

Schwingende Bodenbearbeitungswerkzeuge Kinematik und Versuche mit einzelnen Modellwerkzeugen

Von Alfred Eggenmüller

Bei der Entwicklung des Ackerschleppers ist eine bessere Ausnutzung der Motorleistung anzustreben. Dieses Ziel ist jedoch bei gezogenen Geräten durch die ungenügende Zugleistung der Schlepperreifen in schwierigen Bodenverhältnissen begrenzt. Die Entwicklung muß also von nur gezogenen Geräten zu Geräten gehen, bei denen die Motorleistung zu einem hohen Anteil unmittelbar über die Zapfwelle dem Gerät zugeführt und dadurch energetisch wirkungsvoller angewendet wird.

Bodenbearbeitungsgeräte, vor allem Pflüge, haben im allgemeinen den größten Zugkraftbedarf unter den Landmaschinen. Die Bodenfräse kommt der Forderung nach einer günstigen Kraftübertragung weitgehend entgegen, hat aber bis heute nur begrenzte Anwendungsmöglichkeiten gefunden. Infolge der starken Krümelwirkung unter gewissen Bodenverhältnissen und auch infolge des höheren Leistungsbedarfes kann die Fräse vorerst den Streichblechpflug nicht ersetzen.

Nach den im Folgenden mitgeteilten Untersuchungen [1]¹⁾ und auch nach anderen, vor allem amerikanischen [2] und russischen [3] Versuchen können mit schwingenden Bodenbearbeitungswerkzeugen die Zugkräfte verringert werden. Die bisher bekannten Untersuchungen berücksichtigen aber nicht den Einfluß der Schwingungsbahn des Werkzeuges im Boden, die nach unseren Untersuchungen einen wesentlichen Einfluß auf Zugkraftverringern und Arbeitserfolg hat.

Unter „schwingenden Werkzeugen“ sollen im folgenden nur zwangsweise bewegte Werkzeuge und nicht frei schwingende Werkzeuge bei gefederter Aufhängung verstanden werden. Als schwingende Werkzeuge können Untergrundlockerer, Hackwerkzeuge, Häufelkörper, aber auch Pflugkörper, in Frage kommen.

¹⁾ Diese ersten Untersuchungen wurden mit finanzieller Unterstützung der BV-Aral AG Bochum durchgeführt, der dafür auch an dieser Stelle bestens gedankt sei.

Die Untersuchungen wurden an einfachen Werkzeugen in Form geneigter Flächen begonnen und später auf schwierige Formen ausgedehnt. Eine solche geneigte Fläche als Modellwerkzeug vereinfacht den Vorgang des Schneidens, Abscherens, Beschleunigens und Anhebens des Bodens. Von Söhne [4] wurden an starren Werkzeugen dieser Form auftretende Kräfte berechnet und untersucht, womit Unterlagen für eine theoretische Behandlung der Verhältnisse gegeben sind. Danach werden etwa 60% der an einem solchen Werkzeug auftretenden Kräfte durch die Reibung zwischen Werkzeug und Boden und der inneren Reibung im Boden hervorgerufen. Gelingt es, den Reibungsbeiwert zwischen Stahl und Boden, der im Mittel etwa 0,5 beträgt, beispielsweise um 50% zu verringern, so würde sich die gesamte Zugkraft um nur 30% verringern. Um mehr zu erreichen, müßten durch Änderung der technologischen Bedingungen auch die zum Trennen und Beschleunigen des Bodens notwendigen Kräfte am Werkzeug verringert oder durch einen geeigneten Antrieb des Werkzeuges aufgebracht werden. Bei den Vorversuchen an schwingenden Einzelwerkzeugen in Form geneigter Flächen wurde der große Einfluß der Schwingungsgrößen, wie Frequenz, Amplitude, Fahrgeschwindigkeit und Schwingungsrichtung, auf die Zugkraft festgestellt. Dabei wurden bei kleinen Fahrgeschwindigkeiten von 0,40 m/s eine Zugkraftverringern bis auf 40% gemessen. Einen besonderen Einfluß hat dabei die Schwingungsrichtung, die, wie nachfolgende Überlegungen zeigen, für die Bahn des schwingenden Werkzeuges im Boden bestimmend ist.

Kinematik schwingender Werkzeuge

Bewegt sich ein schwingendes Werkzeug unter einem bestimmten Winkel zur Fahrtrichtung – in der sogenannten Schwingungsrichtung – geradlinig und ist der Geschwindigkeitsverlauf über dieser Bewegung infolge eines Kurbelantriebes sinusförmig, so beschreibt das Werkzeug bei einer Überlagerung der Schwingungsbewegung mit der Fahrbewegung eine von den Schwingungsdaten charakterisierte Bahn, die Schwingungsbahn.

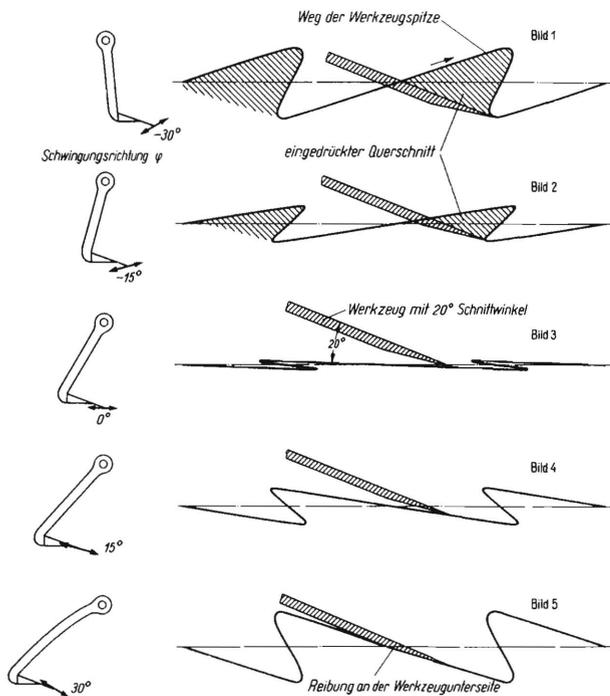


Bild 1 bis 5. Bahn eines schwingenden Werkzeuges bei verschiedener Schwingungsrichtung, jedoch gleicher Frequenz, Fahrgeschwindigkeit und Amplitude.

In **Bild 1 bis 5** sind verschiedene Schwingungsrichtungen miteinander verglichen, wobei Frequenz, Amplitude und Fahrgeschwindigkeit in allen Fällen gleich sind. Auf der linken Seite von **Bild 1 bis 5** sind die Werkzeuge mit ihrer Aufhängung dargestellt. Die Lage des Drehpunktes zur Werkzeugschneide bestimmt die Schwingungsrichtung. Dabei kann hier mit genügender Genauigkeit eine geradlinige Bewegung angenommen werden, weil die Amplitude im Vergleich zum Abstand der Werkzeugschneide zum Drehpunkt relativ klein ist. Natürlich kann eine solche geradlinige Bewegung auch durch eine andere Werkzeugaufhängung erreicht werden. Nach den bisherigen Untersuchungen erzielt eine solche einfache, geradlinige, unter der Schwingungsrichtung zur Vorwärtsbewegung geneigte Schwingbewegung schon hohe Zugkraftverringerungen. Auf der rechten Seite von **Bild 1 bis 5** sind die Wege der Werkzeugschneide während der gleichzeitigen Vorwärtsbewegung der Werkzeugaufhängung dargestellt.

Dabei muß zwischen negativen und positiven Schwingungsrichtungen unterschieden werden, **Bild 1**

und **2** zeigen die Werkzeugbewegung bei negativen Schwingungsrichtungen von -30° und -15° . In beiden Fällen schwingen die Werkzeuge bei ihrer Vorwärtsbewegung schräg nach oben, schneiden dabei neuen Boden ab und bewegen ihn auf seiner Oberfläche nach oben. Bei der darauf folgenden Abwärtsbewegung soll sich der Boden abheben, um bei der nachfolgenden Vorwärtsbewegung keine Reibung auf der Werkzeugoberseite zu verursachen. Der Vorgang beider Schwingungsrichtungen unterscheidet sich durch die Höhe der senkrechten Bewegung. Dabei wirkt sich das Eindringen des nicht abgeschnittenen Bodens an der Unterseite des Werkzeuges (schraffierte Querschnitte) ungünstig aus. Ebenfalls ungünstig ist das Anheben des Bodens bei der Vorwärtsbewegung, weil dabei zu dem Trennwiderstand Reibungs- und Beschleunigungskräfte hinzukommen, die Komponenten in Fahrtrichtung erzeugen und somit Zugkräfte benötigen. Daher ist zu erwarten, daß mit einer solchen Anordnung der Schwingungsbewegung keine günstigen Verhältnisse zu erzielen sind.

Auch die in **Bild 3** dargestellte Schwingungsrichtung von 0° läßt keine große Zugkraftverringerung erwarten. Im wesentlichen bewegt sich dabei das Werkzeug mit höherer Geschwindigkeit als die Fahrgeschwindigkeit nach vorn, um dann bei der Rückwärtsbewegung einen gewissen Weganteil zu überschneiden.

Günstiger sind die Verhältnisse bei positiven Schwingungsrichtungen, d. h., wenn sich die Werkzeugschneide bei der Vorwärtsbewegung schräg nach unten bewegt. **Bild 4** und **5** zeigen die Werkzeugbewegungen bei Schwingungsrichtungen von 15° und 30° . Hier erfolgt die Vorwärtsbewegung unter einem Winkel, der etwas kleiner als der Schnittwinkel ²⁾ des Werkzeuges ist. Es wird also in diesem Teil des Weges der Boden abgetrennt und nur geringfügig angehoben. Bei der darauf folgenden Hubbewegung wird der abgeschnittene Boden abgetrennt und der gesamte auf dem Werkzeug liegende Boden nach oben beschleunigt; er hebt sich ab und gibt das Werkzeug während der nachfolgenden Vorwärtsbewegung frei (**Bild 6**).

²⁾ Bezeichnung der Winkel nach den Begriffsbestimmungen in Normblatt DIN 11118.

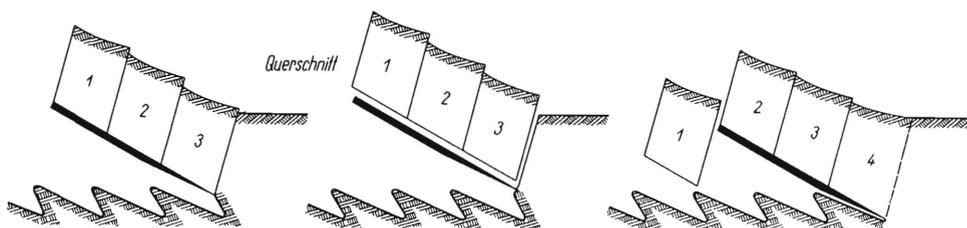


Bild 6. Idealisierter Vorgang am schwingenden Werkzeug.

links: Abtrennen und Beschleunigung des Bodens nach oben

Mitte: Boden vom Werkzeug abgehoben

rechts: Werkzeug schneidet Boden ab, abgehobener Boden kommt auf das Werkzeug zurück

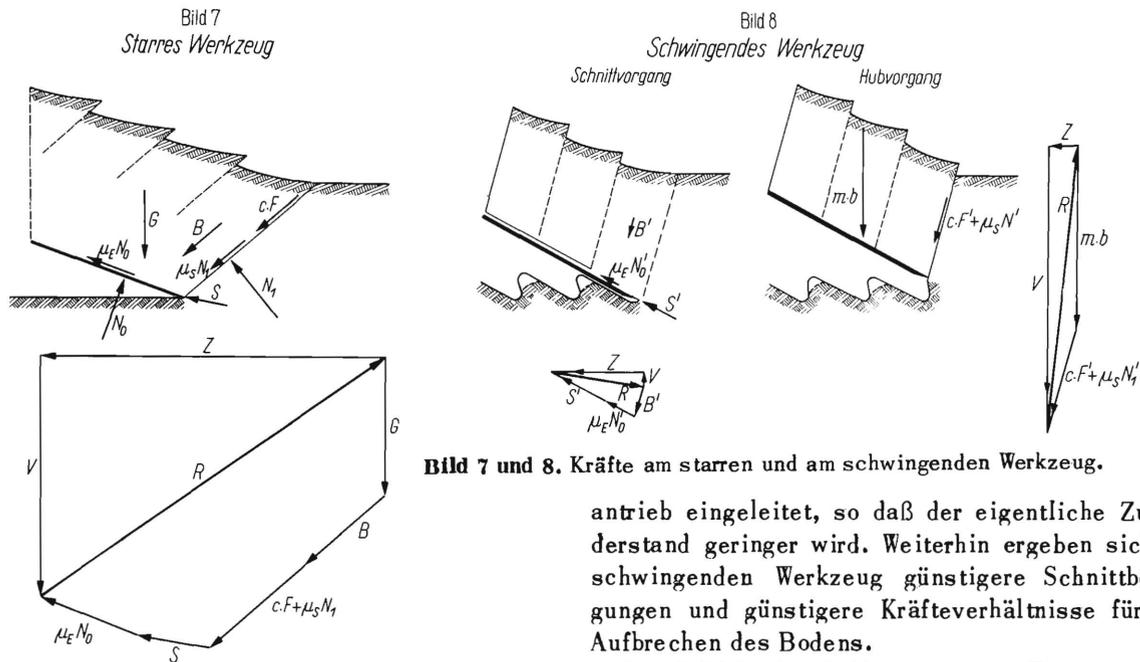


Bild 7 und 8. Kräfte am starren und am schwingenden Werkzeug.

Infolgedessen erzeugt nur der Schnittwiderstand und der Reibwiderstand des neu abgeschnittenen Bodens eine Komponente in Fahrtrichtung.

Der Winkel der Schnittbewegung und die Richtung der Hubbewegung sind von Frequenz, Amplitude, Schwingungsrichtung und Fahrgeschwindigkeit abhängig. Bei der Schnittbewegung ist darauf zu achten, daß keine zusätzliche Reibung an der Unterseite des Werkzeuges auftritt, wie es in Bild 5 der Fall ist. Dabei und wohl für jede Festlegung der Schwingungsdaten ist der Anstellwinkel des Werkzeuges von Bedeutung.

Die Zugkraftverringerung eines schwingenden Werkzeuges läßt sich folgendermaßen erklären: Bei einem starren Werkzeug erfolgen Abschneiden, Aufbrechen und Anheben des Bodens immer gleichzeitig. Die für die Einzelvorgänge erforderlichen Kräfte, die sich durch Reibungseinflüsse auf mehr als das Doppelte vergrößern, müssen durch reine Zugkräfte aufgebracht werden (Bild 7). Das starre Werkzeug schneidet den Boden in einem Winkel ab, der gleich dem Schnittwinkel des Werkzeuges ist. Infolge der von dem Werkzeug auf den Boden ausgeübten Kräfte bricht dieser periodisch in Scherebenen auf und wird vom Werkzeug angehoben. Die dabei entstehenden Kräfte können in Reibungs- und Scherkräfte sowie in Hub- und Beschleunigungskräfte aufgegliedert werden, wie es Söhne [4] gezeigt hat. Daneben wirkt an der Werkzeugschneide noch der Schnittwiderstand. Die Summe der waagerechten Komponenten dieser Kräfte entspricht dem Zugwiderstand des Werkzeuges.

Beim schwingenden Werkzeug (Bild 8) werden die beim starren Werkzeug beobachteten Einzelvorgänge in verschiedene Phasen aufgeteilt und ein Teil der erforderlichen Kräfte über den Schwing-

antrieb eingeleitet, so daß der eigentliche Zugwiderstand geringer wird. Weiterhin ergeben sich am schwingenden Werkzeug günstigere Schnittbedingungen und günstigere Kräfteverhältnisse für das Aufbrechen des Bodens.

So wird hier durch die senkrechte Bewegung des Werkzeuges der auf ihn lastende Boden nach oben beschleunigt und an der Werkzeugschneide vom festen Boden abgeschert (rechte Darstellung im Bild 8). Infolge der Vertikalbeschleunigung hebt sich der Boden vom Werkzeug ab; die dabei auf das Werkzeug ausgeübten Kräfte liegen fast senkrecht zur Fahrtrichtung und bewirken daher kaum oder nur einen geringen Zugwiderstand. Bei der darauf folgenden Vorwärtsbewegung des Werkzeuges wird neuer Boden abgeschnitten, wobei ein Schnittwiderstand an der Werkzeugschneide entsteht. Bei günstig gewählten Schwingungsdaten und entsprechendem Schnittwinkel des Werkzeuges erfolgt diese Vorwärtsbewegung so, daß an der Werkzeugunterseite ein noch ausreichender Freiwinkel vorhanden ist. Infolge der Abwärtsbewegung in dieser Phase ist der Schnittwinkel der Schneide kleiner als bei einem starren Werkzeug, womit auch der zum Trennen notwendige Schnittwiderstand geringer wird. Der frisch abgeschnittene Boden gleitet auf der Oberseite des Werkzeuges und verursacht Reibungskräfte. Er wird in dieser Phase nur geringfügig angehoben und bricht vermutlich noch nicht auf. Auch werden noch keine großen senkrechten Beschleunigungen auf ihn ausgeübt. Währenddessen fällt der beim vorhergehenden Hub des Werkzeuges hochgehobene Boden wieder auf das Werkzeug zurück, wobei die Größe der auf den Boden ausgeübten senkrechten Beschleunigung den Zeitpunkt des Wiederauftreffens bestimmt.

Der resultierende Zugwiderstand ist während dieser abwärts gerichteten Schnittbewegung nur gering (linke Darstellung in Bild 8). Theoretisch kann bei einem idealen Schwingungsvorgang erreicht werden, daß nur der Schnittwiderstand und die Reibungskräfte des neu abgeschnittenen Bodens einen Zugwiderstand verursachen.

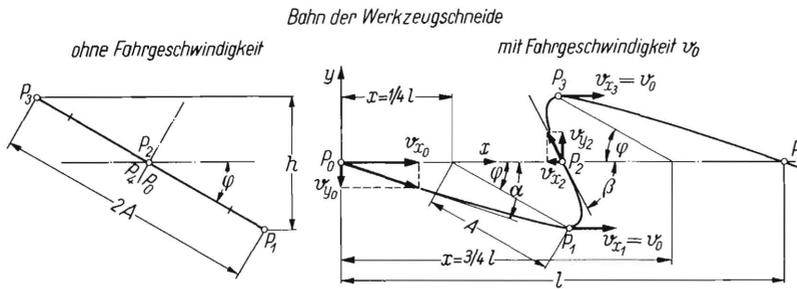


Bild 9. Definitionen und geometrische Größen einer Schwingungsbahn.

Der Weg des Werkzeuges im Boden als Überlagerung der Schwingbewegung mit der Fahrbewegung ist bei geradliniger Schwingbewegung und bei einem sinusförmigen Verlauf der Schwingungsgeschwindigkeit eine schrägliegende Sinus-Schwingung (Bild 9). Die Schwingungslänge l , d.h. die Länge einer Schwingungsperiode, ergibt sich bei einer Fahrgeschwindigkeit v_0 des Gerätes und einer Frequenz f des Schwingungsantriebes zu

$$l = \frac{v_0}{f}$$

Die Schwingungshöhe h der senkrechten Bewegung des Werkzeuges in der Hubphase ergibt sich bei einem Winkel φ der Schwingungsrichtung und einer Amplitude A , zu $h = 2 A \sin \varphi$

Das Verhältnis Schwingungslänge zu Schwingungshöhe

$$z = \frac{l}{h} = \frac{v_0}{2 A f \sin \varphi}$$

enthält als dimensionslose Zahl alle den Schwingungsweg charakterisierenden Größen und ist bei der Beurteilung und Darstellung der Ergebnisse besonders wichtig und nützlich.

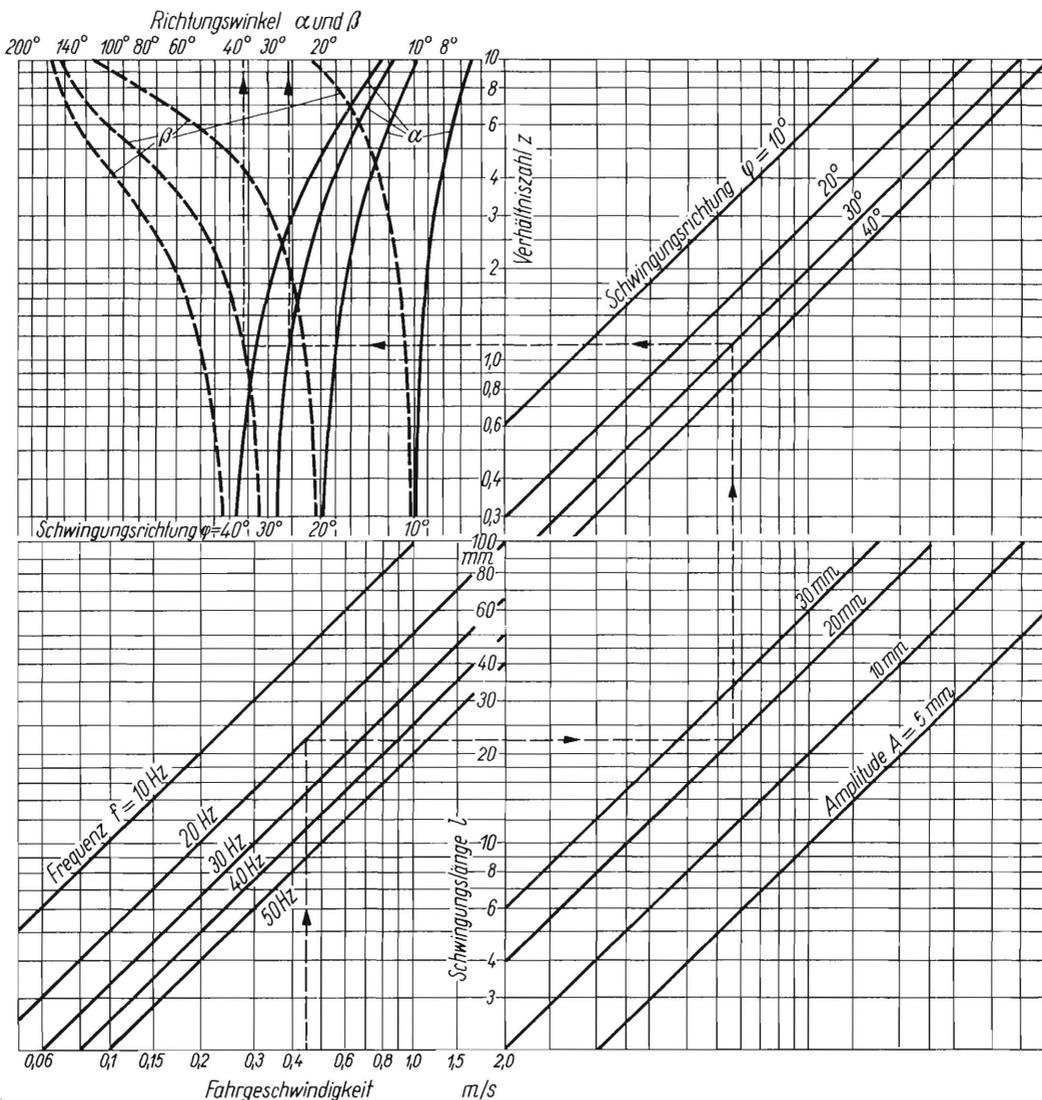


Bild 10. Nomogramm zur Ermittlung der Verhältniszahl z und der Winkel α und β in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit v_0 , der Schwingungsfrequenz f , der Amplitude A und des Winkels φ der Schwingungsrichtung.

Der Weg des Werkzeuges ist in Koordinatendarstellung

$$x = v_0 t + A \cos \varphi \sin \omega t$$

$$y = -A \sin \varphi \sin \omega t$$

wobei $\omega = 2 \pi f$ ist. Der Verlauf der Geschwindigkeit ergibt sich aus der Ableitung des Weges nach der Zeit:

$$v_x = v_0 + A \omega \cos \varphi \cos \omega t$$

$$v_y = -A \omega \sin \varphi \cos \omega t$$

Für eine genaue Bestimmung der Schwingungsbahn benutzt man außer der Schwingungslänge l und der Schwingungshöhe h noch die Richtung der Schnittbewegung in Punkt P_1 und P_4 und die Richtung der Hubbewegung in Punkt P_2 . Die Richtung der Schnittbewegung ist:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{v_{y0}}{v_{x0}} = \frac{A \omega \sin \varphi}{v_0 + A \omega \cos \varphi}$$

Führt man in diese Gleichung die Zahl

$$z = \frac{v_0}{2 A f \sin \varphi} \quad \text{ein, so ergibt sich:}$$

$$\operatorname{ctg} \alpha = \frac{z}{\pi} + \operatorname{ctg} \varphi$$

Die Richtung der Hubbewegung in P_2 ist:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{v_{y2}}{v_{x2}}$$

Führt man in diese Gleichung z ein, so ergibt sich:

$$\operatorname{ctg} \beta = \frac{z}{\pi} - \operatorname{ctg} \varphi$$

Die Wendepunkte P_1 und P_3 erhält man, indem man die Amplitude A an den Punkten $x = \frac{1}{4} l$ und $x = \frac{3}{4} l$ unter dem Winkel φ der Schwingungsrichtung aufträgt (Bild 9).

Die Verhältniszahl z sowie die Winkel α und β kann man in Abhängigkeit von den Schwingungsdaten v_0, f, A und φ in dem in **Bild 10** dargestellten Nomogramm ablesen.

Für die Beurteilung einer Schwingung ist es nun zweckmäßig, die dazugehörigen Schwingungswege aufzuzeichnen. **Bild 11** zeigt diese Kurven für die Fahrgeschwindigkeit von 0,40 m/s. Die Frequenz nimmt in den senkrechten Spalten von 16 bis 48 Hz zu. In den waagerechten Zeilen werden die Schwingungsrichtung von 15° bis 45° und in den waagerechten Gruppen die Amplituden von 6 bis 18 mm variiert. Mit größer werdender Frequenz verringert sich die Schwingungslänge, so daß bei großen Amplituden und flachen Schwingungsrichtungen eine relativ große Rückwärtsbewegung des Werkzeuges auftritt. Mit steiler werdender Schwingungsrichtung und mit größer werdender Amplitude nimmt die Schwingungshöhe zu, während die Frequenz darauf keinen Einfluß hat. Dagegen beeinflussen Amplitude und Schwingungsrichtung die Schwingungslänge nicht, es sei denn, daß eine Überschnei-

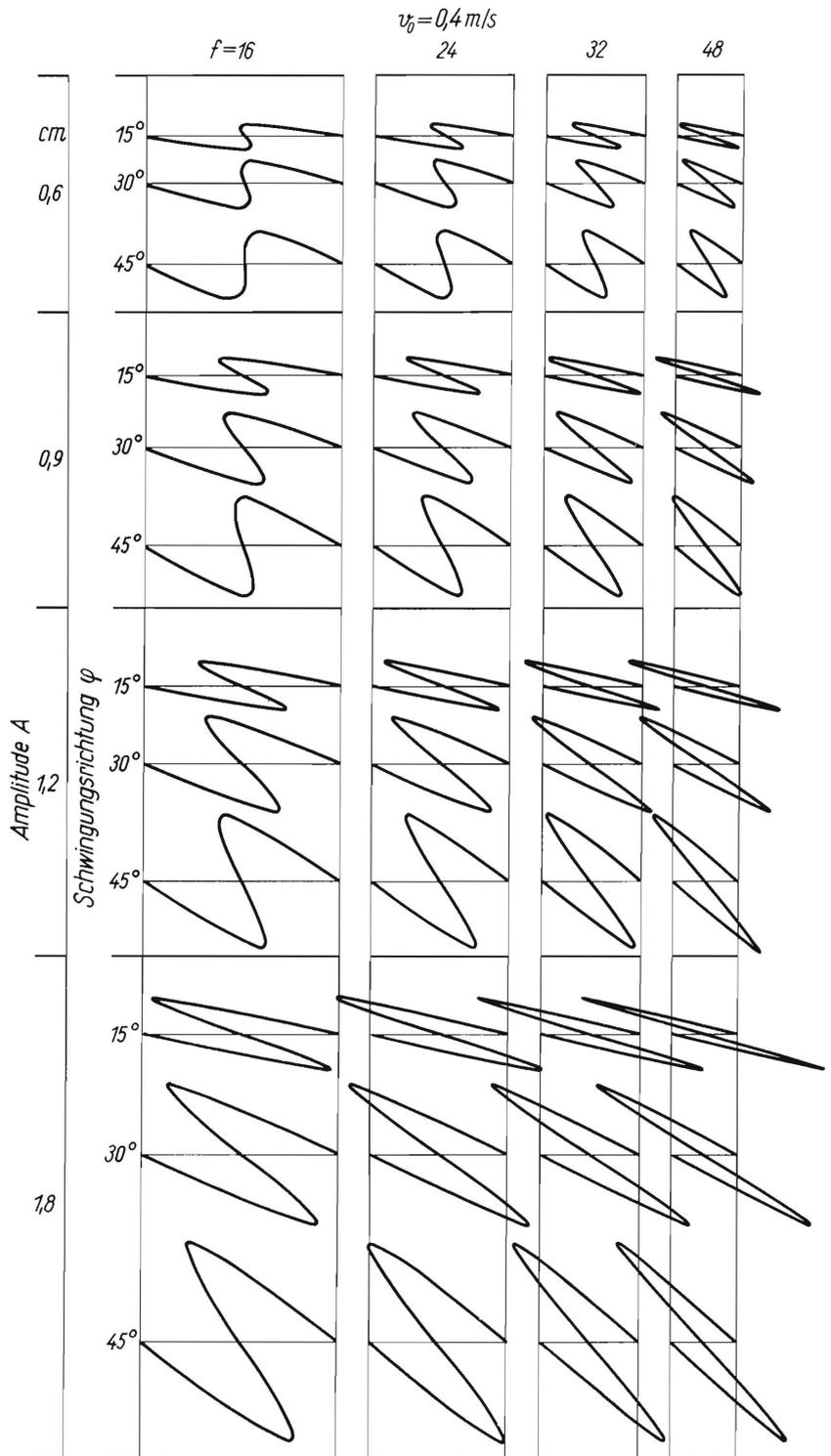


Bild 11 bis 13. Schwingungsbahnen eines Werkzeuges für eine Fahrgeschwindigkeit von 0,4, 0,6 und 0,8 m/s in Abhängigkeit der Schwingungsamplitude A , der Frequenz f und der Schwingungsrichtung φ .
Bild 12 und 13 siehe Seite 60 und 61

zung bei der senkrechten Bewegung über die Schwingungslänge hinaus eintritt. Die Winkel α und β sind stark von den Schwingungsdaten abhängig; den entscheidenden Einfluß auf sie hat die Schwingungsrichtung.

Bild 12 zeigt die Schwingungswege für die Fahrgeschwindigkeit von 0,6 m/s. Infolge der höheren Fahrgeschwindigkeit sind die Schwingungslängen

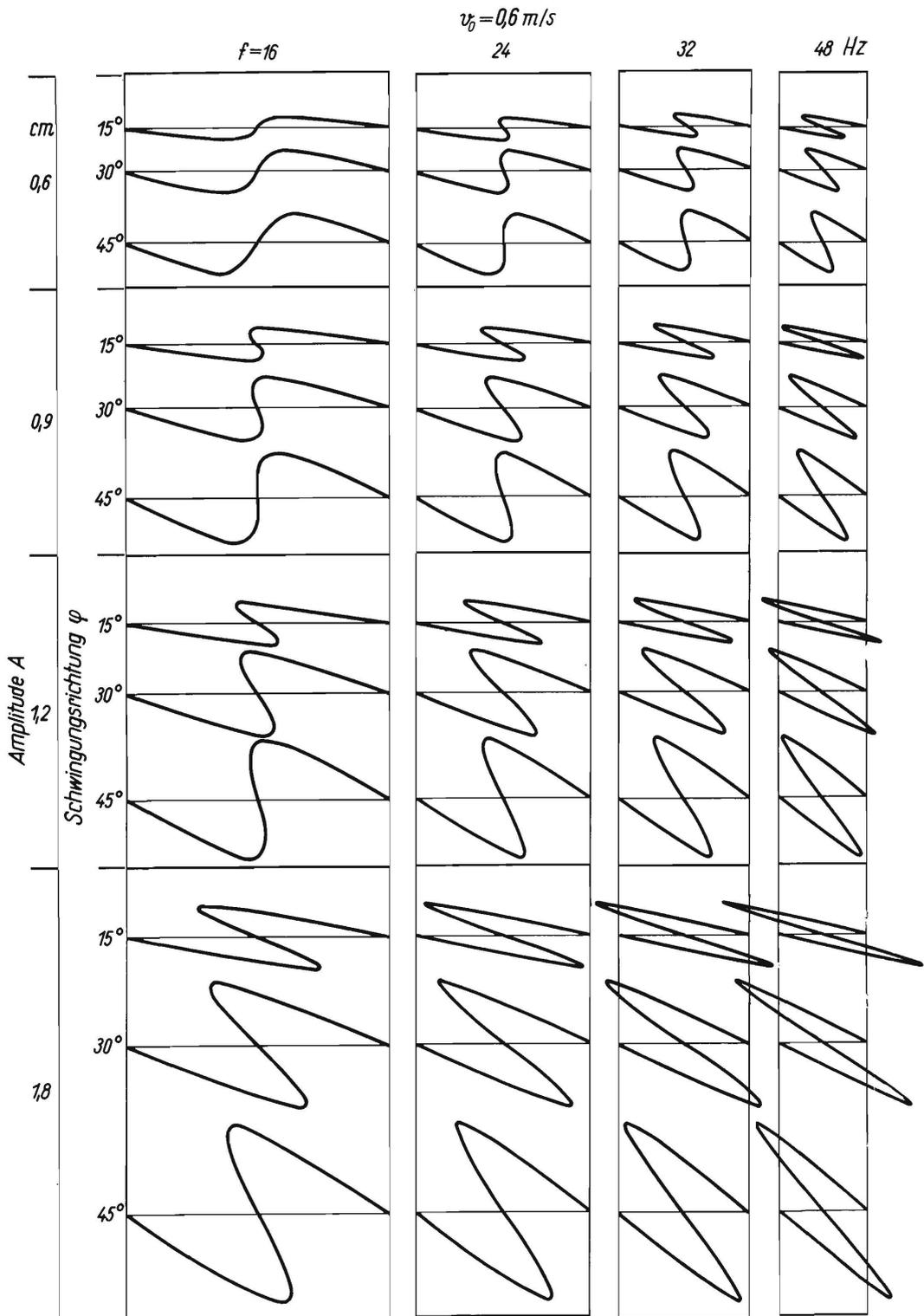


Bild 12.

proportional länger geworden. Bei geringer Frequenz und kleinen Amplituden treten Schwingungsformen auf, bei welchen die Richtung der Hubbewegung in Fahrtrichtung verläuft ($\beta > 90^\circ$); dies ist ungünstig, weil dadurch Kraftkomponenten in der Zugrichtung entstehen. Bei größeren Amplituden wird die Schwingungsbahn wieder günstiger. Die Rückwärtsbewegungen sind bei hohen Frequenzen und großen Amplituden noch relativ groß; ebenso treten auch starke Überschneidungen auf.

Bei den in **Bild 13** dargestellten Schwingungswegen für die Fahrgeschwindigkeit von $0,8 \text{ m/s}$ ist die Richtung der Hubbewegung bei kleinen Frequenzen und kleinen Amplituden noch ungünstiger. Auch ist die Schwingungslänge bei kleinen Frequenzen sehr groß. Vergleicht man die Schwingungsbahnen der verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten, so stellt man fest, daß die Schwingungsbahnen in ihrer Form übereinstimmen, wenn das Verhältnis Fahrgeschwindigkeit : Frequenz sowie

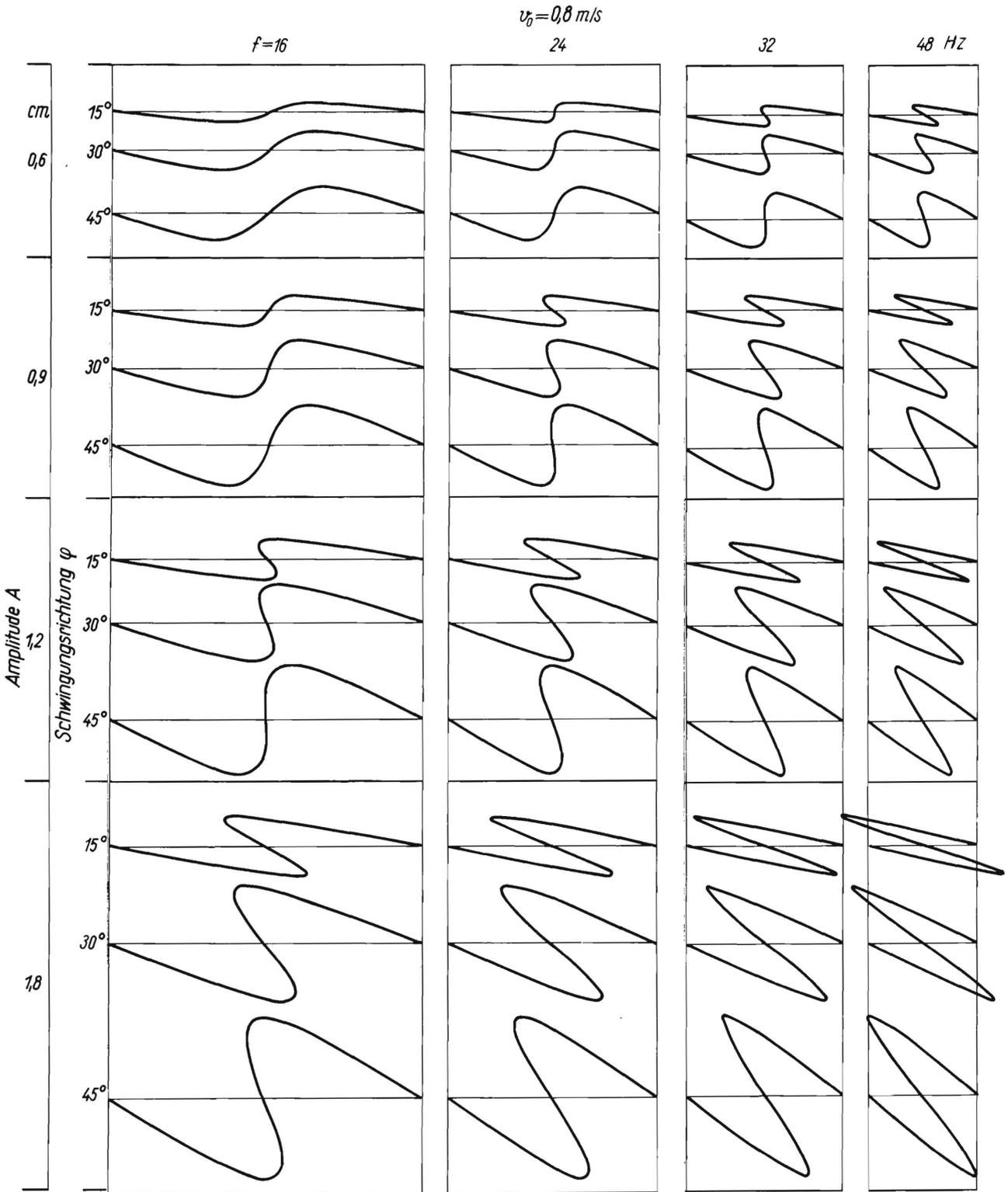


Bild 13.

Amplitude und Schwingungsrichtung gleich sind. Bei der doppelten Fahrgeschwindigkeit und der doppelten Frequenz ergeben sich die gleichen Schwingungsbilder. Sie unterscheiden sich lediglich in ihrer Zeitdauer. Aus Bild 11 bis 13 geht der Einfluß der einzelnen Schwingungsgrößen auf die Schwingungsbahn hervor, der Einfluß dieser auf die Zugkraftverringerung wird später anhand der Versuchsergebnisse diskutiert.

Die mittlere Schwingungs-Geschwindigkeit, mit der das Werkzeug an seiner Aufhängung sich bewegt, sei v_{sm} , dann gilt $v_{sm} = 4 A/T$ und mit der Schwingungszeit $T = 1/f$

$$v_{sm} = 4 A f$$

Die maximale Schwingungsgeschwindigkeit v_{smax} ergibt sich aus $v_s = A \omega \cos \omega t$ mit $\cos \omega t = 1$ und $\omega = 2 \pi f$

$$v_{smax} = 2 \pi A f$$

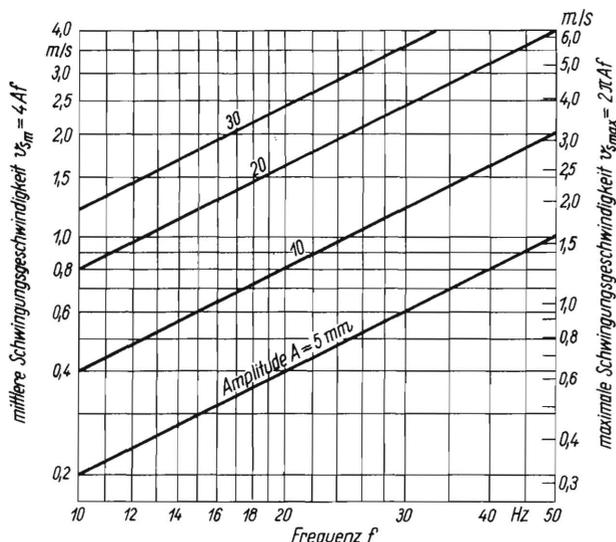


Bild 14. Mittlere und maximale Schwingungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Frequenz f und der Amplitude A .

Sie ist also um $\pi/2 = 1,57$ mal höher als die mittlere Schwingungsgeschwindigkeit (**Bild 14**).

Die mittlere Geschwindigkeit für die senkrechte Bewegung des Werkzeuges, die mittlere Hubgeschwindigkeit, v_{Hm} ist: $v_{Hm} = 2h/T = 2fh$ und mit $h = 2A \sin\varphi$

$$v_{Hm} = 4fA \sin\varphi.$$

Das Verhältnis Fahrgeschwindigkeit zu mittlerer Hubgeschwindigkeit ist:

$$\frac{v_0}{v_{Hm}} = \frac{v_0}{4fA \sin\varphi} = \frac{z}{2}.$$

Die Zahl z gibt also nicht nur das Verhältnis der Schwingungslänge zur Schwingungshöhe, sondern auch das Verhältnis der doppelten Fahrgeschwindigkeit zur mittleren Hubgeschwindigkeit an:

$$z = \frac{2v_0}{v_{Hm}}.$$

Die Formel für die mittlere Schnittgeschwindigkeit lautet:

$$v_{Sm} = v_0 + v_{sm} \cos\varphi = v_0 + 4fA \cos\varphi.$$

Bei gleichen z -Werten kann die mittlere Schnittgeschwindigkeit sehr verschieden sein. Bei hohen mittleren Schnittgeschwindigkeiten überschneiden sich die Schwingungsbahnen erheblich, bei kleinen mittleren Geschwindigkeiten verlaufen die Hubbewegungen in einem flachen Winkel zur Fahrtrichtung nach vorn ($\beta > 90^\circ$).

Die Lage der unteren und oberen Wendepunkte P_1 und P_3 (**Bild 9**) ist nun ein Maß für die Über- oder Unterschneidung. Liegt P_1 und P_3 direkt über P_2 , dem mittleren Punkt der Hubbewegung, so muß

$$v_0 = 4fA \cos\varphi$$

oder

$$\frac{v_0}{4fA \cos\varphi} = 1$$

sein.

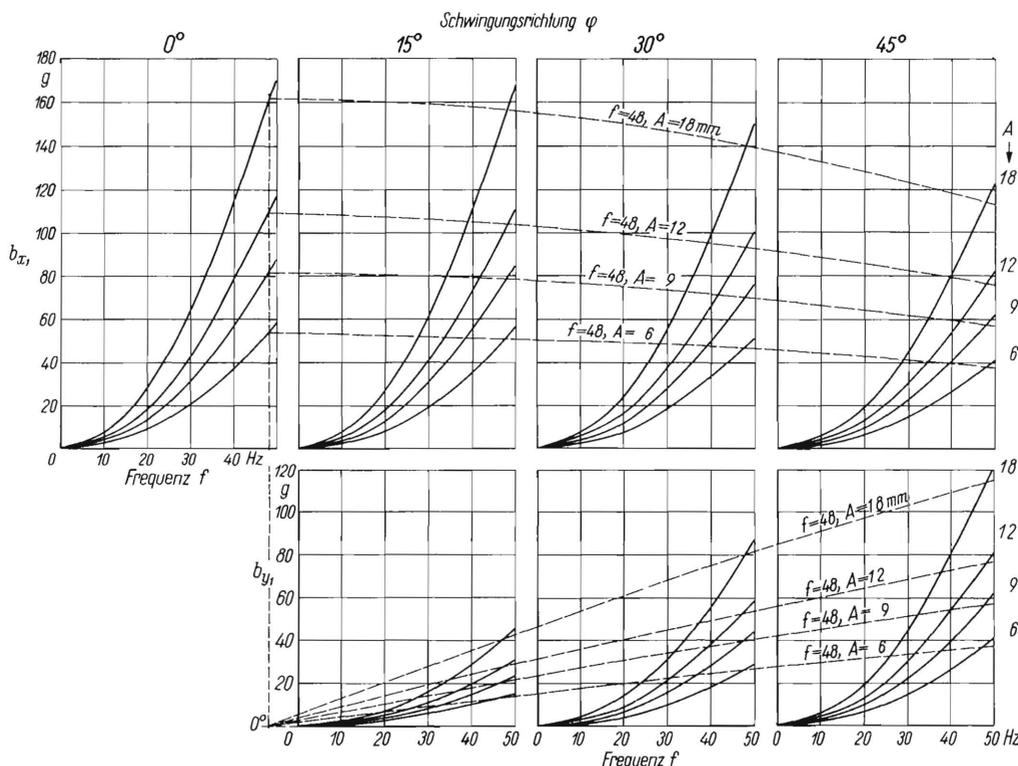


Bild 15. Waagerechte und senkrechte Beschleunigungen eines schwingenden Werkzeuges im unteren Wendepunkt P_1 der Schwingungsbahn in Abhängigkeit von der Frequenz bei verschiedenen Amplituden und Schwingungsrichtungen.

Dieses Verhältnis kann nun bei gleichen z -Werten sehr verschieden sein, und es muß untersucht werden, welchen Wert dieses Verhältnis

$$w = \frac{v_0}{4 f A \cos \varphi}$$

annehmen muß, um bei einem bestimmten z -Wert eine optimale Zugkraftverringerung zu bringen. Bei $w = 1$ ist der Schnittpunkt in der Projektion auf die Fahrtrichtung gleich der Schwingungslänge l . Wird $w < 1$, so überschneiden sich die Schnittwege. Der Wert w errechnet sich aus z nach der Gleichung:

$$\frac{w}{z} = \frac{1}{2} \operatorname{tg} \varphi \quad \text{oder} \quad w = \frac{z}{2} \operatorname{tg} \varphi$$

Aus den optimalen z - und v -Werten kann dann die dafür günstigste Schwingungsrichtung bestimmt werden:

$$\operatorname{tg} \varphi = 2 \frac{w}{z}$$

Die an einem schwingenden Werkzeug auftretenden Beschleunigungen und Verzögerungen sind für die Beurteilung der für den Schwingungsantrieb erforderlichen Leistung nützlich. Die waagerechte und senkrechte Beschleunigung b_x und b_y ergibt sich aus der Ableitung der Geschwindigkeit nach der Zeit:

$$b_x = -A \cos \varphi \omega^2 \sin \omega t$$

$$b_y = A \sin \varphi \omega^2 \sin \omega t$$

Sie erreichen ihren größten Wert in den Punkten P_1 und P_3 ; für P_1 mit $\sin \omega t = 1$ gilt:

$$b_{x1} = -A \cos \varphi \omega^2$$

$$b_{y1} = A \sin \varphi \omega^2$$

In Bild 15 sind die waagerechten und die senkrechten Beschleunigungen b_{x1} und b_{y1} von dem für die Beurteilung wichtigen Punkt P_1 in Abhängigkeit von der Frequenz bei verschiedener Amplitude und Schwingungsrichtung als Vielfaches der Erdbeschleunigung dargestellt. Der Punkt P_1 ist der untere Wendepunkt des Schwingungsweges, von ihm aus beginnt das Anheben des Werkzeuges und das Beschleunigen des Bodens in senkrechter Richtung.

Die waagerechte Beschleunigung b_{x1} wächst quadratisch mit der Frequenz und linear mit der Amplitude. Mit steiler werdender Schwingungsrichtung fällt sie leicht ab, wie die Linien konstanter Frequenz (für $f = 48$ eingezeichnet) und Amplitude zeigen. Wie schon oben erwähnt, ist die senkrechte Beschleunigung b_{y1} für das Abheben des Bodens vom Werkzeug von Einfluß. Sie wächst ebenfalls quadratisch mit der Frequenz und linear mit der Amplitude und mit dem Sinus der Schwingungsrichtung. Bei 45° -Schwingungsrichtung sind die waagerechten und senkrechten Beschleunigungen gleich groß.

Welche Beschleunigungen erforderlich sind, um bei einer bestimmten Schwingungslänge ein aus-

reichendes Abheben zu erzielen, muß erst durch Versuche festgestellt werden. Zu hohe Beschleunigungen dürften sich jedoch auf die Energiebilanz ungünstig auswirken.

Systematische Versuche an einem Einzelwerkzeug

In einem umfangreichen Versuchsprogramm wurden die Schwingungsgrößen entsprechend der in Bild 11, 12 und 13 aufgezeichneten Schwingungsbahnen variiert. Als Modellwerkzeug wurde eine geneigte Fläche benutzt, die an der in Bild 16 und 17 dargestellten Versuchseinrichtung befestigt war. Das Werkzeug schwingt um einen festen Drehpunkt an der Meßbrücke des Meßwagens für die Bodenrinne. Die Meßbrücke ist so in Federn aufgehängt, daß über eine hydraulische Meßdose und einen Indikator der Zugwiderstand gemessen werden kann. Am Schwinghebel kann das Werkzeug in drei verschiedenen Stellungen befestigt werden, die die Schwingungsrichtung 0° , 15° und 30° ergeben. Die

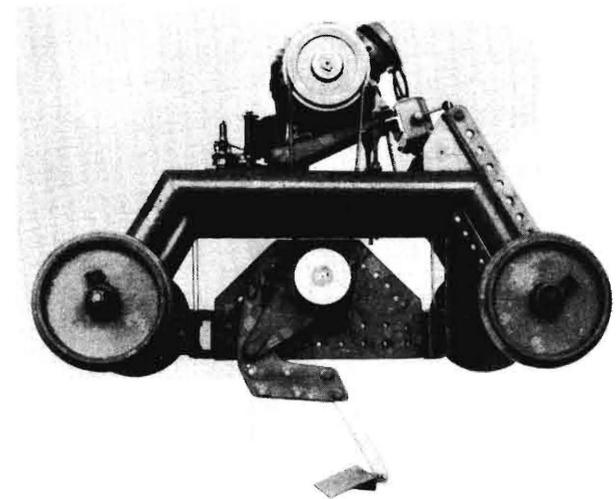


Bild 16. Versuchseinrichtung für eine schwingende, geneigte Fläche am Messwagen der Bodenrinne mit Vorrichtung zum Ändern der Schwingungsrichtung.

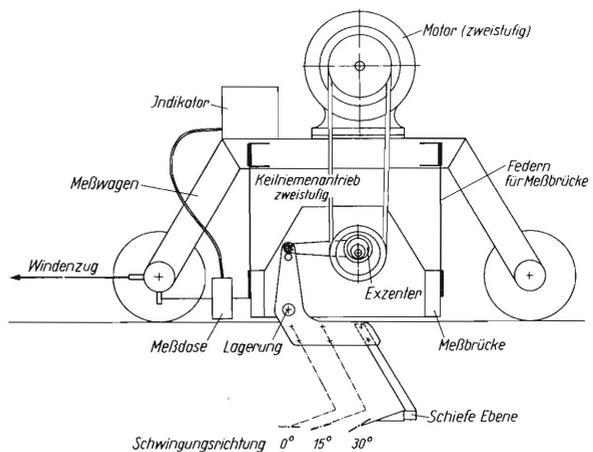


Bild 17. Schema der Versuchseinrichtung in Bild 16.

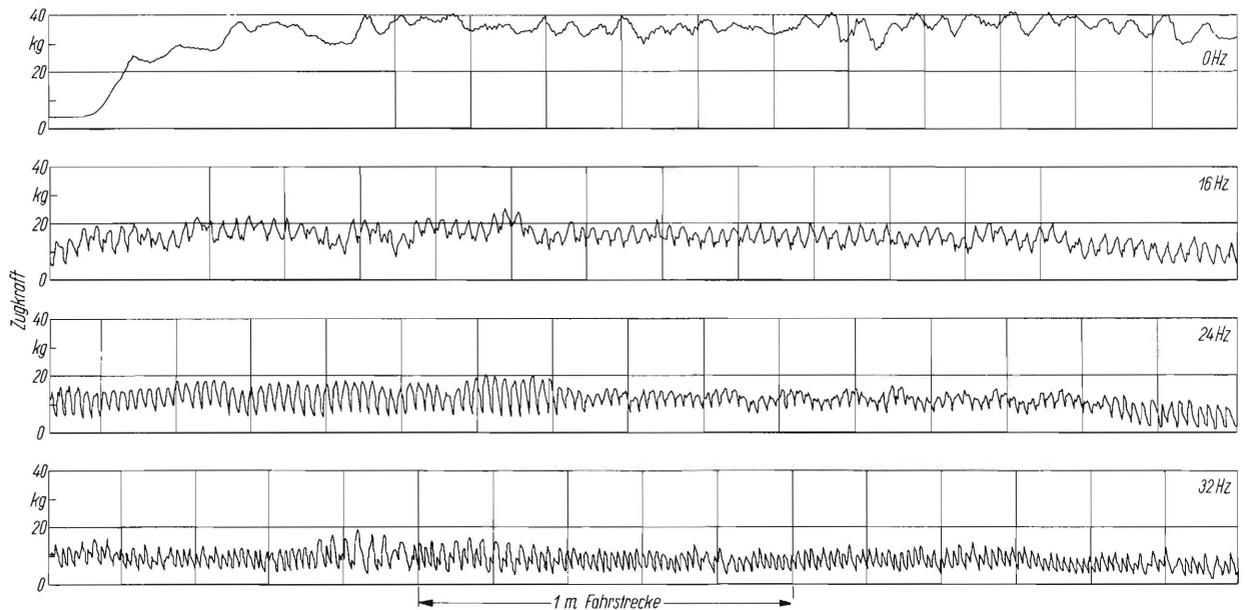


Bild 18. Messschriebe der Zugkraftmessung eines Versuches für das starre ($f=0$) und für das schwingende Werkzeug für drei verschiedene Frequenzen $f=16, 24$ und 32 Hz.

Fahrgeschwindigkeit	$v_0 = 0,60 \text{ m/s}$	Textur des Bodens (feinsandiger Lehm):	Arbeitstiefe	$t = 9 \text{ cm}$
Amplitude	$A = 9 \text{ mm}$	12 % Grobsand, 54 % Feinsand	Arbeitsbreite	$b = 30 \text{ cm}$
Schwingungsrichtung	$\varphi = 30^\circ$	26 % Schluff, 8 % Ton	Schnittwinkel	$\delta = 20^\circ$
		Bodenfeuchtigkeit 16 % i. M.		
		Porenanteil 48 % i. M.		

Amplitude wird durch einen Doppelpunkt auf der Antriebswelle verändert, während die Frequenz durch Drehzahländerung variiert werden kann. Die Versuche wurden in einem feinsandigen Lehmboden jeweils bei gleichen Versuchsbedingungen und gleichem Ablauf durchgeführt.

Es wurden im allgemeinen vier Einzelmessungen, davon jeweils eine mit starrem Werkzeug, bei einem Versuch gemacht. In **Bild 18** sind die Meßschriebe eines Versuches wiedergegeben. Der obere Schrieb gibt die Zugkraft des starren Werkzeuges, die darunterliegenden Schriebe die Zugkraftverläufe bei verschiedenen Frequenzen wieder. Die Schwankungen im Zugkraftverlauf des schwingenden Werkzeuges rühren von Massenkräften und dem Wechsel von Hub- und Schnittbewegung her. Eine eindeutige Frequenzanalyse ist bei der Dämpfung der hydraulischen Meßanlage und der Resonanz in der gefederten Aufhängung der Meßbrücke nicht möglich. Die aus dem Mittelwert eines Schriebes ermittelte Zugkraft am schwingenden Werkzeug wurde jeweils auf die Zugkraft beim starren Werkzeug, gleich 100 Prozent bezogen, (**Bild 19**). Bei kleinen Fahrgeschwindigkeiten nehmen die Zugkräfte schon bei relativ niedrigen Frequenzen ab, bei höheren Fahrgeschwindigkeiten sind zur Erreichung derselben Zugkraftminderung höhere Frequenzen erforderlich. Die verschieden gekennzeichneten Meßpunkte bedeuten verschiedene Schwingungsrichtungen. Wenn man in einigen Fällen von einer größeren Streuung und von einigen „ausgerissenen“ Meßpunkten absieht, so kann der obere Teil des Streubereiches

der Schwingungsrichtung 0° , der untere der Schwingungsrichtung 30° zugeordnet werden. Die Meßpunkte für die Schwingungsrichtung 15° streuen meist über den ganzen Bereich.

Bei Amplituden von 9 und 12 mm und bei der kleinen Fahrgeschwindigkeit werden bei kleinen Frequenzen mit der Schwingungsrichtung $\varphi = 30^\circ$ schon gute Ergebnisse erzielt; eine weitere Erhöhung der Frequenz bringt nicht mehr viel und kann unter Umständen sogar zu einem Anstieg der Zugkraft führen.

Um den Einfluß der einzelnen Faktoren genauer zu erfassen, wurden in **Bild 20, 21** und **22** die Zugkräfte bei schwingendem Werkzeug einmal in Abhängigkeit von der Amplitude, dann von der Schwingungsrichtung und schließlich von der Fahrgeschwindigkeit aufgetragen. **Bild 20** zeigt den Einfluß der Amplitude. Bereits bei einer relativ kleinen Amplitude wurde eine starke Zugkraftminderung festgestellt. Größere Amplituden bringen nur noch eine geringe Verbesserung. Sie sind nur noch bei der hohen Fahrgeschwindigkeit von Nutzen. Eine Vergrößerung der Amplitude über den untersuchten Bereich hinaus, läßt für die verschiedenen Frequenzen anscheinend keine Verbesserung mehr erwarten. Allerdings ergaben Versuche mit noch größeren Amplituden an dieser Versuchseinrichtung auch deswegen keine befriedigenden Ergebnisse, weil sich der Einfluß der Massenkräfte in der Zugrichtung stark bemerkbar machte. Bei größeren Amplituden ist daher ein Massenausgleich von mindestens zwei gegeneinander schwingenden Werkzeugen erforderlich.

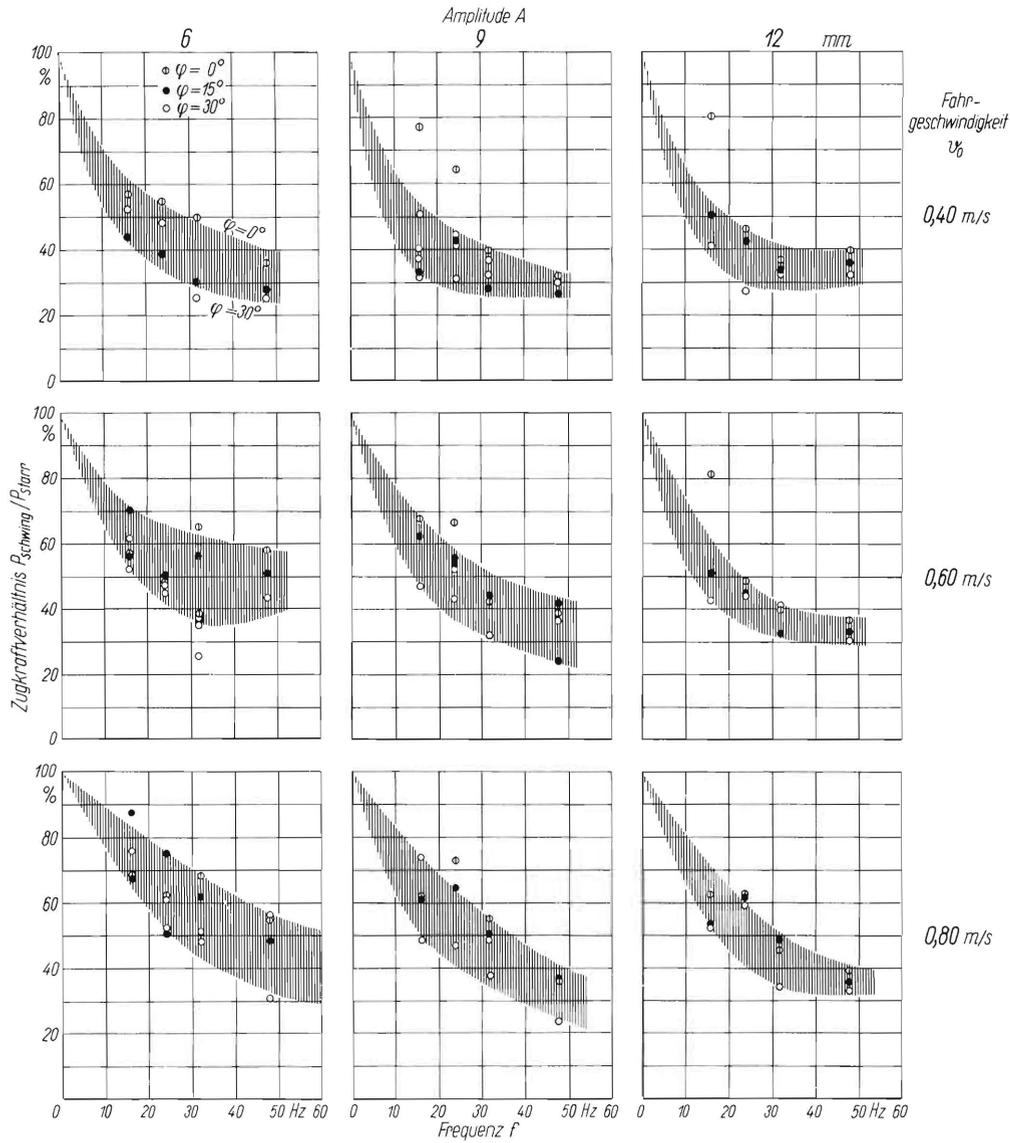


Bild 19. Zugwiderstand eines schwingenden Werkzeuges bezogen auf den Zugwiderstand des starren Werkzeuges in Abhängigkeit von der Frequenz bei verschiedenen Schwingungsgrößen.

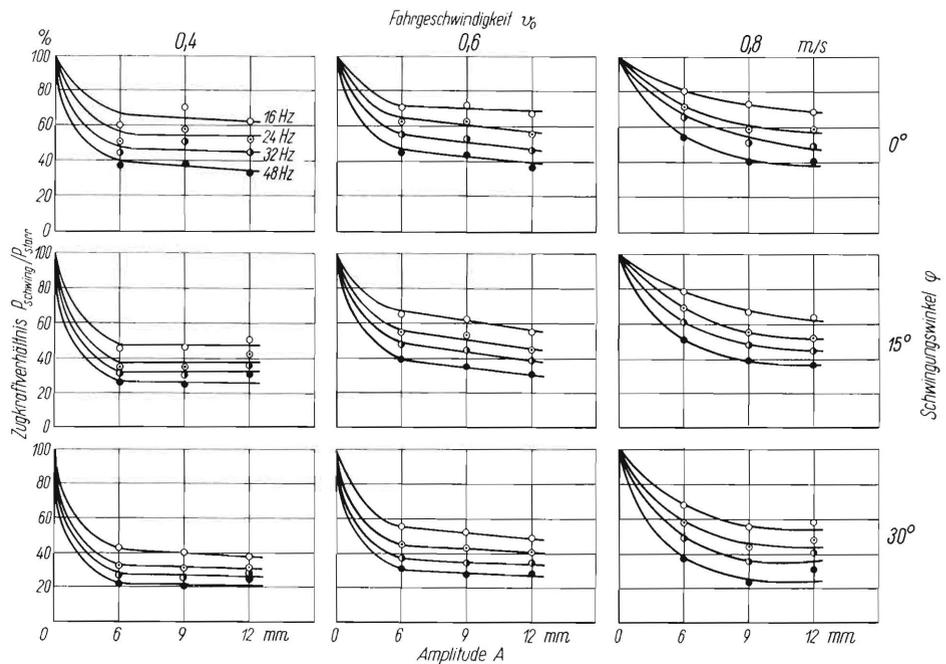


Bild 20. Zugwiderstand eines schwingenden Werkzeuges bezogen auf den Zugwiderstand des starren Werkzeuges in Abhängigkeit von der Amplitude bei verschiedenen Schwingungsgrößen.

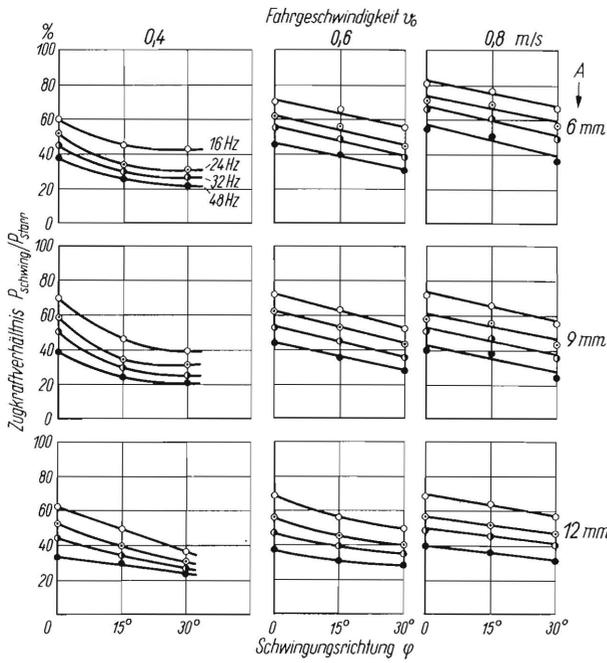


Bild 21. Zugwiderstand eines schwingenden Werkzeuges bezogen auf den Zugwiderstand des starren Werkzeuges in Abhängigkeit von der Schwingungsrichtung bei verschiedenen Schwingungsgrößen.

Bild 21 zeigt die Zugkraft am schwingenden Werkzeug in Abhängigkeit von der Schwingungsrichtung. Bei der kleinen Fahrgeschwindigkeit ist die Zugkraftverringerung bereits bei einer Schwingungsrichtung von 15° gegenüber einer von 0° beträchtlich; bei 30° ergibt sich nurmehr eine geringe Verbesserung. Dies läßt sich anhand der Schwingungsbilder 11 bis 13 und von Bild 5 damit erklären, daß bei einer für bestimmte Schwingungsdaten zu steilen Schwingungsrichtung Reibung an der Werkzeugunterseite auftritt, wodurch eine weitere Zugkraftverringerung verhindert wird. Bei der mittleren und hohen Fahrgeschwindigkeit ergibt sich auch bei $\varphi = 30^\circ$ eine Verbesserung gegenüber 15°.

In Bild 22 ist der Einfluß der Fahrgeschwindigkeit dargestellt. Bei kleiner Amplitude steigt die Zugkraft mit höher werdender Fahrgeschwindigkeit stark an, was bei großen Amplituden und bei der steilen Schwingungsrichtung weniger der Fall ist. Diese Tendenz ist in allen Frequenzen die gleiche.

Für die Beurteilung einer bestimmten Schwingungsform ist neben der Zugkraftverringerung aber auch die erforderliche Leistung für den Schwingungsantrieb von Bedeutung (Bild 23). Da diese Werte die Verluste des Elektromotors, die bei dem verwendeten polumschaltbaren Typ sehr hoch waren, und die Verluste des Versuchsgerätes enthalten, liegt die Gesamtleistung sehr hoch und erlaubt nur einen Vergleich und die Beobachtung der Tendenzen. Die Leistungsaufnahme nimmt entsprechend dem quadratischen Anstieg der Beschleunigung mit der Frequenz stark zu. Allerdings ist der tatsächliche Leistungsanstieg nicht ganz quadratisch; es ist zu vermuten, daß infolge der elastischen Verformbarkeit des Werkzeuges die errechneten Beschleunigungen nicht erreicht und auch durch die Nachgiebigkeit des Bodens nicht auf ihn übertragen werden. Mit größer werdender Amplitude nimmt die Leistung etwa linear zu; dies entspricht dem linearen Anstieg der Beschleunigung mit der Amplitude (Bild 24). Der Leistungsanstieg mit steiler werdender Schwingungsrichtung ist nicht so stark ausgeprägt, vor allem bei kleinen Frequenzen

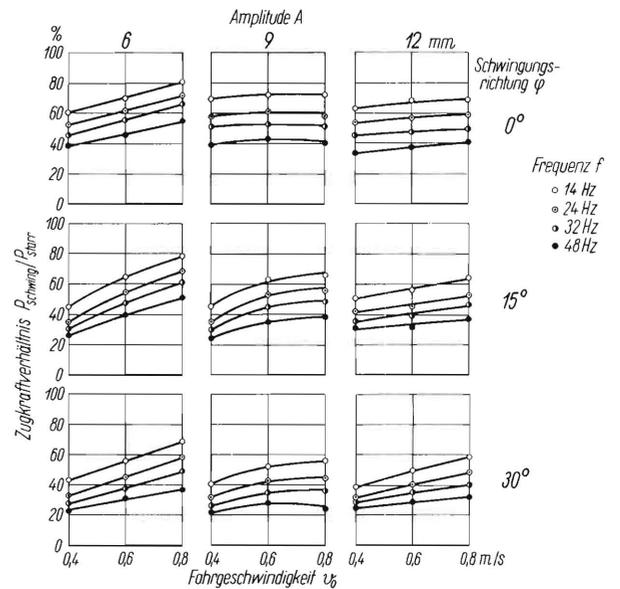


Bild 22. Zugwiderstand eines schwingenden Werkzeuges bezogen auf den Zugwiderstand des starren Werkzeuges in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit bei verschiedenen Schwingungsgrößen.

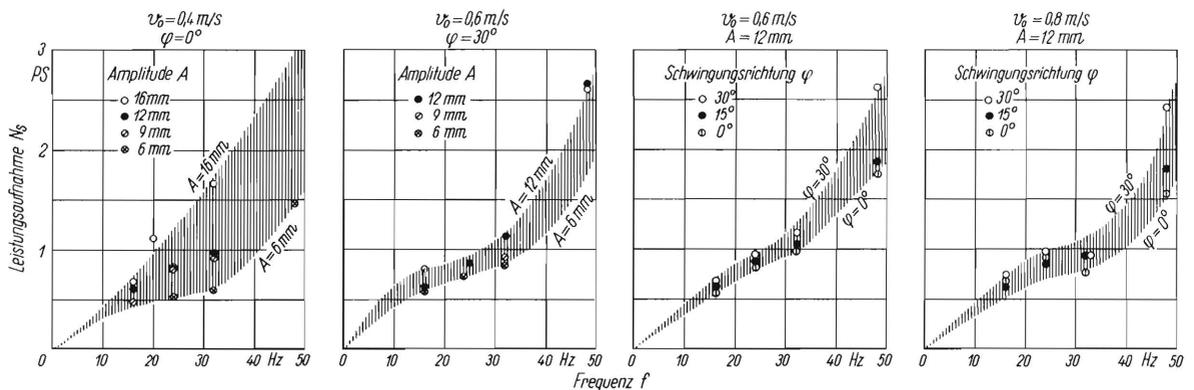


Bild 23. Motorleistung für den Schwingantrieb in Abhängigkeit von der Frequenz.

Bild 24. Motorleistung für den Schwingantrieb in Abhängigkeit von der Schwingungsamplitude.

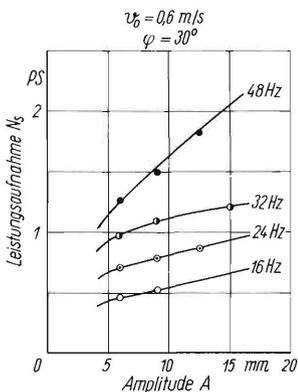
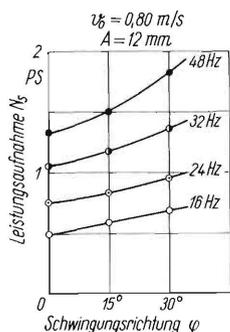


Bild 25. Motorleistung für den Schwingantrieb in Abhängigkeit von der Schwingungsrichtung.

(Bild 25). Für den Leistungsaufwand zum Antrieb der Schwingbewegung ist es günstiger, mit relativ kleinen Frequenzen zu arbeiten. Die bei diesen Werten erhaltene Zugkraftverringering liegt schon in einem günstigen Bereich und kann nur noch durch einen wesentlich größeren Leistungsaufwand für den Schwingantrieb bei hohen Frequenzen geringfügig verbessert werden.

Zur Ermittlung des Einflusses der Arbeitstiefe auf Zugkraftverringering und Leistungsbedarf wurden

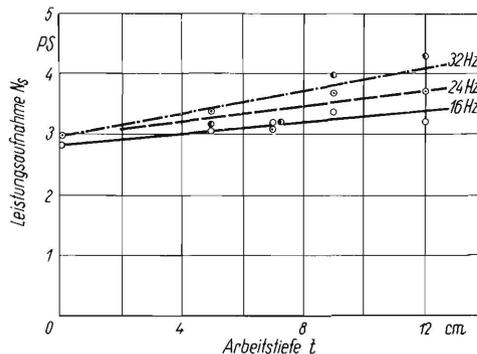
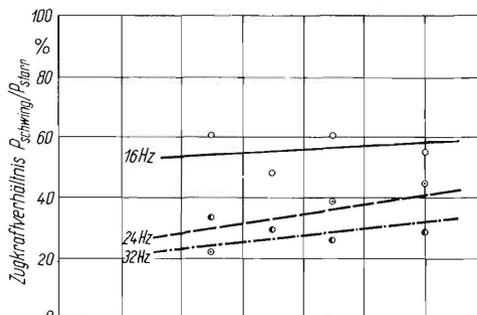


Bild 26. Zugkraftverminderung und Leistungsbedarf eines schwingenden Werkzeuges in Abhängigkeit von der Arbeitstiefe bei verschiedenen Frequenzen.
 $v_0 = 0,80\text{ m/s}$

den Versuche bei verschiedenen Tiefgängen durchgeführt. Als Schwingungsdaten wurden Werte ge-

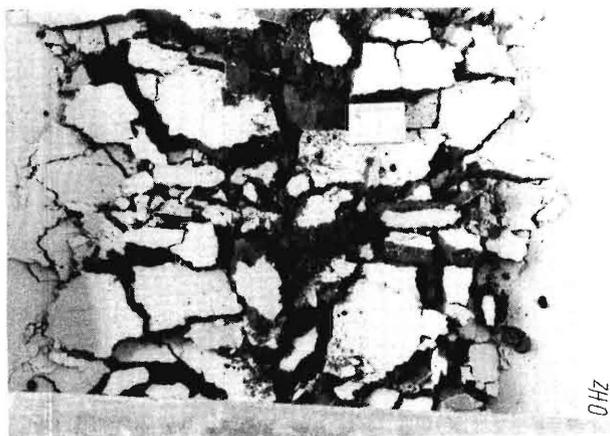


Bild 27 bis 30. Krümelbildung beim starren und beim schwingenden Werkzeug bei verschiedenen Frequenzen für eine Fahrgeschwindigkeit von 0,40 m/s, einer Amplitude von 12 mm, einer Schwingungsrichtung von 30° und einer Arbeitstiefe von 7 cm. (Derselbe Boden wie in Bild 18)

wählt, die bei den vorhergegangenen Versuchen günstige Ergebnisse gezeigt hatten (Bild 26). Mit zunehmender Arbeitstiefe nimmt das Zugkraftverhältnis zwischen schwingendem und starrem Werkzeug nur geringfügig zu. Die Leistungsaufnahme des Schwingantriebes steigt allerdings mit zunehmender Arbeitstiefe an. Nur bei kleiner Fahrgeschwindigkeit und kleinen Frequenzen ist sie nahezu konstant. Aus diesem Bild kann man die hohe Leerlaufleistung von Gerät und Motor über der Arbeitstiefe $t = 0$ erkennen. Sehen wir von den beträchtlichen Verlusten in dem Elektromotor ab, so ergeben sich trotzdem noch beträchtliche Leistungen zum Bewegen der Werkzeugmassen und Übertragungsglieder sowie zur Überwindung der Lagerreibung. Für das Bewegen der Bodenmasse ist nur eine geringe zusätzliche Leistung erforderlich und sie steigt mit zunehmender Bodenmasse, also mit größer werdender Arbeitstiefe, nur geringfügig an.

Bei allen Versuchen mit schwingendem Werkzeug konnte eine bessere Krümelung gegenüber dem starren Werkzeug beobachtet werden. Eine Schollenanalyse konnte bei dem verwendeten Boden nicht gemacht werden, da ein Absieben zu verfälschten Ergebnissen geführt hätte.

Anhand von Aufnahmen der Bodenoberfläche nach der Bearbeitung ist in Bild 27 bis 30 der Arbeitserfolg des starren Werkzeuges dem des schwingenden Werkzeuges bei verschiedenen Frequenzen gegenübergestellt. Beim starren Werkzeug entstehen große Schollen; der Boden ist nur wenig aufgelockert und nach dem Durchfahren fast wieder in seine ursprüngliche Lage zurückgefallen. An den Rändern ist der Aufbruch nur gering; der Einfluß des Stieles ist gut zu erkennen.

Bei einer Frequenz von 16 Hz sind die Schollen kleiner, der Randaufbruch besser und der Stieleinfluß nunmehr gering; ein Teil der Schollen wurde gewendet. Eine weitere Verbesserung ergibt sich bei einer Frequenz von 32 Hz. Die Zahl der kleinen

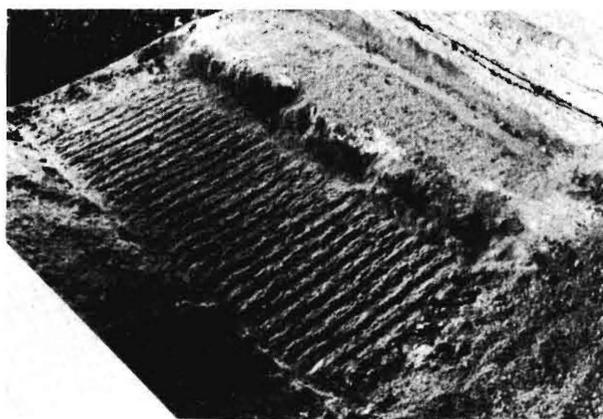
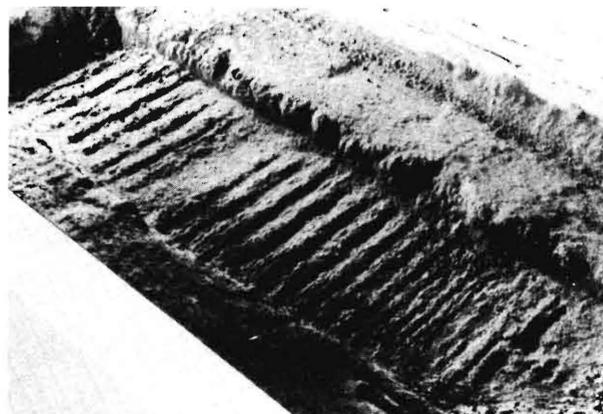


Bild 31 und 32. Sohle eines schwingenden Werkzeuges bei verschiedenen Frequenzen für eine Fahrgeschwindigkeit von 0,80 m/s, einer Schwingungsrichtung von 30° und einer Amplitude von 12 mm.

Schollen hatte stark zugenommen. Eine ganze Anzahl von Schollen wurde gewendet. Bei 48 Hz ist nur noch eine bessere Wendung der Schollen festzustellen.

Das in schräger Schwingungsrichtung sich bewegende Werkzeug schneidet den Boden nicht eben ab, es entsteht vielmehr an der Sohle ein Abdruck des Schwingungsbildes. Legt man die Sohle frei (Bild 31 und 32), so erkennt man deutlich die ein-

$v_0 = 0,80 \text{ m/s}; f = 32 \text{ Hz}$

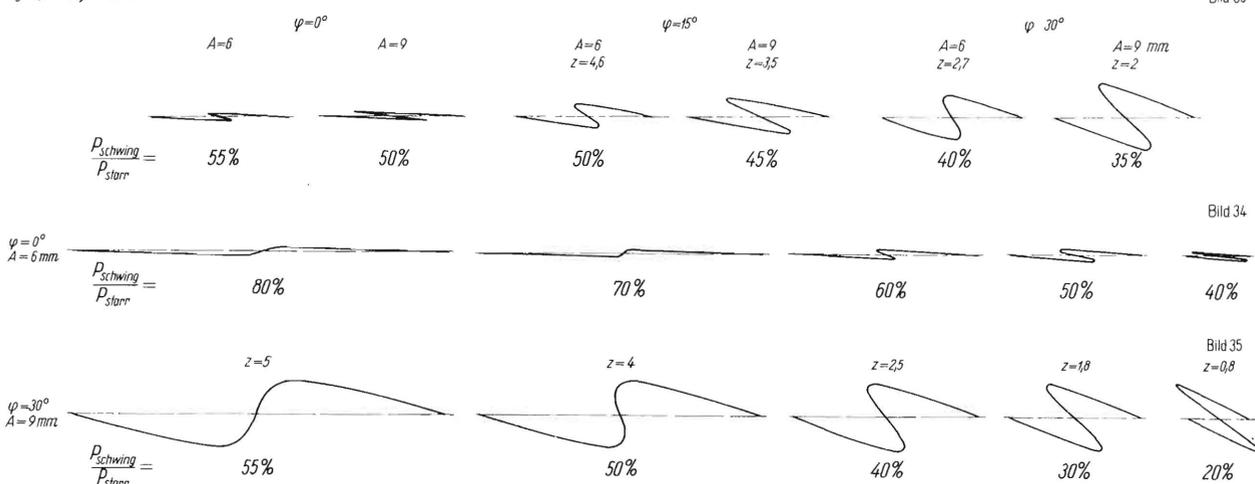


Bild 33 und 34. Einfluss der Schwingungsform auf die Zugkraftverminderung.

zelen Schwingungen des Werkzeuges, in denen sich Schnitt- und Scherflächen abwechseln. Diese unterbrochene Sohle kann gegenüber der Sohle eines starren Werkzeuges für den Bodenschluß günstiger sein.

Anhand der Versuchsergebnisse läßt sich jetzt die günstigste Schwingungsform feststellen. In **Bild 33 und 34** sind die Schwingungsbahnen einiger Fälle zusammengestellt, und die noch verbleibende Zugkraft in Prozenten der Zugkraft des starren Werkzeuges sowie die für die Schwingung charakteristische Zahl z angegeben. Bei den Schwingungsbahnen in Bild 33 sind Amplitude und Schwingungsrichtung bei konstanter Fahrgeschwindigkeit und Frequenz verschieden. Mit größerer Amplitude und steilerer Schwingungsrichtung wird die Zugkraftverringerung größer. Bild 34 zeigt die Verringerung der Zugkraft mit kleiner werdender Schwingungslänge.

Man kann nun die Versuchsergebnisse zusammenfassend darstellen, wenn man sie über der Verhältniszahl z der Schwingungslänge zur Schwingungshöhe aufträgt (**Bild 35**). Die Werte für die relative Zugkraft liegen bei den verschiedenen Schwingungsgrößen, aber gleichen z -Werten, innerhalb eines Streubereiches. Danach ergeben sich Zugkraftverringerungen um 75%. Der Verlauf der Kurve zeigt, daß die Zugkraft bei $z = 2$ schon stark abgenommen hat. Mit kleinerem z erhält man nurmehr eine geringe Verbesserung. Mit Rücksicht auf die erforderliche Schwingungsleistung wird man unter $z = 2$ nicht heruntergehen.

Zusammenfassung

Bei einem Modellwerkzeug in Form einer geeigneten Fläche ist durch eine schwingende Bewegung eine erhebliche Verringerung der Zugkraft möglich. Bei günstig gewählten Schwingungsgrößen, wie Frequenz, Amplitude und Schwingungsrichtung, läßt sich für die jeweilige Fahrgeschwindigkeit ein Optimum für die Zugkraft erzielen. Mit Rücksicht auf die erforderliche Antriebsleistung wird man zweckmäßiger solche Schwingungsgrößen wählen, bei denen die Leistung noch verhältnismäßig niedrig ist, und wird die etwas geringere Zugkraftverringerung in Kauf nehmen.

Gegenüber einer Schwingungsrichtung $\varphi = 0^\circ$ ist für die Zugkraftverringerung wie für den Leistungsaufwand eine solche unter 30° immer günstiger. Sie wirkt sich aber besonders dann stark aus, wenn Frequenz und Amplitude klein und die Fahrgeschwindigkeit groß ist.

Für die Verringerung der Zugkraft am schwingenden Werkzeug konnte eine eindeutige Erklärung gegeben werden. Bewegt sich das Werkzeug in einer geeigneten Bahn am Boden, so können die Kräfte über den Schwingantrieb eingeleitet und die resultierenden Kräfte in eine günstige Richtung zur Zug-

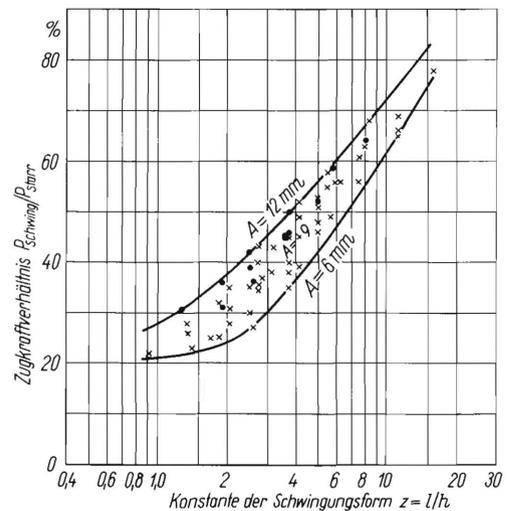


Bild 35. Zugkraftverminderung in Abhängigkeit von der Verhältniszahl $z = l/h$,
 l Schwingungslänge } s. Bild 9
 h Schwingungshöhe }

richtung gebracht werden. Entscheidend dabei ist, daß eine eindeutige Trennung des Abschneidens und Anhebens des Bodens erfolgt. Der Arbeitserfolg kann durch ein schwingendes Werkzeug wesentlich verbessert werden.

Durch die senkrechte Bewegung in der Hubphase bricht der Boden häufiger auf, wird feiner gekrümelt, besser gewendet und gemischt.

Bei großen Amplituden war bei dem verwendeten Versuchsgerät kaum mehr eine größere Zugkraftverringerung zu erreichen, was sich vermutlich auf den schlechten Massenausgleich bei dem Einzelwerkzeug zurückführen läßt. Daher müssen bei Untersuchungen mit großen Amplituden Maßnahmen für einen Massenausgleich der schwingenden Teile und der Bodenmasse, vor allem in Zugrichtung, geschaffen werden. Das kann am einfachsten durch paarweise gegeneinander schwingende Werkzeuge erreicht werden. Weiterhin müssen die Untersuchungen mit dem einfachen Modellwerkzeug auf schwierigere Werkzeugformen ausgedehnt werden.

Schrifttum

- [1] Eggenmüller, Alfred: Untersuchungen an schwingenden Bodenbearbeitungswerkzeugen. Diss. T. H. Hannover 1957. Der vorliegende Aufsatz und die beiden folgenden entsprechen inhaltlich dieser Dissertation.
- [2] Gunn und Tramontini: Oscillation of Tillage Implements. *Agricult. Engng.* H. 11, Nov. 1955, S. 725/729.
- [3] Mogilenko, N.: Schwingende Untergrundlockerer. *Maschinen-Traktoren-Stat.* 15 (1955) No. 1.
- [4] Söhne, Walter: Einige Grundlagen für eine landtechnische Bodenmechanik. In: 13. Konstrukteurheft. Düsseldorf: VDI-Verlag 1956. S. 11/27. (Grundlagen d. Landtechn. Heft 7).

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