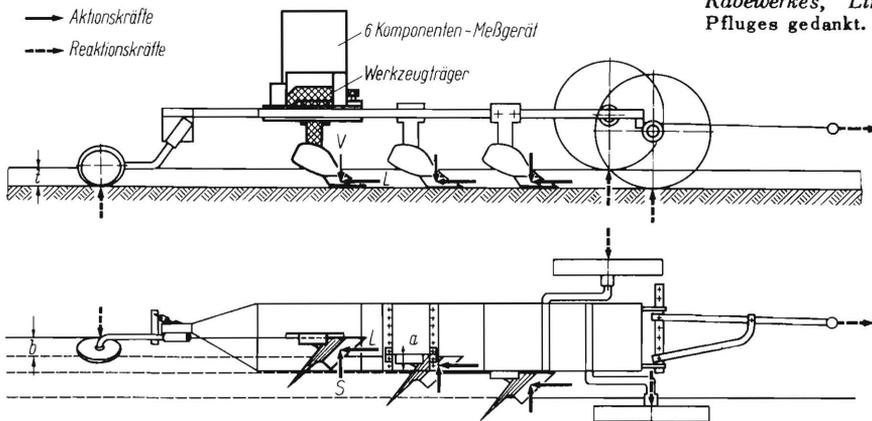


MESSUNG DER KRAFTKOMPONENTEN AN EINEM PFLUGKÖRPER

Von Günter Getzlaff

Die Entwicklung von Pflugkörpern wird seit jeher empirisch vorgenommen, wobei man zur Beurteilung ihrer Brauchbarkeit die geleistete Wende- und Krümmelarbeit subjektiv beobachtet und daneben auch die Zugkraft ermittelt. Zugkraftmessungen bildeten die einzige objektive Aussage über die Wirkung eines Pflugkörpers. Vielfach musste in Kauf genommen werden, dass mit der Zugkraft nur ein Bruttoüberblick über das ganze Gerät gegeben war, weil in der gemessenen Zugkraft sowohl die Sohlen- und Anlagenkräfte als auch – bei Rahmen- oder Karrenpflügen – der Rollwiderstand der Räder mit enthalten war.

Für die Weiterentwicklung der Pflugkörperformen zur Erreichung von optimalen Verhältnissen zwischen



Leistungsaufwand und technologischem Arbeitserfolg, für die festigkeitgerechte Formgebung der der Pflugkonstruktionen, für die kinematische Beherrschung des Kräftespieles bei Einstellung und Steuerung von Anbaupflügen u.a. wird es notwendig sein, sich ein möglichst objektives und umfassendes Bild von dem Zusammenspiel der Kräfte am Pflug und am Pflugkörper unter den verschiedenen Arbeitsbedingungen zu verschaffen.

Über den Einfluss der Arbeitsbedingungen auf die Zugkraft hat man sich schon früher Gedanken gemacht [1]; für die Messung von Größe und Richtung der am Pflugkörper wirksamen Kräfte, sowie der resultierenden Bodenwiderstandskraft hat zuerst Kühne [2] eine fahrbare Sechskomponenten-Messeinrichtung im Landmaschineninstitut der Technischen Hochschule München gebaut, mit der seine Mitarbeiter von Poncet in der Bodenrinne [3] und Schreyer auf dem Acker [4] eine Reihe von Untersuchungen durchgeführt haben. Die Einrichtungen fielen leider dem Kriege zum Opfer.

Die nachstehenden Messungen erfolgten ausschliesslich auf dem Acker unter den in der Praxis üblichen Bedingungen. Dadurch konnte sowohl die Größe der tatsächlich im Betrieb auftretenden Kräfte als auch deren Streuung ermittelt werden.

A. Messeinrichtung und Versuchsdurchführung

Für die Messungen wurde ein Sechskomponentenmessgerät¹⁾ in Verbindung mit einem dreischarigen Rahmenanhängepflug²⁾ in der in Bild 1 dargestellten Anordnung benutzt. Die Pflugkörper können gegen andere Körper und Bodenbearbeitungswerkzeuge ausgetauscht werden. Der dritte Pflugkörper war mit dem Sechskomponentenmessgerät fest verbunden, wobei sich die 6 hydraulischen Druckmessdosen dieses Gerätes gegen den Pflugrahmen abstützten. Die Druckmessdosen sind dabei so in einem rechtwinkligen Koor-

- 1) Die Messeinrichtung wurde von K. Thormählen entwickelt, der auch einen Teil der Erprobung durchgeführt hat.
- 2) Es sei an dieser Stelle Herrn Heinrich Clausing, Inhaber des Rabewerkes, Linne für die freundliche Überlassung des Pfluges gedankt.

Bild 1. Schema des Messpfluges.
Der dritte Pflugkörper ist mit dem Messrahmen des Sechskomponentengerätes fest verbunden.

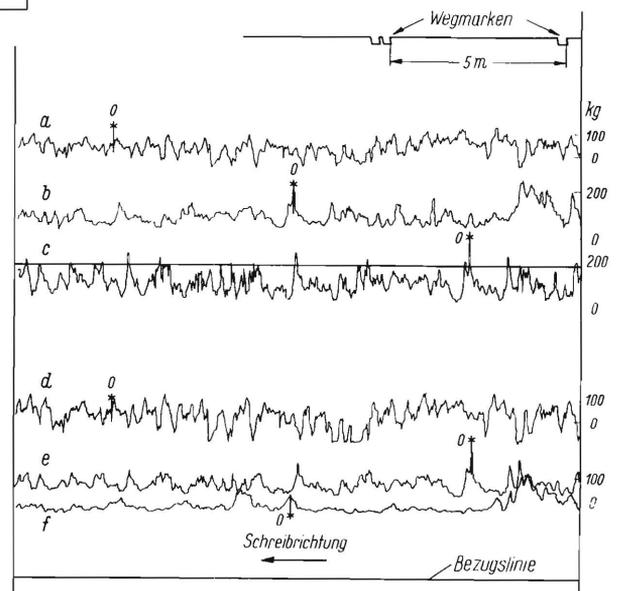


Bild 2. Ausschnitt aus einem Messschrieb. Beispiel für eine durchschnittliche Streuung der gemessenen Kräfte.

- a Seitenkraftkomponente, oben am Messgerät
- b Längskraft
- c Vertikalkomponente, vorne am Messgerät
- d Seitenkraftkomponente, unten am Messgerät
- e Vertikalkomponente, hinten am Messgerät
- f Seitenkraftkomponente, hinten am Messgerät
- O zeitlich zugeordnete Punkte in den einzelnen Messschrieben.

dinatensystem angeordnet, dass ihre Kraftwirkungslinien parallel zur Richtlinie und senkrecht zu den beiden Richtebenen des Pflugkörpers³⁾ sind. Die Kräfte auf den Pflugkörper verursachen entsprechende Druckänderungen in den ölgefüllten Messdosen. Diese Druckänderungen werden von 6 Indikatoren gleichzeitig auf einem elektrisch angetriebenen Wachspapierstreifen registriert, wovon Bild 2 einen Ausschnitt als Beispiel zeigt. Die Synchronisierung mit der 20 m langen Messstrecke geschah auf dem Papierstreifen durch Wegmarken, die alle 5 m nach Messlatten von Hand gegeben wurden. Die Furchentiefe wurde von Hand in Abständen von 2,5 m gemessen und für die 5 m langen Teilversuchsstrecken gemittelt. Der mittlere Körper des Pfluges liess sich quer zur Fahrtrichtung verschieben, wodurch die Arbeitsbreite des Versuchspflugkörpers bequem geändert werden konnte.

Sämtliche Messergebnisse, über die hier berichtet wird, sind mit einem Pflugkörper auf einem Boden unter folgenden Bedingungen ermittelt worden:

1. Schmalschnittkörper, steile Form, mit einer Arbeitsbreite $b_n = 20$ cm und einer Arbeitstiefe $t_n = 22$ cm³⁾,
2. Schnittwinkel des Schares $\delta_1 = 31^\circ$ (Bild 3), entsprechend der Fabrikeinstellung des Pflugkörpers,
3. ohne Anlage und ohne Sohle,
4. ohne Sech und Vorschäler, mit Streichschiene,
5. scharfes Schar (Schnabelschar),
6. Geschwindigkeit: $v = 3,6$ km/h bzw. 1 m/s,
7. mittelschwerer Lehmboden (Ort: Helmstedt; Vorfrucht: Erbsen),
8. Bodenfeuchte: 10 Gew. % (d. h. trocken).

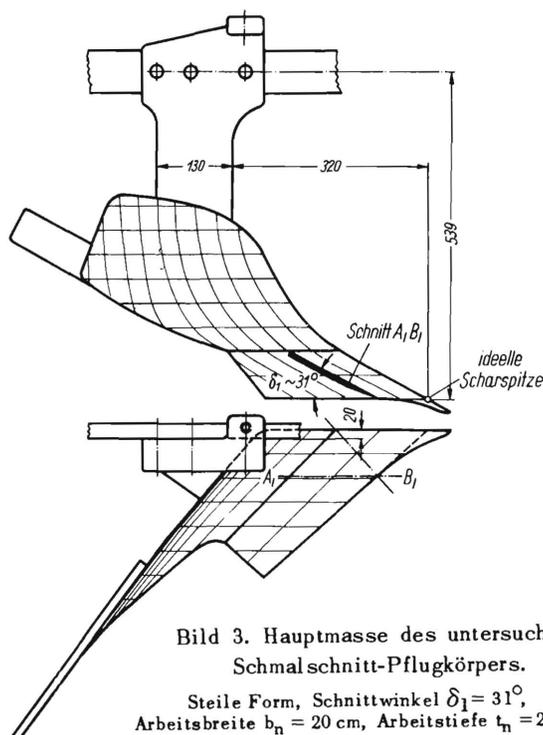


Bild 3. Hauptmasse des untersuchten Schmalschnitt-Pflugkörpers.

Steile Form, Schnittwinkel $\delta_1 = 31^\circ$,
Arbeitsbreite $b_n = 20$ cm, Arbeitstiefe $t_n = 22$ cm

Der Arbeitserfolg hinsichtlich Krümelung und Wendung entsprach in dem gemessenen Arbeitsbereich den landwirtschaftlichen Anforderungen. In den Messergebnissen sind entsprechend der obigen Versuchsanordnung nicht enthalten:

- a) eine Sohlen- und Anlagenreibung, da ohne Sohle und Anlage gearbeitet wurde,
- b) der an den drei Rädern auftretende Rollwiderstand.

Denkt man sich einen Pflugkörper durch den Boden gezogen, dann übt der erfasste „Bodenbalken“ räumlich verteilte Kräfte auf den Körper aus, die nicht zu einer resultierenden Gesamtkraft zusammengefasst werden können. Sie lassen sich im vorliegenden Fall durch ein Kraftkreuz ersetzen, d. h. durch zwei sich im Raumkreuzende, aber nicht schneidende Kräfte. Dieses Kraftkreuz kann nach den Regeln der räumlichen Statik in beliebig viel andere, gleichwertige Kraftkreuze oder in eine Kraft und ein Moment umgeformt werden [5]. Besonders aufschlussreich ist die Umformung zu einer Kraftschraube, da diese der Wirkung der resultierenden Einzelkraft am nächsten kommt. Die Kraftschraube vereinigt die räumlichen Kräfte zu einer resultierenden R und dem kleinstmöglichen Restmoment M_r , wirksam als Drehmoment um diese resultierende Kraft. Die Richtung ihrer Wirkungslinie (Zentralachse genannt) wird in der Projektion auf die senkrechte Richtebene³⁾ durch den Winkel α und in der Projektion auf die waagerechte Richtebene durch den Winkel β nach Bild 4 festgelegt. Es ist $\text{tg } \alpha = V/L$ und $\text{tg } \beta = S/L$.

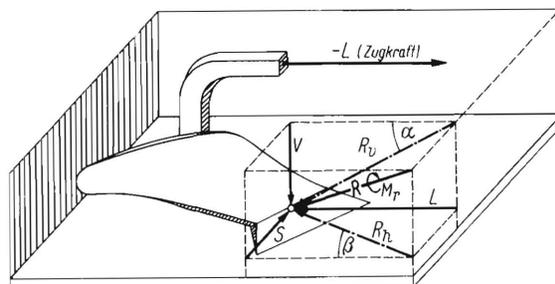


Bild 4. Zerlegung der resultierenden Bodenkraft R in die Längskraft L , die Vertikalkraft V und die Seitenkraft S .

Entsprechend diesem Bild wird die auf den Pflugkörper wirkende resultierende Kraft R in folgende drei Richtungen zerlegt,

in die Längskraft L = die in Längs- bzw. Fahrtrichtung wirkende Kraftkomponente. Die Gegenkraft wird im allgemeinen mit Zugkraft bezeichnet;

in die Vertikalkraft V = die vom Boden ausgeübte, abwärts gerichtete Kraftkomponente;

in die Seitenkraft S = die quer zur Fahrtrichtung ausgeübte Kraftkomponente, die den Körper gegen die Furchenwand drücken will.

3) Begriffe u. Benennungen nach DIN 11118 über Pflugkörper.

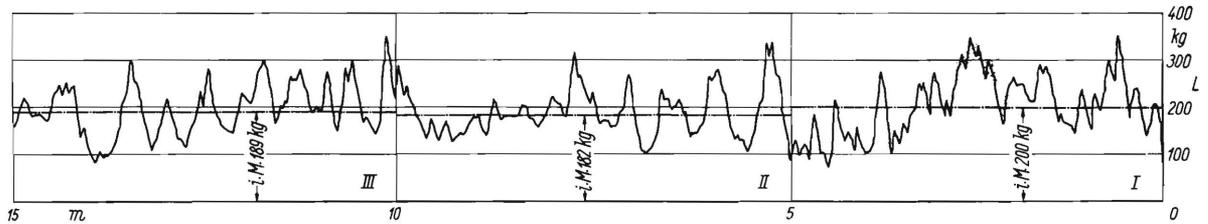


Bild 5. Auswertung eines Messchriebes. Beispiel für eine extrem grosse Streuung der gemessenen Kraft.
Messchrieb der Längskraft L für $b = 25$ cm und $t = 23,5$ cm i. M.

Die Kräfte in der senkrechten Richte ebene werden zusammengefasst zur Teilresultierenden R_v und die Kräfte in der waagerechten Richte ebene zur Teilresultierenden R_h .

B. Auswertung der Messchriebe

Bild 5 zeigt einen Messchrieb der Längskraft L über eine Versuchsstrecke von 15 m. Für je 5 m Furchenlänge wurde der jeweilige Mittelwert der Kraft bestimmt (Wert I, II und III) und in die graphische Darstellung Bild 6 über der zugehörigen Furchentiefe als Messpunkt eingetragen. Der sich dabei ergebende Streubereich der Mittelwerte wird in diesem

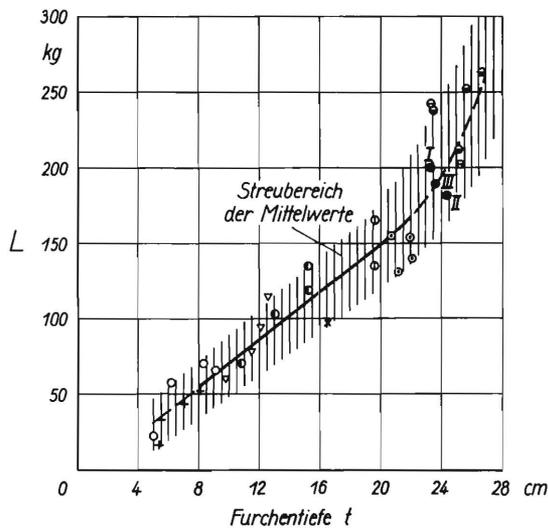


Bild 6. Auswertung eines Messchriebes. Längskraft L in Anhängigkeit von der Furchentiefe t für $b = 25$ cm. Die Punkte I, II und III sind die Mittelwerte aus Bild 5. Der listenmässige Arbeitsbereich des untersuchten Pflugkörpers ist durch den ausgezogenen Teil der Kurve gekennzeichnet.

Bild durch das schraffierte Feld gekennzeichnet; mittlere Verhältnisse werden durch die eingezeichnete Kurve ausgedrückt.

Der Versuchsacker war wenig homogen; dann und wann wurden tonige und harte Stellen angetroffen. Der Streubereich der Kräfte kann in diesem Falle als extrem gross angesehen werden, während Bild 2 das Beispiel eines Messchriebes zeigt, dessen Schwankungen etwa den durchschnittlich beobachteten entsprechen.

Wie in diesem Beispiel der Längskraft L werden in den folgenden Abschnitten die gemessenen Ergeb-

nisse dargestellt und besprochen. Um die Tendenz der Gesetzmässigkeiten hervortreten zu lassen, sind die Auslegedaten des Pflugkörpers ($b_n = 20$ cm, $t_n = 22$ cm) bewusst über- und unterschritten worden. Dadurch wurde ein umfassender Einblick in die Gesetzmässigkeiten des Kraftflusses für eine Körperform und eine Bodenart gewonnen. Der durch Schraffur dargestellte Streubereich erfasst in allen Darstellungen etwa 95% der so festgestellten Mittelwerte, wobei in der Regel aus Übersichtsgründen die Einzelwerte nicht eingezeichnet worden sind. Die Messungen wurden jeweils mit konstant gehaltener Furchenbreite durchgeführt, während die Furchentiefe in Stufen geändert wurde.

Diese und alle ihr entsprechenden folgenden Darstellungen geben also die auf den Teilmessstrecken bestimmten Mittelwerte und deren Streuung wieder. In Wirklichkeit aber pendelt die gemessene Kraft ständig um die jeweiligen Mittelwerte und über- oder unterschreitet diese zum Teil erheblich.

C. Gültigkeitsbereich der ermittelten Werte

Bei Betrachtung der im folgenden dargestellten Diagramme muss also berücksichtigt werden, dass es sich nur um Mittelwerte der gemessenen Kräfte handelt, die in Wirklichkeit auch einmal erheblich überschritten werden können. Dies kann z.B. bei Festigkeitsbetrachtungen von Bedeutung sein. Es ist möglich, dass sich die Aussagen später durch verfeinerte Auswertungsmethoden präzisieren lassen. Vorläufig mögen sie als Ausdruck gewisser Tendenzen hingenommen werden.

Beispielsweise kann das aufgenommene Diagramm in Bild 5 in genügend kleine Abschnitte unterteilt

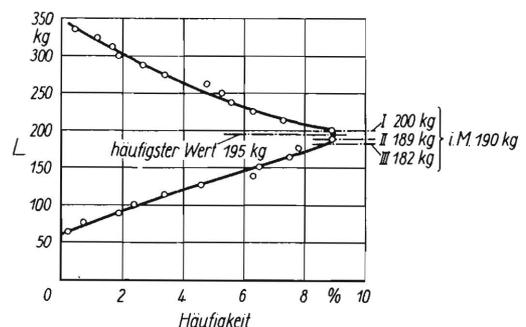


Bild 7. Auswertung eines Messchriebes. Häufigkeitskurve der Längskraft L nach Bild 5 bei Unterteilung des Diagrammes in gleich kleine Wegabschnitte.

werden und dann für diese Abschnitte die Längskraft L nach Grösse und Häufigkeit ihres Vorkommens bestimmt werden. Es ergibt sich eine der Gauss'schen Verteilung ähnliche Häufigkeitskurve (Bild 7), deren häufigster Wert bei $L = 195 \text{ kg}$ liegt. Daneben können Werte zwischen 60 kg und 340 kg in der aus dieser Kurve zu entnehmenden Häufigkeit auftreten. Bemerkenswert ist die Eindeutigkeit des häufigsten Wertes, ausgedrückt durch die ausgeprägte Spitze der Häufigkeitskurve. Dieses hinsichtlich der Gleichmässigkeit zweifellos besonders ungünstige Beispiel zeigt, dass unter den vorliegenden Verhältnissen mit Schwankungsbeträgen der Spitzenwerte von -70 bis $+80\%$ um den Mittelwert ($= 100\%$) gerechnet werden muss.

D. Die Grösse der Kräfte

Die Abhängigkeit der Längskraft L vom Furchenquerschnitt für verschiedene Furchenbreiten zeigt Bild 8. Die schraffierten Flächen stellen den Streubereich der Mittelwerte dar; die eingezeichneten Kurven kennzeichnen mittlere Verhältnisse.

Die Streufelder der Mittelwerte von L liegen praktisch für alle Arbeitsbreiten übereinander. Die Längskraft nimmt linear mit dem Furchenquerschnitt zu bis zu einem Punkt, von dem ab eine weitere Vergrößerung des Furchenquerschnitts mit einem steileren Anstieg der Längskraft verbunden ist. Ver-

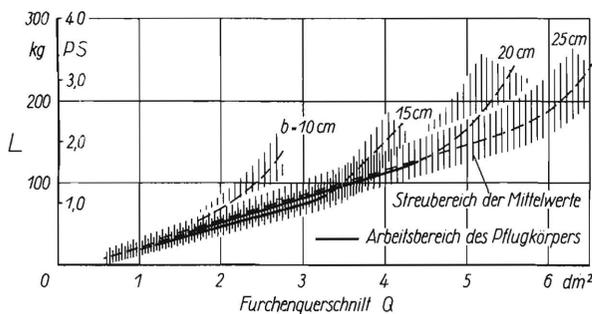


Bild 8. Längskraft L und Leistungsbedarf des Pflugkörpers in Abhängigkeit vom Furchenquerschnitt bei verschiedener Furchenbreite. Pflugkörper ohne Anlage und Sohle und ohne Sech. Mittelschwerer Lehmboden, 10 Gew.% Feuchtigkeit (trocken), $v = 1 \text{ m/s}$.

mutlich liegt dort, worauf noch zurückzukommen sein wird, die seitherige Bearbeitungstiefe. Für mittlere Verhältnisse ($Q = 4 \text{ dm}^2$ und $b = 18 \text{ cm}$) ergibt sich ein Leistungsaufwand von $\sim 1,5 \text{ PS}$ (Bild 8).

Noch klarer zeigt sich die Belastung des Pflugkörpers an dem Verlauf der Längskraft L über der Furchentiefe t für verschiedene Furchenbreiten (Bild 9). Bei Tiefen bis $t = 20 \text{ cm}$ ist die Zunahme von L für alle Furchenbreiten linear („Proportionalitätsbereich“), über 20 cm Arbeitsbreite erfolgt bei allen Breiten ein steiler Anstieg der Kurven.

Wie oben dargelegt wurde, ist jeder Kurve auf ihrer ganzen Länge ein Streubereich der gemessenen Mittelwerte zugeordnet (vergl. auch Bild 6), über dessen Grösse Bild 9 rechts (L über b für $t = 10$

bzw. 20 cm) Aufschluss gibt. Die Zuordnung erläutert das eingezeichnete Beispiel für $b = 20 \text{ cm}$, wobei sich in beiden Bildern die Streuungen s_1 und s_2 ergeben. Für andere Furchenbreiten kann sinngemäss verfahren werden. Diese Art der Angabe des Streubereichs ist auch in den folgenden Darstellungen beibehalten worden. Ebenso sind in allen Diagrammen die Kurven, die dem Auslegebereich des Pflugkörpers ($b = 15$ bis 20 cm und $t = 8$ bis 22 cm) entsprechen, stark ausgezogen.

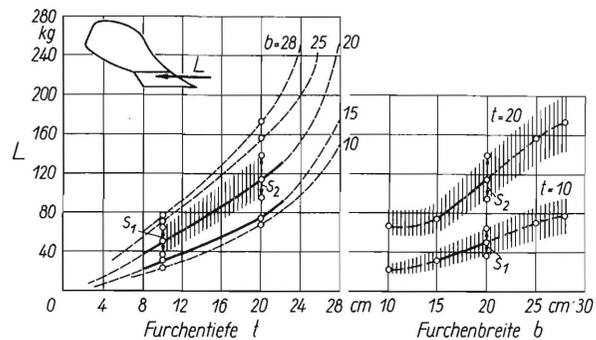


Bild 9. Längskraft L über Furchentiefe t und Furchenbreite b . Die Zuordnung des Streubereiches der Mittelwerte (schraffiertes Gebiet) ist anhand des Beispiels für die Streuungen s_1 und s_2 erläutert.

(Die eingezeichneten Kreise und die entsprechenden in den folgenden Darstellungen sind keine Messpunkte).

Über die Ursache des steileren Kurvenanstieges bei grösseren Tiefen können zwei Erklärungen angeführt werden: Der Boden wird unterhalb einer Tiefe von $t = 20 \text{ cm}$ härter, weil dort die normale Bearbeitungstiefe überschritten wird; dafür spricht, dass die Lage des Knicks bei allen Breiten etwa von dieser Tiefe ab beginnt. Oder aber der Körper ist überlastet und schafft die grossen Bodenmengen nicht mehr weg; dagegen spricht, dass der Knick bei grösseren Breiten nicht schon früher eintritt. Es sei aber darauf hingewiesen, dass von Poncet auch in dem homogenen Boden der Bodenrinne einen solchen Knick festgestellt hat.

Die Grösse der Vertikalkraft V in Abhängigkeit von der Furchentiefe zeigt Bild 10. Im Arbeitsbereich des Pflugkörpers ($t = 8$ bis 22 cm) steigt V mit zunehmender Tiefe, ebenso wie die Längskraft L , linear an. Bei grösseren Furchentiefen durchschreitet V ein Maximum und nimmt wieder ab. Bei Fur-

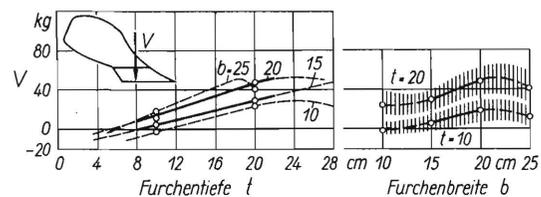


Bild 10. Vertikalkraft V über Furchentiefe t und Furchenbreite b .

chentiefen unter 10 cm kehrt sich die Richtung von V um, d.h. die Vertikalkraft ist nach oben gerichtet. Das erklärt sich daraus, dass die gemessene Vertikalkraft die Resultierende aus zwei entgegenge-

setzt gerichteten Kräften ist: aus den abwärts gerichteten Kräften des „Bodenbalkens“ (Hub- und Beschleunigungsarbeit usw.) und den aufwärts gerichteten Widerstandskräften, die der Boden dem Eindringen des Pflugkörpers entgegensetzt (z.B. Vertikalkomponente des Scharschneidewiderstandes). Da bei kleinen Tiefen dieser Anteil überwiegt, ist V nach oben gerichtet.

Die Vertikalkräfte V sind wesentlich kleiner als die entsprechenden Längskräfte L (vergl. Bild 9 und 10). Das Verhältnis beider Kräfte zueinander zeigt Bild 11. Die Kurven gleicher Furchenbreite haben ein Maximum bei mittleren Tiefen, wobei angenähert $V = 0,4 L$ ist.

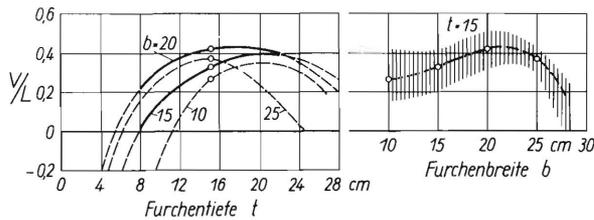


Bild 11. Verhältnis der Vertikalkraft zur Längskraft (V/L) über Furchentiefe und Furchenbreite.

Auch die Seitenkraft S steigt im Arbeitsbereich des Körpers linear mit der Furchentiefe an (Bild 12). Bei grösseren Furchentiefen erfolgt, ähnlich wie bei L, ein steilerer Anstieg der Seitenkräfte. Die Seitenkräfte S sind ebenfalls kleiner als die entsprechen-

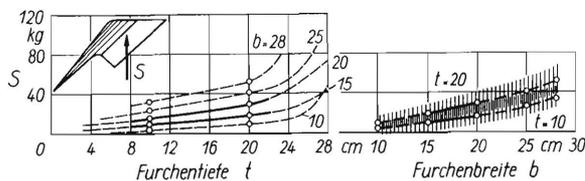


Bild 12. Seitenkraft S über Furchentiefe und Furchenbreite.

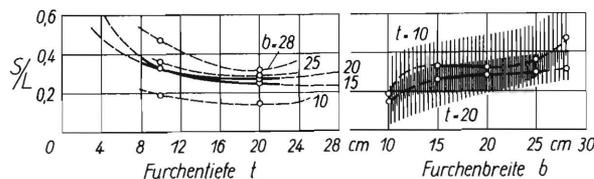


Bild 13. Verhältnis der Seitenkraft zur Längskraft (S/L) über Furchentiefe und Furchenbreite.

den Längskräfte. Das Verhältnis S/L ändert sich im Arbeitsbereich des Pflugkörpers nur wenig, wie aus dem flachen Kurvenverlauf in Bild 13 zu ersehen ist. In diesem Bereich ist angenähert $S = 0,3 L$.

E. Die Richtung der Kräfte in der Vertikal- und Horizontalebene

Anhand von Bild 4 wurde dargelegt, dass sich alle auf den Pflugkörper wirkenden Bodenkraft zu einer Kraftschraube vereinigen lassen, deren Richtung sich in der Projektion auf die Vertikalebene durch die geometrische Summe von L und V ergibt.

In Bild 14 (oben) wurden in dem L-V-Diagramm (für $b = 15 \text{ cm}$) die zugeordneten Kräfte L und V zu der Teilresultierenden R_v vektoriell addiert, wobei die eingezeichneten Punkte den Streubereich der Vektorspitze R_v darstellen. Die Verbindungslinie jedes einzelnen Messpunktes mit dem Nullpunkt des Diagramms gibt die Grösse und Richtung der jeweiligen Teilresultierenden R_v an. Die Neigung von R_v wird durch den Winkel α gegen die Horizontale ausgedrückt. Die gezeichnete Kurve gibt die Lage der Vektorspitze unter mittleren Verhältnissen an.

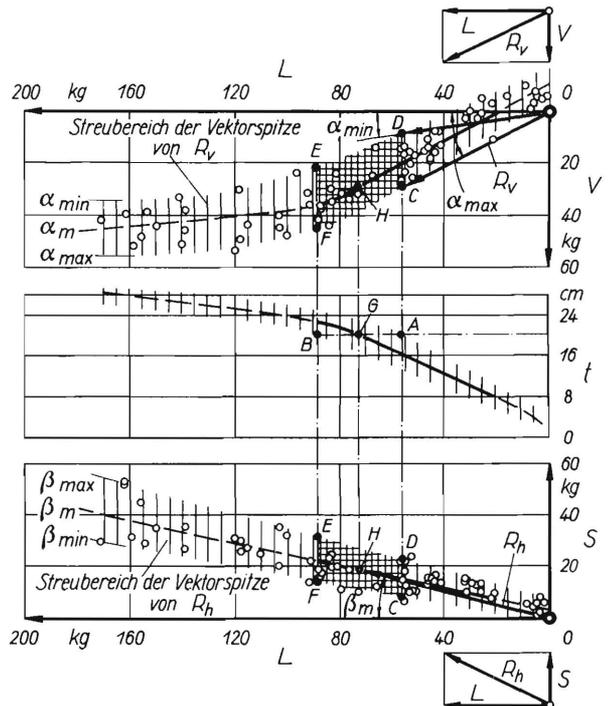


Bild 14. Richtung der Teilresultierenden R_v aus Längskraft L und Vertikalkraft V, sowie Richtung der Teilresultierenden R_h aus Längskraft L und Seitenkraft S für die Furchenbreite $b = 15 \text{ cm}$.

In Bild 14 (Mitte) ist ferner L in Abhängigkeit von von der Furchentiefe für $b = 15 \text{ cm}$ wiedergegeben (s. auch die Kurve für $b = 15 \text{ cm}$ in Bild 9). Durch die Zuordnung der beiden Darstellungen können für jede gewünschte Furchentiefe folgende Grössen festgestellt werden:

1. der Streubereich der Vektorspitze von R_v ,
2. der kleinstmögliche (α_{\min}) und grösstmögliche Winkel (α_{\max}) der Resultierenden R_v in der Vertikalebene,
3. die Grösse von R_v , wovon der Grösstwert $R_{v \max}$ besonders interessiert.

An dem eingezeichneten Beispiel für $t = 20 \text{ cm}$ soll dies erläutert werden: Bei einer Furchentiefe $t = 20 \text{ cm}$ streut der Mittelwert von L zwischen 55 kg (Punkt A) und 90 kg (Punkt B). Geht man von diesen Punkten auf den gestrichelten Linien senkrecht in das obere Diagramm, dann grenzen diese das Feld C D E F auf dem Streuband ab. Diese kreuzweis schraffierte Fläche stellt den Streubereich der

Vektorspitze von R_v für $t = 20$ cm und $b = 15$ cm dar. Den kleinstmöglichen Winkel α_{\min} von R_v (damit auch der Gesamtresultierenden) bildet der Vektor OD; für α_{\max} ist der Vektor OC. Beide Vektoren sind in das Diagramm eingezeichnet. Dem zahlenmässig grössten Wert $R_{v \max}$ entspricht der Vektor OF. Mittlere Verhältnisse dieses Beispiels sind durch die Punkte G und H bzw. die eingezeichnete (stark ausgezogene) Mittellinie innerhalb des kreuzweis schraffierten Gebietes gegeben.

Die Grösse von α in Abhängigkeit von der Furchentiefe kann aus Bild 15 entnommen werden; ein Beispiel für den zugehörigen Streubereich ist für

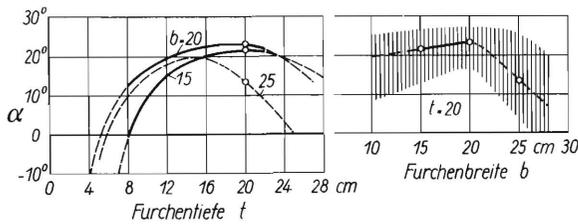


Bild 15. Richtungswinkel α der Teilresultierenden R_v in der Vertikalebene über Furchentiefe und Furchenbreite. Beispiel für die Streuung von α für $t = 20$ cm.

$t = 20$ cm dargestellt. α beträgt für mittlere Furchentiefen 20 bis 22°. Die Kurvencharakteristik für α entspricht derjenigen des Verhältnisses V/L (Bild 11), da $V/L = \tan \alpha$ und $\alpha \leq 22^\circ$ ist.

Die in Bild 14 (oben) angewandte vektorielle Darstellung der Kräfte in der Vertikalebene lässt sich auch in der Horizontalebene durchführen. Bild 14 (unten) zeigt dies für dieselben Verhältnisse wie in Bild 14 (oben).

Der Vektor vom Nullpunkt zu einem beliebigen Messpunkt bedeutet in diesem Falle die vektorielle Vereinigung von L und S zur Teilresultierenden R_h in der Horizontalebene. Der zwischen R_h und L gebildete Winkel β gibt die Richtung der Gesamtresultierenden in der Projektion auf die Horizontalebene an. Blickt man von oben auf den Pflugkörper, dann muss die Wirkungslinie der Zugkraft in dieser Ebene in erster Näherung unter dem Winkel β verlaufen.

Mit Hilfe der Darstellung von L in Abhängigkeit von der Furchentiefe (Bild 14, Mitte) können aus Bild 14 (unten) für beliebige Furchentiefen folgende Grössen entnommen werden:

1. der Streubereich der Vektorspitze von R_h ,
2. der kleinstmögliche (β_{\min}) und grösstmögliche Winkel (β_{\max}) der Resultierenden R_h in der Horizontalebene,
3. die Grösse von R_h , wovon der Grösstwert $R_{h \max}$ besonders interessiert.

Für das eingezeichnete Beispiel gelten sinngemäss die für Bild 14 (oben) gegebenen Erläuterungen.

Die Grösse von β in Abhängigkeit von der Furchentiefe sowie ein Beispiel für die Grösse des

Streubereiches zeigt Bild 16. Im Arbeitsbereich des des Pflugkörpers ändert sich β nur wenig und be-

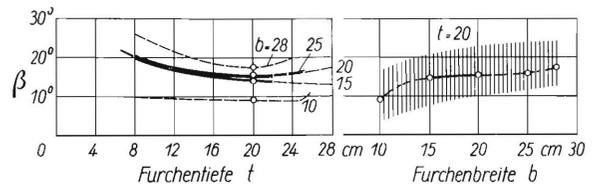


Bild 16. Richtungswinkel β der Teilresultierenden R_h in der Horizontalebene über Furchentiefe und Furchenbreite. Beispiel für die Streuung von β für $t = 20$ cm.

wegt sich in der Grössenordnung von etwa 15°. Der Kurvencharakter stimmt mit dem seines Tangens (siehe Verhältnis S/L in Bild 13) überein.

F. Der spezifische Zugwiderstand

Es wurde bereits erwähnt, dass bei der Beurteilung der gemessenen Grösse des spezifischen Zugwiderstands z berücksichtigt werden muss, dass in ihm die Anteile für Sohlen- und Anlagereibung sowie des Rollwiderstandes der Räder nicht enthalten sind. Die ermittelten Werte für z in Bild 17 sind daher verhältnismässig niedrig. z ist im Arbeitsbereich des Pflugkörpers im Mittelwert fast konstant und beträgt je nach Furchenbreite 20 – 30 kg/dm². Umgekehrt kann aus diesen niedrigen Werten geschlossen werden, dass die Anteile für Rollwiderstand sowie Sohlen- und Anlagereibung beträchtlich sein müssen. Zugkraftmessungen am Pflug ergaben einen Gesamt-widerstand von 40 – 45 kg/dm². Bei Überschreiten

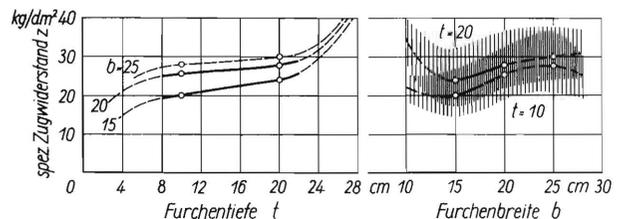


Bild 17. Spezifischer Zugwiderstand z in Abhängigkeit von Furchentiefe und Furchenbreite. z enthält nicht den Rollwiderstand der Räder sowie die Sohle- und Anlagereibung.

der Arbeitstiefe $t_n = 22$ cm tritt ein sehr steiles Anwachsen des spezifischen Widerstandes ein, wobei hinsichtlich der Ursachen auf die oben angeführten Vermutungen hingewiesen sei. Die starke Streuung von z erklärt sich durch die Überlagerung der Streuungen von Längskraft und Furchenquerschnitt.

Wird die Sohlen- und Anlagenreibung auf Grund der Kräfte V und S nach Bild 10 und 12 rechnerisch berücksichtigt, dann erhöhen sich die z -Werte um 30 – 35 % (Reibungsbeiwert für Stahl auf Lehmboden nach Messungen von Söhne etwa 0,5). Für den Anbaupflug sind diese Werte sicher zu ungünstig, denn bei ihm kann bei richtiger Anbringung der Zugkraft ein Teil der Vertikal- und Seitenkraft aufgehoben werden. Es wäre also nur der aus Führungs- und Stabilitätsgründen notwendige Restanteil beider Komponenten

einzusetzen. Beim richtig eingestellten Rahmen-Anhängeflug werden diese Kraftkomponenten durch die Räder abgestützt, es tritt also überhaupt keine durch gleitende Reibung verursachte Zugkraftehöhung auf, was bei dem untersuchten Pflugkörper durch Messungen mit und ohne Anlage bestätigt wurde. Es ist bemerkenswert, dass beim Anbaupflug in der üblichen Form die Abstützung der Vertikal- und Seitenkräfte auf dem Boden unter gleitender Reibung (Reibungsbeiwert $\mu = 0,5$) erfolgt, während beim Anhängeflug diese Kräfte bei rollender Reibung (Rollreibungsbeiwert $f = 0,15$) übertragen werden.

Für die Beurteilung des Pflugkörpers ist die in Bild 18 gewählte Darstellung der Mittelwerte des spez. Zugwiderstandes über dem Verhältnis b/t (Furchenbreite : Furchentiefe) sehr geeignet, besonders zur Beurteilung der Frage: Schmalschnitt oder Breitschnitt. Die Ordinate $b/t = 1,0$ teilt das

des Körpers abhängt. Zwischen flachem Schälern und Tiefpflügen bewegt sich also der spezifische Zugwiderstand entlang der jeweiligen Linie $b = \text{const.}$ Diese Linien konstanter Furchenbreite verlaufen mit kleiner werdenden b/t -Werten leicht ansteigend, um bei Tiefen über $t = 20$ cm steil anzusteigen.

Für die Auslegedaten des vorliegenden Körpers gilt also die Linie $b = 20$ cm, die Linie $b = 15$ cm gibt die optimal gemessenen Werte wieder, und die darunter zu denkende, für $b = 13$ cm gültige Hüllkurve (aus Übersichtsgründen nicht eingezeichnet) stellt die optimal erreichbaren Werte dar. Der Körper hat also unter den vorliegenden Betriebsverhältnissen und dem listenmässig genannten Arbeitsbereich recht gut gearbeitet. Es sei aber nochmals betont, dass alle diese Überlegungen nur für diesen Einzelfall Gültigkeit haben und die Übertragung auf andere Boden- und Feuchtigkeitsverhältnisse, an-

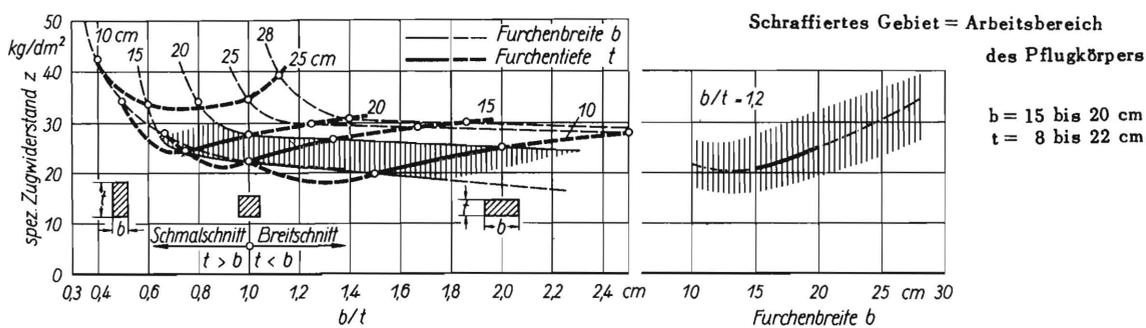


Bild 18. Spezifischer Zugwiderstand z über dem Verhältnis b/t des Furchenquerschnittes.

Diagramm in den Schmalschnittbereich (linke Seite) und den Breitschnittbereich (rechte Seite). Unter Berücksichtigung der in Abschnitt C dargelegten Gesichtspunkte müssen die Aussagen dieses Diagramms wegen des grossen Streubereiches vorsichtig gewertet werden.

Alle Linien konstanter Furchentiefe (dick ausgezogen) haben ein deutlich erkennbares Minimum, d.h. einen günstigsten b/t -Wert, der für die Furchentiefen 15-25 cm im Schmalschnittbereich liegt. Die Minima dieser Kurven liegen für die Tiefen 10-20 cm bei Breiten zwischen 13 und 14 cm. Unter den vorliegenden Betriebsverhältnissen (Boden, Fahrgeschwindigkeit usw.) scheint der untersuchte Pflugkörper also bei Furchentiefen zwischen 10 und 20 cm bei einer einzigen Breite (zwischen 13 und 14 cm) energetisch am günstigsten zu arbeiten. Diese optimale Arbeitsbreite beträgt rund 55% der Schnittbreite b_s bzw. 70% der listenmässig angegebenen Arbeitsbreite b_n (Nennbreite) des Pflugkörpers. Für diese optimale Arbeitsbreite ist der spezifische Zugwiderstand z bei $t = 20$ cm um etwa 10%, bei $t = 10$ cm um rund 30% niedriger als für die Nennbreite b_n .

In Bild 18 sind ferner die Linien konstanter Furchenbreite (dünn ausgezogen) eingetragen. Zwischen den Linien $b = 15$ und $b = 20$ liegt der Betriebsbereich des Pflugkörpers (schraffiert). Bei Mehrscharpflügen ist sie eine einzige schmale Kurve, die von der in der Fabrik fest eingestellten Arbeitsbreite

dere Körperformen oder sonstige Verallgemeinerungen nicht möglich und vorerst auch noch nicht abschätzbar sind.

G. Drehmomente um die ideelle Scharspitze

Die Grösse und Richtung der Kraftkomponente L , V , S und damit auch der Resultierenden R lassen sich aus den Messungen eindeutig bestimmen und sind von dem Angriffspunkt am Pflugkörper unabhängig. Wählt man für diese Kräfte einen bestimmten Bezugspunkt in der Arbeitsfläche des Pflugkörpers, so wird damit die Grösse und Richtung der Momente (M und M_x, M_y, M_z) festgelegt. Nur für einen einzigen Punkt ist die Bedingung, dass der Vektor der resultierenden Kraft R und des resultierenden Restmomentes M_r in einer Richtung liegen (Kraftschraube), erfüllt. In allen anderen Fällen ist das resultierende Moment $M > M_r$. Wählt man nach Bild 19, 20 und 21 die ideelle Scharspitze (s. Bild 3) als Bezugspunkt, so ist nicht zu erwarten, dass die Resultierende aus M_x, M_y und M_z schon das resultierende Restmoment M_r ist. Die Lage der Zentralachse der Kraftschraube $[R, M_r]$ lässt sich aber aus dem Kraftkreuz $[R, M]$ rechnerisch ermitteln.

Das Drehmoment um die Längsachse M_x (Bild 19) bewegt sich in der Grössenordnung von 3 kgm und ist sowohl über der Tiefe als auch über der Furchenbreite praktisch konstant. Das Drehmoment um

die Querachse M_y ist im Arbeitsbereich ebenfalls unbedeutend und hat über Furchentiefe und -breite annähernd horizontalen Verlauf (Bild 20): Das Drehmoment um die Hochachse M_z steigt im Arbeitsbe-

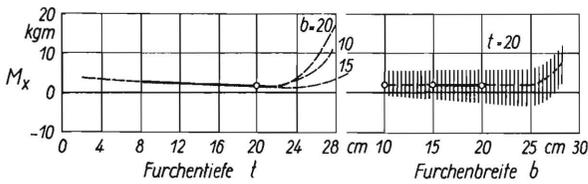


Bild 19. Drehmoment M_x um die Längsachse über der Furchentiefe und Furchenbreite. Scharfspitze als Bezugspunkt.

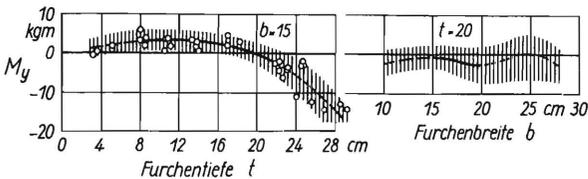


Bild 20. Drehmoment M_y um die Querachse über Furchentiefe und Furchenbreite. Scharfspitze als Bezugspunkt.

reich linear mit der Furchentiefe an (Bild 21). Bei Tiefen über 22 cm erfolgt ein sehr steiler Anstieg zu recht beträchtlichen Werten, d.h. bei Überschreiten der Auslegedaten treten erhebliche Drehmomente um den Pflugkörperhalter auf. Den Verlauf von M_z über der Furchenbreite und den Streubereich der Mittelwerte zeigt Bild 21 (rechts).

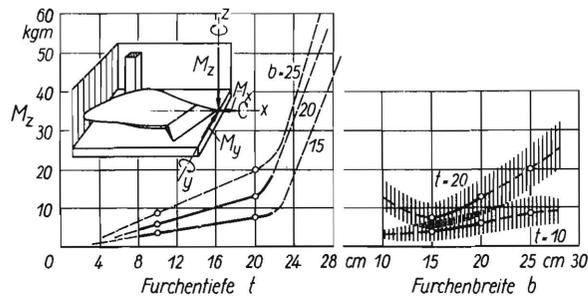


Bild 21. Drehmoment M_z um die Hochachse über Furchentiefe und -breite. Scharfspitze als Bezugspunkt.

Es sei erwähnt, dass die resultierenden Restmomente M_r um die zugehörigen Bezugspunkte in der Arbeitsfläche des Pflugkörpers kleiner sind als die entsprechenden auf die Scharfspitze bezogenen resultierenden Momente aus M_x , M_y und M_z .

H. Lage der resultierenden Kraftschraube

Die Lage der resultierenden Kraftschraube und deren Durchstosspunkt auf der Arbeitsfläche des Pflugkörpers ist anhand von vier Beispielen in Bild 22 gezeigt. Es zeigt die maßstäblichen Umriss des Körpers in Grundriss und Seitenansicht, wobei die Lage und die Richtung der vier Einzelmessungen eingetragen sind. Es sind die resultierenden Kraft-

schrauben für die Grenzfälle der Vertikalkraft V_{max} und V_{min} und der Seitenkraft S_{max} und S_{min} eingezeichnet. Die Kraftschrauben für die Fälle V_{max} und V_{min} verlaufen im Grundriss etwa parallel, während in der Seitenansicht die Kraftschraube für V_{max} steiler gerichtet ist. Die Kraftschrauben für die Fälle S_{max} und S_{min} verlaufen in der Seitenansicht etwa parallel, während im Grundriss die Kraftschraube für S_{max} steiler gerichtet ist.

Die zugehörigen Durchstosspunkte sind als Kreise dargestellt. Sie grenzen die schraffierte Fläche ab, die jedoch nur angenähert als Gesamtstreubereich der Lage der Durchstosspunkte angesehen werden kann, da die Breite bei den Messungen unterschiedlich gewesen ist. Ein Teil der Pfeilverschiebung in Richtung zum Scharende (Grundriss) ist auf die grössere Furchentiefe bei den Messungen S_{min} und V_{min} zurückzuführen [2].

Die Grösse der Restmomente, wirksam als Drehmomente um die jeweilige Wirkungslinie der Kraftschraube, bewegt sich für die dargestellten Beispiele zwischen 5 und 15 kgm.

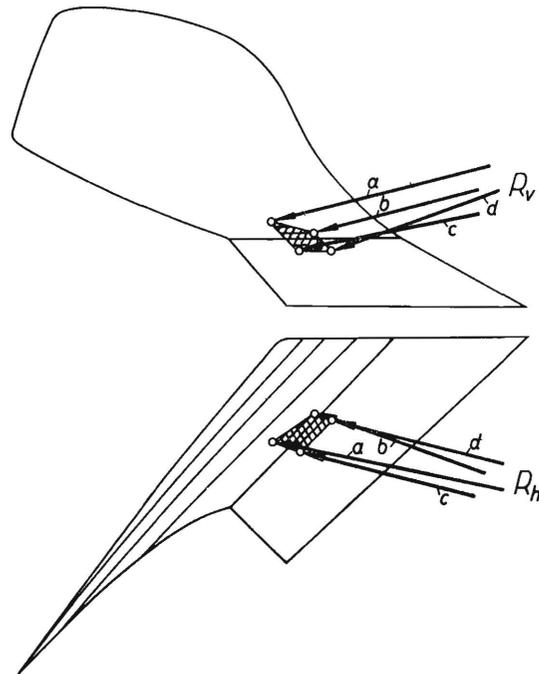


Bild 22. Die resultierenden Kraftschrauben $[R, M_r]$ für 4 Grenzwerte und deren Durchstosspunkte auf der Arbeitsfläche des Pflugkörpers ($b = 20$ cm).

Vektor	für	R kg	M_r kgm	α Grad	β Grad
a	S_{min}	262	+8,7	14,3	12,1
b	S_{max}	201	+15,5	14,6	19,4
c	V_{min}	200	+9,7	11,9	14,7
d	V_{max}	195	+5,2	20,7	14,6

*

Zusammenfassung

An einem Pflugkörper (steile Form, Schmalschnitt, ohne Anlage, ohne Sech) wurden auf mittelschwerem, trockenem Lehmboden bei einer Geschwindigkeit von 3,6 km/h Krätemessungen durchgeführt. Als erstes Ergebnis dieser Messungen wird der Versuch gemacht, ein zusammenhängendes Bild der Gesetzmässigkeiten zwischen der Grösse der Kräfte in den drei Ebenen (Längskraft L , Vertikalkraft V , Seitenkraft S), der Richtung der Teilresultierenden in der Vertikal- und Horizontalebene, der Grösse der Drehmomente um die drei Achsen abhängig von der Furchentiefe t für die Furchenbreiten $b = 10, 15, 20, 25, 28$ cm zu geben.

Die Grössen L, V, S wachsen im Auslegebereich des Pflugkörpers ($b_n = 20$ cm, $t_n = 22$ cm) linear mit zunehmender Tiefe an. Als Richtwert wurde für einen mittleren Furchenquerschnitt ($b = 20$ cm, $t = 20$ cm) eine Längskraft von 110 kg (streuend zwischen 150 und 90 kg) bzw. ein Leistungsaufwand von etwa 1,5 PS gemessen. Das Verhältnis V/L liegt bei etwa 0,4; das Verhältnis S/L bewegt sich um 0,3 und ändert sich über Breite und Tiefe nur wenig.

Der Winkel α , unter dem die Gesamresultierende in der Vertikalebene nach abwärts gerichtet ist, beträgt im Mittel 22° ; der Winkel β der Gesamresultierenden in der Horizontalebene (von oben gesehen) wurde zu etwa 15° ermittelt.

Die spezifischen Zugwiderstände z sind relativ niedrig, da in ihnen die Anteile der Sohlen- und Anlagenreibung sowie des Rollwiderstandes nicht enthalten sind und liegen zwischen 20 und 30 kg/dm². Interessante Einblicke gibt eine Darstellung dieser Werte über dem Verhältnis b/t (Furchenbreite/Furchentiefe): Alle Linien $t = \text{const}$ haben einen günstigsten b/t -Wert, der für die Tiefen 15 – 25 cm im Schmalschnittbereich liegt ($b/t < 1$). Die energetisch günstigste Furchenbreite ergibt sich zu etwa 13–

14 cm. Der spezifische Zugwiderstand liegt dabei um 10 bis 30 Prozent niedriger als bei der Nennbreite.

Die Drehmomente um die Längsachse M_x und Querachse M_y sind unbedeutend. Sie bewegen sich – auf die Scharspitze bezogen – um 3 kgm und sind über b und t etwa konstant. Das Drehmoment um die Hochachse M_z steigt linear mit der Furchentiefe an. Bei Überschreiten der Auslegedaten des Körpers (Überlastung) treten erhebliche Verdrehbeanspruchungen am Grindel auf (Werte um 40 kgm).

Die Lage der Durchstosspunkte der Wirkungslinie der Gesamresultierenden auf der Arbeitsfläche des Körpers wird an einigen Beispielen dargestellt. Das dabei auftretende Restmoment bewegt sich zwischen 5 und 15 kgm.

Es gelten alle Angaben nur für die eine angegebene Körperform, einen Bodenzustand und eine Geschwindigkeit. Ihre Übertragung auf andere Formen und Verhältnisse ist vorerst nicht möglich. Auf die Bedeutung der Streuung der Messwerte bei der Deutung der Diagramme wurde hingewiesen.

Schrifttum

- [1] *Georg Kühne*: Untersuchungen über den Zugwiderstand eines Pflugwerkzeugmodells bei verschiedenen Arbeitsbedingungen und ihre Anwendung auf praktische Verhältnisse. Verb.landw.Masch.Prüfg.Anst. 8 (1914) 80/134.
- [2] *G. Kühne* und *A. König*: Forschungsarbeiten in der Bodenrinne. Halle 1932.
- [3] *W. von Poncet*: Untersuchungen über das Kräftespiel an einem Pflugkörper. Borna (Leipzig) 1939.
- [4] *W. Schreyer*: Untersuchungen über die räumliche Kräfteverteilung am Pfluge. Diss. Bonn 1927.
- [5] *A. Föppl*: Vorlesung über technische Mechanik. Band 2, Graph. Statik, 10. Aufl. München 1949. S. 73 ff.

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

Anschrift des Verfassers: Ing. Günter Getzlaff, (20b) Braunschweig, Forschungsanstalt für Landwirtschaft