

## Staubbekämpfung beim Mähdrescher

Von Wilhelm Batel, Braunschweig-Völkenrode\*)

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

DK 62-784:628.511:614.71:631.354

Die Bestrebungen zum Verbessern der Arbeitsbedingungen beinhalten beim Mähdreschen auch Maßnahmen der Staubbekämpfung. — Da die Staubemission mit der Schnittbreite ansteigt, nehmen die Anforderungen an die Staubbekämpfung entsprechend zu.

Ein hinreichender Staubschutz, also eine Einhaltung von MAK-Werten, für den Fahrerplatz auf Mähdreschern läßt sich mit Einrichtungen an der Maschine und unabhängig von den äußeren Bedingungen mit der entsprechend ausgelegten Fahrerkabine und Fahrerhaube erreichen. Die Absaugung der beiden Hauptquellen ist ebenfalls geeignet, scheidet aber wegen der Kosten aus. Es werden Hinweise zur Konstruktion von Fahrerkabinen und Fahrerhauben unter staubtechnischen Gesichtspunkten gegeben.

### Inhalt

1. Einleitung und Aufgabenstellung
2. Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung
  - 2.1 Einrichtungen zur Staubbekämpfung
  - 2.2 Messen der Emissionsströme
  - 2.3 Messen der Staubgehalte
  - 2.4 Versuchsdurchführung

### 3. Meßergebnisse

- 3.1 Schnittbreite und Staubemission
- 3.2 Ausgeworfene Staubmenge und Staubgehalt am Fahrerplatz
- 3.3 Erfolge von Maßnahmen zur Staubbekämpfung
  - 3.3.1 Absaugen der Staubemissionsströme  $E_M$ ,  $E_S$  und  $E_{ges}$
  - 3.3.2 Die Fahrerhaube
  - 3.3.3 Die Fahrerkabine
  - 3.3.4 Bewerten der untersuchten Maßnahmen zur Staubbekämpfung
4. Staubtechnische Gesichtspunkte bei der Konstruktion von Fahrerhauben
5. Staubtechnische Gesichtspunkte bei der Konstruktion von Fahrerkabinen
6. Zusammenfassung

### 1. Einleitung und Aufgabenstellung

Die Bemühungen, die Arbeitsbedingungen in der landwirtschaftlichen Produktion zu verbessern, beinhalten auch Maßnahmen der Staubbekämpfung [1]. Dies gilt insbesondere für Arbeiten mit dem Schlepper, dem Mähdrescher und anderen Arbeitsmaschinen mit Eigenantrieb. Die grundsätzlichen Möglichkeiten der Staubbekämpfung sind vielgestaltig, **Tafel 1**, und wurden diskutiert [2]. Umfangreiche Meßergebnisse zeigen die Größe und Abhängigkeit der vom Mähdrescher ausgehenden Emissionsströme und die dadurch verursachten Staubbelastungen am Fahrerplatz, ohne und bei verschiedenen Maßnahmen der Staubbekämpfung [3]. Danach

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

sind als maschinenintegrierter Staubschutz<sup>1)</sup> für den Fahrer zur Einhaltung von MAK-Werten nur die Fahrerkabine und die Fahrerhaube entsprechender Auslegung zu empfehlen. Das Absaugen der Quellen befriedigt zwar hinsichtlich der Staubminderung, scheidet aber aus wegen der hohen Kosten und der notwendigen Behandlung des anfallenden Staubes. Atemschutzmasken werden meist für einen nur kurzzeitigen Einsatz als zumutbar angesehen. Dagegen sind der Atemschutzhelm oder ähnliche Lösungen im Bereich des persönlichen Staubschutzes als beachtenswerte Maßnahmen einzustufen.

Diese Arbeit ist eine Fortführung der vorgenannten Untersuchungen am Mähdrescher. Dabei stehen zwei Ziele im Vordergrund. Es gilt aufzuzeigen, welche Zusammenhänge zwischen den Staubemissionsströmen und dem Staubgehalt am Fahrerplatz ohne und bei verschiedenen maschinenintegrierten Maßnahmen der Staubbekämpfung bestehen, um den Gültigkeitsbereich der gefundenen Ergebnisse, insbesondere aber ihre Übertragbarkeit, zu verbreitern. Ferner wird angestrebt, Unterlagen für die konstruktive Ausbildung und den Einsatz der Fahrerkabine, der Fahrerhaube und der Staubabsaugung zu erarbeiten.

Maßnahmen in der Produktionstechnik	Maßnahmen am Produktionsmittel	Persönlicher Staubschutz
1. Ändern der Arbeits- und Produktionsabläufe	1. Absauganlage	1. Atemschutzmaske
	2. Fahrerhaube	2. Atemschutzhelm
2. Automatisieren	3. Fahrerkabine	3. Atemschutzhäube
3. .	4. Anordnung des Fahrerplatzes	.
	5. Ändern der Arbeitsweise	.

Tafel 1. Übersicht über Maßnahmen zur Staubbekämpfung, eingehendere Erklärungen zu den Atemschutzgeräten s. Tafel 3.

## 2. Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Die gestellte Aufgabe läßt sich nur über Versuche lösen. Dazu ist der Staubgehalt im Atembereich am Fahrerplatz  $\zeta_F$  in Abhängigkeit von den Ursachen, also dem Gesamt-Emissionsstrom, zu ermitteln, und dies bei verschiedenen Maßnahmen der Staubbekämpfung. Nur dieser Weg liefert gesicherte Unterlagen für eine allgemein gültige Bewertung von Staubbekämpfungsmaßnahmen. Der nächste Schritt ist die Untersuchung der konstruktionsbedingten Einflüsse bei den in Frage kommenden Staubschutzeinrichtungen. Für die Versuche stand ein "Claas-Dominator 85" mit 4,50 m Mähwerk zur Verfügung.<sup>2)</sup>

### 2.1 Einrichtungen zur Staubbekämpfung

Die eingesetzten Maßnahmen zur Staubbekämpfung sind im Grundsatz in einer früheren Arbeit beschrieben [3].

<sup>1)</sup> Der Begriff "Staubschutz" beinhaltet die Einhaltung einer bestimmten Belastungsgrenze. Wir gehen dabei von der allgemein geltenden Arbeitsstoffverordnung und den MAK-Werten aus [4]. So kann kein Schutz vorgetauscht werden, der nicht gegeben ist.

<sup>2)</sup> Für diese Unterstützung durch die Fa. Gebr. Claas, Harsewinkel i.W., erlauben wir uns verbindlichst zu danken.

### 2.1.1 Absaugen der Emissionsströme am Mähtrisch ( $E_M$ ) und am Stroh- und Spreuaustritt ( $E_S$ )

Die Einrichtungen zum Erfassen dieser beiden Quellen mit anschließender Abscheidung des Staubes zeigt Bild 1. Das Mähwerk ist mit einer auch seitlich geschlossenen, bis zur Getreideoberkante verstellbaren, durchsichtigen PVC-Haube abgedeckt. Der in diesem Raum anfallende Staub wird mit einem Luftstrom von etwa 10000 m<sup>3</sup>/h durch ein Axialgebläse abgesaugt und dem Reinigungsgebläse derart zugeführt, daß die Wirkung der Reinigung nicht beeinflusst wird. Der ggf. verbleibende Strom gelangt direkt in die Absaugeinrichtung am Stroh- und Spreuaustritt. Die Rohrleitun-

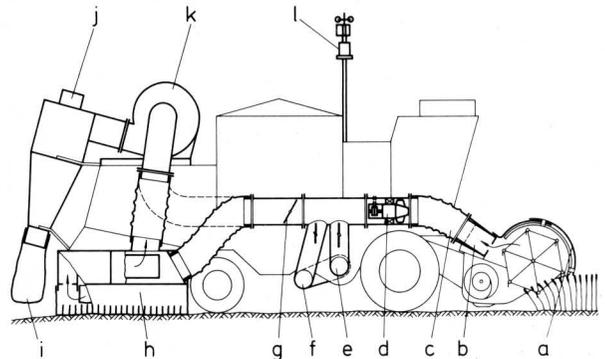


Bild 1. Schema der Erfassungs-, Förder- und Abscheideeinrichtungen am Versuchsmähdrescher.

- a verstellbare, seitlich geschlossene, durchsichtige und abnehmbare Haube über dem Mähwerk
- b Absaugkanal, Länge = Mähwerksbreite
- c flexible Schläuche
- d Axialgebläse, Antrieb durch Wankelmotor, Durchsatz einstellbar bis 15000 m<sup>3</sup>/h
- e Luftkanal zur rechten Eintrittsöffnung des Reinigungsgebläses
- f Luftkanal zur linken Eintrittsöffnung des Reinigungsgebläses
- g Drosselklappen
- h Erfassungselemente am Stroh- und Spreuaustritt [3]
- i abgeschiedener Staub
- j Doppelzyklon, Tauchrohr  $\phi = 0,45$  m, Zyklon  $\phi = 1,0$  m, Zyklonhöhe = 2,7 m
- k Radialgebläse, Antrieb durch Wankelmotor, Durchsatz einstellbar bis 15000 m<sup>3</sup>/h
- l Meßgerät für Windeinfallswinkel und die relative Windgeschwindigkeit (Registrierung auf Band)

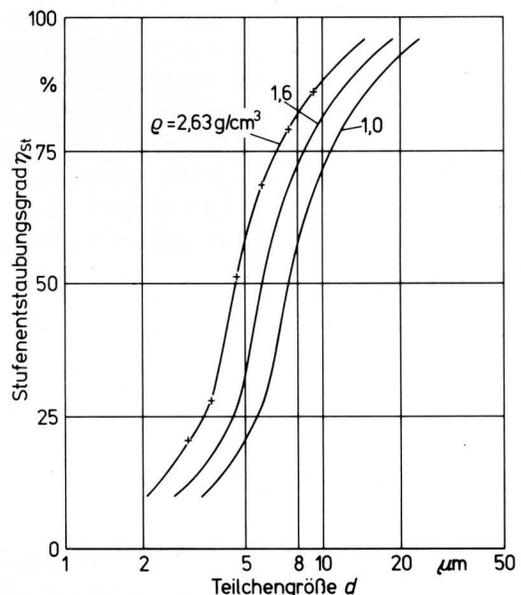


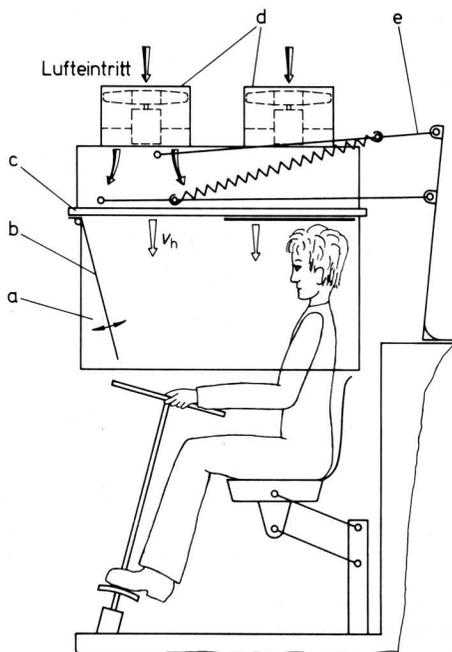
Bild 2. Stufenentstaubungsgrad des Doppelzyklons, gemessen für  $\rho = 2,63$  g/cm<sup>3</sup>. Die Kurven für  $\rho = 1,6$  g/cm<sup>3</sup> (Dichte des Staubes beim Mähdrusch) und  $\rho = 1$  g/cm<sup>3</sup> sind daraus errechnet.

gen zu den Eintrittsöffnungen des Reinigungsgebläses lassen sich durch Verschieben schnell an- und abkoppeln.

Der Raum für den Stroh- und Spreuaustritt ist mit schon früher beschriebenen Elementen umschlossen [3]. Ein Radialgebläse fördert die Staubluft mit einem Durchsatz von etwa  $14000 \text{ m}^3/\text{h}$  bei  $2000 \text{ Pa}$  in einen Doppelyklon. Den Stufenentstaubungsgrad dieser Zyklonbatterie zeigt **Bild 2**. Bezogen auf die anfallenden Stäube ergeben sich bei Absaugung beider Quellen Abscheidungsgrade von etwa  $95\text{--}97\%$ . Durch entsprechende Ankopplung der Schläuche (in **Bild 1** gestrichelt angedeutet) lassen sich auch beide Staubemissionsströme getrennt voneinander erfassen.

### 2.1.2 Die Fahrerhaube

Die Aufgabe dieser Einrichtung besteht darin, hinreichend staubfreie Luft in den Atembereich des Fahrers zu leiten und ihre Beladung mit Teilchen aus dem umgebenden Staubfeld weitestgehend zu verhindern. Dabei sind die Bedingungen für die Behaglichkeit einzuhalten. Die für die Versuche aus früheren Erkenntnissen entwickelte Haube oder Teilkabine ist in **Bild 3** dargestellt. Um ausreichend Bewegungsraum und eine hinreichende Beschattung für den Fahrer zu schaffen sowie aus strömungstechnischen Gründen, beträgt die waagerechte Querschnittsfläche  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ . Die Luft wird durch ein Faservlies (Viledon P15/100) mit einem Abscheidungsgrad von etwa  $97\%$  entstaubt und über der gesamten Fläche – bis auf einen Sektor über dem Kopf – dem durch Scheiben abgegrenzten Raum gleichmäßig zugeführt. Eine solche Kolbenströmung ist aus noch zu erörternden Gründen wichtig. Die Luftgeschwindigkeit  $v_h$  läßt sich zwischen  $0$  und  $1 \text{ m/s}$  einstellen. Ein Luftvorhang ist nicht vorgesehen. Der Schutz der nahezu staubfreien Frischluft gegen eine Beladung erfolgt durch durchsichtige,  $0,5 \text{ m}$  hohe Scheiben. Bei einer solchen Anordnung ist es nützlich, daß sich die Haube beim Aufstehen des Fahrers anheben läßt. Dazu hängt die Haube an einem Gelenkviereck mit einer Feder als Gewichtsausgleich. Durch einfache Rasten läßt sich die Haube in verschiedenen Höhen feststellen. Bei einer anderen Lösung wird eine Geradföhrung mit einer elektrischen Höhenverstellung benutzt.



**Bild 3.** Schema der untersuchten Fahrerhaube.

- a seitliche Scheiben
- b in der Neigung verstellbare vordere Scheibe
- c Filterkassette (Faservlies), darunter Lochplatte
- d Gebläse, Luftdurchsatz bis  $4000 \text{ m}^3/\text{h}$
- e Gelenkviereck mit Gewichtsausgleich durch Feder

### 2.1.3 Die Fahrerkabine

Es wird eine handelsübliche, mit einer Kühlanlage ausgerüstete Kabine verwendet. Der Luftdurchsatz läßt sich zwischen  $0$  und  $300 \text{ m}^3/\text{h}$  in  $3$  Stufen einstellen. Das Klappfenster und die Klapptür schließen dicht. Die Öffnungen für die Verstellelemente in Boden und Wänden sind sorgfältig abgedichtet, so daß sich ein Überdruck von etwa  $20\text{--}30 \text{ Pa}$  bei einem Luftdurchsatz von  $300 \text{ m}^3/\text{h}$  ergibt.

## 2.2 Messen der Emissionsströme

Die unter 2.1.1 beschriebene Einrichtung zur Staubbekämpfung durch Absaugen der Quellen ist auch geeignet, die bestimmenden Emissionsströme zu ermitteln, da der Gütegrad der Zyklone und die Teilchengrößenverteilung des Staubes bekannt sind. Diese Emissionsströme sind die am Mähtisch ( $E_M$ ) und die am Stroh- und Spreuaustritt ( $E_S$ ) unabhängig von Maßnahmen der Staubbekämpfung zeitlich anfallenden Staubmengen. Oder anders ausgedrückt: Die Absauganlage ist im Rahmen der Versuche kein Teil des Mähreschers, sondern eine nachgeschaltete Meßeinrichtung oder Maßnahme zur Staubbekämpfung.

Ein gewisses Problem besteht darin, die Emissionsströme hinsichtlich der Teilchengröße nach oben zu begrenzen. Es wurde seinerzeit ein durch die Versuchseinrichtung definierter Trennschnitt mit einer oberen Teilchengröße der Trennungskurve von  $1 \text{ mm}$  gewählt. Der entsprechende Trennvorgang erfolgte im Probenehmer [3]. Nach dem gleichen Prinzip wird der von den Zyklonen abgeschiedene Staub getrennt. Dazu erfolgt zunächst eine Vorabscheidung auf einem Schwingsieb mit  $1 \text{ mm}$  Maschenweite. Vom Durchgang werden Sammelproben dem seinerzeit benutzten und entsprechend aufgebauten Probenehmer zugeführt. Unter Berücksichtigung des nicht abgeschiedenen Feinstaubes und der Feuchte ergibt sich der Massenstrom an Trockenmasse.

## 2.3 Messen der Staubgehalte

Das Messen der Staubgehalte im Atembereich wie auch an anderen Punkten in der Umgebung des Mähreschers erfolgt durch Filtergeräte [5], weil sich nur damit eine ausreichende Genauigkeit erzielen läßt. Erfasst wird der atembare Staub.

Besteht die Aufgabe, die räumliche Verteilung des Staubgehaltes zu ermitteln, so werden mehrere, gleiche Filterköpfe an entsprechenden Stellen angeordnet.

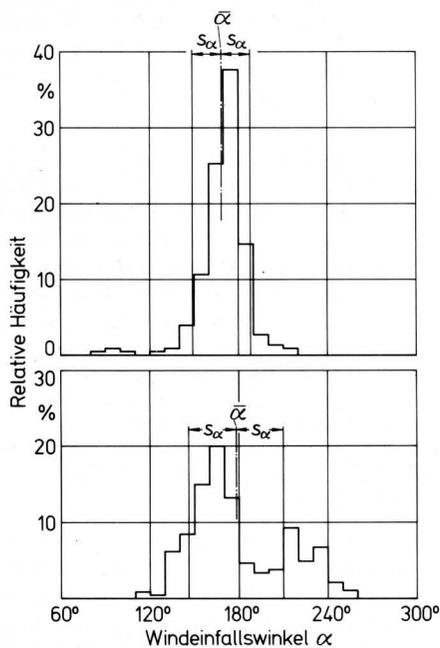
Werden Filtergeräte in Kabinen eingesetzt, so ist zu beachten, daß damit ein Teil des Staubes abgeschieden wird. Die u.U. notwendige Korrektur richtet sich nach den vorliegenden Gegebenheiten. Die Grundlagen dazu werden in Abschnitt 5 angesprochen.

## 2.4 Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung steht unter der Forderung, daß sich die Maßnahmen der Staubbekämpfung vergleichend bewerten lassen. Die Staubbelastung am Fahrerplatz wird bestimmt durch die Emissionsströme und die Staubausbreitung. Die Staubausbreitung von den Quellen hängt ab von den Strömungsverhältnissen, den Staubeigenschaften und den gegebenen geometrischen Bedingungen. Hieraus folgt, daß die eingangs gestellte Forderung nach Vergleichbarkeit der Ergebnisse nur erfüllt ist, wenn für die verschiedenen Maßnahmen der Staubbekämpfung der Staubgehalt am Fahrerplatz in Abhängigkeit von den Emissionsströmen bei gleichen Windverhältnissen, physikalischen Staubeigenschaften und Mährescherabmessungen ermittelt wird.

Die Stärke der Staubquellen wird systematisch durch die Wahl einer unterschiedlichen Schnittbreite verändert. Dabei liegt der jeweils angebotene Getreidestreifen symmetrisch zur Mittellinie des Mähreschers.

Bei der Forderung nach gleichen Windverhältnissen sind der Windeinfallswinkel  $\alpha$ , die relative Windgeschwindigkeit  $v_{rw}$  und die kurzzeitigen Schwankungen (Böigkeit) zu beachten. Diese Werte sind daher kontinuierlich zu messen. Zur Beschränkung des Versuchsumfanges ist noch zu klären, welche Windverhältnisse zu besonders aussagekräftigen Ergebnissen führen. Die Maßnahmen der Staubbekämpfung müssen darauf abzielen, daß auch bei ungünstigen Bedingungen die Dauerbelastung nach der MAK-Liste nicht überschritten wird. Einen entscheidenden Einfluß auf den Staubgehalt am Fahrerplatz hat die Windrichtung. Aus der entsprechenden Abhängigkeit folgt [3], daß, von Sonderfällen abgesehen, die größte Dauerbelastung dann auftritt, wenn die Längsachse des Mähreschers bei einer Folge von Hin- und Rückfahrten etwa in Richtung des Windes liegt, d.h. Einfallswinkel von  $\alpha = 0^\circ \pm 45^\circ$  und  $\alpha = 180^\circ \pm 30^\circ$  vorliegen. Bei allen anderen Windeinfallswinkeln ist die Dauerbelastung gleich oder niedriger. Für die vergleichende Bewertung von Staubbekämpfungsmaßnahmen werden daher alle Versuche mit einem Windeinfallswinkel von  $\alpha = 0^\circ$  und  $\alpha = 180^\circ$  und einem noch zu diskutierenden Schwankungsbereich von  $\pm 30^\circ$  durchgeführt. Diese Forderung läßt sich dadurch erfüllen, daß die Fahrtrichtung der Windrichtung angepaßt wird. Im Gegensatz zum Windeinfallswinkel läßt sich die relative Windgeschwindigkeit durch die Versuchsbedingungen nicht beeinflussen. Man muß entsprechende Wetterbedingungen abwarten.



**Bild 4.** Zwei Beispiele für Häufigkeitsverteilungen des Windeinfallswinkels  $\alpha$  bei Rückenwind.

oben: Versuch Nr. 12–16 (Hafer, gewertet)		unten: Versuch Nr. 7–14 (Gerste, nicht gewertet)	
$\bar{\alpha}$	= 169,2°	$\bar{\alpha}$	= 178,2°
$s_\alpha$	= 18,97°	$s_\alpha$	= 31,89°
$\zeta_F$	= 42 mg/m <sup>3</sup>	$\zeta_F$	= 29,12 mg/m <sup>3</sup>
$E_{ges}$	= 10 kg/h	$E_{ges}$	= 28 kg/h
$v_{rw}$	= 4,5 m/s	$v_{rw}$	= 2,6 m/s

Die Böigkeit ist gekennzeichnet durch die Häufigkeit und Größe der Richtungs- und Geschwindigkeitsschwankungen. Besonders empfindlich reagiert der Staubgehalt  $\zeta_F$  bei Schwankungen der Richtung um einen Winkel  $\alpha \approx 180^\circ$ . In der Zeit, in der die Schwankungen über etwa  $30^\circ$  hinausgehen, gelangt z.B. von der Quelle am Stroh- und Spreuastritt vergleichsweise fast kein Staub mehr zum Fahrerplatz. Das **Bild 4** veranschaulicht mit zwei Beispielen die Häufigkeit von gemessenen Richtungsschwankungen. Nur wenn der Wind während der Versuchsdauer über 90 % der Zeit – erkenntlich am entsprechenden Flächenanteil unter der Häufigkeitskurve – in dem genannten Bereich von  $\alpha = 180^\circ \pm 30^\circ$  liegt, wird der Versuch gewertet. Im unteren Bild ist

diese Bedingung nicht erfüllt. An den Versuchstagen wurde eine Streuung im Bereich  $10^\circ < s_\alpha < 40^\circ$  beobachtet. Auch die Frequenz der Schwankungen hat einen Einfluß. Diese wurde aber nicht berücksichtigt. – Da der Mährescherkörper nicht symmetrisch ist und sich der Windströmung die vom Mährescher erzeugten Strömungen überlagern, ist die Kurve für den Staubgehalt am Fahrerplatz in Abhängigkeit von  $\alpha$  nicht symmetrisch zur Längsachse [3]. Die entsprechenden Einflüsse wirken sich im vorgegebenen Sektor von  $\pm 30^\circ$  nicht oder nur wenig aus.

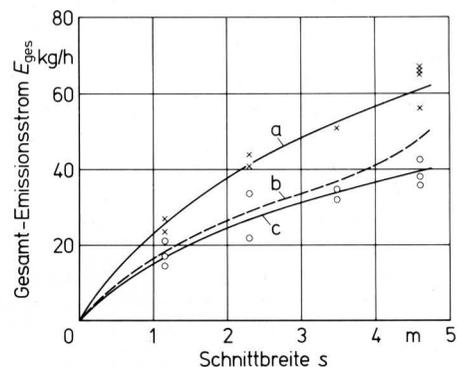
Für die relative Windgeschwindigkeit wurde ein Bereich  $2,5 \text{ m/s} < v_{rw} < 5 \text{ m/s}$  für die Zuordnung von Emissionsstrom und Fahrerplatzbelastung zugelassen. Im Vergleich zu den Windverhältnissen sind die Staubeigenschaften von weniger großem Einfluß. Zur Kontrolle werden die Teilchengrößenverteilung und die Feuchtigkeit gemessen.

Die Abmessungen des Mähreschers bleiben bei allen Versuchen gleich, wenn man von den Änderungen durch die jeweiligen Staubschutzmaßnahmen absieht. Werden die Einflüsse bei nur einer Staubschutzmaßnahme untersucht, z.B. bei der Fahrerhaube oder der Fahrerkabine, so können auch andere, aber konstant gehaltene Windeinfallswinkel gewählt werden.

### 3. Meßergebnisse

#### 3.1 Schnittbreite\*) und Staubemission

Für die Beurteilung von Staubschutzmaßnahmen ist die anfallende Staubmenge grundlegend. Unbeschadet schon vorliegender Ergebnisse [3] wird mit **Bild 5** an die Abhängigkeit des Staubemissionsstromes  $E_{ges}$  von der Schnittbreite  $s$  bei verschiedenen Bedingungen erinnert. Es wird bestätigt, daß der Emissionsstrom im wesentlichen der Schnittbreite direkt proportional ist, im einzelnen aber bei kleinen Schnittbreiten stärker und bei großen weniger stark mit  $s$  zunimmt. Hieraus folgt, daß die Maßnahmen der Staubschutz mit der Größe der Mährescher entsprechend zu verstärken sind.



**Bild 5.** Staubemissionsstrom  $E_{ges}$  für Winter-Gerste in Abhängigkeit von der Schnittbreite  $s$ .

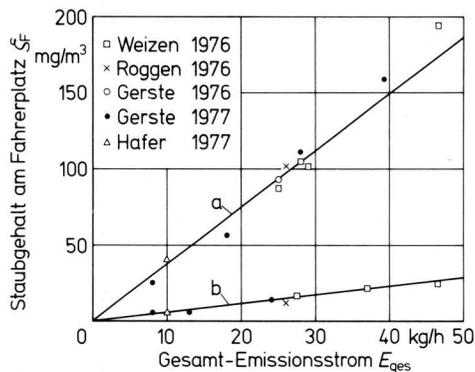
- a 14 Tage nach Mährescherreife, ca. 60 dt/ha
- b nach [3]
- c bei Mährescherreife, ca. 60 dt/ha

#### 3.2 Ausgeworfene Staubmenge und Staubgehalt am Fahrerplatz

Theoretische Überlegungen ergeben, daß bei sonst gleichen Bedingungen bei der Ausbreitung der Staubgehalt am Fahrerplatz direkt proportional ist der austretenden Staubmenge, also dem Emissionsstrom. In **Bild 6** sind einige gemessene Staubgehalte am Fahrerplatz  $\zeta_F$  ohne Staubschutzmaßnahmen in Abhängigkeit von dem Gesamt-Emissionsstrom  $E_{ges}$  dargestellt. Es zeigt sich, daß der Staubgehalt am Fahrerplatz in recht guter Näherung der emittierten Staubmen-

\*) Unter Schnittbreite  $s$  wird hier die Breite des geschnittenen Getreidestreifens verstanden.

ge direkt proportional ist. Die Steigung der Geraden ist stark abhängig vom Windeinfallswinkel  $\alpha$ . Die weiteren Einflüsse, nämlich die rel. Windgeschwindigkeit  $v_{rw}$ , die Böigkeit, die Staubeigenschaften und die Abmessungen des Mähreschers wurden nicht verändert bzw. schwanken in engen, vorgegebenen Bereichen. Der mit dem Bild gezeigte Zusammenhang erlaubt es, die früher mitgeteilten Ergebnisse über die Größe und Abhängigkeit der Staubemission für die Bestimmung der Fahrerplatzbelastung heranzuziehen.



**Bild 6.** Staubgehalt im Atembereich am Fahrerplatz des Mähreschers  $\zeta_F$  in Abhängigkeit von dem Gesamt-Emissionsstrom  $E_{ges}$ , Mähwerkbreite 4,50 m, keine Staubbekämpfung.

- a  $\alpha = 180^\circ \pm 30^\circ$ ;  $2,5 \text{ m/s} < v_{rw} < 4 \text{ m/s}$   
 b  $\alpha = 0^\circ \pm 30^\circ$ ;  $2,5 \text{ m/s} < v_{rw} < 4 \text{ m/s}$

### 3.3 Erfolge von Maßnahmen der Staubbekämpfung

#### 3.3.1 Absaugen der Staubemissionsströme $E_M$ , $E_S$ und $E_{ges}$

Die Meßergebnisse über die Fahrerplatzbelastung  $\zeta_F$  in Abhängigkeit von der Staubemission  $E_{ges}$  bei Absaugen von  $E_S$ ,  $E_M$  und  $E_{ges}$  für den Windeinfallswinkel  $\alpha = 0^\circ \pm 30^\circ$  und  $\alpha = 180^\circ \pm 30^\circ$  im Vergleich zum Mährescher ohne Staubbekämpfung zeigt **Bild 7**.

Bei Gegenwind (obere Bildhälfte) bestimmt nur die vordere Quelle die Belastung am Fahrerplatz. Das Absaugen der Quelle am Stroh- und Spreuaustritt (Punkte b) bringt keine Senkung des Staubgehaltes am Fahrerplatz.

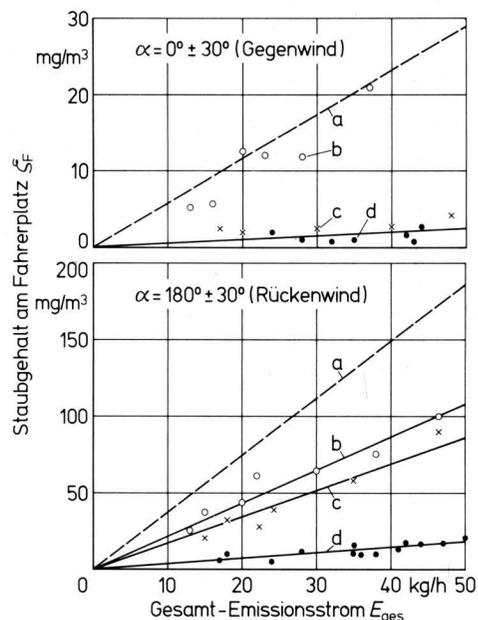
Bei Rückenwind (untere Bildhälfte) sind beide Quellen an der Fahrerplatzbelastung beteiligt. Dabei liefert die Quelle am Mähtrisch den größeren Anteil. Dies erklärt sich durch die Wirbel, die sich im Windschatten eines Körpers ausbilden [3].

Das Absaugen nur einer Quelle, selbst der vorderen, erfüllt die bestehenden Forderungen zur Staubbekämpfung auch bei kleinen Mähreschern nicht hinreichend. Werden aber beide Quellen erfaßt (Kurven d), so ist die Staubminderung als ausreichend anzusehen (Abschnitt 3.3.4).

Daß trotz der guten Erfassung und Abscheidung der Teilchen bei Rückenwind eine Spitzenbelastung bis etwa  $20 \text{ mg/m}^3$  verbleiben kann (Kurve d), ist auf folgendes zurückzuführen:

1. Die Zyklone scheiden nur Teilchen um  $d > 5 \mu\text{m}$  ab, so daß Feinstaub aus den Tauchrohren bei Rückenwind zum Fahrerplatz gelangen kann.
2. Trotz gut ausgebildeter Erfassungselemente gelangt noch ein geringer Anteil des Staubes in die Umgebung.
3. Alle auf Stoppel, Stroh und Boden schleifenden oder rollenden Bauteile lösen Staub ab. Dieser Staub wird nur teilweise erfaßt.
4. Es sind Undichtigkeiten am Mährescher vorhanden, wo Staub in geringen Mengen austritt. Dieser Staub wird nicht erfaßt.

Zum Absaugen und Abscheiden ist ein Aufwand etwa nach Bild 1 zu treiben. Selbst bei Neukonzeption eines Mähreschers ist der Kostenanteil für diese Elemente im Verhältnis so hoch, daß eine solche Maßnahme zur Staubbekämpfung nicht zu vertreten ist. Aber auch andere Gründe sprechen gegen eine Absauganlage, nämlich die Möglichkeit einer zusätzlichen Störquelle durch Verstopfungen, insbesondere aber der Aufwand für die Behandlung des erfaßten bzw. abgeschiedenen Staubes. Ferner werden die Sichtverhältnisse verschlechtert und das Bauvolumen vergrößert.

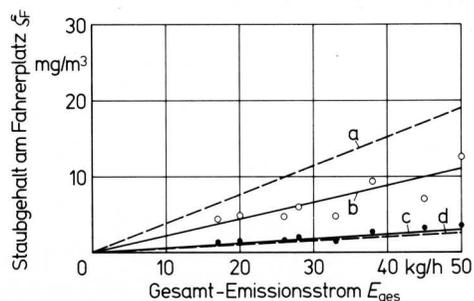


**Bild 7.** Staubgehalt im Atembereich am Fahrerplatz  $\zeta_F$  ohne und mit Staubbekämpfung durch Absaugen von  $E_M$ ,  $E_S$  und  $E_{ges}$  in Abhängigkeit vom Gesamt-Emissionsstrom  $E_{ges}$  bei Gegen- und Rückenwind.

- a Staubgehalt  $\zeta_F$  ohne Staubbekämpfung, aus Bild 6  
 b Staubbekämpfung durch Absaugen der Quelle am Stroh- und Spreuaustritt  $E_S$   
 c Staubbekämpfung durch Absaugen der Quelle am Mähwerk  $E_M$   
 d Staubbekämpfung durch Absaugen beider Quellen, d.h. von  $E_{ges} = E_M + E_S$

#### 3.3.2 Die Fahrerhaube

Mit der untersuchten Fahrerhaube ( $v_h = 0,4 \text{ m/s}$ ,  $b = 0,27 \text{ m}$ ,  $\beta = 0$ ) lassen sich nach **Bild 8** Fahrerplatzbelastungen erreichen, die niedriger liegen als bei einer Gesamtabsaugung.



**Bild 8.** Staubgehalt im Atembereich am Fahrerplatz  $\zeta_F$  bei Staubbekämpfung durch eine Fahrerhaube und einer Bauart nach Bild 3 (Kurven b und c) in Abhängigkeit vom Gesamt-Emissionsstrom  $E_{ges}$ ; dem Vergleich dienen die Kurven für die Gesamtabsaugung (Kurven a und d).

- a Staubgehalt  $\zeta_F$  bei Absaugen beider Quellen ( $E_{ges}$ ) und Rückenwind  
 b Staubgehalt  $\zeta_F$  in der Fahrerhaube bei Rückenwind  
 c Staubgehalt  $\zeta_F$  in der Fahrerhaube bei Gegenwind  
 d Staubgehalt  $\zeta_F$  bei Absaugen beider Quellen ( $E_{ges}$ ) und Gegenwind

Gegenüber der 1976 untersuchten, handelsüblichen Fahrerhaube [3] konnte die Staubbelastung um die Hälfte gesenkt werden. Mit diesem Ergebnis und wegen der vergleichsweise geringen Kosten ist die richtig ausgelegte Fahrerhaube (s. Abschnitt 4) ein empfehlenswertes Mittel zum Staubschutz auf Mähdreschern. Die in diesem Bild gezeigten Ergebnisse für die Fahrerhaube lassen sich noch verbessern, wenn die vordere Scheibe geneigt wird (siehe Abschn. 4).

### 3.3.3 Die Fahrerkabine

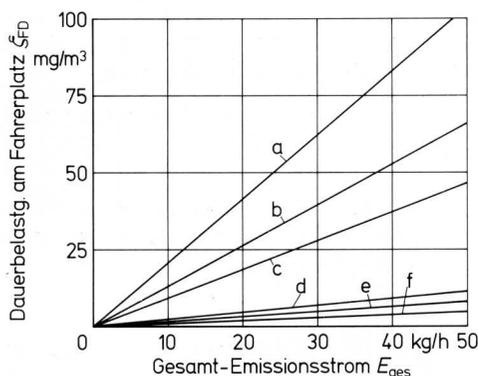
Den besten maschinenintegrierten Staubschutz bietet, wie schon nachgewiesen [3] und mit den durchgeführten Versuchen bestätigt, **Tafel 2**, die Fahrerkabine, wenn darin stets ein hinreichender Überdruck herrscht.

Getreideart		Wintergerste				Winterweizen					
		17		26		54	58		60		
Gesamtemissionsstrom $E_{ges}$	kg/h	17	160	356	160	76	302	42	314	337	144
Windeinfallswinkel $\alpha$	°	349	160	356	160	76	302	42	314	337	144
rel. Windgeschwindigkeit $v_{rw}$	m/s	5,1	2,6	6,6	4,9	4,1	4,4	1,7	2,3	3,8	2,0
Staubgehalt der Frischluft $\zeta_a$ vor dem Filter	mg/m <sup>3</sup>	2,2	3,4	1,9	3,2	1,1	5,4	35	11	3,7	33
Staubgehalt im Atembereich $\zeta_F$	mg/m <sup>3</sup>	1,7	2,4	2,6	3,4	2,1	2,6	2,5	3,7	4	4,7

**Tafel 2.** Staubgehalt im Atembereich in einer geschlossen gehaltenen Fahrerkabine bei verschiedenen äußeren Bedingungen (Mittelwerte), Überdruck 20 Pa. Vor jedem Versuch wurden neue Filter [2] eingesetzt.

### 3.3.4 Bewerten der untersuchten Maßnahmen zur Staubbekämpfung

Für eine Bewertung der untersuchten Maßnahmen zur Staubminderung wird die höchste Dauerbelastung  $\zeta_{FD}$  herangezogen. Sie ist der ungünstigste, denkbare Fall und tritt auf, wenn bei einer ununterbrochenen Folge von Hin- und Rückfahrten die Fahrzeuggängsachse etwa in Windrichtung liegt.



**Bild 9.** Höchste, mögliche Dauerbelastung  $\zeta_{FD}$  am Fahrerplatz in Abhängigkeit vom Gesamt-Emissionsstrom ohne und bei verschiedenen Maßnahmen der Staubbekämpfung, errechnet aus den Werten nach Bild 6, 7, 8 und Tafel 2.

- a Mähdrescher ohne Staubbekämpfung
- b Absaugen der Quelle am Stroh- und Spreuaustritt (hintere Quelle)
- c Absaugen der Quelle am Mähtrisch (vordere Quelle)
- d Absaugen beider Quellen (Gesamtabsaugung)
- e Fahrerhaube nach Bild 3,  $v_h = 0,4$  m/s,  $\beta = 0^\circ$ ,  $b = 0,27$  m
- f Fahrerkabine 300 m<sup>3</sup>/h Frischluft, 20 Pa Überdruck

Unter der Annahme, der Staub sei inert, ergibt sich nach der MAK-Liste bei einem lungengängigen Anteil bis 25 % eine zulässige Dauerbelastung von 32 mg/m<sup>3</sup>. Da die gemachte Annahme u.a. wegen des Quarzgehaltes nicht gesichert ist und unter Abschätzung angestrebter Entwicklungen erscheint derzeit ein Wert von 16 mg atembarem Staub je m<sup>3</sup> realistisch. Langfristig ist mit 8 mg/m<sup>3</sup> zu rechnen.

Das **Bild 9** zeigt die höchste Dauerbelastung am Fahrerplatz  $\zeta_{FD}$ , ermittelt aus den mit Bild 6 bis 8 dargestellten Ergebnissen in Abhängigkeit von dem anfallenden Staubstrom  $E_{ges}$  bei verschiedenen Maßnahmen der Staubbekämpfung.

Es ergibt sich, daß die Fahrerkabine mit Kühlanlage für alle derzeit im Handel befindlichen Mähdrescher einen ausreichenden Staubschutz bietet, selbst wenn man den niedrigsten und noch hypothetischen MAK-Wert von 8 mg/m<sup>3</sup> (atembarer Staub) annimmt. Das gleiche gilt für die Fahrerhaube in entsprechender Gestaltung. Das Absaugen der Staubquellen ist vom Ergebnis her ebenfalls eine geeignete Maßnahme. Sie scheidet aber wegen der Kosten und wegen der notwendigen Behandlung des erfaßten Staubes aus.

Als geeignete maschinenintegrierte Staubschutzmaßnahmen für Mähdrescher sind daher nur die Fahrerhaube und die Fahrerkabine zu empfehlen. In den nachfolgenden Kapiteln werden Hinweise zu ihrer Konstruktion unter staubtechnischen Aspekten gegeben.

## 4. Staubtechnische Gesichtspunkte bei der Konstruktion von Fahrerhauben

Die Forderungen an die Konstruktion von Fahrerhauben bedingen Elemente zum Erzeugen einer hinreichend staubfreien Luft und solche, die ein Beladen dieser Luft mit Teilchen aus dem umgebenden Staubfeld verhindern und dies unter Erhalt der Behaglichkeit. Zur Verwirklichung dieser drei Forderungen gibt es viele Lösungsmöglichkeiten. **Bild 10** veranschaulicht für solche Überlegungen die wirkenden Staubströme.

Staubfreie Luft, d.h. Luft mit einem genügend niedrigen Staubgehalt von beispielsweise  $\zeta_{zu} = 2$  mg/m<sup>3</sup>, läßt sich sicher und einfach durch Filter erzeugen [2].

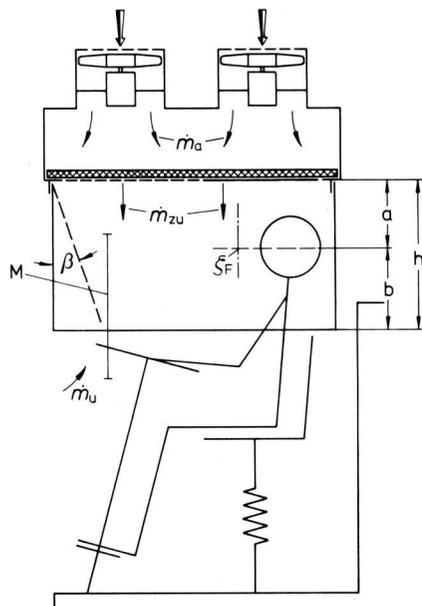
Aus der Tatsache, daß außer bei nur sehr geringen Windgeschwindigkeiten das Staubfeld den Mähdrescher nur wenig in der Höhe überragt, läßt sich durch entsprechend hohe Entnahmestellen eine geringe Belastung des Filters erreichen.

Vielschichtiger sind die Möglichkeiten, die Beladung der staubfreien Luft zu verhindern oder einzugrenzen, d.h. die Vermischungszone M möglichst nach unten zu legen. Geeignet sind, wie im vorliegenden Fall ausgeführt, durchsichtige Wände. Diese bilden einen Raum, in dem eine "Kolbenströmung" mit der Geschwindigkeit  $v_h$  herrscht. Hierdurch werden Windströmungen so geführt, daß die staubhaltige Luft möglichst nicht, auch nicht durch den Körper des Fahrers, in den Atembereich geleitet wird.

Aus der Zuordnung der genannten Parameter ergibt sich die Güte einer Fahrerhaube. Zur Unterstützung entsprechender Entscheidungen sind wichtige Einflußgrößen, nämlich die Luftgeschwindigkeit  $v_h$ , die Überdeckung des Atembereichs  $b$  und der Neigungswinkel  $\beta$  der vorderen Scheibe, mit ihrer Wirkung auf den Staubgehalt am Fahrerplatz in **Bild 11 bis 13** dargestellt.

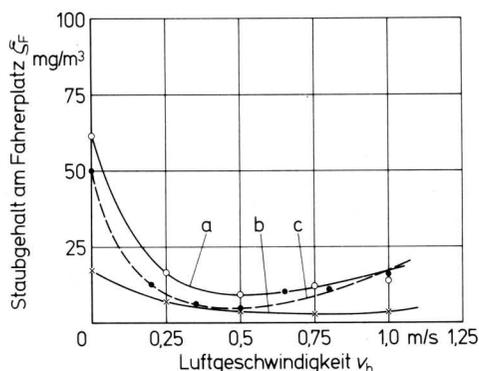
Wie die Versuche zeigen, hat die nach unten gerichtete Luftgeschwindigkeit  $v_h$  einen bedeutenden Einfluß auf den Staubgehalt im Atembereich. Wird doch hierdurch in hohem Maße bestimmt, wo die Mischungszone liegt. Bei den untersuchten Bedingungen sind Luftgeschwindigkeiten von etwa 0,4–0,6 m/s am günstigsten. Höhere Geschwindigkeiten bringen eine Verschlechterung, weil

dann Wirbel und Rückströmungen am Körper (sitzende Haltung) entstehen. Um solche Wirkungen so weit wie möglich zu vermeiden, ist auch die Kolbenströmung anzustreben, d.h. ein flächiger Austritt der Frischluft.



**Bild 10.** Staubströme bei einer Fahrerhaube.

- a Abstand zwischen Atembereich und Haubendecke
- b Überdeckung des Atembereichs durch die Scheiben
- h Höhe der Scheiben
- $\dot{m}_a$  Staubstrom vor Filtration
- $\dot{m}_u$  Staubstrom, der mit der Windströmung auf die offene Fläche der Fahrerhaube trifft
- $\dot{m}_{zu}$  Staubstrom mit der Frischluft
- M Ausdehnung der Vermischungszone der Ströme  $\dot{m}_{zu}$  und  $\dot{m}_u$



**Bild 11.** Einfluß der Luftgeschwindigkeit  $v_h$  auf den Staubgehalt in der Fahrerhaube  $\zeta_F$ ;  $b = 0,27$  m,  $\beta = 0^\circ$ .

- a  $\alpha = 180^\circ \pm 30^\circ$ ;  $2,5 \text{ m/s} < v_{rw} < 6 \text{ m/s}$  } Gerste,  $E_{ges}$  ca. 45 kg/h
- b  $\alpha = 0^\circ \pm 30^\circ$ ;  $3 \text{ m/s} < v_{rw} < 7 \text{ m/s}$  }
- c Mittelwerte aus je zwei Fahrten mit und gegen schwachen Wind,  $E_{ges}$  etwa 30 kg/h;  $7 \text{ mg/m}^3 < \zeta_a < 130 \text{ mg/m}^3$ , Weizen

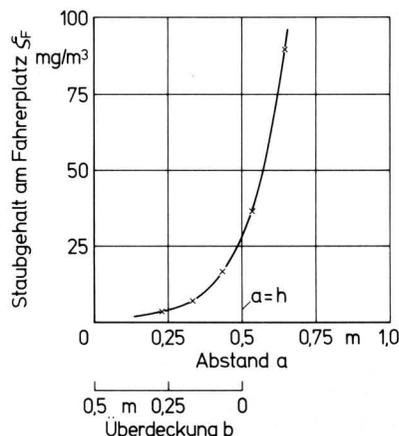
Der Abstand zwischen Haubendecke und Fahrerkopf wirkt sich verhältnismäßig gering aus, solange sich der Atembereich noch genügend innerhalb der Haube befindet. Die Schutzwirkung der Haube verschwindet schnell, wenn diese Bedingung nicht mehr erfüllt ist. Die Überdeckung des Atembereichs ist daher eine sehr bedeutende Größe für die Konstruktion. Mit ein Grund für die gewählte Höhenverstellbarkeit der Haube ist dieser Einfluß. Auch ist an eine Höhenverstellung der Scheiben und/oder eine Verlängerung durch flexibles Material zu denken.

Der Neigungswinkel  $\beta$  der vorderen Scheibe wirkt sich dahingehend aus, daß der Staubgehalt zunächst abnimmt, wenn der Winkel größer wird. Dies ist darauf zurückzuführen, daß die Luftgeschwindigkeit wegen des verkleinerten Querschnitts ansteigt. Große

Werte von  $\beta$  sind dagegen deswegen von Nachteil, weil dann Rückströmungen am Körper unterstützt werden. Auch die Führung von Windströmungen wird hinsichtlich einer Beladung der Frischluft mit kleinem Winkel  $\beta$  günstiger.

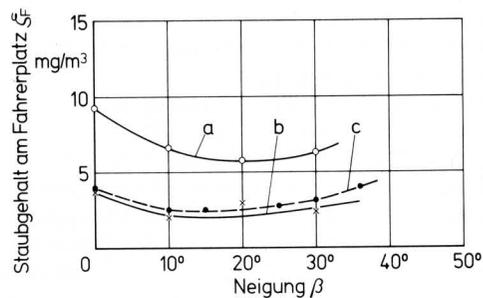
In die Konstruktion der Fahrerhaube ist auch der Bereich unter der Fahrerhaube einzubeziehen. Alle Bauteile sind so zu gestalten, daß möglichst keine Windströmungen in die Haube gelenkt werden. So sollte die Wand des Mähdeschers hinter dem Sitz wegen des anzustrebenden Abstandes nicht zugleich Rückwand der Haube sein, um nur ein Beispiel zu nennen.

Insgesamt darf man feststellen, daß mit der Fahrerhaube und in der vorgestellten Konzeption dann eine sehr gute Staubbekämpfung möglich ist, wenn die Luftgeschwindigkeit  $v_h = 0,5$  m/s, der Winkel  $\beta = 10\text{--}20^\circ$  und die Überdeckung des Atembereichs  $h - a = b$  mindestens 25 cm beträgt.



**Bild 12.** Einfluß des Abstandes a zwischen Atembereich und Haubendecke (Lochplatte) bzw. der Überdeckung b auf den Staubgehalt  $\zeta_F$ ;  $v_h = 0,5$  m/s,  $\beta = 0^\circ$ .

Mittelwerte aus je zwei Fahrten mit und gegen schwachen Wind,  $E_{ges}$  etwa 30 kg/h;  $7 \text{ mg/m}^3 < \zeta_a < 130 \text{ mg/m}^3$ , Weizen



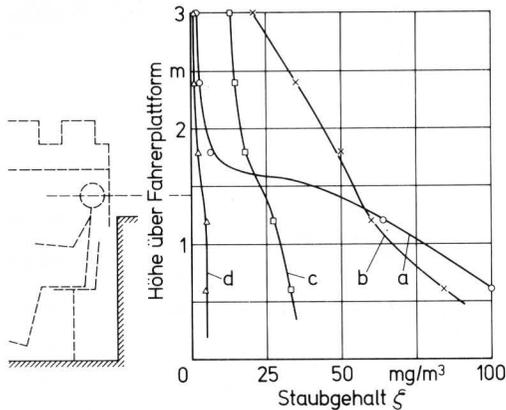
**Bild 13.** Einfluß der Neigung der Frontscheibe um den Winkel  $\beta$  auf den Staubgehalt in der Fahrerhaube  $\zeta_F$ ;  $v_h = 0,5$  m/s,  $b = 0,27$  m. Legende wie bei Bild 11

Eine weitere Frage ist die nach der Behaglichkeit in der Fahrerhaube. Die klimatischen Bedingungen während der Getreideernte (ohne Mais) sind so, daß eine Luftgeschwindigkeit von 0,4 bis 0,6 m/s die Behaglichkeit nicht beeinträchtigt. Günstig wirkt sich die Beschattung aus. Die Lufttemperatur im Atembereich entspricht nach Messungen fast der außerhalb der Haube. (Der Unterschied liegt unter  $0,5$  °C). Insgesamt gesehen bringt die untersuchte Fahrerhaube eine gewisse Verbesserung hinsichtlich der Klimabelastung.

Durch die Verwendung von 2 Gebläsen läßt sich die Drehzahl und damit die Geräuschbelastung so senken, daß sie unter 62 dB(A) liegt.

Anzusprechen ist noch der Ort der Frischluftentnahme. Hierzu wurde wiederholt die Verteilung des Staubgehaltes am Fahrerplatz insbesondere in Abhängigkeit von der Höhe über der Plattform untersucht.

Es ergibt sich, daß das Staubfeld bei relativen Windgeschwindigkeiten  $v_{rw} > 2,5$  m/s die Höhe von etwa 2 m kaum überschreitet, d.h. der Staubgehalt beträgt dort nur einige  $mg/m^3$ . Dabei ist die höhenmäßige Ausdehnung bei Gegenwind stets kleiner als bei Rückenwind. Anders sind die Verhältnisse bei schwachwindigem Wetter, **Bild 14**. Dort ist die Staubverteilung bei einer Umfahrt dargestellt. Bei  $v_{rw} < 1$  m/s nimmt der Staubgehalt  $\zeta$  mit der Höhe vergleichsweise wenig ab, so daß Frischluft mit genügend geringem Staubgehalt nicht zur Verfügung steht.



**Bild 14.** Staubgehalt  $\zeta$  in unterschiedlicher Höhe über der Fahrerplattform (ohne Haube, ohne Kabine).

- |   |                                      |                          |                                  |
|---|--------------------------------------|--------------------------|----------------------------------|
| a | $\alpha = 50^\circ \pm 30^\circ$ ,   | $v_{rw} \approx 1,3$ m/s | } Weizen, $E_{ges}$ etwa 30 kg/h |
| b | $\alpha = 180^\circ \pm 100^\circ$ , | $v_{rw} = 0-0,5$ m/s     |                                  |
| c | $\alpha = 100^\circ \pm 100^\circ$ , | $v_{rw} = 0-0,5$ m/s     |                                  |
| d | $\alpha = 270^\circ \pm 20^\circ$ ,  | $v_{rw} = 1-1,5$ m/s     |                                  |

Grundsätzlich ist zu folgern, daß die Frischluft genügend oberhalb des Mährescherkörpers zu entnehmen ist. Mit Rücksicht auf ungünstige Bedingungen sollte eine Fahrerhaube aber stets mit einem Filter ausgerüstet sein.

Vorstehende Hinweise betreffen auch die Anordnung des Fahrerplatzes am geeigneten Ort als Maßnahme der Staubbeminderung, wenn weitere Einrichtungen zur Staubbekämpfung nicht vorgesehen sind, beispielsweise bei kleinen Mähreschern. Durch Höherlegen um 80 cm läßt sich nach den Bedingungen entsprechend **Bild 14** die Staubbelastung bei einer Umfahrt von  $\zeta_F = 35$   $mg/m^3$  auf  $\zeta_F = 15$   $mg/m^3$  senken. In Bezug auf den Mährescherkörper sollte der Atembereich bzw. die Frischluftentnahme stets oberhalb der Umrißlinie liegen.

Es stellt sich noch die Frage nach den Kosten. Diese lassen sich aus unserer Sicht nur schätzen. Je nach Ausführung der Fahrerhaube ist mit einem Vertriebspreis von etwa 1 000,- bis 2 000,- DM zu rechnen.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß die Fahrerhaube in entsprechender Gestaltung einen hinreichenden Staubschutz bietet und auch für kleine und mittlere Mährescher kostenmäßig zu vertreten ist. Sie erfordert keine Konstruktionsänderungen am Mährescher. Eine Nachrüstung bereitet keine Schwierigkeiten.

Wegen dieser Erkenntnisse werden die Versuche an der Fahrerhaube fortgesetzt. Um alle Einflußfaktoren ermitteln zu können, empfehlen sich nicht nur Feldversuche, sondern auch solche in einem Staubkanal und in dem Belastungssimulator, über den das Institut gemeinsam mit dem Institut für Betriebstechnik verfügt.

Noch eine Anmerkung zu der gewählten Konstruktion: Das Verhindern einer Beladung der staubfreien Luft in der Fahrerhaube durch Luftvorhänge erscheint bestehend. Jedoch ist die

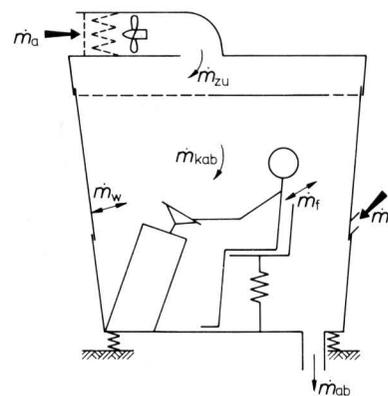
Wirkung solcher Luftvorhänge, d.h. die Reichweite, recht gering. Nach unseren Messungen wird die Geschwindigkeit schnell abgebaut. Insbesondere aber unterstützen Luftvorhänge Rückströmungen in der Haube. So werden zwischen Luftvorhang und Körper Wirbel erzeugt, die Staub in den Atembereich einziehen. Aus diesem Grunde haben wir durchsichtigen Wänden in Form von Scheiben mit dazwischenliegender Kolbenströmung als Schutz gegen eine Beladung den Vorzug gegeben.

## 5. Staubtechnische Gesichtspunkte bei der Konstruktion von Fahrererkabine

Den sichersten Staubschutz kann, wie schon nachgewiesen, die Fahrererkabine bieten. Hinweise zur staubtechnischen Gestaltung lassen sich aus den Staubströmen und den sie beeinflussenden Wirkungen ableiten, **Bild 15**.

Nach dem Satz von der Erhaltung der Masse gilt:

$$\dot{m}_{zu} - \dot{m}_{kab} - \dot{m}_w - \dot{m}_f + \dot{m}_l - \dot{m}_{ab} = 0 \quad (1).$$



**Bild 15.** Staubströme bei Fahrererkabine.

Bezeichnungen der Staubströme

- |                 |                     |                |                        |
|-----------------|---------------------|----------------|------------------------|
| $\dot{m}_a$     | zum Filter          | $\dot{m}_l$    | durch Lecköffnungen    |
| $\dot{m}_{ab}$  | in der Abluft       | $\dot{m}_w$    | von oder zu den Wänden |
| $\dot{m}_f$     | von oder zum Fahrer | $\dot{m}_{zu}$ | durch das Filter       |
| $\dot{m}_{kab}$ | durch die Kabine    |                |                        |

Für die Kennzeichnung der entsprechenden Luftströme  $\dot{V}$  und Staubgehalte  $\zeta$  werden die gleichen Indizes verwendet

Mit der Annahme einer gleichmäßigen Staubverteilung in der Kabine, d.h.  $\zeta_{kab} = \zeta_F$  (die nachfolgenden Gleichungen beinhalten gewisse weitere Vereinfachungen) und mit

$$\begin{aligned} \dot{m}_{zu} &= \dot{m}_a (1 - \eta_G); \quad \dot{m}_a = \dot{V}_{zu} \zeta_a; \quad \dot{m}_l = \dot{V}_l \zeta_l; \\ \dot{m}_{ab} &= (\dot{V}_{zu} + \dot{V}_l) \zeta_{kab}; \quad \dot{m}_{kab} = \frac{d \zeta_{kab}}{dt} V_{kab}; \\ \dot{m}_w &= c_1 \zeta_{kab}; \quad \dot{m}_f = c_2 \zeta_{kab} \end{aligned}$$

wird

$$\frac{d \zeta_{kab}}{dt} = \frac{1}{V_{kab}} \left[ \dot{V}_{zu} \zeta_a (1 - \eta_G) + \zeta_l \dot{V}_l - \zeta_{kab} (\dot{V}_{ab} + c_1 + c_2) \right] \quad (2).$$

Dies ist eine Gleichung vom Typ

$$\dot{\zeta} = a - b \zeta \quad (3),$$

d.h. die Konzentration  $\zeta_{kab}$  nähert sich in Form einer e-Funktion dem Grenzwert  $\zeta_{kab} = a/b$  mit der Einschwingkonstanten  $\tau = 1/b$ .

Danach beträgt der sich in der Kabine nach entsprechender Zeit einstellende Staubgehalt  $\zeta_F = \zeta_{kab}$ :

$$\zeta_F = \frac{\dot{V}_{zu} \zeta_a (1 - \eta_G) + \zeta_1 \dot{V}_1}{\dot{V}_{ab} + c_1 + c_2} \quad (4)$$

und die Einschwingkonstante

$$\tau = \frac{V_{kab}}{\dot{V}_{ab} + c_1 + c_2} \quad (5)$$

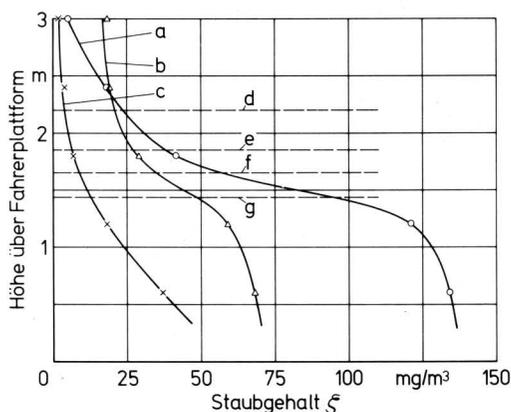
Mit diesen Gleichungen sind unter Beachtung der getroffenen Annahmen die wichtigsten Hinweise für die staubtechnische Gestaltung gegeben. Die in solche Überlegungen einzubeziehenden Bedingungen neben der Kabine zeigt **Bild 16**.

Betrachtet man zunächst nur den Frischluftstrom unter der Annahme, daß  $\dot{V}_{zu} = 300 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\zeta_a = 50 \text{ mg/m}^3$  betrage und ein Staubgehalt  $\zeta_F = 2 \text{ mg/m}^3$  angestrebt wird, dann muß der Gütegrad des Filters  $\eta_G = 96 \%$  erreichen. Nimmt man weiter einen Leckstrom von  $\dot{V}_1 = 6 \text{ m}^3/\text{h}$  mit dem Wert  $\zeta_1 = 100 \text{ mg/m}^3$  an, dann verdoppelt sich bereits der Staubgehalt  $\zeta_F$ , d.h. der Leckstrom kann einen bedeutenden Einfluß haben.

Prüft man die in Tafel 2 dargestellten Meßwerte durch Vergleich von  $\zeta_a$  und  $\zeta_F \hat{=} \zeta_{kab}$ , so wird diese Aussage qualitativ dadurch bestätigt, daß bei sehr kleinen  $\zeta_a$ -Werten  $\zeta_{kab}$  höher liegen kann. Dies ist nur über den Staubstrom durch die Lecköffnungen  $\dot{m}_1$  möglich.

Aufgrund der Tatsache, daß sich die Lecköffnungen vor allem in der Bodenplatte befinden und der Staubstrom  $\dot{m}_{zu}$  von oben in die Kabine eintritt, ist die Annahme einer gleichmäßigen Staubverteilung nur eine Näherung. Dies ergeben auch die Messungen. Die Unterschiede nehmen jedoch mit dem Luftdurchsatz ab und bei etwa  $300 \text{ m}^3/\text{h}$  liegen sie bereits im Bereich der Meßgenauigkeit.

Nach den theoretischen Grundlagen und den Meßergebnissen bestimmen im wesentlichen der Gütegrad des Filters, der Luftdurchsatz und Umfang, Struktur und Ort der Lecköffnungen die Staubschutzwirkung einer Fahrerkabine.



**Bild 16.** Staubgehalt  $\zeta$  neben der Kabine, gemessen in verschiedenen Höhen über der Fahrerplattform beim Mähdreschen an verschiedenen Tagen, Weizen.

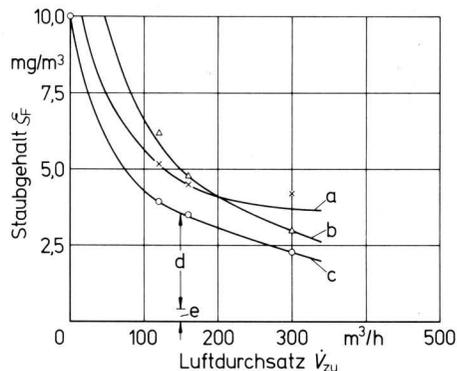
- a  $E_{ges} \approx 60 \text{ kg/h}$ ;  $v_{rw} = 1,3-2,5 \text{ m/s}$
- b  $E_{ges} \approx 58 \text{ kg/h}$ ;  $v_{rw} = 1,5-3,2 \text{ m/s}$
- c  $E_{ges} \approx 54 \text{ kg/h}$ ;  $v_{rw} = 2,9-4 \text{ m/s}$
- d Höhe der Frischluftentnahme Haube
- e Höhe der Frischluftentnahme Kabine
- f Atembereich stehend
- g Atembereich sitzend

Wie sich der Durchsatz  $\dot{V}_{zu}$  und indirekt die Lecköffnungen auf den Staubgehalt auswirken, zeigt **Bild 17**. Ferner ist für einen Betriebszustand der Anteil durch die Lecköffnungen und der durch

den Filterdurchlaß angegeben. Es zeigt sich, daß der Staubgehalt im wesentlichen vom Leckstrom herrührt. Bei einem guten Filter läßt sich der Staubgehalt nur noch über den Frischluftdurchsatz und insbesondere über die Dichtheit der Kabine nennenswert senken.

Da man mit einer Fahrerkabine hinsichtlich des Staubschutzes Werte genügend weit unterhalb möglicher MAK-Werte erreichen kann, ist es zulässig, mit Richtwerten für die Prüfung zu arbeiten:

Werden Fahrerkabine so ausgeführt, daß die Filter für den Staub in der Frischluft einen Abscheidegrad von etwa 97 % erreichen\*, dies sind handelsübliche Filter der Güteklasse C\*\*) [6], und sind die Lecköffnungen so begrenzt, daß bei eingeschalteter Belüftung der Überdruck nicht unter etwa 20 bis 50 Pa sinkt, lassen sich Staubgehalte unter  $3 \text{ mg/m}^3$  als Dauerbelastung mit Sicherheit für alle äußeren Bedingungen einhalten.



**Bild 17.** Staubgehalt in der Fahrerkabine  $\zeta_F$  in Abhängigkeit vom Frischluftstrom  $\dot{V}_{zu}$  und verschiedenen Bedingungen (Mittelwerte), Weizen.

- a  $\zeta_a = 10 \text{ mg/m}^3$ ;  $v_{rw} = 2,3 \text{ m/s}$ ;  $\alpha = 140^\circ$  und  $340^\circ$
- b  $\zeta_a = 20 \text{ mg/m}^3$ ;  $v_{rw} = 2,6 \text{ m/s}$ ;  $\alpha = 20-60^\circ$  und  $280-320^\circ$
- c  $\zeta_a = 3 \text{ mg/m}^3$ ;  $v_{rw} = 4,3 \text{ m/s}$ ;  $\alpha = 80-100^\circ$  und  $300-320^\circ$
- d Anteil Staubstrom  $\dot{m}_1$
- e Anteil Staubstrom  $\dot{m}_{zu}$

Noch einige allgemeine Hinweise:

Der Entnahmeort für die Frischluft ist, wie bei der Haube mit **Bild 14** erörtert, möglichst hoch, also in das Dach zu legen. Die Frage, ob man ihn seitlich, hinten oder vorne anordnen sollte, ist beim Mähdrescher als nicht so gewichtig anzusehen, weil das Kabinenvolumen im Vergleich zu dem der Maschine klein ist.

Lecköffnungen am Frischluftfilter können die Staubschutzwirkung beachtlich gefährden. Da die Dichtheit nicht einfach zu prüfen ist, sollte die notwendige Sicherheit durch die konstruktive Ausbildung gegeben sein.

Die Frischluftmenge sollte nicht unter  $200 \text{ m}^3/\text{h}$  liegen und die Luftzufuhr sollte eingeschaltet sein, wenn die Kabine besetzt ist.

Um auch größere Luftdurchsätze ermöglichen zu können, sind entsprechend ausgebildete Abluftöffnungen erforderlich.

Für die Korrektur der Meßwerte bei Einsatz von Filtergeräten in Kabinen liefert Gleichung (1) die Grundlagen. Es ist dann noch der Staubstrom  $\dot{m}_m$  in das Meßgerät als weiterer Massenstrom in die Gleichung einzuführen.

\*) Bei den Versuchen wurden zick-zack gefaltete Papierfilter C22117 der Fa. MANN und AG 55/1 der Fa. Knecht verwendet.

\*\*) Die Prüfvorschriften werden derzeit auf ASHRAE umgestellt [6].

## 6. Zusammenfassung

Die Folgerungen aus früheren Arbeiten wurden bestätigt, d.h. für den Mährescher sind als integrierte Staubschutzmaßnahmen nur die Fahrerkabine und die Fahrerhaube zu empfehlen. Schutzmaßnahmen, die nur bei bestimmten äußeren Bedingungen hinreichend wirksam sind, kann man nicht als solche ansprechen.

### 6.1 Staubgehalt am Fahrerplatz und Emissionsströme

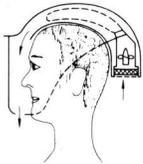
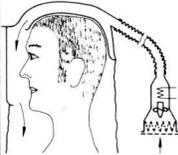
Bei sonst gleichen Bedingungen ist die Staubkonzentration am Fahrerplatz direkt proportional dem aus dem Mährescher austretenden Staubemissionsstrom. Die Steigung der sich in einem entsprechenden Diagramm ergebenden Geraden ist abhängig vom Windeinfallswinkel  $\alpha$ , der rel. Windgeschwindigkeit  $v_{rw}$ , der Böigkeit, den Staubeigenschaften und den konstruktionsbedingten Parametern, die die Staubausbreitung beeinflussen, also den Staubbekämpfungsmaßnahmen. Durch dieses Ergebnis sind in Verbindung mit schon früher mitgeteilten Zusammenhängen [3] weiter-

gehende Unterlagen für die Beurteilung und Entwicklung von Staubbekämpfungsmaßnahmen vorhanden.

### 6.2 Bewertung der Maßnahmen zur Staubbekämpfung

Da die austretende Staubmenge bei Mähreschern mit der Schnittbreite ansteigt, nimmt der notwendige Aufwand für die Staubbekämpfung mit der Größe des Mähreschers entsprechend zu. Die Baugröße ist daher bei der Bewertung von Maßnahmen der Staubbekämpfung mit zu berücksichtigen.

Den sichersten Staubschutz gewährt die dichte Fahrerkabine mit Entstauber und Kühlanlage. Sie wird sich auch im Hinblick auf weitere Anforderungen an den Arbeitsplatz für mittelgroße und große Mährescher durchsetzen. Fahrerkabinen sind mit Entstaubern etwa der Güteklasse C auszurüsten. Der Überdruck sollte bei normaler Belüftung etwa 20 bis 50 Pa betragen. Unter solchen Prüfbedingungen sind Staubgehalte unter  $3 \text{ mg/m}^3$  sicherzustellen, so daß die einzuhaltende Staubbelastungsgrenze wesentlich unterschritten wird.

Gerätebenennung	Atemschutzmaske				Atemschutzhelm				Atemschutzhaube			
Schema												
untersuchter Arbeitsplatz	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	K		S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	K		S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	K	
Staubgehalt neben dem Kopf $\zeta_a$ [ $\text{mg/m}^3$ ]	17	66	73	153	18	52	50	160	17	73	60	120
Staubgehalt in Atemluft $\zeta_F$ [ $\text{mg/m}^3$ ]	0,4	0,5	0,8	1,1	0,6	0,5	0,5	0,8	0,7	0,9	0,5	0,6
Vorteile	preiswert				kein zusätzlicher Atemwiderstand				kein zusätzlicher Atemwiderstand kein Dichtrand am Gesicht			
Nachteile	zusätzlicher Atemwiderstand Abdichtung eng am Gesicht anliegend				Abdichtungslippen im Wangenbereich Gewicht 900 g				Luftschlauch zum ortsfesten oder vom Körper getragenen Gebläse mit Filter			
Behinderung	stark				mittel				mittel			
Schutzstufe bei Staub	2a, 2b				2a (2b)				—			
vom Kopf zu tragende Masse [g]	700				900				400			
Preis [DM]	120,—				600,—				Versuchsmodell			

#### Zeichenerklärung und Hinweise

- S<sub>1</sub> Fahrerplatz Schlepper, Bodenbearbeitung, mittelfeuchter Boden, rel. Windgeschw.  $v_{rw} = 1-6 \text{ m/s}$ , Dauerbelastung  
 S<sub>2</sub> Fahrerplatz Schlepper, Bodenbearbeitung, trockener Boden, rel. Windgeschw.  $v_{rw} = 2-7 \text{ m/s}$ , Dauerbelastung  
 K Fahrerplatz in einer Staubkammer, Mährescherstaub vom Mähwerk, Gerste, Teilchengrößenverteilung [3]

Zum Messen von  $\zeta_F$  wurde ein Luftstrom von 50 l/min durch den Mund eines Modells abgesaugt. Das Filter von 45 mm  $\phi$  ist gleichzeitig Eintrittsöffnung. Bei den  $\zeta_F$ -Werten kann der Fehler wegen der Wägegenauigkeit einen Betrag bis etwa  $0,3 \text{ mg/m}^3$  erreichen. Dies ist für die anstehende Frage zu vertreten.

Untersucht wurde der Atemschutzhelm der Fa. Racal-Amplivox, Vertrieb: Fa. Voss, Braunschweig-Wenden. Diese Einrichtung ist gekennzeichnet durch eine interne Frischluftbehandlung (Staubabscheidung). Luftdurchsatz und Lufttemperatur lassen sich nicht verändern.

Bei der Atemschutzhaube ist wegen der externen Frischluftbehandlung zusätzlich eine Veränderung des Luftdurchsatzes sowie eine Beheizung und Kühlung der Luft möglich. Dem Versuchsmodell vergleichbare Bauarten werden angeboten von Fa. Auer, Berlin, Fa. 3M, Neuss, und Fa. Sundström, Stockholm.

Tafel 3. Einige Ergebnisse zur Wirkung von Atemschutzgeräten (persönlicher Staubschutz) im praktischen und praxisnahen Einsatz.

Die Fahrerhaube in entsprechender Gestaltung kann ebenfalls für alle Mährescher einen ausreichenden Staubschutz bieten. Die Kosten liegen je nach Ausführung im Bereich um 1000,- DM. Einfache Prüfkriterien, wie bei der Fahrerhaube, sind nicht zu erwarten, weil auch Einflüsse von der jeweiligen Maschine zu beachten sind. Lufttemperatur und -feuchtigkeit bleiben gegenüber der Umgebung unverändert. Günstig wirkt sich die Beschattung aus.

Das Absaugen des Staubes an den Quellen ist recht aufwendig und beinhaltet Probleme der Behandlung des abgeschiedenen Staubes. Diese Lösung scheidet derzeit und auch auf Sicht wegen der genannten Gründe aus. Das Absaugen nur einer Quelle befriedigt nicht hinsichtlich der Staubbekämpfung.

Ist keine Einrichtung zur Staubbekämpfung am Mährescher vorgesehen, sollte man den Fahrerplatz in Bezug auf die Kontur möglichst hoch legen, Bild 14 und 16.

Neben dem maschinenintegrierten ist noch der persönliche Staubschutz [7, 8] zu beachten, über dessen Wirksamkeit Tafel 3 Auskunft gibt [9]. Hinzuweisen ist dabei auf den in diesem Jahr auf dem Markt angebotenen Atemschutzhelm. Es wird ein ausgezeichneter Staubschutz (auch bei allergenem Staub ausreichend) bei nur mittlerer Behinderung und ohne Einschränkung der Bewegungsfreiheit erreicht.

Da die Aussagen zum maschinenintegrierten Staubschutz in Abhängigkeit vom Staubemissionsstrom erfolgen, ist die Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf andere Bauarten und Baugrößen qualitativ ohne Einschränkung gesichert. Bei quantitativen Erörterungen sind die geometrischen Bedingungen, insbesondere die Lage des Fahrerplatzes zu den Quellen, zu berücksichtigen.

Die vorgestellten Ergebnisse gelten sinngemäß auch für andere Arbeitsmaschinen mit Eigenantrieb und für Schlepper [9].

#### Verwendete Formelzeichen

a	m	Abstand des Atembereichs in einer Fahrerhaube von der Haubendecke, s. Bild 10
b	m	Überdeckung des Atembereichs durch die Scheiben bei einer Fahrerhaube, s. Bild 10
s	m	Schnittbreite
$v_h$	m/s	Vertikale Luftgeschwindigkeit in der Fahrerhaube
$v_{rw}$	m/s	Geschwindigkeit der Windströmung bezogen auf das Fahrzeug = relative Windgeschwindigkeit
E	kg/h	Staubemissionsstrom
$E_{ges}$	kg/h	Gesamt-Emissionsstrom, $E_{ges} = E_M + E_S$
$E_S$	kg/h	Emissionsstrom am Stroh- und Spreuaustritt (hintere Quelle)
$E_M$	kg/h	Emissionsstrom am Mähtisch (vordere Quelle)
h	m	Höhe der Scheiben bei einer Fahrerhaube, s. Bild 10
$\dot{m}_a$	kg/h	Staubstrom zum Filter von Fahrerhaube oder Kabine
$\dot{m}_{ab}$	kg/h	Staubstrom mit der Abluft
$\dot{m}_f$	kg/h	Staubstrom von oder zum Fahrer
$\dot{m}_{kab}$	kg/h	Staubstrom durch die Kabine
$\dot{m}_l$	kg/h	Staubstrom durch die Lecköffnungen

$\dot{m}_u$	kg/h	Aus der Umgebung gegen die offene Seite der Fahrerhaube strömende Staubmenge
$\dot{m}_w$	kg/h	Staubstrom von oder zu den Wänden
$\dot{m}_{zu}$	kg/h	Staubstrom durch das Filter
V	m <sup>3</sup>	Volumen
$\dot{V}$	m <sup>3</sup> /h	Luftstrom, Indizes den zugehörigen Staubströmen entsprechend
$\alpha$	°	Windeinfallswinkel, gemessen im Uhrzeigersinn (0° bis 360°) zur Fahrtrichtung des Mähreschers
$\beta$	°	Neigungswinkel der vorderen Scheibe bei einer Fahrerhaube gegenüber senkrecht
$\zeta$	mg/m <sup>3</sup>	Staubgehalt, auf Normzustand des Gases (0 °C, 1,013 bar) bezogen, Indizes, soweit nicht hier aufgeführt, wie bei den entsprechenden Staubströmen
$\zeta_F$	mg/m <sup>3</sup>	Staubgehalt im Atembereich am Fahrerplatz
$\zeta_{FD}$	mg/m <sup>3</sup>	Staubgehalt im Atembereich am Fahrerplatz, aus Fahrten bei $\alpha = 0^\circ$ und $\alpha = 180^\circ$ errechnete Dauerbelastung
$\eta_G$	%	Gütegrad des Entstaubers

#### Schrifttum

- [ 1 ] Batel, W.: Messungen zur Staub-, Lärm- und Geruchsbelastung an Arbeitsplätzen in der landwirtschaftlichen Produktion und Wege zur Entlastung — Erster Bericht. Grundl. Landtechnik Bd. 25 (1975) Nr. 2, S. 135/57.
- [ 2 ] Batel, W.: Staubbekämpfung am Arbeitsplatz auf fahrenden Arbeitsmaschinen. Grundl. Landtechnik Bd. 26 (1976) Nr. 2, S. 50/55.
- [ 3 ] Batel, W.: Staubemission, Staubimmission und Staubbekämpfung beim Mährescher. Grundl. Landtechnik Bd. 26 (1976) Nr. 6, S. 205/15.
- [ 4 ] Weinmann, W. u. H.-P. Thomas: Arbeitsstoffverordnung. Verordnung über gefährliche Arbeitsstoffe; Textausgabe mit Erläuterungen. Teil 1 und 2 Köln: Carl Heymanns 1975 bzw. 1976.
- [ 5 ] Batel, W.: Methoden und Geräte zur Bestimmung des Staubgehaltes. Grundl. Landtechnik Bd. 26 (1976) Nr. 5, S. 178/87.
- [ 6 ] Mürmann, H.: Prüfverfahren für Luftfilter. wasser, luft und betrieb 19 (1975) Nr. 1, S. 9/14.
- [ 7 ] Fahrbach, J.: Neue Regelungen im Atemschutz und ihre Folgen für Herstellung, Prüfung und Einsatz von Atemschutzgeräten sowie für die Vorsorgeuntersuchungen der Gerätebenutzer. Staub-Reinhalt. Luft Bd. 37 (1977) Nr. 10, S. 361/68.
- [ 8 ] Riediger, G. u. W. Coenen: Der Atemschutzhelm, eine persönliche Schutzausrüstung, die den Kopfschutz und den Atemschutz in sich vereinigt. Staub-Reinhalt. Luft Bd. 37 (1977) Nr. 10, S. 378/82.
- [ 9 ] Batel, W.: Staubbekämpfung für den Arbeitsplatz auf fahrenden Arbeitsmaschinen. Vortrag auf der VDI-Jahrestagung Landtechnik 3./4. Nov. 1977 in Braunschweig (erscheint demnächst in dieser Zeitschrift).