

Über die Kräfte in Zahnradgetrieben von Schleppern

Von Albrecht Gerlach

Bisher stehen dem Konstrukteur von Schleppergetrieben nur unzureichende Unterlagen über die Belastung der Getriebe im praktischen Betrieb zur Verfügung. Messungen liegen nur für wenige Sonderfälle vor [1]. Werden Neukonstruktionen mit unsicheren Annahmen entworfen, so besteht aber die Gefahr, daß entweder zu große Sicherheitsfaktoren gewählt und dadurch die überdimensionierten Teile schwerer und teurer als notwendig werden oder daß starker Verschleiß oder gar Brüche zu kostspieligen Änderungen zwingen, wenn bereits die Serienproduktion im Gange ist.

Durch die Untersuchungen, über deren erste Ergebnisse hier berichtet wird, sollen Unterlagen geschaffen werden

1. für eine belastungsgetreue Durchrechnung von Neukonstruktionen und
2. für ein Belastungsprogramm für den Getriebeprüfstand, das den tatsächlich auftretenden Beanspruchungen entspricht.

Die dazu notwendigen Messungen können nicht darauf beschränkt werden, die Größtwerte der vom Getriebe zu übertragenden Drehmomente zu ermitteln, sondern es muß außerdem die statistische Häufigkeit der einzelnen Belastungsstufen festgestellt werden.

Beim Ackerschlepper beeinflußt eine außerordentliche Vielfalt von Faktoren die Beanspruchungen des Triebwerkes; es sind dies

1. die technischen Merkmale des Schleppers selbst (Taktart, Zylinderzahl, Größe der Schwungscheibe, Art der Kupplung usw.),
2. die zusätzlichen Radbewehrungen zur Verminderung des Schlupfes (Ketten, Klappgreifer, Greiferräder),
3. die Arbeitsgeräte,
4. die Bodenverhältnisse, die infolge von Witterungseinflüssen stark wechseln, und die Eigenarten der Kulturen, in denen der Schlepper eingesetzt wird,
5. die Art der Bedienung durch den Fahrer.

Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, sehr viele Messungen durchzuführen, wobei jeder einzelne Versuch über längere Zeit auszudehnen ist, damit die Ergebnisse statistisch gesichert sind.

Da die Anwendung eines elektrischen Meßwertgebers (z.B. eines Dehnungsmeßstreifens) in

Brückenschaltung eine dauernde Überwachung bzw. Nacheichung des Nullpunktes erfordert, wurde für unsere Versuche eine von den üblichen Methoden abweichende Meßeinrichtung geschaffen: Auf der Welle zwischen Kupplung und Getriebe des Versuchsschleppers sind zwei Wechselstromgeneratoren im Abstand von etwa 20 cm angebracht (Bild 1). Als Maß der Getriebebeanspruchung dient die Torsion des Wellenstückes zwischen diesen beiden Generatoren; die Torsion bildet sich in einer der Phasenverschiebung der beiden erzeugten Wechselspannungen proportionalen Meßspannung ab. Die Frequenz der Wechselspannungen ist gleichzeitig ein Maß der Motordrehzahl.

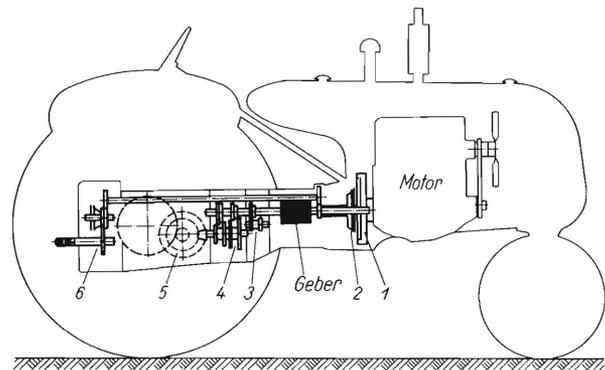


Bild 1. Schnittzeichnung des Schleppers. Die Welle zwischen Kupplung und Getriebe trägt den Meßwertgeber. Ihre Torsion dient als Maß des übertragenen Drehmomentes.

- | | |
|----------------------|----------------------|
| 1 Schwungrad | 4 Wechselgetriebe |
| 2 Kupplung | 5 Ausgleichgetriebe |
| 3 Kriechganggetriebe | 6 Zapfwellengetriebe |

Die exakte Registrierung rasch veränderlicher Meßwerte mit Schwankungsfrequenzen von einigen hundert Schwingungen in der Sekunde ist nur mit dem Schleifenoszillographen möglich. Bei lang andauernden Messungen sind jedoch die Kosten für das fotografische Registrierpapier sowie der Arbeitsaufwand für die Entwicklung der Oszillogramme und die statistische Auswertung der Kurven nicht tragbar. Deshalb wurde zusätzlich eine Apparatur entwickelt, in der durch die elektrische Meßspannung unmittelbar eine Anzahl von Zählwerken gesteuert wird, an denen nach Beendigung des Versuches die statistische Verteilung der Beanspruchung ohne besondere Auswertearbeit unmittelbar abgelesen werden kann. Neben dem Schleifenoszil-

lographen für kurzzeitige Untersuchungen können gleichzeitig mit der Zählrichtung zwei Tintenschreiber zum Registrieren der groben Schwankungen von Drehmoment und Drehzahl eingesetzt werden.



Bild 2. Versuchsschlepper beim Pflügen. Der Messwertsender ist über dem rechten Vorderrad montiert. Im Hintergrund sieht man die fahrbare Registrier- und Auswertestation mit Stromversorgungsaggregat.

Diese Geräte mit den zugehörigen Verstärkern und Stromversorgungsanlagen sind für den Transport auf einem ungefederten Ackerschlepper zu empfindlich und umfangreich. Ein Verbindungskabel zwischen dem Meßschlepper und einer ortsfesten Auswertanlage oder einem nebenher fahrenden Meßwagen würde andererseits die Einsatzmöglichkeiten des Schleppers sehr beschränken. Es wurde deshalb eine drahtlose Meßwertübertragung angewandt. Die Konstruktion des Meßwertgebers erlaubte dabei, die gegen Störungen außerordentlich unempfindliche Impulsbreitenmodulation anzuwenden. Vom Schlepper wird dabei lediglich ein kleiner Kurzwellensender zur Abstrahlung der Meßwerte mitgeführt, dessen Reichweite 2 km beträgt. Sämtliche Registriergeräte befinden sich in einer fahrbaren Auswertstation, die in Sicht des arbeitenden Versuchsschleppers aufgestellt wird (Bild 2). Ein durch Benzinmotor angetriebener 2 KW-Wechselstromgenerator macht den Meßtrupp von der Stromversorgung aus dem Netz unabhängig.

Für Kontrollmessungen und zum Vergleich der Drehmomente am Getriebeeingang und -ausgang in besonderen Beanspruchungsfällen sind die Trieb- radwellen des Schleppers zusätzlich mit Dehnungsmeßstreifen ausgerüstet worden. Zur Registrierung dieser Meßwerte ist allerdings der Anschluß einer Dehnungsmeßbrücke über Kabel und Schleifringe erforderlich.

Die technischen Daten des Versuchsschleppers sind: 30 PS *Cockshutt*-Schlepper, Vierzylinder-Viertakt-Dieselmotor mit maximal 1600 U/min, Hubraum 2,5 l, statisches Maximaldrehmoment des Motors $M_{dmax} = 12 \text{ kgm}$, Gewicht der Schwungscheibe 33 kg, Trägheitsmoment der Schwungscheibe 8,4

kgems^2 , 2×4 Gang-Gruppengetriebe, Gesamtgewicht 1600 kg, Radstand 2140 mm, Bereifung vorn 5,5–16, hinten 11–38, $v_{min} = 3,2 \text{ km/h}$, $v_{max} = 21,1 \text{ km/h}$.

Die ersten Versuchsreihen hatten den Zweck, die Grenzen der möglichen Getriebebelastung unter extremen Versuchsbedingungen zu ermitteln. Die Beanspruchungen des Getriebes über das Dauermoment hinaus können verschiedene Ursachen haben und auf verschiedenen Wegen ins Getriebe eingeleitet werden:

1. über die Kupplungswelle, entweder durch die Ungleichförmigkeit des vom Motor abgegebenen Momentes oder durch plötzliche Momentänderungen beim Kuppeln verursacht;
2. über die Trieb- radwellen, entweder durch Fahrbahnunebenheiten oder durch die Unebenheiten auf dem Trieb- radumfang (Klappgreifer und Spatengreifer) oder durch Änderung der Kraft am Zughaken verursacht; und
3. über die Getriebebremse.

Die von der Motorseite eingeleitete Belastung

Sie ist begrenzt durch das unter Umständen dynamisch überhöhte Rutschmoment der Kupplung. Unter normalen Betriebsverhältnissen beträgt die von der Ungleichförmigkeit des Motors verursachte Belastungsschwankung bei der Höchstdrehzahl von 1600 U/min 10 % des maximalen statischen Momentes von 12 kgm (Bild 3). Sie steigt mit fallender Drehzahl nahezu linear auf 30 % bei 800 U/min. Hierbei hat die Höhe der mittleren Belastung nur einen geringen Einfluß auf die Größe dieser Schwankungen. Ihre Grundfrequenz beträgt das Doppelte der Motorumlauffrequenz, also etwa 53 bis 27 Hz.

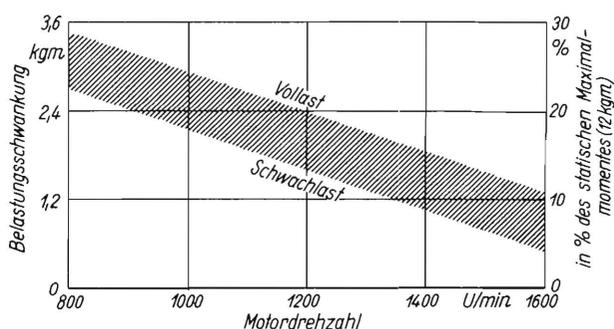


Bild 3. Durch die Ungleichförmigkeit des Motors verursachte Drehmomentschwankung. Es ist der Streubereich der aus verschiedenen Versuchen ermittelten Werte aufgetragen.

Diese raschen Drehmomentschwankungen im Getriebe sind nur an der Kupplungswelle zu messen, nicht dagegen an den Trieb- radwellen. Sie werden durch den dämpfenden Einfluß der dazwischen liegenden Zahnradmassen abgebaut. Im allgemeinen konnte festgestellt werden, daß Schwingungen bis zu einer Frequenz von etwa 10 Hz das Getriebe ungedämpft durchlaufen, während Schwingungen

über 20 Hz praktisch vollkommen verschluckt werden. In Bild 4 ist das deutlich zu erkennen. Die oben angegebenen Zahlen für die Größe der vom Motor verursachten Momentenschwankungen haben nur Gültigkeit, solange die Zahnräder des Getriebes im Eingriff sind. Wird das Drehmoment vorübergehend Null, so können sich die Zahnflanken voneinander abheben; beim Wiederaufeinanderprallen können Belastungsspitzen (x in Bild 5) bis 130 % des statischen Maximalmomentes entstehen.

Beim Kuppeln verursacht die der Schwungmasse entnommene kinetische Energie ein zusätzliches Moment. Die Untersuchung dieses Belastungsfalles wurde zunächst zurückgestellt, da bei extrem hartem Kuppeln immer die Gefahr besteht, daß Getriebeteile brechen [1].

Die von der Triebbradseite eingeleitete Belastung

ist begrenzt durch das Rutschmoment der Räder auf dem Boden, wenn nicht Schwingungen angefacht werden. Bei der Untersuchung der Beanspruchung durch Fahrbahnnunebenheiten wurde eine Wellenbahn von etwa 20 m Länge benutzt, die mit Hindernissen von 2,5 cm Höhe und etwa 30 cm Länge in Abständen von 1/3 des Radstandes gleich 713 mm bestand. Beim Überfahren dieser Bahn konnten wesentliche Beanspruchungsspitzen nur bei einer Fahrgeschwindigkeit, bei der die Eigenfrequenz der Luftreifen der Triebräder angeregt wird, registriert werden [2]. Sie beträgt etwa 3 Hz. Der Schlepper springt dabei ungefähr 15 cm hoch. Damit ist das Maximum dessen erreicht, was ein Schlepperfahrer, der richtig zu reagieren versteht, noch ertragen kann. Die gemessenen Drehmomentspitzen betragen 160% ohne Last und bei einem Zugwiderstand von 250 kg, dem größten, den der Schlepper bei der Resonanzgeschwindigkeit gerade noch bewältigen kann, 230%. Bei diesen Versuchen wurde gleichzeitig die Beschleunigung des Schleppers in horizontaler und vertikaler Richtung registriert. Sie betrug bis zu 5 g vertikal und bis zu 2 g horizontal.

Extreme Beanspruchungen durch zusätzliche Radbewehrungen sind bei Benutzung von Spatengreiferrädern zu erwarten. Auf einer Betonbahn konnten im 1. Gang mit 1000 kg Zugwiderstand Drehmomentschwankungen bis zu 200% gemessen werden. Beim Überrollen einer Greiferspitze wird der Schlepper jeweils um etwa 7 mm angehoben. Die dabei auftretenden Vertikalbeschleunigungen betragen 3 bis 4 g, fast so viel wie auf der Wellenbahn. Da ihre Frequenz hier aber wesentlich höher liegt, bringen sie den Fahrersitz nicht zum Mitschwingen und beanspruchen daher den Fahrer sehr viel weniger. Beim Langsamfahren ohne Last sind die durch Greiferräder verursachten Momentenschwankungen unerheblich, ebenso bei großen Fahrgeschwindigkeiten, da das große Trägheitsmoment der

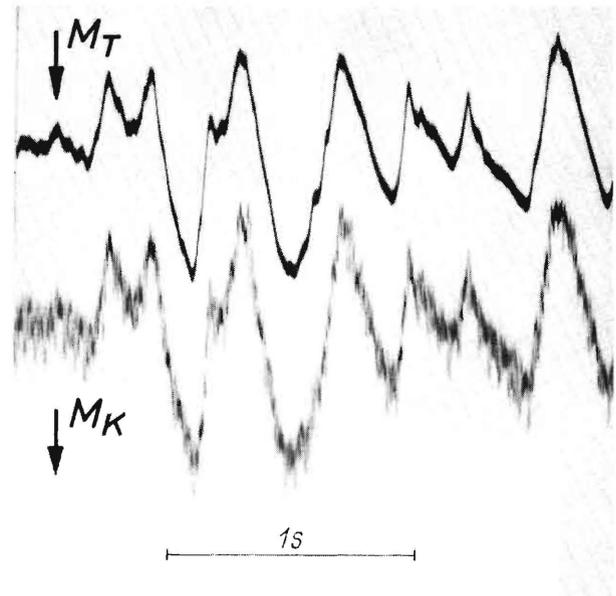


Bild 4. Drehmomentverlauf in der Triebbradwelle (M_T) und in der Kupplungswelle (M_K). Das Oszillogramm (4/5 natürl. Grösse) wurde beim Fahren mit Greiferrädern auf einer Betonbahn aufgenommen.

Greiferräder dann stark dämpfend wirkt. Es wurden nur Schwankungen bis 130% gemessen.

Wenn sich die Kraft am Zughaken des ziehenden Schleppers plötzlich erhöht, wird seine Fahrgeschwindigkeit verringert und, solange die Triebräder am Boden haften und die Kupplung nicht rutscht, werden über das Getriebe auch die rotierenden Massen von Motor und Schwungscheibe abgebremst. Die dabei freiwerdende kinetische Energie belastet das Getriebe zusätzlich. Bei den Versu-

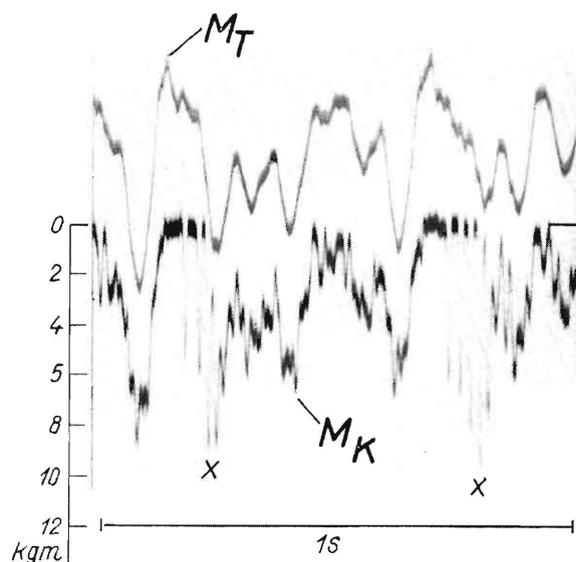


Bild 5. Drehmomentspitzen (x) in der Kupplungswelle infolge Aufeinanderprallens der Zahnflanken. Diese Spitzen treten infolge des Zahnradspieles auf, wenn das mittlere Moment vorübergehend Null wird. Ihre Frequenz ist gleich der Zündfrequenz im Motor.

chen zur Bestimmung dieser Belastung wurde am Zughaken über ein Scherglied ein Drahtseil befestigt, das zunächst in losen Schlingen am Boden lag und dessen anderes Ende am Boden verankert war. Nach 15 m Fahrt des Schleppers straffte sich das Seil, und ein Bolzen wurde abgeschert. Durch die Wahl eines geeigneten Bolzendurchmessers konnte die Größe des beabsichtigten Ruckes vorher ungefähr festgelegt werden. Die größten Beanspruchungen treten natürlich auf, wenn der Bolzen so stark gemacht wird, daß er nicht mehr abschert, und der Schlepper mit einem Ruck zum Stehen kommt. Das entspricht etwa den Beanspruchungen, die im praktischen Betrieb auftreten, wenn der Schlepperfahrer versucht, mit einem Seil Baumstümpfe zu roden. Im Extremfall wurde ein Ruck von 10 t gemessen. Die Horizontalverzögerung betrug dabei 7 g und die Getriebebelastung bis zu 250 %.

Durch das Bremsen bei gleichzeitigem Auskuppeln werden die Triebradwellen nur unwesentlich über die Normallast hinaus beansprucht. Bei allen bisher angestellten Versuchen hat die Beanspruchungsspitze im Getriebe das 2,5fache des

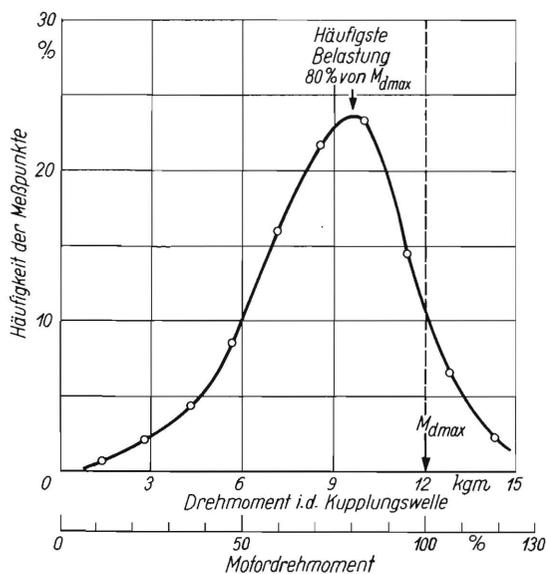


Bild 6. Getriebebelastung beim Pflügen schweren Bodens. Statistische Verteilung der Belastung aus den Anzeigen der Zählwerke.

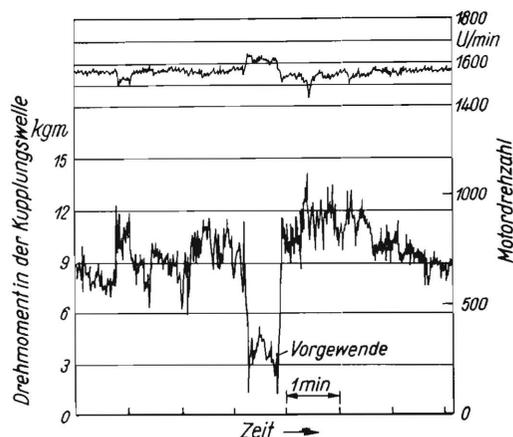


Bild 7. Getriebebelastung beim Pflügen schweren Bodens. Ausschnitt aus der Registrierung der Drehzahl und des Drehmomentes in der Kupplungswelle mit Tintenschreibern.

statischen Maximalmomentes nicht überschritten. Dieser Wert ist vermutlich deshalb so gering, weil die Schwungmasse des Motors verhältnismäßig klein ist.

Zur Klärung dieses Einflusses der technischen Merkmale des Schleppers auf die Getriebebeanspruchung wird eine Versuchsreihe vorbereitet, bei der an das gleiche Getriebe Motoren verschiedener Taktart und Zylinderzahl angeschlossen und die Größe der Schwungscheibe, Art der Kupplung usw. variiert werden sollen.

Der zweite Teil des Meßprogrammes, die statistischen Messungen im praktischen landwirtschaftlichen Betrieb, sind zur Zeit im Gange. Über sie wird später berichtet werden. Hier seien lediglich als Beispiel in **Bild 6** und **7** die Ergebnisse eines Pflugversuches gezeigt.

Schrifttum

- [1] Glaubitz, H.: Messung der Triebwerksdrehmomente eines 3t-Lastwagens im Fahrbetrieb. ATZ 50 (1948) Nr. 6.
- [2] Haack, M.: Über die günstigste Gestaltung der Schleppersitzfederung bei luftbereiften Ackerschleppern mit starrer Hinterachse. Landtechn. Forsch. 3 (1953) Heft 1.

Eingegangen am 25.8. 1955

Institut für Schlepperforschung
der Forschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode
Direktor: Prof. Dipl.-Ing. H. Meyer