

Senken der Anwenderexposition durch Fahrerkabinen und Schutzkleidung

Von Bernd Hardegen, Braunschweig-Völkenrode*)

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

DK 632.934.1:331.43:614.89

Einer beim Ausbringen von Pflanzenbehandlungsmitteln auftretenden Belästigung oder Gefährdung des Fahrers kann mit Hilfe geeigneter Schutzmaßnahmen wirkungsvoll begegnet werden. Eine Alternative zur personengebundenen Schutzausrüstung (Kleidung, Atemluftfilter) besteht darin, die Schutzvorrichtungen in die Kabine zu integrieren. Um ein Eindringen luftfremder Stoffe zu verhindern, ist in der Kabine ein Überdruck gegenüber der Umgebung aufzubauen, und es müssen aus der zwangsggeführten Luft die unerwünschten Stoffe abgeschieden werden. Als geeignete Abscheider haben sich Aktivkohlefilter erwiesen; bei geringen oder kurzzeitigen Belastungen bieten auch normale Papierfilter einen ausreichenden Schutz. Ein Überdruck von ca. 50 Pa in der Kabine reicht aus, damit sich an Lecköffnungen stets eine nach außen gerichtete Strömung einstellt.

1. Einleitung

Pflanzenbehandlungsmittel, Handelsdünger sowie natürliche luftgetragene Stoffe können zu Belastungen der in der Landwirtschaft Beschäftigten führen oder ihre Gesundheit gefährden. So sind von den 126 im Jahre 1981 von den landwirtschaftlichen Berufsgenossenschaften erstmals entschädigten Berufskrankheitsfällen rund 57 % auf die Einwirkung der genannten Stoffe zurückzuführen. Diese Zahlen lassen nicht erkennen, ob der Landwirt die vorgeschriebenen Schutzvorkehrungen — die z.B. den Unfallverhütungsvorschriften der Berufsgenossenschaften [1] zu entnehmen sind — nicht in ausreichendem Maße getroffen hat, oder ob sein passiver Schutz (Kleidung, Atemfilter, Kabine) unzureichend gewesen ist. Ein erhöhter Schutz des Anwenders z.B. durch sein Verhalten beim Umfüllen, Ausbringen und Aufbewahren von Pflanzenbehandlungsmitteln läßt sich im wesentlichen durch verstärktes Aufzeigen der Gefahren erreichen, während die Qualitätssteigerung der ihm zur Verfügung stehenden passiven Schutzvorrichtungen ein technisches Problem darstellt.

Im folgenden wird ein Überblick gegeben über die beiden bedeutendsten beim Ausbringen von Pflanzenbehandlungsmitteln verwendeten passiven Schutzvorrichtungen, die Kabine und die Schutzkleidung. Die Wirkung dieser Maßnahmen wird mit Hilfe theoretischer Überlegungen am Beispiel einer Kabine aufgezeigt, und es werden die Ergebnisse experimenteller Untersuchungen vorgestellt. Die hier gewonnenen Erkenntnisse gelten auch für einen belüfteten Atemschutzhelm, den man sich als bis auf Kopfgröße verkleinerte Kabine vorstellen kann.

*) Dipl.-Ing. B. Hardegen ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für landtechnische Grundlagenforschung (Leiter: Prof. Dr.-Ing. W. Batel) der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode.

2. Die Schutzwirkung von Fahrerkabinen

Eine gute Schutzwirkung einer Kabine gegenüber luftfremden Stoffen setzt eine ausreichende Abdichtung voraus. Um nun einen Mindest-Sauerstoffgehalt in der Kabinenluft zu gewährleisten, aber auch, um extrem hohe Innentemperaturen abzubauen, wird die Kabine zwangsweise belüftet.

Die Schutzwirkung einer Kabine kann, wie **Bild 1** zeigt, beschrieben werden über einen Entlastungsgrad E, bei dem die Abnahme der Schadstoffbelastung¹⁾ durch eine Kabine auf die Belastung am ungeschützten Fahrerplatz bezogen wird,

$$E = \frac{\zeta_F - \zeta_{FKab}}{\zeta_F} \cdot 100 \%,$$

und über einen Abscheidegrad A, bei dem die Differenz zwischen Außen- und Innenbelastung auf den außen am Gebläseeintritt herrschenden Schadstoffgehalt bezogen wird,

$$A = \frac{\zeta_{zu} - \zeta_{FKab}}{\zeta_{zu}} \cdot 100 \%.$$

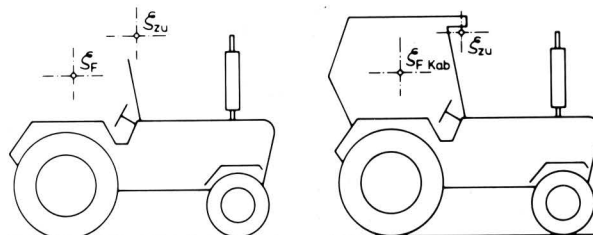


Bild 1. Bestimmungsgrößen für die Schutzwirkung von Schlepperkabinen.

In das Kabineninnere können Schadstoffe auf drei verschiedenen Wegen gelangen, nämlich über das Zuluftfilter, über Lecköffnungen und über einen kontaminierten Fahrer. Die Schadstoffanreicherung durch den Fahrer ist von dessen individuellem Verhalten abhängig und daher systematischen Untersuchungen kaum zugänglich.

Teilbericht eines Forschungsvorhabens mit dem Thema: "Messungen für eine Theorie der Staubschutzwirkung von belüfteten Arbeitsräumen und gekapselten Atemluftbereichen." Der Autor dankt der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Unterstützung der Untersuchungen.

¹⁾ Unter dem Begriff "Schadstoff" werden im folgenden luftfremde Stoffe zusammengefaßt, deren Einwirkung auf den Menschen eine Belästigung oder eine Gefährdung seiner Gesundheit hervorrufen.

2.1 Einflußgrößen

Aussagen über die Schutzwirkung von belüfteten Fahrerkabine setzen die Kenntnis über Zusammenhänge zwischen der Zu- und Abluftführung unter Berücksichtigung der Schadstoffansammlung in der Kabinenluft voraus. Es besteht jedoch eine Vielzahl noch ungelöster Probleme, die die Interaktion "Schadstoff – Umgebung" betreffen, z.B. die Schadstoffablagerung und -wiederaufwirbelung an den Kabineninnenwänden sowie das Schadstoffverhalten unter dem Einfluß der meteorologischen Randwerte.

Eine orientierende Aussage über die die Schutzwirkung einer Kabine beeinflussenden Größe sowie ihre Wertigkeiten erhält man aus einer Massenstrombilanzierung, mit der das temporäre Verhalten von Schadstoffkonzentrationen in belüfteten Räumen berechnet werden kann.

Mit Hilfe einer derartigen Bilanzrechnung lassen sich die Abhängigkeiten zwischen der Schadstoffkonzentration im Inneren einer Kabine und dem Schadstoffgehalt in der Außenluft, den ein- und ausfließenden Luftvolumenströmen, dem Abscheidegrad des Zuluftfilters, dem Kabinenvolumen, der abgelagerten Masse und dem Massenstrom an die inneren Grenzflächen bestimmen. Für die Berechnung wurde die vereinfachende Annahme getroffen, daß sich jede Massenzufuhr in die Kabine sofort homogen verteilt.

In Bild 2 ist der Einfluß dieser Parameter auf die Konzentration in der Kabine – in Abhängigkeit von der Zeit – dargestellt. Durch Verwendung dimensionsloser Größen reduziert sich die Parameterstudie auf die 4 Variablen

- bezogener Wandablagerungsmassenstrom $\dot{M}_b^* = \dot{M}_b / \zeta_a \dot{V}_{zu}$,
- bezogene Wandkonzentration $\zeta_w^* = \zeta_w / \zeta_a$,
- bezogener Leckmassenstrom $\dot{M}_l^* = \dot{M}_l / \zeta_a \dot{V}_{zu} = \dot{V}_l / \dot{V}_{zu}$ und den
- Filterabscheidegrad η .

Die Wirkungen der einzelnen Parameter auf die Kabinenkonzentration wurden durch ihre Variation bei gleichzeitigem Konstanthalten der übrigen Variablen ermittelt [2].

Im linken oberen Diagramm ist der Einfluß des Massenstromes gezeigt, der auf die Innenflächen gerichtet ist und dessen Masse sich dort ablagert. Mit den hier gewählten Ausgangsgrößen für die konstantgehaltenen Variablen ist in der unteren Kurve nahezu der Grenzfall dargestellt, daß die gesamte in die Kabine eindringende Schadstoffmasse an der Wand abgelagert wird und damit nur unwesentlich zur Erhöhung der Innenkonzentration führt, während der andere Extremfall – fehlende Ablagerung – mit der oberen Kurve wiedergegeben wird.

Die dick gezeichneten Kurven in den 4 Diagrammen sind identisch. Ihre Zahlenwerte zeigen die jeweils verwendeten Standardwerte, d.h. daß die Ergebnisse z.B. im linken oberen Diagramm errechnet wurden für eine bezogene Wandkonzentration $\zeta_w^* = 1000$, einen bezogenen Leckmassenstrom $\dot{M}_l^* = 0,033$ und einen Filterabscheidegrad $\eta = 98\%$.

Das rechte obere Diagramm verdeutlicht den geringen Einfluß der bezogenen Wandkonzentration ζ_w^* . Die untere Kurve mit $\zeta_w^* = 1000$ steht für einen Wert, der den realen Verhältnissen an einer Ablagerungsfläche entspricht, während die obere Kurve den Verlauf des Schadstoffgehaltes im Raum bei der bezogenen Wandkonzentration $\zeta_w^* = 0$ und damit auch $\dot{M}_b^* = 0$ wiedergibt.

Die wesentliche Beeinflussung der Konzentration im Inneren erfolgt, wie die beiden unteren Diagramme zeigen, durch den Leckmassenstrom \dot{M}_l^* und den Filterabscheidegrad η .

Der bezogene Leckmassenstrom ist der Quotient aus dem Massenstrom, der durch ein Leck einströmt, und dem Massenstrom, der vom Gebläse durch das Filter angesogen wird. Die Schadstoffkonzentrationen vor einem Leck und vor der Gebläseansaugstelle sind in der Berechnung gleichgroß gewählt; daher entspricht der bezogene Leckmassenstrom dem Verhältnis von Leckluftvolumenstrom zu Zuluftvolumenstrom.

Das linke untere Diagramm zeigt den starken Einfluß des Leckmassenstromes auf die Innenkonzentration schon bei geringfügiger Änderung des Verhältnisses der einströmenden Luftvolumenströme; Konzentrationsüberhöhungen an der Leckstelle lassen den Schadstoffgehalt in der Kabine zusätzlich ansteigen.

Die im rechten unteren Diagramm dargestellte Abhängigkeit der Innenkonzentration vom Gütegrad des Abscheiders zeigt dessen Bedeutung. In dem Bereich der in der Praxis realisierten Abscheidegrade zwischen 95 und 99 % bewirkt eine Erhöhung des Abscheidegrades um je 1 % eine Verringerung der bezogenen Kabinenkonzentration zwischen 15 und 25 % für die hier zugrundegelegten Ausgangsdaten.

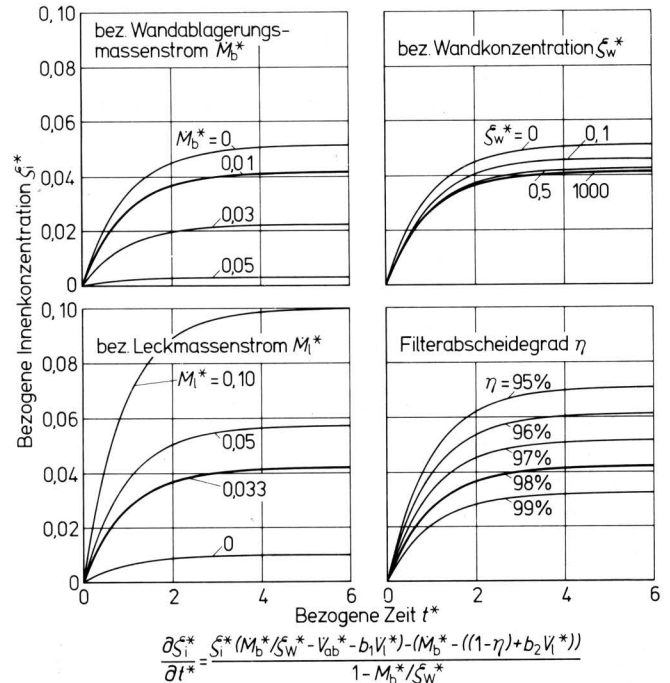


Bild 2. Zeitverhalten der Schadstoffkonzentration in einem belüfteten Raum, nach Hardegen [2].

2.2 Untersuchung der Haupteinflußgrößen

2.2.1 Leckmassenströme

Um das Eindringen von Schadstoffen in einen belüfteten Raum durch Leckstellen zu verhindern, bietet es sich an, mit Hilfe des Zuluftgebläses einen Überdruck im Inneren aufzubauen. Diese in Schleppern teilweise schon praktizierte Schutzmaßnahme ist nur dann wirksam, wenn der Innendruck stets den außen herrschenden Druck übersteigt.

Bild 3 zeigt schematisch die Druck- und Konzentrationsverhältnisse an einem ebenen Kabinenmodell beim Ausbringen von Pflanzenbehandlungsmitteln.

Zur Beschreibung der Druckwirkung auf umströmte Körper dient allgemein der Druckkoeffizient c_p ,

$$c_p = \frac{p - p_\infty}{\rho v_\infty^2} = \frac{\Delta p}{\rho v_\infty^2}$$

Bei einem kubischen Körper herrscht auf der angeströmten, der Luvseite, Überdruck über dem atmosphärischen Druck, während sich leeseitig ein Unterdruckgebiet bildet. Der Überdruck auf der Luvseite Δp_3 erreicht maximal die Größe des Staudruckes,

$$\Delta p_3 \approx \frac{\rho v_\infty^2}{2} \text{ bzw. } c_{pLuv} \approx 1;$$

der Betrag des Unterdruckes auf der Leeseite Δp_1 liegt bei etwa

$$|\Delta p_1| \approx \frac{1}{2} \frac{\rho v_\infty^2}{2}, \text{ d.h. } c_{p\text{Lee}} \approx -0,5.$$

Da sich im vertikalen Mittelschnitt eines kubusförmigen Körpers die Über- bzw. Unterdruckwerte über der Höhe nur in geringem Maße ändern, kann für überschlägige Berechnungen von konstanter Druckverteilung für Luv- und Leeseite ausgegangen werden.

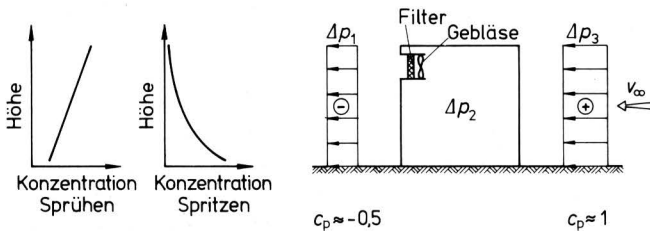


Bild 3. Schematische Darstellung des Druckes an einer angeströmten Kabine und der Konzentration beim Sprühen und Spritzen bei freier Ausbreitung.

Der Druck an der Kabinenaußenwand ist abhängig vom natürlichen Wind nach Betrag und Richtung, vom Fahrtwind, den Abluftströmen des Schleppers (d.h. Kühlgebläse- und Abgasstrom) und der Schleppergeometrie.

Der Kabineninnendruck Δp_2 wird bestimmt von der zur Druckerhöhung zur Verfügung stehenden Gebläsedruckdifferenz, dem jeweiligen Außendruck vor der Gebläseansaug- und den Lecköffnungen sowie der Größe dieser Öffnungen und ihrer Anordnung zueinander.

Der Einfluß dieser Parameter auf Richtung und Betrag von Leckluftvolumenströmen ist für konstante Druckverhältnisse mit Hilfe einer Bilanzrechnung untersucht worden. Will man von den errechneten Volumenströmen auf die eindringenden Schadstoff-Massenströme schließen, so muß das Konzentrationsprofil an der Außenwand bekannt sein; für das Spritzen und Sprühen von Pflanzenschutzmitteln ist dessen prinzipieller Verlauf in ungestörter Strömung hinter der Quelle im Bild 3 mit dargestellt.

Die Ergebnisse der Bilanzrechnung zeigt **Bild 4**; dazu wurden drei die Systemgrenze "Kabinenwand" passierende Volumenströme zugrundegelegt: der Gebläseluftvolumenstrom \dot{V}_G sowie zwei Leckluftvolumenströme \dot{V}_2 und \dot{V}_3 , die durch gegenüberliegende Öffnungen aus- (negatives Vorzeichen) bzw. einfließen (positives Vorzeichen) können.

Ausgehend von der Kennlinie eines handelsüblichen Kabinenzuluftgebläses sowie durch Vorgabe der übrigen Parameter, wie z.B. Filter- und Wärmetauscherdruckverlust, geometrische und strömungsdynamische Daten des Luftführungssystems und Dichte der Luft, sind die Abhängigkeiten zwischen Außen- und Innendruck im stationären Zustand berechnet und in Bild 4 dargestellt.

In der linken Bildhälfte ist der Einfluß des Außenüberdruckes Δp_3 auf den inneren Überdruck Δp_2 (oben) bzw. den luvseitigen Leckluftvolumenstrom \dot{V}_3 (unten) für unterschiedlich große, aber im Luv- und Leebereich gleichmäßig verteilte Lecköffnungen dargestellt. Die ausgewählten Abmessungen der Gesamtleckquerschnitte repräsentieren einen Bereich, wie er im Rahmen einer schwedischen Untersuchung über die Staubbelastung von Schlepperfahrern [3] an Fahrerinnen gemessen wurde.

Das linke obere Diagramm macht deutlich, daß z.B. bei einer Gesamtlecköffnung von 300 cm^2 das gewählte Gebläse ($\dot{V}_{G\text{max}} = 210 \text{ m}^3/\text{h}$, frei ausblasend) beim ruhenden, nicht angeströmten Schlepper einen Innenüberdruck Δp_2 von über 4 Pa aufbaut. Herrscht an der Luvseite ein Überdruck von $\Delta p_3 = 5 \text{ Pa}$, entsprechend einer Anströmgeschwindigkeit $v_\infty = 2,9 \text{ m/s}$, so stellt sich

ein Innenüberdruck von über 6 Pa ein. Mit steigendem Außenüberdruck steigt der innere Überdruck weiter an, aber bei ca. 10 Pa Außenüberdruck – das entspricht einer Anströmgeschwindigkeit von $v_\infty = 4 \text{ m/s}$ – besteht Gleichdruck zwischen außen und innen. Ab $\Delta p_3 = 15 \text{ Pa}$, entsprechend $v_\infty = 5 \text{ m/s}$, übersteigt der Außeninnendruck, und damit tritt in der luvseitigen Lecköffnung eine nach innen gerichtete Strömung auf.

Die Erklärung für diesen Vorgang liegt darin, daß die Druckdifferenz auf der angeströmten Seite, die zur Erhöhung des Innendruckes beiträgt, mit wachsender Anströmgeschwindigkeit sinkt, während gleichzeitig die Druckdifferenz auf der windabgewandten Seite wächst. Diese Druckdifferenz an der Leeseite ist die Ursache dafür, daß der Überdruck im Kabineninneren in geringerem Maße ansteigt als der Überdruck auf der angeströmten Seite. Im Prinzip handelt es sich hier um den gleichen physikalischen Vorgang wie bei einer Strahlpumpe.

Das linke untere Diagramm zeigt den Einfluß des Außenüberdruckes Δp_3 auf Richtung und Betrag des Leckvolumenstromes \dot{V}_3 durch die Öffnung A_3 auf der angeströmten Seite.

Der Zusammenhang zwischen treibender Druckdifferenz Δp und Volumenstrom durch eine Öffnung \dot{V} ist abhängig von der Querschnittsgeometrie und kann über einen empirischen Ansatz [4] beschrieben werden,

$$\dot{V} = C \Delta p^n.$$

Durch den Exponenten n und den dimensionsbehafteten Luftdurchlässigkeitskennwert C werden der Einfluß der Reibung beim Durchströmen von Spalten sowie die Fugengeometrie berücksichtigt.

Die rechte Bildhälfte zeigt die Abhängigkeit der Leckströme vom Außenüberdruck für den Fall, daß im Luv- und Leebereich Leckquerschnitte unterschiedlicher Größe vorliegen; beispielhaft ausgewählt ist hier eine Gesamtleckfläche von $A_2 + A_3 = 300 \text{ cm}^2$.

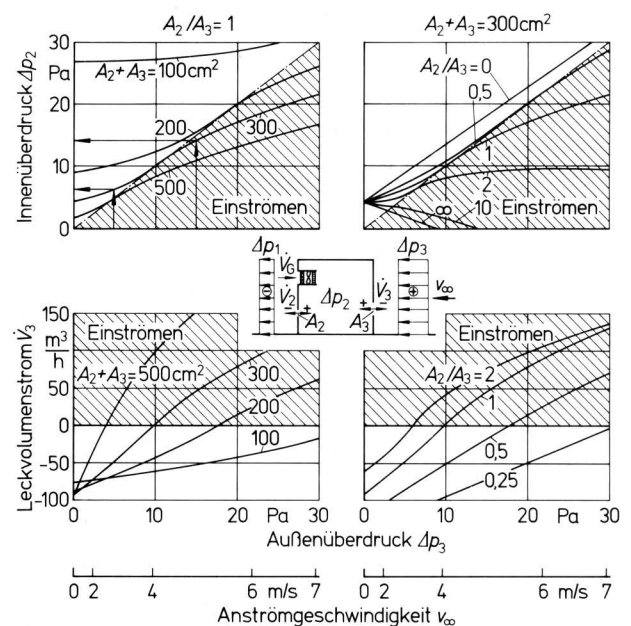


Bild 4. Innenüberdruck (oben) und Leckvolumenstrom (unten) in Abhängigkeit vom Außenüberdruck an einer angeströmten, belüfteten Kabine für Linien konstanten Gesamtleckquerschnittes (links) bzw. Leckquerschnittverhältnisses (rechts). Gebläsevolumenstrom $\dot{V}_{G\text{max}} = 210 \text{ m}^3/\text{h}$ (frei ausblasend); $\Delta p_3/\Delta p_1 = 2$.

Das Diagramm rechts oben bestätigt die besondere Wirkung einer windabgewandten Leck- oder Abluftöffnung. Befindet sich der überwiegende Teil der Leckfläche auf der Leeseite ($A_2/A_3 > 1$), so ist schon bei relativ geringen Anströmgeschwindigkeiten mit einer in die Kabine gerichteten Strömung zu rechnen. Ein Drehen des Fahrzeugs um 180° würde in diesem Fall die Schutzwirkung der Kabine wieder herstellen.

Die Berechnung sowie Messungen an einer Versuchskabine im natürlichen Wind [5] haben gezeigt, daß der Druck in der Kabine durch die Lage der Gebläseansaugöffnung relativ zur Anströmrichtung nur geringfügig beeinflusst wird. Bei der Frage nach dem optimalen Ort der Frischluftansaugung kommt daher der örtlichen Verteilung der Schadstoffe die entscheidende Bedeutung zu.

Die Messungen der Drücke innerhalb und außerhalb einer angeströmten, belüfteten Kabine bestätigen die Berechnung, wenn arithmetische Mittelwerte der instationären Drucksignale zugrunde gelegt werden; sie machen jedoch darüber hinaus deutlich, daß die Böigkeit des Windes bei der Bestimmung der Schutzwirkung der Kabine nicht vernachlässigt werden darf. Erste Versuche zeigen, daß infolge der Instationarität des Windes auch dann noch mit einer zeitweise nach innen gerichteten Strömung gerechnet werden muß, wenn im Mittel der Innendruck den Außendruck weit, d.h. bis über 15 Pa, überschreitet. Der Überdruck in der ruhenden Kabine muß ca. 40 bis 50 Pa betragen, wenn beim fahrenden und angeströmten Fahrzeug ein Eindringen schadstoffhaltiger Luft durch Lecköffnungen sicher verhindert werden soll.

2.2.2 Zuluftfilterung

Die Bedeutung des Zuluftfilters und seiner Abscheidegüte wurde bereits angedeutet. Derzeitiger Standard bei belüfteten Kabinen ist ein Filter zur Abscheidung fester luftfremder Stoffe. Der Einbau derartiger Filter sowie ein Qualitätsnachweis sind dem Schlepperhersteller nicht rechtsverbindlich vorgeschrieben, so daß ihm die Auswahl freigestellt ist. Aus diesem Grund ist die ISO z.Zt. damit befaßt, eine Prüfrichtlinie für Luftfilter in landwirtschaftlichen Fahrerkabine aufzustellen [6, 7].

Obwohl in den letzten Jahren ein wachsender Wunsch vieler Anwender nach einem kabinenintegrierten Schutz vor Pflanzenbehandlungsmitteln zu verzeichnen ist, befindet sich die Entwicklung wirksamer und praktikabler Abscheideeinrichtungen noch im Anfangsstadium. Schwierigkeiten bereiten die Vielfalt der Schadstoffe, das Vorhandensein aller drei Aggregatzustände sowie die stark veränderlichen Randbedingungen, wie z.B. Schadstoffgehalt und Lufttemperatur und -feuchte.

Alle namhaften Schlepperhersteller suchen zusammen mit ihren Filterlieferanten nach Lösungen dieses Problems; nach eigenen Angaben sind sie heute größtenteils in der Lage, Filter zum Abscheiden der Pflanzenbehandlungsmittel-Wirkstoffe als Sonderausstattung anzubieten. Hier muß jedoch auf folgendes Problem hingewiesen werden: Über die beim Ausbringen von Pflanzenbehandlungsmitteln auftretenden Schadstoffkonzentrationen in der Zuluft (und damit über einen bei der Filterauslegung wesentlichen Parameter) war bislang wenig bekannt. Infolgedessen sind die Vorstellungen der Industrie hinsichtlich der Konzentration, aber auch des Aggregatzustandes der luftfremden Stoffe uneinheitlich. Abhilfe soll hier die schon erwähnte ISO-Richtlinie schaffen.

Messungen unseres Institutes zeigen [8], daß die bislang verwendeten Normalfilter, d.h. Staubfilter, beim Ausbringen von Pflanzenbehandlungsmitteln im allgemeinen ausreichen, um ein Gesundheitsrisiko für den Fahrer auszuschließen (s. Abschn. 2.3). Es gibt jedoch auch Gründe, die den Einsatz von speziellen, Gas adsorbierenden Filtern sinnvoll erscheinen lassen, z.B.

- längerzeitiges Ausbringen von Pflanzenbehandlungsmitteln (Lohnunternehmen, Großbetriebe),
- Zusammensetzung und physikalische Eigenschaften der Wirkstoffe,

- ungünstige Anordnung der Spritz- bzw. Sprühvorrichtung relativ zum Fahrerplatz bzw. zum Zuluftfilter, ggf. unterstützt durch häufig auftretende relative Windrichtungen, die zu Konzentrationserhöhungen vor dem Zuluftfilter führen,
- Veranlagung des Fahrers zu Allergien.

Bei der Abscheidung von Schadstoffen, die in allen drei Aggregatzuständen vorliegen, wird ein Filtersystem, dessen Komponenten gezielt jeweils eine Phase aus der Zuluft entfernen, einem einzelnen multifunktionalen Filterelement überlegen sein.

Ein derartiges System soll zusätzlich vielfältigen Anforderungen genügen, und zwar wird gefordert:

- geringer Strömungswiderstand,
- lange Standzeit,
- hoher Luftdurchsatz sowie
- geringes Einbauvolumen.

Das Abtrennen fester Schadstoffe aus der Kabinenzuluft ist Stand der Technik und erfolgt in der Regel mit Papier- oder Faservliesfiltern, die zusätzlich gegenüber Flüssigkeitstropfen mit Hilfe geeigneter Imprägnierungen unempfindlich gemacht werden können.

Filter zur Abscheidung gasförmiger Luftverunreinigungen sind aus anderen technischen Bereichen bekannt; die Gas-Gas-Trennung kann durch Adsorption, Absorption, durch Ausfrieren oder durch Zentrifugalabscheidung erfolgen; unter dem in der Atemluftfilterung nahezu ausschließlich angewandten Verfahren, der Adsorption, versteht man die Anreicherung von Molekülen aus der gasförmigen Phase an einer Festkörperoberfläche.

Von den prinzipiell geeigneten Adsorptionsmitteln wie Aktivkohle, Aluminiumoxid, Kieselgel, Molekularsiebe und Bleicherde ist aufgrund der überlegenen Eigenschaften die Aktivkohle das am häufigsten verwendete.

Da der Einsatz von Gasfiltern in Schlepperkabinen nicht so unproblematisch ist wie der der Aerosolabscheider, wird im folgenden auf die Eigenschaften und Wirkungsweise des gebräuchlichsten Gasfilters, des Aktivkohlefilters, näher eingegangen.

Im Bild 5 sind an einem einzelnen Aktivkohlekorn die zur Beschreibung der Abscheidemechanismen erforderlichen Begriffe aufgeführt. Die Anlagerung eines Gases (oder auch einer Flüssigkeit) an die Grenzfläche eines Festkörpers wird als Adsorption, der aufnehmende Festkörper als Adsorbens oder Adsorptionsmittel, der zu adsorbierende Stoff als Adsorptiv bezeichnet. Der zur Adsorption inverse Vorgang wird Desorption genannt; er dient der Regeneration des beladenen Festkörpers.

Die Bindekräfte zwischen den Adsorptiv-Molekülen und dem Adsorbens können physikalischer oder chemischer Natur sein, dementsprechend wird zwischen Physisorption und Chemisorption unterschieden. Bei der Chemisorption wird die Kopplung der Reaktionspartner durch chemische Bindung und große elektrostatische Wechselwirkungskräfte bestimmt, während bei der Physisorption die meist schwächere Bindung hauptsächlich durch van der Waals'sche Kräfte verursacht wird.

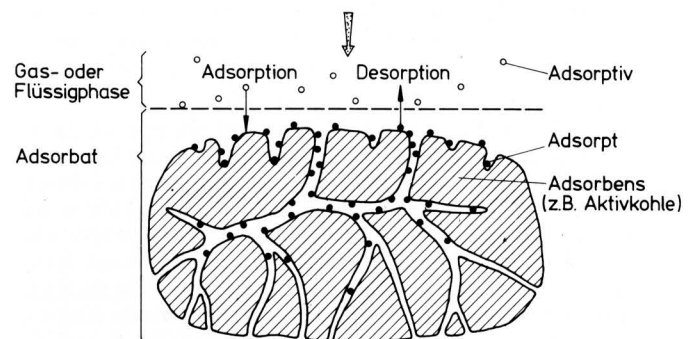


Bild 5. Grundbegriffe der Adsorption.

Die Physisorption ist der bestimmende Vorgang bei nicht imprägnierter Aktivkohle; sie steht im Mittelpunkt des Folgenden, da die Aktivkohle ohne Imprägnierung bekannt ist als optimale Festkörpermatrix zur Abscheidung organischer Dämpfe, die bei der Pflanzenbehandlung zum überwiegenden Teil anfallen.

Ausschlaggebend für die Eignung von Aktivkohle als Adsorptionsmittel ist besonders ihre große — im Herstellungsprozeß beeinflussbare — spezifische Oberfläche, die bis zu 2000 m²/g betragen kann. Dementsprechend klein sind die Poren eines derartigen Stoffes; sie liegen zum großen Teil im Bereich von 10⁻¹⁰ m.

Für die Beladepazität eines Adsorptionsmittels sind die spezifische Oberfläche, die mittlere Korngröße und das Porenvolumen ausschlaggebend. Als praxisrelevantes Maß hat sich aber die Adsorptionsisotherme erwiesen, Bild 6. Diese auch Gleichgewichtsisotherme genannte Kurve ist ein Maß für die bei konstanter Temperatur adsorbierte Menge (bezogen auf die Einwaage des Feststoffes) in Abhängigkeit von der Konzentration bzw. vom Partialdruck des Adsorptivs in der Gasphase.

In Abhängigkeit von den Eigenschaften des Gases und des Feststoffes sind experimentell 6 verschiedene Grundtypen von Adsorptionsisothermen nachgewiesen. Auf diese 6 Formen wird hier nicht näher eingegangen; sie sind jedoch der Grund dafür, daß exakte Standzeiten von Adsorptionsfiltern für unterschiedliche Schadstoffe nach dem derzeitigen Wissensstand nicht angegeben werden können.

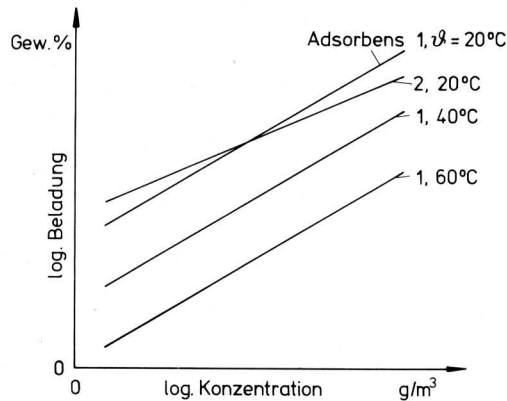


Bild 6. Adsorptionsisothermen für unterschiedliche Adsorptionsmittel und Temperaturen, nach Wirth [9].

Die hier gezeigten für die Physisorption gültigen schematischen Kurven lassen mehrere Eigenschaften des Sorptionsprozesses erkennen: zunächst wird deutlich, daß mit sinkender Adsorptionstemperatur die Bindungskräfte zwischen den Phasen wachsen. Die Neigung der Isothermen ist charakteristisch für ein Adsorbens bzw. eine Aktivkohleart: der Vergleich der beiden Adsorptionsmittel 1 und 2, Bild 6, zeigt, daß zur Abscheidung höherer Konzentrationen der Feststoff 2 besser geeignet ist. Umgekehrt ist bei einer Regeneration der Kohle der Partialdruck des Adsorptivs über Adsorbens 1 stärker zu erniedrigen als über Adsorbens 2, wenn man gleiche Restbeladung anstrebt.

Je nach Grundsubstanz und Herstellungsmethode läßt sich die Adsorptionsfähigkeit von Aktivkohle beeinflussen. Daher sind Filter des gleichen Typs und des gleichen Anwendungsbereiches, jedoch unterschiedlicher Hersteller, untereinander nicht vergleichbar. Im Gegensatz zu anderen Adsorptionsmitteln wie Kieselgel oder Aluminiumoxid ist Aktivkohle als mehr oder weniger hydrophob zu bezeichnen. Dennoch muß bei höherem oder über einen längeren Zeitraum einwirkenden Wasserdampfgehalt der Luft das Wasser als Konkurrenz-Adsorptiv bezeichnet werden; aus diesem Grund ist auch die Lagerfähigkeit von unbenutzten Atemschutz-Gasfiltern durch berufsgenossenschaftliche Vorschriften [10] auf 3 bis 5 Jahre beschränkt.

Ein noch ungelöstes Problem ist die Bestimmung der Sättigung von Aktivkohlefiltern, die als Abscheider in landwirtschaftlichen Fahrerinnen einer ständig quantitativ und qualitativ veränderlichen Belastung ausgesetzt sind. Abschätzungen können lediglich vorgenommen werden, wenn man Mittelwerte sowohl für die Konzentration und die physikalischen und chemischen Eigenschaften der Schadgase als auch für die klimatischen Bedingungen, d.h. Temperatur und Feuchte der Luft, zugrunde legt. Die Ausgangsdaten der Aktivkohle wie Korngröße, spezifische Oberfläche, Porengrößenverteilung und ggf. Imprägnierungen sowie die aufgenommene Gasmenge haben einen wesentlichen Einfluß auf die Zeit bis zum Durchbruch des Filters, d.h. bis zum Überschreiten einer Grenzkonzentration auf der Reinseite.

Die für die Luftreinigung verwendete Aktivkohle kann aus regelmäßigen Körpern (Zylinder, Kugeln mit 0,5 bis 4 mm ϕ) oder unregelmäßigem gebrochenem Korn bestehen; durch entsprechende Lochbleche wird die Kohleschicht auf der An- und Abströmseite mechanisch fixiert. In jüngerer Zeit wird auch Aktivkohle-Granulat mit Hilfe eines luftdurchlässigen Binders auf Polyurethan-Matten aufgebracht, welche dann beliebig verlegt werden können, Bild 7.

Um ein Eindringen von festen und flüssigen Stoffen in das Gasfilter und damit eine Verringerung dessen Aufnahmekapazität zu vermeiden, wird dem Aktivkohlefilter ein entsprechendes Normalfilter vorgeschaltet.

Bei der Anwendung von Aktivkohlefiltern muß durch Auswahl einer geeigneten Kohle, durch konstruktive Maßnahmen und durch rechtzeitigen Wechsel beladener Filter dafür gesorgt werden, daß keine in die Kabine gerichtete Desorption, d.h. Schadstoffaustritt aus dem Filter, stattfindet.

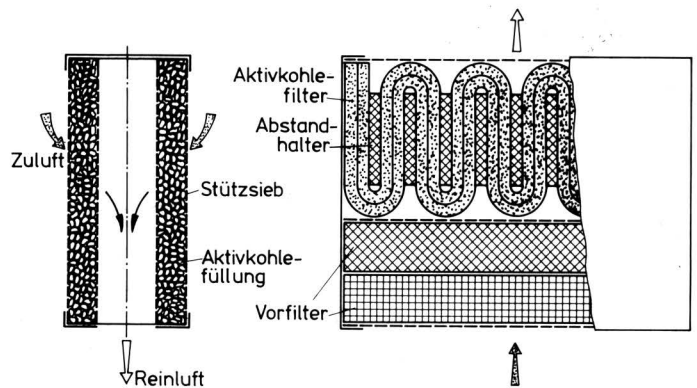


Bild 7. Aktivkohlefilter zur Luftreinigung; links: Filterpatrone; rechts: Filtereinheit aus aktivkohleimprägniertem PU-Schaum (nach EMW-Betrieben) und Vorfilter.

2.3 Meßergebnisse

Um einen Überblick über die Abscheidegrade von Aktivkohlefiltern und die Schutzwirkung geschlossener, belüfteter Kabinen beim Ausbringen von Pflanzenbehandlungsmitteln zu gewinnen, wurden von unserem Institut beim Spritzen und Sprühen die Schadstoffgehalte am Fahrerplatz (mit und ohne Kabine) und am Ort der Frischluftansaugung gemessen, Bild 8, [8]. Dazu war auf einem Unimogfahrzeugstell über der Hinterachse eine handelsübliche Modulkabine angeordnet. Das Frischluftsystem wurde modifiziert durch ein Filtersystem mit einem Faservlies-Vorfilter und einem Hauptfilter, das wahlweise als Aktivkohle- oder als Papierfilter ausgeführt wurde, sowie durch ein verstärktes Gebläse. Die sorgfältige Abdichtung der Kabine mit Dichtmaterial — bis auf eine 50 cm² große Abluftöffnung im Boden — ließ bei einem

Luftdurchsatz von 300 m³/h in der Kabine einen Überdruck von 50 Pa gegenüber dem atmosphärischen Druck entstehen. Das Fahrzeug befand sich auf einem Drehgestell und war stets so ausgerichtet, daß die Kabine in Windrichtung gesehen hinter dem Ausbringungsgerät lag. Als Behandlungsflüssigkeit wurde eine 0,025 %ige Lindan-Emulsion eingesetzt. Als Probenehmer dienten mit flüssigem Sauerstoff gekühlte Abscheider. Durch die verwendete Konzentrationsmeßmethode [8] konnten alle drei Phasen eines Wirkstoffes erfaßt werden.

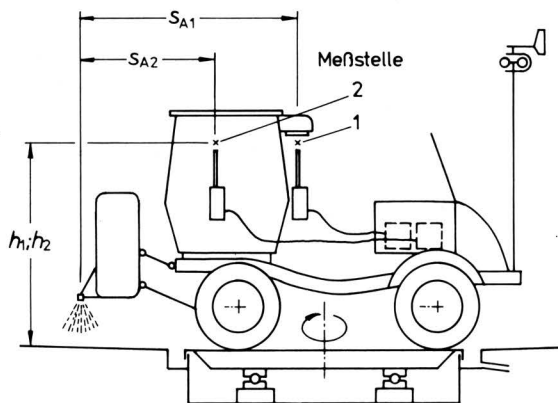


Bild 8. Schema der Versuchsanordnung zur Bestimmung der Schutzwirkung einer Fahrerkabine, nach *Batel* [8].

Abmessungen in mm

	Spritzen	Sprühen
$h_1 = h_2$	2405	2405
s_{A1}	2545	2540
s_{A2}	1590	1585

Die Meßergebnisse sind der **Tafel 1** zu entnehmen. In den Spalten 3 und 4 sind die ohne Kabine gemessenen Wirkstoffgehalte aufgeführt, für das Sprühen unterteilt in Gesamt- und in atembaren Gehalt ζ_F^g und ζ_F^a , gemessen an der Meßstelle 2. Der für das Spritzen mit $\zeta(1)$ angegebene Wirkstoffgesamtgehalt wurde an Meßstelle 1 ermittelt; der Unterschied zwischen dem an beiden Stellen gemessenen Gehalt ist sowohl beim Spritzen als auch beim Sprühen zu vernachlässigen. Spalte 7 gibt den Wirkstoffgehalt am Arbeitsplatz in der Kabine wieder; man erkennt, daß das Aktivkohlefilter den Schadstoffgehalt auf 6,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ beim Sprühen und auf 2,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ beim Spritzen begrenzt (MAK-Wert für Lindan: 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Ein normales Papierfilter, dem ein Faservliesfilter vorgeschaltet ist, führt zu höheren Werten, die aber immer noch unterhalb der MAK-Grenze liegen. Ursache für den Anstieg der Konzentration am Fahrerplatz ist der gasförmige Anteil des Wirkstoffes, der beim Verdampfen von auf dem Filter abgeschiedenen Flüssigkeitstropfen entsteht. Diese Gasphase wird vom Faservlies- und Papierfilter kaum adsorbiert. Der Verdampfungsvorgang kann sehr langsam erfolgen; hierdurch wird zum einen auch bei konstanter Schadstoffkonzentration vor dem Filter nach Beginn der Beaufschlagung eine zeitliche Abnahme des Abscheidegrades auf einen unteren Grenzwert hervorgerufen. Zum anderen gelangt selbst nach Beendigung der Spritz- oder Sprüharbeiten weiterhin Wirkstoff in die Kabine.

Die erreichten mittleren Abscheidegrade (Spalte 9) liegen bei den Versuchen mit Aktivkohlefiltern beim Sprühen bei 98,8 % und beim Spritzen bei 95,3 %. Ein normales Papierfilter mit Faservliesvorfilter zeigt bei einer Benutzungsdauer von ca. 15 min beim Sprühen einen mittleren Abscheidegrad von 92,8 %. Der Unterschied zwischen Abscheide- und Entlastungsgrad ist, wie bei den hohen Abscheidegraden nicht anders zu erwarten, nicht signifikant.

Amerikanische Messungen der Fa. Deere beim Sprühen mit Methylparathion [11] bestätigen die von uns gemessene hohe Schutzwirkung der Kabine mit in vergleichbarer Weise ermittelten Abscheidegraden zwischen 85 und 98 % und Konzentrationen in der Kabine unter 7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Eine andere amerikanische Untersuchung [12] zur Schutzwirkung von Kabinen, die mit Aktivkohlefiltern ausgerüstet sind, haben bei Sprühversuchen mit Meta-Systox R Abscheidegrade von 99,6 %, bei Versuchen mit Systox und Parathion Werte von je 100 % ergeben.

1	2	3				4		5			6			11
		Rel. Windgeschw. v_{rw} m/s	Wirkstoffgehalt ohne Kabine		Filterart	Wirkstoffgehalt mit Kabine		Entlastungs- und Abscheidegrad			ζ_{zu} ζ_F^g ζ_F^a bzw. ζ_{zu} $\zeta(1)$			
			gesamt ζ_F^g $\mu\text{g}/\text{m}^3$	atemb. ζ_F^a $\mu\text{g}/\text{m}^3$		ζ_{zu} $\mu\text{g}/\text{m}^3$	ζ_{FKab} $\mu\text{g}/\text{m}^3$	gesamt E %	A %	E %				
Sprühen mit $\zeta_Q = 14,2 \text{ mg}/\text{m}^3$	0,8	290	215	Aktivkohle- u. Vorfilter	311,2	1,8	99,4	99,4	99,2	1,07				
	1,3	332	250		246,2	6,2	98,1	97,5	97,5	0,74				
	1,6	335	285		367,2	4,3	98,7	98,8	98,5	1,10				
	1,9	400	300		421,5	2,2	99,5	99,5	99,3	1,05				
					ϕ		98,9	98,8	98,6					
		0,6	276	200	Normalfilter u. Vorfilter	379,7	21,2	92,3	94,4	89,4	1,38			
		0,7	280	205		272,8	32,5	88,4	88,1	84,1	0,97			
		1,5	330	280		372,6	9,1	97,2	97,6	96,8	1,13			
	2,5	360	200	345,5		30,7	91,5	91,1	84,7	0,96				
		$\zeta(1)$			ϕ		92,4	92,8	88,8					
Spritzen mit $\dot{E}_{W1} = 0,056 \text{ kg}/\text{m}^3 \text{ h}$	1,4	24		Aktivkohle- u. Vorfilter	35,6	2,6		92,7	89,2	1,48				
	1,6	27			37,6	1,1		97,1	95,9	1,39				
	1,9	27			42,7	2,5		94,1	90,7	1,58				
	2,5	23			52,4	1,4		97,3	93,9	2,28				
					ϕ			95,3	92,4					

Tafel 1. Wirkstoffgehalt in der Luft und Entlastungs- bzw. Abscheidegrad einer belüfteten Fahrerkabine bei verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten; Spritzen (3,15 bar) und Sprühen (11,7 bar) von Flüssigkeit mit 0,025 % Lindan (Wirkstoff); Fahrerkabine mit $V_G = 300 \text{ m}^3/\text{h}$ und $\Delta p_2 = 50 \text{ Pa}$ Überdruck bei $v_\infty = 0$, Abluftquerschnitt 50 cm^2 ; mittl. Lufttemperatur ca. 17,5 °C; mittl. Luftfeuchte ca. 80 %, rel. Windrichtung $\alpha = 180^\circ$ (axialer Rückenwind), nach *Batel* [8].

3. Personengelegene Schutzeinrichtungen

Auf landwirtschaftlichen Fahrzeugen gehören Kabinen der geschil­derten Art durchaus noch nicht zum Ausrüstungsstandard. Dies gilt insbesondere für Sonderschlepper für den Wein- und Obstanbau; dabei ist gerade bei Pflanzenbehandlungsarbeiten in diesen Kultu­ren mit erhöhtem Risiko für den Fahrer zu rechnen.

In Fällen, in denen eine geeignete Kabine nicht zur Verfügung steht, aber auch bei den vorbereitenden Arbeiten vor dem Ausbrin­gen der Pflanzenbehandlungsmittel, ist gemäß einer vom Bundesge­sundheitsamt (BGA) und der Biologischen Bundesanstalt (BBA) herausgegebenen Richtlinie [13] "geeignete Schutzkleidung" zu tragen, und bestimmte Pflanzenbehandlungsmittel oder bestimmte Arbeitsbedingungen erfordern zusätzlich Atemschutzmaßnahmen.

3.1 Atemschutz

Zur Reinhaltung der Atemluft kann abhängig von der potentiellen Gefährdung gewählt werden zwischen Halbmasken, die lediglich die Atemorgane schützen, und Vollmasken, die zusätzlich Augen und Gesichtshaut vor Schädigungen bewahren. Die für beide Mas­kenarten verwendbaren genormten Atemfilter [14] sind unterteilt in

- Gasfilter (zum Schutz gegen Gase)
- Partikelfilter (zum Schutz gegen feste bzw. feste und flüssige Partikeln) und
- Kombinationsfilter.

Beim Umgang mit gelösten Pflanzenbehandlungsmitteln kommen natürlich nur Gas- und Kombinationsfilter zur Anwendung. Alle Atemfiltertypen sind wiederum unterteilt nach den abscheid­baren Stoffen sowie dem Aufnahme- bzw. Rückhaltevermögen. Als gasadsorbierende Substanz wird Aktivkohle verwendet.

Sicherheitstechnische Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung von Atemfiltern sind in DIN 3181 genormt. Dennoch weichen die Durchbruchzeiten von Filtern unterschiedlicher Hersteller erheb­lich voneinander ab; außerdem ist die Gebrauchsdauer der Atemfil­ter in der Praxis – wie bei den Kabinen-Zuluftfiltern – nur dann annähernd zu bestimmen, wenn die Einsatzbedingungen bekannt sind.

3.2 Schutzkleidung

Nach der erwähnten Richtlinie des BGA und der BBA setzt sich die geeignete Schutzkleidung zusammen aus Körper- und Fußbe­kleidung, Kopfbedeckung, Handschuhen und einer Schutzbrille.

Die Körperbekleidung soll aus einem am Hals und den Handgelen­ken eng anliegenden Overall bestehen, bei dem die Hosenbeine über die Schäfte von Gummistiefeln gezogen werden können. Das Material des Anzuges ist in Abhängigkeit vom Aggregatzustand des auszubringenden Mittels zu wählen; bei flüssigen Pflanzenbehand­lungsmitteln muß der Anzug aus einem beschichteten Gewebe be­stehen, wobei in der Kleidung Transpirationslöcher vorzusehen sind.

Es wird unterschieden zwischen

Schutzanzug 1: Overall mit dichtem Baumwollgewebe in Leinenbindung, ca. 180 g/m²

und

Schutzanzug 2: Overall mit leichtem Baumwollgewebe in Leinenbindung, ca. 150 g/cm², mit einer leichten einseitigen PVC-Beschichtung.

Als Fußkleidung sind Gummistiefel zu tragen.

Wird beim Ausbringen von Pflanzenbehandlungsmitteln eine Schutzkleidung getragen, so ist stets auch eine Kopfbedeckung zu benutzen; als zweckmäßigste Form hat sich der Südwester (mit umlaufender Krempe) erwiesen, dessen Material dem des Anzuges entsprechen sollte.

Die über die Overallärmel reichenden Handschuhe sollten undurch­lässig für Wasser und organische Lösungsmittel sein und daher aus Kunststoff oder kunststoffbeschichtetem Gewebe bestehen.

Schädigungen der Augen können durch feste, gasförmige und flüs­sig Substanzen hervorgerufen werden. Während die festen Stoffe mit dem Augenwasser reagieren, führen die Gase vorwiegend zu Schädigungen der Augenschleimhäute und die flüssigen Schadstof­fe zu Verletzungen der Hornhaut. Daher sollte eine am Gesicht an­liegende Korbbrille zusätzlich zu möglicherweise vorhandener Korrekturbrille getragen werden, wobei es Tätigkeit und Art des jeweiligen Pflanzenbehandlungsmittels erforderlich machen kön­nen, daß der Augenraum gasdicht abgeschlossen werden muß.

Auch wenn sich der Fahrer beim Ausbringen in einer schützenden Kabine befindet, ist das Tragen von Schutzkleidung bei dem voran­gehenden Ansetzen der Behandlungsflüssigkeit von entscheidender Bedeutung für den sich ansammelnden Schadstoff in der Kabine, der ja nicht nur auf dem Luftweg, sondern auch über einen konta­minierten Fahrer ins Innere gelangt. Aus diesem Grunde ist es sinn­voll, zumindest die stark kontaminierten Handschuhe vor Betreten der Kabine mit Hilfe einer auf dem Schlepper montierten Wasch­einrichtung zu reinigen.

4. Zusammenfassung

Folgende Schutzmaßnahmen reduzieren die Belastung des Anwen­ders beim Ausbringen von Pflanzenbehandlungsmitteln sicher auf unbedenkliche Werte:

- Tragen von geeigneter Schutzkleidung, insbesondere, wenn ein direkter Kontakt mit Pflanzenbehandlungsmitteln nicht ausgeschlossen werden kann, z.B. beim Herstellen und Um­füllen der Behandlungsflüssigkeit;
- Tragen von Atemschutzmasken bei Anwendung bestimmter Pflanzenbehandlungsmittel sowie unter Arbeitsbedingungen, die eine erhöhte Belastung hervorrufen, wie z.B. Sprühen in dichten, hohen Beständen.
- Beim längerzeitigen Ausbringen bietet sich die Kabine als Schutz vor gesundheitsschädigenden oder belästigenden Ein­wirkungen von Pflanzenbehandlungsmitteln an. Die Schutz­wirkung einer Kabine läßt sich auf folgende Art und Weise optimieren:
 - Schaffung eines Überdruckes in der Kabine von minde­stens 40 bis 50 Pa. Die Eindringwahrscheinlichkeit schad­stoffhaltiger Luft ist umso größer, je größer der Anteil des Leckquerschnittes ist, der in Bereichen mit Unter­druck liegt. Diese Bereiche befinden sich auf den windab­gewandten Seiten und gegebenenfalls am Kabinenboden bei entsprechender Führung des Motorkühlgebläse-Luft­stromes. Leck- und Abluftöffnungen sollten daher gleich­mäßig an den Kabinenwänden verteilt oder in Bereichen am Kabinenboden angeordnet werden, in denen geschwin­digkeitsinduzierte Unterdrücke nur in geringem Umfang auftreten.
 - Die Reinigung der zwangsweise zugeführten Luft muß feste, flüssige und gasförmige Schadstoffe erfassen. Als Abscheideeinrichtung für gesundheitsschädigende Gase bieten sich Aktivkohlefilter an, es bestehen dabei jedoch folgende Probleme, die noch Gegenstand der Forschung sind: die Vielfalt der anfallenden schädigenden oder be­lästigenden Gase erschwert eine optimale Luftreinigung mit nur einer Aktivkohlesorte, so daß man entweder meh­rere Sorten verwenden (Nachteil: höherer Preis und Druckabfall) oder sich mit einer mittleren Abscheidegüte zufrieden geben muß. Die Standzeitabschätzung für ein Aktivkohlefilter, das diskontinuierlichen und nur im Mit­tel bekannten Belastungen ausgesetzt wird, ist äußerst problematisch. Um der Unsicherheit hinsichtlich der Wirksamkeit der Aktivkohle zu begegnen, ist ein häufiges Wechseln des Filters erforderlich.
- Die Vergleichbarkeit von Aktivkohlefiltern des gleichen Typs und des gleichen Anwendungsbereiches, aber unter­schiedlicher Hersteller, ist nicht gegeben, da einheitliche Prüfrichtlinien für die Aktivkohle und ihre möglichen Im­prägnierungen fehlen.

Verwendete Formelzeichen

A	%	Abscheidegrad einer Kabine
A ₂ , A ₃	m ²	Leckquerschnitt
b ₁ , b ₂	—	binäre Größen zur Kennzeichnung der Strömungsrichtung
c _p	—	Druckkoeffizient
C	m ³ /h Pa ⁿ	Luftdurchlässigkeitskennwert
E	%	Entlastungsgrad einer Kabine
Ė _{w1}	kg/m h	Emissionsstrom aus Wirkstoff pro m Spritzbreite
h	m	lotrechter Abstand vom Boden
M	kg	Masse
Ṁ	kg/h	Massenstrom
n	—	Druckexponent
p	Pa	Gesamtdruck
p _∞	Pa	statischer Druck der ungestörten Strömung
Δp	Pa	Druckdifferenz
s _A	m	horizontaler Abstand zwischen Meßstelle und Quelle (Spritzbalken bzw. Düsenkranz des Sprühgerätes)
t	s	Zeit
v _∞	m/s	Anströmgeschwindigkeit
V̇	m ³ /h	Volumenstrom
α	°	Windeinfallswinkel, Winkel zwischen Fahrzeuglängsachse und Windrichtung (bei axialem Gegenwind ist α = 0)
η	%	Gütegrad eines Abscheiders
ζ	mg/m ³	Wirkstoffgehalt in der Luft (20 °C, 1013 mbar)
ρ	kg/m ³	Dichte
Indizes, tiefgesetzt		
a		außen
ab		abgeführt
b		Grenzfläche
F		am ungeschützten Fahrerplatz eines Spritz- oder Sprühfahrzeuges (Atembereich)
FKab		im Atembereich in einer Kabine
G		Gebläse
i		innen
l		Leck
Q		im Trägerluftstrom bei Austritt aus dem Sprühgerät
w		Wand
zu		im Zuluftkanal; zugeführt
(1)		an der Meßstelle 1
hochgesetzt		
a		atembare Wirkstoffgehalt
g		gesamter Wirkstoffgehalt beim Sprühen
*		dimensionslose Größe

Schrifttum

- [1] Unfallverhütungsvorschriften. Bundesverband der landwirtschaftlichen Berufsgenossenschaften. Stand: 1.1.1981.
- [2] *Hardegen, B.*: Theoretische Untersuchungen zur Staubschutzwirkung von belüfteten Arbeitsräumen und gekapselten Atemschutzbereichen und sich daraus ergebende meßtechnische Aufgaben. Unveröffentlichter Bericht zum DFG-Forschungsvorhaben Ba 168/16-II B8, 1982.
- [3] *Gustafsson, A., H.-A. Eriksson u. O. Norén*: Dammbelastning vid jordbruks-, skogs- och entreprenadmaskiner (Staubbelastung bei Arbeiten mit Land-, Forst- und Kommunalmaschinen). Jordbrukstekniska institutet, Uppsala, Schweden, Specialmeddelande S 26, 1978.
- [4] DIN 4701: Regeln für die Berechnung des Wärmebedarfs von Gebäuden. Berlin und Köln: Beuth-Verlag 1982.
- [5] *Hardegen, B.*: Einfluß von Lecköffnungen auf die Schutzwirkung von Fahrer кабин. Vortrag auf der VDI/MEG-Jahrestagung Landtechnik 10./11. Nov. 1983 in Braunschweig (erscheint demnächst in Grundl. Landtechnik).
- [6] ISO/TC 23/SC 3 (Secr-126) N 226 Ad, August 1979. *Gustafsson, A. u. O. Norén*: Dust problems on operating machines in agriculture and forestry.
- [7] ISO/TC 23/SC 3 (UK 7) N 229 E, July 1979. UK proposal for standard specification for forced air ventilation units fitted to tractor cabs and purpose-built spray cabs.
- [8] *Batel, W.*: Schutzwirkung der Fahrerkabine beim Ausbringen von Pflanzenbehandlungsmitteln. Grundl. Landtechnik Bd. 33 (1983) Nr. 1, S. 1/5.
- [9] *Wirth, H.*: Eigenschaften und Auswahlkriterien für Adsorptionsmittel. Staub-Reinhalt. Luft Bd. 36 (1976) Nr. 7, S. 288/92.
- [10] Atemschutz-Merkblatt. Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften, ZH 1/134. Köln: Carl Heymanns Verlag, 1981.
- [11] *Miller, M.L., A.W. Eissler u. J.W. Ackley*: Tractor operator enclosure environment during pesticide application operations. ASAE-Paper No. 79-1009.
- [12] *Taschenberg, E.F., D.F. Minnick u. J.B. Bourke*: Protecting the tractor operator in the application of pesticidal chemicals. New York's Food and Life Sciences Bulletin, Bd. 54 (1975); Plant Sciences, Nr. 7, S. 1/6.
- [13] Merkblatt 18/1: Allgemeine Vorsichtsmaßnahmen beim Umgang mit Pflanzenbehandlungsmitteln. Richtlinie des Bundesgesundheitsamtes und der Biologischen Bundesanstalt. Biologische Bundesanstalt Braunschweig, April 1981.
- [14] DIN 3181: Atemfilter für Atemschutzgeräte. Berlin und Köln: Beuth-Vertrieb, Februar 1973.