

Einflußgrößen auf Flächenleistung und Energieaufwand beim Schleppereinsatz

Von Gerhard Jahns und Heinrich Steinkampf,
Braunschweig-Völkenrode*)

Mitteilung aus den Instituten für landtechnische Grundlagenforschung und Betriebstechnik der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft,
Braunschweig-Völkenrode

DK 631.372:631.51:65.015

Vorrangiges Ziel bei der Entwicklung und beim Einsatz von Schleppern und Geräten in der Bodenbearbeitung ist die Steigerung der Flächenleistung bei möglichst geringem Energieaufwand und ohne Beeinträchtigung des gewünschten Bearbeitungseffektes. Hier wird mit Hilfe von Modellrechnungen der Einfluß verschiedener Parameter auf die Flächenleistung und den Kraftstoffverbrauch quantifiziert. Die Ergebnisse tragen dazu bei, Auswirkungen von Maßnahmen im Vorhinein zu beurteilen — bei der Entwicklung zur Ermittlung optimaler Geräteparameter, beim Einsatz zur Festlegung optimaler Betriebsbedingungen.

1. Einleitung

Flächenleistung und Energieaufwand sind wesentliche Kriterien für die Effizienz des Schleppereinsatzes in der Feldwirtschaft. Flächenleistung und Energieaufwand bei der Bodenbearbeitung hängen von zahlreichen Einflußgrößen ab, deren wichtigste, geordnet nach Bereichen, in **Bild 1** aufgeführt sind.

Sowohl für den Hersteller als auch für den Benutzer ist es wichtig zu wissen, welche der aufgeführten Bereiche bzw. Größen er beeinflussen kann und wie sich einzelne Einflußgrößen auf die Zielgrößen Flächenleistung und Energieaufwand auswirken. Dies durch Messungen am Gesamtsystem in der Praxis ermitteln zu wollen, ist bei der Vielzahl der Einflußgrößen, die sich auch gegenseitig beeinflussen, nahezu unmöglich, ganz abgesehen von dem dafür erforderlichen Zeit- und Kostenaufwand. Für solche Untersuchungen sind aber Simulationsmodelle ein wirkungsvolles Hilfsmittel.

Im vorliegenden Beitrag wird mit Hilfe von Modellrechnungen aufgezeigt, wie und in welchem Umfang einzelne der genannten Einflußgrößen die Flächenleistung und den Energieverbrauch beim Pflügen beeinflussen. Dabei darf nicht verkannt werden, daß Flächenleistung und Energieverbrauch nur zwei, wenn auch wichtige Kriterien für die Beurteilung des Schleppereinsatzes sind. Andere Kriterien sind z.B. die Arbeitsqualität und ergonomische Aspekte. Diese jedoch sind bis heute einer Quantifizierung und mathematischen Formulierung weitgehend verschlossen. Sie sind deshalb Modellen der nachfolgend dargestellten Art nicht zugänglich und lassen sich zur Zeit auch nicht objektiv anhand von Maßzahlen vergleichen.

*) Dr.-Ing. G. Jahns ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für landtechnische Grundlagenforschung (Leiter: Prof. Dr.-Ing. W. Batel); Dr.-Ing. H. Steinkampf ist wissenschaftlicher Mitarbeiter des Instituts für Betriebstechnik (Leiter: Prof. Dr. H. Schön) der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL) Braunschweig-Völkenrode.

2. Struktur und Aufbau des Modelles

Struktur und Aufbau eines Modelles richten sich nach der mit dem Modell zu beantwortenden Fragestellung und der Zielsetzung. Eines ist jedoch allen Modellen gemeinsam: sie sollen mit Hilfe von mathematischen Beziehungen die zu untersuchenden Zusammenhänge übersichtlich darstellen und stützen sich auf empirisch gewonnene Daten und Zusammenhänge, im vorliegenden Fall z.B. auf Zugkraftbedarfskurven von Geräten, Triebkraft- und Rollwiderstandskurven von Schlepperreifen. Ausgehend hiervon wird über Kraft-, Leistungs-, Zeit- oder andere Bilanzen ein Gesamtmodell gebildet.

Bei dem hier verwendeten Modell wurde Wert auf einen modularen Aufbau gelegt. Für die 3 Bereiche: Fahrzeug, Laufwerk/Boden, Gerät ist dies in **Bild 2** schematisch dargestellt. Durch den modularen Aufbau ist die Möglichkeit eines weiteren Ausbaues und einer Verfeinerung des Modelles gewährleistet. Außerdem ermöglicht er, die Schnittstellen des Systems so zu wählen, daß sie denen des realen Systems weitgehend entsprechen. Dadurch wird die Anschaulichkeit verbessert und die Interpretation der Ergebnisse sowie ihr Vergleich mit Meßwerten aus der Praxis erleichtert. Daß bei der Formulierung der einzelnen Module auf eine Reihe bereits bekannter Zusammenhänge zurückgegriffen werden kann, deuten die Kurvenzüge in der unteren Bildhälfte an.

Für viele Geräte stehen Werte für den Zugkraft- bzw. Leistungsbedarf in Abhängigkeit von der Arbeits- und Fahrgeschwindigkeit auf unterschiedlichen Böden als umfangreiche Versuchsergebnisse und in Veröffentlichungen zur Verfügung [1, 2, 3]. Der Zugkraftbedarf des in den nachfolgenden Beispielen auf zwei Bodenarten "verwendeten" Pfluges wurde nach dem Ansatz:

$$F_z = b t (a_1 + b_1 v^2)$$

errechnet. Hierin sind F_z der Zugkraftbedarf in kN, b und t die Arbeitsbreite und Arbeitstiefe des Pfluges in m und v die Fahrgeschwindigkeit in km/h. Die Zahlenwerte für die Koeffizienten a_1 und b_1 sind in der **Tafel 1** wiedergegeben. Sie wurden den in [2] dargestellten Ergebnissen entnommen.

Die Beschreibung der Laufwerkeigenschaften verschiedener Reifen/Boden-Paarungen bei unterschiedlichen Einsatzbedingungen geht aus von eigenen Meßwerten [1, 4]. Hierbei besteht vor allem die Aufgabe, das umfangreiche Datenmaterial ohne Informationsverlust zu reduzieren. Die bisherige Auswertung der Versuchsdaten läßt erwarten, daß es mit dem gefundenen Ansatz möglich ist, Übertragungseigenschaften von Schlepperreifen mit wenigen Kenngrößen zu beschreiben. Der zur Beschreibung des Triebkraftwertes in Abhängigkeit vom Schlupf gewählte Ansatz lautet:

$$\kappa = a_2 + b_2 \exp(c_2 \sigma)$$

$$\sigma = 0,3$$

Fahrer
 menschliche Eigenschaften
 - Informationen zu erfassen, zu verarbeiten und auszugeben
 - anthropom. Eigenschaften
 - Belastung des Fahrers

Arbeitsablauf Betriebsstruktur
 Schlagabmessung
 Witterung
 Fruchtfolge
 Arbeitszeiten (u.a. Haupt- u. Nebenzeiten)

Schlepper
 Nennleistung
 Motorauslastung
 Motoreigenschaften
 Getriebe
 Laufwerk
 Masse

Gerät
 spez. Zugwiderstand
 spez. Leistungsbedarf
 Arbeits-Breite
 Arbeits-Tiefe
 Arbeits-Geschwindigkeit
 Arbeits-Effekt

Boden
 spez. Bodenwiderstand:
 - Bodenart
 - Porenvolumen
 - Feuchtegehalt

Bild 1. Zusammenstellung von Einflußgrößen, die Flächenleistung und Energieverbrauch beim Schleppereinsatz bestimmen.

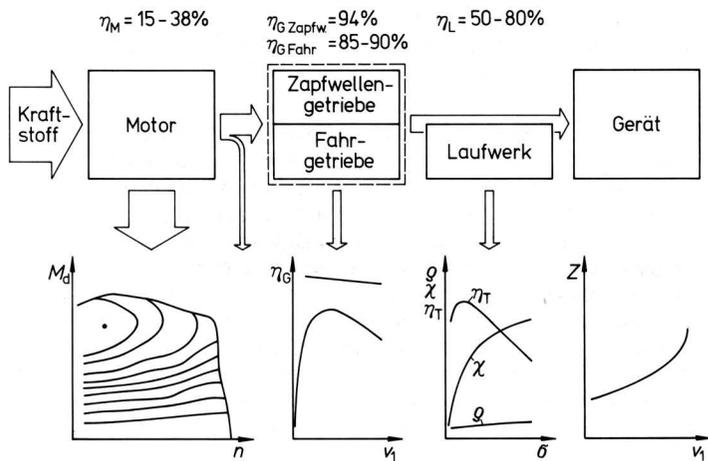


Bild 2. Struktur und Aufbau des Modells Schlepper-Gerät.

Koeffizient	Einheit	sandiger Lehm	lehmgiger Ton
a_1	kN/m^2	3,354	6,727
b_1	$\frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot \frac{\text{h}^2}{\text{km}^2}$	0,0223	0,0464
a_2	-	0,521	0,713
b_2	-	-0,524	-0,684
c_2	-	-8,299	-7,603
a_3	-	0,076	0,0575
b_3	-	0,205	0,025

Tafel 1. Koeffizienten für die Berechnung des Zugkraftbedarfs sowie des Triebkraft- und Rollwiderstandsbeiwertes für 2 Böden.

Es handelt sich hierbei ebenso wie bei dem Ansatz für den Rollwiderstandsbeiwert:

$$\rho = a_3 + b_3 \sigma$$

um einen formalen mathematischen Ansatz. Die Zahlenwerte der Koeffizienten dieser beiden Ansätze sind ebenfalls in Tafel 1 aufgeführt.

Die zur Beschreibung der Getriebe verfügbaren Daten sind insbesondere für einzelne Schlepper noch unzureichend. Wünschenswert wären hier Kennfelder, die die Verluste des gesamten Antriebsstranges von der Motorwelle bis hin zu den Achsnaben in Abhängigkeit von der Drehzahl, der Getriebeauslastung und der Übersetzung wiedergeben, und das nicht nur für das Fahrgetriebe, sondern in gleicher Art auch für das Zapfwellengetriebe. Auch für die Beschreibung des Energiebedarfs der Neben- und Hilfsaggregate stehen nur wenige schlepperspezifische Daten zur Verfügung.

Die übrigen Daten, die zur Beschreibung der in den Beispielen verwendeten Schlepper erforderlich sind, wurden den jeweiligen OECD-Testberichten entnommen [5]. Dies gilt vor allem für die Beschreibung der Motoreigenschaften, bei der von dem jeweiligen Muscheldiagramm ausgegangen wird. Durch die Einbeziehung des Muscheldiagramms ist die Gültigkeit des Modells auch im Teillastbereich gewährleistet. Da im folgenden auch der Zusammenhang zwischen Motorleistung, Drehzahl und Kraftstoffverbrauch benötigt wird, ist mit Hilfe des Rechners das übliche Muscheldiagramm (Drehzahl-Drehmoment-Kennfeld) in ein Drehzahl-Leistung-Kennfeld umgerechnet, Bild 3. Die Linien gleichen spezifischen Verbrauchs sind hier als Linien gleichen Mehrverbrauchs, bezogen auf den Optimalwert $b_e = 220 \text{ g/kWh}$, wiedergegeben. Daneben sind auch Linien gleichen stündlichen Verbrauchs berechnet und im Diagramm eingetragen. So läßt sich in Abhängigkeit von Drehzahl und Leistung der stündliche Treibstoffverbrauch für jeden Betriebspunkt unmittelbar ablesen.

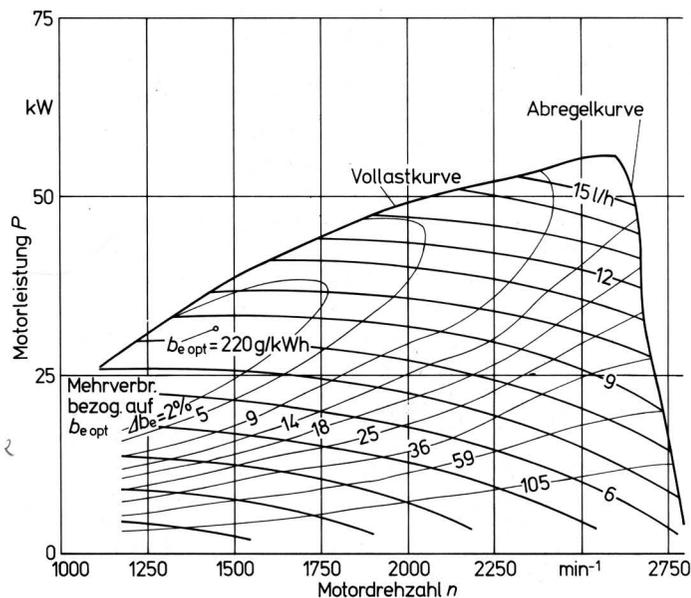


Bild 3. Drehzahl-Leistung-Kennfeld eines Schleppermotors mit Linien gleichen stündlichen Kraftstoffverbrauchs und Linien gleichen spezifischen Kraftstoffverbrauchs, ausgedrückt als Linien gleichen Mehrverbrauchs, bezogen auf den optimalen spezifischen Kraftstoffverbrauch.

3. Untersuchung wichtiger Einflußgrößen in ihrem Einfluß auf die Flächenleistung

Im nachfolgenden werden einzelne Einflußgrößen hinsichtlich ihres quantitativen Einflusses auf die Flächenleistung untersucht. Dabei werden in diesem Abschnitt die fahrer-, struktur- und arbeitsablaufbedingten Einflüsse (s.a. Bild 1) nicht berücksichtigt, d.h. die Ergebnisse beziehen sich zunächst nur auf die Zeit des reinen Pflügens, die Hauptzeit. Im Abschn. 5 wird dann an einigen Beispielen aufgezeigt, wie sich die Flächenleistung unter Berücksichtigung der Gesamtarbeitszeit ändert. Um zu möglichst realitätsnahen Aussagen zu kommen, werden für die Modellrechnung in allen Beispielen Daten konkreter Schlepper, Geräte und Böden verwendet.

3.1 Einfluß der Nennleistung

Mit steigender Nennleistung nimmt erwartungsgemäß die Flächenleistung zu. Dies geht aus Bild 4 deutlich hervor, in dem die Flächenleistung von Schleppern mit unterschiedlicher Nennleistung beim Pflügen über der Arbeitsbreite aufgetragen ist. Bei der Berechnung dieser Kurven wurde eine Schlepper- bzw. leistungsbezogene Masse entsprechend den Kurven in Bild 5 zugrundegelegt; hier wie auch in den nächsten Beispielen ist ein Getriebewirkungsgrad $\eta = 0,80$ und ein Motorauslastungsgrad $\lambda = 1$ unterstellt. Das Ansetzen der Nennleistung ($\lambda = 1$) bedeutet, daß es sich bei den Kurven um die unter den angegebenen Bedingungen erzielbare maximale Flächenleistung handelt. Die Kurven stellen somit Grenzkurven dar, d.h. die in der Praxis erzielbaren Flächenleistungen sind kleiner, bestenfalls gleich den Werten der Grenzkurven, können jedoch nicht größer sein.

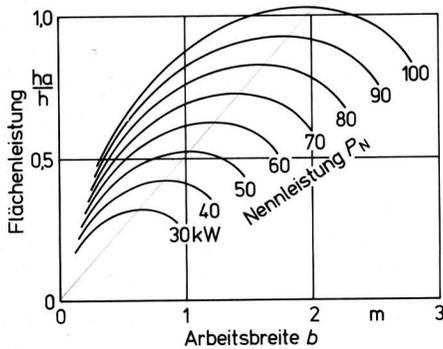


Bild 4. Kurven maximaler Flächenleistung beim Pflügen mit Schleppern unterschiedlicher Nennleistung als Funktion der Arbeitsbreite (lehmiger Ton; $t = 0,25$ m; $\lambda = 1$; $\eta_G = 0,8$).

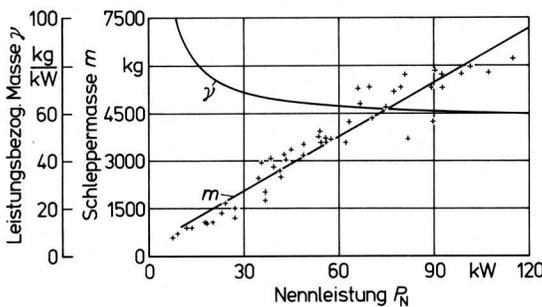


Bild 5. Masse und leistungsbezogene Masse in Abhängigkeit von der Nennleistung; Kurven berechnet aus den Daten von 50 OECD-geprüften Allrad Schleppern.

Das Optimum der in Bild 4 dargestellten Kurven maximaler Flächenleistung verlagert sich mit zunehmender Nennleistung zu größeren Arbeitsbreiten, wobei der Bereich nahezu optimaler Werte breiter wird. Das bedeutet, daß die Abstimmung der Gerätebreite mit zunehmender Nennleistung unkritischer wird. Eine solche Darstellung kann z.B. bei einer Neuanschaffung eine Entscheidungshilfe für die richtige Zuordnung von Schlepper und Gerät sein.

3.2 Einfluß der leistungsbezogenen Masse

Welchen Einfluß die leistungsbezogene Masse bei sonst gleichem Schlepper und Gerät auf die Flächenleistung hat, zeigt Bild 6. Das schraffierte Feld wird begrenzt durch Kurven maximaler Flächenleistung, die sich ergeben, wenn der hier untersuchte Schlepper (OECD-Test 536) ohne Zusatzmasse (59,9 kg/kW) bzw. mit der maximal zulässigen Zusatzmasse (84,6 kg/kW) eingesetzt wird. Das Feld kennzeichnet damit den Bereich der maximalen Flächenleistung, der mit diesem Schlepper bei unterschiedlicher Zusatzmasse abgedeckt wird.

Das Bild belegt quantitativ, in welchem Maß die maximale erzielbare Flächenleistung mit steigender leistungsbezogener Masse zunimmt. Aber nicht nur die maximale Flächenleistung nimmt unter sonst gleichen Bedingungen mit steigender leistungsbezogener Masse zu, sondern es wird auch der Bereich der nahezu optimalen Flächenleistung breiter, d.h. die richtige Abstimmung der Arbeitsbreite wird unkritischer.

Welche Auswirkungen die in den letzten Jahrzehnten zu beobachtende Tendenz zu abnehmender leistungsbezogener Masse auf die maximale Flächenleistung und die Abstimmung von Schlepper und Gerät hat, wird noch deutlicher, wenn man den Schlepper im Gedankenmodell über das durch die Bauart vorgegebene zulässige Maß hinaus schwerer oder leichter macht (Kurven außerhalb des schraffierten Feldes in Bild 6). Die Simulationsergebnisse lassen erkennen, daß der Zugewinn an maximaler Flächenleistung durch die Erhöhung der Schlepper- bzw. so geringer ist, je höher die konstruktiv vorgesehene leistungsbezogene Masse bereits ist. D.h. aber auch umgekehrt, daß eine weitere Reduzierung der leistungsbezogenen Masse unter das derzeit schon recht niedrige Niveau eine vergleichsweise starke Einbuße an maximaler Flächenleistung zur Folge haben würde.

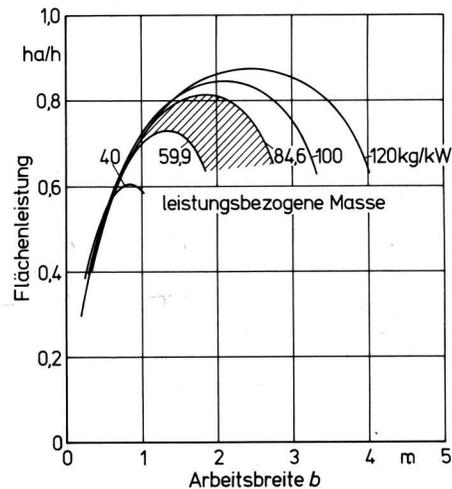


Bild 6. Maximale Flächenleistung in Abhängigkeit von der Arbeitsbreite beim Pflügen mit unterschiedlicher leistungsbezogener Masse des Schleppers (sandiger Lehm; $t = 0,25$ m; $P_N = 41,6$ kW; $\lambda = 1$; $\eta_G = 0,8$).

Aus der Tatsache, daß die Kurven maximaler Flächenleistung für kleine Arbeitsbreiten nahezu deckungsgleich sind, folgt, daß bei einer für diesen Schlepper zu geringen Arbeitsbreite des Pfluges auch durch die Erhöhung der leistungsbezogenen Masse keine oder keine wesentliche Änderung der Flächenleistung erzielt werden kann. Ja, die maximale Flächenleistung kann sogar bei extrem kleiner Arbeitsbreite – für das im Bild 6 unterstellte Fahrzeug sind dies Arbeitsbreiten unterhalb 1 m – durch eine übermäßige Erhöhung der leistungsbezogenen Masse wieder sinken. Ein Grund hierfür ist, daß ein Schlepper bei abnehmender Arbeitsbreite und dementsprechend zunehmender Fahrgeschwindigkeit bei gleichzeitig zunehmender Gesamtmasse einen immer größeren Anteil der Motorleistung für die eigene Fortbewegung benötigt.

Dieser Sachverhalt wird besonders deutlich, wenn man die maximale Flächenleistung als Funktion der leistungsbezogenen Masse für verschiedene Arbeitsbreiten darstellt, Bild 7. In diesem Bild deuten die Geraden bei 59,9 kg/kW und bei 84,6 kg/kW den Bereich der konstruktiv vorgesehenen leistungsbezogenen Masse für den untersuchten Schlepper an. Bei weiterem Wachsen der leistungsbezogenen Masse nimmt die maximale Flächenleistung sowohl für die Arbeitsbreite $b = 0,75$ m als auch für $b = 1$ m ab.

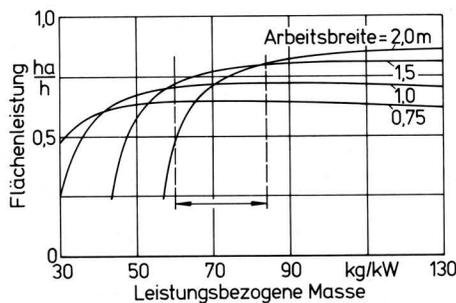


Bild 7. Maximale Flächenleistung in Abhängigkeit von der leistungsbezogenen Masse beim Pflügen mit unterschiedlicher Arbeitsbreite (sandiger Lehm; $t = 0,25$ m; $P_N = 41,6$ kW; $\lambda = 1$; $\eta_G = 0,8$).

3.3 Einfluß der Bodenart

Während die Nennleistung, die leistungsbezogene Masse und die Arbeitsbreite vom Landwirt oder vom Konstrukteur beeinflusst werden können, ist die Bodenart vorgegeben. Ihr Einfluß auf die Flächenleistung ist aber ungleich größer als der Einfluß der leistungsbezogenen Masse, wie Bild 8 zeigt. Die in diesem Bild für zwei Bodenarten dargestellten Rechenergebnisse gelten für den bereits im vorigen Beispiel verwendeten Schlepper, und zwar wieder für dessen jeweils kleinste und größte konstruktiv vorgesehene leistungsbezogene Masse.

Je leichter der Boden, umso größer ist unter sonst gleichen Bedingungen die maximale Flächenleistung und umso breiter ist der Bereich nahezu optimaler Flächenleistung. Daraus folgt, daß die Abstimmung der Arbeitsbreite auf den Schlepper umso kritischer ist, je schwerer der Boden ist. Da je nach Bodenart der Größtwert der maximalen Flächenleistung bei einer ganz bestimmten, aber stets anderen Arbeitsbreite erreicht wird und dieser Wert auch noch von der leistungsbezogenen Masse des Schleppers abhängig ist, muß der Landwirt bei der Bearbeitung unterschiedlicher Böden auf den Flächen seines Betriebes stets einen Kompromiß eingehen, wenn nur eine Schlepper-Geräte-Kombination zur Verfügung steht.

3.4 Einfluß der Fahrgeschwindigkeit und der Arbeitsbreite

Die funktionale Zuordnung von Arbeitsbreite und maximaler Flächenleistung in den Bildern 4, 6 und 8 läßt erkennen, daß je-

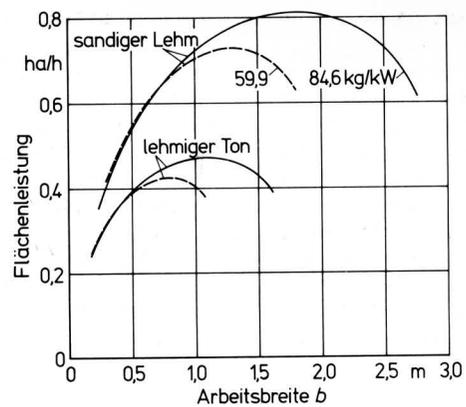


Bild 8. Maximale Flächenleistung in Abhängigkeit von der Arbeitsbreite für zwei unterschiedliche Böden und für die Grenzwerte der leistungsbezogenen Masse des Schleppers ($t = 0,25$ m; $P_N = 41,6$ kW; $\lambda = 1$; $\eta_G = 0,8$).

der Arbeitsbreite ein bestimmter Punkt auf der Kurve der maximalen Flächenleistung zugeordnet ist. Da sich bei Betrachtung der reinen Pflügezeit die Flächenleistung direkt als Produkt von Arbeitsbreite und Fahrgeschwindigkeit ergibt, so ist jedem Punkt der Kurve maximaler Flächenleistung auch eine bestimmte Fahrgeschwindigkeit zugeordnet.

In Bild 9 ist neben der maximalen Flächenleistung die zugehörige Fahrgeschwindigkeit aufgetragen, die entsprechend der Kraft- und Leistungsbilanz des Modells unter den gegebenen Bedingungen eine maximale Fahrgeschwindigkeit bei der jeweiligen Arbeitsbreite ist. Wird diese Fahrgeschwindigkeit nicht erreicht, so ist zwangsläufig die Flächenleistung geringer, als mit der Kurve maximaler Flächenleistung angegeben wird.

Dies trifft selbstverständlich auch für den Höchstwert der Kurve maximaler Flächenleistung zu, der sich unter sonst konstanten Verhältnissen nur für eine einzige Kombination von Fahrgeschwindigkeit und Arbeitsbreite erreichen läßt. Die aufgezeigten Zusammenhänge gelten für jede Schlepper-Geräte-Kombination, wobei nach den Ergebnissen in Abschn. 3.2 für den jeweiligen Höchstwert der maximalen Flächenleistung die Fahrgeschwindigkeit umso kleiner und die Arbeitsbreite umso größer ist, je größer die leistungsbezogene Masse des Schleppers ist. Die Frage "breiter oder schneller?" stellt sich daher nicht, wenn bei vorgegebenen Bodenbedingungen mit einem Schlepper der Höchstwert der Flächenleistung erreicht werden soll.

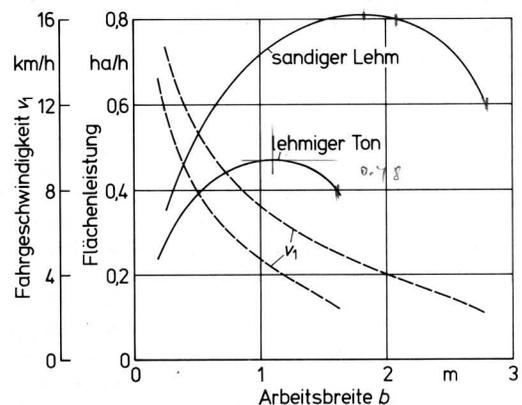


Bild 9. Maximale Flächenleistung und zugehörige Fahrgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Arbeitsbreite beim Pflügen unterschiedlicher Böden ($t = 0,25$ m; $P_N = 41,6$ kW; $\lambda = 1$; $\eta_G = 0,8$; $\gamma = 84,6$ kg/kW).

3.5 Einfluß von Gangabstufung und Motorauslastung

Die bisher diskutierten Kurven maximaler Flächenleistung gelten für die Nennleistung, d.h. den Motorauslastungsgrad $\lambda = 1$. Wie dargelegt, ergeben sich die Kurven für eindeutig bestimmte Kombinationen der Arbeitsbreite des Pfluges und der Fahrgeschwindigkeit des Schleppers. Um jeden beliebigen Punkt der Kurve maximaler Flächenleistung erreichen zu können, wäre eine stufenlose Veränderung beider Größen erforderlich. Da Arbeitsbreite und Fahrgeschwindigkeit in der Praxis nicht stufenlos veränderlich sind, ist ein Erreichen der Kurven maximaler Flächenleistung, und insbesondere ihrer Höchstwerte, nur in Ausnahmefällen möglich.

Im folgenden wird nun aufgezeigt, wie groß die Abweichungen zwischen der Realität und den bisherigen Betrachtungen sind und welche Folgerungen daraus zu ziehen sind. Hierfür ist in **Bild 10** für die unterstellte Schlepper-Geräte-Kombination die erforderliche und die verfügbare Motorleistung in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit für die in diesem Geschwindigkeitsbereich liegenden Gänge dargestellt. Die hier wiedergegebene Kurve für die an der Motorwelle erforderliche Leistung berücksichtigt alle Verluste sowie den an den Reifen auftretenden Schlupf. Aufgrund der vorliegenden Gangüberdeckung läßt sich im dargestellten Geschwindigkeitsbereich ein Motorauslastungsgrad zwischen 89 und 100 % erreichen.

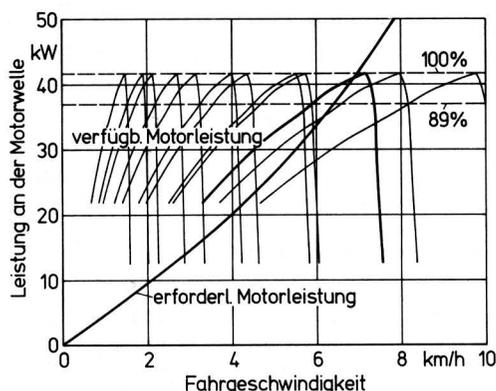


Bild 10. Für das Pflügen erforderliche Motorleistung und in den verschiedenen Gängen verfügbare Motorleistung in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit (sandiger Lehm; $b = 2 \text{ m}$; $t = 0,25 \text{ m}$; $\lambda = 1$; $\eta_G = 0,8$; $\gamma = 84,6 \text{ kg/kW}$).

Überträgt man diesen Sachverhalt auf die bisherige Darstellungsweise, so erhält man zu der bisherigen Kurve maximaler Flächenleistung für $\lambda = 1$ eine zweite für $\lambda = 0,89$, **Bild 11**. Die in der Praxis erreichbare maximale Flächenleistung liegt also zwischen diesen beiden Kurven, vorausgesetzt, daß der Schlepper im richtigen Gang gefahren wird.

Daß diese Voraussetzung in der Praxis keineswegs immer erfüllt ist, zeigen u.a. Untersuchungen von *Rutherford* [6], nach denen in der Praxis beim Pflügen mit Motorauslastungen zwischen 44 und 87 % zu rechnen ist. Neuere Untersuchungen kommen z.T. zu noch niedrigeren Werten [7]. Ein Grund hierfür dürfte in der Tatsache zu sehen sein, daß der Fahrer keine objektive Information über den tatsächlichen Betriebszustand des Schleppers hat. Er kann nicht, wie es beispielsweise anhand des Bildes 10 eindeutig möglich ist, beurteilen, ob er den jeweils richtigen Gang gewählt hat. Er ist auf Erfahrungen und Hilfinformationen wie beispielsweise das Motorgeräusch und ähnliches angewiesen. Eine Anzeige, die den Fahrer darüber informiert, ob er im richtigen Gang fährt, bzw. welchen Gang er einzulegen hätte, wäre demnach eine wesentliche Voraussetzung, um das vorhandene Leistungspotential voll auszunutzen. Eine solche Anzeige würde gewährleisten, daß sich stets Flächenleistungen erzielen lassen, die zwischen den Kurven des Bildes 11 liegen. Die Erprobung eines solchen Informationssystems wird z.Z. vorbereitet.

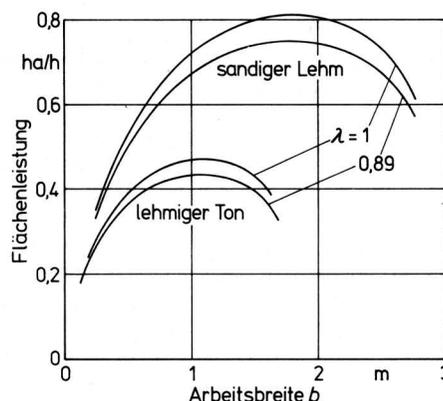


Bild 11. Flächenleistung in Abhängigkeit von der Arbeitsbreite beim Pflügen verschiedener Böden und bei unterschiedlichem Motorauslastungsgrad ($t = 0,25 \text{ m}$; $P_N = 41,6 \text{ kW}$; $\eta_G = 0,8$; $\gamma = 84,6 \text{ kg/kW}$).

Unterstellt man einmal für die weiteren Überlegungen, daß der Fahrer bereits über ein solches Informationssystem verfügt und somit in der Lage ist, stets im richtigen Gang zu fahren, d.h. mindestens 89 % der Leistung des Schleppers zu nutzen, so stellt sich die Frage, ob es weitere Maßnahmen gibt, die eine noch höhere Auslastung des Motors zu erreichen gestatten, und ob sich dadurch höhere Flächenleistungen ergeben.

Geht man dieser Frage nach, so zeigt sich sehr bald, daß eine Motorauslastung von 100 % zwar eine notwendige, aber nicht eine hinreichende Bedingung für das Erreichen der Kurve maximaler Flächenleistung oder des Höchstwertes dieser Kurve ist. So erlaubt beispielsweise ein stufenloses Getriebe, die Geschwindigkeit stets so zu wählen, daß $\lambda = 1$ ist. Doch bedingt durch den derzeit noch schlechteren Getriebewirkungsgrad eines stufenlosen Getriebes, würde hier für $\lambda = 1$ die Kurve maximaler Flächenleistung von vornherein tiefer liegen als bei sonst gleichem Schlepper mit gestuftem Getriebe. Trotz voller Motorauslastung müssen sich deshalb nicht zwingend höhere Flächenleistungen ergeben. Feldmessungen von *Meyer* [8] und *Nation* [9] bestätigen dies.

Eine 100 %ige Auslastung des Motors ließe sich auch durch eine Regelung der Arbeitstiefe des Pfluges erzielen. Im Beispiel nach **Bild 10** läßt sich durch Vergrößern der Arbeitstiefe die Kurve der erforderlichen Motorleistung so verschieben, daß sie durch den Punkt der Nennleistung des nächstkleineren Ganges verläuft. Damit ist der Motorauslastungsgrad 100 %, doch die Flächenleistung würde aufgrund der geringeren Fahrgeschwindigkeit sinken. Die andere Alternative, die Arbeitstiefe zu verringern, bis die Kurve der erforderlichen Motorleistung durch den Punkt der Nennleistung des stark ausgezogenen Ganges verläuft, führt über das Ansteigen der Fahrgeschwindigkeit zu einer Erhöhung der Flächenleistung, läßt sich aber ohne Berücksichtigung des Arbeitseffektes nicht bewerten. Ein Verringern der Arbeitstiefe kann grundsätzlich solange fortgesetzt werden, bis die Arbeitstiefe 0 wird und sich in der Praxis wie im Modell die größte "Flächenleistung" ergibt.

Schließlich besteht auch die Möglichkeit, die Arbeitsbreite so zu regeln, daß eine 100 %ige Motorauslastung erreicht wird [10]. Durch diese Maßnahmen lassen sich einzelne Punkte auf der Kurve maximaler Flächenleistung ($\lambda = 1$) und dadurch u.U. auch höhere Flächenleistungen erzielen. Ganz abgesehen davon, daß eine Änderung der Arbeitsbreite durch Schnittbreitenverstellung ebenso wie eine Änderung der Arbeitstiefe nicht ohne Auswirkungen auf den Bearbeitungseffekt bleibt, stellt sich die Frage, in welchem Verhältnis der erzielbare Nutzen zum erforderlichen technischen und arbeitswirtschaftlichen Aufwand steht. Da eine Veränderung der Arbeitsbreite während des Pflügens eine unregelmäßige Form der gepflügten Fläche zur Folge hat, führt dies zu einem Mehraufwand für die Bearbeitung der verbleibenden Restflächen. Natürlich aber können unkomplizierte Möglichkeiten der schnellen Anpassung der Arbeitsbreite von Pflügen an die jeweiligen Bodenverhältnisse verschiedener Schläge erhebliche Vorteile bringen.

4. Gegenüberstellung einer Optimierung bezüglich Flächenleistung und Energieverbrauch

Bisher wurde gezeigt, daß die maximale Flächenleistung einer gegebenen Schlepper-Geräte-Kombination bei gegebenen Bodenverhältnissen nur bei maximaler Motorleistung unter Einhaltung einer bestimmten Arbeitsbreite und Fahrgeschwindigkeit zu erreichen ist. Bei Nennleistung tritt aber der höchste Kraftstoffverbrauch pro Zeiteinheit auf, wie beispielsweise in Bild 3 zu erkennen ist. Hier beträgt der Mehrverbrauch bei maximaler Motorleistung, bezogen auf den Punkt optimalen spezifischen Verbrauchs, etwa 11–12 %. Zumindest dieser motorbedingte Mehrverbrauch könnte eingespart werden, wenn im Bereich des optimalen spezifischen Kraftstoffverbrauchs gearbeitet würde.

Wie sich dies auf den Kraftstoffverbrauch je Hektar und die Flächenleistung auswirkt, ist in Bild 12 dargestellt. Die Kurvenzüge der linken Bildhälfte gelten für das Arbeiten bei maximaler Motorleistung, die der rechten Bildhälfte für das Arbeiten im Punkt des optimalen spezifischen Kraftstoffverbrauchs. Durch Ausnutzen des verbrauchsgünstigsten Punktes des Motorkennfeldes ergibt sich im vorliegenden Beispiel (Schlepper nach OECD-Test 536) eine Kraftstoffeinsparung von 19 %, aber auch eine um 40 % geringere Flächenleistung. Eine gleichzeitige Optimierung nach Flächenleistung und Kraftstoffverbrauch ist also nicht möglich bei einem Motorkennfeld, bei dem der Punkt des optimalen spezifischen Verbrauchs nicht mit dem der maximalen Motorleistung zusammenfällt.

Der Unterschied im Kraftstoffverbrauch je Flächeneinheit wird um so geringer, je näher der Punkt des optimalen spezifischen Kraftstoffverbrauchs und der Punkt der maximalen Motorleistung beieinanderliegen. Bei Schleppern, die überwiegend für schwere Bodenbearbeitung eingesetzt werden, sollte daher der Punkt des optimalen spezifischen Verbrauchs möglichst nahe dem Punkt der maximalen Motorleistung liegen. Anders ist es jedoch, wenn der Schlepper überwiegend bei geringer Motorlast und Drehzahl eingesetzt wird. Dann ist es günstiger, wenn der Punkt des optimalen spezifischen Verbrauchs bei niedrigerer Drehzahl und Motorleistung liegt, etwa so, wie dies im Bild 3 der Fall ist.

5. Einfluß der Betriebsstruktur, des Arbeitsablaufes und des Fahrers auf die Flächenleistung

Bei den bisherigen Betrachtungen wurde die Flächenleistung auf die Zeit des reinen Pflügens, die Hauptzeit, Bild 13, bezogen. Im folgenden soll an 2 Beispielen dargestellt werden, wie groß der Einfluß der Betriebsstruktur, des Arbeitsablaufes und des Fahrers auf die Flächenleistung sein kann. Dazu ist es notwendig, die Flächenleistung auf die Gesamtarbeitszeit zu beziehen, also auch die Teilzeiten zu berücksichtigen, die den Bereichen Arbeitsablauf, Betriebsstruktur und Fahrer in Bild 1 zuzurechnen sind.

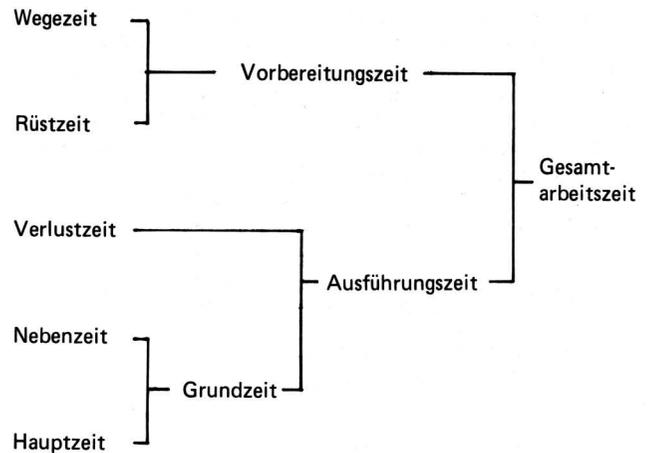


Bild 13. Gliederung der Gesamtarbeitszeit in Teilzeiten [1].

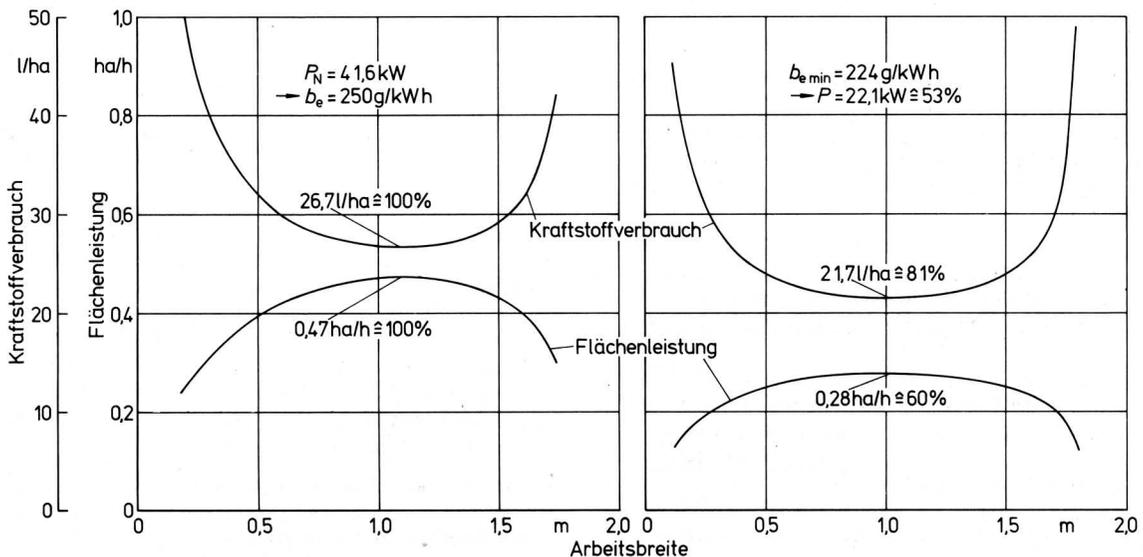


Bild 12. Flächenleistung und flächenbezogener Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit von der Arbeitsbreite, links bei Optimierung bezüglich der Flächenleistung (Vorgabe: $P_N = 41,6 \text{ kW}$), rechts bei Optimierung bezüglich des Kraftstoffverbrauchs (Vorgabe: $b_{e \text{ min}} = 224 \text{ g/kWh}$) (lehmiger Ton; $t = 0,25 \text{ m}$; $\eta_G = 0,8$).

Der Anteil dieser Teilzeiten und damit auch der Anteil der Hauptzeit an der Gesamtarbeitszeit ist u.a. abhängig von der Schlaggröße, **Bild 14**. Die Daten und Annahmen zur Berechnung dieses Beispiels sind in **Tafel 2** zusammengestellt. Die Arbeitsbreite von 1,05 m und die bei maximaler Motorleistung auf lehmigem Ton zugehörige Fahrgeschwindigkeit von 4,4 km/h sind in **Bild 9** entnommen. Das Ergebnis der Simulationsrechnung läßt erkennen, daß der Anteil der Hauptzeit an der Gesamtzeit bei kleinen Schlaggrößen stark abnimmt. Einen erheblichen Anteil an der Gesamtarbeitszeit hat die Wendezeit, die neben der Hauptzeit größte Teilzeit. Sie hängt u.a. von der Art der Wendefigur ab, die ihrerseits auch von der Art des Gerätes und der Geschicklichkeit des Fahrers abhängig ist. Wie Messungen in der Praxis ergaben [11], kann allein die Geschicklichkeit eines Fahrers einen Einfluß von $\pm 20\%$ auf die Wendezeit haben.

Wie sich dies auf die Flächenleistung auswirkt, ist in **Bild 15** dargestellt. Die dort wiedergegebenen Simulationsergebnisse zeigen, daß unter sonst gleichen Bedingungen ein geschickter Fahrer (mit 0,4 min eine 20 % kürzere Wendezeit als der KTBL-Richtwert von 0,5 min [12]) mit einem 80 kW-Schlepper bis zu einer Schlaggröße von etwa 1,4 ha eine höhere Flächenleistung erzielt als der schlechtere Fahrer (mit 0,6 min eine 20 % längere Wendezeit als der KTBL-Richtwert) mit einem 90 kW-Schlepper. Zum Vergleich sind im Bild auch die Flächenleistungen dargestellt, die bei durchschnittlichen Wendezeiten (KTBL-Richtzeit 0,5 min) mit dem 90 kW-Schlepper (obere Kurve) und dem 80 kW-Schlepper (untere Kurve) erreicht werden. In diesem Bild wird außerdem deutlich, daß die auf die Gesamtarbeitszeit bezogene Flächenleistung, unabhängig von Schlepper und Fahrer, mit abnehmender Schlaggröße sehr stark abfällt.

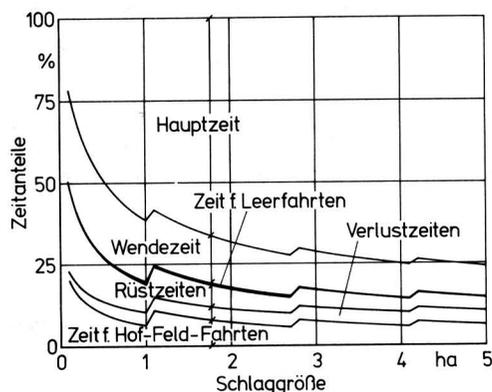


Bild 14. Anteile der Teilzeiten an der Gesamtarbeitszeit beim Pflügen in Abhängigkeit von der Schlaggröße (lehmiger Ton; $b = 1,05$ m; $t = 0,25$ m; $P_N = 41,6$ kW; $\lambda = 1$; $\eta_G = 0,8$; $\gamma = 84,6$ kg/kW).

Bodenart	lehmiger Ton	Zahl d. Leerfahrten	2
Schlepperdaten	OECD-Test 536	Vorgewendebreite	5,0 m
Motorauslastungsgrad	100 %	Wendezeit	0,5 min
Leistungsbez. Masse	84,6 kg/kW	fixe Verlustzeit	1,5 min/ha
Fahrgeschwindigkeit	4,4 km/h	unvermeidb. Verl.z.	4,0 %
Arbeitstiefe	0,25 m	Rüstzeit im Hof	15,0 min
Arbeitsbreite	1,05 m	Rüstz. a. Arb.ort	5,0 min
Schlagl./Schlagbr.	2 : 1	Geschw. b. Leerf.	16,0 km/h
Hof/Feld-Entfernung	2000 m	Länge d. Halbtags	240 min

Tafel 2. Annahmen zur Berechnung von Teilzeitanteilen (Ergebnis in **Bild 14**).

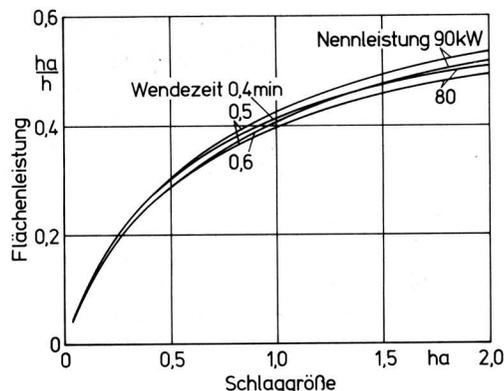


Bild 15. Flächenleistung, bezogen auf die Gesamtarbeitszeit, in Abhängigkeit von der Schlaggröße für verschiedene Wendezeiten und verschiedene Nennleistung des Schleppers (lehmiger Ton; $b = 1,75$ m; $t = 0,25$ m; $\lambda = 1$; $\eta_G = 0,8$; γ entspr. **Bild 5**).

Bereits diese wenigen Beispiele lassen erkennen, daß die Betriebsstruktur, der Arbeitsablauf und das Verhalten des Fahrers bei sonst gleicher technischer Ausstattung des Betriebes sehr unterschiedliche Flächenleistungen zur Folge haben können. Diese Einflüsse sind daher bei gesamtbetrieblichen Untersuchungen nicht zu vernachlässigen. Im Gegensatz dazu sollten sie aber bei der Beurteilung von Schlepper-Geräte-Kombinationen unter technischen Gesichtspunkten nicht in das Modell mit einbezogen werden, um Fehlinterpretationen zu vermeiden.

6. Schlußbetrachtung

Im vorliegenden Beitrag wird am Beispiel des Pflügens gezeigt, wie mit Hilfe der Simulation der Einfluß einzelner Größen auf die Flächenleistung quantitativ bestimmt werden kann. Bewertungskriterium ist die während des reinen Pflügens (der Hauptzeit) erzielbare Flächenleistung. Diese ist u.a. sehr stark von der Nennleistung und der leistungsbezogenen Masse des Schleppers sowie der Bodenart abhängig.

Sind Schlepper und Geräteart vorgegeben, lassen sich maximale Flächenleistungen nur bei einer ganz bestimmten Arbeitsbreite und Fahrgeschwindigkeit sowie bei voller Motorauslastung erreichen. Richtige Zuordnung von Schlepper und Gerät, eine entsprechende Gangabstufung und Gangwahl sind also wesentliche Voraussetzungen für eine hohe Flächenleistung.

Da bei voller Motorauslastung eine bestimmte konstante Kraftstoffmenge pro Zeiteinheit verbraucht wird, ist der Kraftstoffaufwand einer Schlepper-Geräte-Kombination, bezogen auf die Flächeneinheit, bei Vollast umso niedriger, je höher die erzielte Flächenleistung ist (der flächenbezogene Kraftstoffaufwand ist umgekehrt proportional der Flächenleistung). Eine Reduzierung des flächenbezogenen Kraftstoffaufwands ist möglich, wenn bei Teillast im Bereich des optimalen spezifischen Kraftstoffverbrauchs gearbeitet wird. Jedoch sinkt dabei die Flächenleistung prozentual stärker als der Kraftstoffverbrauch.

Bei Berücksichtigung von Einflußgrößen der Betriebsstruktur, des Arbeitsablaufes und des Fahrers ergeben sich trotz gleicher technischer Ausstattung sehr unterschiedliche Anteile von Hauptzeit zu Gesamtarbeitszeit und damit sehr unterschiedliche Flächenleistungen. Diese Einflußgrößen können daher bei gesamtbetrieblichen Untersuchungen von ausschlaggebender Bedeutung sein. Bei der Beurteilung von Schlepper- und Gerätekombinationen unter technischen Gesichtspunkten sollten sie aber nicht in das Modell mit einbezogen werden, um Fehlinterpretationen zu vermeiden.

Schrifttum

- [1] *Rosegger, S. u. F.-P. Sörgel:* Ermittlung von technischen und arbeitswirtschaftlichen Planungsdaten für die pflanzliche Produktion. Landbauforschung Völkensrode, Sonderheft 32, (1976).
- [2] *Zach, M., H. Steinkampf u. C. Sommer:* Arbeitseffekte und Leistungsbedarf eines Kreiselpfluges. Landbauforschung Völkensrode Bd. 23 (1973) Nr. 1, S. 29/40.
- [3] *Steinkampf, H. u. M. Zach:* Leistungsbedarf und Krümelungseffekt von gezogenen und zapfwellengetriebenen Geräten zur Saatbettbereitung. Landbauforschung Völkensrode Bd. 24 (1974) Nr. 1, S. 55/62.
- [4] *Steinkampf, H.:* Ermittlung von Reifenkennlinien und Gerätezugleistungen für Ackerschlepper. Landbauforschung Völkensrode, Sonderheft 27, (1975).
- [5] *Berichte über Technische Untersuchungen nach dem OECD Standard Code for the Official Testing of Agricultural Tractor Performance.*
- [6] *Rutherford, I.:* Wheeled and tracklaying tractors – utilization, performance and tyre and track costs. In Proceedings of International Conference "Perspectives of Agricultural Tractor Development", Sept. 17.–22., 1973, Warszawa, S. 115/56.
- [7] *Ohrman, J., Larsen, W.E. u. Lee R. Ericksen:* Four-wheel drive tractors. A field evaluation. Agric. Engng. Bd. 61 (1980) Nr. 2, S. 17/18.
- [8] *Meyer, H.:* Die Bedeutung eines stufenlosen Getriebes für den Ackerschlepper und seine Geräte. Grundl. Landtechnik Heft 11 (1959) S. 5/12.
- [9] *Nation, H.-J.:* Some pilot field comparisons between tractors fitted with hydrostatic or mechanical transmission. J. agric. Engng. Res. Bd. 8 (1963) Nr. 4, S. 355/75.
- [10] *Stoppel, A. u. W. Schäfer:* Maximierung der Schlagkraft beim Pflügen durch stufenlose Arbeitsbreitenverstellung. Grundl. Landtechnik Bd. 31 (1981) Nr. 6, S. 205/10.
- [11] *Rosegger, S. u. F.-P. Sörgel:* Ermittlung von technischen und arbeitswirtschaftlichen Planungsdaten für die pflanzliche Produktion. Institutsinterner Bericht 1975, Teil 2a und 2b. Institut für Betriebstechnik der FAL.
- [12] *Jäger, P.:* Vergleich von Arbeitszeitbedarf und Maschinenkosten in Betrieben mit geänderten Agrarstrukturdaten. Programmbeschreibung und Benutzerdaten. KTBL 1979.

Ausgewählte Dissertationen

Landtechnische Dissertationen 1979 und 1980

Technische Universität Berlin

Hosseini pour, Massud:

Einfluß der meteorologischen Daten auf die Drift bei der Applikation von Pflanzenschutzmitteln (*Göhlich/Moser*).

Richter, Klaus:

Über das Lenkverhalten von Ackerschleppern bei Straßenfahrt (*Göhlich/Appel*).

Universität Bonn

Balg, Johannes:

Wärmepumpen zur Stallklimatisierung und Hausbeheizung (*Heege/Schätzke*).

Flake, Eckard:

Untersuchungen zur Sicherung des Feldaufganges von Zuckerrübensaatgut (*Brinkmann/Boeker*).

Mülle, Gerhard:

Untersuchungen zur Einzelkornsaat von Getreide (*Heege/Heyland*).

Pingen, Franz-Josef:

Zuteileigenschaften von Granulatstreuern für Pflanzenbehandlungsmittel bei geringen Applikationsraten (*Brinkmann/Heyland*).

Ritterbach, Udo:

Die energetische Verbesserung des Garens durch das Bauprinzip einer geschlossenen Kochstelle (*Schätzke/Greuel*).

Universität Gießen

Jungbluth, T.:

Die Wärmeversorgung des Ferkelliegebereichs in einstreulosen Abferkelbuchten nach thermophysiologischen und physikalischen Grundlagen des Wärmeaustausches (*Eichhorn/Seufert*).

Stuhrmann, Heinz:

Analytische Betrachtungen und modelltheoretische Untersuchungen zur Bestimmung der optimalen Kanalabmessungen beim Flüssigmistverfahren (*Eichhorn/Lacher*).

Van den Weghe, H.:

Planungs- und Organisationsmodelle mit den baulichen und technischen Aufwendungen für die einstreulose Ferkelproduktion in Bestandsgrößen zwischen 50 und 250 Sauen (*Eichhorn/Senft*).

Universität Göttingen

Asiedu, John James:

Physical and chemical properties and processing of plantain (*musa paradisiaca*) (*Wieneke*).

Rathing, Klaus:

Energieausnutzung der Außenluft bei landwirtschaftlichen Satzrocknungsanlagen (*Wieneke*).

Universität Hohenheim

Adam, Miloslav:

Untersuchungen über wärmetechnisches Verhalten der raumschließenden Bauteile intensiv belüfteter Ställe (*Bischoff/Kutzbach/Mechel*).

Akpaetok, Owonam:

Zur Sorptionskinetik des Bodenwassers beim keimenden Saatgut (*Stoppel/Steiner*).

Freye, Theo:

Untersuchungen zur Trennung von Korn-Spreu-Gemischen durch die Reinigungsanlage des Mähdreschers (*Kutzbach/Moser*).

Ganzelmeier, Heinz:

Untersuchungen zur Mischwirkung von hydraulischen Rührsystemen für Pflanzenschutzgeräte (*Moser/Göhlich*).

Gerstlauer, Hans:

Systematische Untersuchungen zur Freßstelleneinschränkung bei Milchkühen im Liegeboxenlaufstall (*Bischoff/Hinrichsen*).

Köller, Karlheinz:

Bodenbearbeitung ohne Pflug (Ergebnisse mehrjähriger Vergleichsuntersuchungen verschiedener Geräte und Verfahren auf vier Standorten) (*Stoppel/Kahnt*).