
Inhaltsverzeichnis	
Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	V
1 Einleitung	1
2 Pflanzenschutzmittel – Allgemeines	2
2.1 Definitionen	2
2.2 EU-Richtlinien und nationale Gesetzgebung	3
2.3 Branchenspezifische Regelungen	3
2.4 Richtlinie für die Prüfung von Pflanzenschutzgeräten 7-1.5 Messung der direkten Abdrift von flüssigen Pflanzenschutzmitteln im Freiland	5
2.5 Allgemeines zum Pflanzenschutz	7
2.5.1 Aufbau von Pflanzen	7
2.5.2 Natürliche Mikroflora	9
2.5.3 Pflanzenschutz	10
2.5.4 Klassifizierung und Eigenschaften von Pflanzenschutzmitteln	11
2.6 Eintragungspfade von Pflanzenschutzmitteln in die Umwelt	15
2.6.1 Abdrift	15
2.6.2 Verdampfung	16
2.6.3 Deposition	16
2.6.4 Leaching	17
3 Aktuelle Messmethoden	18
3.1 Aktive Luftsammler	18
3.2 Passive Luftsammler	19
3.2.1 Ergebnisse von Passivsammlerstudien	22
3.3 Passives und aktives Biomonitoring	25
3.4 Bienenbrotmonitoring	26

3.5	Bulk- und Niederschlagsammler	26
3.6	Nachweis von Drift und Deposition	28
3.7	Nachweis Verflüchtigungs- und Depositionsraten	29
3.8	Abdrifteckwerte	31
4	Modellierung von Abdrift	33
4.1	Mathematische Grundlagen und Voraussetzungen	33
4.2	SPEXUS-Modell.....	34
4.3	Monte-Carlo-Simulation.....	38
4.4	Cauchy Verteilung.....	41
4.5	Normalverteilung mit logarithmierten Messwerten und Standardabweichung	43
4.6	Weitere Projekte und Modellierungsansätze	46
5	Übersicht Messmethoden und Modellierungen	49
6	Fazit und Ausblick	56
6.1	Bewertung der Messmethoden	56
6.2	Modellierung.....	57
	Literaturverzeichnis	60

Abkürzungsverzeichnis

BBA	Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft
BBCH-Index	Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Bundessortenamt und Chemische Industrie; der Index gibt Auskunft über das morphologische Entwicklungsstadium einer Pflanze
BfR	Bundesinstitut für Risikobewertung
BNN	Bundesverband Naturkost Naturwaren e.V.
BVL	Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit
DBV	Deutscher Bauernverband
DOY	Day of year
EFSA	Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit
GC/MS	Gaschromatographie mit Massenspektrometrie-Kopplung
HPLCMS/MS	Flüssigchromatographie mit Massenspektrometrie-Kopplung
JKI	Julius-Kühn-Institut
k. A.	keine Angabe
LC-MS/MS	Flüssigchromatographie mit Massenspektrometrie-Kopplung
LM-Verfahren	Levenberg-Marquardt-Verfahren
MVD	Mittlere volumetrische Durchmesser
PflSchG	Pflanzenschutzgesetzes
PSM	Pflanzenschutzmittel
PUF	Polyurethanschaum
SPEXUS	Spray Drift Exposure for Upward and Sideways directed Sprays
TrinkwV	Trinkwasserverordnung
UBA	Umweltbundesamt
XAD	hydrophobes Copolymer aus Styrol-Divinylbenzol-Harz, das als Sorptionsmittel dient

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Versuchsaufbau für Abdriftmessungen.....	6
Abbildung 2: Aufbau und Bestandteile eines Blattes	8
Abbildung 3: Mögliche Eintrags- und Verlustpfade von Pflanzenschutzmitteln in die Umwelt	15
Abbildung 4: Aufbau eines aktiven Luftsammlers.....	18
Abbildung 5: Passivsammler (TIEM Technik).....	21
Abbildung 6: Darstellung der Pestizid-Immissionsprofile an den 4 Standorten in einer logarithmischen Darstellung.....	24
Abbildung 7: Verlauf der summarischen Pestizid-Immissionsbelastung	25
Abbildung 8 A: Einfacher Bulksammler. B: elektrischer Bulksammler mit Kühlung bzw. Heizung	27
Abbildung 9 Labortestsystem, bestehend aus Verflüchtigungskammer (a), Depositions- kammer (b) und PU-Fallensystem (c)	29
Abbildung 10 Verflüchtigungskammer mit appliziertem Kartoffelblatt	30
Abbildung 11 Kumulierte Verflüchtigung für die drei Versuchsvariante	30
Abbildung 12: Aus den Abdriftwerten ermittelte 95% Percentile (Bodensediment)	31
Abbildung 13 Schematischer Aufbau der Experimente zur Messung	35
Abbildung 14 Variablen und Parameter der Modellierung	41
Abbildung 15 Güte der Modellierung der prozentualen Abdriftwerte durch eine abgeschnittene Cauchy-Verteilung	42
Abbildung 16 Schematische Darstellung des hypothetischen Expositionsszenarios für aquatische Nichtzielflächen	44
Abbildung 17 Vergleich der Mediane und 90. Perzentile der Abdriftmesswerte für Feldspritzgeräte mit den Versuchsmittelwerten.....	45
Abbildung 18 Vergleich der 90. Perzentile der Versuchsmittelwerte mit den Ergebnissen der Simulation der Abdriftsedimente für Entfernungen, die mit Messwerten belegbar sind.....	45

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Grundorgane und Funktionen höherer Pflanzen	7
Tabelle 2: Bezeichnung und Erläuterung von immunologischen Abwehrmethoden einer Pflanze	10
Tabelle 3: Übersicht der Pflanzenschutzmethoden	11
Tabelle 4: Klassifizierung von chemischen Pflanzenschutzmitteln	12
Tabelle 5: Ausschnitt einiger Wirkstoffe von PSM	14
Tabelle 6: Die Wirkstoffe mit dem größten Vorkommen in den Passivsammlern nach Wirkstoffklassen.....	23
Tabelle 7 Parameter der Abdrifteckwert-Messungen.....	32
Tabelle 8: Optimierte Faktoren und ihre dazugehörigen Werte	36
Tabelle 9: Einflussfaktoren von Driftmenge und Driftentfernung.....	47
Tabelle 10: Relevanz der Parameter, die die Abdrift beeinflussen	47
Tabelle 11 Vergleich verschiedener Messmethoden	49
Tabelle 12: Übersicht der über die Literaturrecherche gefundenen Modellierungen.....	51
Tabelle 13 Vorgeschlagene Erfassung des PSM-Rückstands im Abstand zur Ausbringungsfläche	58

1 Einleitung

Bei der Applikation von Pflanzschutzmitteln (PSM) ist es unvermeidbar, dass die Substanzen über die zu behandelnde Fläche (Zielfläche) hinaus transportiert werden, dieser Vorgang wird als Abdrift bezeichnet. Bei der ungewollten Belastung, der sich in der Nähe befindlichen Flächen handelt es sich um Nichtzielflächen. Hervorgerufen wird dieser Mechanismus über Luftbewegungen, dabei spielen Einflussfaktoren wie Wind und durch Turbulenzen hervorgerufene Luftbewegungen eine Rolle. Diese sind von verschiedenen verfahrenstechnischen und meteorologischen Bedingungen abhängig. Um die Mengen an Abdrift zu reduzieren und um weitere Maßnahmen zu treffen, ist es wichtig so viel wie möglich über die Zusammenhänge zwischen den Einflussfaktoren und der Abdrift zu wissen (Kaul et al. 2001).

Bei der Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln geht ein Teil der ausgebrachten Menge in der Luft verloren. Um die Prüfung und Bewertung im Feld zu vereinfachen, werden mathematische und rechnerische Modelle zur Bestimmung des Pestizidtransports verwendet, dafür ist eine detaillierte Charakterisierung des landwirtschaftlichen Umfelds sowohl mit zeitlichen als auch mit räumlichen Variationen erforderlich. Gebräuchliche Modelle beschränken sich meist auf den Transport und die Ablagerung von Pestiziden in der Flüssigphase in Gebieten, die an behandelte Felder angrenzen (Gil und Sinfort 2005). Aufgrund der begrenzten Anzahl und der mangelnden zeitlichen Auflösung der messtechnisch ermittelten Ergebnisse sowie der vielfältigen Expositionspfade sind Modellierungen von großer Bedeutung (TSAI et al. 2005).

Zu Beginn der Arbeit werden die rechtlichen Grundlagen vorgestellt, die den aktuellen Rahmen der Thematik im Bereich der Messmethoden festlegen. Dabei sollen sowohl EU-Richtlinien als auch die aktuelle nationale Gesetzgebung und Regelungen im Bio-Landbau berücksichtigt werden. Neben der Klassifizierung von PSM und deren physikalischen und chemischen Eigenschaften werden im Weiteren die verschiedenen Eintragspfade in die Umwelt kurz erläutert. Anschließend werden bereits praktizierte Messmethoden für den Nachweis von PSM beschrieben, die bereits in diversen Projekten verwendet wurden, um den Stand der Technik wiederzugeben. Es werden verschiedene Modellierungen vorgestellt und im Anschluss eine Übersicht der Messmethoden und Modellierungen mit den dazugehörigen Anwendungsmöglichkeiten und Grenzen zusammengetragen.

2 Pflanzenschutzmittel – Allgemeines

2.1 Definitionen

Pflanzenschutzmittel

Pflanzenschutz- und Schädlingsbekämpfungsmittel sind Chemikalien, die Nutz- oder Kulturpflanzen vor tierischen Schädlingen, mikrobiell bedingten Krankheiten sowie der Unkrautkonkurrenz schützen sollen.

Primäre Abdrift:

Direkte Abdrift ist der Anteil der ausgebrachten Wirkstoffmenge, der während des Applikationsvorganges über die zu behandelnde Fläche infolge von Luftbewegungen hinausgetragen wird.

Sekundäre Abdrift:

Wirkstoffaustrag durch Verdunstung (Thermik), Auswaschung oder die Verwehung von Bodenpartikeln.

Schläge (Schlag)

Schläge definieren eine Bewirtschaftungseinheiten "die vergleichbare Standortverhältnisse aufweisen, einheitlich bewirtschaftet werden und mit der gleichen Pflanzenart oder den gleichen Pflanzenarten bestellt sind." (BMELV 2010, S. 65).

Flächenkulturen

Bezeichnen landwirtschaftliche Kulturen, die sich in Bodennähe befinden z.B. Salatfeld

Raumkulturen

Nehmen ein größeres Volumen über ihre Fläche ein wie z.B. Weinreben

2.2 EU-Richtlinien und nationale Gesetzgebung

Die europäische Verordnung (EG)1107/2009¹ regelt das Inverkehrbringen von PSM in der EU. Die Wirkstoffe für den PSM-Einsatz werden dabei auf EU-Ebene zuerst geprüft. Eine Zulassung kann nur dann erfolgen, wenn die Anwendung keine unverträglichen Nebenwirkungen auf Menschen und Umwelt zeigt unter Berücksichtigung des Verbleibs und der Verteilung im Ökosystem.

Die Einschätzung von PSM-Wirkstoffen erfolgt auf europäischer Ebene durch die Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit (EFSA) und die Mitgliedsstaaten. Die letztendliche Zulassung der Pflanzenschutzmittel erfolgt in den nationalen Staaten.

In Deutschland ist das Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL) für die PSM-Zulassung zuständig. Unterstützt wird es durch Teilbewertungen vom Julius-Kühn-Institut (JKI), dem Umweltbundesamt (UBA) und dem Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR). Das BVL lässt nach Pflanzenschutzgesetz (PflSchG) ein PSM zu, wenn es nach dem Stande der wissenschaftlichen Erkenntnisse und der Technik bei bestimmungsgemäßer und sachgerechter Anwendung, oder als Folge einer solchen Anwendung, keine nicht vertretbaren Auswirkungen auf den Naturhaushalt hat. (Golla 2018).

Wichtig ist vor allem die im § 3 des Pflanzenschutzgesetzes (PflSchG) festgelegte gute fachliche Praxis, die unter anderem das Ausbringen von Pflanzenschutzmitteln regelt (BMELV 2010). Sie ist verbindlich zu befolgen und unterliegt der Kontrolle durch die Bundesländer.

Es gibt keine gesetzlichen Anforderungen an das Ausbringen von PSM in der Umgebung von Flächen des Biolandbaus. Generell ergeben sich Anforderungen aus der guten fachlichen Praxis: Darin sind Temperaturen, Windgeschwindigkeit, Aufbringmenge, verwendete Gerätschaften, Fahrtgeschwindigkeit geregelt, die beim Ausbringen von PSM eingehalten werden müssen, um unter anderem Abdrift zu verringern. Mindestabstände gelten generell bei der Anwendung von PSM zum Schutz von Umstehenden und Anwohnern, und zwar gelten Flächenkulturen 2 Meter und in Raumkulturen 5 Meter Abstand (Bundesanzeiger 2016).

2.3 Branchenspezifische Regelungen

Das Bio-Recht (EU-Bioverordnung Nr. 2018/848) regelt Bio-Erzeugnisse, sieht aber keine gesetzlich geregelten Grenzwerte vor, da sie eigentlich frei von konventionellen Pflanzenschutzmitteln sein sollten. Die Branche orientiert sich vor allem an den Orientierungswerten des Bundesverband Naturkost Naturwaren e.V. (BNN) – andere Orientierungswerte wurden nicht

¹ Geänderte Fassung seit dem 21.11.2022 verfügbar

gefunden. Verschiedene Verbände haben verschiedene Satzungen und Regeln bezüglich PSM-Rückstände in den Produkten ihrer Mitglieder. Im Großen und Ganzen ähneln sie sich aber und werden im Folgenden am Beispiel der Biodynamischen Föderation Demeter beschrieben, die ebenfalls die BNN-Werte für ihre Mitglieder vorschreiben (QSI 2019).

Der BNN-Orientierungswert gilt für pflanzliche Lebensmittel, Futtermittel, freiverkäufliche Arzneimittel und Heilmittel aus ökologischem Anbau, jedoch nicht für tierische Erzeugnisse wie Honig. Der Orientierungswert liegt bei 0,010 mg/kg für jeden Wirkstoff (Rückstandsdefinition gemäß Verordnung (EG) Nr. 396/2005) und bezieht sich auf das unverarbeitete Ausgangsprodukt (Primärprodukt i. S. von Verordnung (EG) 178/2002) (BNN 2021). Dieser darf für zwei Pflanzenschutzmittel überschritten sein. Die Verbände konzentrieren sich dabei nur an den Pflanzenschutzmittelrückständen im Endprodukt, Deposition auf den Feldern oder Abdrift wird nicht ohne Verdacht gemessen.

Für die Orientierungswerte werden Messunsicherheiten von bis zu 50 % als akzeptabel angesehen. Das bedeutet, dass erst ab einem Messwert von 0,021 mg/kg Endprodukt für zwei PSM das Produkt aus dem Verkehr gezogen wird. Gleichzeitig müssen solche Ergebnisse dem entsprechenden Verband gemeldet werden und eine Ursachenanalyse wird angeordnet. Auch Nachweise unterhalb der Orientierungswerte werden überprüft (Demeter 2020). Kann nachgewiesen werden, dass die Rückstände durch unvermeidliche Umstände wie Altlasten, Drift oder Lagerkontamination verursacht wurden, können die entsprechenden Stellen das Produkt zum Verkauf freigeben, vorausgesetzt es werden nicht mehr als zwei verbotene Substanzen nachgewiesen. Sanktionen bei akzeptablen und inakzeptablen Orientierungswerten werden durch entsprechende Kataloge der Organisation festgelegt. Auch bei nachgewiesenen Konzentrationen unter den Orientierungswerten sind diese von den biologisch arbeitenden Bauern zu melden und auch hier ist ggf. Ursachenforschung zu betreiben. (Demeter 2020)

Zusätzlich zu den Orientierungswerten, beschreibt die „Internationale Richtlinie für die Zertifizierung von „Demeter“, „Biodynamisch“ und damit in Verbindung stehenden Marken“ das Vorgehen und die Maßnahmen, die biologisch arbeitende landwirtschaftliche Betriebe zur Verhinderung von Abdrift ergreifen müssen.

Die zertifizierende Organisation hat das Recht eine Risikoanalyse für Betriebe, Regionen oder das komplette Zertifizierungsgebiet zu verlangen. Inhalt und Umfang werden von der jeweiligen zertifizierenden Organisation festgelegt. Außerdem sind sie berechtigt, auf Grundlage der Risikoanalyse einen Aktionsplan zur Reduzierung von Risiken zu fordern. Der daraus resultierende Risikomanagementplan ist bindend und kann verschiedene Maßnahmen vorsehen. Sie kann schriftliche Übereinkünfte mit den konventionell arbeitenden Landwirtschaftsbetrieben, Pufferzonen zwischen bio- und konventionell bestellten Feldern, sowie eine eindeutige

Dokumentation der jeweiligen Vermarktung von biologisch vermarkteten und Pufferzonen-Produkten enthalten. Aber auch weit über diese Maßnahmen hinausgehen. Es sollten, wenn möglich, Barrieren (z.B. Hecken) zur Verminderung von Abdrift angelegt werden (Demeter 2020).

2.4 Richtlinie für die Prüfung von Pflanzenschutzgeräten 7-1.5 Messung der direkten Abdrift von flüssigen Pflanzenschutzmitteln im Freiland

In der Richtlinie wird im Rahmen der Beurteilung von Pflanzenschutzgeräten (§ 52 Abs.1 PflSchG) beschrieben, wie Abdriftmessungen vorzunehmen sind. Sie ersetzt die Richtlinie 2.1 der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft (BBA), die auch als Grundlage für den Versuchsaufbau für die in Kapitel 3.8 gemessenen Abdrifteckwerte benutzt wurde. Obwohl für die Einschätzung von Pflanzenschutzgeräten gedacht, wird die Richtlinie auch oft als Grundlage für Versuchsaufbauten mit anderen Fragestellungen genutzt.

Die Richtlinie dient dazu eine weitgehende Vergleichbarkeit der Messwerte zu erreichen. Je nach Fragestellung kann der Versuchsaufbau aber auch abweichen.

Versuchsaufbau

Der Abdriftmessfläche befindet sich in Windrichtung neben der Behandlungsfläche. Die Behandlungsfläche sollte dabei mindestens 50 m x 20 m groß sein. Sie wird mit einem wasserlöslichen, fluoreszierenden Nachweisstoff bespritzt. (JKI 2021)

Direkte Abdrift wird als Bodensediment in Prozent gemessen, weswegen Petrischalen als Abdriftkollektoren verwendet werden. Sie werden auf einer horizontalen Fläche auf den Boden gestellt. Die Kollektoren werden in zehnfacher Ausführung mit mindestens 1 m Abstand angeordnet (siehe Abbildung 1) Es müssen fünf Entfernungen aus einem Raster 1; 2; 3; 4; 5; 7,5; 10; 15; 20; 30; 40; 50; 75 und 100 m Abstand ausgewählt werden. Der für den Abstand verwendete Nullpunkt ist von der untersuchten Kultur abhängig und wird in JKI 2021 für verschiedene Kulturen spezifiziert.

Zusätzlich werden fünf Petrischalen als Referenzproben außerhalb der Messfläche zur Bestimmung der Nullwerte aufgestellt. Sie dürfen nicht von Abdrift getroffen werden. Für den Versuchsaufbau müssen die Messungen drei Mal wiederholt werden.

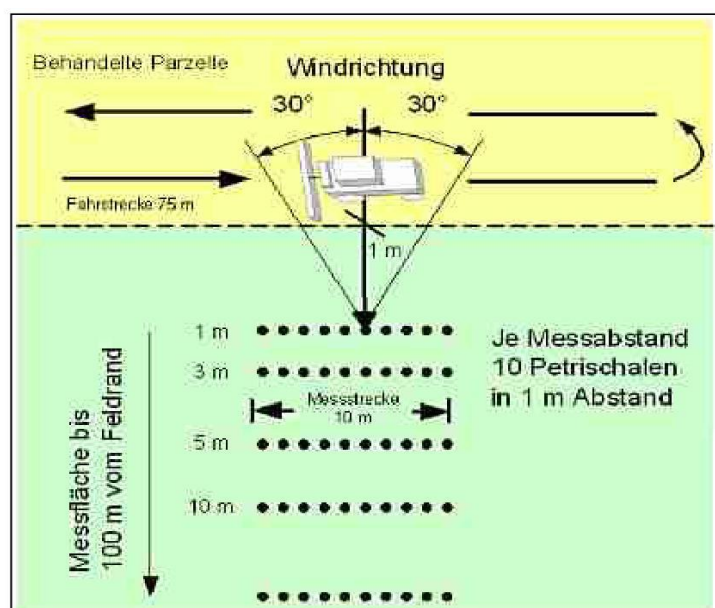


Abbildung 1: Versuchsaufbau für Abdriftmessungen (Golla 2018, S. 14)

Die verwendete Menge wird in l/ha angegeben. Der Spritzdruck sollte ein ganzzahliges Vielfaches von 0,5 bar sein.

Während des Versuchs werden an Wetterdaten Lufttemperatur (1 Messwert je Fahrt), relative Luftfeuchte (1 Messwert je Fahrt), Windrichtung (1 Messwert je Sekunde) und Windgeschwindigkeit (1 Messwert je Sekunde) gesammelt und notiert.

Die Wetterdaten werden auf der Mittelachse hinter der Messfläche in mindestens 2 m Höhe gemessen und mindestens in 1 m über der Höhe der Kultur (z.B. bei Raumkulturen wie Obstplantagen). Die Lufttemperatur sollte nicht höher als 25 °C sein.

„Mindestens am Anfang und am Ende einer Versuchsreihe an einem Tag sind Tankproben als Bezugsgröße aus dem Behälter mit der Versuchsflüssigkeit zu entnehmen.“ (JKI 2021, S. 5)

2.5 Allgemeines zum Pflanzenschutz

In dem folgenden Kapitel werden grundlegende Informationen zum Aufbau von Pflanzen und deren Mikroflora vorgestellt. Mit dem Wissen dieser Grundlagen wird anschließend der allgemeine Pflanzenschutz genauer betrachtet und definiert, im Fokus liegt der chemische Pflanzenschutz und dessen Klassifizierung und Wirkungsweise.

2.5.1 Aufbau von Pflanzen

Als Pflanzen werden Lebewesen betrachtet, die verschiedene Kerneigenschaften besitzen. Diese sind unter anderem die Nutzung der Photosynthese, der Besitz von Chloroplasten und damit die photoautotrophe Lebensweise.

Bei den Pflanzen wird zwischen den niederen und den höheren Gewächsen unterschieden. Höhere Pflanzen, wie Samenpflanzen besitzen einen Grundbauplan und Grundorgane: die Wurzeln, Sprossachsen und Blätter. Weiterhin sind höhere Pflanzen zur Ausbildung von Blüten und Samen möglich.

Bei den niederen Pflanzen gibt es keine Einteilung in Grundorgane, d.h. sie besitzen keine echten Wurzeln, Sprossachsen oder Blätter. Zu ihnen gehören unter anderem die Moose und die Algen (Zuch et al.; Besl 2002). In Tabelle 1 werden die diversen Funktionen der Grundorgane genannt.

Tabelle 1: Grundorgane und Funktionen höherer Pflanzen (Sitte et al. 2002; Dörken 2022)

Bezeichnung	Funktion
Wurzeln	Verankerung der Pflanze, Wasseraufnahme, Nährstoffaufnahme, Speicherorgan, Stoffaustausch
Sprossachsen (Stängel, Stamm etc.)	Nährstofftransport, Wassertransport, Stützfunktion, Speicherorgan
Blätter	Photosynthese, Wasserspeicher, Stoffaustausch, Gasaustausch
Blüten	Fortpflanzung

Das dritte Grundorgan neben der Wurzel- und Sprossachse ist das Blatt. Blätter sind die wichtigsten Aufbauorgane höherer Pflanzen und daher reich an Chlorophyll. Für alle Blätter charakteristisch sind die Elemente Epidermis, Mesophyll und Leitbündel. Die Blätter haben unterschiedliche Aufgaben, die wichtigsten sind die Photosynthese, die Transpiration und der Gasaustausch. Bei der Photosynthese findet eine Umwandlung von Wasser und Sonnenlicht statt. Beim Gasaustausch entsteht in den Stomata der Blätter ein koordinierter Gasaustausch von Sauerstoff und Kohlendioxid. Folgend wird bei geöffneten Poren Wasserdampf nach außen abgegeben. Aufgrund dieser Wasserverdunstung wird der Wassertransport mit gelösten

Nährstoffen durch den Transpirationszug von der Wurzelspitze zu den Blättern aufrechterhalten. Eine wichtige Folge davon ist die Verdunstungskühlung; die Blätter werden vor einer Überhitzung geschützt (Dörken 2022; Sitte et al. 2002). In Abbildung 2 ist der vereinfachte Aufbau und die Bestandteile eines Blattes abgebildet.

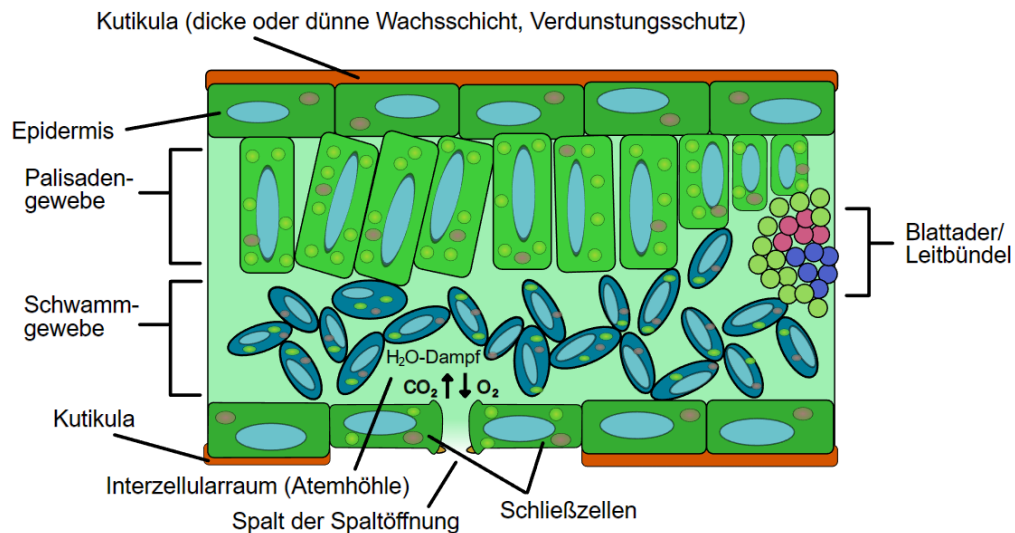


Abbildung 2: Aufbau und Bestandteile eines Blattes (Willig 2018)

Die äußerste Schicht beim Aufbau eines Blattes ist die hydrophobe Cuticula. Diese verhindert eine unregulierte Verdunstung und somit einen ungewollten Wasserverlust. Unter der Cuticula folgt die Epidermis, diese ist durchsichtig und einschichtig, um eine Absorption von Licht zu verhindern. Ebenso befinden sich hier in der Regel keine Chloroplasten. An der Unterseite der Epidermis befinden sich die Stomata (Spaltöffnungen) (Dörken 2022; Jäger et al. 2009). Die Stomata regulieren den Gasaustausch zwischen der Pflanze und der Umgebungsluft. Dazu gehören im Allgemeinen die Abgabe von Sauerstoff und Wasser (Transpiration), sowie die Aufnahme von Kohlendioxid. Stomata öffnen und schließen nach dem gleichen Mechanismus, unabhängig vom Pflanzentyp oder Anpassung an besondere Standortbedingungen. Stomata befinden sich bei den meisten Pflanzen in der unteren Epidermis der Blätter, bei Gräsern auf beiden Seiten der Blätter und bei Schwimmblattpflanzen nur auf den Blattoberseiten. Stomata können auch in der Epidermis von Stängeln und Blütenblättern gefunden werden, aber nicht in den Wurzeln (Sitte et al. 2002; Zuch et al. 2022).

Das Mesophyll ist die Gesamtheit des zwischen der oberen und unteren Epidermis liegenden Grundgewebes der pflanzlichen Blätter, mit Ausnahme der Leitbündel. Etwa 80 % aller Chloroplasten befinden sich im Palisadengewebe, dessen Hauptaufgabe die Photosynthese ist. Das Schwammgewebe besteht aus unregelmäßig geformten Zellen, die einen großen Interzellularraum bilden. Die Hauptaufgabe des Schwammgewebes besteht darin, die Belüftung

des Mesophylls sicherzustellen (Dörken 2022; Jäger et al. 2009). Im oberen Bereich des Schwammgewebes befinden sich die Leitbündel, dessen Funktion ist der Antransport von Wasser und Mineralien ins Blatt, sowie der Abtransport von Photosynthese Produkten aus dem Blatt (Dörken 2022).

2.5.2 Natürliche Mikroflora

Pflanzen werden von einer Vielzahl unterschiedlicher Bakterien besiedelt und diese können sich je nach Bakterienart positiv oder negativ auf die Pflanze auswirken. Diese Gesamtheit der Mikroorganismen wird als Pflanzenmikrobiom und aufgrund seiner Relevanz auch als zweites Pflanzengenom bezeichnet (BuBiFoPSM 2010). Eine weitere Besonderheit der Mikroflora ist, dass das Pflanzeninnere mikrobiologisch nahezu steril oder nur von wenigen Mikroorganismen besiedelt ist, die Mehrzahl aller Bakterien und Pilze befinden sich direkt auf der Epidermis und Rhizodermis (PCC-Gruppe 2019). Dort können diese Stoffwechselprodukte abgeben, die wiederum die Pflanze benötigt und die Pflanze liefert Abfallprodukte, die wiederum essenziell für Mikroorganismen sein können. Eine gesunde Mikroflora ist gekennzeichnet von Symbiose.

Neben symbiotischen Mikroorganismen können in der Mikroflora auch Pflanzenpathogene, wie zum Beispiel *Escherichia coli*, Salmonellen, Pilze oder enteropathogene Viren auftreten. Dieses negativ für die Pflanze geprägte Zusammenspiel von Pathogen und Pflanze beginnt häufig mit der Besiedelung der Pflanze durch Risse in der schützenden Cuticula oder durch die Stomata an den Blattunterseiten.

Folgen dieser Infektion sind der Nährstoffverlust, Krankheitsbefall oder Tod des Wirts. Daher verfügen Pflanzen über eine Vielzahl von Abwehrmethoden, um dies zu verhindern (Fornfeld et al. 2015). Als erste Schicht der Abwehr dienen präformierte Barrieren wie die Cuticula, der Schutz der Spaltöffnungen oder Härchen auf der Blattoberfläche. pathogeninduzierende Proteine, chemische Verbindungen (Blausäure, Senföle etc.) oder diverse Enzyme dienen als nächste unspezifische Schutzschicht, die sogenannten sekundären Pflanzenstoffe. Als letzte Barriere des Immunsystems der Pflanzen dient die aktiv induzierte Abwehr. Gekennzeichnet ist diese, durch die Reaktionen nach Erkennung des Erregers. Diese sind in Tabelle 2: Bezeichnung und Erläuterung von immunologischen Abwehrmethoden einer Pflanze erläutert.

Tabelle 2: Bezeichnung und Erläuterung von immunologischen Abwehrmethoden einer Pflanze

Bezeichnung	Erläuterung
Verstärkung von Zellwänden	Durch Einlagerung von Callose und Lignin um eine Wunde werden Pathogene verlangsamt und gestoppt.
Hypersensitive Reaktion	Durch kontrollierte Nekrose von Pflanzenzellen werden Pathogene eingegrenzt. Den Erregern werden somit Wasser und Nährstoffe entzogen.
Oxidative Burst	Aktivierung von speziellen Enzymen, die Sauerstoff-Radikale freisetzen. Die stark oxidierende Wirkung dieser Moleküle hat eine Inaktivierung von Proteinen, Abbau von Nukleinsäuren und das Oxidieren von Lipiden der Zellwand zur Folge. Sowohl Pathogene als auch pflanzeneigene Zellen sind betroffen. Sehr schnell auftretende Reaktion und Auslöser von weiteren Immunreaktionen.
Photoreaktivierung	DNA-Reparaturmechanismus. Photolyse nutzt Licht im Bereich von 300-500 nm um DNA-Schäden rückgängig zu machen

Neben Pflanzenpathogenen können durch äußere Kontaminationen, wie belastete Oberflächen/Grundwasser oder Dünger, regelmäßig Pflanzen mit Humanpathogenen in Kontakt kommen (Fornefeld 2015).

2.5.3 Pflanzenschutz

Seitdem Menschen Land bewirtschaften, müssen sie sich mit dem Auftreten von Schaderregern auseinandersetzen. Dies sind Viren, Bakterien, Pilze, Nematoden, Mäuse, Milben und viele schädliche Insekten und Schnecken, die Pflanzen im Wesentlichen schädigen. Bei Landwirtschafts- und Gartenbaukulturen können diese zu erheblichen Ertrags- und Qualitätseinbußen führen. Zusätzlich gibt es Wildpflanzen, die mit Kulturpflanzen konkurrieren und den Ertrag mindern (BIL 2023).

Um diese Ertragsverluste zu minimieren, praktizieren Landwirte und Landwirtinnen Pflanzenschutz. Aber das sind keineswegs nur chemische Mittel; vielmehr führt die Kombination verschiedener Methoden zum Ziel. Laut dem Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft sollten die vorbeugenden Maßnahmen immer Vorrang haben. Dazu gehört zum Beispiel der Einsatz standortangepasster, widerstandsfähiger Sorten, eine rechtzeitige Aussaat und eine fachgerechte Bodenbearbeitung. Ebenso hat die Fruchtfolge, die Aufeinanderfolge verschiedener Kulturpflanzen und der entstehende Nährstoffkreislauf, einen besonderen Einfluss auf die Ertragsqualität (BMEL 2022). Zusätzlich zu diesen ackerbaulichen Maßnahmen werden in Tabelle 3 weitere Schutzmethoden aufgezählt:

Tabelle 3: Übersicht der Pflanzenschutzmethoden (BMEL 2022) :

Methode	Beispiele
biologischer Pflanzenschutz	Der gezielte Einsatz von Nützlingen gegen Schädlinge.
chemischer Pflanzenschutz	Der Einsatz von chemisch-synthetischen PSM.
ökologischer Pflanzenschutz	Hauptsächlich bestehend aus biologischem und physikalischem Pflanzenschutz. Sehr begrenzter chemischer Einsatz.
biotechnischer Pflanzenschutz	Die Schädlinge werden mithilfe von Ködern und Pheromon-Duftlockstoffen weggelockt.
physikalischer/mechanischer Pflanzenschutz	Die Bekämpfung mit Hand- oder Maschinenhacke, Egge, dem Pflug, dem Absammeln oder zum Beispiel das Fangen der Schädlinge in Fallen.

Durch den Einsatz von mineralischem Dünger (Nährstoffe in pflanzenverfügbarer Form, entsprechend festgelegten Nährstoffnormen) und organischem Dünger (organisch gebundene Nährstoffe, Flüssigdünger, Kompost etc.) oder einer Kombination aus beidem, sichern Landwirte langfristig hohe Erträge und erhalten die Bodenfruchtbarkeit und -gesundheit.

2.5.4 Klassifizierung und Eigenschaften von Pflanzenschutzmitteln

Pflanzenschutz- und Schädlingsbekämpfungsmittel sind Chemikalien, die Nutz- oder Kulturpflanzen vor tierischen Schädlingen, mikrobiell bedingten Krankheiten sowie der Unkrautkonkurrenz schützen sollen. Pflanzenschutzmittel werden in der Regel entsprechend ihrer Wirkungsweise eingeteilt. Die verschiedenen Klassifizierungen sind in Tabelle 4 zu erkennen, die größte Bedeutung kommt den Herbiziden, den Fungiziden und den Insektiziden zu. PSM wirken toxisch auf diese Schadorganismen. Allerdings ist die Wirkung der meisten Mittel nicht auf diese beschränkt. Es können auch andere Tier- und Pflanzenarten geschädigt werden. Ebenso kann eine Anreicherung im Boden oder in Gewässer erfolgen oder ein langsamer Abbau die Umwelt belasten. Somit ist der Einsatz von PSM mit Risiken für Mensch, Tier und der Umwelt verbunden.

Tabelle 4: Klassifizierung von chemischen Pflanzenschutzmitteln (BVL 2023)

Wirkstoffklasse	Bekämpfte Schadorganismen	Wirkungsweise
Insektizide	Insekten	Nervengifte, Energieblocker, sowie Wachstumsregulatoren und Häutungshemmer
Fungizide	Pflanzenparasitäre Pilze	Stoffwechselstörung durch Wechselwirkungen mit bestimmten Enzymen
Bakterizide	Pflanzenparasitäre Bakterien	Auslösen einer irreversiblen Nekrose der Bakterienzellen
Herbizide	Unkräuter	Hemmung von verschiedenen Synthese- und Wachstumsvorgänge durch z.B Glyphosat
Akarizide	Milben	Hemmung des mitochondrialen Elektronentransport und die Lipidbiosynthese der Milben
Nematizide	Fadenwürmer, Älchen	Enzymhemmung durch Methylisothiocyanat
Molluskizide	Schnecken	Anorganische Salze, Alkaloide oder hormonelle Wirkstoffe lösen tödliche Signalkaskaden aus.
Rodentizide	Nagetiere	„Rattengift“, Vitamin K Antagonisten, Phosphinbildner, Altgifte (Arsenverbindungen, Weißer Phosphor, Strychnin etc.)

PSM enthalten einen oder mehrere Wirkstoffe und weitere Hilfsstoffe (Stoffe, die sich positiv auf die Herstellung, Lagerung oder Anwendung auswirken sollen). Wirkstoffe sind biologisch aktive Verbindungen, die in geringen Konzentrationen biochemische und physiologische Prozesse in pflanzlichen, tierischen und menschlichen Organismen quantitativ oder/und qualitativ im Sinne einer Aktivierung oder Hemmung beeinflussen (Umweltbundesamt 2023). Sie werden als Präparate in verschiedenen Formen wie Saatgutbehandlungsmittel, Spritzmittel oder Granulate verwendet. Wichtige Faktoren für die Beurteilung des Umweltverhaltens von Wirkstoffen sind (Umweltbundesamt 2023):

- Schmelzpunkt und Siedepunkt
- Relative Dichte
- Dampfdruck
- Henry-Konstante (der Partialdruck eines Gases über einer Flüssigkeit ist direkt proportional zur Konzentration des Gases in der Flüssigkeit. Die Proportionalität wird ausgedrückt durch die Henry-Konstante (Sander 2015))
- Molekül-Spektren und molare Extinktion
- Löslichkeit in Wasser und organischen Lösemitteln
- Säurekonstante
- Verteilungskoeffizient n-Oktanol / Wasser (P_{ow})

- Stabilität in Wasser
- Stabilität in Luft

In einer Untersuchung zur Kontamination benachbarter Nicht-Zielpflanzen konnte gezeigt werden, dass die Belastung von angrenzenden Gras- und Heckenkulturen in Abhängigkeit vom Dampfdruck der untersuchten Substanzen sehr hoch sein kann (Klöppel und Kördel 1997). Auf Helgoland wurde im Sommer 1993 in einem abgelegenen Gebiet über 500 ng/L Simazin im Regen nachgewiesen (Bester et al. 1995). Simazin ist ein ehemals weitverbreiteter Wirkstoff der Herbizide, aufgrund erhöhter Rückstände im Trinkwasser und weiteren bedenklichen Merkmalen ist Simazin seit 2003 in der EU verboten. Hemisphären übergreifende Verteilungen treten jedoch bei den meisten PSM aufgrund ihrer geringen photochemischen Stabilität nicht auf. Häufig wird von maximalen Transportstrecken bis zu wenigen tausend Kilometern ausgegangen. Solche Transportstrecken treten jedoch nur bei Substanzen mit relativ geringem Dampfdruck auf, da diese einem deutlich geringerem photochemischem Abbau unterliegen (Bernhardt 2004). Für Fenpropimorph wurden Spitzenkonzentrationen von 1,2 µg/g Trockensubstanz in 1 m Höhe und noch 0,7 µg/g Trockensubstanz in 4 m Höhe einer benachbarten Hecke nachgewiesen. Zusätzlich wurde beobachtet, dass die Konzentrationen von Chlorthalonil, Bentazon und Dichlorprop-P maximal 0,3 µg/g Trockensubstanz betragen und deren Dampfdrücke um den Faktor 15 bis 50 niedriger sind als der von Fenpropimorph (Klöppel und Kördel 1997). Hier konnte also eine starke Abhängigkeit vom Dampfdruck der Substanzen nachgewiesen werden.

Laut Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit waren 2023 in Deutschland 1854 PSM mit insgesamt 283 Wirkstoffen zugelassen (BVL 2023). In Tabelle 5 sind Beispiele einiger Wirkstoffe von PSM beschrieben.

Tabelle 5: Ausschnitt einiger Wirkstoffe von PSM (BVL 2023):

Bezeichnung	Wirkstoff und Einsatz gemäß AGRIOS1 Richtlinien	Gefahrenhinweise	Zulassung
Captan	Fungizid gegen Schorf und Lagerkrankheiten	Gewässergefährdend, vermutlich krebserzeugend	EU, Schweiz, Anwendung 14-mal pro Jahr
Fluazinam	Fungizid gegen Schorf und Alternaria	Gesundheitsschädlich beim Einatmen, sehr giftig für Wasserorganismen, kann allergische Hautreaktionen verursachen	EU, Schweiz, Anwendung 7-mal pro Jahr
Phosmet	Insektizid gegen San José Schildlaus, Apfelwickler, Blattsauger Mittelmeer Fruchtfliege, Marmorierte Baumwanze	Gesundheitsschädlich bei Hautkontakt und Verschlucken, Gewässergefährdend	EU, Anwendung 2-mal pro Jahr
Cycloxydim	Herbizid gegen Gräser		In der EU bis 2023 zugelassen
Chlorpyrifos-methyl	Insektizid und Akarizid	Gewässergefährdend, kann allergische Hautreaktionen verursachen	EU, 4-mal pro Jahr
Dithianon	Fungizid	Gewässergefährdend, toxisch bei Verschlucken	EU, 14-mal pro Jahr
Imidacloprid	Insektizid	Giftig für Bestäuberinsekten und lange Beständigkeit im Boden	Seit 2018 nur in geschlossenen Gewächshäusern in der EU erlaubt

2.6 Eintragspfade von Pflanzenschutzmitteln in die Umwelt

Es gibt verschiedene Eintrags- und Verlustpfade über die PSM in der Umwelt über einen längeren Zeitraum verbleiben können. Da auch bei den Messmethoden verschiedene Eintragspfade in Erwägung gezogen werden, um Rückschlüsse auf das Verhalten von PSM in der Atmosphäre ziehen zu können, werden einige Mechanismen im Folgenden kurz erläutert. Eine kurze Übersicht der verschiedenen Pfade befindet sich in Abbildung 3. Der Fokus in dieser Arbeit wird auf der Abdrift und auf der Deposition von PSM liegen.

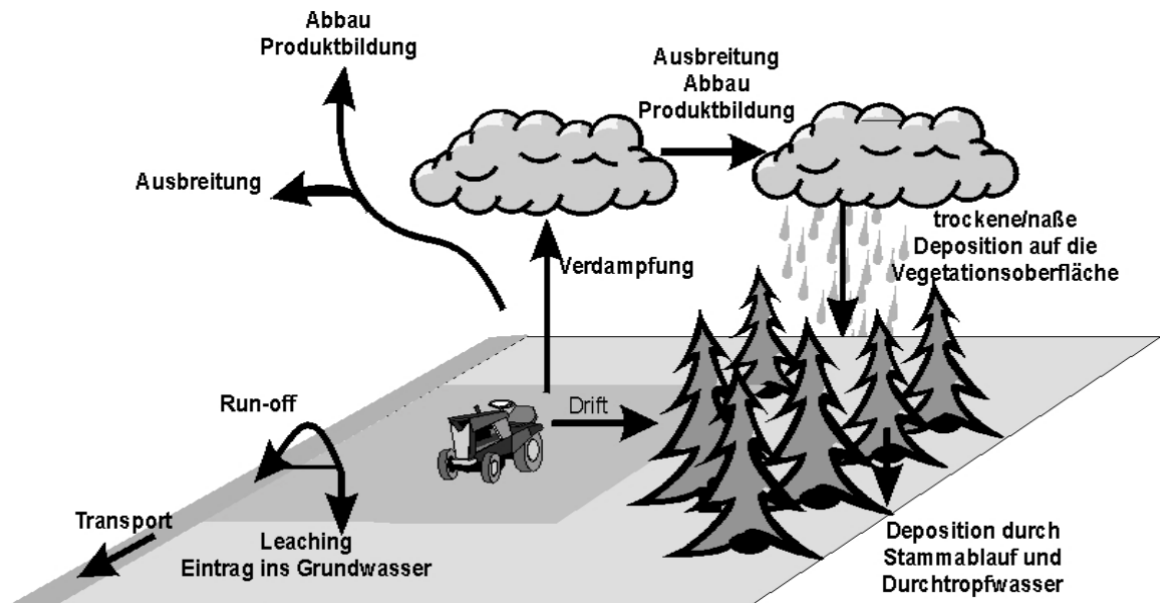


Abbildung 3: Mögliche Eintrags- und Verlustpfade von Pflanzenschutzmitteln in die Umwelt (Bernhardt 2004)

2.6.1 Abdrift

Bei der Abdrift handelt es sich um eine unbeabsichtigte Verfrachtung von PSM auf Nichtzielflächen. Dazu gehören Nachbarschläge, Wegränder, Gräben und Böschungen. Dabei wird zwischen primärer und sekundärer Abdrift unterschieden. Durch Windströmungen oder durch Fehler bei der Applikation wird die Abdrift verursacht, dabei gehören zu den Fehlern u.a. zu hohe Fahrtgeschwindigkeiten, eine falsche Düsenwahl, ein zu hoher Düsenabstand zur Zielfläche oder auch ein zu hoher Spritzdruck. In solchen Fällen handelt es sich um die primäre Abdrift. Wenn Substanzen zu einer Verflüchtigung neigen, etwa durch Thermik oder Verdunstung, dann wird damit eine sekundäre Abdrift verursacht. Es ist auch bekannt, dass PSM-Konzentrationen in der Atmosphäre ansteigen, wenn Ackerböden auch einige Zeit nach der Applikation bearbeitet werden. (Scharf und Bächmann 1993; Bernhardt 2004)

Unter anderem die Ausbringungstechnik sowie die regionalen Wetterbedingungen wie z.B. Windgeschwindigkeit und -richtung spielen eine große Rolle bei der Abdrift von PSM. Während einer Untersuchung zur Belastung benachbarter Ökosysteme in der Nähe der Zielfläche, wurden Konzentrationen zwischen 0,5 und 3 µg/m³ von Fenpropimorph, Bentazon, Dichlorprop-P, Parathion-Ethyl und Chlorthalonil in einer Höhe von einem Meter gemessen. Ausgehend von einer gleichmäßigen Drift über die gesamte Ackerlänge und einer Höhe der Driftwolke von vier Metern, wurde ein Verlust von weniger als einem Prozent der ausgebrachten Wirkstoffmenge festgestellt. Nur bei dem Stoff Parathion-Ethyl wurde eine Spraydrift von 16 – 17 % der ausgebrachten Menge gemessen. Um die Exposition terrestrischer Ökosysteme zu beurteilen, wurde die Pestizidaufnahme von standardisierten Graskulturen und von Blättern der natürlichen, windabgewandten Hecke bestimmt. Dabei wurde festgestellt, dass sowohl die Aufnahme von Fenpropimorph durch die Pflanzen nach der Ausbringung im Frühjahr als auch die Aufnahme von Chlorthalonil durch die Pflanzen nach der Ausbringung im Sommer zu hohen Konzentrationen in Nichtzielpflanzen führte. Hierbei sind klimatische Parameter relevant. Eine signifikante Anreicherung von Fenpropimorph und Chlorthalonil konnte in den Graskulturen nicht nachgewiesen werden. Da die Fenpropimorph-Konzentrationen in den Zielpflanzen niedrig waren und schnell abnahmen, wurden 6-10 Stunden nach der Anwendung keine signifikanten Unterschiede zwischen den Fenpropimorph-Konzentrationen in den Zielpflanzen und in den Graskulturen festgestellt (Klöppel und Kördel 1997).

2.6.2 Verdampfung

Über Verdunstung können sich PSM verflüchtigen, aufsteigen und mit dem Wind über mehrere hundert Meter, teils auch kilometerweit verfrachtet werden. Bei der Verdampfung von PSM spielen vorwiegend die ersten 24 Stunden nach der Applikation und der Dampfdruck der Substanz eine große Rolle. Je höher der Dampfdruck der zu untersuchenden Substanz ist, desto höher sind die Verluste (vgl. Kapitel 2.5.4). (Bernhardt 2004; Klöppel und Kördel 1997)

2.6.3 Deposition

Wenn PSM in die Atmosphäre emittiert werden, unterliegen sie einer Vielzahl von verschiedenen Transport-, Verteilungs-, und Reaktionsprozessen. Dabei wird zwischen trockener und nasser Deposition unterschieden. Die trockene Deposition hängt dabei sehr stark von meteorologischen Bedingungen oder auch von den jeweiligen Partikelgrößen ab. Die Deposition von PSM wurde in zahlreichen Projekten bei der Messung von PSM berücksichtigt (vgl. Kapitel 3). Pflanzenschutzmittel konnten bei Messungen nach der Ausbringung im Regen nachgewiesen

werden, die darin enthaltenen Substanzen überschritten dabei den Grenzwert der Trinkwasserordnung (TrinkwV) von 100 ng/L pro Einzelsubstanz. Es konnte beobachtet werden, dass die Konzentration von der Regendauer bzw. -menge abhängig ist, dabei sind die Konzentrationen zu Beginn des Regens am höchsten und innerhalb der ersten 2 bis 3 mm Niederschlag verringert sich die Konzentration auf einen Bruchteil der Ausgangskonzentration (Bernhardt 2004).

2.6.4 Leaching

Wenn PSM in tieferen Bodenschichten versickern, wird dieser Prozess als Leaching bezeichnet. Für den Mechanismus spielen physiko-chemischen Eigenschaften des PSM eine große Rolle, dazu gehören bspw. Löslichkeiten und Verteilungskoeffizienten, die versickernde Wassermenge sowie Bodeneigenschaften (Bernhardt 2004).

3 Aktuelle Messmethoden

In dem folgenden Kapitel werden verschiedene Nachweismethoden für PSM vorgestellt. Die Anzahl der Messmethoden ist vielfältig. Neben den technischen Anwendungen wie aktive Luftsammler können ebenso biologische Nachweismethoden wie z. B. Rinden genutzt werden, da PSM-Wirkstoffe häufig in den Stoffwechsel organischer Systeme miteingebunden sind. Die Wahl für eine geeignete Methode ist hauptsächlich abhängig von Komplexität, Kosten, Fehleranfälligkeit und Genauigkeit.

3.1 Aktive Luftsammler

Bei aktiven Luftsammlern wird Luft aktiv durch einen speziellen Filter und anschließend einen festen Adsorbent gepumpt. Pflanzenschutzmittel, die sich in der Partikelphase befinden, werden durch den Filter aus der Luft entfernt. Pflanzenschutzmittel, die sich in der Gasphase befinden, werden durch den Adsorbent entfernt (siehe Abbildung 4). Am Gerät lassen sich Zeitpunkt und Dauer der Probenentnahme individuell einstellen (Bolz und Kubiak 2020).

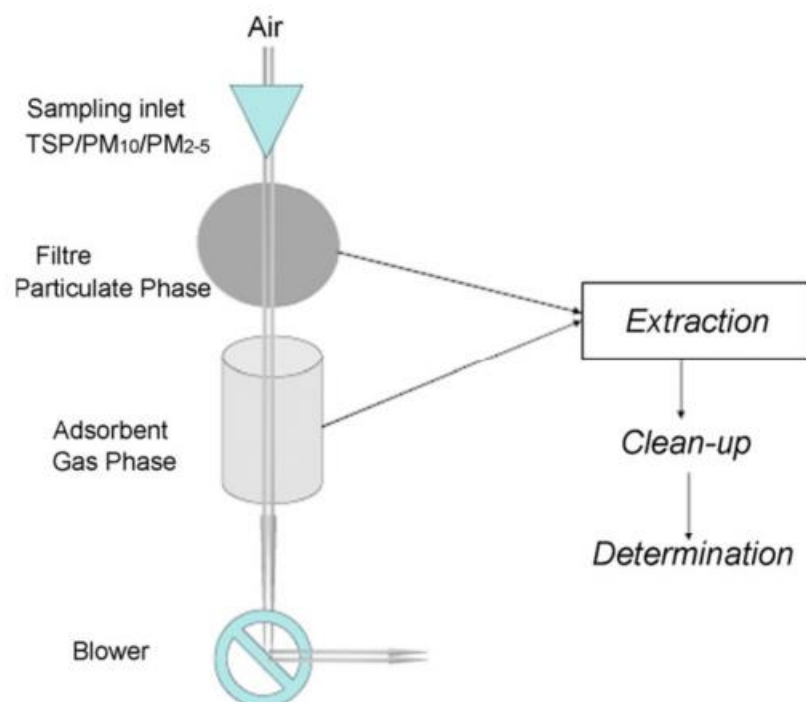


Abbildung 4: Aufbau eines aktiven Luftsammlers (Bolz und Kubiak 2020)

Für die Partikelphase eignet sich bei der Filterwahl beispielsweise Quarzfaserfilter oder Glasfaserfilter und als Adsorbent für die Gasphase Polyurethanschaum, hydrophobe Copolymere XAD-2 und XAD-4, Carbo-pack, Chromosorb oder Kieselgel, wobei XAD als Standard-Adsorbent gilt, da es viele Substanzen adsorbieren kann, leicht wiederherzustellen ist und häufig verwendet werden kann. Ein wesentlicher Vorteil der aktiven Sammler ist, dass mit ihnen die zum Zeitpunkt der Probennahme befindliche Luftkonzentration bestimmt werden kann und somit zeitliche und räumliche Veränderungen der Konzentration verfolgt werden können. Die in der Gasphase gelösten PSM können getrennt von den an Partikeln adsorbierten PSM aufgenommen werden und die Verteilung des PSM in den Luftphasen kann somit zusätzlich nachvollzogen werden. Das Gewicht, die hohen Anschaffungskosten, und die Notwendigkeit eines vorhandenen Stromanschlusses sind Nachteile der aktiven Luftsammler. (Bolz und Kubiak 2020)

3.2 Passive Luftsammler

Passive Luftsammler sind eine der gängigsten Methoden zur Untersuchung von PSM-Abdrift. Pflanzenschutzmittel, die in der Gasphase gelöst sind, können mithilfe von passiven Luftsammlern gesammelt werden. Der Vorteil dieser ist, dass sie nur auf Diffusion beruhen und ohne Strom auskommen (Ehrler und Lötscher 2019). Im Vergleich zu aktiven Luftsammlern sind sie somit günstiger und leichter (Bolz und Kubiak 2020). Ein wesentlicher Nachteil ist, dass die gesammelten Mengen einer Substanz nur in Bezug zur gesammelten Zeitspanne und nicht zur gesammelten Luftmenge wiedergegeben werden können. Sie eignen sich zur Ermittlung von räumlichen als auch zeitlichen Variationen der Pflanzenschutzmittelverteilung und der Luftqualität an den gewählten Standorten. (Yusà et al. 2009)

Häufig werden auf XAD Adsorbentharzen oder auf Polyurethanschaum basierende Passivsammler verwendet. Chemische Verbindungen werden so lange aus der Gasphase aufgenommen, bis ein Gleichgewicht zwischen der Gasphase und dem Sammelmedium eingestellt ist. Die Luftkonzentration kann mit Hilfe einer in Koblizkova et al. (2012) beschriebenen Gleichung auch mit passiven Luftsammlern ermittelt werden:

$$V_{Air} = (K'_{PSM-A}) * (V_{PSM}) * \left\{ 1 - \exp \left[- \frac{k_A}{K'_{PSM-A}} * \frac{1}{D_{film}} \right] * t \right\} \quad \text{Gleichung 1}$$

Hier muss das Luftvolumen V_{Air} ermittelt werden, dieses durchläuft den passiven Sammler in der Probennahmezeit t . Das Luftvolumen V_{Air} abhängig von dem Volumen des passiven Sammelmediums V_{PSM} , dem Verteilungskoeffizient zwischen der Luft und dem Sammelmedium

K'_{PSM-A} , der Zeit, dem Luftmassentransferkoeffizienten k_A , und der effektiven Schichtdicke D_{film} (Koblizkova et al. 2012). Die berechneten Luftkonzentrationen zeigen ähnliche Expositionsmuster wie die mit Hilfe von aktiven Luftsammlern ermittelten Luftkonzentrationen. Median-Konzentrationen können in den passiven Luftsammlern jedoch höher sein, was unter anderem durch die indirekte Abschätzung der Luftmenge und den verschiedenen Probenahmezeiten bei Verwendung von passiven Luftsammlern kommen kann. (Bolz und Kubiak 2020) Die berechneten Luftkonzentrationen zeigen ähnliche Expositionsmuster wie die mit Hilfe von aktiven Luftsammlern ermittelten Luftkonzentrationen, Median-Konzentrationen können in den passiven Luftsammlern jedoch höher sein, was unter anderem durch die indirekte Abschätzung der Luftmenge und den verschiedenen Probenahmezeiten bei Verwendung von passiven Luftsammlern kommen kann (Bolz und Kubiak 2020).

In einer großangelegten Studie (Kruse-Platz et al. 2020) wurden mit Passivsammler des Typs TE-200-PAS oder des Typs TE-PAS-DD von der Firma Tisch Environment an 49 Standorten Messungen von zahlreichen persistenten organische Luftschadstoffen durchgeführt. Die PUF-Matrix, eine Polyurethan-Scheibe mit 14 cm Durchmesser und 1,35 cm Höhe, wurde ebenso von Tisch Environmental, Inc., bezogen.

In Abbildung 5 ist der schematische Aufbau dieses Passivsammlers zu sehen. Die PUF-Matrix soll hier innerhalb eines umschlossenen Raums die semivolatilen und volatilen Wirkstoffe erfassen. Der PEF-Filter ist als weitere Matrix offen exponiert und wird zur Messung der Wirkstoffe Glufosinat und Glyphosat genutzt. Der Messzeitraum erstreckte sich von Anfang März bis Mitte November, wobei alle 2 bis 2,5 Monaten die PUF-Proben ausgetauscht wurden.

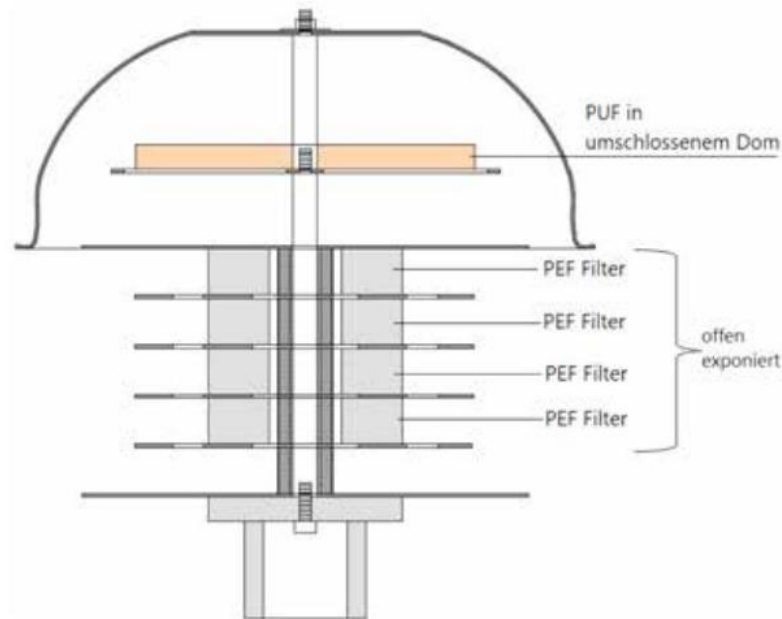


Abbildung 5: Passivsammler (TIEM Technik) mit einer PUF-Matrix zur Erfassung volatiler und semi-volatiler Wirkstoffe sowie einem PEF-Filter zur Erfassung von Glyphosat (Kruse-Plaß et al. 2020)

Im Jahr 2018 untersuchte das Umweltinstitut München die Verbreitung von zahlreichen, persistenten organischen Luftschadstoffen in der Region Vinschgau in Südtirol. Für die Messungen wurden an vier verschiedenen Standorten jeweils zwei Passivsammler des Typs TE-200-PAS von der Firma Tisch-Environment aufgestellt. (Hofmann et al. 2018) Die Scheibe aus PUF wurde zuvor mit Lösungsmittel aufgereinigt, um Verunreinigungen zu verhindern. Ende Februar 2018 wurden alle acht Passivsammler aufgestellt. Der erste Standort (A) war ein gut durch Häuser und Hecken geschützter Garten innerhalb einer Siedlung am Rande des Vinschgauer Kerbgebiets. Der zweite Standort (B) befand sich inmitten einer rein biologisch bewirtschafteten Obstwiese. Als dritter Standort (C) wurde ein deutlich von bewohnten oder bewirtschafteten Flächen abgelegenes Seitental gewählt. Für den letzten Standort (D) wurde ein Bio-Betrieb gewählt, der als direkten Nachbar einen konventionellen Betrieb hat. Die Wechsel der PUF-Scheiben fanden im dreiwöchigen Rhythmus statt. Aufgrund des dreiwöchigen Wechsels konnte eine zeitliche Differenzierung erreicht werden. Nachdem die Proben entnommen wurden, sind die in Probenröhrchen verschlossenen PUF-Scheiben in einer gekühlten und isolierten Box per Expressversand über Nacht in das Bremer Labor für Rückstandsanalytik geschickt worden. Dort wurden die Proben extrahiert und das Eluat mit HPLCMS/MS und GC-MS/MS auf 29 Wirkstoffe untersucht. Die Auswertung erfolgte für jeden Pestizid-Wirkstoff einzeln, indem der Verlauf der Pestizidbelastung an den vier Standorten über den Messzeitraum der neun Perioden mit Standardabweichung und Mittelwert grafisch dargestellt und begutachtet wurde. In dieser Studie wurde der unmittelbare „Nahbereich“ als ein Distanzbereich von bis zu 100 m definiert. Als „mittlerer“ Transport wurde ein Distanzbereich über mehrere hundert Meter

und als „Ferntransport“ eine darüber hinaus gehende Verfrachtung im km-Distanzbereich festgelegt (Hofmann et al. 2018).

3.2.1 Ergebnisse von Passivsammlerstudien

In der Studie von Kruse-Platz et al. (2020) analysierte das akkreditierte Labor KWALIS über 500 Wirkstoffe mittels Multimethode nach ASU L 00.00-115 (Bestimmung von Pestizidrückständen in pflanzlichen Lebensmitteln mittels Gaschromatographie-Massenspektrometrie (GC/MS) und/oder Flüssigchromatographie/Massenspektrometrie (LC-MS/MS)). Zusätzlich wurden die Werte für Glufosinat, Aminomethylphosphonsäure und Glyphosat mittels LC-MS/MS ermittelt. Die Wirkstoffe mit den größten Vorkommen gehen aus Tabelle 6 hervor. Eines der zu erwarteten Ergebnisse war, dass auch eine Lage abseits intensiver Landwirtschaft vor der Belastung nicht schützt. Standorte mit weiter entfernt liegenden Quellen weisen eine Vielzahl von Wirkstoffen auf. Im Biosphärenreservat Niedersächsische Elbtalaue finden sich 19 Wirkstoffe und im wesentlich höher liegenden Nationalpark Harz auf dem Brocken sind es immer noch 13. Weiterhin zeigten die Ergebnisse, dass sich die höchste Umweltbelastung von Pestiziden im landwirtschaftlich intensiv genutzten Norden und Nordosten der Republik vorfindet.

Tabelle 6: Die Wirkstoffe mit dem größten Vorkommen in den Passivsammlern nach Wirkstoffklassen (Kruse-Plaß et al. 2020; ECFS 2023)

Wirkstoff	Zulassung in Deutschland	Bemerkung	Gefunden in Anzahl/Standorte	Median (ng/Probe)
Glyphosat	Zugelassen		49	98,4
Chlorthalonil	Nicht zugelassen	Seit 2020 in der EU nicht zugelassen	47	272,5
(S)Metolachlor	Zugelassen	(RS)Metachlor in DE verboten	45	58,1
Pendimethalin	Zugelassen		44	145,5
Terbuthylazin	Zugelassen		44	77,3
Prothioconazol-desthio	Zugelassen		42	35,0
Dimethenamid	Nicht zugelassen	Seit 2006 in EU verboten. Dimethenamid-P als Herbizid erlaubt und sehr verbreitet.	40	37,6
Prosulfocarb	Zugelassen		40	90,7
AMPA		Metabolit von Glyphosat	40	25,1
Flufenacet	Zugelassen		35	20,0
Tebuconazol	Zugelassen		32	13,9
Aclonifen	Zugelassen		27	12,2
Chlorflurenol	nicht zugelassen	Seit 2003 in der EU nicht zugelassen	27	53,9
HCB	nicht zugelassen	Seit 1981 in der BRD nicht zugelassen	27	10,8
HCH-gamma	nicht zugelassen	Seit 2007 in der EU nicht zugelassen	26	16,5
MCPA	Zugelassen		22	
PCB	Nicht zugelassen	Akut toxisch und sehr umweltschädlich. Herstellung seit 1989 in DE Verboten. Weltweit seit 2001	20	
Epoxiconazol	Nicht zugelassen	Seit 2020 in der EU verboten	18	
Folpet	zugelassen		17	

In der Studie des Umweltinstitut München im Vinschgau konnte von den 29 untersuchten Wirkstoffen 20 nachgewiesen werden, die fehlenden 9 Wirkstoffe waren alle unterhalb der Bestimmungs-grenze. Der letzte Standort D erwies sich, wie erwartet, am als stärksten belastet aus. Auf dieser Fläche finden selbst aber keine Applikationen von PSM statt. Die integrierte Standort-belastung (über die neun Messperioden) über alle 20 nachweisbaren Wirkstoffe erreicht dort einen Wert von 52062 ng/ PUF-Scheibe. Am zweitstärksten belastet ist die Bio-Apfelplantage, in deren Umgebung sich ebenfalls konventionelle Anbauflächen befinden, mit einer Belastung von 33282 ng/PUF-Scheibe. Weit niedriger als D und B ist die Belastung des ersten Standorts A, der sich innerhalb einer Siedlung befand mit 2715 ng/PUF-Scheibe. Am wenigsten belastet erwies sich der dritte Standort C, das Seitental, mit 773 ng/PUF-Scheibe. Eine grafische Darstellung der Ergebnisse ist in Abbildung 6 zu sehen. In Abbildung 7 ist weiterhin ein zeitlicher Verlauf der Messungen dargestellt. Schlussfolgernd beweist Hofmann et al. (2018) mithilfe der Ergebnisse, dass ein Ferntransport von Pestiziden über kilometerweit entfernte Distanzen möglich ist, der reine Biobetrieb sehr erschwert wird und dass eine erheblich höhere und über den Saisonverlauf andauernde Belastung von Pestiziden besteht und damit ein entsprechend höheres Gefahrenpotenzial verursacht.

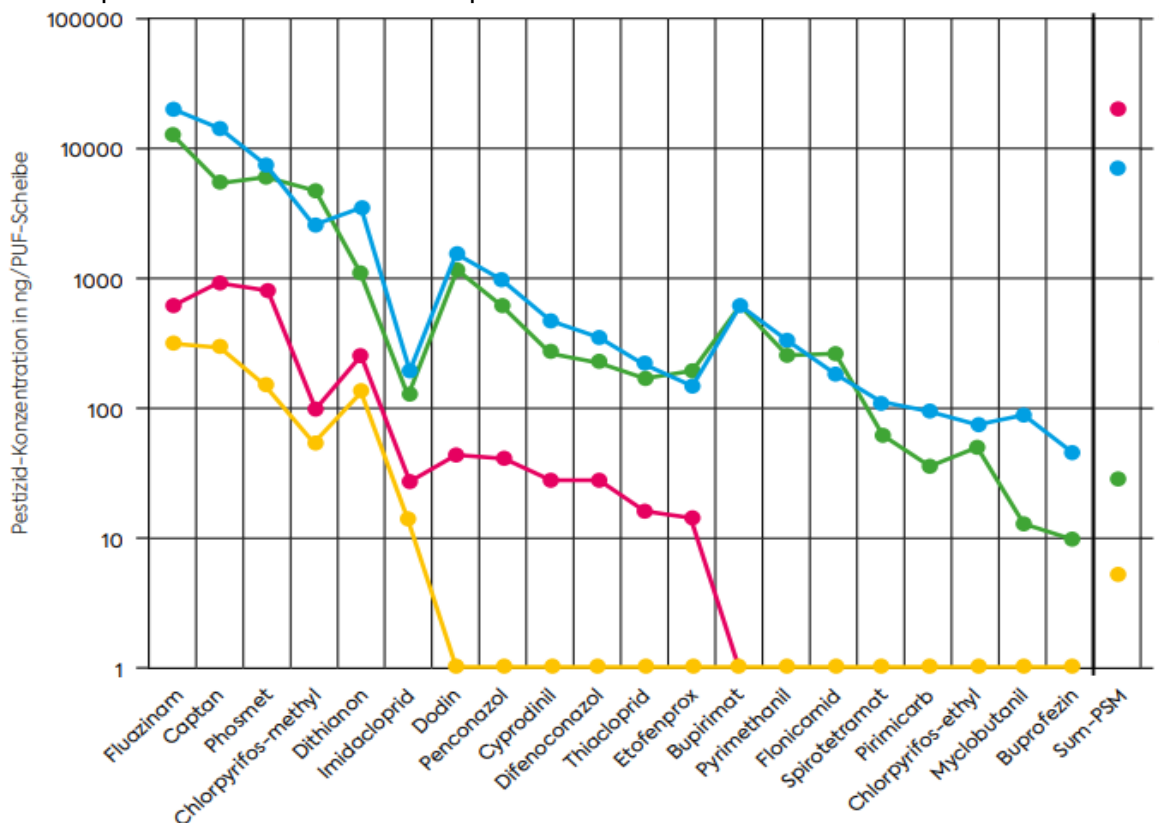


Abbildung 6: Darstellung der Pestizid-Immissionsprofile an den 4 Standorten in einer logarithmischen Darstellung in \log_{10} ng/PUF-Scheibe. Farblich sortiert in Standort A, Standort B, Standort C, Standort D (Hofmann et al. 2018)

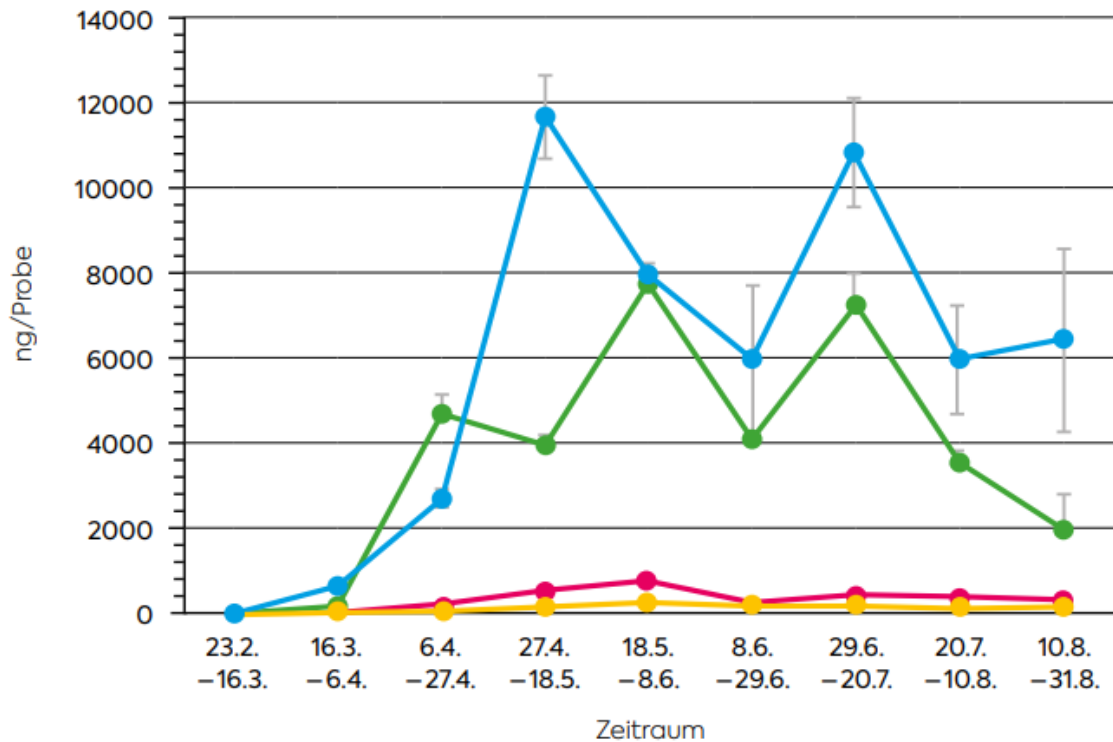


Abbildung 7: Verlauf der summarischen Pestizid-Immissionsbelastung über die 9 Messperioden im Sommer 2018 an den 4 Standorten a) lineare Maßstabsdarstellung in ng/PUF-Scheibe Standort A, Standort B, Standort C, Standort D (Hofmann et al. 2018)

3.3 Passives und aktives Biomonitoring

Das passive und aktive Biomonitoring von PSM wird durch natürliche Organismen, die als Luftsammler fungieren, ermöglicht. Für das passive Monitoring sind Rinden ein wichtiges Medium, dieses tote Gewebe kann über Jahre hinweg Schadstoffe aus der Umwelt aufnehmen und diese akkumulieren. Zusätzlich werden diese nicht metabolisch abgebaut. Rindenmonitoring kann mit einem geringen Zeitaufwand einen Überblick über Immissionsbelastung geben (Bolz und Kubiak 2020).

Der fehlende Bezug zur gesammelten Luftmenge und die einmalige Beprobung erweisen sich als Nachteile für diese Messmethode. Eine standardisierte Probenentnahme ist durch spezielle Rindenprobennehmer möglich. Zusätzlich zu Rinden können auch Flechten als natürliche passive Luftsammler analysiert werden. Das Fehlen einer Cuticula, die eine Barriere für PSM darstellen kann, das Fehlen von internen Transportprozesse und die Abhängigkeit von der Atmosphäre als Nährstofflieferant erweisen sich als Vorteile gegenüber Rinden. Blätter, Moose und Nadeln von Nadelbäumen sind ebenfalls wichtige Organismen für das passive Biomonitoring. Das aktive Biomonitoring zeichnet sich durch das gezielte Aufstellen und Erproben von standortfremden Pflanzen aus. Der Unterschied zum passiven Biomonitoring ist, dass keine in

der Natur gewachsenen Pflanzen beprobt werden. Grünkohl eignet sich beispielsweise für diese Methode, hier kann die VDI-Richtlinie 3957 Blatt 3 als Grundlage genutzt werden. Grünkohl wird für 8 Wochen in einem Gewächshaus angezogen und anschließend an den Messstellen aufgestellt. Die Blätter des Grünkohls werden aufgrund ihrer Wuchsform gut umströmt. Durch die ausgeprägte Wachsschicht der Blätter können sich die zumeist lipophilen Substanzen einfach anlagern und die Kräuselung der Blätter bewirkt eine vergrößerte Oberfläche. Ein zusätzlicher Vorteil ergibt sich durch die Winterhärte des Grünkohls, da somit auch über die kalte Jahreszeit ein Monitoring stattfinden kann. (Bolz und Kubiak 2020) Graskulturen und Tabakpflanzen sind ebenfalls geeignete Nachweismöglichkeiten für organisch-chemische oder anorganische Verbindungen (LfU Bayern 2023). Die entnommenen Proben können hier ebenfalls mittels GC/MS oder LC/MS/MS analysiert werden.

3.4 Bienenbrotmonitoring

Für die Untersuchung der Verbreitung von Wirkstoffen in einer biologischen Matrix ist Bienenbrot ebenfalls eine geeignete Methode. Diese Methode zählt zum Biomonitoring. Bienenbrot wird auch Blütenpollen genannt, der von den Stockbienen mit dem Speichel der bearbeitenden Bienen vermischt und dadurch fermentiert wird. Dies geschieht bei den Einlagerungsvorgängen. Durch diese Fermentierung wird der Pollen haltbar. Darüber hinaus wird der Pollen in der Zelle mit einer Propolissschicht umschlossen, die ihn vor Bakterien- und Pilzbefall schützt (Gilliam 1979). An Bienenbrot haften Pflanzenschutzmittelwirkstoffe aufgrund des eher lipophilen Charakters besser am Pollen als am hydrophilen Honig. Weiterhin dient das Bienenbrot über längere Zeit als Nahrung für Ammenbienen und Larven. Mögliche mittel bis langfristige Effekte auf Bienenvölker sind hier eher zu erwarten als durch den eingelagerten Honig. Ein Nachteil der Messmethode ist die hohe Abhängigkeit an das Wetter im Messzeitraum, je weniger Pollenmaterial desto weniger aussagekräftige Proben. Das entnommene Bienenbrot kann mittels GC/MS oder LC/MS/MS analysiert werden. Aus den entnommenen Bienenbrotproben können, wenn auch in geringerer Anzahl, der Großteil der relevanten Wirkstoffe quantitativ nachgewiesen werden (Bolz und Kubiak 2020; Kruse-Platz et al. 2020). Mithilfe der Methode ist es möglich, ungefähr 400 der relevanten Wirkstoffe nachzuweisen (BMEL 2021).

3.5 Bulk- und Niederschlagsammler

Bulksammler, wie in Abbildung 8, ermöglichen die Erfassung von nasser Deposition durch Regen, die Substanzen aus der Luft auswäscht, und trockener Deposition. Es handelt sich bei den Sammlern um offene Gefäße mit einer trichterförmigen Öffnung. In der Öffnung setzt sich

der Staub ab und wird mit dem Regen hinein gespült. Bulksammler gibt es in verschiedenen Ausführungen. Einfache Varianten bestehen nur aus dem zuvor beschriebenen Gefäß. Es gibt aber auch technisch aufwendigere Modelle, die über die Möglichkeit verfügen die Proben im Sommer zu kühlen bzw. das Gerät im Winter aufzuheizen, mit dem Ziel Schnee auf dem Gerät zu schmelzen und in flüssiger Form aufzufangen. Die gesammelte Menge wird als Gewichtseinheit in Abhängigkeit der Fläche und des Zeitraumes ermittelt. An jedem Standort sollten für ein Monitoring die gleichen Sammler verwendet werden, da die ermittelten Werte abhängig von dem verwendeten Gefäß sind. Mit elektrisch betriebenen Bulksammlern können Proben gekühlt werden, wodurch ein Abbau verhindert werden kann. Allerdings sind die Anschaffungskosten höher. Gleichzeitig muss ein Stromanschluss vorhanden sein (Bolz und Kubiak 2020).

Niederschlagssammler ermöglichen die Sammlung von PSM-Rückständen, die in der Atmosphäre an Partikel gebunden sind oder in der Gasphase gelöst vorliegen. Bei Regen werden die in Frage stehenden Substanzen aus der Atmosphäre ausgewaschen und können in den Sammlern aufgefangen werden. Während Bulksammler auch trockene Deposition auffangen, ist bei den Niederschlagssammlern das Auffanggefäß in niederschlagsfreien Phasen geschlossen. Ein Sensor registriert bei Niederschlagssammlern den einsetzenden Niederschlag und öffnet das Sammelgefäß. Dies bedeutet, dass zur Messung Niederschlagsereignisse notwendig sind. Das Einsammeln und die Analyse der Proben müssen daher flexibel durchführbar sein (Bolz und Kubiak 2020).

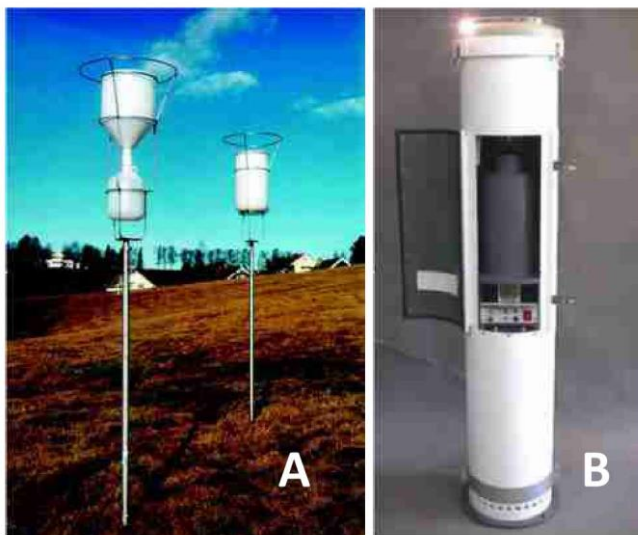


Abbildung 8 A: Einfacher Bulksammler. B: elektrischer Bulksammler mit Kühlung bzw. Heizung (Bolz und Kubiak 2020; Eigenbrodt 2014)

Im Rahmen eines Forschungsprojektes des UBA war das Ziel, Kenntnisse über die Verteilung und das Verhalten von PSM in der Atmosphäre zu erlangen. Für die Probenahme und Analytik

wurden insgesamt drei Probenahmestellen ausgewählt. Zwei davon waren in Reinluftgebieten, die quellenferne Probenahmeorte für Ferntransportmessungen repräsentiert haben. Bei der dritten Stelle handelte es sich um ein landwirtschaftlich genutztes Gebiet, welches als quellennahe Probenahmestelle genutzt werden konnte. Meteorologische Daten wie Regenmenge, Regenzeit, Regenräume, Temperatur und Hauptwindrichtung wurden erfasst, um sinnvolle Messungen durchzuführen. Die Analyse wurde mittels Gaschromatographie durchgeführt. Die Parameter zur Gaschromatographie sind in dem Bericht von J. Scharf und K. Bächmann zu finden. (Scharf und Bächmann 1993)

Als Ergebnis zeigten die Ferntransportmessungen, dass es zu einer gleichmäßigen Verteilung der Wirkstoffe in der Atmosphäre kommt. Über die Henry-Konstante sind nur bedingt Aussagen über Wiederfindungen ableitbar gewesen. Die Wirkstoffe werden trotz kurzer Halbwertszeit noch lange nach der Applikation gefunden. Durch Resuspension gelangen sie nach vier bis fünf Monaten immer wieder in die Atmosphäre. Nahtransportmessungen zeigten in der Konzentrationsmessung drei Maxima bei der Applikation; das erste Maximum war bei Beginn der Applikationsperiode, das zweite war bei Beginn der Ernteperiode und das dritte wurde durch die Bodenbearbeitung verursacht, dabei gelangen die nicht abgebauten Wirkstoffe aus Bodenschichten in Atmosphäre. Im Vergleich zu den Ferntransportmessungen waren die Wirkstoffkonzentrationen bei den Nahtransportmessungen zehn Mal höher. Der Grund dafür ist die Windbewegung, die eine Fernverteilung der Wirkstoffe durch direkte und indirekte Abdrift bewirkt. Dadurch sind die Depositionsregionen auch nicht kontrollierbar, sodass zum Beispiel die Wasserschutzgebiete und das Brunnen Trinkwasser kontaminiert sein könnten. (Scharf und Bächmann 1993)

3.6 Nachweis von Drift und Deposition

Der Nachweis der Abdrift von Pflanzenschutzmitteln kann grundsätzlich durch zwei Methoden erfolgen. Zum einen durch eine direkte chemische Analyse und zum anderen durch den Einsatz von Tracern. Bei der chemischen Analyse wird die Luft durch ein Adsorptionsmittel geleitet und die darin enthaltenen Pflanzenschutzwirkstoffanteile extrahiert. Die Ergebnisse können dann durch Methoden der Massenspektrometrie und der Gaschromatographie analysiert werden (Gil und Sinfort 2005). Bei der Anwendung von Tracern gibt es verschiedene analytische Methoden in Abhängigkeit der Art des verwendeten Tracers. Ganz allgemein wird bei diesem Verfahren der auszubringenden Spritzflüssigkeit ein Markierungsmittel (Tracer) zugesetzt, deren Abdrift und Deposition dann analysiert werden kann (Göhlich 1982).

Es gibt Tracersysteme basierend auf wasserlöslichen Metallsalzen und Luftprobensammlern, die zur Analyse atomare Absorptions-Spektrophotometer (AAS) verwenden. Weitere analytische Methoden umfassen die Kolorimetrie sowie die Fluorometrie. Zur Quantifizierung der Abdrift in der Luft werden bspw. fluoreszierende Markierungsmittel mit Zusatz von nicht-ionischen Tensiden eingesetzt. Bei fluoreszierenden Markierungsmitteln besteht das Problem, dass sie bei Sonneneinstrahlung degradieren, was eine korrekte Messung behindern kann (Gil und Sinfort 2005).

3.7 Nachweis Verflüchtigungs- und Depositionsraten

Um Verflüchtigungs- und Depositionsraten von PSM von Boden- und Pflanzenoberflächen zu bestimmen, wurde ein geschlossenes Laborsystem am Institut für Agrarökologie entwickelt.

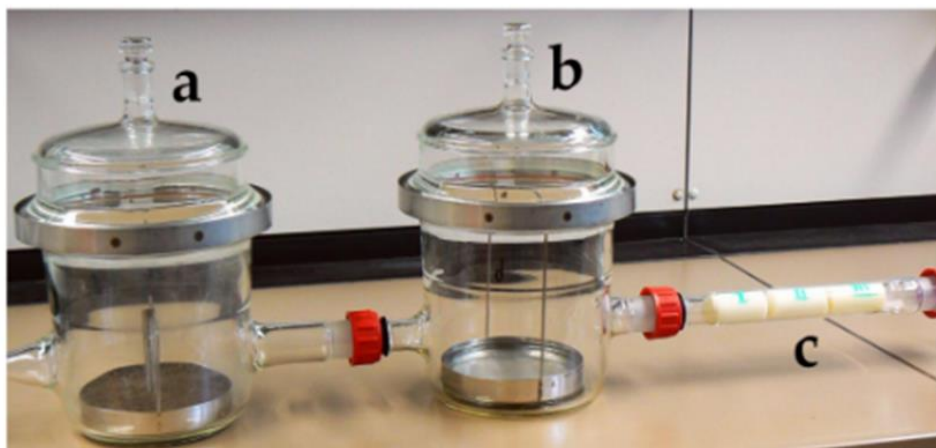


Abbildung 9 Labortestsystem, bestehend aus Verflüchtigungskammer (a), Depositionskammer (b) und PU-Fallensystem (c) (Staffa et al. 2012)

Am Anfang des Experiments wurde Lindan, ein leicht flüchtiges PSM, auf verschiedene Matrices (feuchte-, luftgetrocknete Boden, und Kartoffelblätter) appliziert und in eine Verflüchtigungskammer gestellt. Die Luft wird mit konstanter Geschwindigkeit über die Oberfläche geleitet. In einer nachgeschalteten Depositionskammer geht ein Teil des verflüchtigten Lindans von der Gas- in die Wasserphase über. Im folgenden Fallensystem werden verflüchtigte Anteile des PSM und dessen Abbauprodukte in Polyurethan-Schäumen (PU) zurückgehalten. Das Wasser wird in der Depositionskammer regelmäßig beprobt und die PU-Schäume gewechselt. Die Verflüchtigungs- und Depositionsrate sowie die Luftkonzentrationen lassen sich über die Zeit bestimmen und Luftkonzentrationen errechnen (Staffa et al. 2012).



Abbildung 10 Verflüchtigungskammer mit appliziertem Kartoffelblatt (Staffa et al. 2012)

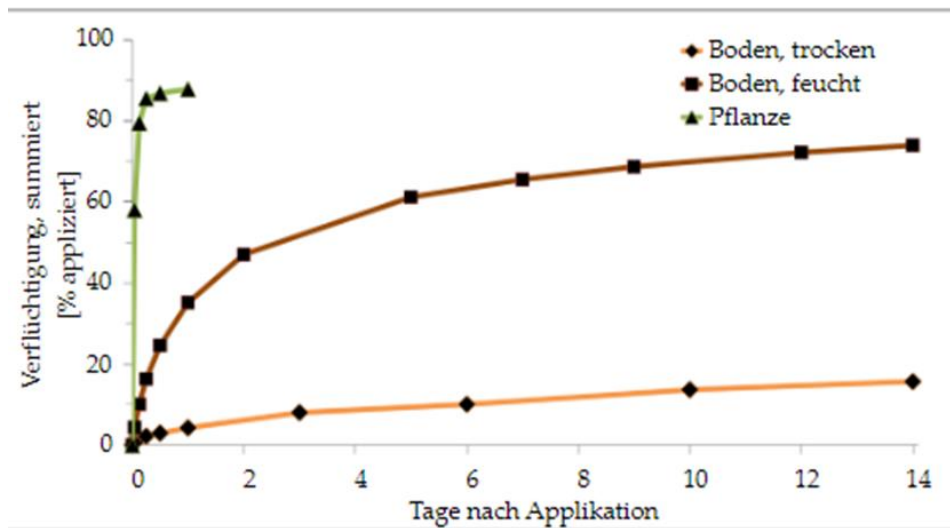


Abbildung 11 Kumulierte Verflüchtigung für die drei Versuchsvariante (Staffa et al. 2012)

Nach einem Tag war die höchste Verflüchtigung (88% des applizierten Lindans) auf den Kartoffelblätter zu finden, wie in Abbildung 11 dargestellt. Mehr als 60% der applizierten Menge des Lindans waren nach einer Woche beim feuchten Boden verflüchtigt. Am Ende des Versuchs (nach 14 Tagen) waren insgesamt ca. 74% des Lindans verflüchtigt (Staffa et al. 2012).

3.8 Abdrifteckwerte

Im Rahmen einer bundesweiten Studie wurden in den Jahren 1989 bis 1992 insgesamt 119 Abdriftmessungen im Feld-, Wein-, Obst- und Hopfenbau in Anlehnung an die JKI-Richtlinie 7-1.5, die in Kapitel 2.4 beschrieben ist, durchgeführt. Ziel dieser Studie war es die damalige schwache Datengrundlage bezüglich PSM-Abdrift zu erweitern. Auf der Grundlage der 95%-Percentile (eine verteilungsfreie Kenngröße für das „worst case“ Szenario) und der Einzelmesswerte wurden Abdrifteckwerte für die genannten Kulturen festgelegt. Mithilfe dieser Eckwerte wurden die zu erwartenden Konzentrationen eines Pflanzenschutzmittels bzw. eines Wirkstoffes berechnet. Die Ergebnisse wurden als Bodensediment in Prozent bezogen auf die Aufbringungsmenge angegeben und sind in Abbildung 12 dargestellt. Wetterparameter (relative Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit, Temperatur und Windrichtung) sowie Geräteparameter (Hersteller, Typ, Düsenart, Druck, Nachweisstoff, Fahrgeschwindigkeiten) wurden protokolliert (siehe Tabelle 7) (Ganzelmeier et al. 1995).

Ab- stand [m]	Flächenkultur			Raumkulturen					
	f	s	f+s	Weinbau		Obstbau		Hopfenbau	
	f	s	f+s	f	s	f	s	f	s
1	4,0	5,0	4,0	23,2	20,0	46,2	26,7	47,6	23,4
2	1,6	1,8	1,6	8,0	12,0	34,5	22,3	39,9	19,9
3	0,9	1,4	1,0	4,9	7,5	29,6	19,6	32,3	17,7
4	0,6	1,0	0,9	2,6	5,8	23,8	15,3	26,1	15,4
5	0,5	0,7	0,6	1,6	5,2	19,5	10,1	18,0	12,7
7,5	0,3	0,5	0,4	1,0	2,6	14,1	6,4	8,5	10,8
10	0,3	0,4	0,3	0,4	1,7	10,6	4,4	4,8	8,9
15	0,2	0,2	0,2	0,2	0,8	6,2	2,5	1,7	4,7
20	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4	4,2	1,4	0,8	3,8
30	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	2,0	0,6	0,3	2,1
40	—	—	—	0,1	—	0,4	—	0,1	0,3
50	—	—	—	0,1	—	0,2	—	0,1	0,3

Anmerkung:
 Bodensedimente in Prozent (95 % - Percentile der Einzelwerte),
 bezogen auf den Aufwand in l/ha od. kg/ha

f frühe Wachstumsstadien
 s späte Wachstumsstadien
 — Werte nicht ermittelt

Abbildung 12: Aus den Abdriftwerten ermittelte 95% Percentile (Bodensediment) (Ganzelmeier et al. 1995).

Die Daten in Ganzelmeier et al. (1995) sind insofern wichtig, als dass sie sehr umfassende Versuchsdaten zu verschiedenen Kulturen und Entfernungen zur Aufbringfläche bieten. Ergänzt durch die Versuche in Rautmann et al. (2001), die mit verbesserter Messtechnik und der zusätzlichen Entfernung von 100 m durchgeführt wurden, bilden sie die Datengrundlage für

die meisten Modellierungen. Im Folgenden werden sie auch als Abdrifteckwerte bezeichnet: Aktuelle Werte zu Abdrifteckwerten und sind im Bundesanzeiger und zusammengefasst in einer Excel-Tabelle auf der der Seite des JKI zu finden (Rautmann 2023).

Tabelle 7 Parameter der Abdrifteckwert-Messungen aus (Ganzelmeier et al. 1995)

Parameter	
Flüssigkeitsaufwand	300 l/ha
Fahrgeschwindigkeit	6 km/h
Windgeschwindigkeiten	0,8 m/s und 3,6 m/s
Temperaturen	10- 17 °C
Luftfeuchte	57-83 %.
Düsendruck	2,4 - 2,5 bar
Düsenart	Flachdruckdüse
Weitere Bemerkungen	ohne verlustmindernde Technik

4 Modellierung von Abdrift

Modellierungen zum Verbleib von Pflanzenschutzmitteln müssen sehr komplexe Prozesse der Umwelt und Atmosphäre darstellen. Dabei gilt den Übergang in die Luftphase, die Verteilungs- bzw. Abbauprozesse in der Luft und die Deposition auf Oberflächen darzustellen. In vielen Modellen wird nur ein Eintragspfad betrachtet.

In Anlehnung an Bolz und Kubiak (2020) wird in diesem Kapitel kurz auf die mathematischen Voraussetzung der Modelle eingegangen.

Viele Modellierungen sind vor allem für aquatische Nicht-Zielflächen gedacht. Die Auswahl für Ausbreitungsmodellierungen für Luft und Boden sind in der Literatur wenig vertreten bzw. nicht sehr ausführlich betrachtet. Trotzdem gibt es verschiedene Modellierungen zur Ausbreitung von Abdrift. Die Mehrheit dieser Modelle finden sich in Programmen zur Expositions- und Risikoabschätzung wieder. Exemplarisch werden in diesem Kapitel einige Modellierungen mit dem Eintragspfads Abdrift für Luft aber auch Wasser vorgestellt. Weitere Modelle für Abdrift und Modelle für andere Eintragspfade werden kurz zusammengefasst.

4.1 Mathematische Grundlagen und Voraussetzungen

Die FOCUS Working Group on Pesticides in Air (FOCUS Air Group), eine Arbeitsgruppe (2002-2006) die sich mit Pestiziden in der Luft und ihrer Ausbreitung beschäftigte, beschreibt die verschiedenen Stufen der Komplexität von vorhandenen Modellierungen. Es werden drei Ansätze unterschieden, „die für die Modellierung der Verfrachtung von PSM über den Luftweg in Betracht gezogen werden können. 1. über einfache empirische Regressionsgleichungen, die über Verflüchtigungsstudien gewonnen wurden, 2. Komplexere Methoden, bei denen auch Umweltfaktoren und Substanzeigenschaften herangezogen werden, 3. sehr komplexe Modellierungen, bei denen Verflüchtigung nur ein Teil ist, welcher in eine Vielzahl numerischer Modelle zum Umweltverhalten von PSM eingebaut ist.“

Im Gegensatz zu den empirischen Ansätzen stehen die mechanistischen, welche nicht auf in Versuchen gewonnenen Daten basieren, sondern auf Prozessgleichungen, die anhand von fundamentalen, theoretischen Konzepten aufgestellt wurden. Mechanistische Modelle gelten als robuster, da rein empirische Modelle auf Grund der endlichen Versuchszahl meist nicht alle möglichen Versuchsausgänge abdecken können.

Weiter können deterministische von stochastischen Modellen unterschieden werden. Erstere geben unabhängig von der Anzahl an Durchführungen stets das gleiche Ergebnis bei gleichen Eingabeparametern. Stochastische Modelle hingegen geben ein Konfidenzintervall mit an

(Burns 2000), da sie die Variation der Exposition durch die mehrfache, zufällige Kombination der verteilungsbasierten Eingabeparameter berücksichtigen. (Golla et al. 2011). Von Burns (2000) wird jedoch angemerkt, dass der statistische Fehler der betrachteten Variablen nicht immer im Detail bekannt ist.“ (zitiert nach Bolz und Kubiak 2020, S. 39)

Random-Walk Modelle werden verwendet, um die Ausbreitung von Gasen in der Atmosphäre zu modellieren. Bei dieser Methode wird die Flugbahn eines jeden markierten Fluidelements auf seinem Weg durch die Atmosphäre verfolgt. Durch Verfolgung einer ausreichend großen Anzahl von Flugbahnen können aussagekräftige Schätzungen der Ausbreitungsstatistiken erhalten werden. (Hashem und Parkin 1991)

„Des Weiteren können noch zwei Ansätze unterschieden werden, die zur Modellierung verwendet werden können: das Lagrange'sche- und das Euler'sche-Modell. Bei ersterem wird die Flugbahn jedes einzelnen Partikels berechnet, bei letzterem hingegen wird das Medium Luft in ein mehrdimensionales Raster unterteilt und die Gesamtdiffusion und Konvektion der Partikel wird betrachtet. Dadurch ist das Lagrange'sche Modell zeitaufwändiger und hat einen höheren Rechenaufwand im Vergleich zum Euler'schen Modell (Saidi et al. 2014; FOCUS 2008)“ (zitiert nach Bolz und Kubiak 2020, S. 39)

4.2 SPEXUS-Modell

Einen Ansatz zur Modellierung und Bewertung der Abdriftablagerungen bei der Pestizidbehandlung von Kernobstplantagen (Raumkultur) bietet das Modell mit dem Namen „Spray Drift Exposure for Upward and Sideways directed Sprays“ (SPEXUS). Dabei werden Daten aus 20 Jahren Spray-Drift-Experimenten herangezogen. Das Hauptziel dieser Experimente bestand darin, verschiedene Applikationstechniken zur Verringerung der Sprühabdrift im Vergleich zu einer gegebenen Standardtechnik, einer üblicherweise verwendeten Querstrom-Fächertechnik, zu bewerten. Daher wurden für diese Standardanwendungstechnik zahlreiche experimentelle Daten unter unterschiedlichen Bedingungen gesammelt, dazu gehören verschiedene Jahreszeiten und alle Wachstumsstadien der Obstbäume. Dabei wird die Kronendichte, als phänologisches Wachstumsstadium BBCH², mit dem Tag des Jahres (DOY³) verknüpft. Das Modell der Sprühablagerungen wird in Windrichtung als Funktion der Entfernung von der letzten Baumreihe angegeben. Für die Standardanwendungstechnik waren 158 Experimente mit gepaarten Ablagerungen aus Versuchen zwischen 1992 und 2011 verfügbar (Holterman et al.

² Beispiele: BBCH-Code: 7, Beginn des Austriebs erste grüne Blattspitzen sichtbar; BBCH-Code: 55, Blütenknospen sichtbar (noch geschlossen)

³ DOY steht für „Day of year“.

2018). Als Sammler wurden synthetische Filtermaterialien auf den Boden gelegt, die Filter im Labor gewaschen und die Fluoreszenz der extrahierten Lösung gemessen und die Ablagerungen aus der Tracerkonzentration berechnet. Windgeschwindigkeiten in verschiedenen Höhen, sowohl in Windrichtung als auch über der Obstanlage wurden gemessen oder geschätzt. Bei den Berechnungen wurde ein logarithmisches Geschwindigkeitsprofil berücksichtigt und die Windgeschwindigkeiten in 4 m Höhe über dem Boden innerhalb der Plantage in den Messdaten angepasst. Die Sprühabdrift aus der Luft wurde auch gemessen, aber nicht für die Modellentwicklung in diesem Bericht verwendet. Teilweise wurden die Daten mit meteorologischen Daten aus den nahegelegenen Wetterstationen ergänzt (Holterman et al. 2018). Abbildung 13 zeigt den schematischen Aufbau der Experimente zur Messung der Ablagerung in Windrichtung. Die Richtung, in der das Spray auf die Bäume gesprüht wurde, wird durch die roten Pfeile angezeigt.

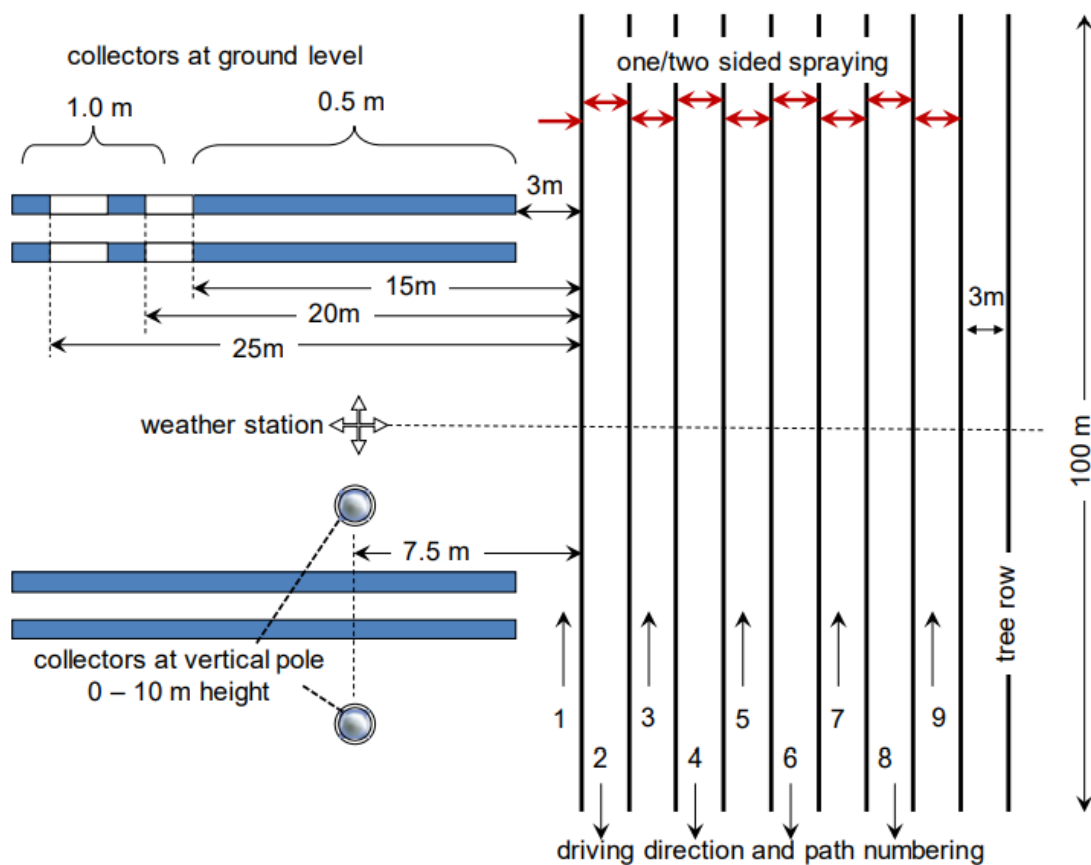


Abbildung 13 Schematischer Aufbau der Experimente zur Messung (Holterman et al. 2018)

Zur schnellen Konvergenz wurde in der ersten Phase der Kurvenanpassung das Levenberg-Marquardt-Verfahren (LM-Verfahren) angewendet, also ein numerischer Optimierungsalgorithmus zur Lösung nichtlinearer Ausgleichs-Probleme mit Hilfe der kleinsten Quadrate. Dabei handelt es sich um eine Modifikation des Gauß-Newton-Verfahrens zur Verbesserung der Iterationsstabilität (Holterman et al. 2018).

In dem Bericht von Holterman et al. (2018) gibt eine Übersicht (vgl. Tabelle 8) mit Konstanten, den dazugehörigen Werten und deren Zusammenhang mit Größen in unterschiedlichen Gleichungen.

Tabelle 8: Optimierte Faktoren und ihre dazugehörigen Werte (Holterman et al. 2018)

Submodel	Factor	Sub-factor	Value	Eqs.
Main factors	q_1	q_{10}	0.9952634	(3), (4)
	q_2	q_{20}	0.3498658	
	c	a	0.5042081	(3), (13)
		m	0.6334076	
Wind speed factor	F_{w1}	a_{11}	0.2543382	(4), (5)
		a_{21}	0.0449953	
	F_{w2}	a_{12}	0.2439259	
		a_{22}	-0.0281577	
Canopy density factor	β	a_0	1.3863454	(14), (15)
		a_1	1.4627357	
		a_2	-0.4627521	
		a_3	0.9660170	
		a_4	5.2203472	
Temperature factor	F_{T1}	b_{11}	0.0305028	(4), (6)
		b_{21}	-0.0048358	
	F_{T2}	b_{12}	0.0347715	
		b_{22}	-0.0022583	
Sprayer fan speed	F_f	f_{fs}	0.7212178	(4), (16)

Es zeigte sich ein Korrelationskoeffizient von 86 % beim Vergleich von modellierten und gemessenen Ablagerungen, bei den gepaarten Messungen ergab sich ein Korrelationskoeffizient von 0,98 %. Für die paarweisen Messungen wurden zwei parallele Kollektorreihen (Abstand 1,5 m) auf dem Boden im Windschatten der Obstanlage und senkrecht zur Richtung der Baumreihen aufgestellt, um einen Hinweis auf die Genauigkeit der Ablagerungen zu erhalten. Mögliche Unterschiede bei der paarweisen Ablagerung können auf stochastische Unterschiede in der Windrichtung und Windgeschwindigkeit, Unterschiede in der Struktur und Dichte der Bäume in der Nähe der Kollektoren (z. B. in der Nähe des Randes der Obstplantage) oder auf die unterschiedliche Handhabung sowie Verarbeitung der Kollektoren zurückzuführen sein. Idealerweise sollte sich das Modell der paarweisen Korrelation so gut wie möglich annähern, da diese die Obergrenze für die Korrelation zwischen Modellergebnissen und Versuchsergebnissen darstellt. Geometrische Inhomogenitäten der Bäume und lokale kleinräumige

Turbulenzen bzw. momentane Änderungen von Umweltfaktoren wie Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Kronendichte nahegelegter Bäume können in den modellierten Daten Abweichungen bzw. zum Teil stochastische Schwankungen verursachen. Hier ist zu beachten, dass das Modell Abhängigkeiten von gemittelten Umgebungsbedingungen widerspiegelt. Durch die Streuung der Versuchsdaten wird eine Verbesserung des Modells verhindert, dies kann auf eine noch nicht berücksichtigte Variable zurückzuführen sein. Das Modell ist in der Lage Vorhersagen für Ablagerungen in Windrichtung in Abhängigkeit von der durchschnittlichen Windgeschwindigkeit, durchschnittlichen Windrichtung, der Lufttemperatur und der Baumkronendichte zu treffen. Anhand experimenteller Daten konnte eine große Abhängigkeit der Parameter Windgeschwindigkeit und Temperatur bei der Modellierung festgestellt werden, jedoch sind für dieses Verhalten weitere Experimente erforderlich. Ferner sollten mit Hilfe weiterer experimenteller Daten, die noch nicht bei der Entwicklung des Modells verwendet wurden, das Modell validiert und verbessert werden. Zudem bietet das Modell eine Grundlage für eine Risikobewertung für die Exposition von Wasserorganismen in Bezug auf alle Randgewässer neben Obstplantagen. Das Modell wurde in ein Risikobewertungsmodell für Wasserorganismen implementiert, die Pestiziden ausgesetzt sind, es kann aber auch allein verwendet werden. Ursprünglich wurde das Modell für Apfelplantagen in den Niederlanden entwickelt, es kann aber auch für andere Obstkulturen und andere Klimazonen angepasst werden, sofern eine entsprechende BBCH-zu-DOY-Beziehung berücksichtigt wird (Holterman et al. 2018).

4.3 Monte-Carlo-Simulation

Die Monte-Carlo-Simulation wird als Verfahren in der Wahrscheinlichkeitstheorie angewendet, bei dem wiederholt Zufallsstichproben einer Verteilung mithilfe von Zufallsexperimenten gezogen werden. Über die gezogenen Stichproben sollen analytisch aufwendig lösbare Probleme gelöst werden. Dabei können die Zufallsexperimente in Computerberechnungen mittels Monte-Carlo-Algorithmen durchgeführt werden. Für die Simulation werden Zufallszahlen von zufälligen Ereignissen genutzt. Die Monte-Carlo-Simulation wird z. B. in der Klimamodellierung, im Risikomanagement oder auch für Integrale genutzt (Hofmann 2003; Anderson 1986).

In einem weiteren Projekt wurden für die Schätzung der Exposition von Oberflächengewässern mit Hilfe eines probabilistischen Verfahrens die „Predicted Environmental Concentration“-Werte (PEC-Werte)⁴ ermittelt, dafür wurde das empirische 90%-Quantil der Abdriftverteilung (pro Entfernung) gewählt. Dazu wurde zunächst das Ausmaß von Abdrift durch Versuche mit unterschiedlichen Entfernungen vom ursprünglichen Ausbringungsort ausgewertet. Bei dem Projekt ging es um die Untersuchung der Abhängigkeit der Abdriftwerte von Witterungsparametern. Dafür wurde zunächst ein Modell aus Abdriftversuchen entwickelt, das die Abhängigkeit der Stärke der Abdrift von Witterungsbedingungen und der Entfernung der Messung vom Ausbringungsort beschreibt (von der Hude 2004).

Es wurde ein nichtlinearer Zusammenhang zwischen der Entfernung und den Abdriftwerten festgestellt (Auswertung der Versuche von 1990). Aus den logarithmierten Entfernungen und den logarithmierten Messwerten war hingegen ein linearer Zusammenhang erkennbar, welcher durch den funktionalen Zusammenhang zwischen den Messwerten der Entfernungswerte (Entf) und den Messwerten der Abdrift mit Gleichung 2 zusammengefasst werden kann:

$$\text{Abdrift} = a \cdot \text{Entf}^b \qquad \text{Gleichung 2}$$

Durch neuere Versuche konnte dieser Zusammenhang bestätigt werden. Bei der Auswertung der Daten, für die ausgewählten Entfernungen bei 1,4,10 und 30 m, stellte sich eine Abhängigkeit der Abdrift von der Windgeschwindigkeit bei Entfernungen über 1 m heraus. Die Einflussvariablen wurden abhängig von der Stärke ihres Einflusses in das Modell eingegeben. Zu den stärksten Einflussfaktoren gehören die logarithmierte Entfernung, die Windgeschwindigkeit sowie die sich daraus ergebenden Wechselwirkung

⁴ Der PEC-Wert ist ein theoretischer Wert, der die in der Umwelt erwartete Konzentration einer Substanz angibt.

($\ln(\text{Entfernung}) \cdot \text{Windgeschwindigkeit}$). Für die Erklärung der Variabilität der Abdriftwerte tragen die relative Luftfeuchtigkeit und die Temperatur nur im geringen Maße bei (von der Hude 2004).

Bei der Auswertung der Versuche von 1996 bis 1999 wurde die Abhängigkeit der prozentualen Abdrift von der Windgeschwindigkeit nicht erneut bestätigt. Diese Einflussvariable besitzt einen geringeren Einfluss als Temperatur, Luftfeuchtigkeit und der Bewölkungsgrad. Für die Reduktion des Bestimmtheitsgrades gegenüber dem Modell, das die Entfernung vom Ausbringungsort berücksichtigt, liefern die Witterungsparameter einen kleinen Beitrag. Aus diesem Grund wurde lediglich die Entfernung im Modell berücksichtigt. Für die Simulation der Abdriftwerte ergeben sich folgende drei Regressionsmodelle, um die Verteilung der Abdriftwerte zu erzeugen.

Dazugehörige Variablen:

Abdrift:	Abdrift [%]
y:	$\ln(\text{Abdrift} + 0.005)$
Entf:	Entfernung [m]
Wind:	Windgeschwindigkeit [m/s]
ϵ :	Residuum ⁵

1. Das Regressionsmodell wurden aus den Versuchsdaten von 1990 abgeleitet. Es beinhaltet als Einflussvariablen die Entfernungen vom Ausbringungsort und die Windgeschwindigkeit.

$$\text{Abdrift} = e^{-0.392 - 1.438 \cdot \ln(\text{Entf}) + 0.22 \cdot \text{Wind} + 0.141 \cdot \ln(\text{Entf}) \cdot \text{Wind}} \cdot \epsilon - 0.005 \quad \text{Gleichung 3}$$

2. Standardabweichung der Residuen in diesem Modell ist größer als in dem erwähnten Modell in Punkt 1. Die Einflüsse von Faktoren, die nicht in die Modellgleichung berücksichtigt wurden, sind in der Streuung der Residuen mitinbegriffen, dementsprechend gilt dies auch für Witterungsparameter.

$$\text{Abdrift} = e^{0.05266 - 0.995 \cdot \ln(\text{Entf})} \cdot \epsilon \quad \text{Gleichung 4}$$

3. Verwendung der empirischen Abdriftverteilung, die aus den neueren Versuchen erhalten wurde.

⁵ Vertikaler Abstand zwischen geschätzter Regressionsgeraden und Beobachtungspunkt. Kleine Residuen bedeuten, dass die Regressionslinie eine gute Passform für die beobachteten Daten hat.

Die aus den neueren Versuchen erhaltene empirische Abdriftverteilung wird genutzt. Die PEC-Werte für den durch Abdrift zu erwartenden Eintrag von PSM in Oberflächengewässer über Gleichung 5 berechnet.

$$PEC = \frac{\text{Aufwand} \cdot \text{Abdrift}}{V} \quad \text{Gleichung 5}$$

Aufwand Aufwandmenge [ml/ha]

Abdrift: Abdrift [%]

V: Gewässertiefe (Volumen/m² Fläche)

Bei den Witterungsdaten handelt es sich um sehr kleine Datensätze. Die Witterungsbedingungen umfassen nicht alle Möglichkeiten der Ausbringungsbedingung (max. Temperatur 25 °C, max. Windgeschwindigkeit 5 m/s). Eine repräsentative Verteilung der Windgeschwindigkeiten ist für die Erstellung eines Modells wichtig. Es handelt sich hierbei jedoch um Extrapolationen des aus dem Versuchsdatensatz gewonnenen Modells. Durch die Nutzung der empirischen Verteilung der vorliegenden Versuchsdaten, ist ein Ausschluss der Unterschätzung der in der Praxis möglichen Abdriftwerte möglich. Das Regressionsmodell aus Gleichung 4 liefert fast identische Ergebnisse wie das aus Gleichung 3, ist aber einfacher in der Anwendung, weshalb dieses für die Simulation der PEC-Werte genutzt wird. In einem Vergleich zeigte sich, dass die deterministisch und die probabilistisch ermittelten PEC-Werte einen hohen Grad der Übereinstimmung aufweisen, wenn die Möglichkeit der Höchstmengenüberschreitung ausgeschlossen wird. Die deterministische Methode ist gegenüber leichten Abweichungen somit sehr robust (von der Hude 2004).

4.4 Cauchy Verteilung

Die Arbeit von Bachmaier und Kohlschütter (2004) versucht die Verteilung des Spritzmittels aus einer Düse mithilfe einer Cauchy-Verteilung zu modellieren

Als Datengrundlage dienten wieder die Abdrifteckwerte aus Ganzelmeier et al. (1995) sowie die in den Versuchen verwendeten Aufbringparameter, die in Tabelle 7 erwähnt sind,

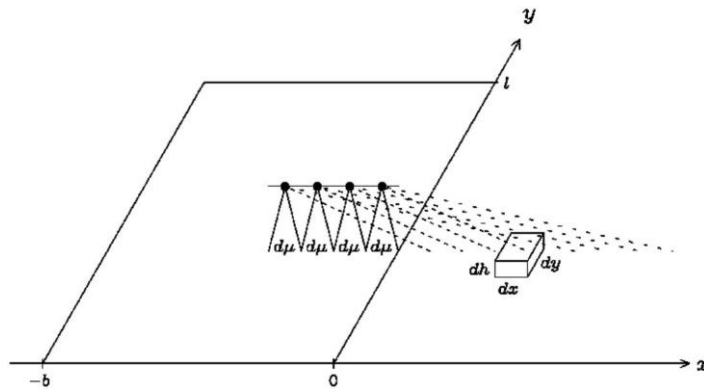


Abbildung 14 Variablen und Parameter der Modellierung (Bachmaier und Kohlschütter 2004, S. 89)

Bei dem gedachten Modell handelt es sich um ein Spritzgestänge auf einem rechteckigen Feld als Zielfläche (links der y -Achse, siehe Abbildung 14) mit einem Kontinuum von unendlich vielen Düsen mit infinitesimal kleinem Abstand $d\mu$ auf. Das Gestänge befindet sich parallel der x -Achse und bewegt sich am Traktor fixiert in Richtung y -Achse auf der Zielfläche.

Wenn man von einem unendlichen breiten Acker ausgeht, so kann eine bestimmte Stelle x auch als Summe aller infinitesimal kleinen auf die Stelle x gespritzten Höhen aus allen Düsen μ dargestellt werden. Der Parameter dh hängt dabei davon ab, wie weit die Stelle x des Gefäßes von der Stelle μ der Düse entfernt ist, und zusätzlich von der Stärke σ der Zerstäubung der Düse. Als Parameter fließen also ein: die Stelle x des Gefäßes, Stelle μ der Düse, die Stärke σ der Zerstäubungsbreite der Düse (nicht die Standardabweichung), was im Modell dem Abstand der Modell-Düse vom Boden ($\Delta x, \mu$) entspricht und Verteilung des Spritzmittels mit dem Verteilungswinkel φ . Die Verteilung des Spritzmittels wird durch die abgeschnittene Gleichverteilung des Spritzwinkels dargestellt. Da die Verteilung des Spritzmittels von der Windrichtung beeinflusst wird, wird angenommen, dass die Düse bis zu einem Winkel φ nach links (Westen) zerstäubt, aufgrund des herrschenden Westwindes aber bis $90^\circ = \pi/2$ nach rechts (Osten) verteilt wird. Die zwischen diesen beiden liegenden Winkel werden mit gleicher Wahrscheinlichkeitsverteilung angenommen.

Im Modell wird dann die Abhängigkeit von dh von x und μ mit Hilfe einer Dichtefunktion $f_{\mu, \sigma, \varphi}$ einer abgeschnittenen Cauchy-Verteilung dargestellt.

$$f_{\mu,\sigma,\varphi}(x) = \begin{cases} 0 & \text{für } x < \mu - \sigma \cdot \tan \varphi \\ \frac{1}{\sigma \cdot (\varphi + \frac{\pi}{2})} \cdot \frac{1}{1 + (\frac{x-\mu}{\sigma})^2} & \text{für } x \geq \mu - \sigma \cdot \tan \varphi \end{cases} \quad \text{Gleichung 6}$$

Simuliert wird das Modell mit den Programmen QuickTrift und Abdrift.exe. Diese scheinen nicht mehr auf dem Markt verfügbar zu sein. Die Seiten der Lizenzbetreiber sind nicht mehr auffindbar.

Die Modellierung zeigt fast eine nahezu komplette Übereinstimmung mit den Abdrifteckwerten (siehe Abbildung 15). Der Abstand der Düse vom Boden (σ) ist dabei vereinfacht dargestellt. In der Realität ist das $\sigma = 50$ cm, im Modell wird $\sigma = 8,2$ cm werden. Für die tatsächliche und modellierte Düse sind die Verteilungswinkel aber sehr ähnlich (110-120° bzw. 115°).

Die Abdrift kann mit diesem Modell, aber auch den Einfluss von Feldwegen auf die Abdrift modellieren oder mit den entsprechenden Formeln auch auf andere Flächenformen angewandt werden. Modelliert wird nur die Hauptwindrichtung. Für eine bessere Anpassung des Modells an andere Windrichtungen wären neue Messungen von Nöten. Jedwede Zerstäubung (durch Wind oder Düsen) an den Feldgrenzen wird außer Acht gelassen. Auch die verflüchtigungsbedingte Deposition kann nicht abgebildet werden, was aber wünschenswert wäre, da sie „teilweise zu Belastungen auf anrainenden Flächen führen, die in der Größenordnung der Abdrift liegen“ (Kördel W. 2001 zitiert nach Bachmaier und Kohlschütter 2004, S.96)

Abstand x zur Zielfläche	1 - F _{μ_0, σ, φ} (x) mit $\mu_0 = -0,058$ m, $\sigma = 0,082$ m und $\varphi = 70^\circ = 1,22173$	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 %
200 m	0,0001468 = 0,015 %	0,016 %
225 m	0,0001305 = 0,013 %	0,014 %
250 m	0,0001174 = 0,012 %	0,012 %

Abbildung 15 Güte der Modellierung der prozentualen Abdriftwerte durch eine abgeschnittene Cauchy-Verteilung (Bachmaier und Kohlschütter 2004)

4.5 Normalverteilung mit logarithmierten Messwerten und Standardabweichung

Die Dissertation von B. Golla (2018) beschäftigt sich mit einem räumlich und zeitlich expliziten Verfahren, um stark mit PSM belastete Landschaftsbereiche (Hot-Spots) realistisch zu bestimmen. Hier geht es, wie in vielen Modellierungen, hauptsächlich um den Eintrag in aquatische Flächen.

Als Datengrundlage für landwirtschaftliche Flächen dient das ATKIS-Basis DLM aus denen Fachdatensätze abgeleitet werden (Agrarraum, Zielfläche, Nicht-Zielflächen, Refugien).

Golla (2018) beschäftigt sich mehr mit der Risiko- und Expositionsabschätzung, denen zwar eine Ausbreitungsmodellierung zugrunde liegt, aber nicht das primäre Ziel der Fragestellung ist. Die Modellierung der Abdrift spielt nur eine untergeordnete Rolle.

Es sollen realistische Abdriftwerte für verschiedene Entfernungen simuliert werden. Grundlage der Daten waren, wie bei vielen Modellierungen, die Abdriftversuche von Ganzelmeier et al (1995) und Rautmann et al. (2001) und Daten aus dem Feldbau, Wein-, Hopfen- und Obstbau. Auf die Abdriftversuche aus dem Jahr 1990, die ebenfalls bei Ganzelmeier et al. (1995) zu finden sind, wurde aufgrund der Einheitlichkeit von Erfassung/Auswertung verzichtet.

In dieser Modellierung wurde zwischen den verschiedenen Kulturtypen unterschieden. Anhand des Feldbaus wird die Methode kurz erläutert. Es wird eine Polynom-Funktion angepasst, um die Messdaten für verschiedene Entfernungen zu simulieren (bis zu 150 m für Wein-, Hopfen-, und Obstbau; 75 m für Feldfrüchte). Dafür werden Mittelwerte für jeden Messabstand und Versuch berechnet, die einer Lognormal Verteilung folgen. Der Logarithmus der Versuchsmittelwerte wird für jeden Versuch und Messabstand x bestimmt. Im Feldbau Versuch wurden für den Abstand von 50 m Abdriftsediment von 0 gemessen, um ihn in die Berechnung trotzdem beachten zu können (da $\ln(0)$ undefiniert ist) wurde er auf 0,001 % gesetzt (Golla 2018, S. 52).

Die logarithmierten Versuchsmittelwerte mit Messabstand x lassen sich durch eine logarithmierte Normalverteilung beschreiben, die durch einen Mittelwert und Standardabweichung beschrieben werden kann (Golla 2018, S. 84–87).

Durch eine nicht lineare Regression wurden Funktionen ermittelt, welche die logarithmierten Mittelwerte und Standardabweichung in Abhängigkeit zur Entfernung y zu beschreiben. Als Parameter für die Modellierungen wurden die Entfernung zur Applikationsfläche y , logarithmierte Mittelwerte der Versuchsreihe $m_{\ln drift,y}$ und die logarithmierte Standardabweichung $s_{\ln drift,y}$ in eine Funktion (*rand*) für eine zufällige Normalverteilung (*norm*) eingesetzt.

$$\ln drift_y = rand\left(norm; m_{\ln drift_y}, s_{\ln drift_y}\right) \quad \text{Gleichung 7}$$

Aus diesen Parametern ergibt sich Gleichung 8, die der simulierten Abdrift entspricht. Eine genauere Herleitung ist in der Quelle selbst zu finden.

$$drift = e^{(\ln drift_y)} \quad \text{Gleichung 8}$$

„Die Methode der versuchsweisen Auswertung der Abdriftmesswerte führt bei der Betrachtung des Medians zu etwas höheren Abdriftwerten (maximal 0,1 % bei 1 m) gemessen in Prozent Abdriftsediment. Im 90. Perzentil sind die Versuchsmittelwerte um maximal 0,1 % (bei 3 m) geringfügig niedriger.“ (Golla 2018, S. 85)

Um die Modellierung zu verifizieren, wurden Abdriftmesswerte ($n = 40.000$) für verschiedene Entfernungen exemplarisch für den Feldbau simuliert. Hierbei wurden die Einträge aller Windrichtungen mit der gleichen Entfernung angenommen und auf ein hypothetisches Expositionsmodell übertragen (siehe Abbildung 16), in dem es sich um eine punktförmige Nichtzielfläche umgeben von Behandlungsfläche handelt. Dies entspricht vom Aufbau her nicht der Realität, ermöglicht aber die Überprüfung des Modells.

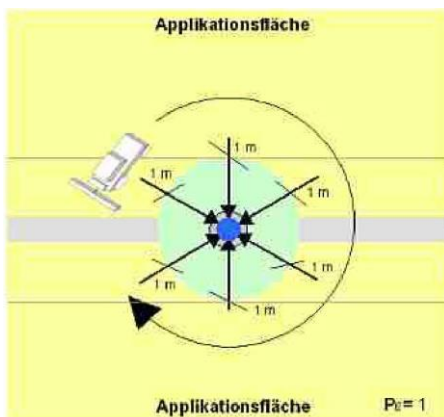


Abbildung 16 Schematische Darstellung des hypothetischen Expositionsszenarios für aquatische Nichtzielflächen als Grundlage für die Bewertung der Simulationsergebnisse (Beispiel Messabstand 1 m) (Golla 2018)

Bis zu einem Messabstand von 5 m ist die 90. Perzentile der Versuchsmittel durch die simulierten Abdriftsedimente mit einer maximalen Abweichung von 0,05 % überschätzt, bei 10 m Messabstand mit einer maximalen Abweichung von 0,066 % unterschätzt (siehe Abbildung 17 und Abbildung 18). Die Abdrift lässt sich also mit dem Modell sehr gut darstellen und kann durch weitere verteilungsbasierte Parameter im Zusammenhang mit einer georeferenzierten probabilistischen Expositionsabschätzung erweitert werden

Die Änderung der Windrichtung war für das deterministische Expositionsmodell nicht relevant und wurde durch den Versuchsaufbau bestimmt. Die Windrichtung wurde also nur insofern beachtet als, dass sie wieder senkrecht ($\pm 30^\circ$) zur Aufbringungsrichtung definiert wurde.

Messabstand [m]		Abdriftsediment* [%]							
		1	3	5	10	20	30	50	75
Messwerte n=420 (260)		0,727	0,341	0,249	0,123	0,059	0,042	0,029	0,011
Versuchsmittelwerte n=42 (26)	Median	0,832	0,375	0,269	0,134	0,064	0,042	0,031	0,012
Abweichung		0,105	0,034	0,020	0,011	0,005	0	0,002	0,001
Messwerte n=420 (260)		2,317	0,856	0,643	0,328	0,160	0,099	0,078	0,030
Versuchsmittelwerte n=42 (26)	90. Perzentil	2,275	0,745	0,566	0,323	0,132	0,098	0,083	0,030
Abweichung		-0,042	-0,111	-0,077	-0,005	-0,028	-0,001	0,005	0

*Abdriftsediment in % des Nominalaufwandes auf der Behandlungsfläche

Abbildung 17 Vergleich der Mediane und 90. Perzentile der Abdriftmesswerte für Feldspritzgeräte mit den Versuchsmittelwerten (Golla 2018, S. 87)

Entfernung [m]		Abdriftsediment in %							
		Wert	1	3	5	10	20	30	50
Versuchsmittelwerte N=42 (N=26)	90. Perzentil	2,275	0,795	0,566	0,323	0,132	0,098	0,083	0,03
Simulation des Abdriftsedimentes N=40 000	90. Perzentil	2,232	0,778	0,500	0,293	0,182	0,141	0,058	0,027

Abbildung 18 Vergleich der 90. Perzentile der Versuchsmittelwerte mit den Ergebnissen der Simulation der Abdriftsedimente für Entfernungen, die mit Messwerten belegbar sind (Golla 2018, S. 87)

4.6 Weitere Projekte und Modellierungsansätze

Um die Zusammenhänge zwischen Randbedingungen und Abdriftsediment im Feldbau zu analysieren, wurden Messergebnisse des Driftsediments in Abhängigkeit von Driftentfernung und Randbedingungen durch eine multiple Regressionsanalyse in dem Projekt von Kaul et al. (2001) erarbeitet. Ziel dabei war es zwischen den auf das Abdriftsediment wirkenden und vernachlässigbaren Randbedingungen zu unterscheiden und daraus ein Modell zur Berechnung des Abdriftsediments zu erstellen. Die Messergebnisse wurden von der Landesanstalt für Pflanzenschutz Stuttgart und dem Pflanzenschutzamt der Landwirtschaftskammer Hannover im Auftrag der Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft (BBA) zur Verfügung gestellt.

Anhand dieser erfolgte die Auswertung mit Hilfe der multiplen Regression in Verbindung mit der Software „SAS REG Procedure“. Es soll der Zusammenhang zwischen Driftergebnis in Form der sedimentierten und verschwebten Mengen und den meteorologischen und verfahrenstechnischen Bedingungen gefunden und mathematisch formuliert werden.

Zu den im Ergebnis der Regressionsanalyse als relevant ermittelten Parametern gehören das Tropfenspektrum, der Zielflächenabstand der Düsen, die psychometrische Temperaturdifferenz der Luft und die Fahrgeschwindigkeit, die Windgeschwindigkeit, der Flüssigkeitsaufwand sowie die Breite des behandelnden Feldes. Die Temperatur, der Bewölkungsgrad, der Nachweisstoffaufwand, der Zeitpunkt der Applikation im Tagesverlauf, die Arbeitsbreite sowie die Wirkungsweise der Düsen werden nicht als signifikant für das Abdriftsediment betrachtet. In dem Modell sind Pflanzenhöhen auf der Mess- und Behandlungsfläche sowie die Variation der Gerätetypen nicht enthalten, weshalb diese Parameter nicht bewertet wurden.

Es wird ein Bestimmtheitsmaß der Regressionsfunktion von ca. 58 % erreicht, bei der Berücksichtigung der relevanten Parameter liegt dieses bei 50 %. Ein Bestimmtheitsmaß von 90 % ergibt sich bei parallel durchgeführten Messungen der Masse der Driftwolke. Daraus ist ein vorherrschender Anteil stochastischer Einflüsse im Ablagerungsvorgang der Tropfen zu berücksichtigen. Durch die Analyse von Entfernungsabschnitten (1 - 3 m; 3 - 7,5 m; 7,5 - 30 m) kann eine zusätzliche Verbesserung der Regression erzielt werden, wodurch eine bessere Anpassung an die nichtlineare Sedimentationskurve möglich ist. Durch Variantenrechnung wird der Einfluss der relevanten Parameter untersucht. Eine Übersicht der Einflussfaktoren von Driftmenge zeigt Tabelle 9. Zu den Parametern, die in Feldrandnähe stärker wirken als weiter entfernt, gehören: Zielflächenabstand, psychometrische Temperaturdifferenz, Tropfenspektrum, Fahrgeschwindigkeit und die Breite des behandelten Feldes. Der Flüssigkeitsaufwand sowie die Windgeschwindigkeit wirken sich über die gesamte gemessene Entfernung gleich stark auf das Abdriftsediment aus (Kaul et al. 2001).

Tabelle 9: Einflussfaktoren von Driftmenge und Driftentfernung, angelehnt an Kaul et al. (2001)

Meteorologische	Verfahrenstechnische	Sonstige
<ul style="list-style-type: none"> - Bewölkungsgrad - Lufttemperatur - Psychrometr. Differenz - Windgeschwindigkeit - Windrichtung - Zeitpunkt der Applikation 	<ul style="list-style-type: none"> - Gerätetyp - Mittlerer volumetrischer Durchmesser (MVD) - Wirkungsweise Düse - Düsenabstand - Düsenhöhe - Arbeitsbreite - Behandlungsbreite - Fahrgeschwindigkeit - Flüssigkeitsaufwand - Nachweisstoffaufwand 	<ul style="list-style-type: none"> - Kulturhöhe Feld - Kulturhöhe - Messfläche - Messentfernung - Versuchsansteller

Für den Bewölkungsgrad, das Injektorprinzip der Düsen, die Arbeitsbreite und den Zeitpunkt der Applikation konnte keine Relevanz in Bezug auf das Driftsediment gefunden werden. Nachfolgend zeigt Tabelle 10 die Relevanz der Parameter auf das Driftsediment der Nachbarfläche nach Kaul et al. (2001).

Tabelle 10: Relevanz der Parameter, die die Abdrift beeinflussen, angelehnt an Kaul et al. (2001)

Relevante Parameter	Nichtrelevante Parameter	Keine Schlussfolgerung
<ul style="list-style-type: none"> - Fahrgeschwindigkeit - Psychrometrische Differenz⁶ - Tropfengröße (MVD) - Zielflächenabstand - Windgeschwindigkeit - Behandlungsbreite - Flüssigkeitsaufwand 	<ul style="list-style-type: none"> - Zeitpunkt der Applikation - Nachweisstoffaufwand - Bewölkungsgrad - Injektordüsen-Prinzip - Arbeitsbreite - Lufttemperatur 	<ul style="list-style-type: none"> - Kultur auf Messfläche - Kultur auf Behandlungsfläche - Gerätetyp - Düsenabstand

Zusammenfassend konnte über eine Regressionsanalyse die Beschreibung des Driftsediments und der schwebenden Driftwolke erfolgen und mit Hilfe der multiplen Regressionsanalyse ein Modell entwickelt werden. Das verwendete Datenmaterial beeinflusst dabei die Qualität des Modells, das als Basis für die Validierung von Abdriftmodellen genutzt werden kann, sofern diese auf physikalischen Zusammenhängen basieren. Durch die Regressionsanalyse konnten die relevanten Parameter von nicht relevanten Parametern differenziert werden. Da anstelle des gesamten Driftbereichs Entfernungsabschnitte genutzt wurden, konnte die Übereinstimmung zwischen Modell- und Messergebnissen verbessert werden. Durch das durch

⁶ Treibende Kraft für die Verdunstung von Flüssigkeiten in der Luft (Kaul et al. 2001)

multiple Regression gewonnene Modell können Variantenrechnungen genutzt werden, um den Einfluss einzelner Faktoren zu simulieren. Daraus resultieren Ansatzpunkte für die Gestaltung des Applikationsprozesses, wodurch eine Reduzierung des Driftsediments erreicht werden kann (Kaul et al. 2001).

Hashem und Parkin (1991) haben ein einfaches random walk Modell der Schwerteilchenausbreitung entwickelt, bei dem der Effekt der sich kreuzenden Flugbahnen, berücksichtigt wird. Über Sprühexperimente im Feld wurden die Ausbreitungsvorhersagen des Modells unter Verwendung einer Reihe von Tropfengrößen verglichen. Das Modell stimmte im Allgemeinen gut mit den experimentellen Ergebnissen überein, es überschätzte jedoch die Dispersion im Fernfeldbereich. Dabei konnte eine gute Übereinstimmung für kleine Tropfen (Durchmesser 10-32 μm) und relativ große Partikel (160 μm) festgestellt werden. Bei Tropfen mit einem Durchmesser von 40 μm war die Übereinstimmung nur angemessen. Bei den Ergebnissen zeigte das Modell eine Tendenz zur Überschätzung der Ausbreitung im Fernfeldbereich, was auf schlechte Statistik zurückgeführt werden kann, die sich aus niedrigen in den Entfernungen gemessenen Partikelkonzentrationen ergibt. Verglichen mit anderen Modellen, bietet das Modell erhebliche Einsparungen an Rechenzeit, allerdings bleiben bei den erwähnten anderen Modellen die Schwerteilcheneigenschaften für die Tropfen erhalten. Tropfen, die mit anderen Geschwindigkeiten als Endgeschwindigkeiten freigesetzt werden, erfordern komplexere Modellformulierungen (bspw. Verdunstungseffekte). Das daraus resultierende Ausbreitungsmodell für verdunstende Tropfen würde ein zusätzliches nützliches Instrument für das Sprühmanagement darstellen (Hashem und Parkin 1991).

In dem Bericht von Bolz und Kubiak (2020) werden diverse Modellierungsansätze aus verschiedenen Projekten zusammengefasst. Dort werden auch Modellierungsansätze erwähnt, die mehrere Eintragspfade berücksichtigen bzw. eine Kombination der dort erwähnten Modelle bilden. Diese werden nicht mehr ausführlich beschrieben, sondern in Kapitel 5 Tabelle 12 der Übersicht der Modellierungen hinzugefügt.

5 Übersicht Messmethoden und Modellierungen

Tabelle 11 stellt die in Kapitel 3 beschriebenen Messmethoden nochmal zusammenfassend dar.

Tabelle 11 Vergleich verschiedener Messmethoden

Messmethode	Einsatz	Vorteile	Nachteile	Grenzen der Methode	Anmerkungen
Aktive Luftsammler	- sehr abhängig von Wetterlage und Dampfdruck des Wirkstoffes, von wenigen Metern bis zu Hunderten Kilometern	- getrennte Sammlung von partikelgebundenen und in der Gasphase gelösten PSM - definiertes gesammeltes Luftvolumen	- hohe Anschaffungskosten - hohes Gewicht, erschwerter Transport - benötigen Stromversorgung	- Aussagen zur Konzentration in der Luft möglich und damit -Bezug zur ausgebrachten Menge Ermittlung räumlicher und zeitlicher Variationen	
Passive Luftsammler	- sehr abhängig von Wetterlage und Dampfdruck des Wirkstoffes, von wenigen Metern bis zu Hunderten Kilometern	- niedrige Anschaffungskosten Leicht transportabel - unabhängig von Stromanschluss	- gesammelte PSM können, ohne die in 3.2 beschriebenen mathematischen Gleichung, nur in Bezug zur Zeitspanne gebracht werden, nicht zur gesammelten Luftmenge - nur in der Gasphase gelöste PSM können gesammelt werden	- Aussage zur Exposition in einem definierten Zeitraum Ermittlung räumlicher und zeitlicher Variationen	- keine direkte Korrelation zur Anwendung - möglich Luftkonzentration mit Hilfe einer Gleichung auch mit passiven Luftsammlern zu berechnen

Messmethode	Einsatz	Vorteile	Nachteile	Grenzen der Methode	Anmerkungen
Biomonitoring	- abhängig von organischem Stoffwechsel und Wetter	<ul style="list-style-type: none"> - keine Anschaffungskosten - kein Aufstellen von Geräten - Bezug zur Zeit bei aktivem Biomonitoring möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - kein Bezug zur Luftmenge - Bezug zur Zeit bei passivem Biomonitoring nicht möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - Nachweis von persistenten und akkumulierbaren PSM - kurzfristig realisierbare Aussagen über Verteilung von PSM in der Umwelt Seite Überblick über die Immissionsbelastung 	<ul style="list-style-type: none"> - passiv: Bienenbrot, Rinden, Flechten - aktiv: Grünkohl, Gräser
Bulksammler	- bis zu 50 m von Applikationsflächen	- sammelt nasse u. trockene Deposition zeitgleich	<ul style="list-style-type: none"> - abhängig von Niederschlagsmenge - keine Trennung von trockener und nasser Deposition 	<ul style="list-style-type: none"> - Aussagen von Deposition von PSM hängen von Zeiteinheit u. Fläche ab. - 10 Messstellen nötig für eine belastbare Aussage 	
Niederschlagsammler	- 60 bis 80 km	- nur nasse Deposition wird gesammelt	<ul style="list-style-type: none"> - keine Möglichkeit die trockene Deposition zu ermitteln - abhängig von Niederschlagsereignissen 	<ul style="list-style-type: none"> - Angabe in Bezug zur Niederschlagsmenge - Aussagen zu über Regen ausgewaschene Mengen PSM 	

Die folgende Tabelle fasst die bisher näher betrachteten Modellierungen zusammen und wird durch die in dem Bericht von Bolz und Kubiak (2020) erwähnten Modellierungen ergänzt.

Tabelle 12: Übersicht der über die Literaturrecherche gefundenen Modellierungen

Modellierung	Verwendete Parameter	Validierung vorhanden?	Anwendung	Schwächen/Grenzen
Cauchy-Verteilung	<ul style="list-style-type: none"> - Stelle x des Gefäßes, - Stelle μ der Düse - die Stärke σ der Zerstäubungsbreite der Düse ($\Delta x, \mu$) entspricht - Verteilung des Spritzmittel Verteilungswinkel φ 	<ul style="list-style-type: none"> - starke Vereinfachung der Bodenabstände zwischen Realität und Modell - simulierte Werte, aber sehr genau 	<ul style="list-style-type: none"> - modellierter Eintragspfad: direkte Abdrift - verschiedene Feldgrößen können dargestellt werden 	<ul style="list-style-type: none"> - nur Windrichtung senkrecht zur Spitzrichtung - nur für Universaldüsen, keine verlustmindernde Technik
Normalverteilung mit logarithmierten Mittelwerten	<ul style="list-style-type: none"> - y zur Entfernung zur Applikationsfläche y zu beschreiben - log. Versuchsmittelwerte $m_{\ln drift y}$ - log. Standardabweichung $s_{\ln drift y}$ 	<ul style="list-style-type: none"> - große Übereinstimmungen mit Realität - geringfügige Unter-/Überschätzung bei verschiedenen Entfernungen 	<ul style="list-style-type: none"> - modellierter Eintragspfad: direkte Abdrift - Abschätzung der Exposition von Oberflächengewässern nach Applikation Raum- oder Flächenkulturen - Einflussfaktoren in der Umgebung (z. B. Hecken) werden mit eingerechnet 	<ul style="list-style-type: none"> - probabilistisches Modell⁷ - Genauigkeit/Reichweite: 5-150 m für Wein-/-, Hopfen-/-, und Obstbau und 5-75 m für Feldfrüchte darstellen zu könne

⁷ Probabilistische Methoden basieren auf der Annahme, dass es eine gewisse Unsicherheit oder Zufälligkeit in den Eingangsdaten oder im Systemverhalten gibt. Anstatt genaue Werte zu berechnen, arbeiten probabilistische Methoden mit Wahrscheinlichkeitsverteilungen und statistischen Modellen, um die Wahrscheinlichkeit von verschiedenen Ergebnissen zu schätzen (Golla 2018).

Modellierung	Verwendete Parameter	Validierung vorhanden?	Anwendung	Schwächen/Grenzen
Monte-Carlo-Simulation	<ul style="list-style-type: none"> - Entfernung vom Ausbringungsort 	<ul style="list-style-type: none"> - deterministisch und probabilistisch ermittelte PEC-Werte weisen einen hohen Grad der Übereinstimmung auf 	<ul style="list-style-type: none"> - modellierter Eintragspfad: Abdrift - Schätzung der Exposition von Oberflächengewässern durch PSM; Ermittlung der PEC-Werte 	<ul style="list-style-type: none"> - Witterungsbedingungen umfassen nicht alle Möglichkeiten der Ausbringungsbedingung
SPEXUS-Modell	<ul style="list-style-type: none"> - Windgeschwindigkeit - Windrichtung - Kronendichte - Größe der Obstplantage - Umgebungstemperatur 	<ul style="list-style-type: none"> - Validierung konkret notwendig 	<ul style="list-style-type: none"> - modellierter Eintragspfad: Abdrift - Nutzung für andere Obstkulturen und andere Klimazonen möglich - kann in andere Modelle integriert oder auch allein verwendet werden 	<ul style="list-style-type: none"> - kleinräumige Turbulenzen nicht berücksichtigt - momentane Änderungen von Umweltfaktoren können in den modellierten Daten Abweichungen bzw. zum Teil stochastische Schwankungen verursachen
ALOHA (Aerial Location of Hazardous Atmospheres)	<ul style="list-style-type: none"> - atmosphärische Bedingungen 		<ul style="list-style-type: none"> - modellierter Eintragspfad: Verflüchtigung - Kalkulation der räumlichen Verteilung einer Substanz in deren Konzentration in der Atmungszone des Menschen - Bezug nicht nur auf PSM, sondern auch auf andere Substanzen, welche sich über Luftweg verbreiten (500 Chemikalien hinterlegt) 	<ul style="list-style-type: none"> - Effekte von Landschaftselementen nicht berücksichtigt - Anwendung bei Windgeschwindigkeiten > 1 m/s - für Notfälle (unbeabsichtigte Freisetzung von Substanzen) gedacht

Modellierung	Verwendete Parameter	Validierung vorhanden?	Anwendung	Schwächen/Grenzen
EXAMS (Exposure Analysis Modelling System)	- physiko-chemische Eigenschaften der Substanz, Umweltbedingungen (pH-Wert, Windgeschwindigkeit, Temperatur, mikrobielle Aktivität, Umgebungseigenschaften)	-Validierung erfolgte nicht ausreichend - gute Übereinstimmungen mit experimentellen Messungen bei einem Projekt	- modellierter Eintragspfad: Verflüchtigung - Berechnungen der Menge an PSM, die über physiko-chemische Prozesse im Wasser verloren geht - gute Übereinstimmungen im Vergleich mit im Labor und im Freiland ermittelt Verflüchtigungsraten	- deterministisches Vorhersagemodell ⁸ , basiert auf mechanistischen Prozessgleichungen (abgeleitet von theoretischen Konzepten)
EVA3 (Evaporation Via Air)	k.A.	- Modell wird für die Fragestellung angewendet	- modellierter Eintragspfad: Deposition nach Verflüchtigung - Ermittlung PEC- und TER (Toxicity Exposure Ratio)-Werte für Oberflächengewässer und Saumstrukturen - Anwendung im Zulassungsverfahren für PSM	- empirische Modellierung - als xlsm-Datei Seite des Bundesamts für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit verfügbar

⁸ Deterministische Methoden basieren Regeln, Gleichungen oder Formeln, die den Zusammenhang zwischen verschiedenen Variablen des Systems beschreiben. Diese Methode erfordert genaue und zuverlässige Daten als Eingabe, um die Ausgabe zu berechnen. Das Ergebnis ist in der Regel vorhersehbar und deterministisch (Golla 2018).

Modellierung	Verwendete Parameter	Validierung vorhanden?	Anwendung	Schwächen/Grenzen
PEARL (Pesticide Emission Assessment at Regional and Local Scales)	<ul style="list-style-type: none"> - meteorologische Bedingungen (Temperatur, Feuchtigkeit, Niederschlag, Sonneneinstrahlung und Windgeschwindigkeit) - Eigenschaften & Dosierung des PSM (Dampfdruck, Molekulargewicht und Wasserlöslichkeit, Aufbringmenge) 	<ul style="list-style-type: none"> - Validierung vorhanden; Modell findet Anwendung für Registrierungsprozesse in der EU 	<ul style="list-style-type: none"> - modellierter Eintragspfad: Verflüchtigung 	<ul style="list-style-type: none"> - deterministisches Modell
PERFUM (Probabilistic Exposure and Risk Model for Fungicides)	<ul style="list-style-type: none"> - Emissionsrate der betrachteten Substanz vom Feld, - Größe des Feldes - meteorologische Bedingungen 	k.A.	<ul style="list-style-type: none"> - modellierter Eintragspfad: Verflüchtigung - betrachtet Verflüchtigung von Begasungsmitteln/Exposition von Nebenteilnehmenden - für Beurteilung der Notwendigkeit von Pufferzonen für Begasungsmittel in regulatorischen Verfahren 	<ul style="list-style-type: none"> - probabilistisches Expositionsmodell; Grundlage ist das deterministische Verteilungsmodell ISCST3
Silsoe Spray Drift Model	<ul style="list-style-type: none"> - Fahrgeschwindigkeit - Balkenhöhe - Düsentyp - Windgeschwindigkeiten 	<ul style="list-style-type: none"> - Validierung vorhanden, gute Übereinstimmungen mit experimentellen Daten 	<ul style="list-style-type: none"> - modellierter Eintragspfad: direkte Abdrift - modelliert Flugbahn von Tropfen aus Flachstrahldüsen 	<ul style="list-style-type: none"> - basiert auf einem random walk-Ansatz - Nahe des Spritzbalkens Unterschätzung der Rückstände, in weiterer Entfernung Überschätzung

Modellierung	Verwendete Parameter	Validierung vorhanden?	Anwendung	Schwächen/Grenzen
IDEFICS (IMAG program for Drift Evaluation for Field sprayers by Computer Simulation)	k.A.	- Kalibrierung des Modells mit experimentellen Daten, k.A zur Validierung	- betrachtet direkte Abdrift und gibt damit Deposition auf dem Boden und vertikale Verteilung in einem bestimmten Abstand zu dem Sprühbalken aus	- Kombination eines deterministischen Ansatzes mit statistischen Schwankungen von Luftturbulenzen
ADMS (Atmospheric Dispersion Modelling System)	- meteorologische Daten (Windgeschwindigkeit, Temperatur, Niederschlag, Luftfeuchtigkeit, Sonneneinstrahlung) - physiko-chemische Eigenschaften des Wirkstoffes (Dampfdruck und Molekulargewicht) - Daten zur Behandlungsfläche (Feldgröße, Kulturhöhe, Oberflächeneigenschaften des Bodens)	- Validierung vorhanden	- modellierter Eintragspfad: Transport/Deposition - Beschreibung der Verteilung von PSM in der Atmosphäre	
OPS-St (Shortterm Operational Priority Substances)	k.A.	k.A.	- modellierter Eintragspfad: Transport/Deposition - betrachtet Verteilung, chemische Umwandlung, Transport und Deposition - Ermittlung von zeitabhängigen Luftkonzentrationen von PSM sowohl in als auch um die behandelte Fläche in Kombination mit dem PEARL-Modell	- beruht auf Gaußschen Fahnenmodell

6 Fazit und Ausblick

6.1 Bewertung der Messmethoden

Hinsichtlich der Art der Probennahme werden Passivsammler am häufigsten verwendet, da sie einfach zu bedienen sind und längere Expositionszeiten ermöglichen. Weiterhin ist diese Methode günstig und ermöglicht eine große Flächenabdeckung. Die fehlende Zeitauflösung erweist sich als Nachteil, der mit mathematischen Verfahren ausgeglichen werden kann. Zudem können Witterungsbedingungen die Ergebnisse beeinflussen und es kann nicht zwischen verschiedenen Quellen unterschieden werden. Passivsammler eignen sich daher eher für die Überwachung von großflächigen Gebieten mit längerer Expositionsdauer, wie beispielsweise in der Landwirtschaft. Für kurzfristige Überwachungen und Messungen aus spezifischen Quellen sind sie weniger geeignet.

Aktivsammler hingegen sind aufgrund der kontinuierlichen Exposition und der kontinuierlichen Probenverarbeitung, unter anderem dank der kontinuierlichen Energieversorgung, ein präziseres Messverfahren als dessen passives Pendant. Die Methode kann zudem zwischen unterschiedlichen Quellen unterscheiden und bei unterschiedlichen Witterungsbedingungen eingesetzt werden. Ebenso messen aktive Luftsammler ein getrenntes definiertes Luftvolumen von partikelgebundenen und in der Gasphase gelösten PSM. Nachteilig ist, dass Aktivsammler gegenüber Passivsammlern teurer und aufwendiger sind und dass die Expositionszeit begrenzt ist. Daher eignen sich Aktivsammler gut für kurzfristige, präzise Überwachungen aus spezifischen Quellen (Bolz und Kubiak 2020).

Biomonitoring wiederum bietet den Vorteil, dass die Methode direkt die Exposition von lebenden Organismen gegenüber Pflanzenschutzmitteln messen kann und dadurch deren Wirkung auf die Umwelt bestimmen kann. Nachteilig ist, dass es andere Faktoren gibt, die die Ergebnisse beeinflussen können, sowie, dass weder ein Bezug zur Luftmenge noch zur Zeit vorhanden ist. Die Methode eignet sich zur Ermittlung der Wirkung von Pflanzenschutzmitteln auf die Umwelt und derer Immisionsbelastung (Kruse-Platz et al. 2020).

Mit Bulksammlern können sowohl trockene als auch nasse Depositionen gemessen werden. Eine Trennung der beiden ist hier aber nicht möglich. Schneefall erschwert ebenso eine quantifizierbare Messung. Bulksammler ermöglichen Aussagen von Depositionen von PSM in Abhängigkeit von Zeiteinheit und Fläche (Kruse-Platz et al. 2020).

Niederschlagssammler können im Vergleich zu Bulksammlern nur nasse Deposition messen, die Methode ist abhängig von Niederschlagsereignissen. Sie ermöglichen eine Integration der Abdriftbelastung über einen längeren Zeitraum, allerdings ist die Zuordnung zu einem bestimmten Anwendungsgebiet schwierig. Zudem sind die Konzentrationen im Regenwasser oft

gering und können nur mit empfindlichen Analysemethoden nachgewiesen werden. Die Angaben der Methode sind somit immer im Bezug zur Niederschlagsmenge (Bolz und Kubiak 2020).

Ein Vorteil der Bienensammler-Methode ist, dass die Ergebnisse, wie auch beim Biomonitoring, die tatsächliche Exposition von Bienen und anderen Insekten gegenüber PSM widerspiegeln. Nachteilig ist, dass sich nur ein begrenztes Zeitfenster für die Probennahme bietet und dass die Methode nicht für alle Arten von PSM geeignet ist (Bolz und Kubiak 2020).

Was die Nachweismethoden betrifft, so kann zwischen der chemischen Analyse und Tracer-Verfahren unterschieden werden. Chemische Analyseverfahren, wie die Massenspektrometrie oder die Gaschromatografie erfordern spezielle Ausrüstung und Fachkenntnisse, sind zeitaufwendig und erfordern eine komplexe Probenvorbereitung. Sie bieten allerdings eine hohe Selektivität und Empfindlichkeit und ermöglichen eine quantitative Bestimmung der PSM.

Tracer Methoden unterscheiden sich in ihrer Anwendbarkeit je nach verwendetem Tracer und der sich daraus ergebenden Analysemethode. Fluoreszenz - Tracer bspw. bieten eine einfache Handhabung und ermöglichen eine direkte Visualisierung der Abdrift. Nachteilig ist, dass die Sichtbarkeit von Farbstoffen durch Wetterbedingungen beeinträchtigt werden kann (Gil und Sinfort 2005).

6.2 Modellierung

Modellierungen sind oft vor allem für Risikobewertungen zu finden. Modellierungen zu Ausbreitungen gibt es zwar auch - auch einige für Luftausbreitung - der Fokus lag bei den verwendeten Literaturquellen häufig auf dem Umweltmedium Wasser und nicht auf Boden/Luft.

Ein Problem, was in den Veröffentlichungen oft angemerkt wird, ist, dass die angenommene Windrichtung in den Versuchen, senkrecht zur Aufbringungsrichtung, die realitätsgetreue Simulation der Windrichtungen verhindert. Hinzu kommt, dass sporadisch auftretende Einflüsse, wie lokale Turbulenzen und spontane Veränderungen der Windverhältnisse oder auftretende Wechselwirkungen zwischen den Parametern überhaupt nicht oder nicht ausreichend dargestellt werden können, weil der Messdatensatz nicht ausreichend ist (Kaul et al. 2001; Golla 2018).

Bei den meisten Versuchen konzentrierten sich die Forscher zudem auf den Transport von Pestizidtröpfchen in angrenzende Gebiete (indem sie den Einfluss von Wetterbedingungen und Produkttypen untersuchten) und nicht auf die Menge der Schadstoffe in der Luft (weder in Dämpfen noch in kleinen Tröpfchen).

Da sich die meisten Modelle auf die Abdrifteckwerte beziehen, sind die Entfernungen für die Modellierungen meist auf 150 m begrenzt. Hofmann et al. (2019) schlägt für generelles Monitoring von PSM-Rückständen aber die Unterteilung in drei Bereiche vor, die idealerweise über 1000 m hinaus gehen sollten, was auch Modellierungen verbessern und weitreichender anwendbar machen könnte (siehe Tabelle 13).

Tabelle 13 Vorgeschlagene Erfassung des PSM-Rückstands im Abstand zur Ausbringungsfläche nach Hofmann et al. (2019)

Entfernungsbereich	Abstand
Nahbereich	≤100 m (Spraydrift-Bereich)
Mittelbereich	100 - 1000 m
Fernbereich	> 1 km

Die vorhandenen Modelle betrachten oft nur einen Expositionspfad wie Abdrift, wie auch diese Arbeit. Es gibt jedoch auch Modellierungen, die mehrere Modelle mit verschiedenen Stärken kombinieren. Zum jetzigen Wissensstand gibt es kein Modell, was alle Expositionspfade abbildet (Bolz und Kubiak 2020). Ein weiterführendes Thema ist die Modellierung pflanzenschutzmittelhaltiger Stäube, die in dieser Arbeit nicht genauer betrachtet wurde.

Warum die vorgestellten Simulationen im Allgemeinen die Abdriftwerte so gut darstellen können, ist ohne Eintauchen in die mathematischen Kenntnisse wahrscheinlich nicht möglich, könnte aber mit derselben Datengrundlage der Modelle zusammenhängen. Interessant wäre es, die Modellierungen auf einem neuen Messdatensatz anzuwenden und zu prüfen, ob diese auch so exakt dargestellt werden können.

Im Gegensatz zu einer Labor- oder Feldmessung, bei denen die Genauigkeit von Daten und Beobachtungen mit bekannten Qualitätssicherungs- und Qualitätskontrollverfahren (z.B. Analyse von Kontrollproben oder Vergleichsstudien) bewertet werden kann, gestaltet sich der Nachweis der Zuverlässigkeit eines Modells als schwieriger (Leeuw et al. 2000).

Eine Simulation, die auf theoretischen Modellen basiert, ist aus technischen Gesichtspunkten betrachtet einfacher als eine Simulation auf Basis einer kompletten empirischen Verteilung der Abdriftwerte, weshalb der Einsatz eines Regressionsmodells empfohlen wird. Probabilistische Verfahren bieten die Möglichkeit, den genannten Schwächen deterministischer Verfahren zu begegnen. Es können Gesamtwahrscheinlichkeiten berechnet werden, indem Eingangsparameter durch Verteilungen, die zufällig miteinander kombiniert werden, in die Berechnungen eingehen (von der Hude 2004).

Ein weiteres Problem bei der Bewertung von Ausbreitungsmodellen stellt die häufig unbekannte Qualität der Modelleingangsdaten dar, da sich Fehler in den Eingabedaten direkt auf die dadurch entstandene Modellausgabe auswirkt. Zudem ist die Qualität der Beobachtungen, mit welchen Modelle bewertet werden, häufig schlecht definiert. Bestimmte Überwachungsdaten sind aufgrund geringer Qualität (z. B. zufällige oder systematische Überwachungsfehler, unzureichende Zeitabdeckung) oder wegen einer nicht ausreichenden Repräsentativität der Messstationen nicht für den Modellvergleich geeignet. Lokale Emissionen können Stationen beeinflussen und sind aufgrund zu geringer räumlicher Auflösung nicht in Modellen integriert (Leeuw et al. 2000).

Zum jetzigen Zeitpunkt sind nur sehr wenige Modelle ausreichend validiert (vgl. Kapitel 5). Für die Validierung fehlen u. U. ausreichend neue experimentelle Messdaten von guter Qualität, die nicht bereits für die Erstellung der Modellierung verwendet wurden.

Abschließend sind vor allem fehlende Messdaten bzgl. Windrichtung, die mangelnde Validierung, sowie die Herausforderung verschiedene Eintragspfade in einem Modell zu beschreiben die größten Hindernisse für Modellierungen.

Literaturverzeichnis

Anderson, Herbert L. (1986): Metropolis, Monte Carlo, and the Maniac (Fall 1986 LOS ALAMOS SCIENCE). Online verfügbar unter <https://library.lanl.gov/cgi-bin/getfile?00326886.pdf>, zuletzt geprüft am 27.01.2023.

Bachmaier, Martin; Kohlschütter, Niels (2004): Abdrift des Pflanzenschutzmittelaustrags auf Nichtzielflächen Modellierung und Berechnung. In: *Agrartechnische Forschung* (10), S. 88–97.

Bernhardt, A. (2004): Ermittlung von Pestizidstoffströmen im Ökosystem Buchenwald. Dissertation (2020). Online verfügbar unter https://pub-data.leuphana.de/frontdoor/index/index/start/0/rows/10/sortfield/score/sortorder/desc/searchtype/simple/query/bernhardt+2003/facetNumber_year/all/yearfq/2003/docId/341, zuletzt geprüft am 19.12.2022.

Bester, Kai; Hühnerfuss, H.; Neudorf, B.; Thiemann, W. (1995): Atmospheric deposition of triazine herbicides in Northern Germany and the German Bight (North Sea). In: *Chemosphere* 30 (9), S. 1639–1653. DOI: 10.1016/0045-6535(95)00051-9.

BIL (2023): Düngung und Pflanzenschutz. Bundesinformationszentrum Landwirtschaft. Online verfügbar unter <https://www.landwirtschaft.de/landwirtschaftliche-produkte/wie-werden-unsere-lebensmittel-erzeugt/obst-und-emueseenanbau-in-deutschland/duengung-und-pflanzenschutz>, zuletzt aktualisiert am 27.01.2023, zuletzt geprüft am 27.01.2023.

BMEL (2021): Bienenbrotmonitoring. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. Online verfügbar unter <https://www.nap-pflanzenschutz.de/indikatorenforschung/indikatoren-und-deutscher-pflanzenschutzindex/deutscher-pflanzenschutzindex/bienenbrotmonitoring>, zuletzt aktualisiert am 08.03.2023, zuletzt geprüft am 08.03.2023.

BMEL (2022): Pflanzenschutz, 16.09.2022. Online verfügbar unter https://www.bmel.de/DE/themen/landwirtschaft/pflanzenbau/pflanzenschutz/pflanzenschutz_node.html, zuletzt geprüft am 27.01.2023.

BMELV (2010): Gute fachliche Praxis im Pflanzenschutz. Grundsätze für die Durchführung. Online verfügbar unter https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ips/dateien/ips_1a_-_gute_fachliche_praxis_im_pflanzenschutz.pdf.

BNN (2021): BNN-Orientierungswert Fassung. Hg. v. BNN. Online verfügbar unter https://n-bnn.de/sites/default/dateien/BNN-Orientierungswert_DE_22122021.pdf, zuletzt geprüft am 27.01.2023.

Bolz, H.; Kubiak, R. (2020): Machbarkeitsanalyse für ein Monitoring über Rückstände in unbehandelten Flächen und auf unbehandelten Kulturen über die Verfrachtung von Pflanzenschutzmittelwirkstoffen. In: *Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit*. Online

verfügbar unter https://www.bvl.bund.de/SharedDocs/Downloads/04_Pflanzenschutzmittel/00_fachmeldungen/Machbarkeitsanalyse_Luftmonitoring_2020.pdf?__blob=publication-File&v=3, zuletzt geprüft am 04.03.2023.

BuBiFoPSM (2010): Pflanzen-Pathogen-Interaktion. Bundesministerium für Bildung und Forschung und Pflanzenforschung. Online verfügbar unter <https://www.pflanzenforschung.de/de/pflanzenwissen/journal/pflanzen-pathogen-interaktion-894>.

Bundesanzeiger (2016): Sachgerechte Anwendung - Bekanntmachung über die Mindestabstände bei der Anwendung von Pflanzenschutzmitteln im Bundesanzeiger (BVL 16/02/02), zuletzt aktualisiert am 27.01.2023, zuletzt geprüft am 27.01.2023.

Burns, Lawrence A. Burns (2000): Exposure Analysis Modeling System (EXAMS): User Manual and System Documentation. U.S. Environmental Protection Agency. Online verfügbar unter <https://www.epa.gov/sites/default/files/documents/EXAMREVG.PDF>, zuletzt aktualisiert am 25.06.2021, zuletzt geprüft am 24.03.2023.

BVL (2023): Verzeichnis zugelassener Pflanzenschutzmittel. Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit. Online verfügbar unter <https://apps2.bvl.bund.de/psm/jsp/index.jsp>, zuletzt geprüft am 27.01.2023.

Demeter (2020): Erzeugung, Verarbeitung und Kennzeichnung Internationale Richtlinie für die Zertifizierung von „Demeter“, „Biodynamisch“ und damit in Verbindung stehenden Marken. Hg. v. Biodynamische Föderation - Demeter International e.V. Online verfügbar unter https://www.demeter.net/wp-content/uploads/2021/04/20201204_bfdi_standard_for2021_gerversion_final_sc.pdf, zuletzt geprüft am 27.02.2023.

Dörken, V. (2022): Blattmorphologie und Blattanatomie. Universität Konstanz. Online verfügbar unter <https://www.biologie.uni-konstanz.de/doerken/lehre/skripte/morphologie/blatt/>.

ECFS (2023): EU Pesticides Database, 05.03.2023. Online verfügbar unter https://food.ec.europa.eu/plants/pesticides/eu-pesticides-database_en, zuletzt geprüft am 05.03.2023.

Ehrler, A.; Lötscher, H. (2019): Vom Winde verweht – Messung von Pflanzenschutzmitteln in der Luft im Münstertal. Online verfügbar unter https://www.gr.ch/DE/institutionen/verwaltung/ekud/anu/ANU_Dokumente/20200923_Messungen_Pflanzenschutzmittel_Muenstertal_2019.pdf, zuletzt geprüft am 04.03.2023.

Eigenbrodt (2014): Automatic Precipitation Sampler (Collector) And Analyser (Monitor), zuletzt aktualisiert am 08.03.2023, zuletzt geprüft am 08.03.2023.

FOCUS (2008): Pesticides in Air: Considerations for Exposure Assessment. Report of the FOCUS Working Group on Pesticides in Air (EC Document Reference SANCO/10553/2006).

Online verfügbar unter https://esdac.jrc.ec.europa.eu/public_path/projects_data/focus/air/docs/FOCUS_AIR_GROUP_REPORT-FINAL.pdf, zuletzt geprüft am 24.03.2023.

Fornefeld, E.; Schikora, A.; Berg, G.; Grosch, Rita; Erlacher, A.; Thomas Kühne, T.; Smalla, K. (2015): Humanpathogene Bakterien auf Pflanzen. In: *Journal für Kulturpflanzen*, 67 (9), S. 297–309. DOI: 10.5073/JfK.2015.09.01.

Ganzelmeier, H.; Rautmann, D.; Spangenberg, R.; Streloke, M.; Herrmann, M.; Wenzelburger, H-J.; Walter, H-F. (1995): Studies on the spray drift of plant protection products. Results of a test program carried out throughout the Federal Republic of Germany. Berlin: Blackwell Wissenschafts-Verlag (Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Heft 305). Online verfügbar unter https://www.openagrar.de/servlets/MCRFileNodeServlet/openagrar_derivate_00040448/Mitt_BBA_305.pdf, zuletzt geprüft am 21.02.2023.

Gil, Y.; Sinfort, C. (2005): Emission of pesticides to the air during sprayer application: A bibliographic review. In: *Atmospheric Environment* 39 (28), S. 5183–5193. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2005.05.019.

Gilliam, M. (1979): Microbiology of Pollen and Bee Bread. In: *Apidologie* 10 (1), S. 43–53. DOI: 10.1051/apido:19790106.

Göhlich, Horst (1982): Abdrift im Pflanzenschutz unter Berücksichtigung von Meßergebnissen am Steilhang. Technische Universität Berlin - Landtechnik und Baumaschinen im Institut für Maschinenkonstruktion. Berlin. Online verfügbar unter https://www.openagrar.de/servlets/MCRFileNodeServlet/openagrar_derivate_00037676/1982-022.pdf.

Golla, Burkhard (2018): Räumliche Methoden zur Analyse von Hot-Spots durch Abdriftbedingte Pflanzenschutzmitteleinträge. Ein Beitrag zur Erweiterung der Kenntnisse über die Verwundbarkeit des Naturhaushalts in Agrarlandschaften. Dissertation. Online verfügbar unter https://opendata.uni-halle.de/bitstream/1981185920/13617/1/diss_print2_270818_seitenzahlen.pdf, zuletzt geprüft am 31.01.2023.

Golla, Burkhard; Strassemeyer, Jörn; Koch, Heribert; Rautmann, Dirk (2011): A method for a stochastic simulation of spray drift values as basis for a georeferenced probabilistic exposure assessment of surface waters. In: *Journal für Kulturpflanzen* (63 (2)), S. 33–44. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/profile/Joern-Strassemeyer/publication/289212357_A_method_for_a_stochastic_simulation_of_spray_drift_values_as_basis_for_a_georeferenced_probabilistic_exposure_assessment_of_surface_waters/links/57d02e2308ae5f03b48907f6/A-method-for-a-stochastic-simulation-of-spray-drift-

values-as-basis-for-a-georeferenced-probabilistic-exposure-assessment-of-surface-waters.pdf, zuletzt geprüft am 24.01.2023.

Hashem, A.; Parkin, C. S. (1991): A simplified heavy particle random-walk model for the prediction of drift from agricultural sprays. Online verfügbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0960168691900194?via%3Dihub>, zuletzt geprüft am 23.02.2023.

Hofmann, F.; Bär, K.; Vogt, C. (2018): Vom Winde verweht. messungen von Pestiziden in der Luft im Vinschgau 2018. Online verfügbar unter https://www.umweltinstitut.org/wp-content/uploads/2022/11/20190306_UIM_Bericht_Messprojekt-Vinschgau-Doppelseiten-web.pdf, zuletzt geprüft am 30.01.2023.

Hofmann, F.; Schlechtriemen, U.; Kruse-Platz, M.; Wosniok, W. (2019): Biomonitoring der Pestizid - Belastung der Luft mittels Luftgüte - Rindenmonitoring und MulAnalytik auf über 500 Wirkstoffe inklusive Glyphosat.

Hofmann, Peter (2003): Grundlagen der Monte Carlo Simulation. Online verfügbar unter https://www.uni-muenster.de/Physik.TP/archive/fileadmin/lehre/teilchen/teilchen_ws03/montecarlo.pdf, zuletzt geprüft am 27.01.2023.

Holterman, H. J.; van der Zande, J. C.; Huijsmans, J.F.M.; Wenneker, M. (2018): Development of a spray drift model for spray applications in fruit orchards. PPO/PRI AGRO Field Technology Innovations. Wageningen.

Jäger, Eckehart J.; Neumann, Stefanie; Ohmann, Erich (2009): Botanik: S. 107-164. Heidelberg.

JKI (2021): Richtlinie für die Prüfung von Pflanzenschutzgeräten 7-1.5 Messung der direkten Abdrift von flüssigen Pflanzenschutzmitteln im Freiland. Online verfügbar unter https://www.julius-kuehn.de/media/Institute/AT/PDF_RichtlinienListenPruefberichte/Rili_PSgeraete/7-1.5_Messung_der_direkten_Abdrift_beim_Ausbringen_von_fluessigen_Pflanzenschutzmitteln_im_Freiland.pdf, zuletzt geprüft am 21.02.2023.

Kaul, Peter; Moll, Eckart; Gebauer, Sabine; Neukampf, Ralf (2001): Modellierung der direkten Abdrift von Pflanzenschutzmitteln im. Modelling of Direct Drift of Plant Protection Products in Field Crops. Beispiel 2. Stuttgart: Eugen Ulmer GmbH & Co (53) (2). Online verfügbar unter <https://scholar.archive.org/work/bo7hw6vcfvhljngcle6w3dqgg4>, zuletzt geprüft am 19.12.2022.

Klöppel, H.; Kördel, W. (1997): Pesticide Volatilization and Exposure of Terrestrial Ecosystems. Online verfügbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653597002130>, zuletzt geprüft am 27.02.2023.

Koblizkova, M.; Lee, S-C.; Harner, T. (2012): Sorbent impregnated polyurethane foam disk passive air samplers for investigating current-use pesticides at the global scale (3). Online verfügbar unter <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1309104215304207?token=D9690E837EFE0139A427557C254094AFD1D2D4577F449B252783040177AF925F4ED82C1DCBF5FDAA96FEB1AA24F12CE2&originRegion=eu-west-1&originCreation=20230304202559>.

Kördel W., Klöppel H. (2001): Exposition von naturnahen Ökosystemen durch luftgetragene Pflanzenschutzmittel. Forschungsvorhaben des Umweltbundesamtes, FKZ: 126 05 110, Mai 1998. In: Rolf Forster (Hg.): Biozönosen von Saumbiotopen im landwirtschaftlichen Einflussbereich: Beeinflussung durch Pflanzenschutzmitteleinträge? Fachgespräch am 23. und 24. November 1999 in Braunschweig. Berlin: Parey (Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Berlin-Dahlem, 387).

Kruse-Plaß, M.; Schlechtriemen, U.; Wosniok, W. (2020): Pestizid-Belastung der Luft. Eine deutschlandweite Studie zur Ermittlung der Belastung der Luft mit Hilfe von technischen Sammlern, Bienenbrot, Filtern aus Be- und Entlüftungsanlagen und Luftgüte-Rindenmonitoring hinsichtlich des Vorkommens von Pestizid-Wirkstoffen, insbesondere Glyphosat. Online verfügbar unter https://umweltinstitut.org/wp-content/uploads/2023/01/20201006_UIM_Bericht_Pestizid-Messungen-deutschlandweit.pdf, zuletzt geprüft am 31.01.2023.

Leeuw, Frank A. A. M. de; van Pul, W. Addo J.; van den Berg, Frederik; Gilbert, Andrew J. (2000): The Use of Atmospheric Dispersion Models in Risk Assessment Decision Support Systems for Pesticides. In: *Environmental Monitoring and Assessment* 62 (2), S. 133–145. DOI: 10.1023/A:1006262209031.

LfU Bayern (2023): Immissionsökologische Dauerbeobachtungsstation. Online verfügbar unter https://www.lfu.bayern.de/natur/aussenanlagen_lfu_kulmbach/immissionsoekologische_dauerbeobachtungsstation/index.htm, zuletzt aktualisiert am 04.03.2023, zuletzt geprüft am 04.03.2023.

PCC-Gruppe (2019): Einfluss der bakteriellen Mikroflora auf die Qualität von pflanzlichen Tiefkühlprodukten. Online verfügbar unter <https://www.products.pcc.eu/de/blog/einfluss-der-bakteriellen-mikroflora-auf-die-qualitaet-von-pflanzlichen-tiefkuehlprodukten/>.

QSI (2019): Pflanzenschutzmittel-Rückstände in Bio-Produkten. Hg. v. Quality Service International. Online verfügbar unter <https://www.qsi-q3.de/pflanzenschutzmittel-rueckstaende-in-bio-produkten/>, zuletzt aktualisiert am 24.04.2020, zuletzt geprüft am 06.03.2023.

Rautmann, D. (2023): Abdrifteckwerte - JKI - Bundesforschungsinstituts für Kulturpflanzen. Unter Mitarbeit von D. Rautmann. JKI. Online verfügbar unter <https://www.julius->

kuehn.de/at/ab/abdrift-und-risikominderung/abdrifteckwerte/, zuletzt aktualisiert am 25.02.2023, zuletzt geprüft am 25.02.2023.

Rautmann, D.; Streloke, M.; Winkler, R. (2001): New basic drift values in the authorization procedure for plant protection products. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/284496304_New_basic_drift_values_in_the_authorization_procedure_for_plant_protection_products#fullTextFileContent.

Sander, R. (2015): Compilation of Henry's law constants for water as solvent. In: *Atmos. Chem. Phys.* 15 (8), S. 4399–4981. DOI: 10.5194/acp-15-4399-2015.

Scharf, J.; Bächmann, K. (1993): Verteilung von Pflanzenschutzmitteln in der Atmosphäre. Nah- und Ferntransportmessungen. Distribution of pesticides in the atmosphere. Measuring of near and remote transport. In: *Nachrichtenblatt Deutscher Pflanzenschutzdienstes* (45 (4)), S. 82–87. Online verfügbar unter https://www.openagrar.de/servlets/MCRFileNodeServlet/openagrar_derivate_00035800/93-015.pdf.

Sitte, P.; Weiler, E.; Kadereit, J.; Bresinsky, A.; Körner, C. (2002): Lehrbuch der Botanik. 35.Auflage: Spektrum.

Staffa, C.; Fent, G.; Kubiak, R. (2012): Labortestsystem zur Bestimmung der verflüchtigungsbedingten Deposition von Pflanzenschutzmitteln. 58. Deutsche Pflanzenschutztagung Braunschweig. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/273961361_Labortestsystem_zur_Bestimmung_der_verfluchtigungsbedingten_Deposition_von_Pflanzenschutzmitteln.

TSAI, M.; ELGETHUN, K.; RAMAPRASAD, J.; YOST, M.; FELSOT, A.; HEBERT, V.; FENSKE, R. (2005): The Washington aerial spray drift study: Modeling pesticide spray drift deposition from an aerial application. In: *Atmospheric Environment* 39 (33), S. 6194–6203. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2005.07.011.

Umweltbundesamt (2023): Pflanzenschutzmittel. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/chemikalien/pflanzenschutzmittel>, zuletzt aktualisiert am 03.03.2023, zuletzt geprüft am 03.03.2023.

von der Hude, Marlis (2004): Monte-Carlo-Simulation zur Schätzung der Exposition von Oberflächengewässern durch Abdrift von Pflanzenschutzmitteln.

Willig, H. (2018): Blatt-Abbildung. Online verfügbar unter https://www.biologie-seite.de/Biologie/Blatt_%28Pflanze%29.

Yusà, V.; Coscollà, C.; Mellouki, W.; Pastor, A.; La Guardia, M. de (2009): Sampling and analysis of pesticides in ambient air. In: *Journal of chromatography. A* 1216 (15), S. 2972–2983. DOI: 10.1016/j.chroma.2009.02.019.

Zuch, S.; Doyle, M.; Majda, R.; Smith, S. (2022): Cell biology of the leaf epidermis: Fate specification, morphogenesis, and coordination. S. 209–227. *The Plant Cell*, Volume 34, Issue 1. DOI: 10.1093/plcell/koab250.