	Zeit ab Applikationsbeginn
$t_{Ae}$		Zeitpunkt des Applikationsendes
$v$	m/s	Fahrgeschwindigkeit der Düse
$\zeta$	$\mu g/m^3$	Wirkstoffgehalt in der Luft bei $20\text{ °C}$ und $1013\text{ mbar}$
$\zeta_G$	$\mu g/m^3$	Wirkstoffgehalt in der Luft im Atembereich
$\vartheta_B$	$^{\circ}C$	Bodentemperatur, gemessen 2 cm unterhalb der Oberfläche
$\vartheta_L$	$^{\circ}C$	Lufttemperatur
$\varphi$	%	relative Luftfeuchtigkeit

#### Schrifttum

Bücher sind durch • gekennzeichnet

- [ 1 ] • *Ullmann, E.:* LINDAN – Monographie eines insektiziden Wirkstoffs.  
Freiburg im Breisgau: K. Schillinger 1973.
- [ 2 ] • *Figge, K., J. Klahn u. J. Koch:* Chemische Stoffe in Ökosystemen.  
Stuttgart/New York: Gustav Fischer 1985.
- [ 3 ] *Batel, W.:* Zur Anwenderexposition beim Ausbringen von Pflanzenbehandlungsmitteln durch Spritzen und Sprühen.  
Grundl. Landtechnik Bd. 34 (1984) Nr. 2, S. 33/53.

## Energiebilanz beim Einsatz rotierender Bodenbearbeitungswerkzeuge mit horizontaler Drehachse

Von Wolf-Dieter Kalk, Otto Bosse und Christoph Bernard, Müncheberg\*)

DK 631.317/.319:531.2

\*) Dr. sc. techn. W.-D. Kalk, Dr. agr. O. Bosse sind wissenschaftliche Mitarbeiter; Dr. sc. agr. C. Bernard ist wissenschaftlicher Abteilungsleiter im Forschungszentrum für Bodenfruchtbarkeit Müncheberg (Direktor: Prof. Dr. sc. P. Kundler) der Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR.

Zur Energiebilanz beim Einsatz rotierender Bodenbearbeitungswerkzeuge mit horizontaler Drehachse fehlte eine allgemeine, für den gesamten Schlupfbereich geltende Gleichung.  
Bleiben die Energieverluste im Getriebe unberücksichtigt, gilt eine allgemeine Gleichung unabhängig davon, ob die Energieübertragung zum Werkzeug mittels Fahrtrieb und/oder Zapfwelle erfolgt. Bezieht man die Energieverluste im Getriebe ein, müssen wegen der bei treibenden und bei getriebenen Werkzeugen möglichen Energierückführungen 3 Gültigkeitsbereiche für die abgeleitete Gleichung unterschieden werden.