

gemessen werden, während die Bestimmungsmethoden und Meßverfahren für das Arbeitsergebnis selbst für den Forschungsbetrieb noch unzureichend entwickelt sind. Deshalb ist die Bewertung unterschiedlicher Geräte oft noch lückenhaft und subjektiv. Angetriebene Arbeitsorgane setzen sich zwar zögernd, aber doch zunehmend durch. Ihre Vorteile liegen nicht eindeutig im geringeren spezifischen Energieverbrauch, sondern im Zusammenwirken mehrerer Faktoren, wie z. B. kleiner Bauraum, Kombierfähigkeit mit anderen Arbeitsorganen, und in der Einsparung von Arbeitsgängen. Als Beispiele dafür sind die Bodenfräse und die Kreiselegge anzusehen. Schwingend angetriebene Lockerungswerkzeuge sind ebenfalls an zahlreichen Stellen entwickelt worden, konnten sich aber bisher wegen des zu hohen Konstruktionsaufwands mit Ausnahme der Rütteleger nicht durchsetzen. Die oft gestellte Frage, warum das älteste landwirtschaftliche Gerät, der Pflug, als Arbeitsprinzip noch nicht abgelöst ist, kann so beantwortet werden, daß bei einer ausgereiften Lösung für die Nutzung der Naturgesetze, in diesem Falle der Geometrie, der Strömungsmechanik und der Stoffgesetze, ein besseres Prinzip nur durch die bessere Nutzung bekannter oder durch neu erkannte Gesetze gefunden werden kann. Wenn angetriebene Arbeitsorgane echte Fortschritte bringen sollen, so muß erreicht werden, daß die zugeführte Energie mit einem höheren Wirkungsgrad für das angestrebte Arbeitsergebnis genutzt wird. In diesem Zusammenhang spielen bodenmechanische Betrachtungen eine wesentliche Rolle. Allerdings darf das Problem nicht nur auf Spannungs-, Verformungs- und Bruchzustände reduziert werden, weil Beschleunigung und Reibung den Energieauf-

wand erheblich, aber das Arbeitsergebnis nur unwesentlich beeinflussen.

— Die Theorien und Hypothesen der Bruchmechanik für die Zerkleinerung (Lockerung) des Bodens beschreiben bisher vorwiegend nur Einzelvorgänge an einer Bruchstelle und nicht die Vorgänge im gesamten beanspruchten Volumen. Bisher wurde der Bruchvorgang im Boden vorwiegend mit der zweiachsigen Schubspannungshypothese erklärt, die für Werkzeuge mit zunehmendem Keilwinkel, vor allem in Bereichen über 40°, zunehmende Bedeutung hat [2]. So konnte nachgewiesen werden, daß die Schubfestigkeit des Bodens geeignet ist, als alleiniger Bodenparameter den spezifischen Bodenwiderstand eines Pflugkörpers zu kennzeichnen [3]. Die Anwendung der Methode der finiten Elemente kann hier zu besseren Ergebnissen zunächst in der Forschung führen. Für die Praxis wird diese Methode erst Bedeutung erlangen, wenn es gelingt, die Stoffgesetze des Bodens in größeren Gültigkeitsbereichen zu beschreiben und möglichst auch dreidimensionale Betrachtungen durchzuführen [4].

Mathematische Beziehungen zwischen Boden-, Konstruktions- und Betriebsparametern bestehen bisher nur für energetische Zusammenhänge. Über die Arbeitsqualität lassen sich nur qualitative Aussagen machen.

Die bisherigen bodenmechanischen Erkenntnisse lassen für die Werkzeugentwicklung den Schluß zu, den Bruch bei kleinen Belastungsgeschwindigkeiten und in einem kleinen Volumen bei geometrisch definierter Verformung durchzuführen, um Verluste durch Reibung, Verschiebung und Beschleunigung zu vermeiden. Hypothesen [5], daß durch Zug- und Biegebeanspruchung des Bodens gegenüber Schub wesentliche

Energieeinsparungen möglich sind, beziehen sich bisher ebenfalls nur auf Einzelbruchstellen und sind technisch nur schwer oder durch eine Reihe von Kompromissen in einer Konstruktion realisierbar.

### Zusammenfassung

Im Beitrag werden ausgehend von der Gesamtenergiebilanz der Bodenbearbeitungsaggregate die Möglichkeiten für die Verbesserung der Effektivität beim Bodenbearbeiten dargestellt. Auf einige wichtige Teilgebiete, wie Fahrwerk—Boden, Kräftegleichgewicht zwischen Traktor und Gerät und besonders auf die Vorgänge im Boden wird näher eingegangen.

### Literatur

- [1] Stroppe, A.; Bunk, A.: Ein Beitrag zum Leistungs- und Energiebedarf gezogener und angetriebener Bodenbearbeitungsgeräte. Grundlagen der Landtechnik (1978) H. 6, S. 214—218.
- [2] Bernhardt, H.: Schnittprozeß im Boden. Technische Universität Dresden, Sektion 16/1, Jahresbericht 1978 (unveröffentlicht).
- [3] Ganzuch, U.; Soucek, R.; Bernhardt, G.: Experimentell-theoretische Methode zum Bestimmen des spezifischen Bodenwiderstands von Pflugkörpern bei beliebigem Bodenzustand. agrartechnik 28 (1978) H. 9, S. 388—390.
- [4] Jong, R. N.; Hanna, A. W.: Finite element analysis of plane soil cutting (Finite-Elemente-Analyse beim ebenen Bodenschnitt). Journal of Terramechanics 14 (1977) H. 3, S. 103—125.
- [5] Vomocil, J. A.; Chancellor, W. J.: Energy Requirements for Breaking Soil Samples (Energiebedarf für das Brechen von Bodenproben). Transaction of the ASAE (1969) S. 375—383, 388. A 2588

1) Überarbeitete Fassung eines Vortrags anlässlich der Mechanisierungstagung an der Ingenieurhochschule Berlin—Wartenberg vom 6. bis 8. November 1979

## Untersuchungen über die stochastischen Änderungen der Siebfähigkeit des Bodens

Dr.-Ing. T. Uhlig, KDT/Dipl.-Ing. W. Dreessen, KDT/Ing. K. Ziems, KDT  
 Forschungszentrum für Mechanisierung der Landwirtschaft Schlieben/Bornim der AdL der DDR  
 Dr. agr. F. Roch, Agraringenieurschule Haldensleben, Bezirk Magdeburg

### Verwendete Formelzeichen

a	m	Meßabstand der Bodenproben
aT	M-%	abschlammbare Teilchen aus Feinschluff und Ton einer Korngröße $\leq 6 \mu\text{m}$
F		Prüfwerte der F-Verteilung
F <sub>i</sub>		Tabellenwerte der F-Verteilung
m		Stichprobenumfang aus der Grundgesamtheit y
n		Stichprobenumfang aus der Grundgesamtheit x
R <sub>x</sub> ( $\tau$ )		Autokorrelationsfunktion
r <sub>x</sub> ( $\tau$ )		normierte Autokorrelationsfunktion
s <sub>x,y</sub>		Standardabweichung der Grundgesamtheiten x und y
s <sub>i</sub>		gewogene Standardabweichung
S <sub>x</sub> ( $\omega$ )		Spektraldichte
S <sub>x,n</sub> ( $\omega\mu$ )		normierte Spektraldichte
T		Prüfwerte der T-Verteilung
T <sub>n</sub>		Tabellenwerte der T-Verteilung
T <sub>A</sub>	s	Abtastzeit
T <sub>p</sub>	s	zeitliche Pause zwischen Verstellungen von Regelsystemen
t	s	Zeit des Teilintervalls der stochastischen Funktion

VG		Vertrauensgrenze
v <sub>F</sub>	m/s	Fahrgeschwindigkeit
x <sub>i</sub> , y <sub>i</sub>		Einzelwerte aus den Grundgesamtheiten x, y
$\bar{x}$ , $\bar{y}$		Mittelwerte der Grundgesamtheiten x, y
$\eta_s$	%	Siebwirkungsgrad
$\lambda$	m	Wellenlänge
$\mu$		konstante Differenz der Korrelationsfunktion und der Spektraldichte (obere Grenze M)
$\nu$		konstante Differenz der stochastischen Funktion (obere Grenze N)
$\tau$	s	Zeitverschiebung der Korrelationsfunktion
$\omega$	rad/s	Kreisfrequenz
$\omega_{1,2}$	rad/s	untere bzw. obere Grenzfrequenz

### 1. Problemstellung

Die Siebfähigkeit des Bodens hängt von mehreren, abhängig und unabhängig voneinander wirkenden Faktoren ab, wie von der Textur, der Struktur und dem Wassergehalt, und weist, verteilt über die gesamte Bodenfläche, im Be-

arbeitungshorizont entsprechende Änderungen auf. Diese Änderungen sind nicht determiniert. Die stochastischen Änderungen der Siebfähigkeit des Bodens beeinflussen den Durchsatz und die Arbeitsqualität von Siebeinrichtungen der Pflanzenproduktion (z. B. Siebeinrichtung in Kartoffelerntemaschinen) auch dann, wenn andere äußere Bedingungen als konstant angenommen werden können. Parameter der Arbeitsqualität sind z. B. der im Überlauf der Siebeinrichtung verbleibende Anteil siebbarer Bestandteile und die auf das Erntegut ausgeübten Belastungen bzw. Beschädigungen. Die Verstellung der Siebeinrichtung während der Arbeit nach der jeweils vorherrschenden Siebfähigkeit des Bodens durch ein Regelungssystem gewährleistet im Gegensatz zu einer konstanten Einstellung nach den durchschnittlichen Siebbedingungen des gesamten Feldes einen maximalen Durchsatz bei der erforderlichen Reinheit und den zulässigen minimalen mechanischen Belastungen bzw. Beschädigungen des Ernteguts. Damit verbun-

den ist eine ständige Auslastung der technischen Möglichkeiten der Siebeinrichtung. Zur Einschätzung des dynamischen Umfangs der Verstellungen in Regelungssystemen ist die Kenntnis über die Eigenschaften der stochastischen Änderungen der Siebfähigkeit des Bodens erforderlich.

## 2. Charakteristik der durchzuführenden Messungen

### 2.1. Abgrenzung der Meßaufgabe

In Standorteinteilungen nach der Bodenart werden die durchschnittlich vorherrschenden Kornfraktionen des Bodens angegeben (Lehm, sandiger Lehm, lehmiger Sand usw.). In der Wertigkeit für die Sorptionseigenschaften und die wasserhaltende Kraft ist der Anteil einer feineren Fraktion stärker bestimmend, als etwa der gleiche Anteil einer gröberen Fraktion [1]. Die örtliche Verteilung der einzelnen Fraktionen ist im wesentlichen durch die geologische Entstehung festgelegt und nahezu unabhängig von äußeren Einwirkungen.

Das Vorhandensein eines Anteils von Feinschluff und Ton einer Korngröße  $\leq 6 \mu\text{m}$ , weiterhin als abschlämmbare Teilchen bezeichnet, stellt eine grundsätzliche Voraussetzung für die Bildung von bestimmten Gefügeformen dar. Das Zusammenwirken der abschlämmbaren Teilchen mit weiteren Faktoren, vor allem mit dem Wassergehalt, bestimmt die Kohärenz und damit die Siebfähigkeit des Bodens. Eine Untersuchung der unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften des Bodens ist äußerst aufwendig und geht über die gestellte Aufgabe hinaus. Die durch äußere Einflüsse, wie Einbringung organischen und anorganischen Düngers, Wechselwirkungen zwischen Befeuchtung und Verdunstung und verschiedene mechanische Belastungen, verursachten Änderungen der physikalischen Eigenschaften des Bodens sind für die absolute Änderung der Siebfähigkeit bestimmend.

Unter der Annahme, daß z. B. die Kartoffeldämme eines Feldes annähernd gleichen äußeren Einflüssen unterliegen, stellt der Anteil abschlämmbarer Teilchen eine maßgebliche Kenngröße zur Bestimmung der stochastischen, relationalen Änderung der Siebfähigkeit des Bodens dar. Diese Arbeitshypothese gilt für alle folgenden Untersuchungen.

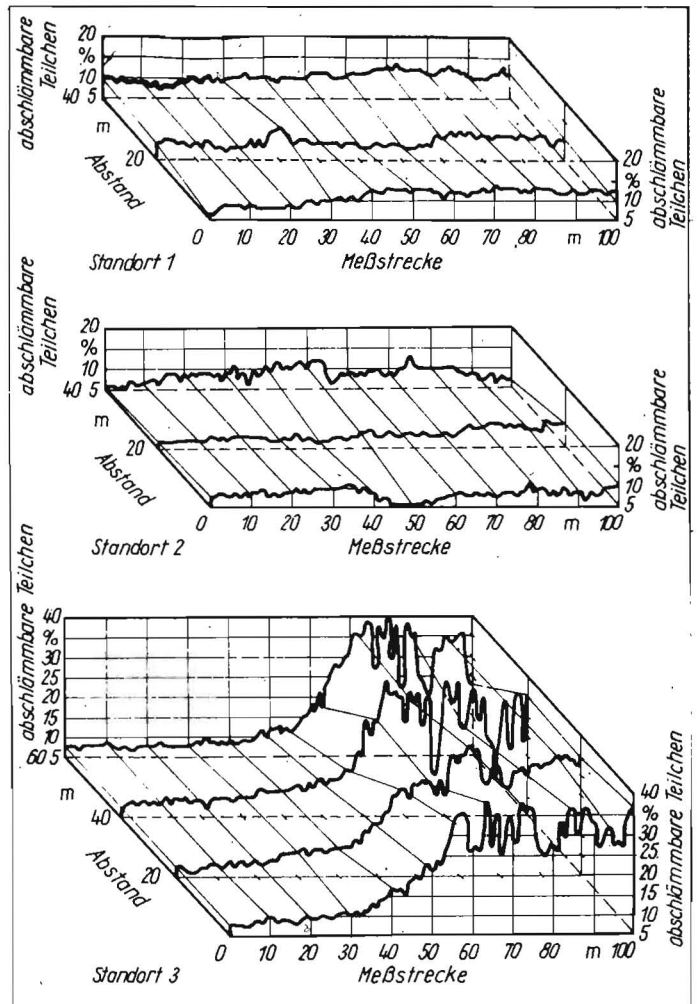
### 2.2. Bestimmung des Meßabstands

Es ist der Meßabstand zu bestimmen, in dem kein signifikanter Unterschied des Anteils abschlämmbarer Teilchen vorliegt. Die Analyse der abschlämmbaren Teilchen erfolgte entsprechend der bekannten Methode [1, 2]. Die Bodenproben wurden in konstanten Abständen entnommen und fortlaufend nummeriert, so daß zeitliche Vergleiche der Meßreihen möglich waren.

Zur Bestimmung des Meßabstands wurden 3 Standorte ausgewählt, auf denen sich die Siebfähigkeit visuell änderte und eine erkennbare Grenze der Klutenhaltigkeit ausbildete. Von dieser Grenze ausgehend, wurden rechtwinklig im konstanten Abstand  $a = 1 \text{ m}$  beidseitig in einer Linie je 50 Bodenproben entnommen. Um die Aussage zu erhöhen, wurden im seitlichen Abstand von 20 m mindestens 3 parallele Meßstrecken angelegt. (Bild 1 und Tafel 1).

Um den Aufwand in Grenzen zu halten, also einen Meßabstand von  $a > 1 \text{ m}$  zu ermitteln, wurden für die Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% ein F-Test nach Fisher auf gleiche Varianzen und ein T-Test nach Welch auf gleiche

Bild 1  
Grafische Darstellung der funktionellen Verteilung abschlämmbarer Teilchen auf unterschiedlichen Standorten; s. Tafel 1



Tafel 1. Statistische Zahlenangaben zu Bild 1

Standort	Bodenart	abschlämmbare Teilchen		VG	
		Bereich Masse-%	$\bar{x}$ Masse-%		s
1	Sand bis sandiger Lehm	7...14	10,4	1,49	0,17
2	anmooriger Sand	5...13	8,6	1,51	0,17
3	Sand bis sandiger Lehm	6...40	19,6	10,9	1,07

Tafel 2. Ergebnisse des F- und T-Tests für 3 untersuchte Standorte

Standort	F	$F_{\alpha}$	T	$T_{\alpha}$
1	1,37	1,50	0,33	1,65
2	1,27	1,66	0,42	1,65
3	1,10	1,54	0,15	1,65

Mittelwerte nach den folgenden Bedingungen durchgeführt:

$$F = \left( \frac{s_x}{s_y} \right)^2 < F_{\alpha} \quad (1)$$

$$T = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{s_i} \sqrt{\frac{n \cdot m}{n + m}} < T_{\alpha} \quad \text{mit}$$

$$s_i^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2 + \sum (y_i - \bar{y})^2}{n + m - 2} \quad (2)$$

Bei einem Abstand zwischen den Proben  $a = 10 \text{ m}$  werden die Bedingungen (1) und (2) mit Sicherheit eingehalten. Die errechneten Werte sind in Tafel 2 enthalten.

Da unter landwirtschaftlichen Bedingungen im Geschwindigkeitsbereich selbstfahrender Landmaschinen mit oberen Grenzfrequenzen um 1 Hz gerechnet werden kann (Bodendichteschwankungen usw.), erscheint es für Messungen über Feldlängen von 600 bis 1000 m zweckmäßig, den Meßabstand  $a = 10 \text{ m}$  festzulegen.

### 2.3. Bestimmung der Siebfähigkeit

Als ein Maß der Siebfähigkeit soll der Siebwirkungsgrad einer Siebeinrichtung gelten, die mit konstanten Betriebs- und Konstruktionsparametern so betrieben wird, daß ihre Arbeitsweise durch konstante Sieböffnungen und Freifläche sowie durch gleiches Schwingungsregime und konstante Einwirkzeit der Siebeinrichtung auf gleichgroße Bodenproben reproduzierbar ist. Der Siebwirkungsgrad wird aus dem Verhältnis des Siebdurchsatzes zur Siebbeaufschlagung berechnet.

Für die Einschätzung des dynamischen Umfangs der Verstellungen in Regelungssystemen sind die zeitlich begrenzten Änderungen der Siebfähigkeit des Bodengemisches von praktischer Bedeutung. Diese Änderungen sind auf den Teilarbeitsprozeß „Absieben“ bezogen und bilden eine relative Größe für die notwendige Einschätzung des dynamischen Umfangs. Folglich ist hier die Untersuchung der Einflüsse der Hygroskopizität, der Bodenfeuchte, des Humusgehalts und der Bodendichte sowie deren gegenseitigen Abhängigkeiten nicht erforderlich.

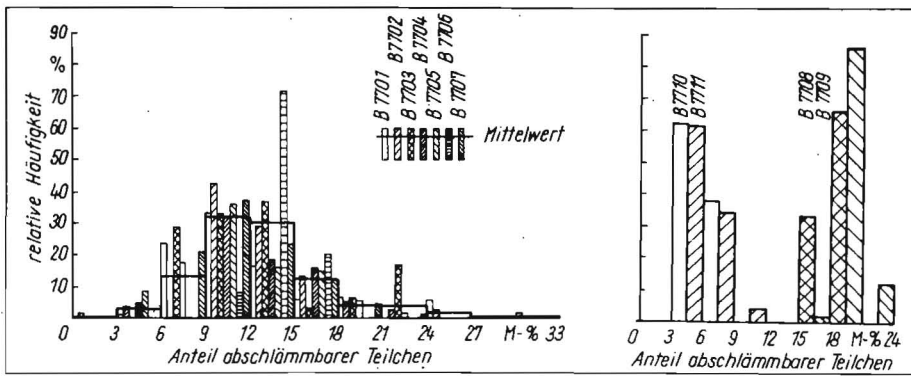


Bild 2. Grafische Darstellung der statistischen Verteilung (relative Häufigkeit) abschlämmbarer Teilchen auf unterschiedlichen Standorten

Tafel 3. Statistische Zahlenangaben zur Verteilung abschlämmbarer Teilchen auf unterschiedlichen Standorten

Vers.-Nr.	$\bar{x}$ Masse-%	$x_{max}$ Masse-%	$x_{min}$ Masse-%	s	s	VG	VG	n	Bodenart
					%	%	%		
B 7701	12,40	32	5	5,73	46,21	1,40	11,27	67	S(h)
B 7702	12,05	22	1	3,87	32,07	0,80	6,60	93	IS, sL
B 7703	14,27	24	9	4,59	32,14	1,71	12,01	30	L, sL, S
B 7704	10,18	16	5	3,36	32,99	1,10	10,85	38	L, sL, IS, S
B 7705	11,07	21	6	3,96	35,80	0,95	8,60	69	L, sL
B 7706	13,17	16	9	1,43	10,85	0,37	2,80	60	sL
B 7707	11,71	23	6	3,48	29,72	0,88	7,55	62	IS, sL
B 7708	17,83	20	15	0,85	4,78	0,21	1,20	63	L
B 7709	19,46	22	17	0,87	4,46	0,21	1,10	65	L
B 7710	5,13	7	3	1,18	23,10	0,30	5,82	63	S
B 7711	5,43	11	3	1,38	25,42	0,34	6,30	65	S

### 3. Zusammenhang zwischen Siebwirkungsgrad und abschlämmbaren Teilchen

Eine Testanalyse der Abhängigkeit des Siebwirkungsgrades  $\eta_S$  von den abschlämmbaren Teilchen  $aT$  auf Böden der untersuchten Bodenarten (lehmiger Sand bis sandiger Lehm) lieferte einen linearen negativen Korrelationsfaktor von rd. 0,4 bei einer Signifikanzgrenze von 0,25 für eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 5%.

Die nichtlineare Regression ergibt:

$$\eta_S = 108,7 - 3,52 aT + 0,004 (aT)^2 \quad (3)$$

Gleichung (3) weist im untersuchten Bereich von 7 Masse-%  $\leq aT \leq 20$  Masse-% eine gute

Linearität auf, denn das quadratische Glied ist vernachlässigbar. Die durchgeführten Untersuchungen bestätigen die Annahme, daß die Messung der abschlämmbaren Teilchen repräsentativ für die Charakteristik der Siebfähigkeit des Bodens ist. Bereits die Differenz von  $\Delta aT = 1$  Masse-% kann zu einer Änderung des Siebwirkungsgrades von  $\Delta \eta_S = 6,4\%$  führen.

Es wird eingeschätzt, daß für  $\Delta \eta_S > 2\%$  Stellensignale eines Regelungssystems wirksam werden müssen, das als Störgröße die Änderung der Siebfähigkeit des Bodens beinhaltet. Folglich sind die Analysen der abschlämmbaren Teilchen zur dynamischen Charakteristik des Arbeitsgegenstands Boden hinreichend.

Bild 3. Autokorrelogramme für eine zu erwartende Siebfähigkeit mit großer Streuung

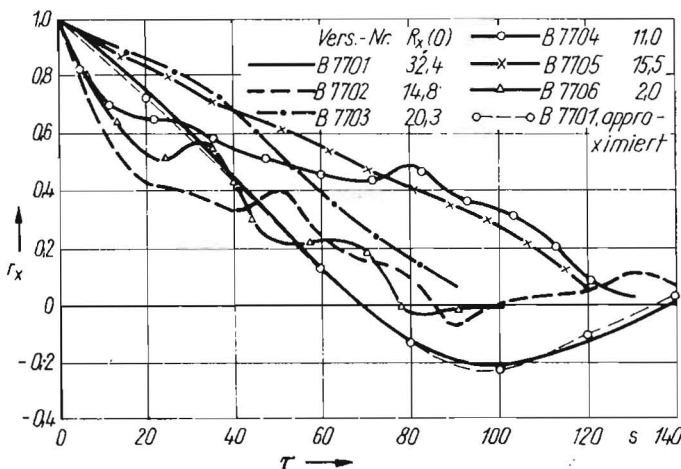
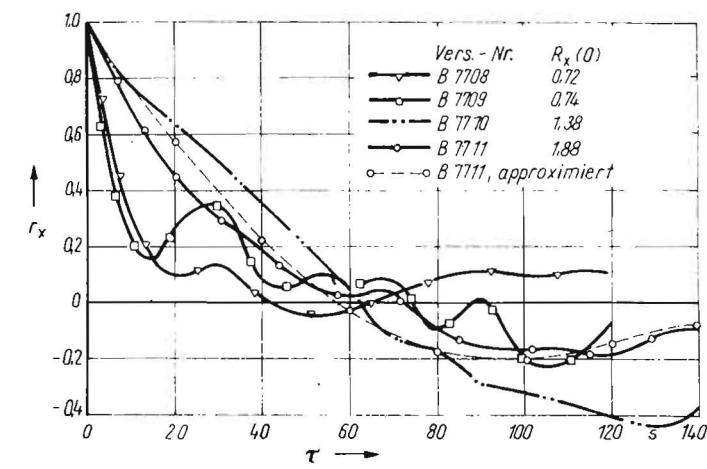


Bild 4. Autokorrelogramme für eine zu erwartende Siebfähigkeit mit kleiner Streuung



## 4. Analyse der Verteilung abschlämmbarer Teilchen

### 4.1. Statistische Verteilung

Prinzipiell ist zu erwarten, daß der Anteil abschlämmbarer Teilchen im Boden sich einer Gaußschen Verteilung annähert. Der Fehler hängt von der Anzahl der Bodenproben bzw. von der Länge der Meßstrecke ab. Aus den statistischen Angaben (Bild 2 und Tafel 3) sind drei charakteristische Gruppen erkennbar:

#### 1. Gruppe:

Große absolute Streuung mit dem Schwerpunkt um 12 Masse-% abschlämmbarer Teilchen. Sie charakterisiert hauptsächlich D- und V-Standorte, die zu mittlerer bis schwerer Siebfähigkeit tendieren.

#### 2. Gruppe:

Kleine absolute Streuung mit dem Schwerpunkt um 19 Masse-% abschlämmbarer Teilchen. Sie charakterisiert Standorte mit einheitlicher Struktur, aber hohem Anteil abschlämmbarer Teilchen (z. B. LÖ-Standorte).

#### 3. Gruppe:

Kleine absolute Streuung mit dem Schwerpunkt um 5 Masse-% abschlämmbarer Teilchen. Sie charakterisiert Standorte mit einheitlicher Struktur bei geringem Anteil abschlämmbarer Teilchen (z. B. Standorte D1, D2).

Die Eigenschaften der 1. Gruppe sind für die Einschätzung der erforderlichen Dynamik von Regelungssystemen bestimmend.

### 4.2. Korrelationsfunktion und Spektraldichte

Über die Korrelationsfunktion soll die Spektraldichte berechnet werden. Die Spektraldichte, die als Bezugsbasis die Frequenz hat, liefert die Wellenlängen der Änderungen des Arbeitsgegenstands und folglich die Kenntnisse über den erforderlichen dynamischen Umfang von Regelungssystemen. Nach [3] kann die Korrelationsfunktion  $R_x(\tau)$  näherungsweise durch die Summe

$$R_x(\tau) \approx R_x(\mu T_A)$$

$$= \frac{1}{N-\mu} \sum_{\nu=1}^{N-\mu} x(\nu T_A) x[(\nu+\mu) T_A] \quad (4)$$

$$t = \nu T_A \quad (\nu = 1, 2, \dots, N)$$

$$\tau = \mu T_A \quad (\mu = 0, 1, 2, \dots, M)$$

ersetzt und folglich aus experimentell gewonnenen Daten berechnet werden. Zur Berechnung der Spektraldichte aus der Korrelations-

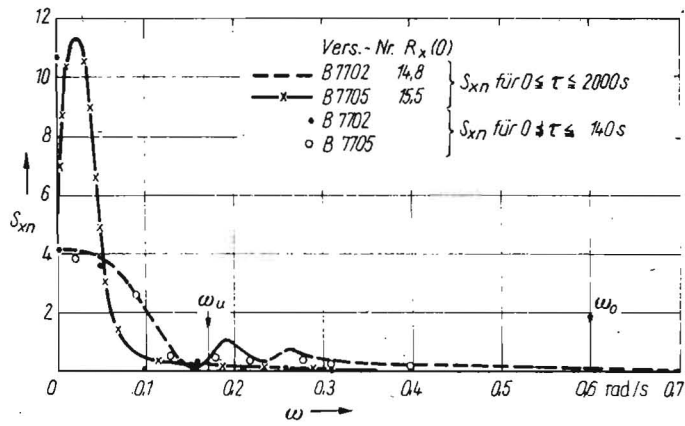


Bild 5. Spektraldichtefunktionen für eine zu erwartende Siebfähigkeit mit großer Streuung

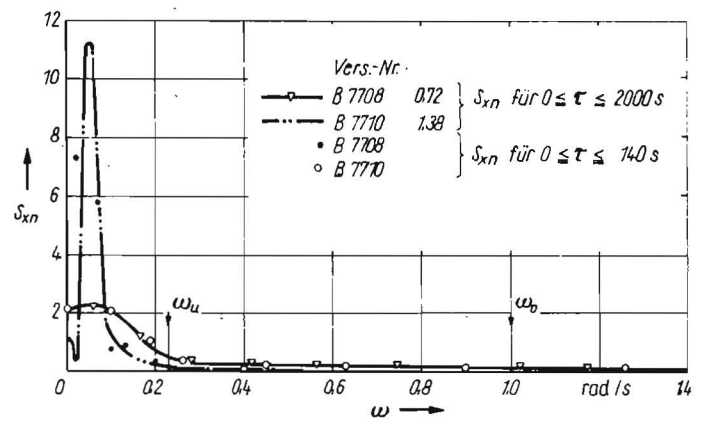


Bild 6. Spektraldichtefunktionen für eine zu erwartende Siebfähigkeit mit kleiner Streuung

Tafel 4. Grenzfrequenz und Wellenlänge der zu erwartenden Änderungen der Siebfähigkeit des Bodens im untersuchten Bereich

Größe	Mittelwert	Streuung	Maximum	Minimum
Grenzfrequenz $\omega_o$ , rad/s	0,37	$\pm 0,15$	0,6	0,17
Wellenlänge $\lambda$ , m	34	-10/+13	21	74

funktion wird in Anlehnung an [5] folgende Summenformel verwendet:

$$S_x(\omega_\mu) \approx S_x(\mu, \Delta\omega)$$

$$S_x(\mu, \Delta\omega) = \Delta\tau [R_x(0) + R_x(M \Delta\tau) \cos \mu \pi$$

$$+ 2 \sum_{v=1}^{M-1} R_x(v \Delta\tau) \cos \frac{v}{M} \mu \pi] \quad (5)$$

Die zur Fehlereinschätzung notwendigen Bedingungen sind in [3, 4] angegeben.

Die zeitliche Analyse der Verteilung der abschlämmbaren Teilchen stößt auf die Grenzen der Feldlänge für die experimentellen Untersuchungen. Die Messungen wurden über Meßstrecken von 600 bis rd. 1000 m angelegt. Aus den Korrelogrammen (Bilder 3 und 4) ist zu erkennen, daß für einen Fehler von 5% der Funktionsverlauf die Grenze  $|R_x(\tau)| \leq 0,05 |R_x(0)|$  nicht erreicht. Da Feldlängen von mehr als 3000 m im allgemeinen innerhalb der DDR nicht anzutreffen sind, wird die Korrelationsfunktion durch Gl.(6) angenähert.

$$r_x(\tau) = \frac{R_x(\tau)}{R_x(0)} \approx e^{-c_1|\tau|} \cos c_2|\tau|^{c_3}; \quad (6)$$

$c_1, c_2, c_3$  Konstanten der Approximation.

Über Gl. (6) kann mit Hilfe von Gl. (5) die Spektraldichtefunktion geschätzt werden. In den nach

$$S_{x_n}(\omega_\mu) = \frac{S_x(\omega_\mu)}{R_x(0)} \quad (7)$$

normierten Spektraldichtefunktionen ausgewählter Versuche sind durch die unterschiedliche Integrationszeit ( $\tau_{\max} = 140$  s; 2000 s) die entstehenden Fehler ersichtlich (Bilder 5 und 6). Die angegebenen Spektraldichtefunktionen charakterisieren die Versuchsgruppen mit der

schmalsten ( $\omega_u$ ) und der breitesten ( $\omega_o$ ) Bandbreite. Die Grenzfrequenzen  $\omega_u$  und  $\omega_o$  wurden nach Gl. (8) festgelegt:

$$S_{x_n}(\omega_{u,o}) \approx 0,01 S_{x_n \max}(\omega). \quad (8)$$

Nach Fourier kann jeder beliebige zeitliche Vorgang als Überlagerung von sinusförmigen Schwingungen angesehen werden. Wird diesen sinusförmigen Schwingungen die Wellenlänge nach

$$\lambda = \frac{2 v_F}{\omega} \quad (9)$$

mit der Fahrgeschwindigkeit  $v_F = 2$  m/s als Bezugswert zugeordnet, ergeben sich für die ermittelten Grenzfrequenzen die Werte nach Tafel 4.

Mit der Annahme, daß sich die Siebfähigkeit des Bodens über die aus den Grenzfrequenzen berechneten Wellenlängen derart ändert, daß eine Verstellung im Regelungssystem ansprechen muß, wären über die Wellenlänge maximal 2 Verstellungen eines Parameters erforderlich. Die Zeit  $T_p$  zwischen den erforderlichen Verstellungen berechnet sich nach Gl. (10) und ist fahrgeschwindigkeitsabhängig (Bild 7):

$$T_p = \frac{\lambda}{2 v_F} \quad (10)$$

## 5. Zusammenfassung

In Feldversuchen und theoretischen Analysen wurde der Zusammenhang zwischen dem Siebwirkungsgrad als Maß der Siebfähigkeit des Bodens und dem Anteil an Feinschluff und Ton unterhalb einer Korngröße von  $6 \mu\text{m}$  (abschlämmbare Teilchen) geprüft.

Das Ergebnis der Regressionsanalyse ist ein statistisch gesicherter, linearer Zusammenhang im untersuchten Bereich abschlämmbarer Teilchen von 7 bis 20 Masse-%. Durch die zeitliche Analyse (Untersuchung der Spektraldichte-

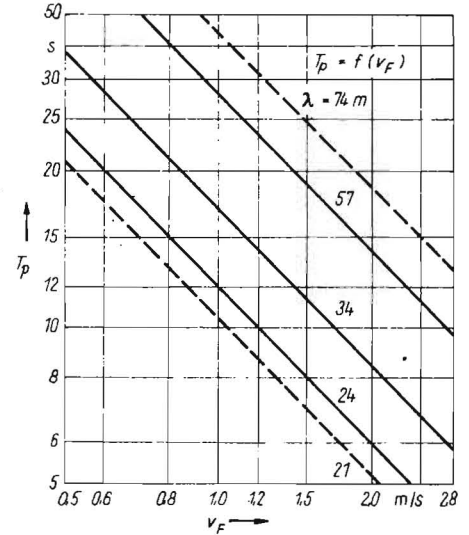


Bild 7. Zeitliche Pause zwischen den erforderlichen Verstellungen von Regelungssystemen in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit der Landmaschine

funktionen) des aus den Bodenproben ermittelten Anteils abschlämmbarer Teilchen konnte der dynamische Umfang der Änderung des Arbeitsgegenstands Boden näherungsweise bestimmt werden. Es ist mit Wellenlängen von größer als 20 m zu rechnen, innerhalb derer sich die Siebfähigkeit des Bodens derart ändert, daß Verstellungen im Regelungssystem erforderlich sind. In Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit einer Landmaschine beträgt die zeitliche Pause zwischen diesen Verstellungen mehr als 5 s.

## Literatur

- [1] Fiedler, H.J.: Methoden der Bodenanalyse, Bd. 1 Feldmethoden. Dresden: Verlag Theodor Steinkopff 1973.
- [2] Roch, F.: Untersuchungen zur Bestimmung der Absiebneigung verschiedener Bodenarten. Agraringenieurschule Haldensleben, 1977 (unveröffentlicht).
- [3] Solodownikow, W. W.: Analyse und Synthese linearer Systeme. Berlin: VEB Verlag Technik 1971.
- [4] Rake, H.: Identifizierung linearer Systeme mit statistischen Methoden. Technische Hochschule Aachen, 1969.
- [5] Rödder, P.: Systemidentifikation mit stochastischen Signalen im geschlossenen Regelkreis — Verfahren und Fehlerabschätzung. Technische Hochschule Aachen, 1973. A 2416