

Für das untersuchte Radargerät ist das Kosten/Nutzen-Verhältnis derzeit noch unbefriedigend. Der unbestreitbare Vorteil der universellen Einsatzmöglichkeiten verliert an Wert, sobald es um Hofarbeiten, leichtere Pflegearbeiten und Erntevorgänge geht, bei denen Kriterien maßgebend sind, die nicht mit der wahren Fahr- geschwindigkeit unmittelbar korrelieren.

Für eine ausschließliche Nutzleistungsoptimierung ist die Erfassung und qualitative Anzeige einer Wellendrehzahl im Achsantrieb als erster Schritt ausreichend und empfiehlt sich zur Anwendung.

Schrifttum

Bücher sind durch • gekennzeichnet

- [1] *Fichtel, H. u. S.M. Ismail:* Untersuchungen zur Messung der Arbeitsgeschwindigkeit von Landmaschinen mit Hilfe eines Radargerätes. Grundl. Landtechnik Bd. 32 (1982) Nr. 4, S. 136/40.
- [2] *Steinbrenner, H. u. H.-J. Florus:* Über neue Methoden zur Messung von Beschleunigungsvorgängen an Fahrzeugen. Automobiltechn. Zeitschr.-ATZ Bd. 67 (1965) H. 1, S. 1/7.
- [3] *Tapp, D.R.F.:* Large four wheel drive tractors. Paper No. 3, Autumn Nat. Conf. of The Inst. of Agric. Eng., High Wycombe, 10th October 1978.
- [4] *Ehlers, K. u. R. Keitel:* Das fünfte Rad als genaues Meßgerät. Automobiltechn. Zeitschr.-ATZ Bd. 73 (1971) H. 1, S. 9/12.
- [5] *Drexl, H.-J.:* Ein Beitrag zur Leistungsübertragung von Ackerschleppern bei schwerem Zug. Diss. TU Berlin 1970.
- [6] *Tompkins, F.D. u. L. R. Wilhelm:* Instrumentation for measuring energy inputs to implements. ASAE-Paper No. 81-1575, St. Joseph 1981.
- [7] *Anisch, S.:* Abstützung der Seitenkräfte durch starre, passiv rollende Scheiben. agrartechnik Jg. 30 (1980) H. 9, S. 419/20.
- [8] • *Wehrmann, W.:* Korrelationsmeßtechnik, ein neuer Zweig der Betriebsmeßtechnik. Grafenau/Württ.: expert-verlag 1980.
- [9] *Delingat, E.:* Berührungslose optische Geschwindigkeits- und Abstandsmessung. Leitz-Mitt. Wiss. u. Techn., Bd. VI (1976) Nr. 7, S. 249/57.
- [10] *Hyltin, T.M., T.D. Fuchser, H.B. Tyson u. W.R. Regueiro:* Vehicular radar speedometer. SAE-Paper 730125, New York 1973.
- [11] *Jahns, G.:* Geschwindigkeitsmeßverfahren für landwirtschaftliche Zug- und Arbeitsmaschinen. Unveröffentl. Bericht JA 10/1980 des Inst. f. landtechnische Grundlagenforschung der FAL, Braunschweig-Völkenrode 1980.
- [12] Präzisions-Mikrowellen-Sensor PSM. Unterlagen der Firma S-Team Elektronik GmbH, Kornwestheim (BRD) 1981.
- [13] *Goris, J.M. u. H.S. Benson:* Maximizing dozer work rate with draft power sensing systems. SAE-Paper 790510, Warrendale 1979.
- [14] *Benson, H.S.:* Persönliche Mitteilung. Januar 1980.
- [15] Unterlagen der Firma Dickey-john Corp., Auburn, Ill. (USA).
- [16] Unterlagen der Firma RDS Farm Electronics Ltd., Nailsworth (England).
- [17] *Renius, K.Th.:* Festlegung der Getriebeabstufung von Ackerschleppern nach Fahrgeschwindigkeitskollektiven. Grundl. Landtechnik Bd. 30 (1980) Nr. 1, S. 7/15.
- [18] *Howe, S.D.:* Tractors at work. Power Farming Vol. 60 (1981) No. 10, S. 8/11.
- [19] Tractors at work '82. Power Farming Vol. 61 (1982) No. 11, S. 54.

Theoretische Untersuchungen zur optimalen Kombination von Allradsschleppern und gezogenen Geräten zur Bodenbearbeitung

Von Winfried Schäfer, Stuttgart-Hohenheim*)

DK 631.372:631.51

Hohe Flächenleistung und niedriger Energiebedarf werden bei gezogenen Geräten zur Bodenbearbeitung einerseits durch Verbesserung der Zugfähigkeit des Schleppers und Verminderung des Zugkraftbedarfs des Gerätes, andererseits durch eine sorgfältige Abstimmung der Betriebsparameter von Schlepper und Gerät erzielt. In diesem Beitrag wird ein Modell vorgestellt, das die Berechnung der zeit- und/oder energieminimalen Kombination von Allradsschleppern und gezogenen Bodenbearbeitungsgeräten ermöglicht. Die Ergebnisse geben Aufschluß darüber, wie die vom Landwirt beeinflussbaren Größen: Nabenleistung, Schleppermasse, Arbeitsbreite und schlupflose Geschwindigkeit im Sinne einer optimalen Kombination aufeinander abgestimmt werden müssen.

Vorliegender Beitrag beinhaltet die wesentlichen Ergebnisse der gleichnamigen Dissertation. Bericht: Prof. Dr.-Ing. A. Stoppel, Mitbericht: Prof. Dr.-Ing. H.D. Kutzbach.

*) *Dipl.-Ing. agr. W. Schäfer war Doktorand am Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim.*

Inhalt

1. Einleitung
2. Das Rechenmodell
 - 2.1 Annahmen und Voraussetzungen
 - 2.2 Mathematische Grundlagen
 - 2.3 Die Beziehungen zwischen Nabenleistung, Schleppergewicht, Arbeitsbreite und schlupfloser Geschwindigkeit
3. Die Ermittlung der zeit- und/oder energieminimalen Kombination von Allradsschlepper und gezogenem Bodenbearbeitungsgerät
 - 3.1 Nabenleistung und Arbeitsbreite gegeben
 - 3.2 Nabenleistung und Schleppergewicht gegeben
 - 3.3 Nabenleistung und schlupflose Geschwindigkeit gegeben
 - 3.4 Arbeitsbreite und Schleppergewicht gegeben
 - 3.5 Arbeitsbreite und schlupflose Geschwindigkeit gegeben
 - 3.6 Schleppergewicht und schlupflose Geschwindigkeit gegeben
4. Beurteilung der Ergebnisse
5. Zusammenfassung

1. Einleitung

Für die Bodenbearbeitung stehen dem Landwirt meist eng bemessene Zeitspannen zur Verfügung. Um die verschiedenen Arbeitsgänge der Bodenbearbeitung termingerecht zu erledigen, werden heute vorwiegend leistungsstarke Allradschlepper in Verbindung mit entsprechenden Bodenbearbeitungsgeräten eingesetzt. Für die Primärbodenbearbeitung kommen hauptsächlich gezogene Geräte zum Einsatz, bei der Sekundärbodenbearbeitung neben gezogenen auch zapfwellengetriebene Geräte.

Hier soll die Kombination von Allradschleppern und gezogenen Bodenbearbeitungsgeräten untersucht werden, da diese die höchsten Ansprüche an die Zugfähigkeit des Schleppers stellen.

Der für die Arbeiterledigung erforderliche Aufwand an Geld, Arbeitszeit und Energie hängt von zahlreichen Einflußfaktoren ab.

Fünf dieser Einflußfaktoren kann der Landwirt direkt beeinflussen:

1. Die verfügbare Nabenleistung
Die maximal verfügbare Nabenleistung wird mit dem Kauf des Schleppers festgelegt. Beim Betrieb kann die verfügbare Nabenleistung des Schleppers durch Einstellung des Drehzahlverstellhebels begrenzt werden.
2. Die Masse des Schleppers
Diese wird sowohl beim Kauf des Schleppers als auch durch dessen Ballastierung bis zur zulässigen Gesamtmasse vorgegeben.
3. Die schlupflose Geschwindigkeit
Diese kann der Landwirt durch Einlegen eines bestimmten Getriebeganges sowie durch Einstellen des Drehzahlverstellhebels vorgeben.
4. Die Arbeitsbreite des Gerätes
Sie ist in der Regel durch Kauf des Gerätes vorgegeben, jedoch kann durch An- und Abbau von Werkzeugen die Arbeitsbreite stufenweise verändert werden. Auch sind Lösungen zur stufenlosen Arbeitsbreitenverstellung bei Pflügen bekannt.
5. Die Arbeitstiefe
Diese beeinflusst der Landwirt direkt durch Einstellung des Gerätes und seiner Werkzeuge.

Neben diesen fünf vom Landwirt direkt steuerbaren Einflußgrößen spielen zahlreiche weitere Faktoren eine wichtige Rolle, die vom Landwirt nur indirekt oder gar nicht beeinflusst werden können. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit sind hier zu nennen:

1. Die Rollwiderstands- und Kraftschlußverhältnisse zwischen Reifen und Boden
Diese können indirekt beeinflusst werden durch die Wahl von Bereifung und Reifenluftdruck.
2. Die Radlasten im Betrieb
Sie können bei Geräten, die am Dreipunktgestänge angebaut werden, durch die Wahl der Hydraulikregelung indirekt beeinflusst werden.
3. Der Zugkraftbedarf¹⁾ des Bodenbearbeitungsgerätes
Dieser hängt ab von der tatsächlichen Fahrgeschwindigkeit, von Arbeitsbreite und -tiefe, von Art und Zustand des Bodens sowie von der konstruktiven Gestaltung der Arbeitswerkzeuge.
4. Betrag und Richtung der Resultierenden aller am Gerät angreifenden Kräfte
Betrag und Richtung hängen ab vom Bodenwiderstand, dem Gerätegewicht sowie der Art der Verbindung zwischen Schlepper und Gerät (angebaut, aufgesattelt, angehängt). Die Neigung der Resultierenden beeinflusst wiederum die Radlasten des Schleppers im Betrieb.

Die komplexen Wechselbeziehungen der hier aufgezählten Einflußfaktoren erschweren die Auswahl der hinsichtlich Kosten, Arbeitszeit- und Energieaufwand optimalen Kombination von Schlepper und Gerät außerordentlich.

¹⁾ Unter Zugkraft versteht der Verfasser die waagerechte Komponente der Resultierenden aller am Gerät angreifenden Kräfte (vergl. Bild 1).

Die zunehmende Verbreitung von Mikrocomputern erlaubt jedoch den Einsatz praxisgerechter Lösungsmethoden bei der Suche nach der optimalen Kombination. Die Entwicklung solcher Lösungsmethoden mit Hilfe eines mikrocomputergerichten Rechenmodells ist das Ziel dieser Arbeit.

Da ein umfangreiches Rechenmodell zur Bestimmung der kostenminimalen Kombination von Allradschlepper und Bodenbearbeitungsgerät bereits veröffentlicht wurde [1, 2], wird die Ermittlung der nach-ökonomischen Gesichtspunkten optimalen Kombination hier nicht weiter verfolgt.

Als optimale Kombination von Allradschleppern und gezogenen Bodenbearbeitungsgeräten wird nachfolgend die Kombination verstanden, bei der der Zeit- und/oder Energiebedarf minimal sind. Für den Zeitbedarf berücksichtigt der Verfasser nur die für den Arbeitszweck unmittelbar benötigte Zeit, die Hauptzeit. Als Energiebedarf wird das Produkt aus Hauptzeit und abgegebener Nabenleistung bezeichnet.

2. Das Rechenmodell

2.1 Annahmen und Voraussetzungen

Die Berechnung der optimalen Kombination von Allradschlepper und gezogenem Bodenbearbeitungsgerät soll unter folgenden Annahmen erfolgen:

1. Der Einsatz von Schlepper und Gerät erfolgt auf ebenem Gelände;
2. Die Rollwiderstands- und Kraftschlußverhältnisse sind an allen vier Schlepperrädern gleich;
3. Die Arbeitstiefe des Gerätes ist konstant;
4. Bei konstanter Arbeitsgeschwindigkeit, Arbeitstiefe und -breite ist die Zugkraft konstant.

Durch diese Annahmen wird sicherlich die Praxisnähe des Rechenmodells in gewissem Maße eingeschränkt. So ist der Einsatz auf ebenem Gelände nicht immer gegeben. Besonders die Rollwiderstands- und Kraftschlußverhältnisse sind laufenden Schwankungen unterworfen. Bekannt ist ferner, daß Multipaß-Effekt, Vor- oder Nachlauf der Vorderräder, Differentialsperre, unterschiedliche Bereifung an Vorder- und Hinterachse, Land- und Furchenrad, Achslastverteilung, sowie Bauart, Profilierung und Luftdruck der Bereifung Triebkraft und Rollwiderstand der vier Schlepperräder unterschiedlich beeinflussen. Schließlich ändern sich auch die am Gerät angreifenden Kräfte ständig, weil der Boden nicht homogen ist, die Arbeitstiefe nicht konstant gehalten werden kann und bei angebauten Geräten die Regelhydraulik steuernd eingreift.

Dennoch sind die gemachten Annahmen sinnvoll. Sie erlauben das Rechnen mit Mittelwerten und der Rechenaufwand bleibt überschaubar. Ferner sind die wenigen verfügbaren Daten für Rechnungen, die über die gemachten Annahmen hinausgehen, mit zahlreichen Unsicherheiten behaftet.

2.2 Mathematische Grundlagen

In Bild 1 sind die Kräfte und Geschwindigkeiten dargestellt, die für das Rechenmodell mit den in 2.1 getroffenen Annahmen benötigt werden.

Die Zugkraft, die dem Betrag nach der Triebkraft gleich ist, läßt sich für gezogene Bodenbearbeitungsgeräte mit folgender Gleichung berechnen:

$$F_Z = (F_{Z0} + F_{Z1} v + F_{Z2} v^2) b \quad (1),$$

mit F_{Z0} N/m
 F_{Z1} (N/m)/(km/h)
 F_{Z2} (N/m)/(km/h)²
b m

} von der Arbeitstiefe abhängige
boden- und gerätespezifische
Konstanten
Arbeitsbreite.

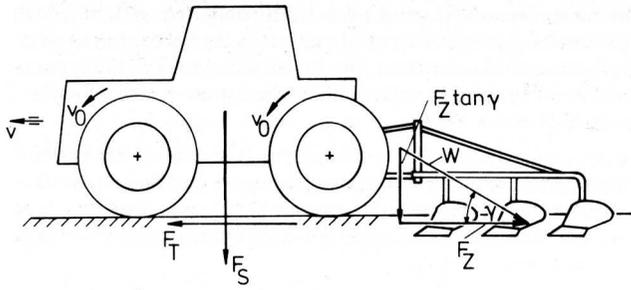


Bild 1. Im Rechenmodell berücksichtigte Kräfte und Geschwindigkeiten an Allradschlepper und gezogenem Bodenaufarbeitungsgerät.

F_S	N	Schleppergewicht (statisch)
F_T	N	Triebkraft aller vier Räder
F_Z	N	Zugkraft
$F_Z \tan \gamma + F_S$	N	Summe der Radlasten im Betrieb
W	N	Resultierende aller am Gerät angreifenden Kräfte
γ	°	Winkel der Resultierenden
v	km/h	Fahrgeschwindigkeit
v_0	km/h	schlupflose Geschwindigkeit

Da beim Pflügen die Zugkraft mit dem Quadrat der Fahrgeschwindigkeit zunimmt, beschreibt Gl. (1) die Verhältnisse beim Pflügen, wenn $F_{Z0} > 0$, $F_{Z1} = 0$ und $F_{Z2} > 0$ ist. Entsprechend gilt Gl. (1) bei den Geräten, bei denen die Zugkraft linear mit der Fahrgeschwindigkeit zunimmt, wenn $F_{Z0} > 0$, $F_{Z1} > 0$ und $F_{Z2} = 0$ ist. Unterschiedliche Arbeitstiefen werden über entsprechende Werte für F_{Z0} , F_{Z1} und F_{Z2} berücksichtigt. Deshalb kann auf die Arbeitstiefe als explizite Variable im weiteren verzichtet werden.

Die Rollwiderstands- und Kraftschlußverhältnisse werden im Laufwerkwirkungsgrad η_L berücksichtigt:

$$\eta_L = \frac{P_Z}{P_{Nab}} = \frac{F_Z v}{3600 P_{Nab}} = \frac{\kappa (1 - \sigma)}{\kappa + \rho} \quad (2)$$

darin ist

P_Z	Zugleistung in kW
P_{Nab}	Nabenleistung in kW
κ	Triebkraftbeiwert
ρ	Rollwiderstandsbeiwert
σ	Schlupf.

Der Triebkraftbeiwert ist nach Definition der Quotient aus Triebkraft und Radlast am treibenden Rad. Da gemäß der Annahmen in Abschn. 2.1 an allen vier Schlepperrädern die gleichen Verhältnisse herrschen sollen, gilt für den Allradschlepper (Bild 1):

$$\kappa = \frac{F_Z}{F_S + F_Z \tan \gamma} \quad (3)$$

Bekanntlich sind sowohl Triebkraft- als auch Rollwiderstandsbeiwert vom Schlupf abhängig. Zur Beschreibung dieser funktionalen Zusammenhänge werden Polynome nach *Stroppel* [3] verwendet:

$$\kappa(\sigma) = \kappa_0 + \kappa_1 \sigma - \kappa_2 \sigma^2 + \kappa_3 \sigma^3 - \kappa_4 \sigma^4 + \kappa_5 \sigma^5 - \kappa_6 \sigma^6 \quad (4)$$

und

$$\rho(\sigma) = \rho_0 + \rho_1 \sigma \quad (5)$$

Daraus erhält man für den Laufwerkwirkungsgrad in Abhängigkeit vom Schlupf:

$$\eta_L(\sigma) = \frac{\kappa(\sigma)(1 - \sigma)}{\kappa(\sigma) + \rho(\sigma)} \quad (6)$$

Zur Berechnung des Zeitbedarfs wird die übliche Gleichung für die Hauptzeit t_e in h/ha verwendet:

$$t_e = \frac{10}{b v} \quad (7)$$

Für den Energiebedarf E in kWh/ha ergibt sich hieraus und aus Gl. (2) gemäß der eingangs gemachten Vereinbarung:

$$E = t_e P_{Nab} = \frac{F_Z}{b \eta_L(\sigma) 3600} \quad (8)$$

Damit sind alle Beziehungen, soweit sie für das Rechenmodell von Bedeutung sind, bekannt.

2.3 Die Beziehungen zwischen Nabenleistung, Schleppergewicht, Arbeitsbreite und schlupfloser Geschwindigkeit

Damit das System Schlepper/Gerät funktionsfähig ist, müssen vom Schlepper angebotene Zugkraft und Zugleistung gleich der vom Gerät geforderten Zugkraft und Zugleistung sein. Formelmäßig lautet diese Gleichgewichtsbedingung unter Anwendung der Gln. (1) bis (6):

$$F_Z = \frac{F_S}{[1/\kappa(\sigma)] - \tan \gamma} = (F_{Z0} + F_{Z1} v + F_{Z2} v^2) b \quad (9)$$

$$P_Z = P_{Nab} \eta_L(\sigma) = \frac{F_Z v}{3600} \quad (10)$$

Diese Gleichungen gelten unter folgenden Nebenbedingungen: Der Quotient aus Zugkraft und Summe der Radlasten muß kleiner, darf höchstens gleich dem maximalen Triebkraftbeiwert sein, sonst bleibt der Schlepper mit 100 % Schlupf stehen. Ferner muß der Quotient aus Zugleistung und Laufwerkwirkungsgrad kleiner oder gleich der maximal verfügbaren Nabenleistung sein, weil sonst der Motor abgewürgt wird.

Unterstellt man nun bestimmte Bodenverhältnisse²⁾, dann lassen sich die im folgenden angegebenen Beziehungen zwischen den vom Landwirt steuerbaren Größen Nabenleistung, Schleppergewicht, Arbeitsbreite und schlupflose Geschwindigkeit ableiten.

2.3.1 Nabenleistung, Schleppergewicht und schlupflose Geschwindigkeit werden vorgegeben

Dann folgt aus der Beziehung

$$v = v_0 (1 - \sigma) \quad (11)$$

und den Gln. (4), (5), (9) und (10):

$$\frac{P_{Nab} 3600}{F_S v_0} = \frac{\kappa(\sigma) + \rho(\sigma)}{1 - \kappa(\sigma) \tan \gamma} \quad (12)^3$$

Das heißt, es gibt nur einen ganz bestimmten Schlupf⁴⁾, bei dem das System Schlepper/Gerät funktionsfähig ist, wobei die Arbeitsbreite einen ganz bestimmten Wert annimmt:

$$b = \frac{F_S}{([1/\kappa(\sigma)] - \tan \gamma)(F_{Z0} + F_{Z1} v_0(1 - \sigma) + F_{Z2} v_0^2(1 - \sigma)^2)} \quad (13)$$

2.3.2 Schleppergewicht, Arbeitsbreite und schlupflose Geschwindigkeit werden vorgegeben

Dann ist das System Schlepper/Gerät wiederum nur bei einem ganz bestimmten Schlupf funktionsfähig, der sich aus Gl. (13) errechnen läßt⁴⁾. Die sich dabei einstellende Nabenleistung erhält man mit Gl. (12). Dieser Fall ist in der Praxis häufig anzutreffen:

²⁾ Bestimmte Bodenverhältnisse heißt: F_{Z0} , F_{Z1} bzw. F_{Z2} , γ und die Funktionen $\kappa(\sigma)$, $\rho(\sigma)$ sind bekannt.

³⁾ Eine grafische Lösungsmethode für diese Gleichung findet man bei Zoz [4].

⁴⁾ Eine Auflösung dieser Gleichung nach dem Schlupf ist nicht möglich. Als iterative Lösungsmethode kann die "binary search method" verwendet werden [5].

Man fährt mit einem Schlepper gegebenen Gewichts, mit einem gegebenen Getriebeang und einem Gerät gegebener Arbeitsbreite. Entsprechend den Bodenverhältnissen stellt sich ein bestimmter Schlupf und eine bestimmte Nabenleistung ein, auf die der Landwirt keinen Einfluß nehmen kann, solange er die Motordrehzahl und den Getriebeang nicht ändert. Im ungünstigen, aber üblichen Fall wird der Schleppermotor nicht ausgelastet. Er kann häufig gar nicht ausgelastet werden, weil kein entsprechender Getriebeang vorhanden ist. Eine ausführliche Behandlung dieser Probleme findet man bei *Stroppel u. Schäfer* [6].

2.3.3 Nabenleistung, Arbeitsbreite und schlupflose Geschwindigkeit werden vorgegeben

Dann folgt aus den Gln. (6) und (9) bis (11):

$$\frac{(F_{Z0} + F_{Z1} v_0(1 - \sigma) + F_{Z2} v_0^2(1 - \sigma)^2) b v_0}{P_{Nab} 3600} = \frac{\kappa(\sigma)}{\kappa(\sigma) + \rho(\sigma)} \quad (14).$$

Auch in diesem Fall ist das System Schlepper/Gerät nur bei einem ganz bestimmten Schlupf⁴⁾ funktionsfähig. Das dazu erforderliche Schleppergewicht erhält man aus den Gln. (9) und (11):

$$F_S = ([1/\kappa(\sigma)] - \tan \gamma)(F_{Z0} + F_{Z1} v_0(1 - \sigma) + F_{Z2} v_0^2(1 - \sigma)^2) b \quad (15).$$

2.3.4 Nabenleistung, Schleppergewicht und Arbeitsbreite werden vorgegeben

Auch für diesen Fall gibt es nur einen ganz bestimmten Schlupf, bei dem das System Schlepper/Gerät funktionsfähig ist. Man berechnet ihn, indem man Gl. (9) mit Hilfe der Gl. (11) nach der schlupflosen Geschwindigkeit auflöst und in Gl. (12) einsetzt. Dabei ist zu beachten, daß sich die schlupflose Geschwindigkeit bei den Geräten, bei denen die Zugkraft linear mit der Geschwindigkeit zunimmt, mit der Gleichung

$$v_0 = \left(\frac{F_S}{b F_{Z1} ([1/\kappa(\sigma)] - \tan \gamma)} - \frac{F_{Z0}}{F_{Z1}} \right) \frac{1}{1 - \sigma} \quad (16a)^5$$

berechnet und bei den Geräten, bei denen die Zugkraft mit dem Quadrat der Geschwindigkeit zunimmt, mit der Gleichung

$$v_0 = \frac{1}{1 - \sigma} \sqrt{\frac{F_S}{b F_{Z2} ([1/\kappa(\sigma)] - \tan \gamma)} - \frac{F_{Z0}}{F_{Z2}}} \quad (16b)^5$$

Wird auf die Annahme, daß die Arbeitstiefe konstant bleibt, verzichtet, dann ist auch ein Fall denkbar, bei dem Nabenleistung, Schleppergewicht, Arbeitsbreite und schlupflose Geschwindigkeit festgelegt sind. Nach Gl. (12) ergibt sich wiederum ein ganz bestimmter Schlupf bei gegebenen Rollwiderstands- und Kraftschlußverhältnissen. Mit diesem Schlupf ist das System Schlepper/Gerät nach Gl. (9) aber nur bei ganz bestimmten Zugkraftverhältnissen funktionsfähig. Bei gegebenem spezifischem Bodenwiderstand resultiert daraus eine ganz bestimmte Arbeitstiefe. Da in der Praxis jedoch die Arbeitstiefe den pflanzenbaulichen Erfordernissen angepaßt werden muß, darf sie nicht als eine von Schlepper und Gerät abhängige Größe betrachtet werden. Dies ist ein weiterer Grund, weshalb auf die Arbeitstiefe als explizite Variable verzichtet wird.

3. Die Ermittlung der zeit- und/oder energieminimalen Kombination von Allradschlepper und gezogenem Bodenbearbeitungsgerät

Wie die Gleichungen des Abschn. 2 zeigen, läßt sich bei Vorgabe von drei der vier vom Landwirt steuerbaren Grundvariablen kein

⁵⁾ Da $v_0 > 0$ sein muß, gilt die Nebenbedingung:

$$b < \frac{F_S}{F_{Z0} ([1/\kappa(\sigma)] - \tan \gamma)}.$$

minimaler Zeit- und Energiebedarf ermitteln. Arbeitsbreite und Geschwindigkeit sowie Nabenleistung sind entweder vorgegeben oder nehmen ganz bestimmte Werte an und bedingen somit nur von den Eingabedaten abhängige Zeit- bzw. Energiebedarfswerte. Die in Abschn. 2.3 dargestellten Beziehungen lassen lediglich die pauschale These zu, daß der Arbeitszeitbedarf abnimmt, wenn verfügbare Nabenleistung, Schleppergewicht, Arbeitsbreite und schlupflose Geschwindigkeit zunehmen.

Eine rechnerische Minimierung des Arbeitszeit- und/oder Energiebedarfs kann aber dann vorgenommen werden, wenn bei bestimmten Bodenverhältnissen²⁾ jeweils nur zwei der vier Grundvariablen vorgegeben werden. Durch Bestimmung des Schlupfwertes im Zeit- bzw. Energieminimum lassen sich dann die zwei restlichen Grundvariablen errechnen. So erhält man exakt die Bedingungen, für die das System Schlepper/Gerät zeit- bzw. energieminimal arbeitet. In all den Fällen, bei denen die Nabenleistung vorgegeben wird, ist die zeitminimale Kombination von Schlepper und Gerät gleich der energieminimalen Kombination (s. Gl. (8)).

Durch Vorgabe von zwei der vier Grundvariablen ergeben sich sechs Kombinationsmöglichkeiten, die hier der Reihe nach an einem Beispiel untersucht werden sollen. Dazu werden die in **Tafel 1** zusammengestellten Daten für den Pflug in die jeweiligen Gleichungen eingesetzt. Alle im folgenden vorgestellten Gleichungen lassen sich aus der Gleichheit von Angebot und Bedarf für Zugkraft und Zugleistung zwischen Schlepper und Gerät (Gln. (9) u. (10)) unter Einhaltung der Nebenbedingungen ableiten.

Für jeden der sechs Fälle wurde ein Rechenprogramm entwickelt, das die Ergebnisse in Form einer Tabelle auf einem Datenträger abspeichert. Alle impliziten Gleichungen wurden iterativ mit Hilfe der "binary search method" [5] gelöst. In einem separaten Programm wurden die Tabellenwerte auf einem Plotter als Diagramme ausgegeben. Jeweils vier solcher Diagramme sind in den folgenden Bildern zusammen dargestellt. In den Diagrammen kennzeichnen die Variable an der Abszisse und der jeweilige Parameter die zwei vorgegebenen Grundvariablen. Die Variablen an den Ordinaten sind der zeit- und/oder energieminimale Schlupf, die hiermit errechneten zwei Grundvariablen sowie der Zeit- bzw. Energiebedarf.

Koeffizienten der Zugkraftfunktion		
$F_{Z0} = 12000$	N/m	
$F_{Z1} = 0$	(N/m)/(km/h)	
$F_{Z2} = 120$	(N/m)/(km/h) ²	
Neigungswinkel der Resultierenden*):		
$\gamma = 15^\circ$		
Koeffizienten der Triebkraftbeiwert-Schlupf-Funktion:		
$\kappa_0 = -0,0425$	$\kappa_3 = 52,9547$	$\kappa_6 = 20,3716$
$\kappa_1 = 5,0047$	$\kappa_4 = 78,1147$	
$\kappa_2 = 21,2601$	$\kappa_5 = 62,1656$	
Koeffizienten der Rollwiderstandsbeiwert-Schlupf-Funktion:		
$\rho_0 = 0,0820$	$\rho_1 = 0,0261$	
Definitionsbereich: $0,009 < \sigma < 0,500$		
Wertebereich: $0,000 < \kappa(\sigma) < 0,506$ $0,082 < \rho(\sigma) < 0,095$		
Maximaler Laufwerkwirkungsgrad: $\eta_{Lmax} = 0,6992$		
Schlupf bei η_{Lmax} : $\sigma(\eta_{Lmax}) = 0,1150$		
Triebkraftbeiwert bei η_{Lmax} : $\kappa(\eta_{Lmax}) = 0,3190$		

*) geschätzt nach Meßwerten von *Steinkamp* [7]

Tafel 1. Daten nach [3] zur Berechnung der zeit- bzw. energieminimalen Kombination von Schlepper und Pflug.

3.1 Nabenleistung und Arbeitsbreite gegeben

Für diesen Fall ist zunächst die maximal mögliche Arbeitsgeschwindigkeit zu ermitteln, bei der Zeit- und Energiebedarf im Minimum sind. Bei den Geräten, bei denen die Zugkraft linear mit der Fahr- geschwindigkeit zunimmt, gilt:

$$v = \frac{1}{2} \left(-\frac{F_{Z0}}{F_{Z1}} + \sqrt{\left(\frac{F_{Z0}}{F_{Z1}}\right)^2 + \frac{P_{Nab} \eta_L(\sigma) 14400}{F_{Z1} b}} \right) \quad (17a)$$

Beim Pflug gilt:

$$v = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3}} \quad (17b)$$

$$p = \frac{F_{Z0}}{F_{Z2}} \quad \text{und} \quad q = -\frac{P_{Nab} \eta_L(\sigma) 3600}{b F_{Z2}}$$

Die Geschwindigkeit ist also bei gegebenen Bodenverhältnissen²⁾ dann maximal, wenn der Laufwerkwirkungsgrad maximal ist. Dies ist aus Gl. (17a) ohne weiteres ersichtlich. Dagegen bedarf Gl. (17b) der Erläuterung: Für die Geschwindigkeit erhält man aus den Gln. (9) und (10) eine Gleichung 3. Grades. In der Cardanischen Formel sind $p > 0$ und $q < 0$, es gibt nur eine reelle Lösung [8]. Da außerdem $v \sim q \sim \eta_L(\sigma)$ ist, ist die Geschwindigkeit am größten beim maximalen Laufwerkwirkungsgrad, also für $\eta_L(\sigma) = \eta_{Lmax}$.

Das für die optimale Kombination erforderliche Schleppergewicht läßt sich dann mit der Gleichung

$$F_S = (F_{Z0} + F_{Z1} v + F_{Z2} v^2) b ([1/\kappa(\eta_{Lmax})] - \tan \gamma) \quad (18)$$

berechnen. Für verschiedene Arbeitsbreiten und Nabenleistungen und mit den Daten aus Tafel 1 sind die Ergebnisse für diesen Fall in Bild 2 dargestellt.

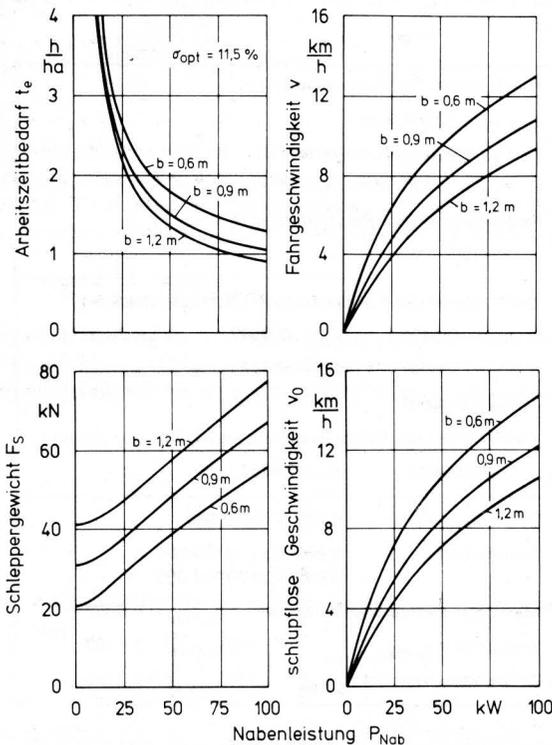


Bild 2. Zeit- und energieminimale Kombinationen von Allrad-schlepper und Pflug, gegeben Nabenleistung und Arbeitsbreite.

Die Ergebnisse dieses Abschnittes lauten:

- Zeit- und Energiebedarf sind im Minimum, wenn bei einem Schlupf gearbeitet wird, bei dem der Laufwerkwirkungsgrad maximal ist.
- Durch den Schlupf beim maximalen Laufwerkwirkungsgrad sind Fahrgeschwindigkeit, schlupflose Geschwindigkeit und Schleppergewicht festgelegt.
- Das für die optimale Kombination erforderliche Schleppergewicht steigt proportional mit zunehmender Arbeitsbreite und wächst mit steigender Nabenleistung.
- Die für die optimale Kombination erforderliche Fahrgeschwindigkeit steigt mit zunehmender Nabenleistung und abnehmender Arbeitsbreite weniger als linear an.

3.2 Nabenleistung und Schleppergewicht gegeben

Für diesen Fall berechnet man den Zeitbedarf mit der Gleichung:

$$t_e = \frac{F_{Z0}}{3600 P_{Nab} \eta_L(\sigma)} + \frac{10 F_{Z1} ([1/\kappa(\sigma)] - \tan \gamma)}{F_S} + \frac{36000 F_{Z2} P_{Nab} \eta_L(\sigma) ([1/\kappa(\sigma)] - \tan \gamma)^2}{F_S^2} \quad (19)$$

Zur Minimierung des Zeit- und Energiebedarfs wird die erste Ableitung der Gl. (19) nach dem Schlupf gleich null gesetzt:

$$\frac{\partial t_e}{\partial \sigma} = \frac{F_{Z0}}{P_{Nab} 3600} R + \frac{10 F_{Z1}}{F_S} S + \frac{36000 F_{Z2} P_{Nab}}{F_S^2} T = 0 \quad (20)$$

$$R = \frac{-\eta_L'}{\eta_L^2(\sigma)} \quad S = \frac{-\kappa'}{\kappa^2(\sigma)}$$

$$T = ([1/\kappa(\sigma)] - \tan \gamma) [\eta_L' ([1/\kappa(\sigma)] - \tan \gamma) + 2 \eta_L(\sigma) S]$$

$$\eta_L' = \frac{[\kappa'(1 - \sigma) - \kappa(\sigma)] (\kappa(\sigma) + \rho(\sigma)) - \kappa(\sigma) (1 - \sigma) (\kappa' + \rho')}{(\kappa(\sigma) + \rho(\sigma))^2}$$

$$\kappa' = \frac{\partial \kappa(\sigma)}{\partial \sigma} \quad \rho' = \frac{\partial \rho(\sigma)}{\partial \sigma}$$

Gl. (20) ist implizit und nur für einen ganz bestimmten Schlupf, den optimalen Schlupf σ_{opt} , erfüllt. Mit ihm wird nun die erforderliche Fahrgeschwindigkeit errechnet:

$$v = \frac{3600 P_{Nab} \eta_L(\sigma_{opt}) ([1/\kappa(\sigma_{opt})] - \tan \gamma)}{F_S} \quad (21)$$

Die erforderliche Arbeitsbreite erhält man, wenn man Gl. (11) und Gl. (21) in Gl. (13) einsetzt. Mit den Daten der Tafel 1 wurden die in Bild 3 gezeigten Ergebnisse errechnet.

- Die Ergebnisse dieses Abschnittes lauten:
- Der energie- und zeitminimale Schlupf ist immer größer oder gleich dem Schlupf beim Maximum des Laufwerkwirkungsgrads. Er ist um so größer, je kleiner der Quotient aus Gewicht und Nabenleistung ist.
 - Mit dem zeit- und energieminimalen Schlupf sind die erforderliche Fahrgeschwindigkeit und die erforderliche Arbeitsbreite festgelegt.
 - Die für die optimale Kombination erforderliche Fahrgeschwindigkeit nimmt mit steigender Nabenleistung zu, mit steigendem Schleppergewicht ab.
 - Die erforderliche Arbeitsbreite nimmt mit steigendem Schleppergewicht zu.

3.3 Nabenleistung und schlupflose Geschwindigkeit gegeben

Mit dieser Vorgabe erhält man für den Arbeitszeitbedarf:

$$t_e = \frac{F_{Z0} + F_{Z1} v_0 (1 - \sigma) + F_{Z2} v_0^2 (1 - \sigma)^2}{P_{Nab} \eta_L(\sigma) 3600} \quad (22)$$

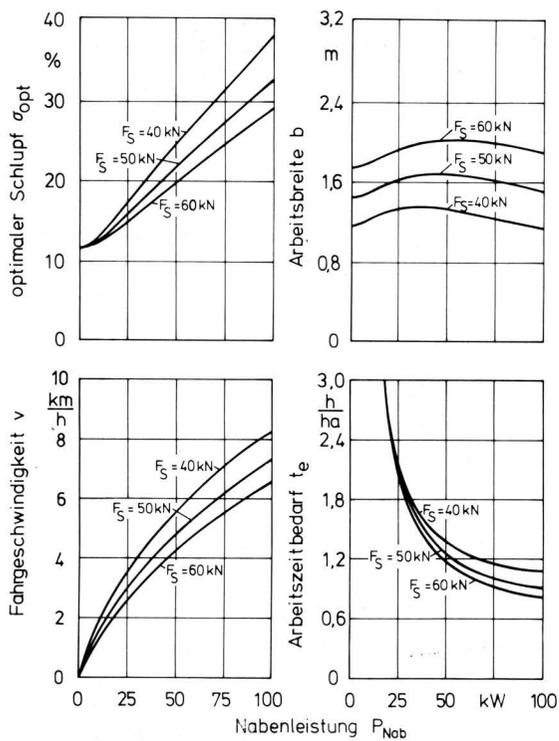


Bild 3. Zeit- und energieminimale Kombination von Allrad-schlepper und Pflug, gegeben Nabenleistung und Schleppergewicht.

Setzt man die erste Ableitung dieser Gleichung nach dem Schlupf gleich null, erhält man:

$$\frac{\partial t_e}{\partial \sigma} = F_{Z0} \eta_L' + F_{Z1} v_0 R + F_{Z2} v_0^2 S = 0 \quad (23)$$

$$R = \eta_L(\sigma) + (1 - \sigma) \eta_L'$$

$$S = 2(1 - \sigma) \eta_L(\sigma) + (1 - \sigma)^2 \eta_L'$$

η_L' wie Gl. (20).

Mit dem aus Gl. (23) gefundenen Schlupf σ_{opt} wird die erforderliche Arbeitsbreite berechnet:

$$b = \frac{3600 P_{Nab} \eta_L(\sigma_{opt})}{v_0 (1 - \sigma_{opt})(F_{Z0} + F_{Z1} v_0 (1 - \sigma_{opt}) + F_{Z2} v_0^2 (1 - \sigma_{opt})^2)} \quad (24)$$

Das erforderliche Schleppergewicht berechnet man mit der Gleichung

$$F_S = \frac{3600 P_{Nab} \eta_L(\sigma_{opt}) ([1/\kappa(\sigma_{opt})] - \tan \gamma)}{v_0 (1 - \sigma_{opt})} \quad (25)$$

Mit den Daten der Tafel 1 wurden die in Bild 4 gezeigten Ergebnisse berechnet.

Die Ergebnisse dieses Abschnitts lauten:

- Der energie- und zeitminimale Schlupf ist immer größer oder gleich dem Schlupf beim Maximum des Laufwerkwirkungsgrads. Er ist unabhängig von der vorgegebenen Nabenleistung und um so größer, je größer die vorgegebene schlupflose Geschwindigkeit ist.
- Mit dem zeit- und energieminimalen Schlupf sind die erforderliche Arbeitsbreite und das erforderliche Schleppergewicht festgelegt.
- Das für die optimale Kombination erforderliche Schleppergewicht steigt proportional mit zunehmender Nabenleistung und sinkt mit zunehmender schlupfloser Geschwindigkeit.
- Die für die optimale Kombination erforderliche Arbeitsbreite steigt proportional mit zunehmender Nabenleistung und sinkt mit zunehmender schlupfloser Geschwindigkeit.

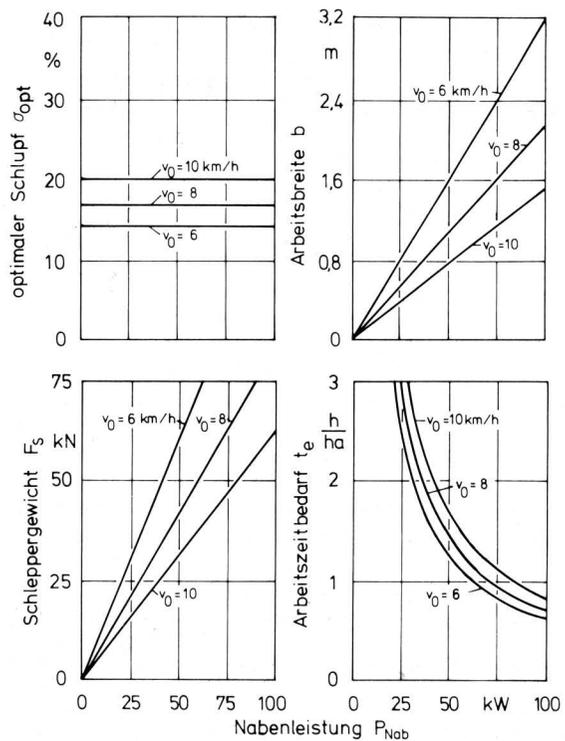


Bild 4. Zeit- und energieminimale Kombinationen von Allrad-schlepper und Pflug, gegeben Nabenleistung und schlupflose Geschwindigkeit.

3.4 Arbeitsbreite und Schleppergewicht gegeben

Für diesen und die beiden folgenden Fälle müssen Minimierung des Zeit- und Energiebedarfs getrennt vorgenommen werden. Zur Minimierung des Zeitbedarfs ist zunächst die Fahrgeschwindigkeit zu maximieren. Dazu wird Gl. (16a) bzw. Gl. (16b) verwendet. Die größtmögliche Fahrgeschwindigkeit wird demnach dann erreicht, wenn der Triebkraftbeiwert maximal ist. Dies gilt unabhängig vom vorgegebenen Schleppergewicht und der vorgegebenen Arbeitsbreite. Das bedeutet, daß der Zeitbedarf nur mit extrem hohen Schlupfwerten, die in der Praxis nicht mehr vertretbar sind, minimiert werden kann. Da sich andererseits bei Schlupfwerten $\sigma > \sigma(\eta_{L,max})$ der Laufwerkwirkungsgrad rapide verschlechtert, steigt die benötigte Nabenleistung sehr stark an:

$$P_{Nab} = \frac{F_S}{3600 \eta_L(\sigma) ([1/\kappa(\sigma)] - \tan \gamma)} \left(\frac{F_S}{F_{Z1} ([1/\kappa(\sigma)] - \tan \gamma) b} - \frac{F_{Z0}}{F_{Z1}} \right) \quad (26a)$$

bzw.

$$P_{Nab} = \frac{F_S}{3600 \eta_L(\sigma) ([1/\kappa(\sigma)] - \tan \gamma)} \sqrt{\frac{F_S}{F_{Z2} ([1/\kappa(\sigma)] - \tan \gamma) b} - \frac{F_{Z0}}{F_{Z2}}} \quad (26b)$$

Während also zunehmender Schlupf sinkenden Zeit- und steigenden Leistungsbedarf zur Folge hat, nimmt der Energiebedarf zu:

$$E = \frac{F_S(\kappa(\sigma) + \rho(\sigma))}{360 b (1 - \sigma) (1 - \kappa(\sigma) \tan \gamma)} \quad (27)$$

Der Energiebedarf steigt nach Gl. (27) deshalb mit zunehmendem Schlupf, weil $\kappa(\sigma)$ und $\rho(\sigma)$ im Zähler zunehmen, während gleichzeitig der Nenner kleiner wird.

Abweichend von den vorhergehenden drei Fällen, lassen sich für diesen Fall keine zeit- bzw. energieminimalen Schlupfwerte zur Ermittlung der optimalen Kombination von Schlepper und Gerät bestimmen, so daß auf eine grafische Darstellung der Zusammenhänge verzichtet werden kann.

Unabhängig vom Schlupf gilt, daß die Geschwindigkeit um so höher ist, je höher das Schleppergewicht ist. Die erforderliche Na-

benleistung steigt stärker als linear mit zunehmendem Schleppergewicht und sinkt mit zunehmender Arbeitsbreite. Der Energiebedarf ist um so größer, je größer das vorgegebene Schleppergewicht und je kleiner die vorgegebene Arbeitsbreite ist.

3.5 Arbeitsbreite und schlupflose Geschwindigkeit gegeben

Mit diesen Vorgaben berechnet man den Arbeitszeitbedarf mit der Gleichung:

$$t_e = \frac{10}{b v_0 (1 - \sigma)} \quad (28).$$

Er ist folglich für $\sigma = 0$ im Minimum. Da aber ohne Schlupf keine Zugkraft entwickelt werden kann, ist dieses Ergebnis ohne Belang. Als Konsequenz läßt sich jedoch festhalten, daß für diesen Fall möglichst geringe Schlupfwerte anzustreben sind. Schlupfwerte, die kleiner als $\sigma(\eta_{L,max})$ sind, sind jedoch zu vermeiden, da dann hohe Laufwerkverluste die verfügbare Nabenleistung aufzehren.

Der Energiebedarf wird mit der Gleichung

$$E = \frac{F_{Z0} + F_{Z1} v_0 (1 - \sigma) + F_{Z2} v_0^2 (1 - \sigma)^2}{360 \eta_L(\sigma)} \quad (29)$$

berechnet. Leitet man diese Gleichung nach dem Schlupf ab und setzt die erste Ableitung gleich null, erhält man Gl. (23). Daraus läßt sich wieder ein energieminimaler Schlupfwert σ_{opt} errechnen, der zur Bestimmung der erforderlichen Nabenleistung und des erforderlichen Schleppergewichts herangezogen wird:

$$P_{Nab} = \frac{(F_{Z0} + F_{Z1} v_0 (1 - \sigma_{opt}) + F_{Z2} v_0^2 (1 - \sigma_{opt})^2) b v_0 (1 - \sigma_{opt})}{3600 \eta_L(\sigma_{opt})} \quad (30)$$

$$F_S = [F_{Z0} + F_{Z1} v_0 (1 - \sigma_{opt}) + F_{Z2} v_0^2 (1 - \sigma_{opt})^2] b \times \\ \times ([1/\kappa(\sigma_{opt})] - \tan \gamma) \quad (31).$$

Mit den Daten der Tafel 1 wurden die in Bild 5 gezeigten Ergebnisse berechnet.

Die Ergebnisse dieses Abschnitts lauten:

- Bei gegebener Arbeitsbreite und schlupfloser Geschwindigkeit gibt es keinen sinnvollen zeitminimalen Schlupf.
- Der energieminimale Schlupf ist immer größer oder gleich dem Schlupf beim Maximum des Laufwerkwirkungsgrads. Er ist unabhängig von der vorgegebenen Arbeitsbreite und nimmt mit steigender schlupfloser Geschwindigkeit zu.
- Mit dem energieminimalen Schlupf sind die erforderliche Nabenleistung und das erforderliche Schleppergewicht festgelegt.
- Die für die energieminimale Kombination erforderliche Nabenleistung steigt proportional mit zunehmender Arbeitsbreite und stärker als proportional mit zunehmender schlupfloser Geschwindigkeit.
- Das für die energieminimale Kombination erforderliche Schleppergewicht steigt proportional mit zunehmender Arbeitsbreite und wird mit zunehmender schlupfloser Geschwindigkeit größer.

3.6 Schleppergewicht und schlupflose Geschwindigkeit gegeben

Unter dieser Vorgabe berechnet sich der Arbeitszeitbedarf mit der Gleichung:

$$t_e = \frac{10 [F_{Z0} + F_{Z1} v_0 (1 - \sigma) + F_{Z2} v_0^2 (1 - \sigma)^2] ([1/\kappa(\sigma)] - \tan \gamma)}{v_0 (1 - \sigma) F_S} \quad (32).$$

Der zeitminimale Schlupf wird nach Nullsetzen der ersten Ableitung der Gl. (32) nach dem Schlupf berechnet:

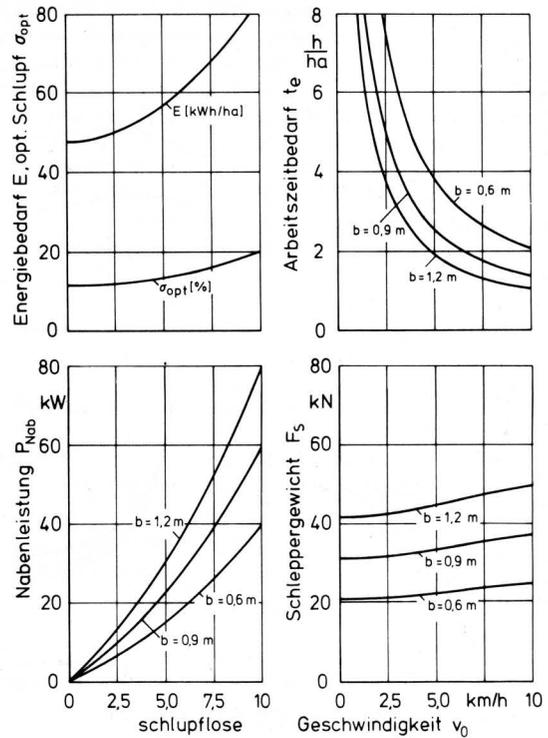


Bild 5. Energieminimale Kombinationen von Allradschlepper und Pflug, gegeben schlupflose Geschwindigkeit und Arbeitsbreite.

$$\frac{\partial t_e}{\partial \sigma} = F_{Z0} R - F_{Z1} v_0 S - F_{Z2} v_0^2 T = 0 \quad (33).$$

$$R = \frac{[1/\kappa(\sigma)] - \tan \gamma}{(1 - \sigma)^2} - \frac{\kappa'}{\kappa(\sigma)(1 - \sigma)}$$

$$S = \frac{\kappa'}{\kappa^2(\sigma)} \quad T = \frac{(1 - \sigma) \kappa'}{\kappa^2(\sigma)} + [1/\kappa(\sigma)] - \tan \gamma$$

κ' wie Gl. (20).

Der energieminimale Schlupf errechnet sich auch für diesen Fall aus Gl. (23). Mit dem aus Gl. (33) bzw. Gl. (23) ermittelten zeit- bzw. energieminimalen Schlupf σ_{opt} erhält man die erforderliche Arbeitsbreite aus Gl. (13) und die erforderliche Nabenleistung aus Gl. (12). Mit den Daten aus Tafel 1 wurden die in Bild 6 und 7 dargestellten Ergebnisse errechnet.

Die Ergebnisse dieses Abschnitts lauten:

- Zeit- und energieminimaler Schlupf unterscheiden sich, sie sind größer oder gleich dem Schlupf beim Maximum des Laufwerkwirkungsgrads. Der Schlupf ist in beiden Fällen unabhängig vom vorgegebenen Schleppergewicht und steigt mit zunehmender schlupfloser Geschwindigkeit.
- Mit den Werten für den zeit- bzw. energieminimalen Schlupf sind jeweils verschiedene Arbeitsbreiten und Nabenleistungen festgelegt.
- In beiden Fällen nimmt die erforderliche Arbeitsbreite proportional mit steigendem Schleppergewicht zu. Mit zunehmender schlupfloser Geschwindigkeit wird die Arbeitsbreite kleiner.
- In beiden Fällen nimmt die erforderliche Nabenleistung mit steigendem Schleppergewicht proportional, mit steigender schlupfloser Geschwindigkeit stärker als proportional zu.

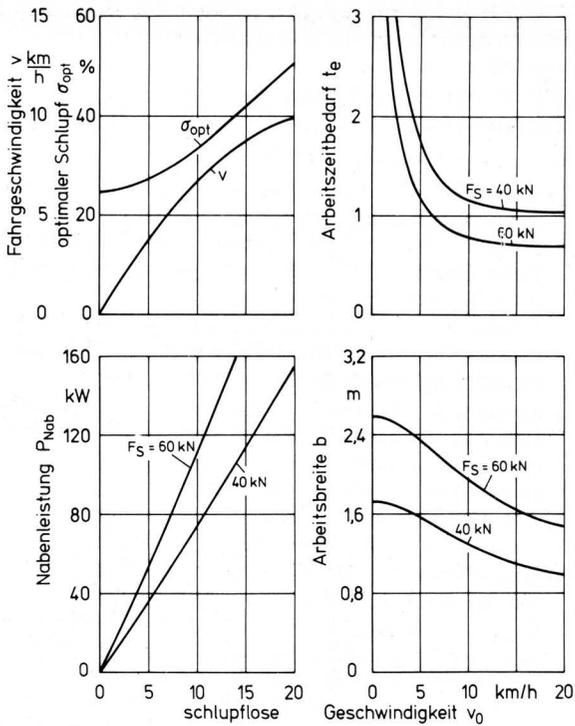


Bild 6. Zeitminimale Kombinationen von Allradschlepper und Pflug, gegeben schlupflose Geschwindigkeit und Schleppergewicht.

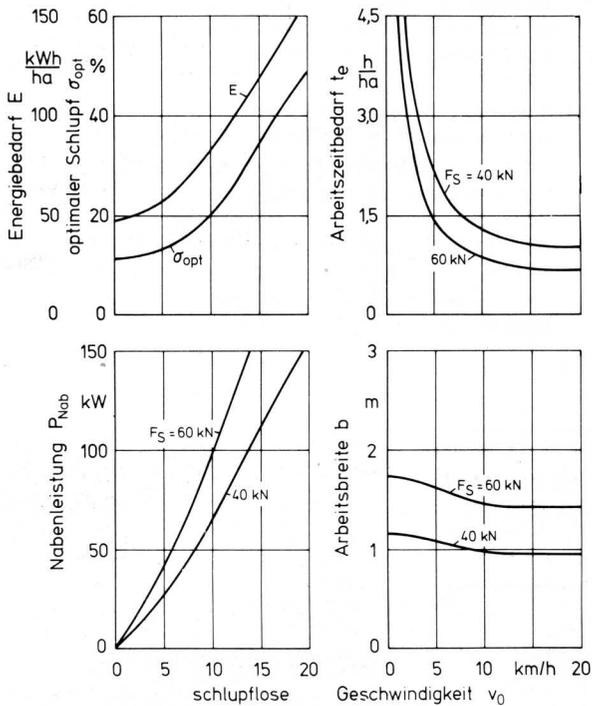


Bild 7. Energieminimale Kombinationen von Allradschlepper und Pflug, gegeben schlupflose Geschwindigkeit und Schleppergewicht.

4. Beurteilung der Ergebnisse

In Tafel 2 sind die in Abschnitt 3 gefundenen Lösungen zur Minimierung des Zeitbedarfs einerseits und zur Minimierung des Energiebedarfs andererseits vergleichend gegenübergestellt.

Fall	gegeben	gesucht	zeitminimaler Schlupf	energieminimaler Schlupf
1	P_{Nab}, b	F_S, v_0	σ_{opt} bei $\eta_L \max$	σ_{opt} bei $\eta_L \max$
2	P_{Nab}, F_S	b, v_0	$\sigma_{opt} = f_1(P_{Nab}, F_S)$	$\sigma_{opt} = f_1(P_{Nab}, F_S)$
3	P_{Nab}, v_0	b, F_S	$\sigma_{opt} = f_2(v_0)$	$\sigma_{opt} = f_2(v_0)$
4	b, F_S	P_{Nab}, v_0	σ_{opt} bei k_{max}	—
5	b, v_0	P_{Nab}, F_S	—	$\sigma_{opt} = f_2(v_0)$
6	F_S, v_0	P_{Nab}, b	$\sigma_{opt} = f_3(v_0)$	$\sigma_{opt} = f_2(v_0)$

f_1 : Gl. (20) f_2 : Gl. (23) f_3 : Gl. (33)

Tafel 2. Übersicht über die Ergebnisse bei der Bestimmung des zeit- bzw. energieminimalen Schlupfes.

Betrachtet man zunächst die Minimierung des Zeitbedarfs, dann ist festzuhalten, daß jeder der 6 Fälle zu einer anderen Funktion und damit zu einer eigenen Lösung führt.

Fall 1 ist anwendbar bei einer bereits vorhandenen Kombination von Schlepper und Gerät. Er ist in allen 6 Fällen bezüglich der optimalen Kombination von Schlepper und gezogenem Gerät der sinnvollste, weil neben dem Zeitbedarf auch der Energiebedarf minimiert wird und die Schleppermotorleistung mit den geringstmöglichen Verlusten in Zugleistung umgesetzt wird. Die Realisierung des Optimums kann jedoch daran scheitern, daß das erforderliche Schleppergewicht größer als das maximal zulässige Gesamtgewicht ist und/oder der erforderliche Getriebegang nicht zur Verfügung steht.

In den Fällen 2 und 3 sind jeweils zwei schlepperseitige Variable vorgegeben. Damit kann die Frage beantwortet werden, wie breit ein gezogenes Gerät sein muß, um die zeit- und energieminimale Kombination für einen gegebenen Schlepper zu erhalten. Wie die Bilder 3 und 4 zeigen, erfordern insbesondere niedrige Leistungsgewichte kleine Arbeitsbreiten bei hohen Geschwindigkeiten und hohen Schlupfwerten, wenn zeitminimal gearbeitet werden soll.

Fall 2 wird häufig unter dem Aspekt der Zugleistungsmaximierung behandelt [9, 10, 11], wozu der maximale Laufwerkwirkungsgrad angestrebt werden muß. Maximale Zugleistung und minimaler Zeitbedarf lassen sich jedoch, ausgenommen Fall 1, nicht gleichzeitig realisieren. Der Grund dafür ist, daß hohe Zugleistungen bei Schleppern geringen Leistungsgewichts nur mit hohen Fahrgeschwindigkeiten erzielt werden können. Eine Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit bewirkt einen überproportionalen Anstieg der Zugleistung, dem nur durch eine entsprechende stärker als lineare Verringerung der Arbeitsbreite und damit durch Verzicht auf Flächenleistung entsprochen werden kann. Eine weiterführende Untersuchung zu Fall 2 findet man bei *Stroppel u. Schäfer* [12].

Die Fälle 4 bis 6 sind hinsichtlich der Minimierung des Zeitbedarfs für praktische Fragestellungen von untergeordneter Bedeutung. Denn man kann davon ausgehen, daß beim Einsatz von Allradschleppern zur Bodenbearbeitung die sinnvolle Auslastung der installierten Motorleistung oberstes Ziel ist. Außerdem liefern die Fälle 4 und 5 zur Minimierung des Zeitbedarfs keinen sinnvollen Schlupfwert und Fall 6 liefert hohe, praxisferne Werte für σ_{opt} .

Bzüglich der Minimierung des Energiebedarfs ist als wichtiges Ergebnis festzuhalten, daß bei gegebener schlupfloser Geschwindigkeit sowohl Schleppergewicht als auch Nabenleistung und Arbeitsbreite keinen Einfluß auf den energieminimalen Schlupf haben. Das betrifft also die Fälle 3, 5 und 6. Für die Minimierung des Energiebedarfs nach den Fällen 1 und 2 gelten die über die Minimierung des Arbeitszeitbedarfs gemachten Aussagen, da Zeit- und Energiebedarfsminimum bei gegebener Nabenleistung zusammenfallen. Fall 4 liefert keinen energieminimalen Schlupfwert und ist somit von untergeordneter Bedeutung.

Von Interesse ist in diesem Zusammenhang die Frage, ob bei einer energieminimalen Kombination auch der Kraftstoffverbrauch minimal ist. Für die Fälle 1 bis 3 fallen minimaler Energiebedarf und minimaler Kraftstoffverbrauch immer dann zusammen, wenn bei der jeweils vorgegebenen Nabenleistung der spez. Kraftstoffverbrauch des Schleppermotors minimal ist. In der Regel liegt bei den heutigen Schleppermotoren der Punkt des minimalen spezifischen Kraftstoffverbrauchs unterhalb der Nennleistung und damit unterhalb der maximal möglichen Nabenleistung, so daß minimaler Zeitbedarf und minimaler Kraftstoffverbrauch nicht gleichzeitig realisiert werden können, wenn die Motorleistung voll ausgenutzt wird.

Alle 6 Fälle zusammen ergeben ein Instrumentarium, mit dessen Hilfe alle denkbaren Fragen zur optimalen Kombination von Allradschlepper und gezogenem Bodenbearbeitungsgerät beantwortet werden können. Alle Funktionen wurden so dargestellt, daß sie ohne großen Aufwand auf einem Mikrocomputer programmiert werden können. Durch systematische Variation der Eingabedaten läßt sich dann eine Vielzahl interessanter Fragestellungen beantworten. Als Ausblick auf mögliche Anwendungsfälle seien genannt: Bestimmung der optimalen Schlepperleistungsgewichte in Abhängigkeit von den Bodenverhältnissen, Bestimmung der optimalen Getriebegangstufung unter Berücksichtigung verschiedener Bodenverhältnisse, Bestimmung der optimalen Kombination von Schlepper und Gerät im Hinblick auf eine bestimmte Zeitspanne.

5. Zusammenfassung

Ausgehend von den vier vom Landwirt beeinflussbaren Größen Nabenleistung, Schleppergewicht, Arbeitsbreite und schlupflose Geschwindigkeit, wird ein Modell entwickelt, das unter bestimmten Annahmen die Berechnung der zeit- und/oder energieminimalen Kombination von Allradschleppern und gezogenen Bodenbearbeitungsgeräten ermöglicht.

Werden bei bestimmten Bodenverhältnissen drei dieser vier Größen vorgegeben, dann arbeitet die Kombination von Schlepper und Gerät in der Regel nicht optimal. Bei Vorgabe von je zwei der vier Größen lassen sich insgesamt sechs Fälle zur Bestimmung der zeit- und/oder energieminimalen Kombination beschreiben. Rechnerisch erfolgt die Bestimmung der optimalen Kombination, indem die jeweiligen Zeit- bzw. Energiebedarfsfunktionen nach dem Schlupf abgeleitet und die Ableitung gleich null gesetzt wird. Mit dem somit ermittelten "optimalen" Schlupf werden die beiden anderen, nicht vorgegebenen Größen berechnet.

Alle sechs Fälle werden formelmäßig erfaßt, und die Ergebnisse werden in Diagrammen am Beispiel der Kombination Allradschlepper/Pflug veranschaulicht.

Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [1] ● Schäfer, W.: Verfahrensvergleich gezogener und zapfwel-lengetriebener Bodenbearbeitungsgeräte hinsichtlich des Leistungs- und Arbeitszeitbedarfs sowie der Verfahrenskosten. Tutkimustiedote Nr. 25, Helsinki: Maatalousteknologian laitoksen Helsingin yliopisto, 1978.
- [2] Schäfer, W.: Ein Rechenmodell zur vergleichenden Beurteilung der Verfahrenskosten bei Bodenbearbeitungsgeräten. Grundl. Landtechnik Bd. 29 (1979) Nr. 5, S. 162/66.
- [3] Stroppel, A.: Energie- und Arbeitszeitbedarf für gezogene Geräte der Bodenbearbeitung bei unterschiedlicher Schleppermotorauslastung. Grundl. Landtechnik Bd. 30 (1980) Nr. 4, S. 135/40.
- [4] Zoz, F.M.: Predicting tractor field performance. ASAE-Paper Nr. 70-118, St. Joseph, Michigan, 1970.
- [5] ● Knuth, D.E.: The art of computer programming. Vol. III. Reading, Mass.: Addison-Wesley 1973.
- [6] Stroppel, A. u. W. Schäfer: Arbeitszeit- und Energiebedarf beim Pflügen in Abhängigkeit vom Getriebegang, der Arbeitsbreite des Pfluges und der Schleppermasse. Grundl. Landtechnik Bd. 31 (1981) Nr. 5, S. 165/71.
- [7] ● Steinkampf, H.: Ermittlung von Reifenkennlinien und Gerätezugleistungen für Ackerschlepper. Landbauforschung Völkenrode, Sh. 7, 1975.
- [8] ● Autorenkollektiv: Kleine Enzyklopädie Mathematik. Leipzig: Verlag Enzyklopädie 1970, S. 110.
- [9] Rosegger, S.: Wirtschaftliche Nutzung großer Schlepperleistung bei der Bodenbearbeitung. Landtechnik von Morgen, Folge 15, München: Fa. Schlüter 1976.
- [10] Krupp, G.: Optimale Arbeitsgeschwindigkeit von Traktoren. Agrartechnik 28, Jg. (1978) H. 7, S. 312.
- [11] Sitkei, G.: Allgemeine Zusammenhänge zwischen Leistung, dem Gewicht und den optimalen Betriebsparametern von Schleppern. Grundl. Landtechnik Bd. 28 (1978) Nr. 5, S. 189/91.
- [12] Stroppel, A. u. W. Schäfer: Maximierung der Schlagkraft beim Pflügen durch stufenlose Arbeitsbreitenverstellung. Grundl. Landtechnik Bd. 31 (1981) Nr. 6, S. 205/10.



VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1983

Schriftleitung: Dr. F. Schoedder, Braunschweig

Printed in Germany. Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung, vorbehalten. Kein Teil dieser Schriftenreihe darf in irgendeiner Form — durch Photokopie, Mikrokopie oder ein anderes Verfahren — ohne schriftliche Genehmigung des Verlages, auch nicht auszugsweise, reproduziert werden. — All rights reserved (including those of translation into foreign languages). No part of this issue may be reproduced in any print, microfilm, or any other means, without written permission from the publishers. — Herstellung: Druckerei Ruth, Braunschweig.