# Abdrift des Pflanzenschutzmittelaustrags auf Nichtzielflächen

## Modellierung und Berechnung

**Martin Bachmaier**[1)] und **Niels Kohlschütter**[2)]
[1)] Abteilung für Biogene Rohstoffe und Technologie der Landnutzung, Technische Universität München, Freising
[2)] Jetzt: Institut für Organischen Landbau (IOL), Universität Bonn

*Anhand der Abdrifteckwerte für Einfachanwendungen beim Ackerbau der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft (BBA) wird die Verteilung des Pflanzenschutzmittels aus der Flachstrahldüse einer Spritze durch eine abgeschnittene Cauchy-Verteilung modelliert, nämlich durch ein auf einem Kreissektor gleich verteiltes Spritzen bis zu 90° in Hauptwindrichtung und bis zu einem kleineren Winkel φ gegen die Hauptwindrichtung. Unter der idealisierten Annahme, dass die Düsen am Spritzgestänge ein Kontinuum bilden, woraus ein gleichmäßiges Spritzbild resultiert, wird dann die insgesamt in Hauptwindrichtung abgedriftete Menge an Pflanzenschutzmitteln (PSM) berechnet. Anschließend wird die Abdrift auf bestimmte Nichtzielflächen, z.B. benachbarte ökologisch bewirtschaftete Flächen, ermittelt. Die Berechnungen sind im DOS-Programm Abtrift.exe und im Windows-Programm QuickTrift implementiert. Sie stehen im Internet unter www.QuickTrift.de bzw. www.agridata.de/agrardos/agrardos/abtrift.html zur Verfügung. Am Ende wird noch ein kurzer Ausblick über die Anwendung dieser Berechnungen in Bezug auf ökologisch bewirtschaftete Flächen geboten.*

**Schlüsselwörter**
Abtrift, QuickTrift, Pflanzenschutzmittel, Zielfläche, Nichtzielfläche, Cauchy-Verteilung

### Einleitung und technische Daten

Die Abdrift bei der Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln (PSM) wurde vor allem im Zusammenhang mit Oberflächengewässern untersucht und diskutiert. In Verbindung mit der größer werdenden Fläche des ökologischen Landbaus gewinnt der Nutzungskonflikt zwischen konventionell und ökologisch bewirtschafteten Flächen an Bedeutung. Sowohl bei aquatischen Systemen als auch bei ökologisch bewirtschafteten Flächen ist neben den abgedrifteten PSM-Mengen in verschiedenen Abständen zur Ausbringungsgrenze, die in bisherigen Versuchen der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft (BBA) ermittelt wurden, die Menge an insgesamt auf die Nichtzielfläche abgedrifteten PSM von Interesse.

Bei den Versuchen der BBA, die zu den verwendeten Daten führten, wurde ein Flüssigkeitsaufwand von 300 l/ha bei einer Fahrgeschwindigkeit von 6 km/h und Drücken zwischen 2,4 und 2,5 bar eingestellt. Die Windgeschwindigkeiten lagen zwischen 0,8 m/s und 3,6 m/s, die Temperaturen zwischen 10 °C und 17 °C bei Luftfeuchten von 57 bis 83 %. Bei den Feldspritzen handelt es sich um konventionelle Geräte ohne Luftunterstützung. Verlustmindernde Technik wird hier nicht eingesetzt. Es wurden 16 Abdriftversuche durchgeführt, davon acht auf unbewachsenem Boden und acht in Getreidebeständen in späten Wachstumsstadien. Die verwendeten Abdrifteckwerte sind Mittelwerte aus frühen und späten Wachstumsstadien. Als Nachweisstoffe wurden OB21 Pflanzenschutzmittel „Cupravit“ Zulassungsnummer 21356 und BSF Brillantsulfoflavin verwendet [1].

Im Folgenden wird der Anteil der Pflanzenschutzmittelabdrift als Funktion des Abstandes zur Feldgrenze so modelliert, dass er mit den Abdrifteckwerten für Einfachanwendungen der BBA [2] möglichst genau übereinstimmt. Anhand dieser Modellierung wird dann die insgesamt von der Zielfläche abgedriftete Menge Spritzbrühe, aber auch die auf gewisse Nichtzielflächen (z.B. aquatische Systeme oder ökologisch bewirtschaftete Flächen) gedriftete Menge in Abhängigkeit der Größe von Ziel- und Nichtzielfläche und der ausgebrachten Menge an PSM berechnet.

### Modellierung des Pflanzenschutzmittelaustrags

#### Der infinitesimale Ansatz

Im Modell enthält das Gestänge ein Kontinuum von unendlich vielen Düsen mit infinitesimal kleinem Abstand $d\mu$. Es wird also angenommen, dass das Gestänge parallel zur $x$-Achse liegt und somit der Traktor mit der Spritze in Richtung der $y$-Achse fährt. Die Zielfläche ist dabei ein rechteckiges Feld der Breite $b$ und der Länge $l$, das links von der $y$-Achse liegt und an sie angrenzt, somit also nur negative $x$-Werte von $-b$ bis 0 annehmen kann, während der interessierenden Nichtzielfläche die positiven $x$-Werte zugeordnet werden.

Nun wird, wie **Bild 1** zeigt, an einer Stelle $x$ der $x$-Achse fiktiv ein rechteckiges Gefäß mit infinitesimal kleiner Breite $dx$ in $x$-Richtung und infinitesimal kleiner Länge $dy$ in $y$-Richtung aufgestellt, wobei $x$ außerhalb der Zielfläche liegt.

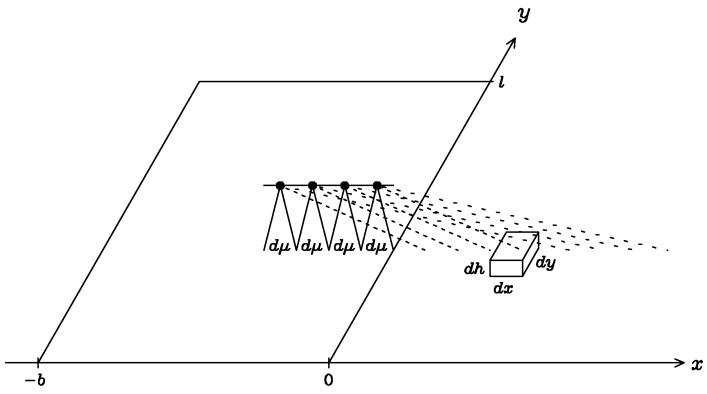



Bild 1: Variablen und Parameter der Modellierung

Die in dieses Gefäß fallende kubisch-infinitesimal kleine Menge $d^3$PSM aus einer Düse, die an der $x$-Achsen-Stelle μ den Acker in $y$-Richtung entlangfährt und dabei auch am Gefäß vorbeifährt, hat dann den Inhalt

$$d^3\mathrm{PSM} = dx \cdot dy \cdot dh \qquad (1)$$

Die infinitesimal kleine Höhe $dh$ hängt dann nicht nur von der Stelle $x$ des Gefäßes und der $x$-Koordinate μ der Düse, sondern auch vom infinitesimal kleinen Abstand $d$μ zweier benachbarter Düsen ab. Diese Abhängigkeit soll im Folgenden ebenfalls infinitesimal angesetzt werden.

Im vorliegenden Versuch wurde das Feld mit einer Intensität von λ = 300 l/m$^2$ PSM bespritzt. Wenn keine Abdrift vorhanden ist, entspricht das einer Höhe von 0,3 m$^3$ / (10000 m$^2$) = 3 · 10$^{-5}$ m, also einem 0,03 Millimeter hohen Spritzfilm auf dem Acker. Fiele also die Spritzbrühe aus der Spritze bloß senkrecht herunter, ohne zerdüst zu werden, dann würde sich an der Stelle μ der Düse die besagte Höhe λ = λ(μ) = 0,03 mm ergeben. Diese von der Düse μ verursachte Gesamthöhe λ = λ(μ) verteilt sich aber aufgrund der Zerstäubung der Flachstrahldüse auf die Parallele zur $x$-Achse. Sie ergibt sich also als Summe (Integral) infinitesimal kleiner Höhen $dh = dh(x,\mu)$ über alle $x$-Werte des Ackers:

$$\lambda = \lambda(\mu) = \int_{x=-\infty}^{+\infty} dh(x,\mu) = \int_{x=-\infty}^{+\infty} dh \qquad (2)$$

Denkt man sich nun den Acker links und rechts unendlich breit, so dass keine Abdrift mehr erfolgen kann, dann lässt sich die Höhe λ der gespritzten Menge an einer bestimmten Stelle $x$ auch als Summe aller infinitesimal kleinen auf die Stelle $x$ gespritzten Höhen aus allen Düsen μ bestimmen:

$$\lambda = \lambda(x) = \int_{\mu=-\infty}^{+\infty} dh(x,\mu) = \int_{\mu=-\infty}^{+\infty} dh \qquad (3)$$

Natürlich ist bei unendlich breitem Acker diese Höhe λ($x$) an jeder Stelle $x$ des Ackers gleich groß, nämlich λ. Dasselbe gilt für die aus einer Düse der Stelle μ ausgesandte Gesamthöhe λ(μ).

**Modellierung der Verteilung der PSM aus einer Düse**

Wir modellieren die Abhängigkeit von $dh$ von $x$ und μ mit Hilfe einer Dichtefunktion $f_{\mu,\sigma,\varphi}$ einer abgeschnittenen Cauchy-Verteilung, die erst in (7) definiert wird. Es sei

$$dh = dh(x,\mu) = \lambda \cdot f_{\mu,\sigma,\varphi}(x)\,dx \qquad (4)$$

bzw.

$$dh = dh(x,\mu) = \lambda \cdot f_{\mu,\sigma,\varphi}(x)\,d\mu \qquad (5)$$

Da die Fläche unter jeder Dichtefunktion gleich 1 ist, folgt sofort, dass die so modellierten Abhängigkeiten die Integralbedingungen in (2) bzw. (3) erfüllen.

Beziehen wir uns im Folgenden wieder auf das aufgestellte Gefäß mit Breite $dx$ und Länge $dy$. Die infinitesimale Höhe $dh$ unter Betrachtung einer einzelnen Düse ist proportional zur infinitesimalen „Breite“ dμ dieser Düse, d.h. zum jeweils gleichen infinitesimalen Abstand dμ zweier benachbarter Düsen. Denn je größer dieser ist, umso stärker muss die einzelne Düse spritzen, um die Intensität λ = 0,03 mm aufrecht zu erhalten. $dh$ hängt aber auch davon ab, wie weit die Stelle $x$ des Gefäßes von der Stelle μ der Düse entfernt ist, und natürlich auch von der Stärke σ der Zerstäubung der Düse. Diese Abhängigkeit wird durch $f_{\mu,\sigma,\varphi}(x)$ ausgedrückt. Dabei ist σ i. Allg. nicht die Standardabweichung, die bei einer Cauchy-Verteilung (siehe [3]) oder einer abgeschnittenen Cauchy-Verteilung gar nicht existiert, sondern ein anderes Maß für die Zerstäubungsbreite der Düse. Im Modell entspricht σ dem Abstand der Modell-Düse vom Boden.

Die Modellierung der Verteilung des Spritzmittels aus einer Düse durch eine abgeschnittene Cauchy-Verteilung entspricht der Gleichverteilung der Spritzwinkel. Da das Düsen jedoch vom Wind beeinflusst wird, gehen wir davon aus, dass die Düse bis zu einem Winkel φ nach links (Westen) zerstäubt, aber wegen des herrschenden Westwindes bis zu einem Winkel von 90 ° = π/2 nach rechts (Osten). Alle dazwischen liegenden Winkel werden mit gleicher Wahrscheinlichkeitsdichte angenommen. Dies ist in **Bild 2** durch die Gleichverteilung der Spritzstrahlen auf dem dargestellten Kreissegment erkennbar.

Natürlich führt das zu keiner Gleichverteilung auf der $x$-Achse, wie ebenfalls aus Bild 2 erkennbar ist. Die Verteilung auf der $x$-Achse entspricht einer abgeschnittenen Cauchy-Verteilung, deren Verteilungsfunktion $F_{\mu,\sigma,\varphi}$ man sofort angeben kann:

$$F_{\mu,\sigma,\varphi}(x) = \begin{cases} 0 & \text{für } x < \mu - \sigma\cdot\tan\varphi \\ \dfrac{\varphi + \arctan\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)}{\varphi + \frac{\pi}{2}} & \\ & \text{für } x \geq \mu - \sigma\cdot\tan\varphi \end{cases} \qquad (6)$$

Daraus können wir die Dichtefunktion $f_{\mu,\sigma,\varphi}$ als die Ableitung von $F_{\mu,\sigma,\varphi}$ nach $x$ herleiten:

$$f_{\mu,\sigma,\varphi}(x) = \begin{cases} 0 & \text{für } x < \mu - \sigma\cdot\tan\varphi \\ \dfrac{1}{\sigma\cdot\left(\varphi+\frac{\pi}{2}\right)} \cdot \dfrac{1}{1+\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} & \\ & \text{für } x \geq \mu - \sigma\cdot\tan\varphi \end{cases} \qquad (7)$$

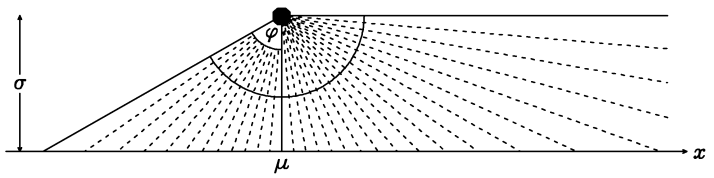



Bild 2: Abgeschnittene Cauchy-Verteilung mit φ = 60 ° = π/3

Da die Ergebnisse des Versuchs durch $\sigma$ = 8,2 cm besonders gut modelliert werden, ist klar, dass das angegebene Modell eine starke Vereinfachung der Wirklichkeit ist. Die Düsen befinden sich nämlich wesentlich weiter als 8,2 cm, nämlich mindestens 50 cm über dem Boden. Außerdem sprüht jede Düse in einem Winkel von 110 ° bis 120 °, d.h. 55 ° bis 60 ° nach beiden Seiten. In **Bild 3** befindet sich die realitätsangepasste Düse genau 50 cm über dem Boden und spritzt gleich verteilt in alle Winkel bis zu 57,5 ° nach beiden Seiten. In Fahrtrichtung streut die Düse überhaupt nicht, da heute fast ausschließlich nur noch Flachstrahldüsen verwendet werden. Die in Bild 3 eingezeichnete Flachstrahldüse mit einem Streuwinkel von 115 ° ist also durchaus realistisch. Bild 3 zeigt, wie sich sozusagen die Spritzstrahlen aus einer solchen Düse verteilen müssen, um dieselbe Verteilung wie mit dem Modell der abgeschnittenen Cauchy-Verteilung, die nach links nur noch bis zu 70 ° sprüht, zu erreichen. Die Modelldüse befindet sich hier $\sigma$ = 8,2 cm über dem Boden, während die Düse der Realität 50 cm über dem Boden ist und wegen des Westwindes etwas nach links versetzt ist, in Bild 3 um $\sigma$, also um 8,2 cm. Demnach fährt der Spritzenfahrer in Wirklichkeit um 8,2 cm weniger als im Modell an die Grenze heran. Das heißt, die äußerste Düse plus der halbe Düsenabstand liegt um 8,2 cm weiter links als die Stelle $\mu_0$ der äußersten Modelldüse, wobei die Modelldüsen unendlich kleinen Abstand haben. Die Stelle der äußersten Modelldüse ergibt sich nach unserer Parameterwahl zur Anpassung der modellierten Abdriftwerte an die Abdriftwerte im Versuch zu $\mu_0$ = -5,8 cm (siehe Tabelle 1), d.h. dass die äußerste Modelldüse nur bis auf 5,8 cm an die Ackergrenze heranfährt. Da in Bild 3 die reale Düse gegenüber der Modelldüse um 8,2 cm nach links versetzt ist, heißt das, dass der Spritzenfahrer (mit der äußersten Düse plus dem halben Düsenabstand) bis an 5,8 cm + 8,2 cm = 14 cm an die Grenze heranfährt. Ein solches Verhalten ist durchaus plausibel, zumal sich die Wirkungsbreiten der Düsen überlappen, man also mit dem äußersten Streubereich der äußersten Düse über die Grenze zielen müsste, um die Grenze in dem Sinn zu erreichen, dass wenn man sie genau so von der anderen Seite zu erreichen suchte, eine ungefähre Gleichverteilung der PSM im Bereich links und rechts der Grenze gesichert wäre. Dies ist eben der Fall, wenn die äußerste Düse nur einen halben Düsenabstand von der Grenze entfernt liegt. So wird also der Spritzenfahrer, der gewillt ist, dem Versuch entsprechend der Grenze entlang zu fahren, lieber ein wenig Abstand halten, da er ja nicht absichtlich mit dem Spritzbereich der äußersten Düse über die Grenze hinausspritzen will. Die starke und in Hauptwindrichtung noch verstärkte Streuung der Düsen, die eben auch für die Düse an der Grenze zutrifft, schwingt im Unterbewusstsein des Fahrers mit, sodass er sich einem gewissen Trend, sich von der Grenze doch ein wenig fernzuhalten, nicht entziehen kann.

Die Spritzstrahlen der Düse in der Realität werden durch die Erdanziehungskraft nach unten abgelenkt und durch den Wind nach rechts (Osten). Es wirkt also eine Kraft nach rechts unten. Bild 3 macht durchaus glaubhaft, dass dermaßen abgelenkte Strahlen sich ungefähr wie die Strahlen der Modelldüse verteilen können. Es wird eben ein von Wind und Erdanziehungskraft beeinflusstes Düsen nach unten durch ein von Wind und Erdanziehungskraft unbeeinflusstes Spritzen in einem größeren Sektor (nach Osten bis zu $\varphi$ = 70 ° und nach Westen bis zu 90 °) aus kleinerer Entfernung angenähert. Freilich hat diese Approximation auch gewisse Schwächen. Dennoch wird die sehr starke Übereinstimmung der tatsächlichen Abdriftwerte mit unseren Modellwerten in Tabelle 1 bestätigen, dass die wahre Verteilung der Spritzbrühe über die *x*-Achse eine starke Ähnlichkeit mit der Verteilung unseres stark vereinfachenden Modells in Bild 2 haben muss.

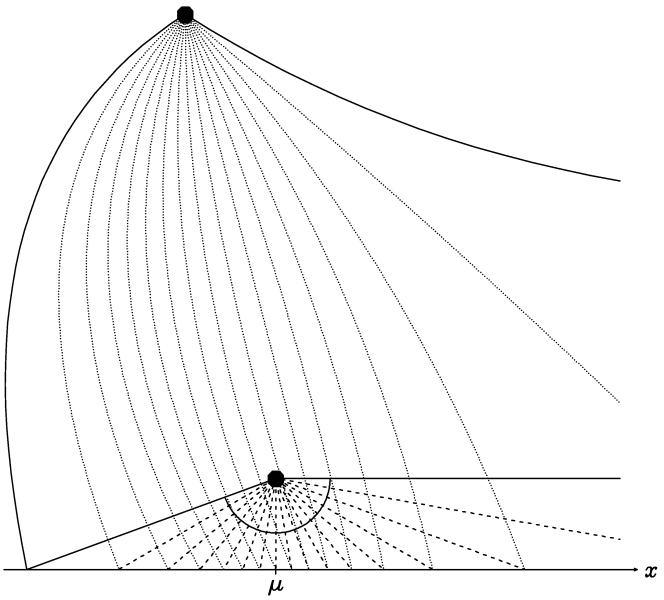



Bild 3: Modelldüse und wirkliche Düse

## Das Finden der Modellparameter aus den Versuchsergebnissen

In diesem Abschnitt wollen wir die Modellparameter $\mu_0$, $\sigma$ und $\varphi$ so bestimmen, dass die Versuchsergebnisse damit besonders gut modelliert werden können.

### Die Versuchsbeschreibung

Im Versuch wurden Gefäße in Abständen bis zu 100 Metern aufgestellt und der darin enthaltene Anteil der Abdrift gemessen, wobei die Spritze so viele Strecken gefahren ist, bis keine Abdrift mehr erkennbar war. Idealisiert heißt das, dass von einem unendlich breiten Acker ausgegangen wurde, also $b = \infty$. Die Menge, die in ein oben beschriebenes Gefäß im Abstand *x* zur Ackergrenze fällt, berechnet sich durch Summation der ausgebrachten Mengen aller über den Acker gefahrenen Düsen im Modell, wobei mehrfache Befahrung einer Düse auch mehrfach gezählt wird. Da die Düsen bei der Modellierung ein Kontinuum entlang der unendlichen Ackerbreite bilden, wird diese Summation zur Integration von $\mu = -\infty$ bis zur Ackergrenze 0 (d.h. $\mu_0 = 0$) oder nur bis zu einem negativen $\mu_0$ nahe an der Ackergrenze ($\mu_0 < 0$, $\mu_0 \approx 0$). Letzteres kann der Fall sein, wenn der Landwirt zur Verringerung der

Abdrift in Bezug auf das modellierte μ, das ohnehin bereits nach rechts versetzt ist (siehe Bild 3), nicht ganz an die Ackergrenze heranfährt.

### Die Höhe der Abdrift im Gefäß

Gemäß der Versuchsbeschreibung ergibt sich der Inhalt des Gefäßes zu

$$\text{Inhalt} = \int_{\mu=-\infty}^{\mu_0} d^3\text{PSM} = \\ = \int_{\mu=-\infty}^{\mu_0} dx \cdot dy \cdot dh = dx \cdot dy \cdot \int_{\mu=-\infty}^{\mu_0} dh \quad (8)$$

Dabei bezeichnet das letzterwähnte Integral

$$h_{]-\infty,\mu_0]}(x) := \int_{\mu=-\infty}^{\mu_0} dh = \\ = \int_{\mu=-\infty}^{\mu_0} \lambda \cdot f_{\mu,\sigma}(x)\, d\mu \quad (9)$$

die interessierende Höhe, die sich im Gefäß an der Stelle $x$ durch die Abdrift der Modell-Düsen des Bereichs ]-∞, $\mu_0$] ergeben hat. Da die Stellen der Modell-Düsen μ, über die integriert wird, wegen $\mu_0 \le 0$ stets im nichtpositiven Bereich liegen, das Gefäß aber an einer Stelle x>0 steht und φ zwischen 0 und π/2 liegt, werden wir bei den folgenden Berechnungen hinsichtlich $f_{\mu,\sigma,\varphi}$ und $F_{\mu,\sigma,\varphi}$ in (7) und (6) stets beim Fall $x \ge \mu - \sigma \cdot \tan\varphi$ landen.

$h_{]-\infty,\mu 0]}(x)$ errechnet sich somit zu

$$h_{]-\infty,\mu_0]}(x) = \int_{\mu=-\infty}^{\mu_0} \lambda \cdot f_{\mu,\sigma,\varphi}(x)\, d\mu \quad (10)$$

$$= \frac{\lambda}{\sigma(\varphi+\frac{\pi}{2})} \cdot \int_{\mu=-\infty}^{\mu_0} \frac{1}{1+\left(\frac{\mu-x}{\sigma}\right)^2} d\mu$$

$$= \frac{\lambda}{\sigma(\varphi+\frac{\pi}{2})} \cdot \left[\sigma \cdot \arctan\left(\frac{\mu-x}{\sigma}\right)\right]_{\mu=-\infty}^{\mu_0}$$

$$= \frac{\lambda}{\varphi+\frac{\pi}{2}} \cdot \left[\frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{x-\mu_0}{\sigma}\right)\right]$$

$$= \lambda \cdot (1 - F_{\mu_0,\sigma,\varphi}(x))$$

### Bestimmung der Modellparameter aus dem Vergleich der prozentualen Abdriftanteile in Modell und Versuch

Die Versuchswerte liefern uns aber die prozentualen Anteile der Abdrift im Gefäß mit Abstand $x$ bezogen auf die pro Flächeneinheit ausgebrachte Menge 300 l/ha, wobei sich diese Angabe auf die insgesamt ausgebrachte Menge im Verhältnis zur Zielfläche bezieht. Die durchschnittlich bei dieser Zielfläche angekommene Menge ist ja wegen der Abdrift ein bisschen geringer. Diese 300 l/ha entsprechen dem angestrebten Spritzfilm mit einer Höhe von λ = 0,03 mm. Um den Anteil der auf den Punkt $x$ abgedrifteten Menge im Modell zu erhalten, müssen wir die modellierte Höhe der Abdrift im Punkt $x$ noch durch die geplante Höhe von λ = 300 l/ha = 0,03 mm dividieren. Damit ergibt sich unter unseren Voraussetzungen $x \ge 0$ und $\mu_0 \le 0$ sowie $0 \le \varphi \le \pi/2$ im Modell der Anteil der in Punkt $x$ abgedrifteten Menge zu

$$\text{Abdriftanteil}_{]-\infty,\mu_0]}(x) = \\ = \frac{h_{]-\infty,\mu_0]}(x)}{\lambda} = 1 - F_{\mu_0,\sigma,\varphi}(x) \quad (11)$$

Um das Modell möglichst gut der Wirklichkeit anzupassen, müssen also nur noch die Parameter $\mu_0$, σ und φ so gewählt werden, dass erstens die an den jeweiligen Abständen $x$ gemessenen Abdriftanteile mit den Modellwerten 1 - $F_{\mu,\sigma,\varphi}(x)$ einzeln gesehen möglichst gut übereinstimmen, zweitens die Summe der Abdriftanteile multipliziert mit den Abständen des Gefäßes ziemlich gut mit der entsprechenden Summe im Modell übereinstimmt (um also stete Unter- bzw. Überschreitung der Modellwerte zu vermeiden) und dass drittens die Parameter auch anschaulich vertretbar sind, dass also die Modellverteilung durch eine tatsächliche Verteilung aus größerer Höhe der Düse angenähert werden kann, wie das in Bild 3 gezeigt wird. Dazu sollte $\mu_0$ nahe bei 0 sein, da man in einem Versuch doch davon ausgehen sollte, dass man mit dem Pflanzenschutzmittel annähernd bis an die Grenze des Ackers gezielt hat. Der Winkel φ sollte echt zwischen 0 und π/2 liegen. Es ergibt sich mit $\mu_0$ = -5,8 cm = -0,058 m und dem Skalierungsparameter σ = 8,2 cm = 0,082 m, der dem Abstand der Modelldüse vom Boden entspricht, sowie mit dem Winkel φ = 70 ° = 1,22173 eine sehr gute Anpassung der Modellwerte an die Werte im Versuch, wie **Tabelle 1** zeigt.

Tabelle 1 enthält die Prozentzahlen der Modellwerte auf so viele Stellen genau wie die angegebenen Eckwerte der BBA. Auf diese Stellenzahl bezogen stimmen alle Modellwerte bis auf einen einzigen, der an der letzten Stelle um 1 abweicht, mit den gemessenen Werten der BBA überein. Zusätzlich sind in dieser Tabelle noch die von der BBA extrapolierten Werte für größere Entfernungen enthalten. Als solche wurden sie aber nicht zur Bestimmung der Modellparameter herangezogen, da sie eben keine Versuchswerte, sondern nur extrapolierte Werte sind, deren Bildungsgesetz nicht publiziert und damit auch nicht begründet ist. Dennoch trifft die BBA-Extrapolation unsere Modellwerte einigermaßen gut.

Tabelle 1: Die Güte der Modellierung der prozentualen Abdriftwerte durch die abgeschnittene Cauchy-Verteilung

| **Abstand *x* zur Zielfläche** | **1 - $F_{\mu 0,\sigma,\varphi}$ (*x*) mit $\mu_0$ = - 0,058 m, σ = 0,082 m und φ = 70° = 1,22173** | **Abdrifteckwerte der BBA** | |
|---|---|---|---|
| 1 m | 0,0276990 = **2,77 %** | **2,77 %** | i |
| 5 m | 0,0058050 = **0,58 %** | **0,57 %** | m |
| 10 m | 0,0029194 = **0,29 %** | **0,29 %** | |
| 15 m | 0,0019501 = **0,20 %** | **0,20 %** | V |
| 20 m | 0,0014640 = **0,15 %** | **0,15 %** | e |
| 30 m | 0,0009769 = **0,10 %** | **0,10 %** | r |
| 40 m | 0,0007331 = **0,07 %** | **0,07 %** | s |
| 50 m | 0,0005866 = **0,06 %** | **0,06 %** | u |
| 70 m | 0,0003912 = **0,04 %** | **0,04 %** | c |
| 100 m | 0,0002935 = **0,03 %** | **0,03 %** | h |
| 125 m | 0,0002348 = *0,023 %* | *0,025 %* | |
| 150 m | 0,0001957 = *0,020 %* | *0,021 %* | |
| 175 m | 0,0001678 = *0,017 %* | *0,018 %* | *von BBA extrapoliert* |
| 200 m | 0,0001468 = *0,015 %* | *0,016 %* | |
| 225 m | 0,0001305 = *0,013 %* | *0,014 %* | |
| 250 m | 0,0001174 = *0,012 %* | *0,012 %* | |

Tabelle 1 zeigt zwar die erstaunlich gute Übereinstimmung der modellierten Werte mit den gemessenen. Man muss allerdings zugestehen, dass die Parameter $\mu$ = -5,8 cm und vor allem $\varphi$ = 70 ° sehr unsicher bestimmt sind. Nur von $\sigma$ = 8,2 cm darf man sehr wenig abweichen (weniger als 1 cm). Variierte man $\varphi$ etwa zwischen $\varphi$ = 30 ° und $\varphi$ = 90 °, ließen sich mit entsprechendem $\mu_0$ und nur wenig verändertem $\sigma$ ebenfalls ziemlich gute Übereinstimmungen der modellierten mit den teils nur sehr ungenau gemessenen Werten ermitteln, wenn auch nicht so gute wie die in Tabelle 1 errechneten, die zudem noch durch die Anschauung in Bild 3 gestützt sind. Wollte man aber die drei Modellparameter etwas schärfer bestimmen, bräuchte man im Versuch vor allem Gefäße näher an der Grenze und sogar direkt an der Grenze, wo die Abdrift maximal ist. Damit könnte der Parameter $\varphi$, der auf den nach Osten driftenden Anteil schließen lässt, sowie der Parameter $\mu_0$, der anzeigt, wie nah man im Modell an die Grenze herangefahren ist, wesentlich genauer bestimmt werden. Wenn dann noch die prozentualen Abdriftwerte in den weit entfernten Gefäßen genauer als auf nur eine gültige Dezimale bestimmt werden, dient das vor allem einer genaueren Bestimmung des Streuparameters $\sigma$. In einem so angelegten Versuch könnten also alle drei Modellparameter wesentlich genauer bestimmt werden.

## Die Berechnung der gesamten Abdrift von der Zielfläche

Nun können wir die so gefundenen Modellparameter verwenden, um die insgesamt (in einer Richtung) von der Zielfläche abgedriftete Menge, aber später auch die auf eine bestimmte Nichtzielfläche gedriftete Menge an PSM zu berechnen, wenn man einen Acker der Breite $b$ spritzt. Bei der Berechung der gesamten Abdrift von der Zielfläche darf die Ackerbreite $b$ nicht mehr gleich unendlich sein, sonst würde absolut gesehen unendlich viel von der Zielfläche abdriften, prozentual gesehen dagegen 0 %.

Die Berechnungen sind allgemeiner Natur, gelten also nicht nur für die aus den Versuchen der BBA ermittelten Parameter $\mu_0$, $\sigma$ und $\varphi$. Auf letztere beziehen sich aber die Beispiele in Tabelle 2 und 3.

### Die absolute Abdrift

Um die absolute Abdrift der ausgebrachten Menge zu berechnen, müssen wir über die ganze Breite rechts von der Zielfläche, also von $x = 0$ bis $\infty$ integrieren, hinsichtlich der $y$-Koordinate dagegen nur von 0 bis zur Länge $l$ des Ackers, da von einer Abdrift nach Süden oder Norden nicht ausgegangen wird. Eine Höhe des Spritzfilms entsteht aber erst, wenn noch zusätzlich über alle Modell-Düsen entlang der negativen $x$-Achse im Bereich des Ackers, also von $\mu = -b$ bis $\mu_0$ integriert wird.

Zur Berechnung der gesamten absoluten Abdrift werden im Folgenden die Gleichungen für $dh$ in (5) sowie für $f_{\mu,\sigma,\varphi}(x)$ und $F_{\mu,\sigma,\varphi}(x)$ in (7) bzw. (6) im Bereich $x \geq \mu - \sigma \cdot \tan\varphi$ benötigt. Damit sich die Integration dieser Funktionen von $\mu = -b$ bis $\mu_0$ sowie von x = 0 bis $\infty$ stets auf diesen Bereich bezieht, muss für die Modellparameter

$$\mu_0 \leq \sigma \cdot \tan\varphi \tag{12}$$

gelten. Für negative $\mu_0$ ist diese Bedingung stets erfüllt. Allgemein gelten aber die im Folgenden hergeleiteten Formeln für die Gesamtabdrift auch für positive $\mu_0$, sofern sie nur Bedingung (12) erfüllen. Zur Herleitung dieser Formeln benötigen wir die trigonometrische Beziehung $\arctan x + \operatorname{arccot} x = \pi/2$. Bei der Integration des Arcuskotangens, der Werte zwischen 0 und $\pi$ annimmt, greifen wir auf Bronstein & Semendjajew [4] zurück. Wir erhalten dann Formel (13).

Im Wesentlichen wurde bei der Berechnung von (13) die Dichte der Cauchy-Verteilung, die an den Enden mit der Ordnung $1/x^2$ abnimmt, zweimal integriert, sodass der Logarithmus entstanden ist,

und dieser ist unbeschränkt, sodass die insgesamt abgedriftete Menge bei einem unendlich breitem Acker absolut gesehen unendlich groß ist.

Wegen der Beziehung $\operatorname{arccot} x = \arctan(1/x)$, die nur für $x > 0$, nicht aber für negative $x$ gilt, kann man den unterklammerten Ausdruck $b \operatorname{arccot}(b/\sigma)$ zunächst durch $b \arctan(\sigma/b)$ ersetzen, und da $\arctan x \approx x$ für kleine $x$ ist, letztlich durch $\sigma$, den Grenzwert für $b \to \infty$; denn schon ab $b$ = 1 m Ackerbreite ist das Verhältnis $\sigma/b$ wegen $\sigma$ = 8,2 cm so

$$\begin{aligned}
\text{absAbdrift} &= \qquad (13)\\
&= \int_{x=0}^{+\infty}\int_{y=0}^{l}\int_{\mu=-b}^{\mu_0} dx\cdot dy\cdot \underbrace{\lambda\cdot f_{\mu,\sigma,\varphi}(x)\,d\mu}_{dh}\\
&= \lambda\cdot l\int_{\mu=-b}^{\mu_0}\int_{x=0}^{+\infty} f_{\mu,\sigma,\varphi}(x)\,dx\,d\mu\\
&= \lambda\cdot l\cdot\int_{\mu=-b}^{\mu_0}\left[F_{\mu,\sigma,\varphi}(\infty) - F_{\mu,\sigma,\varphi}(0)\right]d\mu\\
&= \lambda\cdot l\cdot\int_{\mu=-b}^{\mu_0}\left[\frac{\frac{\pi}{2}}{\varphi+\frac{\pi}{2}} - \frac{1}{\varphi+\frac{\pi}{2}}\arctan\left(\frac{-\mu}{\sigma}\right)\right]d\mu\\
&= \frac{\lambda\cdot l}{\varphi+\frac{\pi}{2}}\int_{\mu=-b}^{\mu_0}\operatorname{arccot}\left(-\frac{\mu}{\sigma}\right)\,d\mu\\
&= \frac{\lambda\cdot l}{\varphi+\frac{\pi}{2}}\left[\mu\operatorname{arccot}\left(-\frac{\mu}{\sigma}\right) - \frac{\sigma}{2}\ln(\sigma^2+\mu^2)\right]_{\mu=-b}^{\mu_0}\\
&= \frac{\lambda\cdot l}{\varphi+\frac{\pi}{2}}\Bigg[\underbrace{\frac{\sigma}{2}\ln\frac{\sigma^2+b^2}{\sigma^2+\mu_0^2}}_{\substack{\to\infty\\ \text{für } b\to\infty}} + \underbrace{b\operatorname{arccot}\frac{b}{\sigma}}_{\substack{\approx\sigma\\ \text{für große } b}} - \underbrace{(-\mu_0)\operatorname{arccot}\frac{-\mu_0}{\sigma}}_{\substack{=0 \text{ nur}\\ \text{falls } \mu_0=0}}\Bigg]\\
&\to \infty \quad \text{für } b\to\infty
\end{aligned}$$

klein, dass die Arcustangensfunktion dieses Argument nahezu unverändert lässt. Und in der Realität ist ja der Acker erheblich breiter als 1 m. Den nicht unterklammerten Arcuskotangens sollte man allgemein nicht durch den Arcustangens des Kehrwertes ersetzen, da das Argument $-\mu_0/\sigma$ zwar nicht in dem hier vorliegenden Versuch, jedoch aber in anderen Versuchen negativ sein könnte, wenn nämlich die äußerste Modelldüse die Grenze überschreitet, $\mu_0$ also positiv ist. Dazu ist es durchaus nicht erforderlich, dass in der Realität die „rechte Grenze des Spritzbereichs“ (d.h. die äußerste Düse plus halber Düsenabstand), die wie in Bild 3 wegen des Windes etwas westwärts der äußersten Modelldüse liegen mag, die Ostgrenze des Ackers überschreitet.

Den wesentlichen Anteil an der Abdrift hat aber der erste unterklammerte Summand innerhalb der letzten eckigen Klammern. Dieser geht für $b \to \infty$ zwar langsam, aber dennoch gegen unendlich, sodass sich kein endlicher asymptotischer Wert für die absolute Abdrift eines unendlich breiten Ackers angeben lässt. Absolut gesehen driftet von einem unendlich breiten Acker unendlich viel ab. Wir müssen also bei der Angabe vernünftiger Abdriftwerte immer die Akkerbreite mit einbeziehen.

**Die relative Abdrift**

Will man wissen, welcher Anteil des ausgebrachten Pflanzenschutzmittels von der Zielfläche abgedriftet ist, muss man die relative Abdrift berechnen. Dazu muss die absolute noch durch die gesamte auf den Acker ausgebrachte Menge an PSM dividiert werden. Diese Menge berechnet sich zu Länge mal Breite mal der Höhe des Spritzfilms bei planmäßiger Ausbringung. Letztere ist die Spritzintensität λ, die sich im Versuch zu λ = 300 l/ha = 0,03 mm ergeben hat.

Aus der absoluten Abdrift und der gesamten ausgebrachten Menge PSM = $l \cdot b \cdot \lambda$ ergibt sich nun die relative Abdrift in Formel (14).

Auch hier könnte man in der Praxis, wo $b$ wesentlich größer als 1 m ist, den Ausdruck $\operatorname{arccot}(b/\sigma)$ durch $\sigma/b$ ersetzen. Es konvergiert aber nicht nur dieser Ausdruck für $b \to \infty$ gegen 0, sondern auch der erste Summand innerhalb der eckigen Klammern, da der Divisor $2b$ viel schneller gegen unendlich geht als der Logarithmus mit einem $b^2$ im Zähler seines Arguments. Damit konvergiert die relative Abdrift für $b \to \infty$ gegen 0. Die Angabe asymptotischer relativer Abdriftwerte ist also ebenfalls nicht sinnvoll. Die relative Abdrift hängt eben von der Breite des Ackers ab. Je breiter dieser ist, umso weniger geht prozentual gesehen verloren, bei unendlicher Breite nur noch 0 %, obwohl die abgedriftete Menge absolut gesehen dann unendlich groß ist.

**Beispiel 1: Tabelle 2** zeigt absolute und relative Abdrift von rechteckigen, mit 300 l/ha PSM behandelten Schlägen in Abhängigkeit von deren Breite. Ihre Länge ist auf 100 m normiert, und die Modellparameter sind die in Abschnitt 3 gemäß den Versuchsergebnissen der BBA ermittelten. Man erkennt, wie die absolute Abdrift mit steigender Breite nur äußerst langsam ansteigt, sodass ihr unendlicher Grenzwert aus praktischer Sicht fast unglaubwürdig wirkt, während die relative Abdrift sehr schnell gegen 0 geht.

$$\begin{aligned} \text{relAbdrift} &= \frac{\text{absAbdrift}}{l \cdot b \cdot \lambda} \\ &= \frac{1}{\varphi + \frac{\pi}{2}} \Bigg[ \underbrace{\frac{\sigma}{2b} \ln \frac{\sigma^2 + b^2}{\sigma^2 + \mu_0^2}}_{\substack{\to 0 \\ \text{für } b \to \infty}} + \underbrace{\operatorname{arccot} \frac{b}{\sigma}}_{\substack{\approx \frac{\sigma}{b} \text{ für} \\ \text{große } b}} - \underbrace{\frac{-\mu_0}{b} \operatorname{arccot} \frac{-\mu_0}{\sigma}}_{\substack{= 0 \text{ nur} \\ \text{falls } \mu_0 = 0}} \Bigg] \\ &\to \quad 0 \quad \text{für} \quad b \to \infty \end{aligned} \tag{14}$$

Tabelle 2: Die Abdrift von einem *l*=100 m langen Schlag in Abhängigkeit von dessen Breite *b* bei λ = 300 l/ha, $\mu_0$=-0,058 m, σ = 0,082 m, φ =70 ° = 1,22173

| Schlagbreite *b* | Insgesamt abgedriftete Menge an PSM | |
|---|---|---|
| | absolut | relativ |
| 1 m | 0,231 l | 7,704 % |
| 50 m | 0,576 l | 0,384 % |
| 100 m | 0,637 l | 0,212 % |
| 200 m | 0,698 l | 0,116 % |
| 500 m | 0,778 l | 0,0519 % |
| 1 km | 0,840 l | 0,0280 % |
| 100 km | 1.245 l | 0,000415 % |
| ∞ km | ∞ l | 0 % |

## Die Abdrift auf endliche Nichtzielflächen

Im Folgenden wird die Nichtzielfläche nicht mehr als die gesamte, unendlich breite Fläche außerhalb des Ackers (in Hauptwindrichtung) gesehen, sondern als endliche rechteckige Fläche. Die auf solche Flächen insgesamt abgedriftete Menge interessiert vor allem bei aquatischen Systemen oder bei ökologisch bewirtschafteten Flächen, die an konventionell bewirtschaftete Flächen angrenzen. Da zwischen beiden Flächen oft noch ein Feldweg oder zumindest ein gewisser Rain liegt, berechnen wir im Folgenden die absolute Abdrift auf Flächen mit einer Breite $w$ (width) und einer Länge $t$ (tallness), die sich im Abstand $d$ zur behandelten Fläche (Zielfläche) befinden. Wir gehen der Einfachheit halber wieder davon aus, dass sowohl Ziel- als auch Nichtzielfläche rechteckig sind, deren Grenzen parallel bzw. orthogonal zueinander verlaufen. Sie dürfen aber in $y$-Richtung, also orthogonal zur Hauptwindrichtung versetzt sein (siehe **Bild 4**). Somit interessiert hinsichtlich der Länge beider Felder in $y$-Richtung nur die Länge $c$ der $y$-Koordinaten, welche beide Felder gemeinsam (common) haben. Bei unmittelbar angrenzenden Feldern ist das die Länge der gemeinsamen Grenze in $y$-Richtung.

**Die absolute Abdrift**

Um die gesamte Abdrift auf solche rechteckige Nichtzielflächen zu erhalten, hätte man nur in (13) anstatt von $x = 0$ bis ∞ von $x = d$ bis $d + w$ zu integrieren brauchen und $l$ durch $c$ ersetzen müssen. Auf diese Weise wäre aber die Auswertung der Integrale etwas länger geworden. Wir können die Abdrift auf endliche Nichtzielflächen auch aus der Formel für die Gesamtabdrift in (13) mittels logischer Überlegungen bestimmen.

Die auf eine unendlich breite Nichtzielfläche im Abstand $d$ abgedriftete Menge entspricht der Gesamtabdrift bei einer Zielfläche, wo der Fahrer um den Ab-

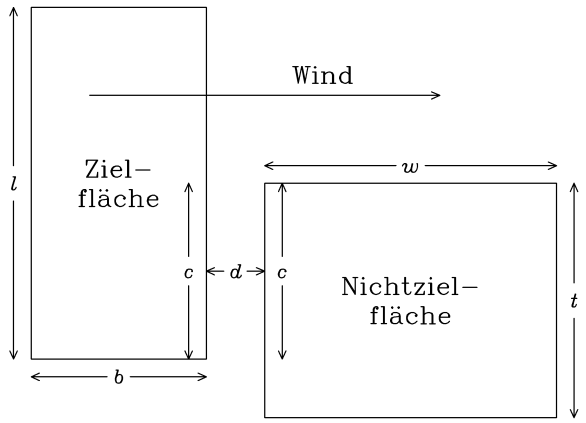



Bild 4: Ziel- und Nichtzielfläche

stand $d$ weniger an die Grenze herangefahren ist, die Zielfläche dafür um den Abstand $d$ (nach links) breiter ist. Um diese Abdrift zu berechnen, müssen wir also nur in Formel (13) den Parameter $\mu_0$, der die Grenzüberschreitung angibt, durch $\mu_0$ - $d$ und die Breite $b$ des Ackers durch $b + d$ ersetzen. Da auf diese Weise an die Stelle von $\mu_0$ was Kleineres getreten ist, ist damit die notwendige Bedingung (12) für die Gültigkeit der Formel trivialer Weise wieder erfüllt; dasselbe trifft auch bei der nächstfolgenden Anwendung dieser Formel zu. Berücksichtigen wir nun zusätzlich, dass die Breite $w$ der Nichtzielfläche endlich ist, so muss die Abdrift, die sogar die rechte Grenze der Nichtzielfläche überschreitet, wieder abgezogen werden. Diese entspricht der Gesamtabdrift bei einer Zielfläche, wo der Fahrer um die Distanz $d + w$ weniger an die Grenze herangefahren ist, die Zielfläche dafür aber um dieselbe Distanz $d + w$ (nach links) breiter geworden ist. Man erhält sie wieder aus (13), wenn man $\mu_0$ durch $\mu_0$ - $(d + w)$ und die Breite $b$ des Ackers durch $b + d + w$ ersetzt. Somit ergibt sich für die Abdrift auf eine Nichtzielfläche der Breite $w$ im Abstand $d$ und gemeinsamer Strecke $c$ in $y$-Richtung die Formel in (15).

Solche Gesamtmengen an PSM-Abdrift können mit dem DOS-Programm Abtrift.exe und mit dem Windows-Programm QuickTrift berechnet werden. QuickTrift bezieht sich auf die Modellparameter $\mu_0$ = -0,058 m, $\sigma$ = 0,082 m und $\varphi$ = 70 ° = 1,22173, wie sie sich aufgrund der Versuche der BBA ergeben haben (siehe Tabelle 1). Das DOS-Programm Abtrift.exe ist speziell auf den vorliegenden Aufsatz zugeschnitten, sodass auch Abdrift-Werte für selbst gewählte Modellparameter berechnet werden können. Das Programm Abtrift.exe steht im Internet unter http://www.agridata.de/agrardos/agrardos/abtrift.html zur Verfügung, während für Quickdrift eine eigene Homepage http://www.QuickTrift.de eingerichtet ist.

Für $\mu_0 = 0$ lassen sich in der Formel für die absolute Abdrift die Breiten $b$ und $w$ von Ziel- und Nichtzielfläche austauschen, ohne dass sich das Ergebnis verändert. Diese Symmetrie gilt allgemein für jedes $\mu_0$ mit $\mu_0 \le \sigma \cdot \tan\varphi$, wenn man die Breite $b$ der Zielfläche durch die wirklich gespritzte Breite $b^* := b + \mu_0$ und den Abstand $d$ durch den Abstand $d^* := d - \mu_0$ von der „Spritzgrenze“ zur Nichtzielfläche ersetzt. Dann ändert der Austausch der Breiten $b^*$ und $w$ nichts an der absoluten Abdrift. Das heißt, dass z.B. die Abdrift von einer Zielfläche mit tatsächlich behandelter Breite $b^*$ = 500 m auf eine 100 m breite Nichtzielfläche genauso groß ist wie die Abdrift von einer Zielfläche mit tatsächlich behandelter Breite $b^*$ = 100 m auf eine 500 m breite Nichtzielfläche, vorausgesetzt, gemeinsame Länge $c$ und Abstand $d^*$ (und damit auch $d$) zwischen beiden Flächen sind identisch.

### Drei Arten von relativer Abdrift

Hinsichtlich der relativen Abdrift unterscheiden wir drei Arten. Dabei ist die relative Abdrift bezogen auf die insgesamt ausgebrachte Menge weniger von Interesse. Sie kann natürlich ebenso einfach mittels Division der absoluten Abdrift durch $\lambda \cdot l \cdot b$ berechnet werden. Sie gibt dann nur noch den Anteil der auf eine bestimmte Nichtzielfläche abgedrifteten Menge an PSM bezogen auf die insgesamt ausgebrachte Menge an.

Eine zweite Art der relativen Abdrift kann sich auf die insgesamt abgedriftete Menge beziehen. Um zu wissen, welcher Anteil der von der Zielfläche abgedrifteten Menge auf die interessierende Nichtzielfläche gefallen ist, muss nur die in (15) errechnete Abdrift auf diese Nichtzielfläche durch die gesamte Abdrift in (13) dividiert werden.

Am interessantesten mag es allerdings sein, die auf eine interessierende Nichtzielfläche gedriftete Menge an PSM durch die Menge zu dividieren, die bei planmäßiger Behandlung der Nichtzielfläche (ohne Abdrift) auf sie gelangt wäre, also durch $\lambda \cdot w \cdot t$. Auf diese Weise entsteht ein Vergleich der Behandlungsintensität der Zielfläche mit der ungewollten durchschnittlichen Behandlungsintensität der interessierenden Nichtzielfläche. Wir erfahren, zu wie viel Prozent im Durchschnitt die interessierende Nichtzielfläche bei der Behandlung der Zielfläche mitbehandelt wurde.

Alle drei Arten von relativer Abdrift sind in Tabelle 3 neben der absoluten Abdrift enthalten, wo solche Abdriftwerte für gewisse Flächengrößen berechnet sind. Die dritte Art der relativen Abdrift ist in der letzten Spalte enthalten, die mit „bzgl. Mitbehandlung“ überschrieben ist.

### Grenzwerte

Aus ökologischer Sicht interessiert insbesondere, wie viel Liter PSM insgesamt auf eine von konventionell bewirtschafteten Flächen umgebene ökologisch bewirtschaftete Fläche driftet. Das ist in unserem Modell der Grenzwert der absoluten Abdrift für $b \to \infty$, wobei $b$ die Breite der Zielfläche ist, von der der Wind her kommt. Zur Berechnung dieses Grenzwerts braucht in Zähler und Nenner des gesamten Bruchs, auf den sich der Logarithmus bezieht, nur jeweils die höchste Potenz von $b$ berücksichtigt zu werden, was auf den Logarithmus des Quotienten der Koeffizienten von $b^2$ in Zähler und Nenner hinausläuft. Hinsichtlich des Arcuskotangens wird dann noch die Beziehung $\lim_{x\to\infty}[x\,\mathrm{arccot}(x/\sigma)] = \lim_{x\to\infty}[x\arctan(\sigma/x)] = \sigma$ für positive Argumente des Arcuskotanges benötigt. Damit ergibt sich der folgende Grenzwert in Formel (16).

$$\begin{aligned}\mathrm{absAbdrift} \;=\; & \frac{\lambda\cdot c}{\varphi+\frac{\pi}{2}}\left[\;\frac{\sigma}{2}\ln\left(\frac{\sigma^2+(b+d)^2}{\sigma^2+(-\mu_0+d)^2}\cdot\frac{\sigma^2+(-\mu_0+d+w)^2}{\sigma^2+(b+d+w)^2}\right)\right.\\ & +\;(b+d)\;\mathrm{arccot}\,\frac{b+d}{\sigma}\\ & -\;(b+d+w)\;\mathrm{arccot}\,\frac{b+d+w}{\sigma}\\ & -\;(-\mu_0+d)\;\mathrm{arccot}\,\frac{-\mu_0+d}{\sigma}\\ & \left.+\;(-\mu_0+d+w)\;\mathrm{arccot}\,\frac{-\mu_0+d+w}{\sigma}\;\right]\end{aligned} \tag{15}$$

$$\begin{aligned}\lim_{b\to\infty}\mathrm{absAbdrift} \;=\; & \\ =\; & \frac{\lambda\cdot c}{\varphi+\frac{\pi}{2}}\left[\;\frac{\sigma}{2}\ln\frac{\sigma^2+(-\mu_0+d+w)^2}{\sigma^2+(-\mu_0+d)^2}\right.\\ & -\;(-\mu_0+d)\;\mathrm{arccot}\,\frac{-\mu_0+d}{\sigma}\\ & \left.+\;\underbrace{(-\mu_0+d+w)\;\mathrm{arccot}\,\frac{-\mu_0+d+w}{\sigma}}_{\approx\,\sigma;\ \text{denn } w \text{ ist groß}}\;\right]\end{aligned} \tag{16}$$

Natürlich soll hier auch nicht der Grenzwert für $w \to \infty$ außer Acht gelassen werden. Möglicherweise ist die angrenzende Nichtzielfläche ein großes Ökogewann oder eine große Zone, die gentechnikfrei und ökologisch bewirtschaftet wird. Dann interessiert die Abdrift der auf einzelne Flächen endlicher Breite $b$ ausgebrachten PSM auf die idealisiert gesehen unendlich breite ökologische Nichtzielfläche. Analog zu (16) erhalten wir dann Formel (17):

$$\lim_{w\to\infty} \text{absAbdrift} = \\ = \frac{\lambda \cdot c}{\varphi + \frac{\pi}{2}} \left[ \frac{\sigma}{2} \ln \frac{\sigma^2 + (b+d)^2}{\sigma^2 + (-\mu_0 + d)^2} \right. \\ - (-\mu_0 + d) \operatorname{arccot} \frac{-\mu_0 + d}{\sigma} \\ \left. + \underbrace{(b+d) \operatorname{arccot} \frac{b+d}{\sigma}}_{\approx \sigma;\ \text{denn } b \text{ ist groß}} \right] \quad (17)$$

Für $d = 0$ und $c = l$ muss natürlich dieser Grenzwert mit der Abdrift in (13) identisch sein. Am Ende der Gleichungsketten (13) und (14) haben wir bereits sehen können, dass sich für $b = \infty$ eine unendlich große absolute Gesamtabdrift und eine relative von nur 0 % ergibt. Diese Gesamtabdrift entspricht der Abdrift auf eine unendlich breite unmittelbar benachbarte ($d = 0$) Nichtzielfläche, wenn also $b = w = \infty$ gilt, vorausgesetzt, dass die Nichtzielfläche auch hinsichtlich der Länge überall angrenzt ($c = l$). Die Formeln (16) und (17) lassen jedoch erkennen, dass bei $b = w = \infty$ die Abdrift auch für jeden endlichen Abstand $d > 0$ und jede gemeinsame Länge $c > 0$ absolut gesehen unendlich groß und relativ zur ausgebrachten Menge nur 0 % ist.

**Beispiel 2: Tabelle 3** zeigt absolute und relative Abdrift von rechteckigen, mit 300 l/ha PSM behandelten Schlägen auf parallel dazu liegende rechteckige Nichtzielflächen in Abhängigkeit von der Breite beider Flächen und deren Abstand zueinander. Ihre Länge ist jeweils auf 100 m normiert, die auch die gemeinsame Länge beider Flächen ist. Als Modellparameter werden wieder die in Abschnitt 3 ermittelten verwendet. Betrachtet man nur die absolute Abdrift, dann erkennt man, dass $b$ und $w$ praktisch austauschbar sind. Da $\mu_0$ zwar sehr nahe an 0, aber nicht exakt 0 ist, führt dies dennoch zu sehr kleinen Differenzen. Die relative Abdrift unterliegt dagegen nicht einer solchen Austauschbarkeit. Tabelle 3 enthält sie nicht nur in Bezug auf die insgesamt ausgebrachte Menge, sondern auch in Bezug auf die insgesamt abgedriftete Menge. In der letzten Spalte ist noch angegeben, welchem Prozentsatz die auf die Nichtzielfläche abgedriftete Menge im Vergleich zu der Menge entspricht, die ausgebracht worden wäre, wenn sie mit derselben Intensität wie die Zielfläche behandelt worden wäre. Außerdem betrachtet Tabelle 3 verschiedene Abstände zwischen Ziel- und Nichtzielfläche. Dabei fällt vor allem ins Auge, dass schon ein Feldweg von 3 m Breite zwischen Ziel- und Nichtzielfläche ausreicht, um die Abdrift auf die Nichtzielfläche etwa um die Hälfte zu reduzieren. Für die Praxis besonders wichtig ist aber, dass die absolute Abdrift auf eine 500 m breite Nichtzielfläche nicht etwa fünfmal so groß ist wie auf eine 100 m breite, sondern nur ein bisschen größer. Man erahnt bereits, wie stark der gesamte PSM-Eintrag auf ökologisch bewirtschaftete Flächen reduziert werden kann, wenn man zersplitterte Flächen zu Ökogewannen zusammenlegt. Mit Hilfe der Programme QuickTrift und Abtrift.exe, wo die vorgestellten Berechnungen implementiert sind, können also solche PSM-Reduzierungs-Effekte im Voraus abgeschätzt werden.

## Ausblick und Diskussion

Die vorgestellte Modellierung der Verteilung der Spritzbrühe aus einer Düse durch eine abgeschnittene Cauchy-Verteilung hat zunächst den Vorteil der Plausibilität (siehe Bild 3). Die Bestimmung der Parameter $\mu_0$, $\sigma$ und $\varphi$ dieser Verteilung beruht auf tatsächlich durch Messungen gefundenen Zusammenhängen zwischen dem mittleren Driftsediment und dem Abstand zur Feldgröße [2]. Dass solche Parameterwerte gefunden werden können, die zu einer nahezu völligen Übereinstimmung der Versuchswerte mit den modellierten führen,

Tabelle 3: Die Abdrift von einer *l*=100 m langen Zielfläche *Z* auf eine parallele Nichtzielfläche *N* der selben Länge (*t* = *l* = *c* = 100 m), wobei $\lambda$ = 300 l/ha, $\mu_0$ = -0,058 m, $\sigma$ = 0,082 m, $\varphi$ = 70 ° = 1,22173

| Breite *b* der Zielfl. | Breite *w* der Nichtz. | Abstand *d* zw. beiden | Auf Nichtzielfläche gedriftete Menge an PSM | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | absolut | bzgl. ausgebrachter Menge | bzgl. abgedrifteter Menge | bzgl. Mitbehandlung |
| 100 m | 100 m | 0 m | 0,576 l | 0,192 % | 90,4 % | 0,192 % |
| | | 3 m | 0,250 l | 0,0834 % | 39,3 % | 0,0834 % |
| | | 100 m | 0,0253 l | 0,00844 % | 3,98 % | 0,00844 % |
| | 500 m | 0 m | 0,621 l | 0,207 % | 97,5 % | 0,0414 % |
| | | 3 m | 0,294 l | 0,0979 % | 46,2 % | 0,0196 % |
| | | 100 m | 0,0474 l | 0,0158 % | 7,45 % | 0,00316 % |
| | ∞ m | 0 m | 0,637 l | 0,212 % | 100 % | 0 % |
| | | 3 m | 0,310 l | 0,103 % | 48,7 % | 0 % |
| | | 100 m | 0,0610 l | 0,0203 % | 9,58 % | 0 % |
| 500 m | 100 m | 0 m | 0,621 l | 0,0414 % | 79,7 % | 0,207 % |
| | | 3 m | 0,294 l | 0,0196 % | 37,8 % | 0,0980 % |
| | | 100 m | 0,0475 l | 0,00316 % | 6,10 % | 0,0158 % |
| | 500 m | 0 m | 0,717 l | 0,0478 % | 92,2 % | 0,0478 % |
| | | 3 m | 0,398 l | 0,0259 % | 49,9 % | 0,0259 % |
| | | 100 m | 0,104 l | 0,00696 % | 13,4 % | 0,00696 % |
| | ∞ m | 0 m | 0,778 l | 0,0519 % | 100 % | 0 % |
| | | 3 m | 0,450 l | 0,0300 % | 57,7 % | 0 % |
| | | 100 m | 0,158 l | 0,0105 % | 20,3 % | 0 % |
| ∞ m | 100 m | 0 m | 0,637 l | 0 % | 0 % | 0,212 % |
| | | 3 m | 0,310 l | 0 % | 0 % | 0,103 % |
| | | 100 m | 0,0610 l | 0 % | 0 % | 0,0203 % |
| | 500 m | 0 m | 0,778 l | 0 % | 0 % | 0,0519 % |
| | | 3 m | 0,450 l | 0 % | 0 % | 0,0300 % |
| | | 100 m | 0,158 l | 0 % | 0 % | 0,0105 % |
| | ∞ m | 0 m | ∞ l | 0 % | 100 % | 0 % |
| | | 3 m | ∞ l | 0 % | 100 % | 0 % |
| | | 100 m | ∞ l | 0 % | 100 % | 0 % |

ist wiederum eine Bestätigung der Güte des Modells.

Ein besonderer Vorteil der hier durchgeführten Berechnungen der Abdrift von einer Ziel- auf eine Nichtzielfläche ist, dass sie nicht nur für direkt aneinander grenzende Schläge gelten. Sie hängen von der Breite der beiden Schläge ab, aber auch von deren Abstand. Man kann den PSM-Eintrag auf die Nichtzielfläche berechnen, wenn die Schläge durch beispielsweise einen Feldweg voneinander getrennt sind. Da die größte PSM-Abdrift direkt an der Feldgrenze niedergeht, vermindert schon ein 3 m breiter Feldweg die Abdrift auf die Nichtzielfläche enorm (um ca. die Hälfte).

Als nachteilig ist allerdings anzusehen, dass in den Versuchen der BBA nur eine Hauptwindrichtung angenommen wird, die senkrecht zur Feldgrenze verläuft, also parallel zum Gestänge der Spritze. Modelliert ist nur diese eine Hauptwindrichtung. Entlang der Feldgrenze wird keine Zerstäubung angenommen, weder durch den Wind noch durch die Düse. Letztere kann tatsächlich vernachlässigt werden, sofern die Spritze mit Flachstrahldüsen bestückt ist, erstere jedoch nicht. Eine Abdrift entlang der Fahrtrichtung kann bei entsprechendem Wind ebenso erfolgen. Es ist anzunehmen, dass sie für große Entfernungen von der entsprechenden Feldgrenze ähnlich ist, wie wenn man den Acker in der (um 90 °) anderen Richtung behandelt. Davon kann man aber direkt an der Feldgrenze nicht ausgehen, da hier die Zerstäubung durch die Düsen noch von größerer Bedeutung ist. Um diesbezüglich Modellierungen vornehmen zu können, bedarf es erst weiterer Versuche durch die BBA, vor allem Messungen, die besonders nahe (auch im Zentimeter-Bereich) an der Feldgrenze erfolgen, sowohl weiterer Messungen an der Grenze entlang der Fahrtrichtung als auch Messungen an der Grenze senkrecht zu ihr.

Die Berechnungen der Abdrift könnten weiter verbessert werden, wenn man Versuchsergebnisse in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit hätte. Bei den Versuchen der BBA lagen Windgeschwindigkeiten zwischen 0,8 m/s und 3,6 m/s vor. Bekannt sind nur mittlere Abdriftwerte, nicht aber Ergebnisse der Abdrift in Abhängigkeit dieser Windgeschwindigkeiten. Durch Veränderung vor allem des Streuparameters $\sigma$ im Modell der abgeschnittenen Cauchy-Verteilung könnte der tatsächlich vorliegenden Windgeschwindigkeit mit Leichtigkeit Rechnung getragen werden. Je stärker der Wind, umso größer ist $\sigma$ zu wählen.

Der Nachteil, dass nur rechteckige Flächen betrachtet wurden, könnte durch entsprechende Änderung des Integrationsbereiches behoben werden. Dadurch würden allerdings die Berechnungen wesentlich komplizierter. Dennoch muss gesagt werden, dass es generell möglich ist, die Modellierung der Verteilung der Spritzbrühe zweidimensional (in $x$- und $y$-Richtung) zu erweitern, und zwar auf eine Weise, dass sie zusätzlich von der Hauptwindrichtung, deren Geschwindigkeit sowie der Fahrtrichtung und deren Geschwindigkeit abhängt. Mittels entsprechender Integration könnte dann die Abdrift von einem Schlag mit gegebenen Eckpunkten auf eine Nichtzielfläche mit ebenfalls gegebenen Eckpunkten ziemlich genau berechnet werden.

Aber auch solche Berechnungen betreffen nur die direkte Abdrift durch den Wind. Es können jedoch auch verflüchtigungsbedingte Depositionen teilweise zu Belastungen auf anrainenden Flächen führen, die in der Größenordung der Abdrift liegen [5]. Die Verflüchtigung erfolgt im Wesentlichen im Zeitraum der ersten 24 Stunden nach der Applikation, kann sich aber auch über mehrere Wochen hinziehen [6, 7, 8, 9, 10]. Ebenso werden die Einträge von Pflanzenschutzmitteln auf Nichtzielflächen durch Oberflächenabschwemmung außer Acht gelassen. Sie bewegen sich zwischen 0,02 und 2 % und können bei ungünstigen Bedingungen sogar 10 % überschreiten [11]. Außerdem hat eine Mängelanalyse der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft gezeigt, dass über die Hälfte der Pflanzenschutzgeräte nicht in Ordnung sind und wenigstens Teile erneuert oder repariert werden müssen [12]. Diesen Tatsachen, die zu einer Unterschätzung des Stoffeintrags führen, kann gegenübergestellt werden, dass das hier verwendete Modell nur für Universaldüsen gültig ist und keine Verlust mindernde Technik berücksichtigt wird. Grobtropfige Düsen, die als 50 %-verlustmindernd registriert sind (AI 110 025 3 bar), führten bei Messreihen der Landesanstalt für Pflanzenbau und Pflanzenschutz zu einer Belagsreduzierung auf Wiesen von 90 % [13]. Dieses große Potential zur Reduzierung der Abdrift wurde bei der Modellierung des Eintrags von Pflanzenschutzmitteln nicht beachtet. Inwieweit sich die geschilderten Einflüsse gegenseitig aufheben, kann nicht beurteilt werden.

Während in Österreich konventionell wirtschaftende Landwirte für die sichtbaren Schäden auf benachbarten ökologisch bewirtschafteten Flächen aufkommen müssen, gibt es eine solche Regelung in Deutschland nicht. Doch auch hier zu Lande gibt es das Problem der Abdrift, wie zurückgegebene, nach den Richtlinien des ökologischen Landbaus produzierte Waren aufgrund von Rückständen von Pflanzenschutzmitteln bei Herstellern von Baby-Nahrung und Probleme bei der Zucht von ökologischem Saatgut verdeutlichen. Mit dem hier vorgestellten Modell kann beispielsweise abgeschätzt werden, welcher Anteil der PSM-Belastung bei fachgerechter Anwendung auf benachbarten Schläge entstanden sein könnte. Außerdem kann die Belastung bei verschiedenen Feldgrößen berechnet werden. So zeigte sich bei einer Betrachtung der Gemeinde Mühlhausen der Region Landl im Landkreis Neumarkt, dass, wenn die zersplitterten ökologisch bewirtschafteten Flächen (309 ha) zu Ökogewannen mit einer durchschnittlichen Größe von neun Hektar zusammengelegt werden, der PSM-Eintrag von 131 Litern Spritzbrühe um 66 % auf 44 Liter gesenkt werden kann [14].

## Literatur

[1] *Ganzelmeier H., Rautmann D., Spangenberg R., Streloke M., Herrmann M., Wenzelburger H.-J., Walter H.-F.:* Untersuchungen zur Abtrift von Pflanzenschutzmitteln. Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft (BBA), Berlin-Dahlem, Heft 304. Wien, Blackwell Wissenschaftsverlag, 1995

[2] Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft (BBA): Abdriftecksätze für Flächen- und Raumkulturen sowie für den gewerblichen Gemüse-, Zierpflanzen- und Beerenobstanbau. Bundesanzeiger Nr. 100, Seite 9879, Köln, Freitag den 26. Mai 2000

[3] *Rothschild V., Logothetis N.:* Probability Distributions. New York, 1986, S. 52-53

[4] *Bronstein I.N., Semendjajew K.A.:* Taschenbuch der Mathematik. Herausgegeben von Grosche G. und Ziegler V.; Leipzig, 1979

[5] *Kördel W., Klöppel H.:* Exposition von naturnahen Ökosystemen durch luftgetragene Pflanzenschutzmittel. Forschungsvorhaben des Umweltbundesamtes, FKZ: 126 05 110, Mai 1998

[6] *Jury W.A., Spencer W.F., Farmer W.J.:* Behaviour Assessment model for trace organics in soil: IV. Review of Experimental evidence. Journal of Environmental Quality 13 (1984), S. 580-586

[7] *Ross L.J., Nicosia S., McChesney M.M., Hefner K.L., Gonzales D.A., Seiber J.N.,:* Volatilization, off-site deposition, and dissipation of DCPA in the field. Journal of Environmental Quality 19 (1990), S. 715-722

[8] *Taylor A.W., Spencer W.F., McChesney M.M., Hefner K.L., Gonzales D.A., Seiber J.N.:* Volatilization and vapor transport processes. In: Pesticides in the soil environment, Soil Science Society of America, 667 S. Segoe Rd., Madison, WI 53711, USA, SSSA Book Series No. 2, Chapter 7 (1990)

[9] *Winkler R., Binner R., Gottschild D., Koch W., Siebers J.:* Bewertungskonzept zum Nahtransport von Pflanzenschutzmitteln infolge Exposition über den Luftpfad (Abtrift, Verflüchtigung und Deposition). / Assessment Scheme for the Short Range Transport of Plant Protection Products - Environmental. Exposure by Airborne Routes (Spray drift, Volatilisation and Deposition) 2002.

[10] *Woodrow J.E., Seiber J. N.:* Correlating techniques for estimating pesticide volatilization flux and downwind concentration. Environmental Science and Technology 31 (1997), S. 521-529

[11] *Winkler R.:* Konzept zur Bewertung des Eintrags von Pflanzenschutzmitteln in Oberflächen- und Grundwasser unter besonderer Berücksichtigung des Oberflächenabflusses (Dokumentation zum Modell EXPOSIT). Umweltbundesamt, Berlin, 2001

[12] Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft (BBA 2000a): Prüfung und Forschung. Fachgruppe Anwendungstechnik, 2000

[13] *Koch H., Weißer P., Landfried M., Straub O.:* Exposition durch Pflanzenschutzmittelabdrift an Blattoberflächen von Nichtzielpflanzen in terrestrischen Saumstrukturen. Journal of Plant Diseases and Protection, Sonderheft XVIII; Eugen Ulmer GmbH & Co., Stuttgart, 2001

[14] *Kohlschütter N.:* Modellierung der Stoffeinträge in Nichtzielflächen bei der Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln und Mineraldüngern und Kalkulation der quantitativen Effekte durch Gewannebewirtschaftung an Hand eines Praxisbeispiels. Wissenschaftszentrum Weihenstephan (WZW), Department für Biogene Rohstoffe und Technologie der Landnutzung, 2003

Berichte aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Reports from the Federal Biological Research Centre for Agriculture and Forestry, Heft 110 (2002)

Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft (BBA): Grundsätze für die Durchführung der guten fachlichen Praxis im Pflanzenschutz. http://www.bba.de/recht/gfp08.htm, S. 1 und 2, am 02.05.2002

*Arvidsson T.:* Spray Drift as Influenced by Meteorological and Technical Factors - A methodological study. Doctoral Thesis, Swedish University of Agricultural Sciences Uppsala, Department of Crop Production Science Uppsala, 1997

**Autoren**

Dr. Martin Bachmaier
Technische Universität München
Abteilung für Biogene Rohstoffe und Technologie der Landnutzung
Versuchsstation Staatsgut Dürnast
Dürnast 1
85350 Freising
Tel.: +49/(0)8161/ 5954
Fax: +49/(0)8161/71-3895
Email: bachmai@wzw.tum.de

Dipl.-Ing. Niels Kohlschütter
Jetzt: Universität Bonn
Institut für Organischen Landbau (IOL)
Katzenburgweg 3
53115 Bonn
Tel: +49/(0)228/73-2039
Fax:+49/(0)228/73-5617
Email: n.kohlschuetter@uni-bonn.de