

Günther Weise und Friedrich Uhlig, Groß-Umstadt

# Wo bleibt die Motorleistung beim Fahren?

## Untersuchungen an einem Forwarder

Forwarder (Bild 1) werden unter anderem nach der Motorleistung verkauft und daher erwarten die Anwender auch entsprechende Fahrleistungen im Gelände. Nicht immer werden diese auch erfüllt. Aus diesem Grund hat das KWF in Zusammenarbeit mit einem namhaften Hersteller von Forstmaschinen sowie der DLG-Prüfstelle Zugkraftversuche mit einem Forwarder ausgeführt, um Aussagen über die Leistungsfähigkeit einer solchen Maschine unter Belastung treffen zu können. Die Ergebnisse wurden mit Verlustschätzungen im Antriebsstrang verglichen, so dass eine grobe Aussage möglich ist, wo nun die Leistung des Antriebmotors bei der Fahrt im Gelände bleibt.

Dr.-Ing. Günther Weise leitet im Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik den Fachbereich Prüfwesen und Normung; Spremberger Straße 1, 64820 Groß-Umstadt; e-mail: fb1@kwf-online.de  
Dipl.-Ing. Friedrich Uhlig ist Mitarbeiter der DLG-Prüfstelle für Landmaschinen in Groß-Umstadt.

### Schlüsselwörter

Motorleistung, Leistungsverluste

### Keywords

Engine power, power loss

### Literatur

Bücher sind mit • gezeichnet

- [1] • Gscheidle, R.: Tabellenbuch Kraftfahrzeugtechnik. Europa Lehrmittel Haan-Gruiten, 2000
- [2] • Hoepke, E.: Nutzfahrzeugtechnik. Vieweg, 2000
- [3] • Schulze, A.: Theorie des Militärkraftfahrzeugs. Militärverlag der DDR, 1988
- [4] • Kunze, G., H. Göhring und K. Jacob: Baumaschinen, Vieweg, 2002



Bild 1: Forwarder Valmet 840.1 für die Zugkraftmessungen

Fig. 1: Power tested forwarder Valmet 840.1

Wird eine Maschine mit einer gegebenen Motorleistung erworben, so geht der Besitzer zunächst einmal davon aus, dass er diese Motorleistung auch über den gesamten Fahrgeschwindigkeitsbereich der Maschine nutzen kann. Die wichtigsten Ausgangsgrößen bei der Fahrt sind dabei die Zugkraft und die Fahrgeschwindigkeit. Zugkraft dient dabei sowohl zum Ziehen von Lasten, aber auch zum Überwinden von Fahrwiderständen und Steigungen durch das betrachtete Fahrzeug. Hierbei kann im Idealfall der verlustlosen Leistungsübertragung vom Motor in Zugleistung folgende Beziehung zwischen der Motorleistung ( $P_{\text{mot}}$ ), der Fahrgeschwindigkeit ( $v$ ) und der Zugkraft des Fahrzeugs ( $F$ ) aufgestellt werden:

$$F = P_{\text{mot}} / v$$

Für die hier durchgeführten Zugleistungsmessungen kann die am Zughaken verfügbare Leistung dagegen nach der analogen Formel  $F = P_{\text{zug}} / v$  bestimmt werden.

Die erste Beziehung ist in Bild 2 dargestellt und gibt die sogenannte ideale Zug-

krafthyperbel wieder. Grundsätzlich sagt diese Darstellung, dass ein Fahrzeug um so langsamer fahren muss, je mehr Kraft es zum Überwinden von Hindernissen benötigt. Dieser Zusammenhang ist jedem Fahrradfahrer oder Autofahrer aus Erfahrung bekannt. Um nach diesem Prinzip fahren zu können, müsste allerdings die Kraft (oder genauer das Drehmoment) des verwendeten Motors genauso wie in dem in Bild 2 dargestelltem Idealfall (der Motor gibt bei jeder Drehzahl eine Leistung von rund 90 kW ab) zunehmen, wenn wir nur die natürliche Motorcharakteristik verwenden wollten. Mit einem Verbrennungsmotor ist diese Charakteristik nicht darstellbar, da der Motor nur einen relativ kleinen nutzbaren Bereich hat. Betrachten wir jedoch eine reale Motorcharakteristik eines modernen Dieselmotors, also die Darstellung des Drehmoments über der Drehzahl (Bild 3), so zeigt sich, dass die Kurven deutlich anders aussehen. Nur ein relativ kleiner Teil der Motorcharakteristik (hier als elastischer Bereich

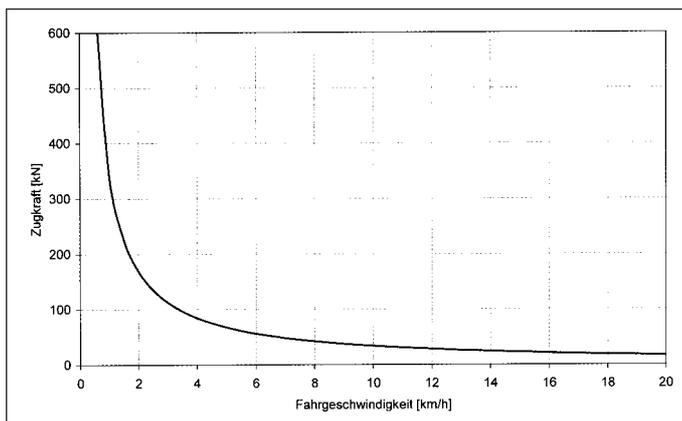


Bild 2: Zugkrafthyperbel

Fig. 2: Tractive power hyperbola

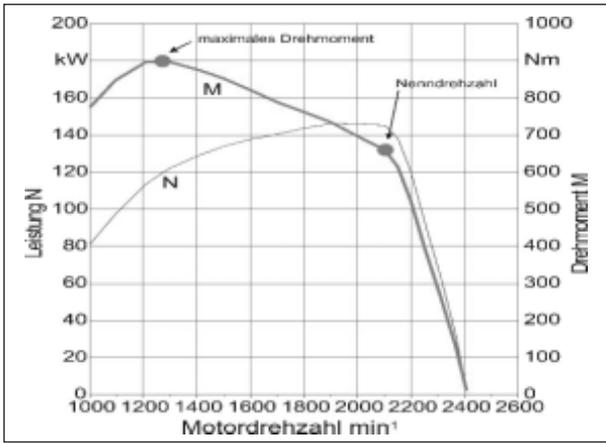


Bild 3: Tatsächliche Motorcharakteristik; nur der gekennzeichnete „elastische Bereich“ ähnelt der Zugkrafthyperbel

Fig. 3: Real engine performance; only the marked „elastic“ range is similar to the tractive power hyperbola

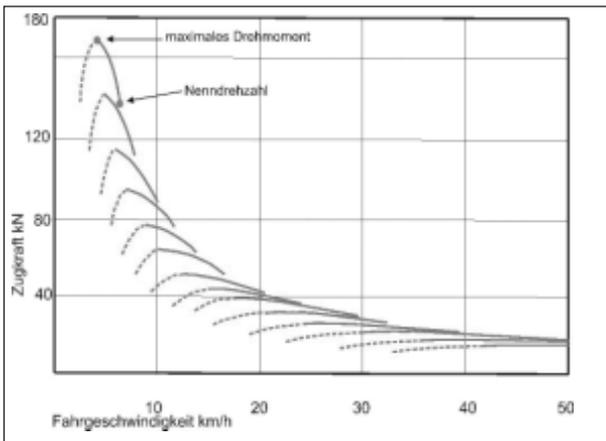


Bild 4: Antriebscharakteristik eines Stufengetriebes (Zugkraft über der Fahrgeschwindigkeit)

Fig. 4: Driveline performance of a range transmission (tractive power at travel speed)

gekennzeichnet) sieht der Zugkrafthyperbel in etwa ähnlich. Außerhalb dieses relativ schmalen Bereichs ist ein stabiles Fahren nicht möglich. Damit wir dennoch den Motor in einem breiten Geschwindigkeitsbereich nutzen können, benötigen wir ein Getriebe. In Bild 4 ist die Charakteristik eines mit der Hand schaltbaren Stufengetriebes dargestellt. Man erkennt, dass die in Bild 3 dargestellte Motorcharakteristik sich für jeden Gang wiederholt, allerdings in verschiedenen Höhen und unterschiedlich gestauchten oder gedehnt. Damit ist, wie zu erkennen, die Zugkrafthyperbel aus Bild 2 einigermaßen angenähert. Nachteilig für die Geländefahrt ist jedoch, dass sich beim Gangwechsel (Schalten) eine Unterbrechung der Zugkraft ergibt. Das macht auf der Straße nicht viel aus, da das Fahrzeug dann einfach weiter rollt. Bei der Fahrt im Gelände, die in der Regel langsam und mit großen Fahrwiderständen erfolgt, führt jedoch ein solcher Gangwechsel in der Regel dazu, dass das Fahrzeug stehen bleibt. Aus diesem Grund finden sich in Forwardern lastschaltbare oder stufenlose Getriebe, häufig in Form von Hydrostaten. Die Zugkraft-Charakteristik über der Fahrgeschwindigkeit eines solchen hydrostatischen Getriebes zeigt Bild 5. Man erkennt, dass dieses Getriebe die ursprüngliche Forderung bereits recht gut erfüllt. Wir finden einen Gelände- und einen Straßenfahrbereich. In jedem dieser Bereiche passt das Getriebe die Fahrgeschwindigkeit an die

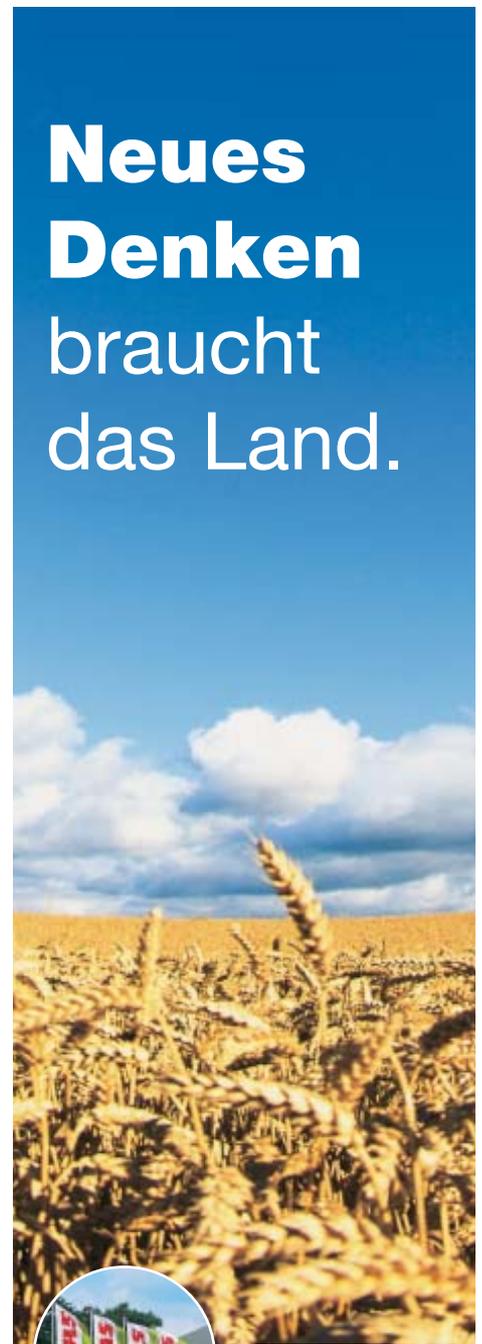
jeweils wirksamen Fahrwiderstände an (dies gilt nur, wenn Getriebe/Motor eine entsprechende Regelung haben und der nutzbare Bereich des Motors nicht überschritten wird; die Auslegung dieser Regelung ist eine der wesentlichen Aufgaben des Fahrzeugherstellers und trägt viel zur Qualität eines Fahrzeugs bei). Die Anpassung geschieht stufenlos und ohne Zugkraftunterbrechung. Dies ist der Grund, warum wir in Forstmaschinen so oft hydrostatische Getriebe finden. Gleichzeitig kommt es aber noch vor, dass Leistungsschwächen bemängelt werden.

### Messungen

Um diesem Phänomen nachzugehen, führte das KWF in Zusammenarbeit mit der Firma Valmet und der DLG Zugkraftmessungen an einem Forwarder (Typ Valmet 840.1) mit einer Motornennleistung von 94 kW und dem Zugkraftmesswagen der DLG durch. Dieses Fahrzeug verfügt über eine Wirbelstrombremse, die es erlaubt, während der Fahrt unterschiedliche Bremskräfte einzustellen und Fahrgeschwindigkeit und Zugkraft zu messen. Das Bremsfahrzeug (Bild 6) musste nun der untersuchte Forwarder über die Betonbahn der DLG ziehen und dabei zeigen, wie viel Kraft er bei welcher Geschwindigkeit noch hatte.

Das Ergebnis dieser Versuchsfahrten ist in Bild 7 dargestellt. Gezeigt sind die Messwerte im Straßengang, die Messwerte im

# Neues Denken braucht das Land.



IHR ERNTE-SPEZIALIST  
**CLAAS**

**Zeitgemäße Kundennähe: Das Servicenetz von CLAAS.**

CLAAS als Ihr Erntespezialist ist der größte Landtechnikerhersteller Europas und zugleich globaler Vordenker. Die wachsende Verantwortung im Umgang mit unseren Ressourcen und die veränderte Weltmarktsituation verlangen modernes Agrarmanagement. In Kooperation mit anderen Anbietern entwickelt CLAAS komplexe Lösungen, die Leistungsstärke intelligent mit Wirtschaftlichkeit und Kundennähe verbinden. So schaffen wir gemeinsam die Basis für eine erfolgreiche Zukunft.

Mehr Info unter:  
**Tel. 05247 12-1144**  
**Fax 05247 12-1164**  
**www.claas.de**

Element	Wirkungs-grad	Leistungs-verlust [kW]	Leistung [kW]
Nennleistung			94,0
Nebenabtriebe		8,0	86,0
Leistung der Hilfspumpen		2,0	84,0
Hydrostatischer Fahrtrieb	0,87	10,9	73,1
Verteilergetriebe	0,96	2,9	70,2
Gelenkwelle	0,97	2,1	68,1
Differential	0,94	4,1	64,0
Bogie (vier Zahnradeingriffe mit je 0,98)	0,92	5,0	59,0
Reifen auf der Straße	0,86	8,3	50,7

Tab. 1: Verlustabschätzung in den Elementen der Leistungsübertragung eines Forwarders

Table 1: Estimate about losses in the elements for power transmission

Rückezugs stark verbessern, fordern ihren Tribut durch die vielen darin laufenden Zahnräder und verbrauchen weitere 5 kW der Motorleistung. Damit stünden zum Antrieb der Räder noch 59 kW zur Verfügung. Doch ehe die Motorleistung tatsächlich in Zugkraft umgewandelt wird, muss sie noch den Reifen passieren. Dabei gehen durch Schlupf und Rollwiderstand ~ 8,3 kW verloren und es stehen schließlich noch etwa 50 kW oder etwas mehr als die Hälfte der Ausgangsleistung zur Verfügung. Würden wir die Fahrt im Gelände zugrunde legen, so würde es sogar noch schlimmer aussehen. Bei den vorliegenden Zugkraftmessungen ist der hier nicht gemessene Reifenschlupf enthalten. Was an Zugkraft oder errechneter Zugleistung ermittelt wurde, enthält also bereits die Schlupfverluste und dürfte im Bereich von 3 bis mindestens 12% gelegen haben. Auf losem/weichen Untergrund wird der Schlupf wesentlich höher liegen.

**Fazit**

Es bleibt festzustellen, dass die Leistungsverluste zwischen Motor und dem Übertragungsort der Leistung auf den Boden erheblich sind. Wichtige Leistungsfresser sind der Hydrostat, die Bogieachsen und die Verluste zwischen den Reifen und Fahrbahn. Bereits bis zu den Reifen geht mehr als ein Drittel der vorhandenen Motorleistung verloren, die dann für den Fahrtrieb nicht mehr zur Verfügung steht. Darüber hinaus ergeben sich durch die hohen Fahrzeuggewichte nicht unerhebliche Rollwiderstandsverluste und die Reifen selber bilden auch eine erhebliche Verlustquelle. Herstellern und Betreibern obliegt es zu versuchen, diese Verluste so weit wie möglich zu minimieren, sei es durch Massenreduzierung (weniger Gewicht heißt weniger Rollwiderstand), Wirkungsgradverbesserungen im Antriebsstrang und Wahl eines optimierten Betriebspunkts für die Reifen durch angepassten Luftdruck.

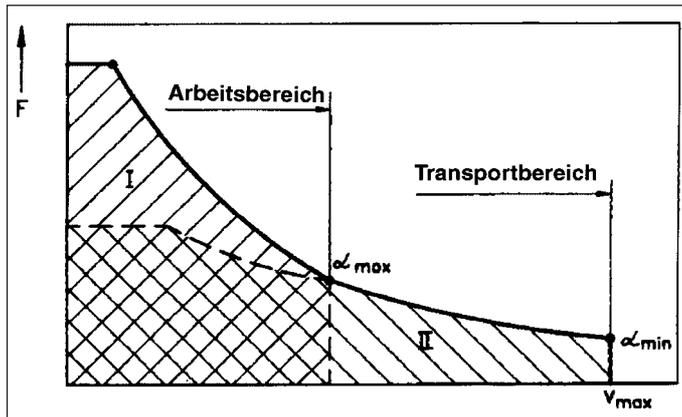


Bild 5: Zugkraftcharakteristik eines hydrostatischen Getriebes (Zugkraft über der Fahrgeschwindigkeit)

Fig. 5: Driveline performance of a hydrostatic transmission (tractive power at travel speed)

Geländegang und die theoretischen Zugkräfte, die sich ergeben, wenn die Zugkräfte vom Straßengang mittels der bekannten Getriebeübersetzung in diejenigen des Geländegangs umgerechnet werden. Dies war nötig, da das Bremsfahrzeug aufgrund seiner Bauweise für die im Forst vorkommenden sehr langsamen Geschwindigkeiten nur eingeschränkt nutzbar war. Im Vergleich zu diesen Charakteristiken ist die ideale verlustlose Kennlinie nach Bild 2 auch eingezeichnet. Wie zu erkennen ist, fehlt hier einiges an Leistung, tatsächlich kommt etwa nur die Hälfte der vom Hersteller genannten Leistung des Motors an den Rädern an.

Wo bleibt der Rest? In Tabelle 1 wurde versucht, eine Abschätzung der Verluste vorzunehmen und zu zeigen, wie viel Motorleistung nach jedem Teil der Kraftübertragung überhaupt noch zur Verfügung steht. Diese Abschätzung wurde aufgrund von Kennwerten aus der Literatur vorgenommen und soll in absehbarer Zeit experimentell untermauert werden. Wo bleibt also die Motorleistung? Zunächst geht Leistung an die Nebenabtriebe verloren. Das sind insbesondere Leistung für Lichtmaschine, Kühlventilator oder Klimakompressor und weitere anzu-treibende Aggregate. Die hier verbrauchte Leistung kann durchaus erheblich sein und nach unserer Aufstellung gehen dadurch mindestens 8 kW verloren. Der hydrostatische Antrieb benötigt ebenfalls Hilfspumpen, deren Leistung hier mit 2 kW angesetzt ist. Ein relativ großer Leistungsfresser ist der Hydrostat selbst, der mit Wirkungsgraden von 0,87 und schlechter in unserem Beispiel



Bild 6: Zugkraftmesswagen der DLG-Prüfstelle Groß-Umstadt

Fig. 6: Tractive power measuring wagon of DLG Test Station Groß-Umstadt

über 10 kW der teuer eingekauften Motorleistung aufzehrt. Das Verteilergetriebe verbraucht kaum Leistung und die Gelenkwelle noch etwas weniger, mehr Leistung geht wieder im Differential verloren. Die Bogieachsen, welche die Geländegängigkeit des

Bild 7: Gemessene Zugkräfte für einen Forwarder über der Fahrgeschwindigkeit im langsamen und im schnellen Gang und ideale Zugkrafthyperbel für Motorleistung

Fig. 7: Tractive measured for a forwarder along travel speed in slow and fast gear and idealistic tractive power hyperbola

