

Franz Wieneke: "Enseignement et recherches dans le domaine de la technique agricole à la faculté agricole de l'université de Goettingue"

Au cours des dernières décennies, on a pu remarquer un changement considerable de la production agricole auquel la technique à contribué de façon décisive. Dans l'avenir la technique de production agricole montrera encore plus de caractéristiques techniques que jusqu'ici. L'enseignement et la recherche pratiqués aux facultés agricoles des hautes écoles doivent tenir compte de ce fait et arriver à une symbiose avec les disciplines de la production végétale et animale et avec l'économie rurale. L'auteur de l'article présent montre comment le programme et l'organisation de l'enseignement et de la recherche de technique agricole à la faculté agricole de l'université de Goettingue tiennent compte de ces conditions.

Franz Wieneke: "Enseñanza e investigación de la ingeniería agrícola en la Facultad Agronómica de Göttingen"

En la producción agropecuaria se ha operado, en los últimos decenios, una transformación significativa en la que la técnica ha participado en forma determinante. En el futuro acusará la técnica de la producción aún más carácter industrial que hasta ahora. En la enseñanza e investigación de la ingeniería agrícola en facultades de agronomía debería considerarse tamaña evolución y llegar a una simbiosis con las disciplinas de la producción vegetal y animal así como con la economía.

En la colaboración indicada se señaló cómo la enseñanza y la investigación de la ingeniería agrícola está organizada y estructurada en consonancia con tales exigencias en la Facultad Agronómica de la Universidad de Göttingen.

Sun-Whi Cho, Helmut Schwanghart, Hans von Sybel:

## Der Gittereffekt an Raupenkettten auf lockerem Boden <sup>1)</sup>

Institut für Landmaschinen, TH München

### Buchstabenverzeichnis

A	cm <sup>2</sup>	Fläche	w	%	Wassergehalt
B	—	Index für Bruch	w <sub>a</sub>	%	Ausrollgrenze
E	cm	Eingriffslänge	w <sub>f</sub>	%	Fließgrenze
E <sub>a</sub>	kp/cm	aktiver Erddruck	x	cm	Längenkoordinate
E <sub>p</sub>	kp/cm	passiver Erdwiderstand	z	cm	Einsinktiefe
F	—	Abkürzung eines Ausdruckes	α	°	tan α = h/b
G	kp	Gewicht	β	°	= α + δ
G <sub>B</sub>	kp	vertikaler Anteil der Bruchlast	γ	°	Winkel in der aktiven Rankine'schen Zone
H	kp	Netto-Triebkraft, Horizontalkomponente der Bodenreaktion	γ	°	Schiebung
K	cm	Konstante bei der Bestimmung der Fließfunktion	γ <sub>1</sub>	kp/cm <sup>3</sup>	spez. Gewicht oberhalb der Gründungssohle
L	cm	Lückenweite	γ <sub>2</sub>	kp/cm <sup>3</sup>	spez. Gewicht unterhalb der Gründungssohle
N	—	Gliederzahl	δ	°	Winkel, unter dem die Last gegen die Normale auf die Belastungsfläche geneigt ist
R <sub>pl</sub>	kp/cm	Bruchlast nach der Plastizitätstheorie	ε <sub>r</sub>	°	Basis-Winkel der aktiven Rankine'schen Zonen
R <sub>B</sub>	kp/cm	resultierende Bruchlast pro Einheit der Streifenfundamentlänge	ε <sub>l</sub>	°	Basis-Winkel der aktiven Rankine'schen Zonen
b	cm	Plattenbreite	ζ	°	Winkel der Schräglage eines Kettenfahrzeuges gegenüber der Horizontalen
c	kp/cm <sup>2</sup>	scheinbare Bodenkohäsion	η	°	90° — δ
e	—	Porenziffer	θ	°	Winkel zwischen den beiden die radiale Übergangszonen begrenzenden Polstrahlen
f	—	Index für fiktiv	z	—	Triebkraftbeiwert
h	cm	Greiferhöhe	z <sub>l</sub>	—	Triebkraftbeiwert einer „gelängten“ Kette
i	%	Schlupf	z <sub>b</sub>	—	Triebkraftbeiwert einer „gebreiteten“ Kette
j	cm	Schubweg	z <sub>0</sub>	—	Triebkraftbeiwert einer geschlossenen Kette
k <sub>w</sub>	—	Konsistenzkennzahl von Atterberg	λ <sub>f,δ</sub>	—	Tragfähigkeitsbeiwert
l	cm	Plattenlänge	λ <sub>b,δ</sub>	—	Tragfähigkeitsbeiwert
n	%	Porenanteil	λ <sub>l</sub>	—	Tragfähigkeitsbeiwert
p	kp/cm <sup>2</sup>	Flächenpressung	ξ	—	Abkürzung eines Ausdruckes
p <sub>B</sub>	kp/cm <sup>2</sup>	Flächendruck bei Bruchseintritt	σ	kp/cm <sup>2</sup>	Normalspannung
r <sub>0</sub>	cm	Radiuslänge am Übergang der aktiven Rankine'schen Zone in die Zone mit spiraligen Scherebenen	τ	kp/cm <sup>2</sup>	Schubspannung
t	cm	Tiefe	τ̄	kp/cm <sup>2</sup>	mittlere Scherfestigkeit
			φ	°	Winkel der Scherfestigkeit
			ψ	°	Winkel in der aktiven Rankine'schen Zone
			∧	—	maximal

1) In dieser Studie ist die am Institut für Landmaschinen durchgeführte und von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Hochschule München genehmigte Dissertation gleichen Themas des erstgenannten Verfassers auszugsweise mitenthalten

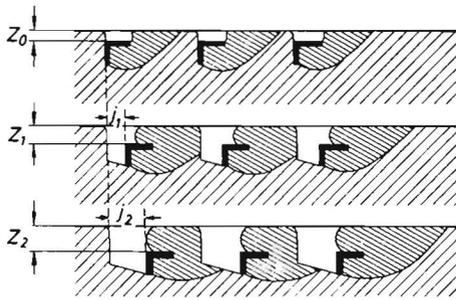


Bild 1: Scherzonen von Greifern bei verschiedenem Schubweg: Auf festem Boden kann sich, wenn Schubweg  $j$  und Einsenkung  $z$  zunehmen, der Zonengrundbruch nicht mehr vollständig ausbilden: Das Abscheren erfolgt schließlich in der Ebene der Greiferkanten [3]

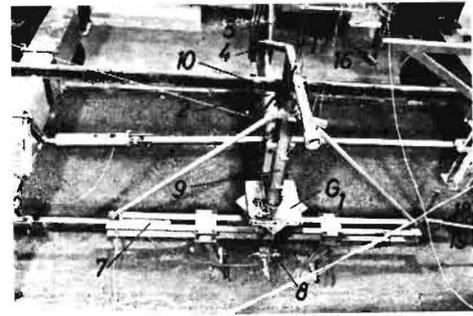


Bild 3: Die drei Kettenlieder nach Verschiebung gegen links: Vor dem linken Glied und dem Mittelglied Rißspuren, Grundbruch andeutend, sowie Aufwölbung. Hinter den beiden ersten Gliedern verbleibt fast keine Lücke: Stopfwirkung

## 1. Aufgabe

Was die Raupe in der Landwirtschaft an Bedeutung einbüßte, hat sie im Erdbau gewonnen. Hier wird ihr allerdings noch höhere Triebkraft abverlangt, wo es doch wahrlich gilt, Berge zu versetzen. Dazu hatte man in gewohnter Betrachtung höchstens Vergrößerung der Kontaktfläche und Last

ohne weiteres bei der Hand:  $\hat{H} = c \cdot A + G \tan \varphi$ . In der für den Aufbau der Triebkraft entscheidenden Schubspannungsverteilung in der Kontaktfläche ist damit aber grundsätzlich nichts geändert. D. h. je höhere Schubspannungen man nach vorne zu abverlangt, um die Triebkraft zu steigern, um so größerem Schlupf und damit verbundener Einsenkung muß man fahren; dies hat natürlich seine Grenzen.

Darüber hinaus läßt sich eine Steigerung des Triebkraftbeiwertes nur von folgenden Maßnahmen erwarten:

A. Übergang von rollender zu schreitender Fahrweise

B. Beteiligung tieferer und ausgedehnter Bodenschichten am Schubspannungsaufbau durch Verformung bis zum Grundbruch, gleichbedeutend mit freiem Abscheren im Inneren des Halbraumes Boden, statt Zwangsscherung in der Kontaktfläche.

Beides war an der Triebkraftsteigerung im „Schubschritt-Verfahren“ [1; 2] beteiligt: Primär war dort die gleichförmige Schubspannungsverteilung im Fußtapfen die Ursache, sekundär, d. h. erst nach stärkerem mit stationärem Einsinken verbundenem Schlupf, sicherlich auch die Abstützung nach rückwärts — abwärts in ausgedehnte Tiefenbezirke des Bodens nach Art des allgemeinen Abscherens im Grundbruch.

Denselben Wandel des Bruchmechanismus hatte bereits M. G. BEKKER bewußt für die gesteigerte Triebkraft seiner „Lückengliederkette“ in Anspruch genommen, die er aus der Sicht theoretischer Bodenmechanik in umfangreicher experimenteller Untermauerung begründete [3; 4]. Hierbei ergab sich die Forderung einer Mindestlückenweite, wenn sich der erstrebte Grundbruch gerade voll ausbilden sollte. Stärkerer Schlupf, durch den das Grundbruchschemata in die nächsthintere Greiferkuhle sozusagen hineinwanderte, drohte jedoch auf festem ungestörtem Boden den Triebkraftgewinn schließlich ganz wieder aufzuzehren (Bild 1). Was aber blieb vollends lohnend von der Gitterwirkung übrig, wenn locke-

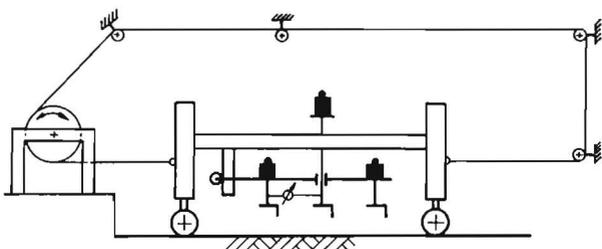


Bild 2: Versuchsanordnung (schematisch): Seilwinde — Meßwagen — Kettengliedträger — Gewichtsbelastung, für Mittelglied unabhängig von den Randgliedern — Triebkraftmesser (elektrischer Geber) nur am Mittelglied

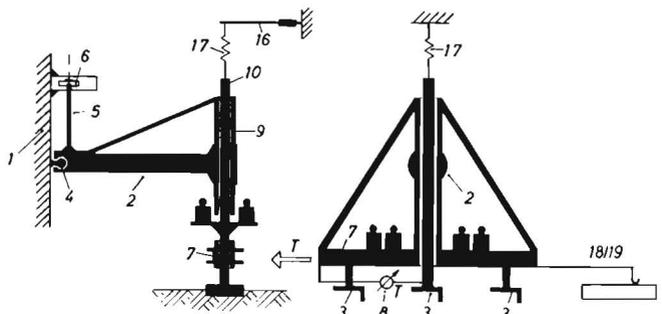


Bild 4: Versuchsanordnung (schematisch): Meßglied (Mitte) kann unabhängig von den Randgliedern einsinken: Säule 10 gleitend in Führung 9, Elektrische Tiefenmessung 16, 17, Rechts elektrische Schubwegmessung 18, 19, Kardanische Aufhängung in 4 gewährt Lastkonstanz beim Ziehen

rer gestörter Boden vorlag? Dies aufzuhellen, für Rollen und Schreiten der Raupe, war das Ziel der Untersuchungen, über die wir im Folgenden auszugsweise berichten.

## 2. Versuchsmethodik

Damit bei dieser praktisch auf den Zusammenhang von Triebkraftbeiwert und Schlupf zielenden Fragestellung der vordergründig berührende Einfluß der Lückigkeit tunlichst unverzerrt hervorträte, erschien es geboten, alle verwässernde Streuung auszuschalten, wie sie aus nicht-bodenmechanischen Einwirkungen herrührt:

Aufbäumen mit Gewichtsverlagerung, Geschwindigkeitsschwankung durch das Polygon der Umlenkrolle und schräges Aufsetzen, periodisches Abwinkeln der Glieder unter der Wanderlast der Laufrollen oder über Bodenunebenheiten mit seiner bodenzermürenden Wirkung, nicht zuletzt auch die während des Schlüpfens eintretende Schräglage „Kopf hoch — Schwanz unten“.

Dies alles läßt sich eliminieren, wenn man, statt wirklichkeitsgerecht den Boden mit dem ganzen Laufwerk zu überfahren, nur ein einziges Raupenglied unter konstanter Last aufsitzen läßt und dasselbe mit der dem wirklichen Schlupf bei bestimmter Fahrgeschwindigkeit entsprechenden „Schergeschwindigkeit“ am Boden schierend entlangzieht (Bild 2 und 3). Nur an diesem einen Glied also wird die Seilzugkraft, als äquivalente Triebkraft, sowie Schubweg und Einsenkung gemessen ( $j$ ,  $z$ ). Mit je einem weiteren Glied in einstellbarem Abstände davor und dahinter wird die Lückigkeit simuliert. Selbstverständlich, daß das Meßglied (Mittelglied) unabhängig von dem berandenden Gliederpaar frei einsinken konnte, und daß die Zugkraft auch beim Einsinken horizontal blieb. Das Aufbäumen des in einem Kugelgelenk gehaltenen Greifersatzes wurde nach dem Vorbilde von H. LÜHRS [5] durch einen in der vertikalen Gelenkebene schwenkenden Hebel 5 mit Rolle 6 verhindert, die sich gegen den Rahmen 1 abstützt (Bild 4). So stark sich diese Versuchsanstellung auch von der vollständigen Fahrzeugmechanik absetzt, so trifft sie im Grunde doch den realen Grundfall der Triebkraftabstützung. Zunächst wird jedoch

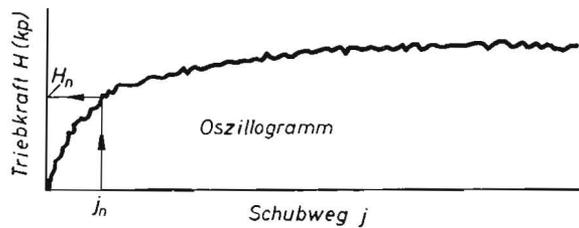


Bild 5: Oszilloport-Meßschiebe der Triebkraft, der Einsinkung und des Schubweges, letzterer anfänglich genauer als Mikroschubweg mittels induktivem Geber, später mittels Potentiometer als Makroschubweg gemessen

unmittelbar nur das schreitende Einzelkettenglied der Raupe simuliert. Einen oszillographisch aufgenommenen Meßschieb zeigt Bild 5.

Von der Seilzugkraft am „schreitenden“ Einzelglied schließt man auf die Triebkraft der „schreitenden“ Raupenkette durch sinngemäße Aufsummierung über die Gliederzahl. Erst für den Fall der Überrollung ist zu berücksichtigen, daß die Bodenverformung unter einer längs als starr betrachteten Kette von vorne, wo das erste Glied aufsetzt, nach hinten zu linear-proportional ansteigt. Damit ist für einen bestimmten Schlupf  $i$  der Schubweg  $j$  der Zwischenglieder gegeben (Bild 6a). Die zu einem bestimmten  $x_n$  bzw. dem entsprechenden  $j_n$  gehörige Einzeltriebkraft  $H_n$  entnimmt man aus dem Oszillogramm in Bild 7. Dadurch gewinnt man schließlich in Bild 6b die Triebkraftverteilung über der Eingriffslänge  $E$ . So ergibt sich der Triebkraftaufbau ( $H$  netto) für das ganze Fahrzeug zu

$$H_{\Sigma} = \sum_{n=1}^{n=N} H_n ; \text{ damit } z = \frac{H_{\Sigma}}{G}$$

wobei Fahrzeuggewicht  
 $G = 2 p \cdot A \cdot N$

### 3. Der Versuchsboden

Unsere Bodenrinne enthielt einen mittelschweren feinsandigen Lehm Boden (aus den Oberschichten eines Ziegeleigeländes), in dem sich zufolge seines Feinteilgehaltes bei Feuchtigkeit unterhalb der Sättigung leicht eine Sekundärstruktur ausbildet, deren größere Agglomerate (Krümel) bei Austrocknung hart werden; daher verhält sich der Boden im trockenen Zustand oft fast mehr wie Sand von grober Körnung, im feuchten zunehmend plastisch. Während des Scherens hat man dabei mit Strukturänderungen zu rechnen. Zu jeder Versuchsreihe wurde der Boden durch Fräsen 25 cm tief aufgelockert, alsdann auf 6,2 % und 17,6 % angefeuchtet. In diesem also nicht vorverdichteten Zustand betrug die Porenziffer  $e = 1,2$  bzw. 1,35 oder der Porenanteil  $n = 54,4$  bzw. 57,5 % (Definitionen:  $e = n/(1-n)$  bzw.  $n = e/(1+e)$ ).

Rein bodenkundlich sei unser Stoffsystem durch die Atterbergsche Konsistenz-Kennzahl  $k_{st} = (w_f - w)/(w_f - w_{pl})$  beschrieben:

Fließgrenze	Ausrollgrenze	jeweiliger Wassergehalt	Konsistenz-Kennzahl
$w_f$ %	$w_{pl}$ %	$w$ %	$k_{st}$
43	23,9	6,2	1,93
43	23,9	17,9	1,31

$w_f$  = Wassergehalt am Übergang von der flüssigen zur plastischen,

$w_{pl}$  = Wassergehalt am Übergang von der plastischen zur halbfesten Zustandsform.

Die Scherfestigkeit des Bodens pflegt man, der Coulombschen Gleichung folgend, mit den Parametern  $c$  und  $\varphi$  wiederzugeben, die nur für einen bestimmten Zustand gelten:  $c$  ist

die sogenannte scheinbare Kohäsion (Kohäsivität) und  $\varphi$  der Winkel der Scherfestigkeit, nicht mit dem echten oder wahren Winkel der inneren Reibung Boden gegen Boden zu verwechseln. Die Problematik der Kennzeichnung des Fließverhaltens des Bodens liegt jedoch in der Bestimmungsmethodik bzw. in rechter Deutung der Meßwerte. Wir verweisen deshalb auf eine Parallelstudie von M. A. GHANI [6], die allgemein der Vervollkommnung des statischen Scherversuches, und zwar im besonderen Hinblick auf den Boden unserer Versuchsrinne, gewidmet war.

### 4. Theoretischer Anhalt:

#### 4.1. Deformation oder Abscheren

##### 4.1.1. Verdichtung und Verdrängung

Der Verformung eines lockeren, weil durch vorangegangenes Fräsen gestörten, also nicht vorverdichteten Bodens liegt von Anbeginn ein gewisses plastisches Verhalten zugrunde. Aber dies ist nicht mit idealplastischem Fließen im Bilde des DE SAINT VENANT-Körpers zu verwechseln, sondern es handelt sich hier zunächst um „eingeschränkte plastische“ Deformationen, die ihre Energie aus dem elastischen Potential des Spannungszustandes entnehmen; die dabei erfolgende fortwährende Umordnung der Teilchen kommt jedoch bei jeder kleinsten Spannungssteigerung immer wieder durch Bildung neuer Kontaktstellen zur Ruhe. Solange es nicht zum Bruch bzw. letztlich zum Gleiten kommt, darf das Haufwerk Boden grundsätzlich also wie ein fester Körper im elastischen Spannungszustand behandelt werden. Die „eingeschränkt“ plastischen Verformungen bilden demnach [7] eine Begleiterscheinung der elastischen Dehnungen. Den wahren Formänderungen ist nach von Soos [26] neuerdings SKEMPTON und BJERRUM [27] bei Tonen durch Aufspaltung in elastische und plastische Gestaltsänderung (Schubverformung) und in Volumenänderung nähergekommen. Für Sande ermittelten nach [26] LORENZ und GÜDEHUS [28] durch Aufsummierung der Einzelverformungen längs der Hauptspannungstrajektorien nach den Werten aus dreiachsigen Druckversuchen die Abweichungen von der elastischen Spannungsverteilung in strenger Lösung. Dies wäre auch beim Fahrzeug von Bedeutung, wenn die Festigkeit des Bodens weitgehend ausgenutzt werden muß. Von derartiger Analyse des Deformationszustandes unter dem Greifer haben wir jedoch vor allem wegen der nach dem Fräsen verbleibenden Inhomogenität des hartkrümeligen Lehm Bodens abgesehen.

Die elastische Betrachtung des Haufwerkes endet mit dem Grenzübergang zum plastischen Fließen; von hier ab kann das Gut idealplastisch unbeschränkt weiterfließen (neutral), es kann beschränkt weiterfließend zur Verfestigung kommen (stabil), oder es tritt nach Spröbruch Gleiten auf (labil) [8]. Die Charakteristik für alle diese verschiedenen Verhaltensweisen liefert uns die Fließkurve aus dem statischen Scherversuch [6].

##### 4.1.2. Grundbruch oder direktes Abscheren

Wird der als homogen und isotrop sowie inkompressibel vorausgesetzte Halbraum Boden, dessen Spannung schon bei geringster Verformung, d. h. wegunabhängig, die Bruchgrenze erreichen soll, durch ein Streifenfundament (Platte mit  $l/b = \infty$ ) bis zur Grenze seiner Abstützfähigkeit zunächst lotrecht belastet, pflegt man in ebener Momentanbetrachtung gleichzeitig „allgemeines oder vollständiges Abscheren“ im Bilde des Rankine'schen Bruchspannungszustandes zu unterstellen; dabei erstreckt sich ein Feld konjugierter Gleitlinien, die sich unter  $90^\circ - \varphi$  schneiden, ins Innere des Halbraumes hinein. Durch die gegen den starr gedachten Untergrund log-spiralig abgegrenzte Prandtl'sche Übergangszone wird die aktive in die passive Rankine'sche Zone so übergeleitet, daß auch hier sich die Gleitlinien unter  $90^\circ - \varphi$  schneiden [9]. Wenn in allen abscherenden Punkten der beiden Rankine'schen Zonen der Vektor der Fließgeschwindigkeit gleich ist, darf jede dieser Zonen für sich als starrer Körper gedacht

werden. Für die Übergangszone ist dies nur der Fall für  $\eta = 0$ , also für rein kohäsiven Boden, nämlich wenn die log-Spirale in einen Kreis übergeht.

Wenn aber zufolge des in Wirklichkeit allmählichen weil wegabhängigen Spannungsanstieges die Bedingungen für Überführung in den passiven Grenzzustand (seitliche Zusammendrückung) nicht durchgehend erfüllt sind, dann erfolgt das Abscheren nicht gleichzeitig allgemein, sondern örtlich begrenzt, ohne daß die Gleitlinien bis an die Oberfläche treten: Progressiver Gleitbruch. Die Grenzlast ist dann zunächst niedriger. Das Potential der Abstützung am Greifer braucht sich also nicht allein im Scherbruch zu erschöpfen, sondern es kann auch die bloße allseits auseinanderspreizende Verdrängung zur Stützung beitragen; teilweises Abscheren erkennt man an Rißspuren (Zugrisse) in Bild 3.

Zur Berechnung des hier maßgeblichen Erddruckes bzw. des passiven Erdwiderstandes müssen die Gleitlinien bekannt sein, sonst irgendwie optimierend erprobt werden [9; 10].

Haben wir es, wie bei unserer Raupe, mit zunehmend schräger Belastung zu tun — gesteigerte Triebkraft bei konstantem Schleppergewicht — und beginnen wir mit lotrechter Belastung, so führt diese zu verhältnismäßig geringer Ruheinsinkung; wir können uns noch weitab vom Bruchzustand befinden. Man müßte schon — nach Bild 14 — ungleich höhere Lasten aufpacken, um unter bloßer Gewichtssteigerung die Tragfähigkeitsgrenze in allgemeinem Abscheren zu überschreiten. Wir hätten also zunächst noch eine Reserve gehabt, die wir nunmehr unter gesteigerter waagerechter Verschiebung und entsprechend anwachsender Triebkraft verhältnismäßig rascher erschöpfen, als mit der Normallast allein.

Die Scherenergie, die das Volumenelement Boden bis zum Bruch aufzunehmen vermag, ist ja in isotropem Boden unabhängig von der Richtung begrenzt; befinden wir uns schon lotrecht näher an der Grenze der Abstützfähigkeit und überschreiten wir dieselbe durch zusätzliche Beanspruchung nach der Waagerechten, so steht eben auch nach der Lotrechten kein ausreichendes Abstütspotential mehr zur Verfügung: Der Greifer sinkt während des Treibens zunehmend ein, wie es an Verdrängung und Aufwölbung erkennbar wird. Daraus versteht sich die sogenannte Schlupf-Einsinkung, unter der

sich bekanntlich die Raupe schrägstellt: „Kopf oben, Schwanz unten.“ In flächenhafter Analogie läßt sich ein schweres Möbel leichter in bestimmter Richtung verschieben, wenn quer dazu das widerstehende Reibungspotential durch Bewegung angezapft oder ausgeschöpft wird. A. R. REECE und J. ADAMS gaben jüngst in [15] die Analyse der Veränderung des Spannungsgleichgewichtes nahe der Belastungsgrenze.

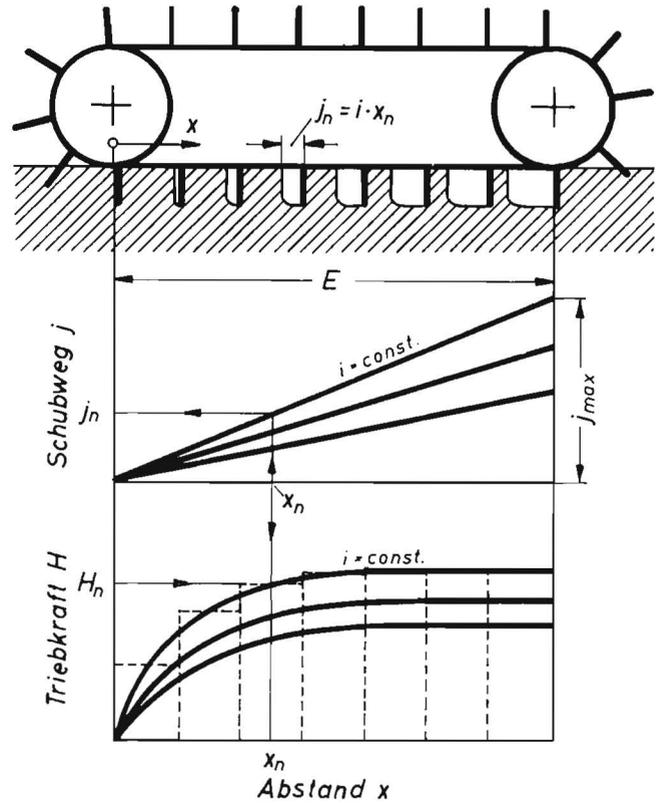
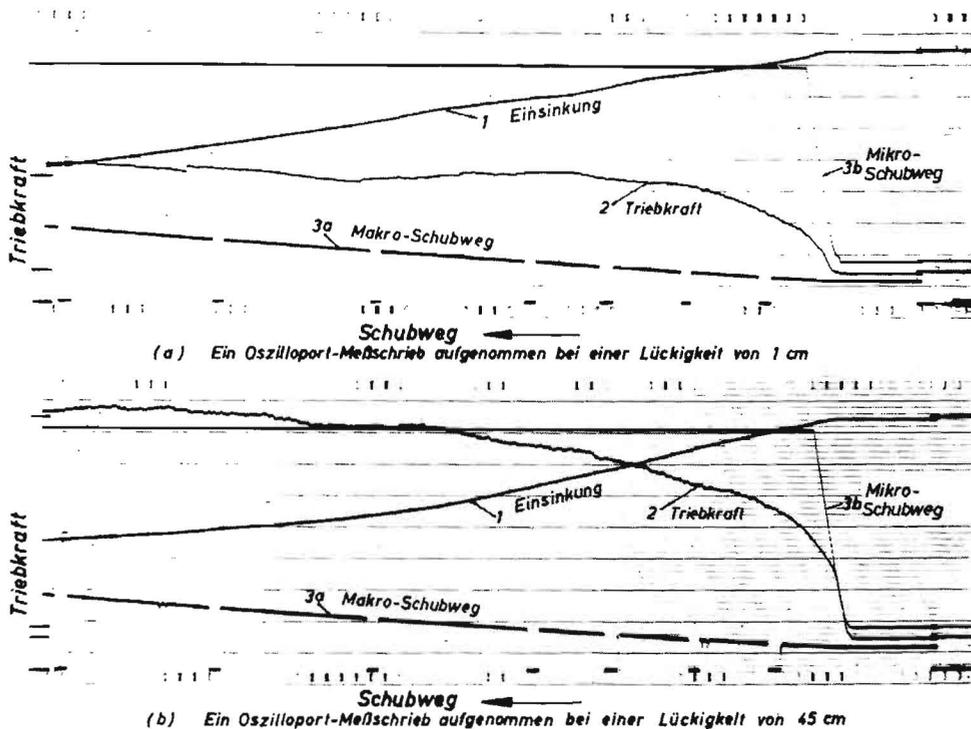


Bild 6 u. 7: Aufsummierung vom Einzelglied zur ganzen Kette: Zu jedem  $x_n$  unter der Kette ergibt sich der Schubweg zu  $i \cdot x_n = j_n$ . Zu  $j_n$  entnimmt man  $H_n$  aus Bild 7. Daraus ergibt sich von Glied zu Glied  $H_n = f(x_n)$  in Bild 6 unten



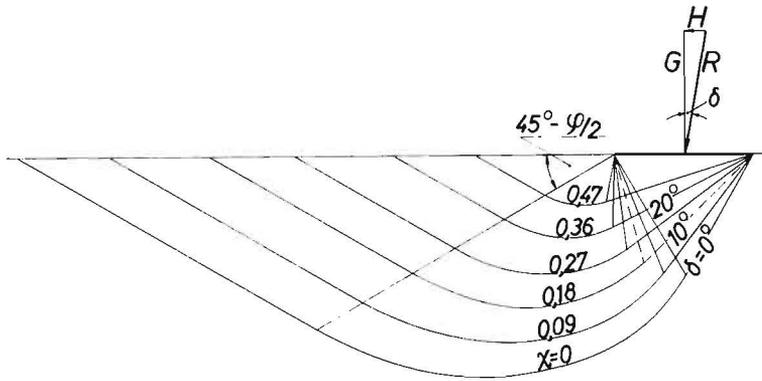


Bild 8 a

Erläuterungen zu den Bildern 8—10

Bild 8: Grundbruchmodell bei mittig-schräger Belastung:

8a Platte; Gültigkeit:  $0 < \delta < \varphi$ ;  $\alpha = 0$

9a (1:2)-Greifer als Platte mit  $\alpha = 26,6^\circ$

10a (1:1)-Greifer als Platte mit  $\alpha = 45^\circ$

Bild 8b, 9b, 10b: Basis-Winkel der aktiven RANKINE'schen Zone graphisch aus den MOHR'schen Spannungskreisen: Geometrischer Ort für einen Punkt, der der jeweiligen Lastschräge entsprechenden, durch den  $\varphi$ -Strahl eingehüllten MOHR'schen Spannungskreise ist der Schnittpunkt des Strahles der Lastschräge  $\delta$  mit der Senkrechten zum Strahl der (fiktiven) Sohlschräge  $\alpha$  im Abstand  $\sigma = \rho = \text{konstant}$  vom Ursprung. Zur Polermittlung Parallele zum Strahl der Sohlschräge  $\alpha$  durch Q. Die Verbindungslinien zwischen dem Pol und den beiden Bruchpunkten  $P_B$  bzw.  $P'_B$  geben die Richtung der Gleitung in den Flanken des aktiven Keiles an.

Trotz der mancherlei Einschränkungen gegenüber der Gültigkeit der Theoreme vom allgemeinen Abscheren im Grundbruch [7] sind Ansätze dazu auch in unserem Falle nicht von der Hand zu weisen, sofern wenigstens bereichsweise Verdichtung voranging. Wenigstens als Rückhalt für die Deutung der gemessenen Fließkurven wollen wir daher das Gleitlinienfeld für Platte und Greifer ( $h : b = 1:2$  bzw.  $1:1$ ) überschlägig auf der Grundlage  $c = 0$ ;  $\varphi = 30^\circ$  bereithalten, Bilder 8 bis 10. Wir bleiben uns aber bewußt, daß die Zonengeometrie sich laufend ändert, wenn  $\varphi$  etwa bei Verdichtung anwächst und womöglich Kohäsivität zu berücksichtigen ist.

Den Greifer denken wir uns, als ob das Dreieck zwischen den Schenkeln starr ausgefüllt wäre, durch eine schräge griffige Platte im Bilde des Pferdehufes ersetzt; es ist dies eine willkürliche Annahme: Denn welche Form die Basis der aktiven Zone annimmt, hängt auch davon ab, wie das Kettenglied in die Fahrzeugkonstruktion eingespannt ist [7].

Die Basiswinkel der aktiven Zone berechnen sich nach H. V. SMOLTCZYK [7] aus dem Gleichgewicht der auf diese Keilzone wirkenden Kräfte, Bild 11. Graphisch findet man die Winkel  $\varepsilon_p$ ,  $\varepsilon_l$  über den Pol im Mohr'schen Spannungskreis, der sich mit jeder Lastschräge ändert: Bilder 8b bis 10b. Darnach ist Grundbruch für den Versuchsgreifer (1:1) theoretisch bis  $\varepsilon = 3,73$  ( $\delta = 75^\circ$ ) möglich, für den (1:2)-Greifer nur bis  $\varepsilon = 1,52$  ( $\delta = 56,6^\circ$ ) und für die Platte sogar nur bis  $\varepsilon = 0,58$  ( $\delta = 30^\circ$ ). Darüber hinaus geht der Grundbruch über in direktes Abscheren bzw. Gleiten längs der geneigten Huffläche. Hierbei war zunächst unterstellt, daß die Reibung Boden-Boden und Boden-Stahl gleich seien:  $\varphi$

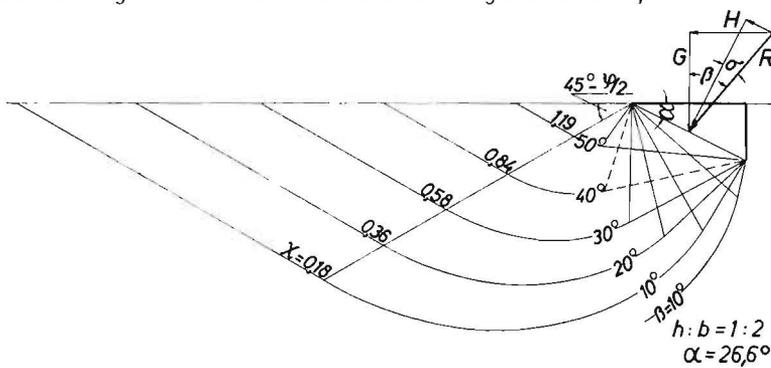


Bild 9 a

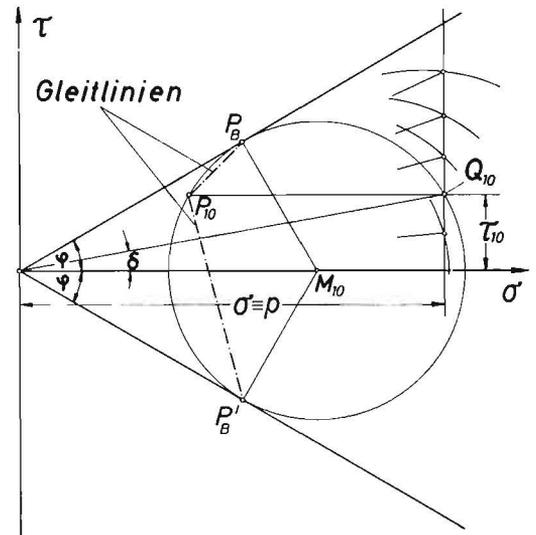


Bild 8 b

$= \varphi_{\text{Stahl}} = 30^\circ$ . Ändern sich die Winkel der Scherfestigkeit, so tritt der Wandel vom Grundbruch zum Abscheren oder Gleiten in der Kontaktfläche früher oder später ein. Durchaus ist in Betracht zu ziehen, daß unmittelbar unter der Kontaktfläche oder der hohen Greiferschneide oder zwischen zwei Greiferschneiden höhere Verdichtung stattfand und dadurch die innere Bodenreibung örtlich erhöht wurde. Auch gibt es eine scheinbare Erhöhung des „Reibungswinkels“, wenn die mit dem Scheren verbundene Dilatation behindert ist, was jedoch eher unter der geschlossenen Kette der Fall wäre.

Längs der unteren Flanke des aktiven Keiles erwartet man im Grundbau das Abrutschen des Fundamentes am Grenzübergang zum plastischen Fließen. Aber während man dabei mit einer Augenblicksbetrachtung des dort im Grunde ja zu verhindernden Vorganges abschließt, nimmt am Triebwerk gerade der weitere Verlauf der Dinge unsere Aufmerksamkeit in Anspruch. D. h. hier erhoffen wir uns eine Erhöhung des Abstützpotentials durch wachsende seitliche Auflast bei fortgesetzter Schlupf-Einsinkung, bei der das Stützglied immer wieder einem neuen Gleichgewicht zustrebt.

Sofern der Grundbruch in lockerem Boden teilweise durch Verdichtung und Verdrängung abgelöst wird, ist die Frage der Mindestlückenweite für optimale Triebkraft nicht mehr allein vom Zonenbild des aktiven und passiven Bruchzustandes her zu beantworten: Denn dann eröffnet sich die Aussicht, daß die vom Vorgänger ausgearbeitete Greiferkuhle durch Nachstopfen laufend mehr oder weniger wieder ausgefüllt wird. Ein Abfall der Triebkraft wäre unter diesen Umständen gar nicht mehr zu erwarten. Deshalb verlieren aber die „ebenen“ Gleitlinienfelder des Streifenfundamentes, aus denen wir den theoretischen Zusammenhang zwischen Lastschräge und Bruchbild gewonnen haben, nicht ihre Be-

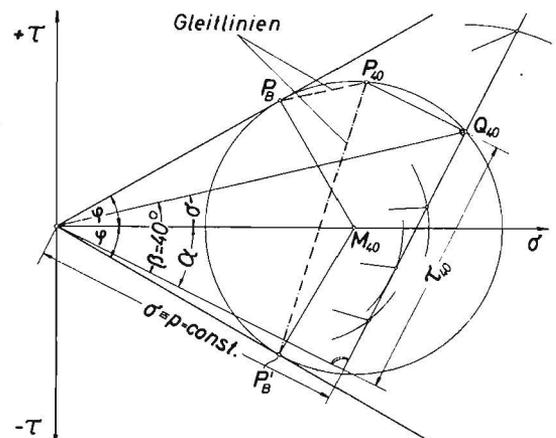


Bild 9 b



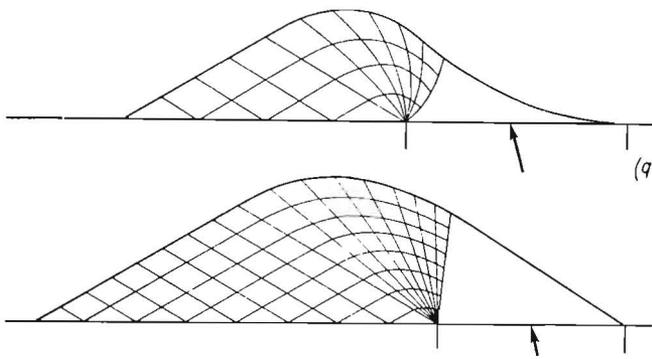


Bild 12: Gleitlinienausbildung bei schräger Belastung: Gegenüber dem Bruchmodell des gewichtslosen Bodens a) ändert sich bei „schwerem“ Boden als Modell gemäß b) nach [10]

von vorne nach hinten linear zunehmend, die zugehörige Spannung kennen, um die Triebkraft über die Eingriffslänge integrieren zu können. Diese lange fällig gebliebene Erweiterung der Coulomb'schen Gleichung auf den ganzen Deformationsvorgang hat erstmalig M. G. BEKKER mit der An-

nahme vorgenommen, daß  $\tau(j)$  nach einer Exponentialfunktion verläuft; und zwar wählte er die Funktion einer aperiodischen Schwingung, die äußerlich dem Typ der Kurve mit Buckel entspricht<sup>2)</sup>. Für den häufiger anzutreffenden Kurventyp ohne Buckel, d. h. mit monotonem Ansteigen der Spannung, haben später Z. JANOSI und B. HANAMOTO [18] eine einfachere Exponential-Funktion mit nur einem Parameter  $K$  (außer  $c$  und  $\varphi$ ) vorgeschlagen:

$$\tau = (c + \sigma \cdot \tan \varphi) (1 - e^{-j/k}).$$

Hierin bedeutet  $j$  die zur Erreichung von  $\tau$  jeweils nötige Deformation (Schubweg). Damit war zwar eine Fließfunktion gewonnen, doch fußte dieselbe auf dem Coulomb'schen Maximum, also auf einer Grenzbetrachtung, sozusagen von oben nach unten.

(Fortsetzung folgt)

2) Anmerkung: Über die geschichtliche Schrittfolge der Entwicklung und des Ausbaues der Eigenheiten und der Parameter-Bestimmung dieser halbempirischen Exponentialfunktion ist jüngst von berufener Seite diesseits und jenseits des großen Teiches sowie schon auf dem I. Internat. Kongreß für Geländefahrt in Turin-Saint Vincent 1961 in ausführlicher Würdigung berichtet worden [4, 15 17]

Reinhold Herpich:

## Dehnungsmeßanlage für genaue Leistungsmessungen an zapfwellenbetriebenen Landmaschinen mit Hilfe von Integratoren

Bayer. Landesanstalt für Landtechnik, Weihenstephan

Angeregt durch ausländische Industrierversuche und Literaturangaben führte Prof. Dr. Dr. HUPFAUER schon 1953 als Leiter der Landesanstalt für landwirtschaftliches Maschinenwesen in Weihenstephan mit seinem damaligen Mitarbeiter, HORST SCHULZ, Zapfwellen-Drehmomentmessungen mit selbstgebauten Drehmomentgebern an verschiedenen Landmaschinen durch, insbesondere an angehängten Mähreschern. Diese Zapfwellen-Drehmomentgeber (Bild 1, links) beinhalten in ihrer Konstruktion bereits alle Bauelemente der heutigen Geber. Sie waren jedoch noch nicht so perfektioniert, wie die jetzt käuflichen Meßwellen, welche weitgehend denjenigen Bedingungen Rechnung tragen, die W. BAADER [1] 1957 für die landtechnische Forschung forderte.

Während die Diskussionen um die Erfassung des Meßwertes durch die moderne Aufnahmetechnik und die dazugehörige moderne Verstärkertechnik ruhiger wurden, also der Dehnungsmeßstreifen zum „Handwerkszeug“ geworden ist, begannen die Diskussionen [3; 4; 5; 7; 9] über die Verarbeitung der nun „sicher“ anfallenden Meßwerte. Es gibt heute schon eine ganze Reihe von Methoden der Meßwertverarbeitung,

insbesondere die recht interessanten von SÖHNE, MÖLLER und BRUER [10] und neuerdings EIMER [3], GLUTH und VOSS [5] und KROMER [8]. Bei diesen Auswertgeräten wird der Meßschieb motorisch unter einer Nachfahreinrichtung bewegt, so daß die Auswertperson nur Bewegungen in Ordinatendirection zu machen hat. Die Nachfahreinrichtung erzeugt dann ein elektrisches analoges Meßsignal, welches durch entsprechende Klassiergeräte erfaßt wird. Bei [10] wird dabei der Mittelwert des Meßschiebes und somit der Meßgröße durch einen mit der Abtastvorrichtung mitbewegten Integrator gefunden. Bei den Anlagen nach [3] und [5] wird der Mittelwert statistisch, also aus dem Klassierergebnis errechnet, Gaus'sche Verteilung vorausgesetzt. Mit diesen Anlagen kann auch durch Klassieren ein Belastungskollektiv ermittelt werden. Während nun das Belastungskollektiv jedoch hauptsächlich zu Festigkeitsanalysen und Festigkeitsberechnungen von Bauteilen herangezogen wird, dient der Mittelwert zur gegenseitigen Beurteilung von Landmaschinen oder von Teilen von Maschinensystemen, die für gleiche Aufgaben bestimmt sind, jedoch konstruktiv ganz andere Lösungen darstellen.

Aus diesem Grund müssen also über den Mittelwert oft sehr feine Unterschiede aufgedeckt werden. Nach [3] hängt bei den oben genannten Auswerteinrichtungen das Ergebnis sehr stark von der Auswertperson ab, so daß je nach Methode mit  $\pm 1$  bis 3 % bzw.  $\pm 2$  bis 6 % Fehler gerechnet werden muß. In vielen Fällen wird diese Genauigkeit völlig ausreichen. Zählt man jedoch zu diesem unkontrollierbaren Fehler noch den Fehler, der eigentlichen Meßanlage mit ca.  $\pm 1$  bis 2 %, so kann der absolute Fehler schon eine Größenordnung annehmen, die jede genauere Betrachtung einer Gegenüberstellung hinfällig macht.

Obwohl Zapfwellen-Leistungsmeßanlagen aus der Literatur bekannt sind [1; 2; 9], soll trotzdem die Dehnungsmeßanlage der Bayer. Landesanstalt für Landtechnik beschrieben werden, da diese Anlage speziell dafür ausgerüstet ist, den Leistungsbedarf über den Mittelwert der Zapfwellenbeanspruchung sehr genau zu messen, ohne daß damit eine langwie-

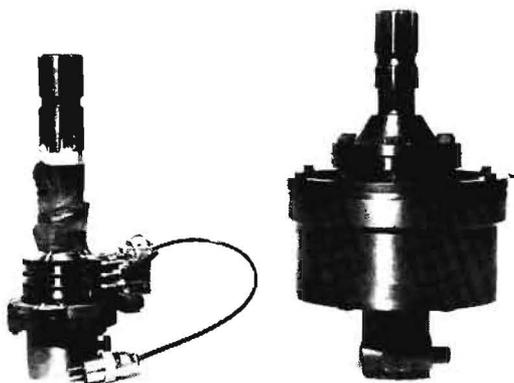


Bild 1: Zapfwellen-Drehmomentgeber. links: 1953 gebauter Geber. rechts: jetzt verwendeter Geber der Zahnradfabrik Friedrichshafen