

KRÄFTE BEIM PLÜGEN VON STEINIGEM ACKER

Von Günter Getzlaff

„Die Technik ist bestrebt, dem Bauern sein Werkzeug und seine Maschinen so gut und so preiswert wie möglich zu liefern. Wenn der Konstrukteur sich überlegt, wie diese beiden Forderungen zu erfüllen sind, dann werden seine Gedanken immer von den Kräften ausgehen, die an den Maschinenteilen wirken. Von dem Masse, wie es gelingt, eine Konstruktion gegen diese Kräfte widerstandsfähig zu machen, werden Güte, Haltbarkeit und Preiswürdigkeit abhängen“. Diese vor langen Jahren von Kloth [1] ausgesprochenen Sätze haben auch heute noch volle Gültigkeit.

nen aufgenommen werden müssen, die ein Vielfaches der normalen betragen. Diese meist stossartigen Spitzenkräfte bestimmen die Abmessungen und die Gestalt und damit den Preis der Geräte, sofern es nicht gelingt, sie durch besondere Massnahmen abzumildern.

So sind bei der Bodenbearbeitung beim Auftreffen des Pflugschares auf ein Hindernis im Boden (Stein, Wurzel u.ä.) die Höchstkräfte um ein Vielfaches grösser als der mittlere Normalwert. Ein typisches Beispiel für den Verlauf solcher Spitzenkräfte zeigt Bild 1 für die Längskraft an einem Pflugkörper. Die Kraft hält sich zunächst in bescheidenen Grenzen

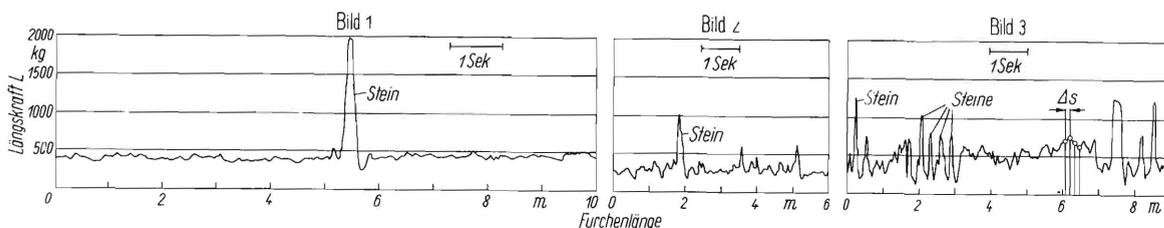


Bild 1 bis 3. Normale Betriebskräfte an einem Pflugkörper, überlagert von Störkräften.

- 1) grosses Steinhindernis im Sandboden
- 2) kleinere Steinhindernisse im Sandboden
- 3) kleinere Steinhindernisse in sandig-lehmigem Ton

Bei den seitherigen Untersuchungen [2] über die Kräfte am Pflugkörper lag der Schwerpunkt bei der Ermittlung von Mittelwerten und ihrer Änderung durch verschiedene Betriebsfaktoren. Durch die Auswertung der Messschriebe nach Mittelwerten und ihrer Streuung konnten die Gesetzmässigkeiten hinsichtlich des Einflusses von Bodenart, Körperform, Furchenbreite, -tiefe usw. auf Grösse und Richtung der auf den Pflugkörper wirkenden Kräfte und Momente klar erkannt werden. Dabei musste zunächst auf die Auswertung nach den in den Messschrieben enthaltenen Grenzwerten der Kräfte, die den Konstrukteur bei der Bemessung der Pflugteile interessieren, verzichtet werden. In der folgenden Untersuchung werden nun die eben angeführten Arbeiten durch die Feststellung der tatsächlich auftretenden Grenzkkräfte nach Grösse, Häufigkeit und Verlauf ergänzt. Die Messungen wurden an einem dreifurchigen Rahmenanhangepflug, dessen letzter Pflugkörper als Messkörper auf ein Sechskomponentenkraft-Schreibgerät arbeitet, ausgeführt [2]. Alle Messungen erfolgten ohne Pfluganlage und Schleifsohle, sowie ohne Sech-

(~400 kg) und schwankt nur wenig, um beim Auftreffen des Pfluges auf einen Stein zu einem sehr hohen Wert (im vorliegenden Fall 2000 kg) steil anzusteigen. Nach Überwinden des Hindernisses verläuft die Kraft nach einem Ausschlag in entgegengesetzter Richtung wieder im normalen Kräftebereich. Im folgenden sollen diese aussergewöhnlichen Kräfte mit „Störkräfte“ bezeichnet werden.

Als Gegenstück dazu zeigt Bild 2 Ausschnitte aus einem Schrieb, der den Verlauf der Längskraft im Sandboden während des normalen Betriebes wiedergibt. Der Boden war ebenfalls mit Steinen durchsetzt, die jedoch kleinere Abmessungen hatten (unter 30 cm ϕ), dafür aber häufiger als im Falle nach Bild 1 anzutreffen waren. Für Steinhindernisse der gleichen Art, Grösse und Anordnung wie bei dem Sandboden nach Bild 2 ist in Bild 3 ein Ausschnitt aus einem Schrieb dargestellt, der auf lehmigem Tonboden aufgenommen wurde (die Versuchsböden lagen räumlich nahe beieinander). Der Mittelwert liegt in Bild 3 höher als in Bild 2. Auch die Spitzenwerte liegen höher und treten anscheinend häufiger auf.

Versuchsdurchführung

Es ist ein besonderes Kennzeichen der Landtechnik, dass nicht nur die „normalen“ Betriebskräfte erheblich streuen, sondern darüber hinaus durch unvermeidliche Störbeanspruchungen Kräfte von den Maschi-

Die Störkräfte sind definiert als aus der engeren Umgebung herausragende steile Kraftanstiege, wie z.B. in Bild 3. In der Regel folgt einem Maximum im Kraftverlauf (Stosspitze) eine plötzliche Entlastung mit einem Minimum im Kraftverlauf. Bei der statisti-

schen Auswertung wurden Kraftintervalle bis herab zu etwa 150 kg mitgezählt.

Neben dieser reinen Zählung der Maxima und Minima ist für bestimmte Zwecke die Kenntnis der Häufigkeitsverteilung der Kraft in gleichen Wegabständen (Δs in Bild 3) von Interesse. Die Auswertung erfolgte mit einem im Institut entwickelten Auswertegerät, das die Auszählung mechanisch-elektrisch während des Nachfahrens der Kurven selbsttätig und unter gleichzeitiger Erfassung des Mittelwertes besorgte und an Zählwerken anzeigte. Zum Teil wurden die Kraftschriebe der früheren Arbeiten [2, 3, 4] zur Auswertung herangezogen.



Bild 4. Messpflug bei der Arbeit.

Bild 4 zeigt den Messpflug bei der Arbeit auf dem Acker. Der Pflugrahmen war durch einen Dreiecksverband besonders biegesteif gemacht worden. Auf Grund der Korngrößenverteilung ist nach Bild 5 der bei den Versuchen benutzte Boden K_1 ein leichter, lehmiger Sandboden (Endmoränengebiet bei Marienwohld zwischen Hamburg und Lübeck), der Boden L ein sandiger Lehm Boden (Helmstedt) und der Boden H ein sandiger bis lehmiger Tonboden (Helmstedt). Die Wassergehalte gehen aus der Zahlentafel 1 hervor.

Zahlentafel 1

Boden	Wasser Gew. %
H	14,8
K	12,6
L	11,0

Für Vergleichszwecke sind auch die Böden A bis E eingetragen, die bei den früheren Versuchen [2, 3, 4] benutzt worden sind.

Störkräfte auf Äckern mit einzelnen grossen Steinen

Die Messungen wurden im Oktober 1952 auf einem lehmigen Sandboden K_2 auf der Domäne Marienwohld durchgeführt. Die Bodenstruktur war ausserordentlich wechselnd und der Acker stark mit Steinen durchsetzt, die – entsprechend dem Endmoränencharakter dieses Gebietes – regellos verstreut in Faust- bis Denkmals-

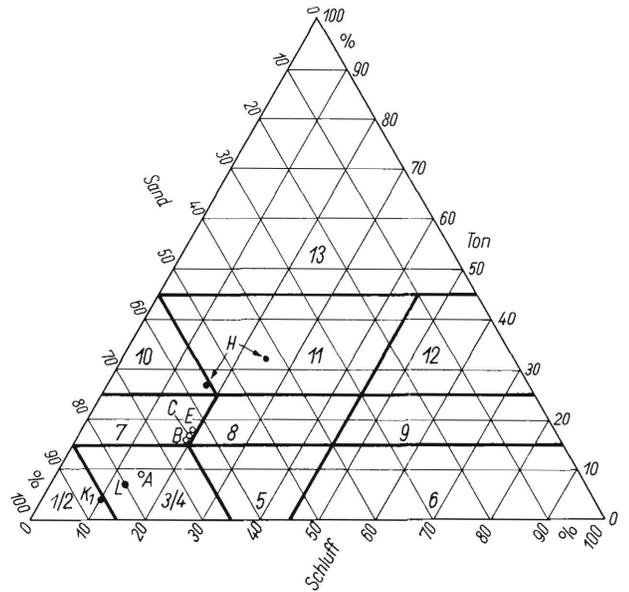


Bild 5. Die Textur der bei den Versuchen benutzten Böden H, K, L.

- | | |
|-----------------------|--------------------------|
| 1/2 lehmiger Sand | 9 schluffig-toniger Lehm |
| 3/4 sandiger Lehm | 10 sandiger Ton |
| 5 Lehm | 11 lehmiger Ton |
| 6 schluffiger Lehm | 12 schluffiger Ton |
| 7 sandig-toniger Lehm | 13 Ton |
| 8 toniger Lehm | |

grösse auftraten. Lange Steinhaufen an den Wegen als Rohstoff für den Strassenbau liessen die, von der Bodenbearbeitung aus gesehen, anormal ungünstigen Verhältnisse erkennen. Trotz eifrigen Entfernens der Steine soll im Laufe der Jahre keine merkliche Verringerung der Steine im Acker infolge des „Nachschubes“ aus dem Untergrund eingetreten sein.

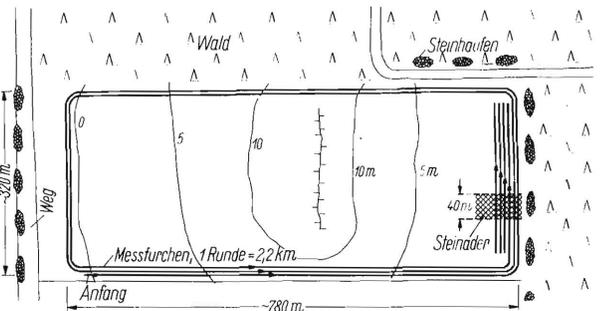


Bild 6. Lageplan und Versuchsstrecke des Versuchsackers in Marienwohld.

Kartoffelacker 25 ha
Boden K_2 : lehmiger Sand
Feuchtigkeit: 12,6 Gew. %

Der etwa 25 ha grosse Kartoffelacker war quer von einer leichten Bodenwelle durchzogen und von Wald umgeben (Bild 6). Es wurden mehrere Messfurchen rund um den Acker gezogen, wobei auf der 2,2 km langen Ackerrunde, dem leichten Boden entsprechend, sehr gleichmässige Schriebe ohne wesentliche Spitzenkräfte entstanden. Es wurden kaum Steine angetroffen; nur in einem Gebiet an der etwas abschüssigen Waldseite wurde eine quer zur Fahrtrichtung verlaufende Steinader von etwa 40 m Breite durchfahren, wobei sehr erhebliche Kräfte im Pflug auftraten. Beim mehrmaligen Durchfahren rutschte zeit-

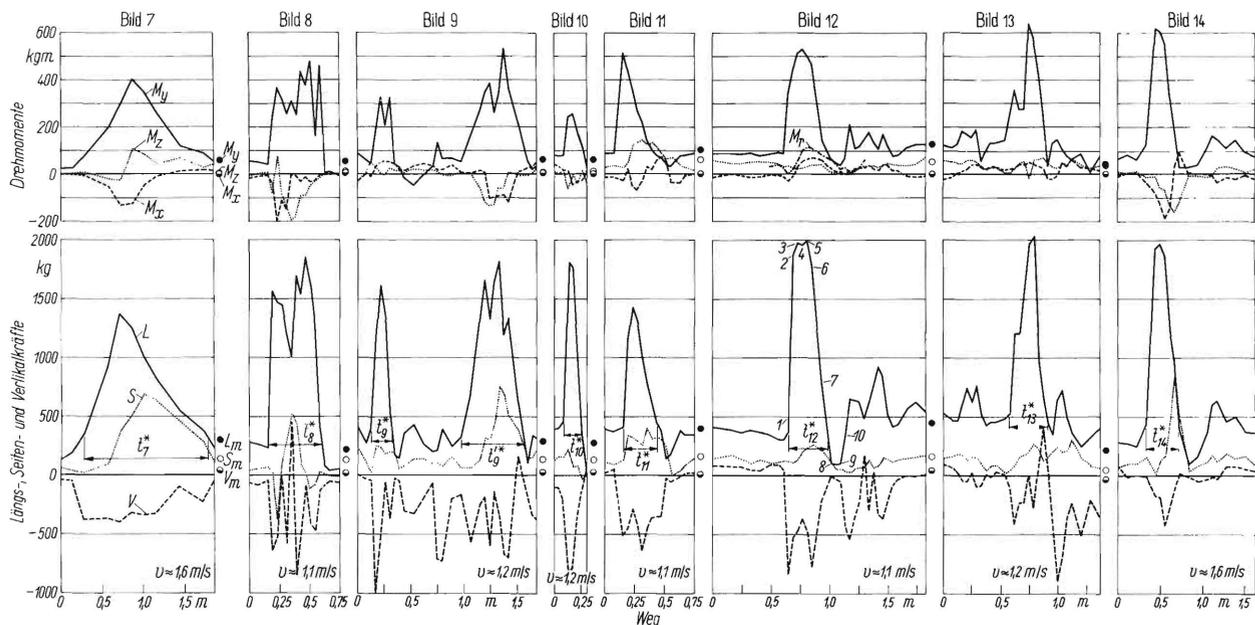


Bild 7 bis 14. Beispiele von Störkräften beim Auftreffen auf Steine

ausgezogene Kurven: Längskraft L bzw. M_y um die Querachse
 punktierte Kurven: Seitenkraft S bzw. M_z um die Hochachse
 gestrichelte Kurven: Vertikalkraft V bzw. M_x um die Längsachse
 (Bezugspunkt O für die Momente siehe in Bild 5 des folgenden Aufsatzes)

Bild	7	8	9	10	11	12	13	14
Pflugkörper	L-Form				S-Form			
Furchenbreite b (in cm)	27				20	25		
Furchentiefe t (in cm)	23				25			
Bodenart	K_2 (ähnlich K_1)				K_1 (lehmiger Sand)			
Geschwindigkeit v (in m/s)	1,6	1,1	1,2	1,2	1,1	1,1	1,2	1,6
Störzeit t^* (in s)	0,94	0,46	0,15 0,47	0,14	0,25	0,28	0,27	0,24

Die Kreispunkte am Rande der Diagramme geben die Grösse der jeweiligen mittleren Betriebskräfte auf steinfreiem Boden an.

weise das Pflugschar des ersten Körpers auf den Steinen so hoch, dass sich das Pflugende heraus hob und das hintere Stützrad fast einen Meter über dem Boden in der Luft hing, wobei der Pflug um die Längsachse gedreht wurde und zu kippen drohte.

Bild 7 bis 14 zeigen eine Auswahl besonders charakteristischer Stössspitzen aus den Messschrieben. Als Zugkraft diente bei diesen Messungen ein Gespann aus einer 40 PS-Haupe zuzüglich eines 45 PS-Radschleppers, um mit Sicherheit so grosse Zugkräfte zur Verfügung zu haben, wie sie in der Praxis nur ausnahmsweise vorkommen. Die Fahrgeschwindigkeit betrug 1 bis 1,6 m/s.

Für die Versuche nach Bild 7 bis 10 wurde eine liegende Pflugkörperform (L-Form [3]) bei einer Furchenbreite $b = 27$ cm und einer Furchentiefe $t = 23$ cm verwendet; die Versuche nach Bild 11 bis 14 wurden an einer steilen Pflugkörperform (S-Form [2]) mit $b = 20$ cm und $t \approx 25$ cm ausgeführt. Die letzteren Versuche wurden ebenfalls in Marienwohldede auf einem lehmigen, lockeren Sandboden K_1 gefahren; bei diesem Acker (ehemalige Kiesgrube) waren die Steine als Einzelhindernisse verstreut vorhanden.

Im unteren Teil von Bild 7 bis 14 sind über dem Weg bzw. der Zeit die drei Kräfte L , V und S , und im oberen Teil die entsprechenden Momente M_x , M_y und M_z aufgetragen. Der Abzissenmassstab ist so gewählt, dass die Zeit bei allen Darstellungen im gleichen Massstab erscheint, die Kraft- bzw. Momentenanstiege also vergleichbar sind. Die im steinfreien Teil der Äcker jeweils gemessenen Mittelwerte sind ebenfalls in die Darstellungen eingetragen.

Schon beim ersten Überblick zeigt sich, dass beim Auftreffen auf ein Steinhindernis die Längskraftkomponente bei weitem am grössten ist, wobei Maximalwerte von etwa 2000 kg erreicht werden. Die Kraft steigt sehr plötzlich (stossartig) an, um nach Erreichen eines Höchstwertes ebenso schnell wieder abzufallen, wobei häufig eine Entlastung bis nahezu Null beobachtet werden kann (z.B. in Bild 8, 10, 12 und 14). Dieses Minimum findet seine Erklärung darin, dass das ganze System vom Schlepperreifen bis zur Scharspitze beim Auftreffen auf ein Hindernis federnd gespannt wird und nach Überwinden des Hindernisses ein geringes Vorschleunigen des angehängten Gerätes bewirkt.

Die Vertikalkraft ist bei nahezu allen Messungen negativ, d.h. am Körper von unten nach oben wirkend. Man hat sich in der Regel den Vorgang wie folgt vorzustellen: Das Pflugschar stösst gegen einen Stein, bewirkt das Ansteigen der Längskraft L und gleitet danach über den Stein hinweg, wobei die negative Vertikalkraft V ansteigt. Erfolgt je nach Lage des Steines zum Schar auch ein seitliches Abdrängen, dann beginnt auch die Seitenkraft S anzusteigen. Dieses zeitliche Nacheilen der Kräfte S ist häufig zu beobachten; Beispiele dafür zeigen Bild 7, 9 und 14. Das Zusammenspiel der drei Kraftkomponenten kann also je nach den Verhältnissen variieren, wobei auch positive Werte der Vertikalkraft V auftreten können, die nur zufällig in keiner Messung vertreten waren. In diesem Fall wird der Stein vom Schar unterfahren, wodurch bei genügender Steingrösse sehr grosse Momente M_y um die Querachse denkbar sind; die Längskraft ist dabei durch die verfügbare Schlepperzugkraft (Rutschen der Reifen) oder durch Sicherheitsglieder begrenzt. Beschädigungen des Gerätes vermeidet man im allgemeinen nur durch Zurückstossen des Pfluges oder Ausgraben des Steines. Weicht der Pflug durch Aufgleiten nach oben dem Stein aus, dann werden die Kräfte natürlich auch durch das Pfluggewicht und die auftretenden Hebelarme, mit dem dieses angreift, beeinflusst. Diese Verhältnisse sind bei dem Messpflug besonders ungünstig (anormale Länge, zusätzliches Gewicht durch Messgerät und Pflugverstärkung).

Die gemessenen Maximalwerte sind $L = 2000$ kg, $V = -1020$ kg und $S = 780$ kg.

Bei den Momenten nach Bild 7 bis 14 spielt das Moment M_y um die Querachse (Biegebeanspruchung des Rumpfes) eine ähnlich vorherrschende Rolle wie die Längskraft L unter den Kraftkomponenten. Als Maximalwert wurde $M_y = 640$ kgm (Bild 13) gefunden. Grosse Biegemomente M_y und grosse Längskräfte L brauchen nicht zusammenzufallen, da jedes Moment von jeweils zwei Kräften und ihrer räumlichen Lage abhängt. So ist z.B. die Stösspitze L in Bild 13 von einem sehr hohen Moment $M_y = 640$ kgm begleitet, während bei einer nahezu gleichgrossen Längskraft in Bild 10 nur ein Moment von $M_y = 250$ kgm auftritt.

Die anderen beiden Momente M_x und M_z sind wesentlich niedriger und schwanken zwischen positiven und negativen Werten. Als Grenzwerte wurden $M_x = +100$ bis -270 kgm und $M_z = +150$ bis -200 kgm gefunden. Es ist bei der Wertung aber zu bedenken, dass diese Momente in Ebenen auftreten, in denen die Pflugkörperperrümpfe wesentlich kleinere Widerstandsmomente haben, sodass beachtliche Spannungen entstehen können. Bezüglich der Steilheit der Stösspitzen liess sich zwischen den beiden Geschwindigkeiten $v = 1,1$ und $1,6$ m/s kein Unterschied feststellen (Bild 12 und 14). Der ganze Stössvorgang dauert $t =$ etwa $2/10$ bis $9/10$ Sekunden. Die Zeit für den eigentlichen Stoss vom Auftreffen auf den Stein bis zum Maximum der

Kraft liegt in der Grössenordnung von $1/20$ Sekunde. In dieser kurzen Zeit müssen also eingebaute Sicherheitsvorrichtungen ansprechen, wenn sie ihren Zweck erfüllen sollen. Arbeiten sie zeitlich träger, dann muss auch weiterhin mit Schäden gerechnet werden. Der bei den Messungen benutzte Pflug war mit einem Sicherheitszughaken ausgerüstet, der in keinem Falle zum Ansprechen kam, auch dann nicht, wenn Steine unterfahren wurden (leider nie durch den Messkörper!), die das Antriebsgespann Raupe + Schlepper zum Durchrutschen bzw. Stillstand zwangen. Dafür gingen mehrere kräftige Glieder der Anhängerkette zu Bruch, bzw. es wurde die Körperhalterung des mittleren Körpers herausgerissen. Beispiele, die zeigen, dass auf dem Gebiet der Sicherheitsglieder noch einiges getan werden muss. Die übrigen Nachteile einfacher Sicherheitszughaken (umständliche zeitraubende Bedienung usw.) gaben den Anstoss zu einer eifrigeren Entwicklung, die noch nicht abgeschlossen ist.

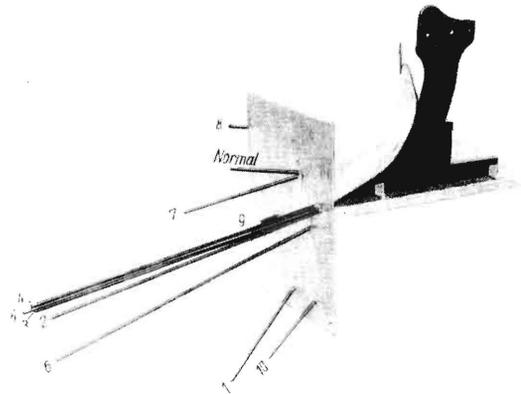


Bild 15. Modell von dem räumlichen Verlauf des resultierenden Kraftvektors bei jeweils kleinstem Restmoment (Kraftschraube).

Die Kraftvektoren (1 bis 10) sind in diesem Modell ihrer Grösse, Richtung und Lage zum Pflugkörper dargestellt und veranschaulichen die Zusammensetzungen der Kraft- und Momentenkomponenten der entsprechenden Stellen in Bild 12. Die Restmomente sind in Bild 12 oben als Kurve dargestellt.

Um einen Einblick in die räumliche Lage der Gesamtergebnisse zu geben, wurde am Beispiel der Stösspitze in Bild 12 die Kraftkomponenten L , V und S und die Komponenten M_x , M_y und M_z an den Stellen 1 bis 10 zur jeweiligen Kraftschraube (resultierender Kraftvektor samt dem kleinstmöglichen Restmoment) zusammengesetzt und die resultierenden Kraftvektoren (1 bis 10) in Bild 15 in einem räumlichen Modell in ihrer Lage zum Pflugkörper dargestellt. Das resultierende Restmoment M_r geht aus Bild 12 hervor. Die Stablänge in Bild 15 entspricht der Grösse des jeweiligen Kraftvektors. Man erkennt, wie der Erhöhung der Längskraft eine Erhöhung der Vertikalkraft vorausgeht (Punkt 1 und 2 in Bild 15). Auch die Wanderung der Kraftangriffspunkte auf dem Streichblech ist einigermassen zu erkennen.

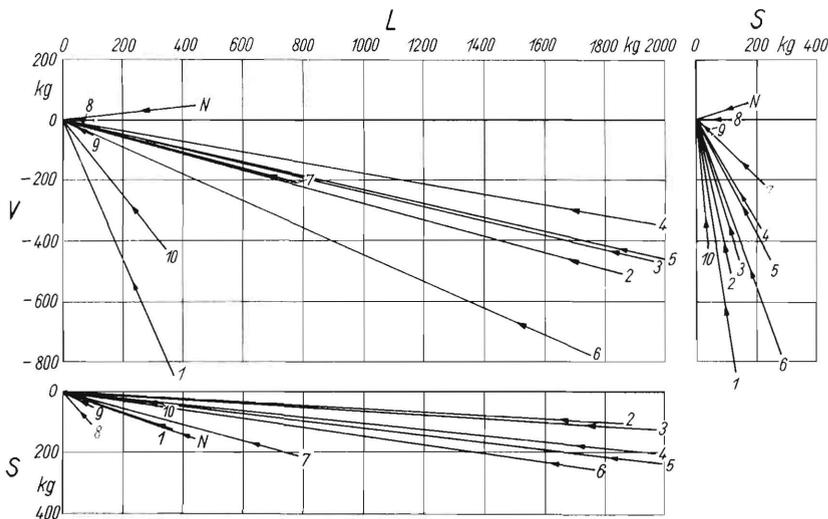


Bild 16. Darstellung der resultierenden Kraftvektoren in Bild 15 als Komponenten L , V und S in einem Koordinatensystem.

Richtung und Grösse der resultierenden Kraftvektoren können diesem Bild entnommen werden. Die Lage zum Pflugkörper ist infolge der parallelen Verschiebung in den Koordinatennullpunkt unterdrückt.
N mittl. normale Betriebskraft (ohne Hindernisse)

Verzichtet man auf die Darstellung der räumlichen Lage der Kraftvektoren zum Pflugkörper und fasst die Vektoren in einem Koordinatensystem O durch parallele Verschiebung zusammen, so erhält man Bild 16, das eine gute Übersicht über die Grösse und Richtung der Komponenten der resultierenden Kräfte gibt. Um auch ein Beispiel für das Auftreten negativer Seitenkräfte zu zeigen, sind in Bild 17 die resultierenden Kraftvektoren der Störbeanspruchung nach Bild 8 gezeigt. Die Einwirkung auf die Seitenkraft kann im Seitenriss gut verfolgt werden.

Will man von den hier ermittelten hohen und seltenen Kräften auf die Beanspruchungen der betroffenen Bauteile schliessen, so muss dies nach den Gesetzen der Gewaltbrüche oder Verbiegungen vorgenommen werden.

Störkräfte auf Äckern mit zahlreichen kleinen Steinen

Unter Störkräften dieser Art sollen die Grenzwerte der Kräfte verstanden werden, die laufend durch aufbrechende Schollen oder auch kleinere Steine (< 25 bis 30 cm Φ) in den Diagrammen aus den normalen Betriebskräften herausragen. Versuche in dieser Richtung wurden im trockenen Herbst 1951 auf einem sandigen Lehmboden L und einem sandigen bis lehmigen Tonboden H in Mariental bei Helmstedt vorgenommen. Die Textur ist aus dem Dreieck-Diagramm nach Bild 5 zu ersehen. Verwendet wurde ein Normkörper M 25 (mittelsteile Form mit 25 cm Nenntiefe). Der Pflug wurde von einem 40 PS-Radschlepper gezogen.

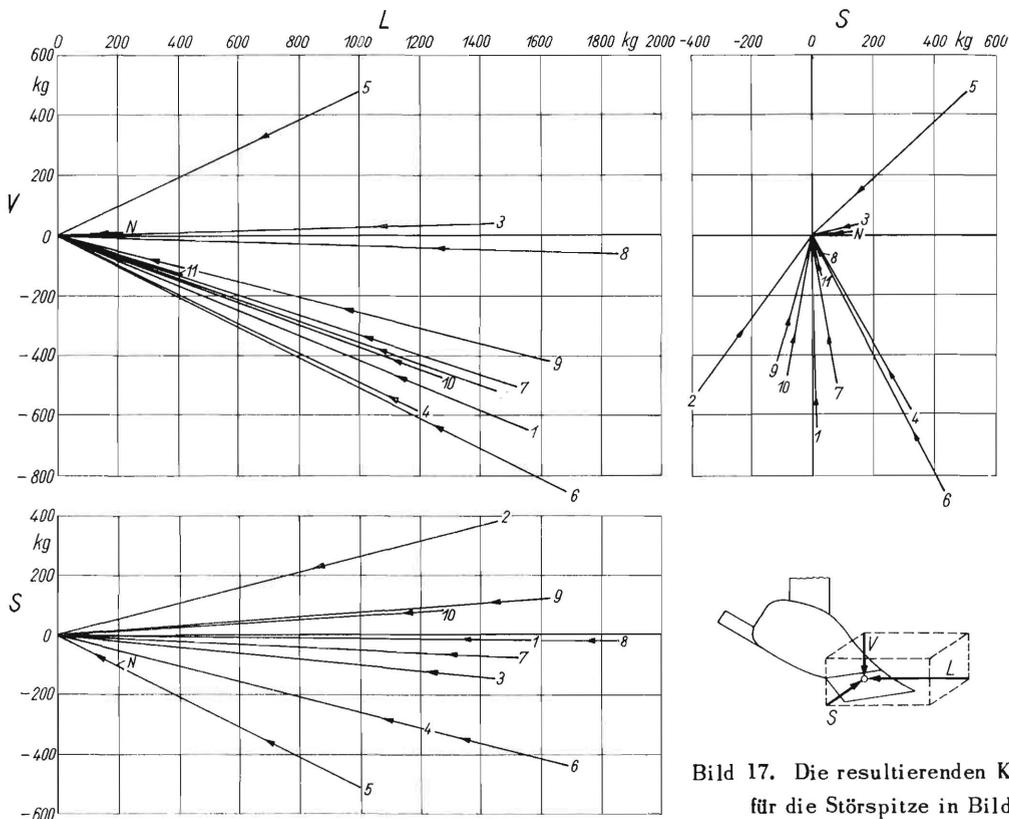


Bild 17. Die resultierenden Kraftvektoren für die Störspitze in Bild 8.

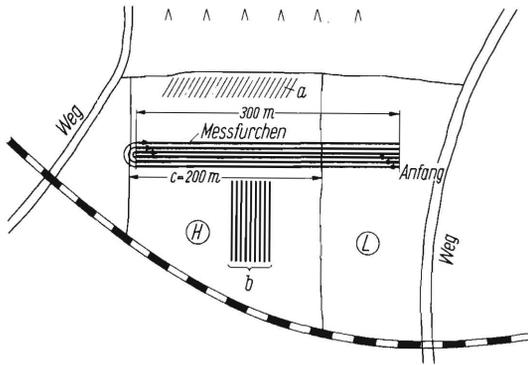


Bild 18. Lageplan und Versuchsstrecke des Versuchsaackers in Mariental bei Helmstedt.

Der Versuchsacker (Bild 18) war ein etwa 8 ha grosser, ebener, horizontaler Plan (Weizenstoppel), aus dem eine 300 m lange Messstrecke ausgewählt wurde. Auf Grund der Bodenproben sowie der Mittelwertauswertungen liess sich die Strecke in zwei Gebiete unterteilen. Ein Drittel der Länge rechts war lockerer, sandiger Lehmboden (Boden L), an den sich unvermittelt eine breite Schwelle lehmigen Tonbodens (Boden H) anschloss, die quer zur Messrichtung durch den Acker zog. Im schraffierten Gebiet a am Feldrand war nach Angaben der Bewirtschafter jedes Jahr mit Pflugkörperbrüchen oder anderen Schäden durch Steinhindernisse zu rechnen. In Bild 19 kann man die sehr scholligen Erdbrocken des lehmigen Tonbodens H erkennen.



Bild 19. Schollige Struktur des gepflügten lehmigen Tonbodens H in Mariental.

Als Beispiel dafür, dass auch durch kleinere Steine während des Betriebes bedeutende Beanspruchungen auftreten können, zeigt Bild 20 einen Ausschnitt aus dem Kräfte- und Momentenverlauf, wie er bei Auflaufen auf einen Stein von etwa 20 cm ϕ im Boden H auftrat. Die Furche war nur 12 cm tief, die Geschwindigkeit klein (0,6 m/s). Der Grund für die hohen Kräfte ist in der Einbettung der Steinhindernisse in den zäh-harten, lehmigen Ton zu suchen. Bemerkenswert ist der negative Ausschlag der Seitenkraft S (in Richtung zum gepflügten Boden) bei a, wodurch bei b ein heftiger negativer Ausschlag des Drehmomentes M_x (Drehen

um die Längsachse durch das Ausweichen des Körpers) bewirkt wurde.

Die Grösse und Häufigkeitsverteilung der Störkräfte der Längskraftkomponente L zeigen Bild 21 und 22 für einen Furchenquerschnitt, zwei verschiedene Geschwindigkeiten und zwei Bodenarten. Die Gesamtzahl n der aufgetretenen Störkräfte sind in den Diagrammen angegeben. Beim Vergleich der beiden Darstellungen ergeben sich folgende Unterschiede:

- 1) Auf leichtem Boden ist die maximale, wie die häufigste Störkraft bei derselben Geschwindigkeit kleiner als beim schweren Boden,
- 2) die Erhöhung der Geschwindigkeit wirkt sich bei demselben Boden in einer Erhöhung der Störkräfte aus.

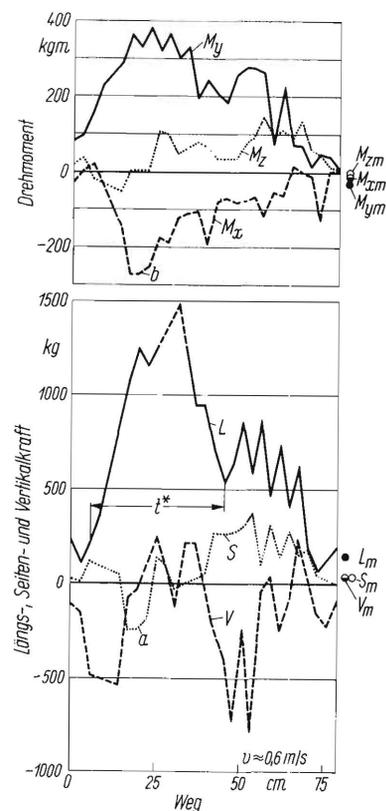


Bild 20. Störkräfte beim Auftreffen auf einen kleineren Stein im lehmigen Tonboden H (s.a. Bild 7 bis 14).

Normkörper M 25	
Furchenbreite	$b = 20 \text{ cm}$
Furchentiefe	$t = 12 \text{ cm}$
Geschwindigkeit	$v = 0,6 \text{ m/s}$
Störzeit	$t^* = 0,64 \text{ s}$

Die zahlenmässigen Unterschiede dieser beiden Einflüsse auf die Störkräfte sind in Zahlentafel 2 zusammengestellt.

Den Kraftschrieben wurden im vorstehenden die Maxima und Minima der Störkräfte, ihre absolute und relative Verteilung einschliesslich der häufigsten Werte, sowie die Mittelwerte der „normalen“, d.h. auf steinfreiem Boden gemessenen Betriebskräfte entnommen. Man kann die Diagramme jedoch noch in anderer Richtung, je nach der Zielsetzung, auswerten.

Zahlentafel 2. Stör- und Betriebskräfte

	$v = 1 \text{ m/s}$		$v = 1,6 \text{ m/s}$	
	Boden L	Boden H	Boden L	Boden H
grösste gemessene Störkraft L_{\max} [kg]	1040	1260	1080	1310
häufigste Störkraft L_h [kg]	360	440	430	500
Anzahl der Störkräfte	121 auf 100m	882 auf 200m	170 auf 100m	647 auf 200m
häufigstes Minimum [kg]	130	210	240	275
häufigster Wert bei Δs -Auswertung [kg]	190	285	300	360
mittl. Betriebskraft L_m [kg] auf störungsfreiem Boden	185	345	220	400
L_{\max}/L_m	$\sim 5,6$	$\sim 3,7$	$\sim 5,0$	$\sim 2,6$
L_h/L_m	$\sim 2,0$	$\sim 1,3$	$\sim 2,0$	$\sim 1,3$

In Bild 23 sind für die Messung auf dem sandigen bis lehmigen Tonboden H die Ergebnisse verschiedener Auswertungsmethoden einander gegenübergestellt. Die (gestrichelte) Kurve der Häufigkeitsverteilung der Störkräfte L ist die gleiche wie in Bild 22. Die punktierte Kurve ist die Verteilung der entsprechenden Minima, die durch die kurzzeitige Entlastung nach Störbeanspruchungen auftreten. Die Längskraftschwankungen bei Störungen treten nach diesem Bild am häufigsten zwischen 275 und 500 kg auf (Häufigkeit zwischen 12 und 16 %).

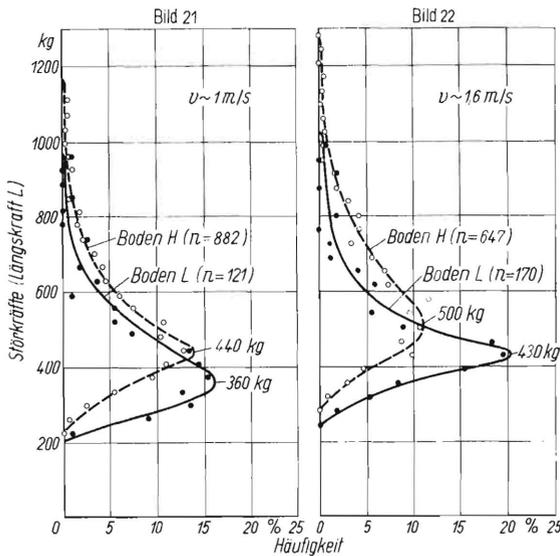


Bild 21 und 22. Einfluss der Bodenart und der Fahrgeschwindigkeit auf die Grösse und Verteilung der Störkräfte.

Normkörper M 25
Boden H: sandiger bis lehmiger Ton
Boden L: sandiger Lehm
Furchenbreite $b = 26 \text{ cm}$
Furchentiefe $t \approx 23 \text{ cm}$
Klassenbreite etwa 40 kg
 n Anzahl der Störkräfte auf 200 m (Boden H) bzw. 100 m (Boden L) Furchenlänge
Die jeweils häufigsten Störkräfte sind eingetragen.

Die ausgezogene Kurve in Bild 23 ist die Häufigkeitsverteilung der Längskraft L , die man bei der statistischen Auszählung der Längskräfte beim Fortschreiten in gleichen Wegabständen Δs (Bild 3) erhält. Der Abstand Δs zweier benachbarter Werte betrug bei dieser Auswertung etwa 3 cm Pflugweg. Dieser geringe Abstand war notwendig, um die Maxima bei Störungen genügend sicher zu erfassen. Der prozentuale Anteil der Maxima und Minima ist bei der grossen Anzahl von Zwischenwerten ($n = 13285$) natürlich sehr viel kleiner, als wenn diese nur auf die Gesamtzahl der Grenzwerte allein bezogen werden. Der häufigste Wert liegt mit 360 kg nahezu in der Mitte zwischen dem häufigsten Wert der Maxima und dem der Minima und liegt etwas niedriger als der Mittelwert $L_m = 400 \text{ kg}$.

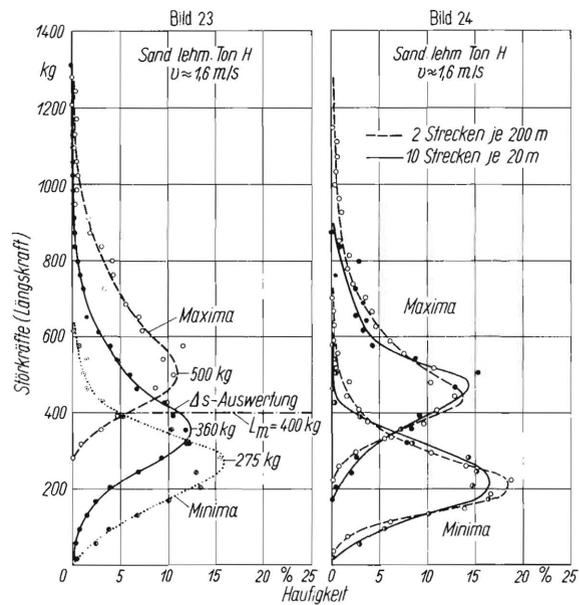


Bild 23. Verschiedene Auswertungsmethoden der Messschriebe am Beispiel der Längskraft L .

Bild 24. Einfluss der Versuchsdauer auf die Gestalt der Häufigkeitskurven.

Während die Kenntnis der Grösse und Zahl der Störkräfte für die Beurteilung der Festigkeit von Bauteilen von Wert ist, wird die Δs -Auswertung z.B. bei Verschleissfragen gute Dienste leisten.

Dass derartige Häufigkeitskurven zuverlässig genug sind, um sichere Schlüsse z.B. für die Konstruktion zu ziehen, ist in Bild 24 gezeigt, in dem die Ergebnisse von zwei getrennt ermittelten Verteilungen der Störkräfte L auf zwei verschiedenen Flächen desselben Ackers einander gegenübergestellt sind. Die gestrichelten Maxima- und Minimalkurven der Längskraft L ergaben sich aus den Messungen auf der zweimal durchfahrenen, 200 m langen Versuchsstrecke c (Bild 18). Die gestrichelte Kurve der Maximaverteilung ist identisch mit der entsprechenden in Bild 21. Die ausgezogenen Maxima- und Minimalkurven der Längskraft L wurden aus Messungen auf der Fläche b (Bild 18) mit 10 je 20 m langen Teilstrecken ermittelt. Man erkennt,

dass sich beide Kurvengruppen weitgehend decken. Die Form der relativen Häufigkeitskurven hat sich also durch die verschieden langen Versuchsstrecken nicht wesentlich geändert, ein Zeichen dafür, dass der Acker in seiner Struktur an diesen Stellen einheitlich war, und die gewählten Versuchsstrecken für die statistische Auswertung lang genug waren.

Die in Bild 21 und 22 dargestellten Versuchsergebnisse sind in Bild 25 in Form von Summenkurven der Häufigkeit der Störkräfte je km Pflugweg wiedergegeben. Die Kurven unterstreichen die oben angegebene Tendenz: die Anzahl und die Grösse der je km Pflugweg zu erwartenden Störkräfte wächst sowohl mit dem Bodenwiderstand der untersuchten Böden, als auch

tragen. Hierbei wurde angenommen, dass die bearbeitete Ackerfläche im Jahr 1,3 mal gepflügt wird (Zwischenfruchtbau, Schälén).

Nach Bild 26 beträgt beispielsweise die Anzahl der Störkräfte, die bei einem gesamten Pflugweg von 15 000 km grösser als 860 kg sind:

bei $v = 1,6$ m/s und Boden L: $0,7 \times 10^6$ Lastwechsel
 bei $v = 1,6$ m/s „ „ H: $2,0 \times 10^6$ „
 bei $v = 1,0$ m/s „ „ H: $1,6 \times 10^6$ „

Wird in einem Betrieb von 100 ha mit einem 35 PS-Schlepper zweifurchig tiefgepflügt, dann ergibt sich bei einer vorgegebenen Lebensdauer von 10 Jahren für jeden Pflugkörper (50 ha) nach Bild 27 ein Pflug-

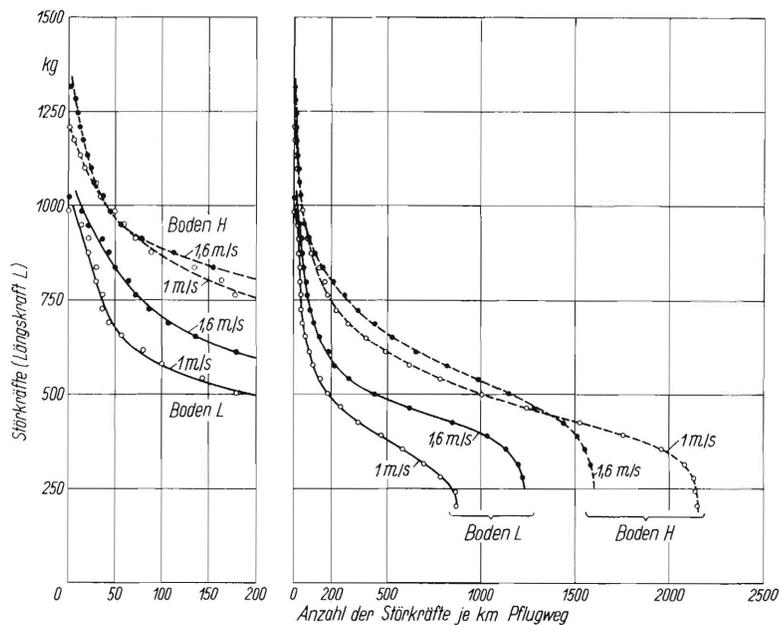


Bild 25. Summenkurven der Störkräfte je km Pflugweg auf verschiedenen Böden und bei verschiedener Geschwindigkeit. Versuchskörper, Furchenquerschnitt usw. wie in Bild 21 und 22.

mit der Geschwindigkeit. Wie aus Zahlentafel 3 zu ersehen ist, scheint der Einfluss der Geschwindigkeit auf das Anwachsen der Zahl der Störspitzen recht gross zu sein.

Zahlentafel 3

Anzahl der Störspitzen in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit und Bodenart

	$v = 1$ m/s		$v = 1,6$ m/s	
	Boden L	Boden H	Boden L	Boden H
Anzahl der Störspitzen von L grösser als 800 kg je km Pflugweg	29	62	149	207

Um einen Überblick über die Grössenordnung der während der Lebensdauer eines Pfluges zu erwartenden Störspitzen (Schwellasten) zu erhalten, wurden die in Bild 25 ermittelten Summenkurven auf grössere Zeiträume umgerechnet (Bild 26). In Bild 27 ist der theoretische Pflugweg eines Pflugkörpers (Arbeitsbreite: 25 cm) in Abhängigkeit von der Grösse der bearbeiteten Fläche und der Benutzungsdauer in Jahren aufge-

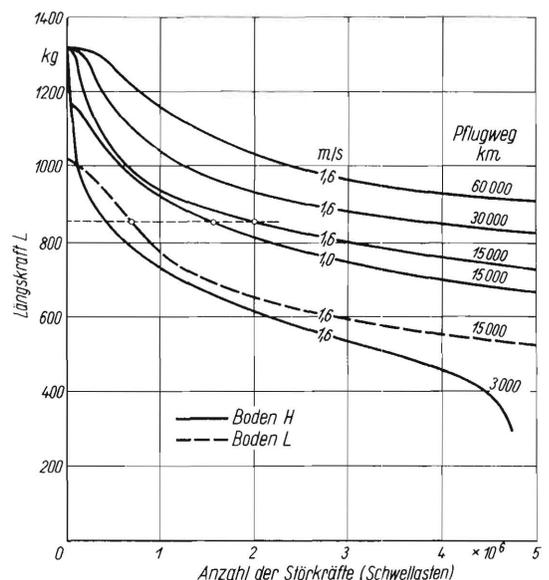


Bild 26. Summenkurven der Störkräfte in Abhängigkeit von der Benutzungsdauer (s.a. Bild 25 und 27).

Boden H: sandiger bis lehmiger Ton
 Boden L: lehmiger Sand

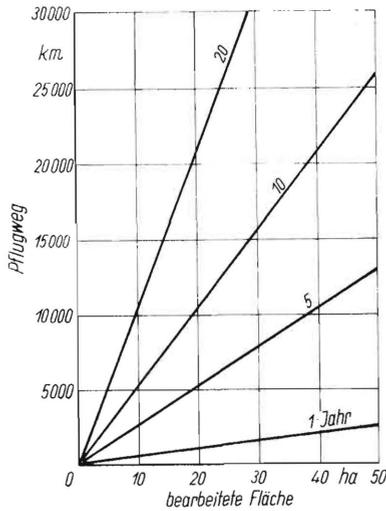


Bild 27. Pflugweg in Abhängigkeit von der bearbeiteten Fläche und der Benutzungsdauer für einen Pflugkörper mit der Arbeitsbreite $b = 25$ cm.

weg von 26 000 km. Wird dieser Weg in dem Boden H mit 1,6 m/s Geschwindigkeit (3. Gang) zurückgelegt, dann hat man mit einer Verteilung der Störkräfte etwa nach der Summenkurve für 30 000 km Pflugweg (Bild 26) zu rechnen, d.h. es treten annähernd 5×10^6 Lastwechsel mit Schwelllasten grösser als 800 kg auf, die bis 1300 kg anwachsen. Diese für einen Pflugkörper geltenden Lastwechselzahlen müssen bei mehrfurchigen Pflügen sinngemäss vervielfacht werden. Will man von den hier ermittelten kleineren, aber sehr

häufigen Kräften auf die Beanspruchung der betroffenen Bauteile schliessen, so muss dies nach den Gesetzen der Dauerfestigkeit vorgenommen werden.

Zusammenfassung

Die seltener auftretenden, durch grosse Hindernisse im Boden ausgelösten „aussergewöhnlichen“ Störkräfte verursachen in einer sehr kleinen Zeitspanne besonders hohes, stossartiges Ansteigen der Längskraft (gemessen: bis 2000 kg in 0,04 Sek., das entspricht dem 10fachen Mittelwert bei steinfreiem Boden). Die entsprechenden Seiten- und Vertikalkräfte können je nach Lage des Hindernisses positiv oder negativ sein. Auch die Momente werden bei Störungen erheblich beeinflusst, wobei das Moment M_y um die Querachse zahlenmässig am grössten ist (bis 640 kgm), die anderen Momente M_x und M_z sind kleiner.

Die zweite Gruppe der Störkräfte, die während des Pflügens durch kleinere, aber häufiger vorkommende Hindernisse ausgelöst werden, wurden auf Sand- und Tonböden ermittelt. Diese Störkräfte entsprechen nach Grösse und Häufigkeit einer *Gauss'schen* Normalverteilung.

Es zeigte sich, dass ausser mit grösser werdendem Bodenwiderstand auch mit wachsender Geschwindigkeit die Störkräfte ansteigen. Bei der Längskraft wurden „normale“ Störkräfte bis zum 5,5fachen der mittleren Kraft beim störungsfreien Pflügen gemessen.

Schrifttum

- [1] Kloth, W.: Kräfte, Beanspruchungen und Sicherheiten. In: RKT-Schrift 71. Berlin 1936. S. 7/11.
- [2] Getzlaff, G.: Messung der Kraftkomponenten an einem Pflugkörper. In: Grundlg. d. Landtechn. Heft 1. Düsseldorf 1951. S. 16/24.
- [3] Getzlaff, G.: Über die Bodenkräfte beim Pflügen bei verschiedener Körperform und Bodenart, In: Grundlg. d. Landtechn. Heft 3. Düsseldorf 1952. S. 60/70.
- [4] Getzlaff, G.: Änderung der Kräfte bei Drehung der Pflugkörper aus der Normallage. In: Grundlg. d. Landtechn. Heft 3. Düsseldorf 1952. S. 71/74.

Institut für Landtechnische Grundlagenforschung
der Forschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode
Direktor: Prof. Dr.-Ing. W. Kloth

Anschrift des Verfassers: Ing. Günter Getzlaff, (20b) Braunschweig, Bundesallee 50