

# Grundlagen der Landtechnik

Herausgegeben mit Unterstützung durch die  
Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft  
Braunschweig-Völkenrode (FAL)

Schriftleitung: Dr. F. Schoedder, Institut  
für landtechnische Grundlagenforschung

Grundl. Landtechnik Bd. 40 (1990) Nr. 2, S. 41 bis 68

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE

## Beurteilung der Leistung der Trennprozesse im Mähdrescher mit Hilfe gemessener Stoffeigenschaften

Von Thomas Beck, Stuttgart-Hohenheim\*)

DK 631.354.2.004.17:633.004.12

Die bei Mähdrescherprüfungen gemessene Leistung kann wegen des starken Einflusses von Stoffeigenschaften nur mit großen Unsicherheiten für eine vergleichende Beurteilung herangezogen werden. Die Objektivierung der Meßergebnisse durch gleichzeitigen Einsatz eines Vergleichsmähdreschers ist mit hohem Aufwand verbunden. Daher wäre es eine grundsätzliche Verbesserung des Prüfverfahrens, wenn parallel zur Leistungsermittlung des Mähdreschers die Stoffeigenschaften gemessen werden könnten, die den Trennprozeß im Mähdrescher maßgeblich bestimmen. Als solche Stoffeigenschaften werden das Fluidisierungsverhalten des Überganges der Reinigungsanlage und die Durchdringungszeit von Körnern durch eine schwingende Strohschicht vom Übergang des Schüttlers untersucht. Die hierzu entwickelten Prüfstände werden vorgestellt und erste Ergebnisse mitgeteilt.

### Inhalt

1. Einleitung
2. Aufgabenstellung
3. Lösungsansatz
  - 3.1 Fluidisierungsverhalten
  - 3.2 Durchdringungszeit

Erweiterte Fassung eines Vortrages auf der 47. Internationalen Tagung Landtechnik  
26./27. Okt. 1989 in Köln.

Frau Brigitte Schuch (LTA) sei an dieser Stelle für die Mitarbeit während der Versuche und für die sorgfältige Ausführung der graphischen Darstellungen, der DFG für die Finanzierung des Forschungsvorhabens gedankt.

\*) Dipl.-Ing. T. Beck ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Grundlagen der Landtechnik (Leiter: Prof. Dr.-Ing. H.D. Kutzbach) des Instituts für Agrartechnik an der Universität Hohenheim.

4. Versuchsaufbau und -durchführung
  - 4.1 Fluidisierungs-Prüfstand
  - 4.2 Durchdringungszeit-Prüfstand
  - 4.3 Mobiles Labor
  - 4.4 Aufnahme der Durchsatz/Verlust-Kennlinien
5. Versuchsergebnisse
  - 5.1 Fluidisierungsverhalten und Reinigungsleistung
  - 5.2 Durchdringungszeit und Schüttlerleistung
6. Zusammenfassung

### 1. Einleitung

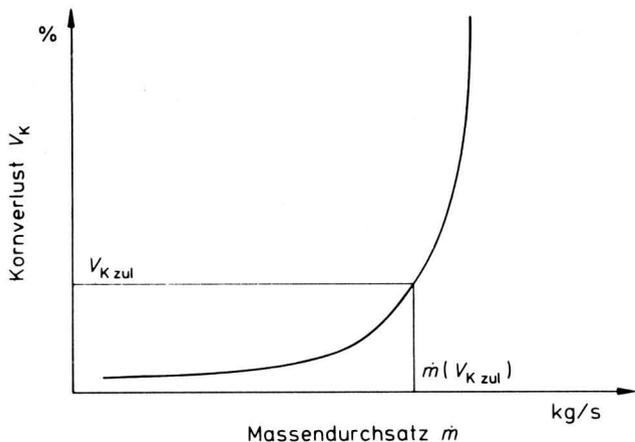
Außer der grundlegenden Funktion des Sammelns führt der Mähdrescher während der Getreideernte auch eine umfangreiche Aufbereitung des Erntegutes durch. Dem eigentlichen Dreschprozeß sind dazu zwei Trennprozesse zur Korn/Stroh- und Korn/Spreu-Trennung nachgeschaltet. Der Dreschprozeß bestimmt zwar die Zusammensetzung des zu den Trennprozessen gelangenden Gutstromes, entscheidend für die Beurteilung des Mähdreschers ist jedoch das Verlustverhalten der Trennprozesse [1].

Ein unzulässiges Ansteigen der Kornverluste in den Trennprozessen begrenzt die Leistung der Gesamtmaschine. Der Kornverlust ist dabei eine Funktion des Massendurchsatzes, die als Kennlinie dargestellt werden kann, **Bild 1**. Der Schnittpunkt dieser Kennlinie mit einem bestimmten Verlustniveau ( $V_{Kzul}$ ) legt einen Massendurchsatz fest, der als Leistung des Trennprozesses bezeichnet wird. Der Begriff Leistung wird in bezug auf die Trennprozesse im Mähdrescher mit dieser und nicht mit seiner physikalischen Definition verwendet.

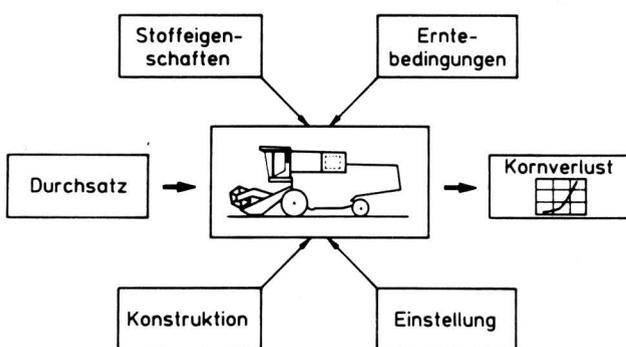
Parameter der Durchsatz/Verlust-Kennlinie sind die konstruktive Gestaltung und die Einstellung der Maschine, aber auch die Stoffeigenschaften des Erntegutes und die Erntebedingungen, **Bild 2**.

Die beiden letztgenannten Parameter haben einen erheblichen Einfluß auf den Verlauf der Durchsatz/Verlust-Kennlinie und damit auch auf die daraus bestimmte Leistung. Für dieselbe Maschine werden deshalb beim Einsatz in verschiedenen Beständen oder Erntejahren deutlich unterschiedliche Leistungen festgestellt.

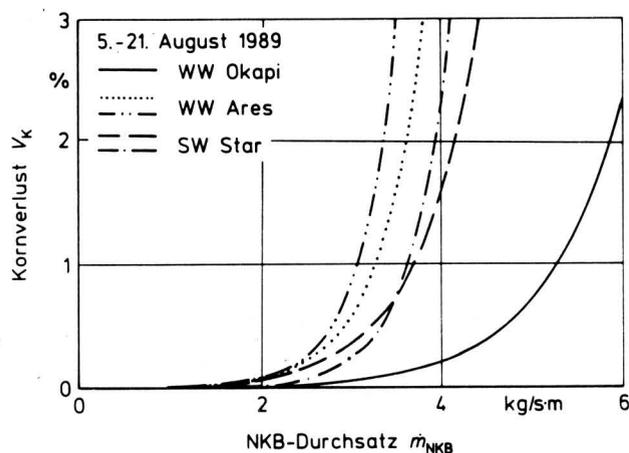
**Bild 3** zeigt die Durchsatz/Verlust-Kennlinien ein und desselben Mähdreschers in verschiedenen Beständen. Aufgetragen sind die Kornverluste der Korn/Stroh-Trennung (Schüttler) über dem Massendurchsatz an Nicht-Korn-Bestandteilen.



**Bild 1.** Durchsatz/Verlust-Kennlinie und Leistung  $\dot{m}(V_{Kzul})$  der Trennprozesse im Mähdrescher.



**Bild 2.** Parameter der Durchsatz/Verlust-Kennlinie der Trennprozesse im Mähdrescher.



**Bild 3.** Kornverlust in Abhängigkeit vom Durchsatz an Nicht-Korn-Bestandteilen (Durchsatz/Verlust-Kennlinien) desselben Mähdreschers in verschiedenen Beständen.

Da am Mähdrescher keine Veränderungen vorgenommen wurden, muß der unterschiedliche Verlauf der Kennlinien auf veränderte Stoffeigenschaften und Erntebedingungen zurückzuführen sein. Beide Parameter sind bei Leistungsmessungen im Feldversuch grundsätzlich nicht reproduzierbar. Ein quantitativer Vergleich von Leistungen ist deshalb nur möglich, wenn die Durchsatz/Verlust-Kennlinien der zu vergleichenden Maschinen gleichzeitig in demselben Bestand ermittelt werden.

Dies ist in der Praxis nur selten möglich. Die einzige bisher mögliche Methode, um unter verschiedenen Bedingungen gemessene Leistungen vergleichen zu können, ist der gleichzeitige Einsatz desselben Vergleichsmähdreschers bei allen Mähdrescherprüfungen, deren Ergebnisse verglichen werden sollen.

Da die Leistung des Prüfmähdreschers dann relativ zur Leistung des Vergleichsmähdreschers angegeben werden kann, werden auch die Leistungen verschiedener Prüfmähdrescher untereinander vergleichbar. Dieses Verfahren erhöht jedoch den ohnehin großen Aufwand für eine Mähdrescherprüfung erheblich. Zur Zeit werden deshalb weltweit nur bei zwei Maschinenprüfstellen systematisch Vergleichsmähdrescher eingesetzt [2,3].

Dieselben Schwierigkeiten ergeben sich für die Mähdrescherhersteller bei der Beurteilung von Auswirkungen konstruktiver Änderungen. Eine grundsätzliche Verbesserung und Vereinfachung des Prüfverfahrens kann erreicht werden, wenn es gelingt, den Einfluß der Parameter Stoffeigenschaften und Erntebedingungen auf das Verlustverhalten der Trennprozesse zu bestimmen.

Wegen der Komplexität des Problems und wegen der aufwendigen Versuchstechnik wurden bisher nur wenige Untersuchungen durchgeführt, die sich mit dem Einfluß der Stoffeigenschaften auf die Leistung der Trennprozesse im Mähdrescher beschäftigen. Die wesentlichen bisher gewonnenen Erkenntnisse sind in drei englischsprachigen Veröffentlichungen [4, 5, 6] enthalten. Auswirkungen einzelner Stoffeigenschaften auf das Betriebsverhalten der Trennprozesse wurden von Wacker [7] sowie von Böttinger u. Kutzbach [8] dargestellt.

## 2. Aufgabenstellung

Zunächst muß geklärt werden, welche Stoffeigenschaften und Erntebedingungen überhaupt einen Einfluß auf den Verlauf der Durchsatz/Verlust-Kennlinie der Trennprozesse haben. Dann müssen geeignete, möglichst einfache Meßverfahren für solche Stoffeigenschaften und Erntebedingungen gefunden werden.

Um Zusammenhänge zwischen den Stoffeigenschaften und Erntebedingungen und der Leistung der Trennprozesse zu finden, müssen Versuche unter möglichst breit streuenden Bedingungen durchgeführt werden. Zur Ermittlung der Leistung der Trennprozesse sind Feldversuche mit einem Versuchsmähdrescher erforderlich.

Gleichzeitig mit der Aufnahme der Durchsatz/Verlust-Kennlinien des Mähdreschers müssen dabei die Stoffeigenschaften des Erntegutes in unmittelbarer Nähe des Versuchsmähdreschers gemessen werden. Aus den so gewonnenen Daten müssen mit statistischen Methoden Korrelationen und schließlich quantitative Zusammenhänge ermittelt werden.

## 3. Lösungsansatz

Der Begriff Stoffeigenschaft ist nicht eindeutig definiert und umfaßt eine Vielzahl verschiedenster Größen, die sich in ihrem Aussagegehalt und im Aufwand für ihre Ermittlung unterscheiden. Eine Einteilung nach der Komplexität ergibt folgende Gruppen von Stoffeigenschaften:

- einfache physikalische Stoffeigenschaften
- komplexe physikalische Stoffeigenschaften
- technologische Stoffeigenschaften.

Als einfache physikalische Stoffeigenschaften sollen dabei Eigenschaften zusammengefaßt werden, die durch die Messung einer eindeutig definierten physikalischen Größe an einzelnen Stoffteilen bestimmt werden. In diese Gruppe fällt beispielsweise der Haftreibungsbeiwert zwischen einem Einzelkorn und einem Strohhalme.

Eine komplexe physikalische Stoffeigenschaft erhält man durch Messung einer physikalischen Größe an einem Haufwerk. Die eine solche Stoffeigenschaft beschreibende Größe wird also von den Wechselwir-

kungen zwischen einer großen Anzahl einzelner Stoffteilchen bestimmt. Beispiele dafür sind der Böschungswinkel oder auch die Schwebegeschwindigkeitsverteilung eines Haufwerkes.

Die letzte Gruppe bilden die technologischen Stoffeigenschaften. Sie werden aus Prüfverfahren abgeleitet, die die Trennprozesse im Mährescher vereinfacht nachbilden. Die dabei ablaufenden Vorgänge lassen sich nicht mehr mit einer einfachen physikalischen Gleichung beschreiben. Deshalb werden die Parameter der mit solchen Verfahren ermittelten Kurven als Maß für die betreffende Stoffeigenschaft verwendet. Mit diesen Prüfverfahren lassen sich auch sehr komplexe Stoffeigenschaftseinflüsse auf eine Kenngröße abbilden. Sie sind deshalb besonders geeignet, um Leistungsänderungen der Trennprozesse im Mährescher zu beschreiben.

Einige grundsätzliche Gedanken zur Auswahl von geeigneten Stoffeigenschaften sind in Bild 4 dargestellt. Die Komplexität der Stoffeigenschaften nimmt von links nach rechts zu. Im gleichen Maße nimmt auch der Aufwand für die Ermittlung der Stoffeigenschaften zu. Aus diesem Grunde muß langfristig die Interpretation von Leistungsänderungen der Trennprozesse mit Hilfe einfacher physikalischer Stoffeigenschaften angestrebt werden. Dies erfordert aber komplexe Rechen- oder Simulationsmodelle für die Trennprozesse im Mährescher, die zur Zeit noch nicht mit hinreichender Genauigkeit dargestellt werden können.

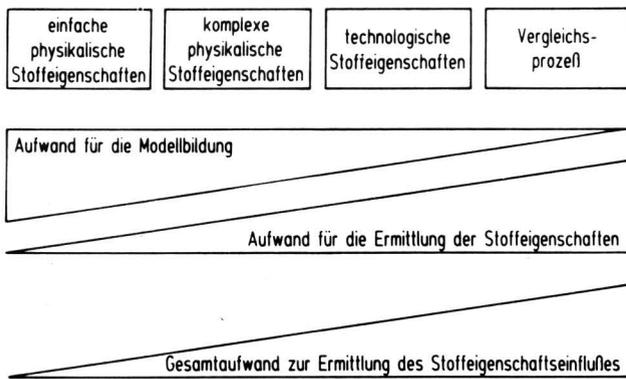


Bild 4. Aufwand bei der Ermittlung des Stoffeigenschaftseinflusses.

Der Aufwand für die Modellbildung nimmt mit zunehmender Komplexität der Stoffeigenschaft ab, bis schließlich beim Vergleichsprozess die jeweiligen Leistungen ohne weitere Rechnung direkt verglichen werden können. Der Gesamtaufwand für die Ermittlung des Stoffeigenschaftseinflusses entspricht jedoch praktisch dem Aufwand für die Ermittlung der Stoffeigenschaften, da bei Anwendung moderner Rechentechniken – unter Voraussetzung der Verfügbarkeit geeigneter Modelle – der Aufwand für die Modellauswertung eine untergeordnete Rolle spielt.

Eine zweite im Bild nicht dargestellte Komponente ist die Aussagesicherheit. Sie nimmt heute mit sinkender Komplexität der Stoffeigenschaften stark ab, so daß beim Einsatz von technologischen Stoffeigenschaften ein Optimum zwischen Aufwand und Aussagesicherheit erreicht wird. Im vorliegenden Beitrag wird deshalb nur auf die Verfahren zur Ermittlung von technologischen Stoffeigenschaften eingegangen. Über weitere im zugrundeliegenden Forschungsprojekt untersuchte Stoffeigenschaften wurde bereits berichtet [9, 10].

### 3.1 Fluidisierungsverhalten

Technologische Stoffeigenschaften zur Beurteilung der Leistung der Reinigungsanlage im Mährescher können aus der Messung des Verhaltens von Schüttungen bei senkrechter Durchströmung mit Luft gewonnen werden. Gemessen wird dazu der Zusammenhang zwischen Luftgeschwindigkeit und Druckabfall in einer Versuchsschüttung.

Bei zunehmender Luftgeschwindigkeit steigt der Druckabfall in der Schüttung zunächst nach einer Potenzfunktion an, bis er von einer für das Versuchsgut typischen Luftgeschwindigkeit an konstant bleibt: Die Potenzfunktion geht in einen waagerechten Ast über. Von diesem Punkt an befindet sich die Schüttung in einem flüssigkeitsähnlichen Wirbelschichtzustand, der als Fluidisierungsphase bezeichnet wird [11, 12]. Dieser Schüttungszustand wird auf dem luftdurchströmten Obersieb der Reinigungsanlage im Mährescher zur Erzielung optimaler Entmischungsverhältnisse angestrebt [13].

Wegen der in der Fluidisierungsphase in der Schüttung ablaufenden Umordnungsvorgänge findet bei wieder abnehmender Luftgeschwindigkeit der Übergang von der Fluidisierungs- in die Schüttungsphase für nicht ideal-homogene Schüttungen bei einer anderen Grenzgeschwindigkeit statt. Die Potenzfunktion der Schüttungsphase hat dann andere Parameter. Dies führt zur Ausbildung einer Hystereseffläche zwischen den Potenzfunktionen für zu- bzw. abnehmende Luftgeschwindigkeiten.

Bild 5 zeigt eine typische Fluidisierungskurve für eine leicht inhomogene Schüttung (z.B. Weizenkörner). Reale Schüttungen neigen zu Kanalbildung [11] und weisen deshalb in der Regel keinen scharfen Übergang von der Schüttungs- in die Fluidisierungsphase auf. Es tritt eine instabile Übergangsphase auf, in der der Druckabfall der Schüttung größer ist als der Fluidisierungsdruckabfall.

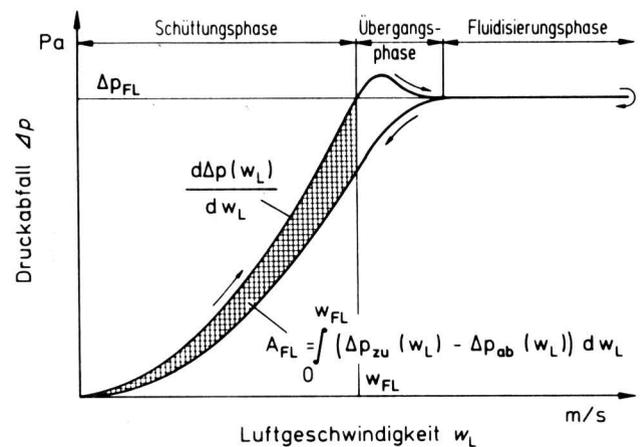


Bild 5. Fluidisierungskurve.

Die Größe des Fluidisierungsabfalles  $\Delta p_{FL}$  wird von der Masse der Versuchsschüttung bestimmt und hängt deshalb praktisch nicht von den Stoffeigenschaften der Schüttung ab. Die Fluidisierungsgeschwindigkeit  $w_{FL}$  (Luftgeschwindigkeit beim Übergang in die Fluidisierungsphase) wird für nicht ideal homogene Schüttungen aus dem Schnittpunkt der verlängerten Linie konstanten Druckabfalles mit der Potenzfunktion für zunehmende Luftgeschwindigkeit bestimmt. Sie hängt von den Stoffeigenschaften der Schüttung ab und eignet sich deshalb für die Verwendung als technologische Stoffeigenschaft.

Dasselbe gilt für die Steigung der Potenzfunktion  $d\Delta p/dw_L$  und für die Größe der Hystereseffläche  $A_{FL}$ . Die Aufnahme der Fluidisierungskurven von Korn, Spreu oder gemischten Korn/Spreu-Schüttungen stellt damit eine Möglichkeit dar, technologische Stoffeigenschaften in meßbare Größen abzubilden. Wird ein normierter Versuchsablauf gewählt, eignen sich diese Meßgrößen zum Vergleich der Stoffeigenschaften.

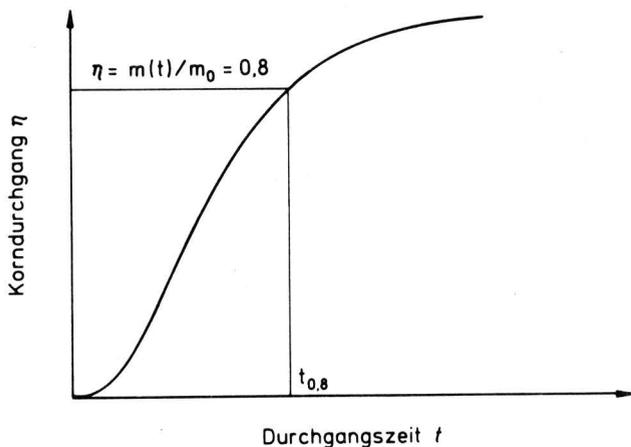
### 3.2 Durchdringungszeit

Zur Beurteilung der Leistung des Schüttlers im Mährescher kann eine technologische Stoffeigenschaft verwendet werden, die aus einem Ent-

mischungsversuch bestimmt wird. Auf eine vertikal schwingende Strohschicht wird eine definierte Kornmasse aufgegeben und anschließend die Summenkurve des Kornmassendurchganges über der Zeit aufgezeichnet. Der Entmischungsversuch wurde von *Baader u. a.* [14] verwendet, um die Zuordnung der mechanischen Parameter Schwingungsamplitude und Schwingungsfrequenz im Hinblick auf den Entmischungsvorgang zu optimieren. Bei den experimentellen Untersuchungen wurde auch ein Einfluß der Stoffeigenschaften des Versuchsgutes festgestellt.

Hält man die mechanischen Parameter des entsprechenden Prüfstandes konstant und normiert die Versuchsbedingungen, so kann aus der ermittelten Summenkurve des Massendurchganges auf eine technologische Stoffeigenschaft geschlossen werden.

**Bild 6** zeigt den prinzipiellen Verlauf einer solchen Summenkurve. Die Kurve genügt einer Exponentialfunktion mit der Asymptote Korndurchgang  $\eta$  gegen eins für Durchgangszeit  $t$  gegen unendlich. Der Korndurchgang  $\eta$  ist dabei das Verhältnis der bereits abgeschiedenen Kornmasse  $m(t)$  zur aufgegebenen Anfangskornmasse  $m_0$ . Die technologische Stoffeigenschaft Durchdringungszeit  $t_{0,8}$  wird als diejenige Zeit definiert, bei der 80 % der aufgegebenen Anfangskornmasse aus dem Strohhauwerk abgeschieden sind. Damit steht eine meßbare Größe zur Beurteilung des Stoffeigenschaftseinflusses auf den Trennprozeß auf dem Schüttler im Mährescher zur Verfügung.



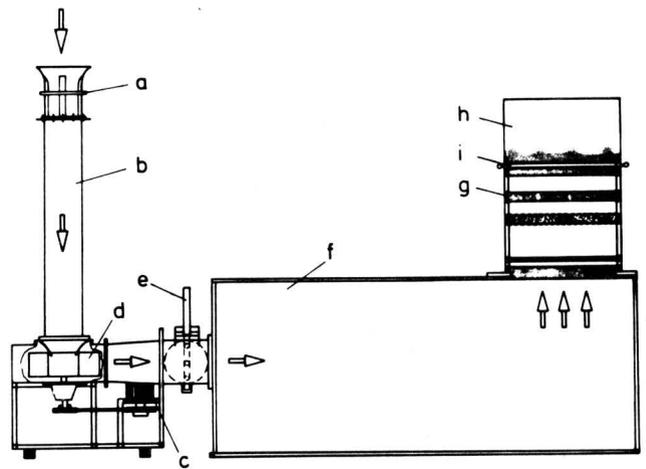
**Bild 6.** Summenkurve des Korndurchganges durch eine vertikal schwingende Strohschicht.

## 4. Versuchsaufbau und -durchführung

### 4.1 Fluidisierungs-Prüfstand

Der zur Aufnahme der Fluidisierungskurve verwendete Prüfstand ist in **Bild 7** dargestellt. Die als Fluid dienende Umgebungsluft wird durch eine Einlaufmeßdüse *a* über ein Ansaugrohr *b* dem vom einem Elektromotor *c* angetriebenen Radialgebläse *d* zugeführt. Über eine zur Einstellung des Volumensstromes dienende Drosselklappe *e* gelangt die Luft in einen großvolumigen Beruhigungsbehälter *f*, von dem aus sie in den Gleichrichterkanal *g* strömt, der eine gleichmäßige Luftgeschwindigkeitsverteilung über dem gesamten Querschnitt des Versuchsgutbehälters *h* gewährleistet.

Die Messung des Druckabfalles  $\Delta p$  in der Schüttung erfolgt über eine Ringleitung *i* in einem freien Querschnitt des Gleichrichterkanals *g* unterhalb des Versuchsgutbehälters *h*. Die aus dem Druckabfall  $\Delta p$  in der Einlaufmeßdüse ermittelte Anströmgeschwindigkeit zum Versuchsgutbehälter kann bei einem Schüttungsdruckabfall von  $\Delta p = 250$  Pa und einer Behälterquerschnittsfläche von  $0,25$  m<sup>2</sup> stufenlos zwischen 0 und 1,5 m/s eingestellt werden. Die Drosselklappe wird dazu durch Vorgabe einer Steuerspannung von einem Stellmotor zwischen 0° und 90° Öffnungswinkel verstellt.

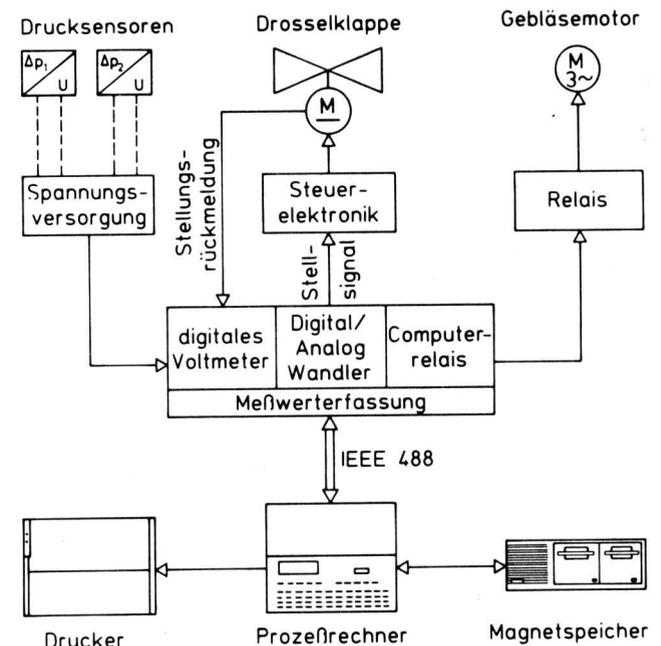


**Bild 7.** Fluidisierungsprüfstand.

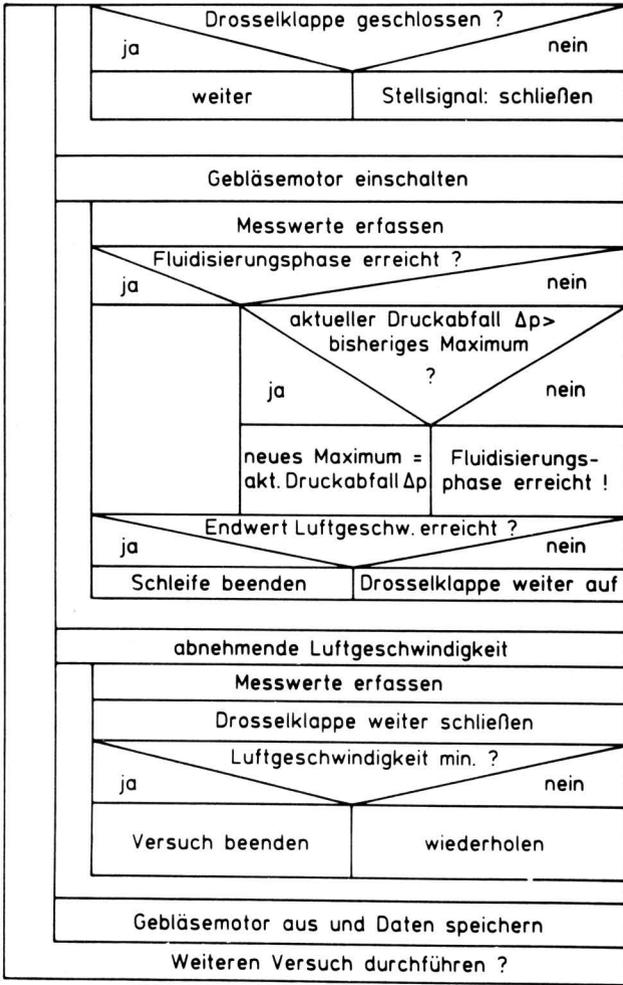
- |                  |                                |
|------------------|--------------------------------|
| a Einlaufmeßdüse | f Beruhigungsbehälter          |
| b Ansaugrohr     | g Gleichrichterkanal           |
| c Elektromotor   | h Versuchsgutbehälter          |
| d Radialgebläse  | i Ringleitung für Druckmessung |
| e Drosselklappe  |                                |

Zur Messung der Fluidisierungskurve müssen die Stellintervalle der Luftgeschwindigkeit relativ klein sein. Dies erfordert die Aufnahme von etwa 100 Druckmeßwertpaaren für eine Fluidisierungskurve. Die Meßwerterfassung wird deshalb vollständig von einem Prozeßrechner ausgeführt, der auch die gesamte Steuerung des Versuchsablaufes übernimmt. Damit kann sichergestellt werden, daß bei der Kurvenaufnahme weitgehend normierte Versuchsbedingungen vorliegen.

**Bild 8** zeigt den prinzipiellen Aufbau der Meßwerterfassung und der Ablaufsteuerung des Fluidisierungsprüfstandes. Die beiden Differenzdruckwerte werden von kapazitiven Aufnehmern in Spannungswerte umgewandelt und über ein digitales Voltmeter an den Rechner weitergeleitet, der die Umrechnung in Luftgeschwindigkeit und Druckabfall vornimmt. Nach Ende des Versuches werden die Meßwertpaare automatisch auf einen magnetischen Datenträger gespeichert und graphisch auf dem Bildschirm dargestellt. Der Versuchsablauf kann dem Struktogramm des Steuerprogrammes des Rechners entnommen werden, **Bild 9**.



**Bild 8.** Meßwerterfassung und Steuerung des Fluidisierungs-Prüfstandes.



**Bild 9.** Struktogramm des Steuerprogrammes für den Fluidisierungs-Prüfstand.

#### 4.2 Durchdringungszeit-Prüfstand

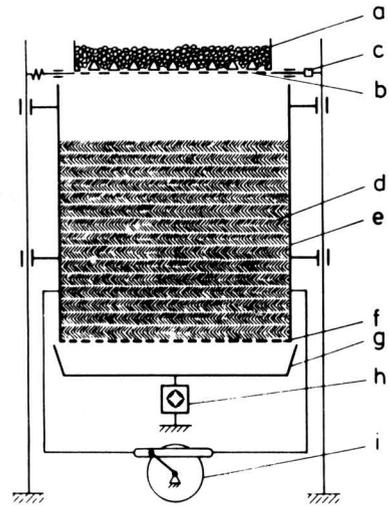
**Bild 10** zeigt das Funktionsschema des Durchdringungszeit-Prüfstandes. Zunächst befindet sich die gesamte Kornmasse  $m_0$  in einem Vorratsbehälter a, der von einem Spaltboden b verschlossen wird. Bei versuchsbeginn wird der Spaltboden von einem Magneten c geöffnet, und die Kornmasse fällt auf die schwingende Strohschicht d im Versuchsgutbehälter e.

Der Versuchsgutbehälter wird von einem Kreuzschubkurbelgetriebe i in sinusförmige Vertikalschwingungen versetzt, so daß die Körner die Strohschicht in vertikaler Richtung durchwandern. Durch den Siebboden f gelangen sie auf die Waagschale g der schwingungskompensierten Waage h.

Die Grundfläche des quadratischen Versuchsgutbehälters beträgt  $0,5 \text{ m}^2$ . Die Antriebsparameter für optimale Entmischungsverhältnisse bei der verwendeten Strohmassenbelegung von  $4 \text{ kg/m}^2$  wurden nach den Ergebnissen von Baader u.a. [14] gewählt. Auch beim Durchdringungszeit-Prüfstand werden die Meßwerterfassung und die Versuchsablaufsteuerung von demselben Prozeßrechner übernommen.

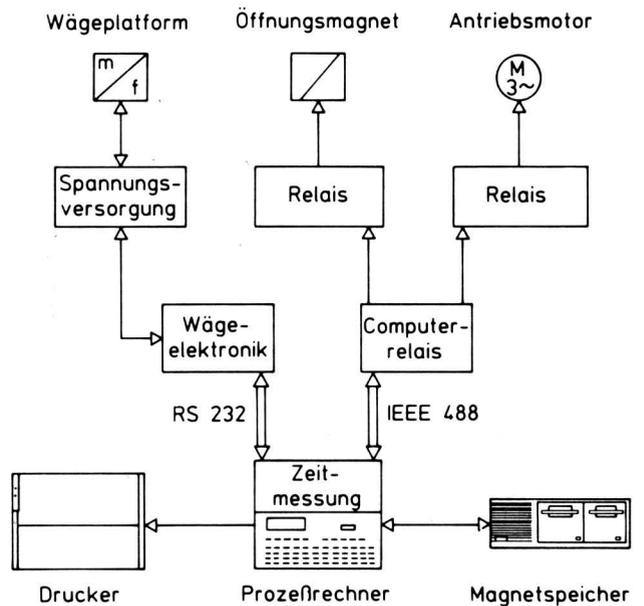
Damit können neben der einfachen Weiterverarbeitung der Meßwerte vor allem der Zeitpunkt der Auslösung des Spaltbodens und der Beginn der Zeitmessung für alle Versuche konstant gehalten werden.

Den prinzipiellen Aufbau der Meßwerterfassung und der Ablaufsteuerung des Durchdringungszeit-Prüfstandes zeigt **Bild 11**.



**Bild 10.** Funktionsschema des Durchdringungszeit-Prüfstandes.

- a Kornvorratsbehälter
- b Spaltboden
- c Öffnungsmagnet
- d Strohschicht
- e Versuchsgutbehälter
- f Siebboden
- g Waagschale
- h schwingungskompensierte Waage
- i Kreuzschubkurbelgetriebe

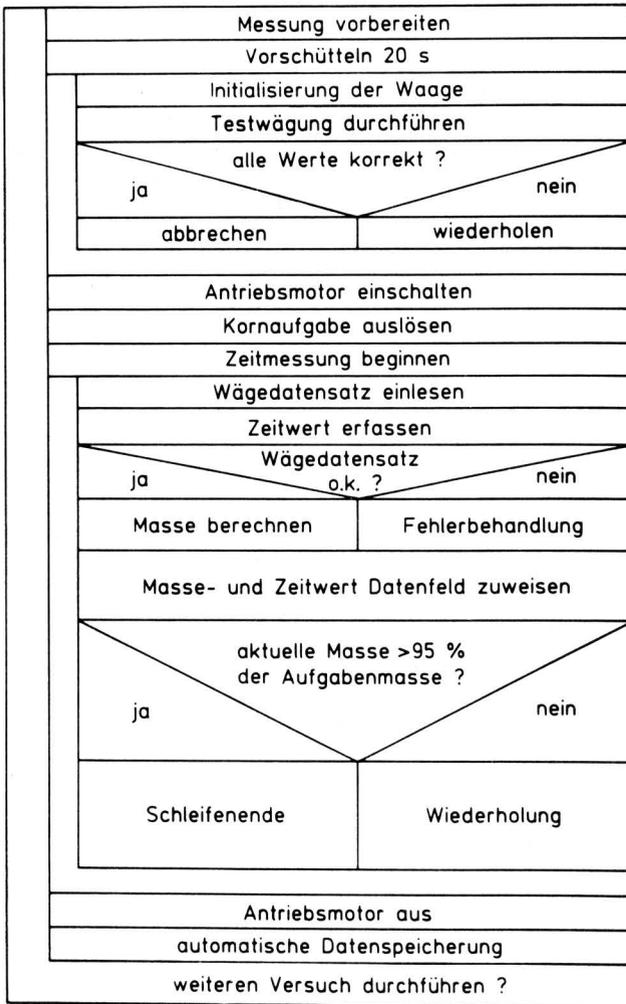


**Bild 11.** Meßwerterfassung und Steuerung des Durchdringungszeit-Prüfstandes.

Der Ablauf des Prüfverfahrens ist in **Bild 12** in Form eines Struktogrammes dargestellt. Die Vorschüttelzeit vor der Auslösung der Kornaufgabe dient dazu, die Strohschüttung bei jedem Versuch in einen normierten Ausgangszustand zu versetzen. Unregelmäßigkeiten aufgrund des Befüllverfahrens können auf diese Weise ausgeglichen werden. Nachdem der Wägewert 95 % der aufgegebenen Kornmasse erreicht hat, wird eine automatische Speicherung der Meßergebnisse auf einen magnetischen Datenträger ausgelöst.

#### 4.3 Mobiles Labor

Bei den bisher bekannten Versuchen, den Einfluß der Stoffeigenschaften des Erntegutes auf die Leistung der Trennprozesse zu bestimmen, bestand stets das Problem, daß die Stoffeigenschaften nicht zeitgleich mit der Aufnahme der Durchsatz/Verlust-Kennlinie gemessen wurden [4, 6], weil nach der Probenentnahme ein Transport in ein ortsfestes Labor vorgenommen wurde.



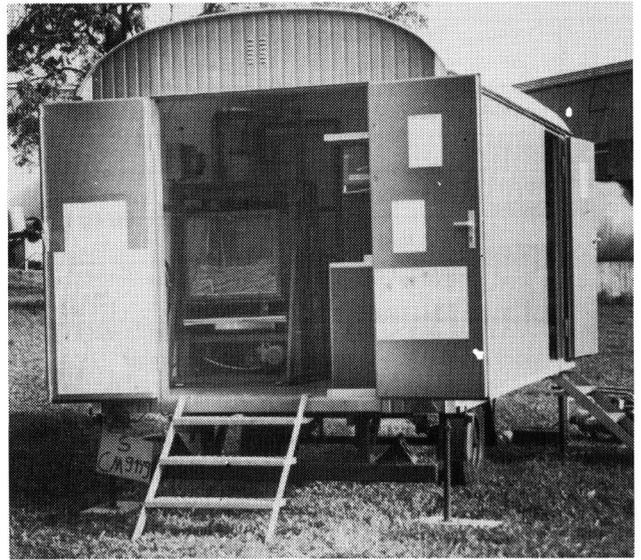
**Bild 12.** Struktogramm des Steuerprogrammes für den Durchdringungszeit-Prüfstand.

Da sich die Stoffeigenschaften des Erntegutes bei veränderten Umgebungsbedingungen sehr schnell ändern können, erschwert dies die Zuordnung von Stoffeigenschaften zu im Feldversuch ermittelten Leistungen. Um diese Fehlerquelle auszuschließen, wurde ein mobiles Labor aufgebaut, in das die Prüfstände zur Messung der Stoffeigenschaften eingebaut wurden. Dieses mobile Labor kann auf der Versuchsfläche in unmittelbarer Nähe des Versuchsmähreschers aufgestellt werden, so daß die Stoffeigenschaften zeitgleich und unter denselben Umgebungsbedingungen wie die Mährescherleistung ermittelt werden. Das mobile Labor verfügt über ein eigenes elektrisches Bordnetz, das von einem Stromerzeuger gespeist wird.

**Bild 13** zeigt das mobile Labor. Durch die geöffnete Hecktür sind links der Durchdringungszeit-Prüfstand und rechts der Fluidisierungs-Prüfstand zu erkennen. Eine ausführliche Beschreibung des mobilen Labors wurde schon veröffentlicht [10].

#### 4.4 Aufnahme der Durchsatz/Verlust-Kennlinien

Zur Aufnahme der Durchsatz/Verlust-Kennlinien der Trennprozesse im Feldversuch wird ein mit einer Meßeinrichtung ausgerüsteter Versuchsmährescher verwendet. Während einer stationären Betriebsphase können damit der Korndurchsatz gemessen und zur Kornverlustermittlung die Übergänge von Reinigungsanlage und Schüttler aufgefangan werden.



**Bild 13.** Mobiles Labor; links Durchdringungszeit-Prüfstand, rechts Fluidisierungs-Prüfstand.

Ein Punkt der Durchsatz/Verlust-Kennlinie der Trennprozesse wird aus einem 15 s dauernden Versuch während einer stationären Betriebsphase des Mähreschers ermittelt. Durch Wägung der aufgefangenen Massen werden die Massendurchsätze und durch Nachreinigen bzw. Nachtrennen der Übergänge von Reinigungsanlage und Schüttler die Kornverluste bestimmt. Eine vollständige Durchsatz/Verlust-Kennlinie besteht aus 6–8 einzelnen Punkten mit unterschiedlichen Massendurchsätzen.

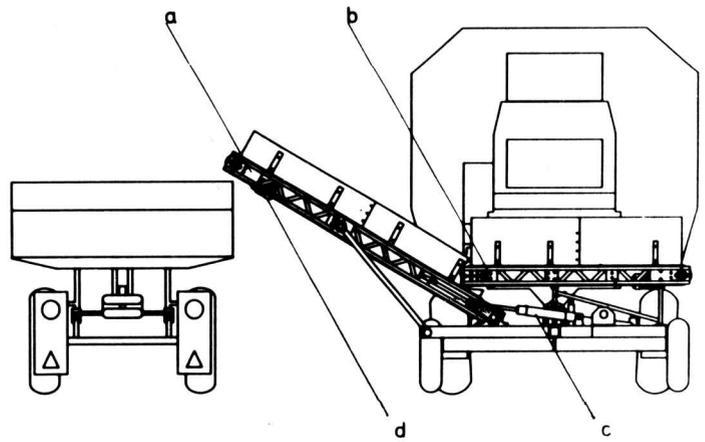
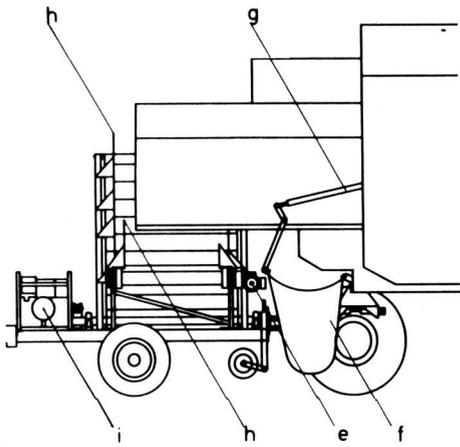
Zur Bestimmung des Korndurchsatzes wird der Körnerstrom aus der Korntankbefüllschnecke während der stationären Betriebsphase mit Hilfe einer hydraulisch betätigten Gutweiche in einem im Korntank an einer Kraftmeßdose aufgehängten Wägebühler geleitet. Der Übergang der Reinigungsanlage gelangt in einen Auffangsack, der von einem Hydraulikzylinder zu Beginn der stationären Betriebsphase geöffnet wird, **Bild 14**.

Aus der aufgefangenen Masse können der NKB-Durchsatz und das Korn/NKB-Verhältnis auf der Reinigungsanlage bestimmt werden. Durch Nachreinigen des Überganges werden die absoluten und prozentualen Kornverluste der Reinigungsanlage bestimmt.

Das Auffangen des Schüttlerüberganges geschieht mit Hilfe eines an den Mährescher angehängten Querförderers (**Bild 14**). Der Querförderer besteht aus einem Horizontal- und einem Schrägförderband. Während der Einlaufphase wird der Schüttlerübergang durch Rechtslauf des Horizontalförderbandes auf dem Feld abgelegt. Bei Erreichen des stationären Betriebszustandes wird mit Versuchsbeginn die Drehrichtung des elektrischen Bandantriebes umgekehrt, und der Schüttlerübergang wird auf einen nebenher fahrenden, mit einer Plane ausgelegten Wagen übergeladen.

Mit Hilfe eines Frontladers, der mit einer Wägeeinrichtung ausgerüstet ist, wird die Plane entladen und die Masse des Überganges und damit der NKB-Durchsatz bestimmt. Die Kornverluste werden durch Nachtrennen mit einer stationären Dreschmaschine ermittelt. Alle Auffangeinrichtungen am Mährescher werden von einem Prozeßrechner gesteuert, so daß eine gleichbleibende Zuordnung der Öffnungs- und Schließzeitpunkte konstante Versuchsbedingungen sicherstellt.

Mit dem Verfahren können die vollständigen Durchsatz/Verlust-Kennlinien der Reinigungsanlage und des Schüttlers in weniger als einer Stunde aufgenommen werden. Damit wird gewährleistet, daß sich die Stoffeigenschaften und die Umgebungsbedingungen während der Versuchsdauer nicht wesentlich ändern.



**Bild 14.** Vorrichtungen am Mähdrescher zum getrennten Auffangen der Übergänge von Reinigungsanlage und Schüttler.

- a Schrägförderband
- b Horizontalförderband
- c Schwenkantrieb Schrägförderband
- d Elektromotor Schrägförderband
- e Elektromotor Horizontalförderband
- f Auffangstrog für Reinigungsübergang (rechts/links laufend)
- g hydraulische Betätigung Auffangstrog
- h Strohleitleiche
- i Stromerzeuger

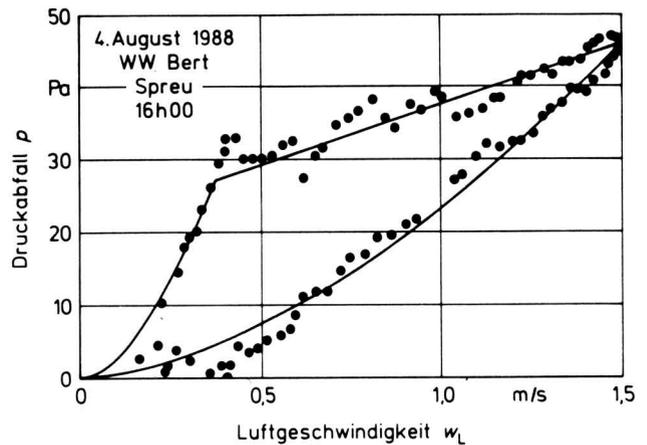
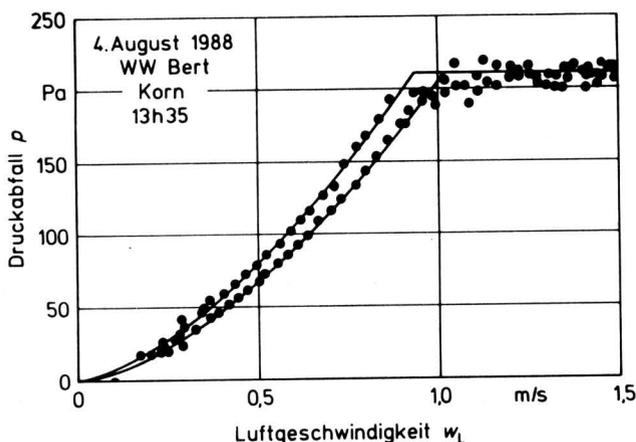
## 5. Versuchsergebnisse

### 5.1 Fluidisierungsverhalten und Reinigungsleistung

Aus den am Fluidisierungsprüfstand ermittelten Meßwertpaaren werden mit Hilfe einer Regressionsrechnung die Fluidisierungskurven der Versuchsschüttungen berechnet. **Bild 15 und 16** zeigen während der Feldversuche gemessene Fluidisierungskurven einer Kornschüttung und einer Schüttung aus dem Übergang der Reinigungsanlage des Versuchsmähdreschers.

Die relativ homogene Kornschüttung (**Bild 15**) zeigt ein nahezu ideales Fluidisierungsverhalten. Der Druckabfall in der Fluidisierungsphase ist konstant und die Hysterese fläche bleibt klein. Die stark inhomogene Schüttung aus dem Reinigungsübergang (**Bild 16**) weist hingegen eine große Hysterese fläche und einen linearen Druckanstieg in der Fluidisierungsphase auf. Die Ursache beider Effekte ist die Entmischung der Schüttung während des Fluidisierungsvorganges.

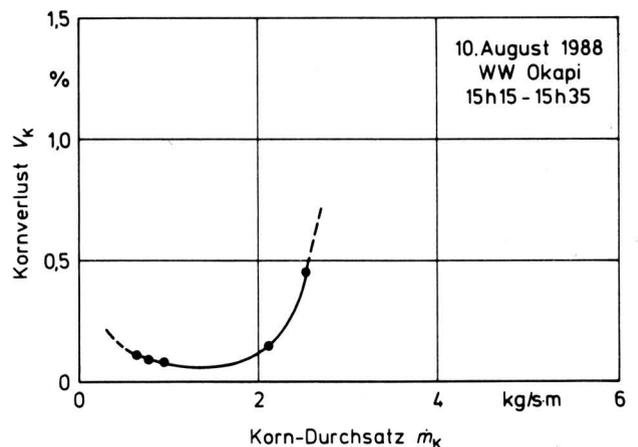
Laborversuche zeigten, daß sowohl die Luftgeschwindigkeit am Beginn der Fluidisierungsphase (Fluidisierungsgeschwindigkeit  $w_{FL}$ ) als auch die Größe der Hysterese fläche  $A_{FL}$  signifikant von der Zusammensetzung der verwendeten Schüttung abhängen. Über die Ergebnisse dieser Versuche im einzelnen wird an anderer Stelle berichtet werden.



**Bild 16.** Fluidisierungskurve für eine Schüttung aus dem Reinigungsübergang.

Zur Untersuchung der hier interessierenden Zusammenhänge des Fluidisierungsverhaltens mit der Leistung der Reinigungsanlage im Mähdrescher wurden nach der in 4.4 beschriebenen Methode Durchsatz/Verlust-Kennlinien der Reinigungsanlage ermittelt.

**Bild 17** zeigt eine aus einzelnen Meßpunkten im Feldversuch ermittelte Durchsatz/Verlust-Kennlinie der Reinigungsanlage im Versuchsmähdrescher.



**Bild 17.** Durchsatz/Verlust-Kennlinie der Reinigungsanlage des Versuchsmähdreschers.

**Bild 15.** Fluidisierungskurve für eine Kornschüttung.

**Tafel 1** gibt den Zusammenhang zwischen Fluidisierungsgeschwindigkeit, Größe der Hysteresefläche und Reinigungsleistung (= Korndurchsatz der Reinigungsanlage bei 0,5 % Kornverlust) an. Die Fluidisierungsgeschwindigkeiten sind Mittelwerte aus jeweils 7 Einzelversuchen, die während der Aufnahme der zugehörigen Durchsatz/Verlust-Kennlinie durchgeführt wurden. Je niedriger die Fluidisierungsgeschwindigkeit des Reinigungsüberganges ist, desto höher ist die festgestellte Reinigungsleistung.

Versuchstag	Reinigungsleistung $\dot{m}_{K(0,5\%)} \text{ kg/s m}$	Fluidisierungsgeschwindigkeit $w_{FL} \text{ m/s}$	Hysteresefläche $A_{FI} \text{ N/ms}$
4. 8. 1988	2,1	0,55	5,9
9. 8. 1988	2,5	0,49	6,5
10. 8. 1988	2,6	0,43	6,6

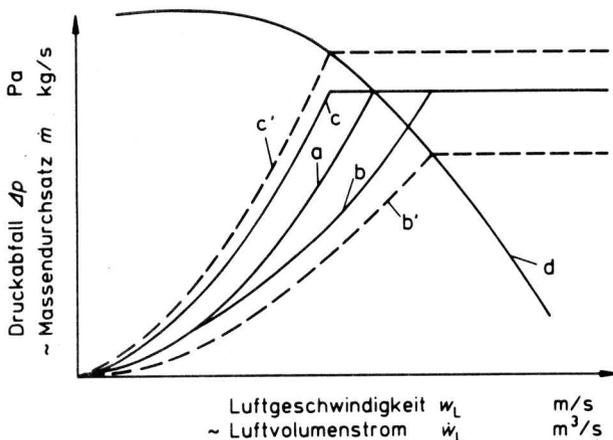
**Tafel 1.** Zusammenhang zwischen Reinigungsleistung (Kornmassendurchsatz bei 0,5 % Kornverlust) und Fluidisierungsverhalten des Reinigungsüberganges.

Dieses Ergebnis entspricht dem zugrundeliegenden physikalischen Zusammenhang. Da der Druckabfall  $\Delta p$  in der Schüttung auf dem Obersieb der Reinigungsanlage praktisch nur vom Kornmassendurchsatz  $\dot{m}_K$  abhängt, kann dieser bei vorgegebener Gebläsekennlinie in dem Maße höher sein, wie die zum Erreichen der Fluidisierungsphase erforderliche Luftgeschwindigkeit  $w_{FL}$  abnimmt.

Der grundsätzliche Zusammenhang ist in **Bild 18** dargestellt. Der Betriebspunkt der Reinigungsanlage liegt im Schnittpunkt der Gebläsekennlinie  $d$  mit der jeweiligen Fluidisierungskurve. Entspricht die x-Koordinate des Schnittpunktes der Fluidisierungsgeschwindigkeit  $w_{FL}$  des Reinigungsgutes (Fall a), so ist die Leistungsgrenze der Reinigungsanlage erreicht.

Ist die Luftgeschwindigkeit im Schnittpunkt kleiner als die Fluidisierungsgeschwindigkeit (Fall b), ist eine ausreichende Fluidisierung des Reinigungsgutes nicht mehr gewährleistet, und die Leistungsgrenze verschiebt sich zu kleineren Massendurchsätzen (Fall b'). Liegt der Schnittpunkt rechts von der Fluidisierungsgeschwindigkeit (Fall c), ist ein entsprechend größerer Massendurchsatz möglich (Fall c').

Die Größe der Hysteresefläche ist ein Maß für die Neigung des Reinigungsgutes zur Entmischung im Luftstrom. Eine große Hysteresefläche entspricht einer starken Entmischung und wegen der konstanten Versuchszeit auch einer starken Entmischungsneigung. Setzt man konstante Fördergeschwindigkeit auf dem Obersieb der Reinigungsanlage voraus, so muß die Größe der Hysteresefläche proportional zur möglichen Reinigungsleistung sein.

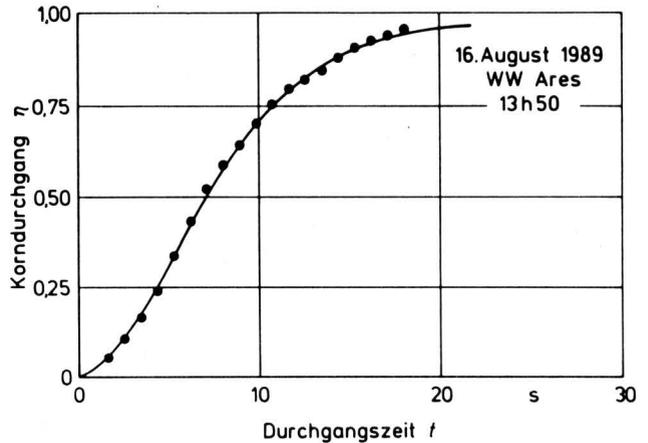


**Bild 18.** Betriebspunkte der Reinigungsanlage im Mähdrescher als Schnittpunkte der Gebläsekennlinie ( $d$ ) und der Fluidisierungskurven ( $a$  bis  $c$ );  $a$  = mittlere,  $b$  = hohe und  $c$  = niedrige Fluidisierungsgeschwindigkeit.

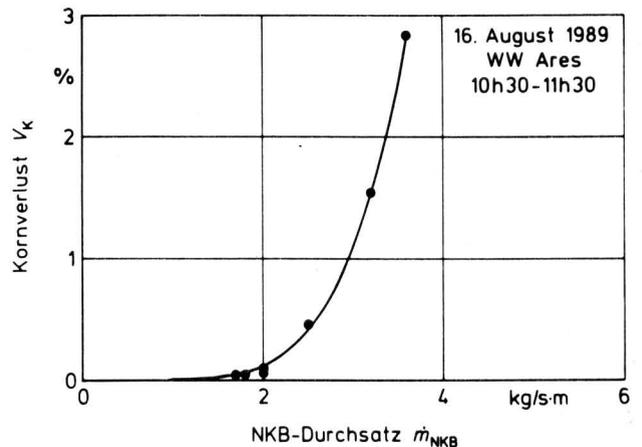
## 5.2 Durchdringungszeit und Schüttlerleistung

Bei der Auswertung der Durchdringungszeitversuche wird mittels Regressionsrechnung eine Kurve durch die Meßpunkte gelegt, **Bild 19**. Der Schnittpunkt der Kurve mit der Geraden  $\eta = 0,8$  liefert die jeweilige Durchdringungszeit  $t_{0,8}$ .

Parallel zur Durchführung von 5 Durchdringungszeitversuchen wurde jeweils eine Durchsatz/Verlust-Kennlinie des Schüttlers im Versuchsmähdrescher aufgenommen, **Bild 20**, aus der die Schüttlerleistung  $\dot{m}_{NKB(1\%)}$  als Massendurchsatz an Nicht-Korn-Bestandteilen bei einem Prozent Kornverlust bestimmt wurde.



**Bild 19.** Summenkurve des Korndurchgangs für einen Durchdringungszeitversuch.



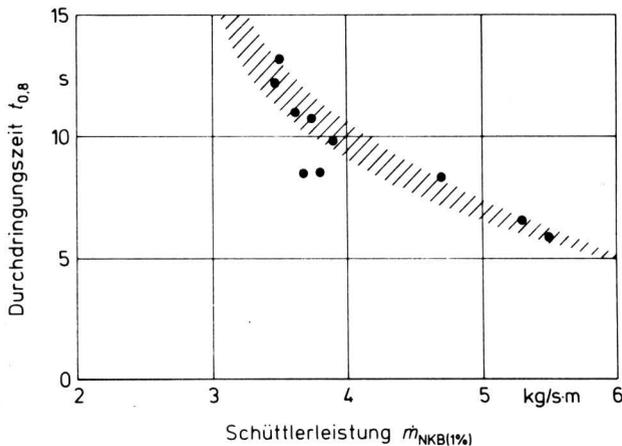
**Bild 20.** Durchsatz/Verlust-Kennlinie des Schüttlers des Versuchsmähdreschers.

Neben den Stoffeigenschaften der in Kontakt tretenden Fraktionen Korn und Stroh spielt die Höhe der Strohschicht auf dem Schüttler eine wichtige Rolle für den Entmischungserfolg und damit für die Schüttlerleistung.

Die Höhe der Strohschicht hängt außer vom Massendurchsatz von der Dichte des Strohs ab. Dieser Einfluß wird beim Durchdringungszeitversuch durch eine konstante Versuchsgutmasse kompensiert, so daß Dichteänderungen des Strohs auch immer entsprechende Schütthöhenänderungen im Versuchsgutbehälter bedingen.

Damit ist ein direkter Vergleich der Durchdringungszeit und der Schüttlerleistung zulässig. **Bild 21** zeigt den ermittelten Zusammenhang beider Größen. Es liegt ein exponentieller Zusammenhang vor, da die Schüttlerleistung für die Durchdringungszeit null asymptotisch gegen unendlich gehen muß und umgekehrt bei unendlicher Durchdringungszeit die Schüttlerleistung gegen null geht.

Die bisher gefundenen Zusammenhänge bestätigen die theoretischen Überlegungen. Um sichere quantitative Aussagen machen zu können, müssen sie jedoch durch eine möglichst große Anzahl weiterer Versuche statistisch abgesichert werden.



**Bild 21.** Zusammenhang zwischen der Schüttlerleistung und der Durchdringungszeit.

## 6. Zusammenfassung

Die aus der Durchsatz/Verlust-Kennlinie bestimmte Leistung der Trennprozesse im Mähdrescher hängt von zahlreichen Einflußgrößen ab. Ein Problem stellt vor allem die Abhängigkeit von den Stoffeigenschaften des Erntegutes dar, da diese für vergleichende Aussagen nicht reproduziert werden können.

Um den aufwendigen Einsatz eines Vergleichsmähdreschers bei Prüfungen zu vermeiden, wurde vorgeschlagen, relevante Stoffeigenschaften des Erntegutes zu messen und Korrelationen zwischen den Meßgrößen und der gleichzeitig gemessenen Leistung der Trennprozesse herzustellen.

Die Einteilung möglicher, meßbarer Stoffeigenschaften nach ihrer Komplexität und die Abschätzung von Aufwand und Aussagesicherheit führte zu der Annahme, daß bei Ermittlung technologischer Stoffeigenschaften ein guter Zusammenhang mit der Leistung der Trennprozesse im Mähdrescher erwartet werden kann.

Die technologischen Stoffeigenschaften Fluidisierungsverhalten und Durchdringungszeit wurden definiert und die entsprechenden Prüfstände vorgestellt. Die verwendete Feldversuchstechnik zur Ermittlung der Durchsatz/Verlust-Kennlinien der Trennprozesse wurde beschrieben.

Anhand von Versuchsergebnissen wurden die Zusammenhänge zwischen dem Fluidisierungsverhalten und der Leistung der Reinigungsanlage sowie auch die Zusammenhänge zwischen der Durchdringungszeit und der Leistung des Schüttlers im Mähdrescher aufgezeigt und erläutert. Die bisherigen Ergebnisse zeigen, daß der Stoffeigenschaftseinfluß auf die Leistung der Reinigungsanlage mit Hilfe des Fluidisierungsverhaltens des Reinigungsüberganges erfaßt werden kann, wobei dieses durch die Fluidisierungsgeschwindigkeit und die Hystereseffekte der Fluidisierungskurve charakterisiert wird. Der Stoffeigenschaftseinfluß auf die Leistung des Schüttlers kann über die Messung der Durchdringungszeit bestimmt werden.

### Verwendete Formelzeichen

$A_{FL}$	N/s m	Hystereseffekte der Fluidisierungskurve
$m$	kg	Kornmasse
$m_0$	kg	Anfangskornmasse
$\dot{m}$	kg/s	Massendurchsatz
$\dot{m}(V_{Kzul})$	kg/s	Massendurchsatz bei vorgegebenem Kornverlust (Trennprozeßleistung)

$\dot{m}_K$	kg/s m	Korn-Massendurchsatz (auf die Kanalbreite bezogen)
$\dot{m}_{K(0,5\%)}$	kg/s m	Korn-Massendurchsatz der Reinigungsanlage bei 0,5 % Kornverlust (Reinigungsleistung)
$\dot{m}_{NKB}$	kg/s m	Massendurchsatz an Nicht-Korn-Bestandteilen (auf die Kanalbreite bezogen)
$\dot{m}_{NKB(1\%)}$	kg/s m	NKB-Massendurchsatz des Schüttlers bei 1 % Kornverlust (Schüttlerleistung)
$\Delta p$	Pa	Druckabfall
$\Delta p_{FL}$	Pa	Fluidisierungsdruckabfall
$t$	s	Durchgangszeit
$t_{0,8}$	s	Durchgangszeit, bei der 80 % der aufgegebenen Körner abgeschieden sind (Durchdringungszeit)
$V_K$	%	Kornverlust
$\dot{V}_L$	m <sup>3</sup> /s	Luftvolumenstrom
$w_L$	m/s	Luftgeschwindigkeit
$w_{FL}$	m/s	Luftgeschwindigkeit bei einsetzender Fluidisierung (Fluidisierungsgeschwindigkeit)
$\eta$	kg/kg	Korndurchgang

## Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [1] *Kutzbach, H.D.*: Dresch- und Trennsysteme neuer Mähdrescher. Landtechnik Bd. 38 (1983) Nr. 6, S. 226/30.
- [2] *Spiess, E.*: Mähdrescher im Test - Folgerungen für die Praxis. Landtechnik Bd. 41 (1986) Nr. 6, S. 268/72.
- [3] ● *Wrubleski, P.D. u. E.O. Nyborg*: Prairie Agricultural Machinery Institute field evaluation of combines. Proc. International Conference on grain and forage harvesting, Ames/Iowa, 25.-29. Sept. 1977, S. 118/23.
- [4] *Hall, J.W. u. J.F. Husman*: Correlating physical properties with combine performance. ASAE-Paper No. 81-3538.
- [5] ● *Huisman, W.*: Moisture content, coefficient of friction and modulus of elasticity of straw in relation to walker losses in a combine harvester. Proc. International Conference on grain and forage harvesting, Ames/Iowa, 25.-29. Sept. 1977, S. 49/54.
- [6] *Srivastava, A., W.T. Mahoney u. N. West*: Effect of crop properties on combine performance. ASAE-Paper No. 86-1583.
- [7] *Wacker, P.*: Einflüsse auf die Dreschleistung von Mähdreschern. Landtechnik Bd. 40 (1985) Nr. 6, S. 273/77.
- [8] *Böttinger, S. u. H.D. Kutzbach*: Performance characteristics of a cleaning unit under various crop conditions. ASAE-Paper No. 87-1512.
- [9] ● *Beck, T.*: Einfluß der Stoffeigenschaften auf die Korn-Stroh- und Korn-Spreu-Trennung von Mähdreschern. VDI/MEG-Kolloquium Landtechnik "Mähdrescher", 1988, H. 6, S. 107/20.
- [10] ● *Beck, T.*: Measurement of crop properties to evaluate performance changes of combine harvesters. 21. Conferencia internacional de mecanizacion agraria, Zaragoza/Spanien, 10.-13. April 1989, Bd. 1, S. 455/64.
- [11] ● *Leva, M.*: Fluidization. New York: McGraw-Hill 1959.
- [12] *Segler, G. u. K. Keuneke*: Untersuchungen an Fließbettförderrinnen für Getreide, Sämereien und landwirtschaftliche Futtermittel. Landtechn. Forschung Bd. 15 (1965) Nr. 4, S. 130/36.
- [13] ● *Freye, T.*: Untersuchungen zur Trennung von Korn-Spreu-Gemischen durch die Reinigungsanlage des Mähdreschers. Diss. Univ. Hohenheim 1980.
- [14] *Baader, W., H. Sonnenberg u. H. Peters*: Die Entmischung eines Korn-Fasergut-Haufwerkes auf einer vertikal schwingenden, horizontalen Unterlage. Grundl. Landtechnik Bd. 19 (1969) Nr. 5, S. 149/57.