

# Die Bedeutung eines stufenlosen Getriebes für den Ackerschlepper und seine Geräte

Von Helmut Meyer

Stufenlose Getriebe werden für Ackerschlepper und Landmaschinen zunehmend diskutiert und vereinzelt auch schon verwendet. Darum erscheint es nötig, ihre Bedeutung zu klären, zumal sehr verschiedenartige Lösungen schon vorhanden oder in Entwicklung sind.

Versucht man, sich ein Bild über ihre Bedeutung für Ackerschlepper zu machen, so kann man von der Dampfmaschine als der für den vorliegenden Zweck idealen Kraftmaschine ausgehen.

Schlepper mit Dampfmaschinen gab es schon vor 90 Jahren. Ihr Drehmoment verläuft im weiten Bereich etwa umgekehrt proportional zur Drehzahl; neben der durch kurzzeitiges Vergrößern der „Füllung“ möglichen „Überlastung“ steht der Vorteil eines stufenlosen Anpassens der Fahrgeschwindigkeit an den Zugkraftbedarf. Die Verwendung der kleinen, schnellaufenden Otto- und Dieselmotoren im Laufe der weiteren Entwicklung erforderte ein Angleichen an das günstige Drehmomentverhalten der Dampfmaschine. Dies führte zu drei, vier und mehr Getriebegängen für den Fahrtrieb (Bild 1). Im Jahre 1940 waren 70% der Schlepper mit Drei- und Vierganggetrieben ausgerüstet. Bis zum Jahre 1950 hat sich das Bild nur wenig zugunsten von vier und mehr Gängen verschoben. In den letzten Jahren sind aber Dreiganggetriebe völlig verschwunden und Vierganggetriebe sehr selten geworden; Fünf- und Sechsganggetriebe beherrschen das Feld, wobei auch schon recht oft zehn und mehr Gänge angeordnet werden. Der durchschnittliche Stufensprung der heutigen Wechselgetriebe, also das Verhältnis zweier benachbarter Übersetzungen bzw. Fahrgeschwindigkeiten  $v_n/v_{n-1}$ , hat in dem Bereich von etwa 2 bis 8 km/h die Größenordnung von 1,55 bis 1,6. Die Größe des Stufensprungs ist für die späteren Betrachtungen von besonderer Bedeutung.

Im Vergleich zu diesen gestuften Getrieben hat ein stufenloses Getriebe zwei bedeutsame Eigenschaften:

1) die Möglichkeit der Wahl einer beliebigen Fahrgeschwindigkeit bei gegebener Motordrehzahl bzw. voller Motorleistung,

2) die Möglichkeit des kraftschlüssigen Geschwindigkeitswechsels. Dieser ist bei gestuften Getrieben nur mit einem relativ hohen Bauaufwand zu erreichen [1], bei stufenlosen ergibt er sich zwangsläufig.

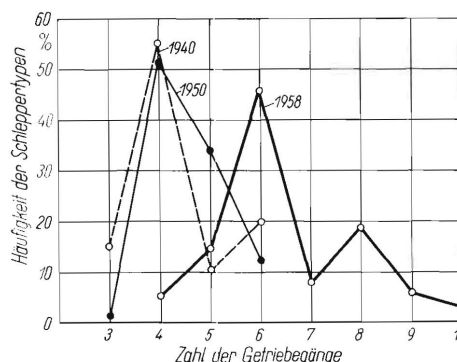


Bild 1. Die Entwicklung der Wechselgetriebe der Ackerschlepper seit 1940.

## Einflussfaktoren auf die Arbeitsgeschwindigkeit

Eine Untersuchung der Bedeutung des stufenlosen Getriebes für die Landwirtschaft führt zunächst zu einer Analyse der Bestimmungsgründe für die Wahl der Fahrgeschwindigkeit bei Ackerschleppern (Tafel 1).

Dabei kann zunächst der technische Zusammenhang von Zugkraft, Zugwiderstand und Motorleistung als bekannt vorausgesetzt werden. Der Einfluß der Fahrgeschwindigkeit auf die Zugfähigkeit ist verhältnismäßig gering, auf den Zugwiderstand kann er dagegen wesentlich sein. Er hängt hauptsächlich von den angegebenen Faktoren ab; Geräte, wie z.B. der Pflug, deren Zugwiderstand mit der Geschwindigkeit sehr anwachsen kann<sup>1)</sup>, sollten künftig unempfindlicher gestaltet werden. Aus den Widerständen und der Fahrgeschwindigkeit sowie dem Leistungsbedarf an der Zapfwelle, der ebenfalls von der Geschwindigkeit abhängen kann, ergibt sich die erforderliche Motorleistung.

<sup>1)</sup> W. Söhne: „Einfluß der Geschwindigkeit auf die Vorgänge auf Pflugkörpern und ihre dadurch bedingte Form“. Vortrag auf der 17. Tagung der Landmaschinen-Konstrukteure, Völkenrode 5. 3. 1959 (s. a. den Bericht in diesem Heft).

**Tafel 1.** Die wichtigsten Bestimmungsgründe für die Wahl der Schlepperfahrgeschwindigkeit

Zugfähigkeit des Schleppers	Radlast, Reifen, Boden bzw. Schlupf
Zugwiderstand des Gerätes	Art und Gewicht des Gerätes, spez. Zugwiderstand, Arbeitsbreite und -tiefe, Reifen, Boden, Gelände u. ä.
Motorleistung	Zug-, Fahr-, Steigungswiderstand und Zapfwellenleistung
Lenkfähigkeit des Schleppers	Lenkvorrichtung, Radlast, Reifen, Boden, Hang, Schräglauf, Spurmärken, Blickfeld, Reaktionsfähigkeit des Fahrers
Beanspruchung durch Schwingungen des Schleppers der Geräte und des Menschen	Unebenheit der Fahrbahn, Federung und Dämpfung
Arbeitsgüte des Gerätes	Werkzeug – Boden, z. B. Pflug, Egge Werkzeug – Boden – Pflanze, z. B. Hack- und Häufelgerät Maschine – auszubringendes Gut, (ausser Saat- und Pflanzgut) z. B. Düngerstreuer Maschine – Saat- bzw. Pflanzgut – Boden, z. B. Kartoffellegemaschine mit selbsttätiger Einlage Maschine – Erntegut – Boden, z. B. Rodegeräte, Mähdrescher Mensch – Maschine – Pflanzgut – Boden, z. B. Kartoffellegemaschine mit Handeinlage
Dringlichkeit der Arbeit	Witterung, verfügbare Zeit, zu bearbeitende Fläche
Wechsel der Fahrgeschwindigkeit	Erkennbarkeit des möglichen Wechsels, Annehmlichkeit, Grösse des Übersetzungssprunges
Bestimmungen für den Strassenverkehr	Über 20 km/h erhöhte Anforderungen an Führerschein, Bremsen, Reifen u. ä., Kraftfahrzeug-Gesetz, Strassenverkehrs-Zulassungsordnung, Normen u. ä.

Hinsichtlich der Lenkfähigkeit sind neben den genannten, rein technischen Einflüssen auf die Wahl der Geschwindigkeit auch physiologische und psychologische wirksam, z.B. das Blickfeld und die Reaktionsfähigkeit des Fahrers; ferner können Schwingungen und Fahrstöße die Geschwindigkeit begrenzen.

Die Arbeitsgüte der Geräte muß in erster Linie berücksichtigt werden, sie wird wohl bei allen Arbeiten entscheidend durch die Fahrgeschwindigkeit beeinflusst, wobei der günstige Bereich teilweise nach oben, teilweise nach unten begrenzt sein kann [2]. Die Einflußfaktoren können, wie die Aufstellung zeigt, sehr komplexer Natur sein; hier wurde eine Gliederung gewählt, die auf Zahl und Art der Faktoren beruht. Die Dringlichkeit einer Arbeit kann mitunter dazu zwingen, sich über die Wünsche an die Arbeitsgüte hinwegzusetzen.

Der Geschwindigkeitswechsel wird durch Art und Aufbau des Getriebes, bei gestuften Getrieben durch den Stufensprung usw., entscheidend beeinflusst. So wird z.B. ein Fahrer das Schalten

eines schwer schaltbaren Vielganggruppengetriebes mit mehreren Schalthebeln nach Möglichkeit zu vermeiden suchen und daher oft langsamer fahren, als es das Getriebe und die Motorleistung an sich gestatten, während er sich bei einem stufenlosen Getriebe anders verhalten wird.

Die Bestimmungen des Kraftfahrzeuggesetzes und der Straßenverkehrs-Zulassungsordnung (StVZO) setzen der Fahrgeschwindigkeit der Ackerschlepper und ihrer Anhänger eine gewisse Grenze bei 20 km/h, deren Überschreitung um kleine Beträge sich nicht lohnt.

### Kennzeichnung der Schlepperarbeiten nach Ausnutzung der Motorleistung und Arbeitsgüte

Betrachtet man das Zusammenwirken des Schleppers und seiner Arbeitsgeräte im Hinblick auf ein stufenloses Getriebe, dann kann man die Arbeiten zu Gruppen zusammenfassen, die gleiche Merkmale hinsichtlich Ausnutzung der Motorleistung, Arbeitsgüte usw. aufweisen:

- Arbeiten, bei denen die Fahrgeschwindigkeit so variiert werden kann, daß die Motorleistung zum Erzielen hoher Flächenleistung voll ausgenutzt wird. Hier handelt es sich insbesondere um die schwere Bodenbearbeitung mit gezogenen Geräten und um Arbeiten mit solchen zapfwellengetriebenen Maschinen und Geräten (wie Mähdrescher, Feldhäcksler und Ackerfräse), bei denen im allgemeinen der Leistungsbedarf bei voller Zapfwellendrehzahl die Fahrgeschwindigkeit begrenzt.
- Arbeiten mit solchen Zapfwellenmaschinen, wie z. B. Sammelrodern, bei denen die Arbeitsgüte die Fahrgeschwindigkeit begrenzt und die Zapfwellendrehzahl zumeist bei ihrem vollen Wert gehalten werden muß (bei Kartoffelsammelrodern muß sie u. U. je nach Bodenart variiert werden).
- Arbeiten mit gezogenen Geräten, bei denen verschiedene Merkmale, zumeist die Arbeitsgüte, die Fahrgeschwindigkeit derart begrenzen, daß die Motorleistung nur zum Teil in Anspruch genommen wird. Arbeitet man z. B. mit relativ schmalen Geräten bei geringem Arbeitswiderstand je m Arbeitsbreite, so kann die Motordrehzahl bei entsprechender Änderung der Übersetzung des stufenlosen Getriebes zugunsten einer höheren Ausnutzung des Motordrehmomentes verringert werden. Der Motor kann dann besser als bei gestuften Getrieben in einem Bereich günstigen Verbrauchs und geringen Verschleißes betrieben werden [3].

Auf diese Gliederung wird später zurückgegriffen werden, zunächst kann in Anlehnung an die ihr zugrundeliegenden Kriterien untersucht werden, bei

welchen Arbeiten ein stufenloses Getriebe Vorteile bringen kann. Wie später nachgewiesen wird, führt ein solches Getriebe bei den beiden ersten Gruppen a) und b) zu einer Erhöhung der Flächenleistung, und damit zu einer gewissen Senkung des Kraftstoffverbrauchs je Flächeneinheit, bei der letzten Gruppe c) dagegen zu einer mehr oder weniger bedeutungsvollen Verringerung des Kraftstoffverbrauches je Stunde und je ha und des Motorverschleißes.

### Einfluss des stufenlosen Getriebes auf die Ausnutzung der Motorleistung

Aus **Tafel 2** ist ersichtlich, daß durch ein stufenloses Getriebe bei sehr vielen Arbeiten Vorteile möglich sind. Die Gewinnmöglichkeiten können jedoch bei derselben Arbeit von Fall zu Fall je nach Motorleistung, Stufung des zum Vergleich herangezogenen gestuften Getriebes und Zugkraftbedarf verschieden sein. So kann z.B. das Hacken von Kartoffeln bei vier Reihen einmal annähernd die volle Motorleistung in Anspruch nehmen, ohne daß die durch die Arbeitsgüte gesteckte Geschwindigkeitsgrenze erreicht wird, während ein andermal diese maßgeblich ist.

**Tafel 2.** Bedeutung eines stufenlosen Schleppergetriebes für die Flächenleistung bei verschiedenen Arbeiten mit Schleppergeräten

Gewinn an Flächenleistung		
Bodenbearbeitung	schwere	+ *)
	leichte	+
	mit angetriebenen Werkzeugen	+
Düngung		(+)
Saat	Drillen	-
	Legen von Kartoffeln	(+)
Pflege	Wiesen u. Weiden	-
	Getreide	-
	Kartoffeln	+
	Zucker- und Futterrüben	(+)
	Schädlingsbekämpfung	(+)
Ernte	Futterbau	+
	Getreide	+
	Kartoffeln	+
	Zuckerrüben	+
Laden	mit Frontlader	?
	mit Ladegeräten	+

\*) + zu erwarten  
(+) nur bei besonderen Geräten und Maschinen zu erwarten  
- nicht vorhanden oder unbedeutend

Bei einigen Arbeiten ist der Vorteil eines stufenlosen Getriebes fraglich, bei anderen ist er nur in der Kombination mit bestimmten Geräten bzw. bei stark wechselnden Arbeitsbedingungen zu erwarten. Hier wird erst durch umfangreiche Erfahrungen das letzte Wort gesprochen werden können.

Aus diesen Überlegungen ergibt sich die Forderung, daß die Geschwindigkeit eines Schleppers

stufenlos zumindest über einen weiten Bereich, wenn nicht über den ganzen, gewählt werden kann. Bei Verwendung von Schaltstufen zur Ausweitung der Geschwindigkeitsgrenzen ist eine genügende Überdeckung der verschiedenen Bereiche erforderlich. Die volle Motorleistung sollte von einer Fahrgeschwindigkeit mit etwa 3,5 km/h bis zur Höchstgeschwindigkeit übertragen werden können. Unter 3,5 km/h kann das Drehmoment an den Rädern konstant bleiben. Im Bereich geringer Geschwindigkeit (unter etwa 1,4 km/h) kann auch ein Verringern der Motordrehzahl zu Hilfe genommen werden.

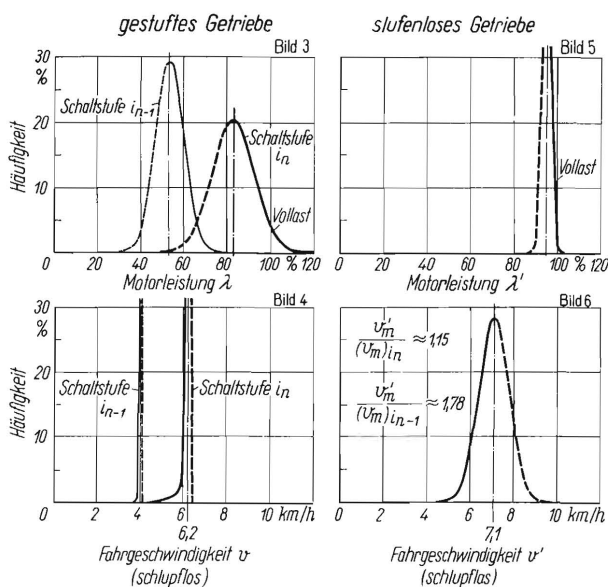
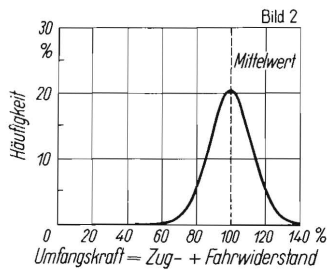
Der kraftschlüssige Geschwindigkeitswechsel bei stufenlosen Getrieben ist bei den aufgeführten beiden Arbeitsgruppen a) und b) von Bedeutung, weil bei den ständig wechselnden Arbeitsbedingungen auf demselben Feld nur durch ein laufendes Ändern der Übersetzung und damit der Fahrgeschwindigkeit die volle Leistung aus dem Schlepper herausgeholt werden kann. Das Übersetzungsverhältnis kann entweder von Hand oder automatisch verstellt werden (der sonst hierfür gebräuchliche Ausdruck „Regeln“ ist in der Regelungstechnik dem automatischen Ändern irgendeiner Größe unter dem Einfluß einer anderen vorbehalten, während man von dem „Steuern“ eines Ablaufs spricht, sobald der Mensch eingreift). Ein Steuern (in diesem Sinne) kann nur dann erfolgreich sein, wenn entweder die Größe der Motorbelastung durch irgendwelche Anzeigegeräte ersichtlich ist, oder die von der Fahrgeschwindigkeit abhängige Grenze der Arbeitsgüte von dem Schlepperfahrer oder dem Steuermann der Arbeitsmaschine laufend erkannt und berücksichtigt werden kann. Das Regeln, also das zwecks Entlastung des Schlepperfahrers automatische Ändern der Fahrgeschwindigkeit, ist zunächst bei der Arbeitsgruppe a), vielleicht auch noch bei b) möglich, wobei als Geber die Motorbelastung bzw. bei Dieselmotoren die Stellung der Regelstange der Einspritzpumpe verwendet werden kann.

Bei der Gruppe c), also bei den Arbeiten mit einem geringen Leistungsbedarf, ist eine Regelung ebenfalls möglich [4], sie ist jedoch für Ackerschlepper, gemessen am Gewinn, wahrscheinlich zu aufwendig, sofern sie nicht bereits für a) und b) vorgesehen ist.

Nach diesen allgemeinen Überlegungen soll nun der Einfluß einer stufenlosen Drehmomentwandlung auf die Ausnutzung der Motorleistung der Größe nach untersucht werden.

Wie schon erwähnt, schwanken der Zugwiderstand gezogener Geräte, der Leistungsbedarf angetriebener Geräte und der Fahrwiderstand des Schleppers in gewissen Grenzen. Die Häufigkeitsverteilung entspricht oft in guter Näherung einer Gauß'schen Normalverteilung [5]. Die Verteilungskurven können

in bestimmten Fällen ziemlich schmal sein, also eine geringe Streuung haben, aber auch sehr breit werden, oder sich aus mehreren Kollektiven zusammensetzen. Typische Mischverteilungen ergeben sich z.B. in hängigem Gelände durch das Bergauf- und Bergabfahren.



**Bild 2 bis 6.** Vergleich der Verteilungen von Motorleistung und Fahrgeschwindigkeit bei gestuften und stufenlosen Getriebe (gleicher Getriebewirkungsgrad vorausgesetzt).

Die Häufigkeiten sind bei Bild 2 für eine Klassenbreite von 6,25%, bei Bild 3 und 5 für eine Klassenbreite von 5,2% und bei Bild 4 und 6 für eine Klassenbreite von 0,5 km/h ermittelt worden.

**Bild 2** zeigt eine Häufigkeitsverteilung der Umfangskraft, die von den Triebrädern eines Schleppers unter üblichen Arbeitsbedingungen zur Überwindung des Zug- und Fahrwiderstandes aufzubringen ist. Die Größe der Motorbelastung muß so weit von der Höchstleistung entfernt sein, daß die verbleibenden Spitzenbelastungen noch vom Motor, eventuell unter Rückgriff auf die kinetische Energie des Schwungrades und der übrigen Massen, gedeckt werden können [6]. Bei einem Schlepper mit gestuftem Getriebe (**Bild 3 und 4**) kann das Lasthäufigkeitsmaximum keinen größeren Wert annehmen, als er sich aus seinem wegen der Spitzenbelastungen erforderlichen „Respektsabstand“ von der Höchstleistung ergibt. Dieses Lasthäufigkeitsmaximum liegt bei der Schaltstufe  $i_n$  bei 83%; unter ungünstigen Verhältnissen, also bei sehr breiter Verteilungskurve des Zug- und Fahrwiderstandes, muß man noch viel tiefer unter die Vollast des Motors

gehen, selbst bei einer gut passenden Fahrgeschwindigkeit.

Wird bei der Schaltstufe  $i_n$  des gestuften Getriebes die Vollast des Motors zu häufig und jeweils zu lange erreicht und überschritten, dann muß auf den nächst niedrigeren Gang  $i_{n-1}$  umgeschaltet werden. Dabei ist aber die Fahrgeschwindigkeit bei dem hier vorliegenden Stufensprung von 1,55 soviel kleiner geworden, daß das Häufigkeitsmaximum der Motorbelastung bei nur 53% liegt.

### Einfluss des stufenlosen Getriebes auf die Fahrgeschwindigkeit

Ist dagegen das Getriebe stufenlos, erlaubt es also auch einen kraftschlüssigen Geschwindigkeitswechsel, dann gilt **Bild 5 und 6**. Hierbei ist unterstellt, daß durch eine gute Steuerung oder Regelung die Motorleistung auf dem hohen Wert von 95% gehalten werden kann. Die Fahrgeschwindigkeit (ohne Schlupf gerechnet) liegt dann zu 95% zwischen 5,5 und 8,7 km/h mit einem häufigsten Wert von 7,1 km/h, wobei die durch die Arbeitsgüte gegebene Geschwindigkeitsgrenze noch nicht erreicht sein soll und der Zugwiderstand als unabhängig von der Arbeitsgeschwindigkeit angesehen wird.

Bezieht man diesen Wert von 7,1 km/h auf die Fahrgeschwindigkeiten des gestuften Getriebes, so ergäbe sich ein Gewinn von 15%, falls mit der Schaltstufe  $i_n$  noch zügig auf dem ganzen Feld gearbeitet werden könnte. Das ist jedoch meist nicht mehr möglich. Gegen den nächstniedrigeren Gang mit dem Stufensprung von 1,55 würde aber ein Gewinn von 78% erzielt.

Daraus ergibt sich, daß verschiedene Faktoren die Größe des Gewinnes an Fahrgeschwindigkeit bestimmen. Bei einem grob gestuften Getriebe muß die Geschwindigkeit im großen Durchschnitt erheblich weiter von dem Maximalwert entfernt bleiben, der sich bei einem stufenlosen Getriebe mit kraftschlüssigem Geschwindigkeitswechsel ergeben kann. Mit einem feiner gestuften Getriebe wird man den Durchschnittswert der Fahrgeschwindigkeit besser dem Maximalwert annähern können als mit einem grob gestuften.

Man kann also diese Verhältnisse auf den mittleren Stufensprung im entscheidenden Arbeitsbereich eines Schleppertriebwerks beziehen und daraus ohne nähere Kenntnis anderer Daten den höchstmöglichen Gewinn an Fahrgeschwindigkeit berechnen:

$$\left(\frac{\Delta v}{v}\right)_{\max} = \left(\frac{\alpha}{\alpha'} - 1\right) 100\% . \quad (1)$$

Hierbei ist  $\alpha$  der mittlere vorhandene Stufensprung,  $\alpha'$  der verkleinerte Stufensprung (**Bild 7**).

Aus einer Analyse vieler Getriebe ergab sich, daß man, wie schon erwähnt, bei den meisten vor-

handenen Schleppern im Mittel mit einem Stufensprung zwischen 1,55 und 1,6 im Bereich von 2 bis 8 km/h rechnen muß. Unterstellt man, daß in diesem Bereich jede Arbeitsgeschwindigkeit als optimal mit gleicher Häufigkeit vorkommen kann, so wird ersichtlich, daß der mögliche Gewinn durch einen Stufensprung von z. B. 1,2 etwa 30% beträgt. Hierbei ist allerdings noch offen, ob der Fahrer in der Lage wäre, den jeweils günstigsten Gang zu wählen.

Beim Verfeinern des Stufensprungs kommt man im Grenzübergang zum stufenlosen Getriebe, bei dem als Grenzwert der Stufensprung  $\alpha' = 1$  ist. Der Gewinn an Fahrgeschwindigkeit durch ein stufenloses Getriebe wird durch die durch einen Faktor  $k$  ergänzte Gleichung (1) wiedergegeben:

$$\frac{\Delta v}{v} = \left( k \frac{\alpha}{\alpha'} - 1 \right) 100\%$$

bzw. mit  $\alpha' = 1$ :

$$\frac{\Delta v}{v} = (k\alpha - 1) 100\% \quad (2)$$

Hierbei ist  $k = \frac{\eta_g'}{\eta_g} \cdot \frac{\lambda'}{\lambda}$

mit  $\eta_g$  und  $\eta_g'$  als Wirkungsgrad des gestuften bzw. stufenlosen Getriebes, mit  $\lambda$  bzw.  $\lambda'$  als höchstmögliche durchschnittliche Motorbelastung des Schleppers mit gestuftem bzw. stufenlosem Getriebe.

Der Wirkungsgrad einfacher Standardtriebwerke liegt heute im Bereich mittlerer bis hoher Belastung bei 0,9 bis 0,92 [7], an komplizierten, vielgliedrigen und -stufigen Triebwerken sind allerdings auch schon wesentlich ungünstigere Werte gemessen worden [8].

Bei stufenlosen Getrieben der bisher bekanntgewordenen Bauarten ist wegen der hinzukommenden Verluste mit Wirkungsgraden zwischen 0,65 und 0,9 zu rechnen. Das Wirkungsgradverhältnis  $\eta_g'/\eta_g$  kann danach im Mittel mit  $0,81/0,9 = 0,9$  mit den Extremwerten 0,7 und 1,0 angenommen werden.

Wie im Zusammenhang mit Bild 5 und 6 gezeigt worden ist, kann bei einem stufenlosen Getriebe die durchschnittliche Motorbelastung bis zu 95% ansteigen. Ein derartig hoher Wert setzt entweder eine gute Regelung oder eine so gute Steuerung

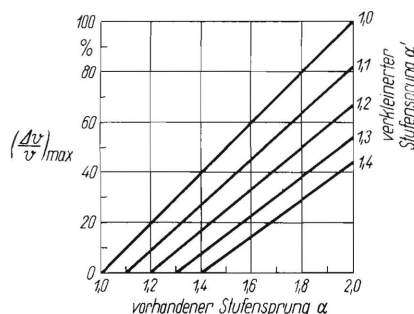


Bild 7. Höchstmöglicher Gewinn an Fahrgeschwindigkeit  $(\Delta v/v)_{\max}$  durch verkleinerten Stufensprung  $\alpha'$ .

voraus, wie sie nur durch einen aufmerksamen Fahrer bei geeigneter Anzeigevorrichtung der jeweiligen Motorbelastung und bei zweckentsprechender Verstelleneinrichtung erreicht werden kann.

Bei einem gestuften Getriebe, aber auch bei einem stufenlosen ohne laufendes Ändern der Übersetzung kann die mittlere Motorbelastung nur in besonders günstigen Fällen, wie z. B. beim Pflügen auf einem sehr gleichmäßigen Boden, 80% überschreiten. Ohne Änderung der Arbeitstiefe durch den Fahrer oder das Kraftheberregelsystem [9] muß auf ungleichmäßigem Boden mit erheblich niedrigeren Werten gerechnet werden, wenn der Fahrer ein ständiges Anhalten und Umschalten vermeiden will (vgl. auch Bild 3 und 4). Erfahrungswerte über die Streuungen von Zugwiderstand und Zapfwellenleistung für die verschiedenen Maschinen und Geräte unter unterschiedlichen Einsatzbedingungen liegen noch nicht in so ausreichender Zahl vor, daß daraus die durchschnittliche Motorbelastung für die in diesem Zusammenhang wichtigen Arbeiten abgeleitet werden könnte. Man kann aber schon aus den obigen Zahlen schließen, daß das Lastverhältnis  $\lambda'/\lambda$  im allgemeinen zwischen etwa 1,1 und 1,5 liegen kann.

Dies bedeutet bei vorsichtigem Abwägen, daß Werte von  $k$  oberhalb von 1,4 und unterhalb von 0,8 verhältnismäßig selten auftreten; deshalb wird im weiteren nur mit Zahlen zwischen 0,85 und 1,3 gerechnet.

Gleichung (2) stellt zudem den größtmöglichen Gewinn durch ein stufenloses Getriebe dar, der dann auftritt, wenn – wie in Bild 3 und 4 – die Schaltstufe  $i_n$  gerade nicht mehr verwendet werden kann. Dann muß mit der Schaltstufe  $i_{n-1}$  gearbeitet werden, die um den Stufensprung  $\alpha$  langsamer ist:

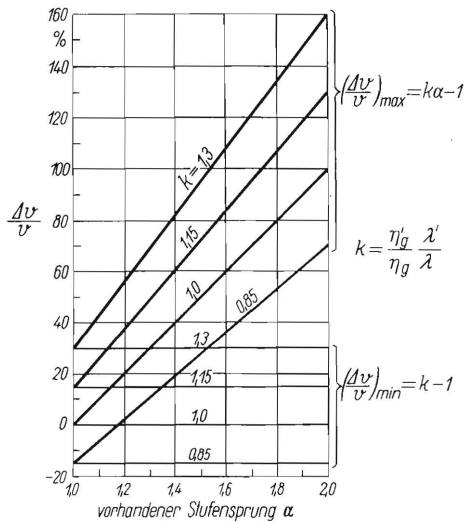
$$\left( \frac{\Delta v}{v} \right)_{\max} = (k\alpha - 1) 100\% \quad (3)$$

Der geringste Gewinn wird bei einer Geschwindigkeit des gestuften Getriebes erhalten, die eben noch ohne unzutraglichen Abfall der Motordrehzahl durch die gelegentlichen Lastspitzen eine Motorbelastung gestattet, die unter den gegebenen Umständen dem höchstmöglichen Wert entspricht. In diesem Fall bleibt der Stufensprung ohne Einfluß; daher wird  $\alpha = 1$  und Gleichung (2) zu

$$\left( \frac{\Delta v}{v} \right)_{\min} = (k - 1) 100\% \quad (4)$$

Bild 8 zeigt die größt- und geringstmöglichen Gewinne an Fahrgeschwindigkeit als Funktion des Stufensprungs  $\alpha$  mit dem Parameter  $k$  als Produkt von Wirkungsgrad- und Motorlastverhältnis.

Im großen Durchschnitt und unter der Voraussetzung, daß nach Wahrscheinlichkeitsüberlegungen jede Arbeitsgeschwindigkeit im fraglichen Bereich mit gleicher Häufigkeit als optimale vorkommen



**Bild 8.** Gewinn  $\Delta v/v$  an Fahrgeschwindigkeit durch stufenloses Getriebe.

kann, ergibt sich, daß der mittlere Gewinn das Mittel aus dem maximalen und dem minimalen darstellt.

$$\begin{aligned} \left(\frac{\Delta v}{v}\right)_{\text{mittl.}} &= \frac{1}{2} \left[ \left(\frac{\Delta v}{v}\right)_{\text{max}} + \left(\frac{\Delta v}{v}\right)_{\text{min}} \right] \\ &= \frac{1}{2} [(k\alpha - 1) + (k - 1)] \cdot 100\% \\ &= \left[ \frac{k}{2} (\alpha + 1) - 1 \right] \cdot 100\% . \end{aligned} \tag{5}$$

Dieser mittlere Gewinn an Geschwindigkeit ist als Ordinate in **Bild 9** dargestellt. Daneben wurden auch die bei Feldarbeiten damit verbundene Erhöhung der Flächenleistung  $\Delta F/F$  bzw. die Zeitersparnis  $\Delta T/T$  durch Maßstäbe berücksichtigt. Hierbei wurde unterstellt, daß im Mittel die Nebenzeiten rund 40% der produktiven Feldarbeitszeit, also fast 30% der Gesamtzeit ausmachen. Diese Nebenzeiten für Fahrt zum Feld, Rüstarbeit auf dem Acker, Störungen usw. sind hier der Sicherheit halber hoch eingesetzt. Werden sie im Einzelfall geringer, so können die beiden Maßstäbe verkleinert werden; der Gewinn an Flächenleistung und die Ersparnis an Arbeitszeit werden dann größer.

**Vergleich von Rechnung und Versuchsergebnissen**

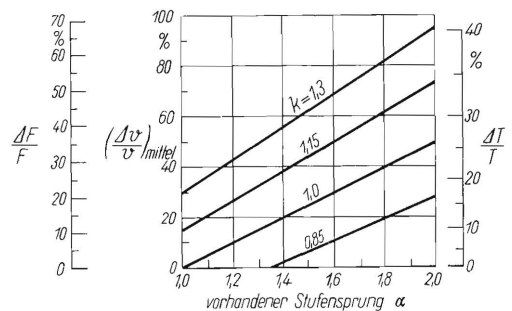
Das Institut für Schlepperforschung der FAL war an einer Überprüfung dieser theoretischen Betrachtung in der Praxis sehr interessiert. Die Firma *Reimers-Getriebe KG* stellte dazu einen Versuchsschlepper mit einem 25 PS-Dieselmotor und einem stufenlos verstellbaren Kettengetriebe, Bauart *Reimers* [10] zur Verfügung. Die Übersetzung wurde vor Hand nach Gehör gesteuert; eine Anzeigevorrichtung der Motorbelastung für den Fahrer war noch nicht vorhanden.

Um Ausnützung, Belastung und Wirkung des stufenlosen Getriebes und die Art des Einsatzes des Schleppers zu erfassen, wurden Zählwerke und ein

Tachograph angebaut. Die Zählwerke gestatteten die Erfassung der Häufigkeit der Motorbelastung, wenn auch nur in groben Stufen, und anderer interessierender Werte [11]. Der Tachograph zeichnete die Fahrgeschwindigkeit (schlupflos), die Motordrehzahl, die Fahr-, Motorlauf- und Haltezeiten und die Fahrstrecke auf [12].

Der Schlepper wurde in verschiedenen Betrieben unter laufender Überwachung <sup>2)</sup> vorzugsweise zu solchen Arbeiten eingesetzt, bei denen die stufenlose Drehmomentwandlung wichtig erschien. Daneben wurden auch spezielle Vergleichsversuche durchgeführt; bei einem Teil wurde die Arbeitsleistung des Versuchsschleppers zu derjenigen in Beziehung gesetzt, die gleichzeitig auf demselben Acker mit einem gleichstarken Schlepper mit normal gestuftem Getriebe erzielt wurde. Bei anderen Versuchen wurde der gleiche Versuchsschlepper einmal mit laufendem Ändern der Übersetzung von Hand eingesetzt, zum andern mit den fest eingestellten Fahrgeschwindigkeiten von 3,5; 5,5 und 7,5 km/h.

Die Ergebnisse bestätigen in vollem Umfang die Voraussagen über die Vorteile eines stufenlosen Getriebes. Sie brachten darüber hinaus eine Fülle von allgemeingültigen Erkenntnissen, aber auch von solchen, die lediglich mit der vorliegenden konstruktiven Lösung zusammenhingen. Sie wiesen Zeitersparnisse bzw. erhöhte Flächenleistungen



**Bild 9.** Mittlerer Gewinn an Fahrgeschwindigkeit  $\Delta v/v$  und Flächenleistung  $\Delta F/F$  sowie Zeitersparnis  $\Delta T/T$  durch stufenloses Getriebe.

bei verschiedenen Arbeiten aus, wie sie unter den Versuchsbedingungen zunächst nicht erwartet worden waren; die Leistungen dieses 25 PS-Schleppers mit stufenlosem Getriebe entsprachen teilweise den von Schleppern bis zu 35 PS. Das gilt besonders für Arbeiten mit solchen Zapfwellengeräten, die eine konstante Zapfwelldrehzahl verlangen und bei denen die Fahrgeschwindigkeit der wechselnden Standdichte des Erntegutes angepaßt werden konnte.

Um einen ungefähren Überblick darüber zu gewinnen, welche Zeitersparnisse für einen 25 PS-Schlepper durch ein stufenloses Getriebe über die Dauer eines Jahres erreicht werden können, wurde

<sup>2)</sup> im technischen Teil durch *Dipl.-Ing. H. H. Coenberg*, im landwirtschaftlichen Teil durch *Dipl.-Landw. U. Schünke*.

**Tafel 3.** Ersparnis an Arbeitszeit eines 25 PS-Schleppers durch stufenloses Getriebe

Arbeit	Anteil an Gesamt-Arbeitszeit eines Schleppers mit gestuftem Getriebe		erreichte durchschnittliche Ersparnis durch stufenloses Getriebe		mögliche durchschnittliche Ersparnis durch stufenloses Getriebe	
	%	Stunden	%	Stunden	%	Stunden
Pflügen	15	225	20	45,0	30	67,5
Schälen	4	60	20	12,0	30	18,0
Grubbern, Scheibeneggen	6	90	20	18,0	25	22,5
Eggen, Schleppen, Striegeln, Walzen	9	135	10	13,5	15	20,3
Stallmist streuen	2	30	—	—	—	—
Handelsdünger streuen *)	4	60	10	6,0	15	9,0
Drillen	3	45	—	—	—	—
Kartoffeln legen, selbsttätig*)	1,0	15	10	1,5	10	1,5
Kartoffeln häufeln (vierreihig)	1,0	15	15	2,3	20	3,0
Kartoffeln hacken	0,7	11	—	—	10	1,1
Rüben hacken	1,5	22	—	—	10	2,2
Grünfutter mähen	2,5	38	5	1,9	5	1,5
Heubearbeiten	2	30	15	4,5	15	4,5
Feldhäckseln *)	2	30	20	6,0	30	9,0
Mähdreschen *)	6	90	20	18,0	30	27,0
Sammelernte von Kartoffeln *)	2,7	40	20	8,0	20	8,0
Sammelernte von Zuckerrüben *)	2,6	39	20	8,0	25	9,7
Transporte schwer	7	110	10	11,0	15	16,5
leicht	28	415	—	—	—	—
insgesamt	100	1500	10,4	155,7	14,8	221,3

\*) mit überbetrieblich genutzter Maschine

von einem Betriebsmodell ausgegangen. Hierbei wurde eine am Rande des Mittelgebirges gelegene Getreide-Hackfrucht-Wirtschaft mit 25 ha landwirtschaftlicher Nutzfläche, davon 15% Grünland und 20% Hackfrucht, mit mittleren bis schweren Böden unterstellt. In **Tafel 3** ist zunächst die Arbeitszeit eines 25 PS-Schleppers mit gestuftem Getriebe in diesem Betrieb aufgegliedert. In zwei weiteren Spalten sind die erreichten durchschnittlichen Ersparnisse durch ein stufenloses Getriebe auf Grund der praktischen Versuche aufgeführt, bei denen der Versuchsschlepper keine Anzeige der Motorbelastung und keine Automatik der Geschwindigkeitsänderung hatte. Durch Ausrüstung eines Schleppers mit Belastungsanzeige bei sorgfältiger Steuerung der Fahrgeschwindigkeit durch den Fahrer oder mit Regeleinrichtung für das Übersetzungsverhältnis wären die in den letzten Spalten aufgeführten durchschnittlichen Ersparnisse möglich. Hierbei ist, wie ein Vergleich mit Bild 9 zeigt, sehr vorsichtig gerechnet worden.

Auf Grund der praktischen Versuche ergibt sich eine Ersparnis von 10,4% und bei verbesserter Aus-

rüstung des Schleppers von 14,8% der Jahresarbeitszeit. Betrachtet man jedoch nur solche Arbeiten, bei denen eine rasche Erledigung wichtig ist, wie die Bodenbearbeitung und die Ernte – sie machen beim Schlepper mit gestuftem Getriebe rund 52% der Gesamtarbeitszeit aus – dann zeigt sich, daß durch das stufenlose Getriebe 24,2% von der für sie notwendigen Zeit eingespart werden können. Hier handelt es sich also schon um Beträge, die für den Arbeitsablauf und für die Produktivität eines landwirtschaftlichen Betriebes von großer Bedeutung sein können. Mithin bieten stufenlose Getriebe unabhängig von ihrer Bauart beträchtliche Vorteile beim Einsatz der Schlepper. Darüberhinaus gewähren gewisse Bauarten eine sonst nicht erreichbare Freizügigkeit in der Gestaltung der Schlepper. Hierüber wird an anderer Stelle berichtet [13].

#### Stufenlose Getriebe für Arbeitsgeräte

In **Tafel 4** wurden die Vorrichtungen und Geräte, bei denen ein stufenloses Getriebe mehr oder weniger vorteilhaft sein kann, zusammengestellt. Bei den hier aufgeführten Zuteilvorrichtungen an Drill-

**Tafel 4.** Vorteile eines stufenlosen Getriebes in Arbeitsgeräten

Vorrichtungen und Geräte	Vorteile vorhanden	Leistungsbedarf
a) Zuteilvorrichtungen von		
Drillmaschinen	x	klein
Miststreuern	?	klein
b) Aufnahmevorrichtungen von		
Feldhäckslern	x	klein
Mähdreschern	x	klein
Sammelladern	x	klein
c) Arbeitswerkzeuge u. ä. von		
Fräsen u. ä.	x	gross
Mähwerken (Mähmesser)	?	klein
Heubearbeitungsgeräten	x	klein
Mähdreschern (Dreschtrommel)	x	gross
Zuckerrübenerntern (Taster)	x	klein
Zuckerrüben- und Kartoffelerntern (Reinigungsvorrichtungen)	x	klein
d) Fahrgetriebe von		
selbsfahrend. Mähdreschern u. anderen Sammelern	x	gross
e) Fahrtrieb (ü. Zapfw.) von		
Anhängern und Stallungstreuern	x	gross
Erntemaschinen usw.	x	gross

maschinen mag an die Lösung der Firma *Rud. Sack* aus dem Jahre 1930 erinnert werden. Die stufenlose Steuerung der Drehzahl der Dreschtrommel von Mähdreschern ist ja bereits bekannt, noch mehr vielleicht diejenige des Fahrgetriebes von selbstfahrenden Mähdreschern. Die hohen Flächenleistungen dieser Maschinen gegenüber denjenigen gezogener Mähdrescher, die an das gestufte Getriebe des ziehenden Schleppers gebunden sind, dürften durch ihre Wendigkeit und nach den vorausgegangenen Bemerkungen durch das stufenlose Getriebe zu erklären sein.

Für den Einsatz von stufenlosen Getrieben sind also nicht nur bei Schleppern, sondern auch bei

Arbeitsgeräten und Landmaschinen viele Möglichkeiten vorhanden. Die Anwendung stufenloser Getriebe wird allerdings nicht nur von ihren Vorteilen, sondern auch vom Preis, der Betriebssicherheit und Lebensdauer bestimmt. Jedoch ist damit zu rechnen, daß derartige Einrichtungen, die die Handhabung und damit die Arbeit bequemer machen, sich zwangsläufig durchsetzen werden.

#### Schrifttum

- [1] *Erwin, R. L. and C. T. O'Harrow*: Tractor Transmission Responds to Finger-Tip Control. *Agric. Engng.* 40 (1959) S. 198/203 u. 207.
- [2] *Meyer, H.*: Probleme der Schlepperentwicklung. In: *Grundlagen d. Landtechn. H. 9*, VDI-Verlag Düsseldorf 1957, S. 10/19, Bild 4.
- [3] *Kiene, W.*: Leistungs- und Verbrauchskennfeld des Ackerschlepper-Dieselmotors. *Landtechn. Forsch.* 3 (1955) Nr. 2, S. 33/42.
- [4] *Jante, A.*: Kraftfahrt-Mechanik. In: *Bussien, Automobiltechnisches Handbuch*, 17. Aufl., Berlin 1953, S. 1/79, Bild 93, 94 und 96.
- [5] *Gerlach, A.*: Erfassung der Triebwerksbelastung von Ackerschleppern. *Landtechn. Forsch.* 8 (1958) Nr. 3, S. 61/67.
- [6] *Coenenberg, H. H.*: Zur Schwungradbemessung bei Ackerschleppern. Erscheint demnächst in *Landtechn. Forsch.* (mit Schrifttum).
- [7] *Kiene, W.*: Versuche mit Getriebeölen der Viskosität SAE 80 und SAE 90. *Landtechn. Forsch.* 8 (1958) S. 10/13.
- [8] *Lamp, B. J., Jr., and S. G. Huber*: Laboratory Efficiency Tests of Farm Tractor Transmissions. Vortrag auf der Wintertagung der ASAE, Chicago, Dezember 1958.
- [9] *Seifert, A.*: Der neue hydraulische Kraftheber des *Fordson Dexta*-Schleppers und sein Vergleich mit anderen Systemen. *Landtechn. Forsch.* 9 (1959) Nr. 2, S. 34/41.
- [10] *Dittrich, O.*: Ein stufenlos verstellbarer Umschlingungstrieb mit neuartiger Reibungskette. *Schriftenreihe Antriebstechnik* Bd. 18 (1957) Verl. Vieweg Braunschweig, s. a. *Konstruktion* 9 (1957) 1, S. 2/10 (Auszug).
- [11] *Coenenberg, H. H.*: Ein Zählverfahren für rauhe Einsatzbedingungen. *Landtechn. Forsch.* 8 (1958) Nr. 6, S. 152/157.
- [12] *Schünke, U.*: Die Arbeitszeit von Schleppern. *Landbauforschung* 8 (1958) S. 70/71.
- [13] *Meyer, H.*: Probleme und Aussichten stufenloser Getriebe für Ackerschlepper. *Landbauforsch.* 9 (1959) H. 3/4.

Institut für Schlepperforschung  
der Forschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode

Anschrift des Verfassers: Prof. Dipl.-Ing. Helmut Meyer, (20b) Braunschweig, Bundesallee 50