

Transporte im Berggebiet

Geschwindigkeit und Treibstoffverbrauch auf steilen Strassen

Stefan Lauber, Matthias Schick, Isidor Schiess, Edwin Stadler und Ruedi Stark, Agroscope FAT Tänikon, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik, CH-8356 Ettenhausen
E-Mail: stefan.lauber@fat.admin.ch

Die Hanglagen und oftmals steilen Strassen im Berggebiet erfordern eine angepasste Transportmechanisierung. Je nach Bedürfnissen und Parzellenausstattung gilt es beim Kaufentscheid zwischen Transporter- und Traktorkombinationen abzuwägen.

Im Hinblick auf weite Transportdistanzen ist dabei weniger die maximale Geschwindigkeit als der tatsächliche Zeitaufwand von Interesse.

Mit einer Serie von Testfahrten wurden sowohl die durchschnittlich erzielten als auch die neigungsabhängigen Geschwindigkeiten ermittelt. Diese Messungen erlauben unter anderem, die für den Transport einer Lasteinheit notwendige Arbeitszeit für verschiedene Mechanisierungstypen und Nutzlastvolumen zu bestimmen.

Getestet wurden je zwei verschieden starke Traktor- und Transporterkombinationen sowie ein Zweiwegtraktor. Nebst der Geschwindigkeit wurde auch der Treibstoffverbrauch je Tonne Nutzlast in Abhängigkeit von der gewählten Mechanisierung gemessen.

Problemstellung und Zielsetzung

Bei Futterernte und Düngung werden im Berggebiet oftmals weite Fahrdistancen zurückgelegt. Steilheit und Unübersichtlichkeit von Bergstrassen erfordern eine angepasste Fahrweise und führen dazu, dass nur mit eingeschränkter Geschwindigkeit gefahren

werden kann. Abgelegene Flächen auf der Maiensässstufe und die häufig stark verstreute Lage der bewirtschafteten Parzellen binden somit grosse Arbeitskapazitäten für Transport- und Leerfahrten. Für arbeitswirtschaftliche Betrachtungen und Planungsrechnungen im Berggebiet ist es deshalb zentral, sich auf fundierte Zahlen abstützen zu können.

Die bislang verfügbaren Geschwindigkeitsdaten für das Berggebiet (Schick 1995) differenzieren nicht zwischen unterschiedlichen Hangneigungen und Strassenqualitäten, sie sind daher nur beschränkt verwendbar. Zudem fehlen Daten zum Dieserverbrauch im Berggebiet. In einer Serie von Messfahrten wurden für verschiedene Traktor- und Transporterkombinationen sowohl die neigungsabhängige Geschwindigkeit als auch der Dieserverbrauch ermittelt.



Abb. 1: Ein Reform Muli 875 SL mit Druckfassaufbau diente als grössere Transporterkombination.

Inhalt	Seite
Problemstellung und Zielsetzung	1
Versuchsanlage und Vorgehen	2
Abkürzungen	2
Resultate	4
Diskussion	8
Literatur	8

Versuchsanlage und Vorgehen

Versuchsfahrzeuge und Anhängelasten

Der Versuch umfasste je zwei Traktoren und Transporter aus unterschiedlichen Leistungsklassen sowie einen Zweiwegtraktor / Zweiachsmäher (Tab. 1). Um die Fahrzeuge unter realen Bedingungen testen zu können, hatten die Traktoren Güllefässer angehängt. Die Transporter (Abb. 1 und 2) fuhren die Strecken mit montierten Druckfassaufbauten. Der Zweiwegtraktor (Abb. 3) hatte auf einzelnen Fahrten ein Frontmäherwerk mit integriertem Aufbereiter als Zusatzlast vorgehängt. Die Gesamtgewichte der einzelnen Testkombinationen wurden vor Ort auf einer Brückenwaage gemessen (Tab. 2).

Teststrecken

Die Testfahrten fanden auf zwei Strassenabschnitten in den Bündner Gemeinden Mon, Salouf, Surava und Tiefencastel statt (Abb. 4 und 5). Auf dem Abschnitt mit Teerbelag wurden drei verschiedene Distanzen gefahren (T1, T2 und T3), auf der Naturstrasse zwei Distanzen (N1 und N2) (Tab. 3). Die separate Messung auf geteerten Strassen und Naturstrassen war wichtig, da die Rollreibung auf letzteren bedeutend grösser ist. Die längste Teerstrecke führte durch den relativ engen Dorfkern von Mon. Alle anderen Strecken berührten das Siedlungsgebiet nicht. Bei sich überlagernden Strecken wurde jede Distanz separat gefahren, um die Effekte des Anfahrens und Abbremsens mit berücksichtigen zu können. Mit den gewählten Distanzen können sowohl Aussagen zu Transporten auf hofnahe Flächen, im Umkreis von rund 500m, als auch zu Fahrten auf hofferne Parzellen gemacht

Abkürzungen

...	Dieser Tabellenwert wurde weggelassen, weil er nicht erhältlich oder ohne Bedeutung ist.
-	Dieser Tabellenwert ist null (es kommt nichts vor).
R ²	Bestimmtheitsmass, eine statistische Grösse, welche die Güte einer Regression bewertet. Sie gibt jenen Anteil an der Streuung der gemessenen Werte an, der durch die entsprechende Regression erklärt werden kann. Im Optimalfall hat R ² einen Wert von 1.
a	Parameter der modellierten Geschwindigkeit. Einheit: km/h
c	Parameter der modellierten Geschwindigkeit. Einheit: km/h pro % Steigung
AKmin	Arbeitskraftminute
g	Gramm; auch: Erdbeschleunigung
kW	Kilowatt
t	Tonne
tkm	Tonnenkilometer (bezieht sich auf Nutzlasten)
v _{max}	Höchstgeschwindigkeit

Tab. 1: Typenbezeichnung, Maximalgeschwindigkeit (v_{max}) und Nennleistung der eingesetzten Zugfahrzeuge.

Zugfahrzeug	Typ	Nennleistung		
		v _{max} km/h	kW	PS
Traktor 70 kW	New Holland TS 90 Turbo	40	70	95
Traktor 53 kW	Same Dorado 75	40	53	72
Transporter 55 kW	Reform Muli 875 SL	40	55	74
Transporter 34 kW	Aebi TP 47	25	34	45
Zweiwegtraktor	Antonio Carraro Tigretac 5500	30	35	48



Abb. 2: Der Aebi TP 47 mit Druckfassaufbau wurde als kleinere Transporterkombination herangezogen.

Tab. 2: Gewogene Gewichte und Fahrprogramm. Mit Ausnahme des Zweiwegtraktors wurden sämtliche Fahrzeugkombinationen auf allen Strecken mit und ohne Zusatzgewicht getestet.

Zugfahrzeug	Basisgewicht	Zusatzlast	Zusatzgewicht	Gewicht total	Fahrprogramm				
	kg		kg	kg	T1	T2	T3	N1	N2
Traktor 70 kW	7 460	mit vollem 5,0-m ³ -Druckfass mit leerem 5,0-m ³ -Druckfass	4 780 –	12 240 7 460	ja ja	ja ja	ja ja	ja ja	ja ja
Traktor 53 kW	4 440	mit vollem 2,7-m ³ -Druckfass mit leerem 2,7-m ³ -Druckfass	2 660 –	7 100 4 440	ja ja	ja ja	ja ja	ja ja	ja ja
Transporter 55 kW	3 200	mit vollem 2,1-m ³ -Druckfassaufbau mit leerem 2,1-m ³ -Druckfassaufbau	2 140 –	5 340 3 200	ja ja	ja ja	ja ja	ja ja	ja ja
Transporter 34 kW	2 340	mit vollem 1,7-m ³ -Druckfassaufbau mit leerem 1,7-m ³ -Druckfassaufbau	1 700 –	4 040 2 340	ja ja	ja ja	ja ja	ja ja	ja ja
Zweiwegtraktor	1 720	mit 2,6-m-Frontmäherwerk/Aufbereiter ohne Zusatzlast	570 –	2 290 1 720	ja nein	ja nein	ja nein	nein ja	nein ja



Abb. 3: Als Zweiachsmäherkombination wurde der Zweiwegtraktor Antonio Carraro Tigretrac 5500 mit und ohne 2,6 m-Frontmäherwerk eingesetzt.

werden, die beispielsweise in anderen Gemeinden oder auf der Maiensässstufe liegen.

Innerhalb der einzelnen Strecken wurden mehrere verschieden steile Teilabschnitte ausgeschieden und deren Neigung gemessen. Diese Teilabschnitte waren innerhalb der geteerten Strecken jeweils 100 m lang, auf der Naturstrasse je 25 m (Tab. 3). Die Strecke T3 weist so beispielsweise 21 Teilabschnitte mit einer Länge von je 100 m und Neigungen zwischen 2,0 % und 12,7 % auf. Die in der Naturstrasse quer angebrachten Entwässerungsrinnen haben einen spürbaren Einfluss auf das Fahrverhalten und wurden deshalb mit erfasst.

Die mittlere Neigung der geteerten Strasse (Abb. 6) war mit 8,8 % erwartungsgemäss geringer als bei der Naturstrasse mit 14,3 % (Abb. 7). Bei den geteerten Strecken T2 und T3 gilt es zu beachten, dass sie einen Neigungswechsel aufweisen. Teilabschnitte mit negativer Neigung wurden bei der Bestimmung der hangneigungsabhängigen Geschwindigkeit immer als Talfahrten gewertet.

Fahrprogramm

Die Fahrzeugkombinationen mit Traktor und Transporter wurden auf sämtlichen Strecken sowohl mit vollem als auch mit leerem Druckfass eingesetzt. Der Zweiwegtraktor hatte auf den geteerten Strecken jeweils ein Frontmäherwerk mit Aufbereiter angehängt, fuhr die Naturstrassenstrecken jedoch ohne Zusatzbelastung (Tab. 2). Aus Zeit- und Kostengründen konnte mit jeder Kombination nur einmal gefahren werden, wobei sowohl die Berg- als auch die Talfahrt für die Messung herangezogen und separat ausgewertet wurden.

Um den Fahrereinfluss auf die Resultate gering zu halten, wurden sämtliche Versuche mit demselben routinierten Fahrer durchgeführt. Dieser kannte die Strecken bereits vor den ersten Messfahrten, womit



Abb. 4: Teststrecken auf der Teerstrasse zwischen Tiefencastel, Mon und Saluf.



Abb. 5: Teststrecken auf der Maiensäss- und Alpstrasse (Naturstrasse) südlich von Surava.

Tab. 3: Innerhalb der fünf Teststrecken wurden die Fahrzeiten von Teilabschnitten, deren Neigung bekannt war, einzeln gemessen. Die Min.- und Max.-Spalten bezeichnen den jeweils flachsten bzw. steilsten Teilabschnitt innerhalb der Strecke. Zusätzlich wurde die Anzahl Querrinnen erhoben.

Strecke	Qualität	Distanz total m	Aufteilung –	Teilabschnitte		Neigung mittlere %	Querrinnen Stück
				max. %	min. %		
T1	geteert	505	3 x 100 m	4.5	4.5	4.6	...
T2	geteert	1 501	12 x 100 m	10.0	2.0	6.1 –4.6	...
T3	geteert	5 877	21 x 100 m	12.7	2.0	8.8 –4.6	...
N1	Naturbelag	598	7 x 25 m	17.1	9.4	14.1	38
N2	Naturbelag	1 751	15 x 25 m	18.1	9.4	14.3	54

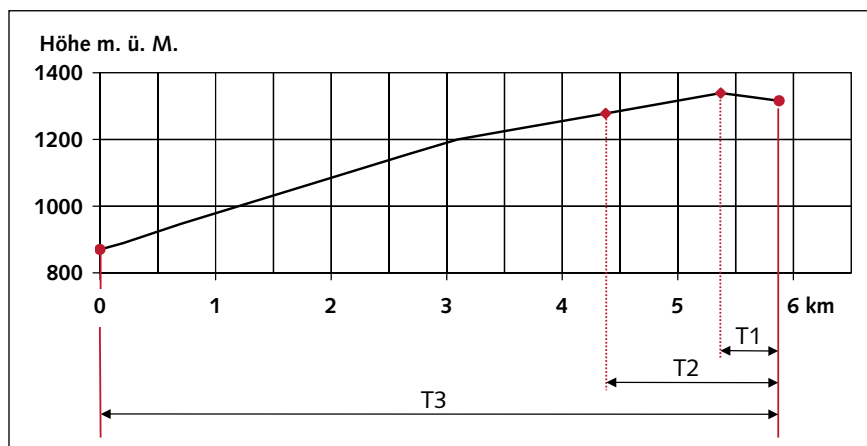


Abb. 6: Die Teerstrasse weist eine mittlere Neigung von 8,8 % auf. Die Strecken T2 und T3 beinhalten ein Teilstück mit Gefälle. Dies ist realitätsnah, da solch lange Strecken selten ausschliesslich ansteigend sind.

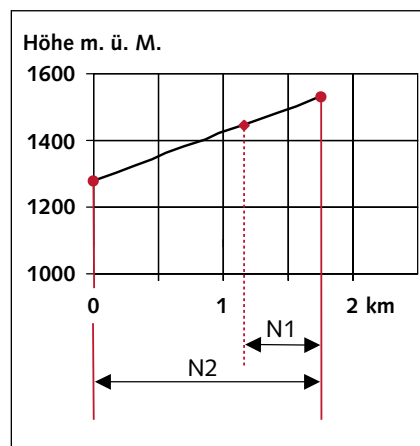


Abb. 7: Die Naturstrasse ist erwartungsgemäss steiler als die Teerstrasse und weist eine mittlere Neigung von 14,3 % auf.

er bei den ersten Fahrten nicht überdurchschnittlich vorsichtig fahren musste. Die Fahrten wurden im Winterhalbjahr auf trockenen, frost- und schneefreien Strassen durchgeführt.

Messungen

Die Fahrzeiten wurden von einer jeweils mitfahrenden zweiten Person manuell gestoppt und in einem Handheld-Computer gespeichert. Dabei wurden sowohl die Zeiten für die gesamte Strecke als auch für die darin liegenden Teilabschnitte erfasst. Bei einer Geschwindigkeit von 25 km/h resultiert auf der kürzesten Strecke bei einer allfällig verzögerten Zeitmessung von einer Sekunde eine Unterschätzung der Geschwindigkeit um 0,34 km/h, was für die vorliegende Fragestellung genügend genau ist.

Die Distanzmessung der gesamten Strecken und der Teilabschnitte erfolgte mit einem Laufrad. Die Steigung der einzelnen Teilabschnitte wurde mit einem laserbasierten Distanz- und Neigungsmesser in einem zweifach wiederholten Dreipunktverfahren bestimmt.

Für die Bestimmung des Treibstoffverbrauchs wurde an den Fahrzeugen ein Zusatztank montiert, der am Anfang und am Ende der Teststrecke mittels Präzisionswaage gewogen wurde. Diese Methode setzt eine minimale Betriebstemperatur der Zugfahrzeuge und eine minimale gefahrene Distanz voraus, um messbare Unterschiede zwischen den einzelnen Testfahrten bestimmen zu können. Diese Messungen wurden daher nur ab Distanzen von mindestens 1500 m durchgeführt.

Resultate

Physikalische Grundlage

Die theoretische Geschwindigkeit einer Fahrzeugkombination hängt im Wesentlichen von fünf Faktoren ab (Stadler et al. 2004):

- Leistung des Zugfahrzeuges
- Zu transportierende Masse
- Steigung der Strasse
- Art des Strassenbelags
- Höchstgeschwindigkeit des Zugfahrzeuges

Weil jedoch auch Strassenverlauf, Übersichtlichkeit und Unebenheiten der Strasse usw. auf das Fahrverhalten einwirken, wird die theoretisch maximale Geschwindigkeit (Abb. 8, 9 und 10) in der Realität nie erreicht. Bei der Bergfahrt kann die Leistung

für das Beschleunigen nach unübersichtlichen Kurven bedeutend sein. Bei der Talfahrt ist die Leistung kaum limitierend, wird doch in der Regel so langsam gefahren, dass spätestens auf halbe Sichtdistanz gebremst werden kann.

Durchschnittliche Geschwindigkeiten

Für verschiedene Betrachtungen interessiert weniger der detaillierte Verlauf der Geschwindigkeitsfunktion als die Durchschnittsgeschwindigkeit für ausgesuchte, typische Distanzen, die auch das Anfahren und Abbremsen berücksichtigt (Tab. 4 und 5).

Auf geteerten Strassen wurde im Schnitt und auf der langen Strecke (T3) talwärts generell schneller gefahren als bergwärts, wobei die Unterschiede beim jeweils stärker motorisierten Traktor und Transporter

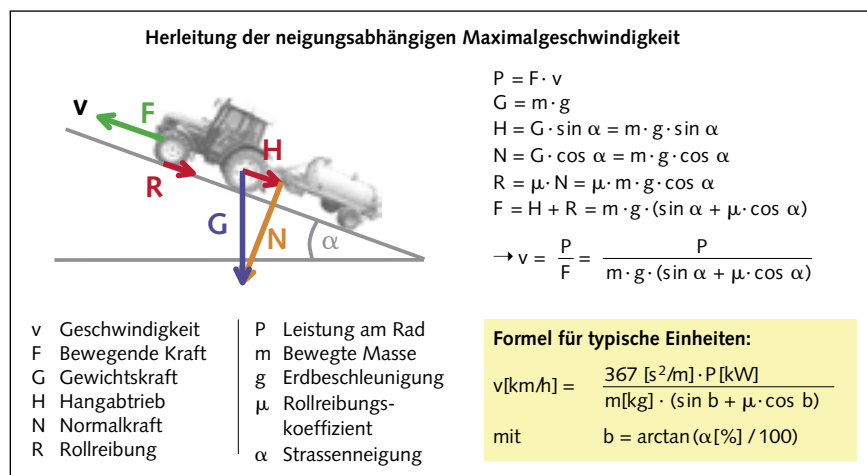


Abb. 8: Herleitung der neigungsabhängigen Maximalgeschwindigkeit aus der physikalischen Theorie.

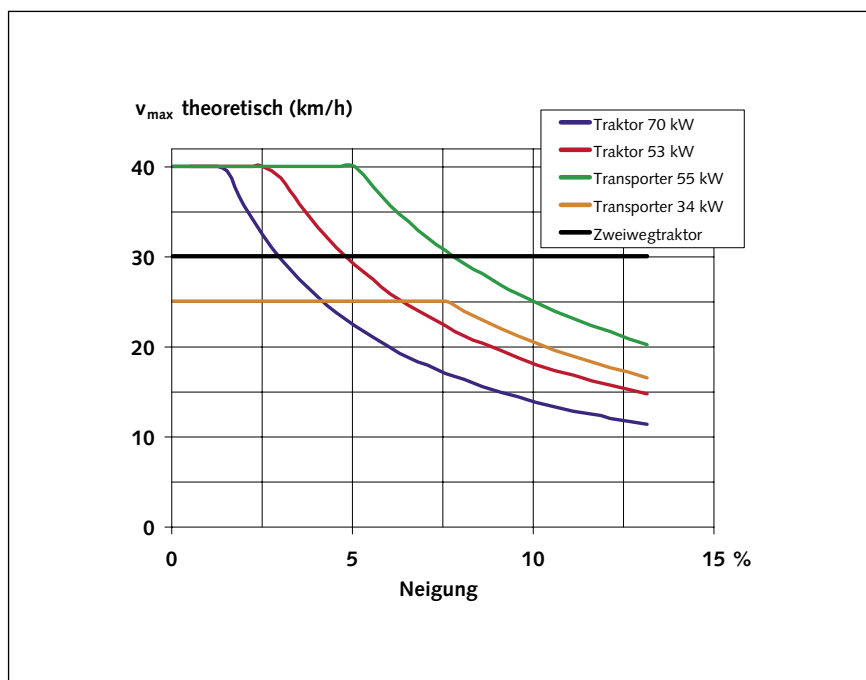


Abb. 9: Theoretische, neigungsabhängige Maximalgeschwindigkeit der beladenen Fahrzeugkombinationen bei der Bergfahrt auf Teerstrassen (angenommener Rollreibungskoeffizient $\mu = 0,03$; 85 % der Nennleistung am Rad). Nach oben ist die Geschwindigkeit durch die maximalen Fahrzeuggeschwindigkeiten begrenzt.

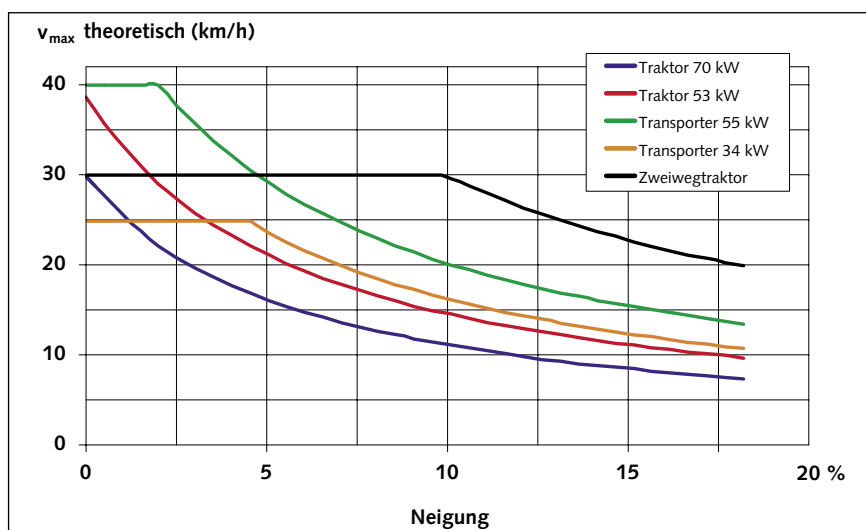


Abb. 10: Theoretische, neigungsabhängige Maximalgeschwindigkeit der beladenen Fahrzeugkombinationen bei der Bergfahrt auf Naturstrassen (angenommener Rollreibungskoeffizient $\mu = 0,06$; 85 % der Nennleistung am Rad). Nach oben ist die Geschwindigkeit durch die maximalen Fahrzeuggeschwindigkeiten begrenzt.

auf Leerfahrten aufgrund der höheren realen Leistung nur gering sind. Diese Aussagen lassen sich für die Strecken T1 und T2 nicht machen. Beim Vergleich der beiden Traktoren fällt auf, dass der Kraftgewinn durch die höhere Leistung in den meisten Fällen durch die höhere Nutzlast überkompensiert wird, der stärkere Traktor also langsamer vorankommt. Die im Verhältnis geringen Unterschiede zwischen Berg- und Talfahrt auf der Strecke T1 sind mit der nur geringen mittleren Steigung von 4,6 % zu erklären.

Auf den Naturstrecken N1 und N2 verhält es sich umgekehrt. Die unübersichtliche Strassensituation führt dazu, dass talwärts langsamer gefahren wird als bergwärts. Diese Aussage ist für den kleineren der beiden untersuchten Transporter mit Zuladung nicht gültig, da er die Leistungsgrenze bergwärts schnell erreicht, talwärts aber im Gegensatz zu den Traktor-Anhänger-Kombinationen immer noch höhere Geschwindigkeiten erlaubt. Zudem ist dieser kleinere Transporter das einzige untersuchte Fahrzeug, das nur ein einfaches Schaltgetriebe ohne jegliche unter Last schaltbaren Unterstellungsmöglichkeiten aufweist. Bei allen anderen Fahrzeugen waren Lastschaltgetriebe vorhanden.

Zeitbedarf beim Transporteinsatz

Beim Investitionsentscheid steht bei der Bergmechanisierung nebst finanziellen Betrachtungen weniger die durchschnittliche Geschwindigkeit des anzuschaffenden Fahrzeuges als der geschätzte Zeitaufwand für den Einsatz bei der Futterernte und beim Ausbringen der Hofdünger im Vordergrund. Die Unterschiede zwischen den stärkeren und schwächeren Mechanisierungstypen und die damit einhergehenden möglichen Nutzlasten werden in Tabellen 4 und 5 deutlich: Auf geteerten Strassen kann durch den Ersatz eines kleinen Transporters mit einem 1,7 m³-Fass durch einen grösseren Transporter mit einem 2,1 m³-

zu Abb 8: Die bewegendende Kraft F ist das Resultat der momentanen Leistung am Rad (zirka 85 % der Nennleistung) und dient dazu, Hangabtrieb H und Rollreibung R zu kompensieren. Der Rollreibungskoeffizient μ hängt vom Strassenbelag ab. Für Teerstrassen wird ein Wert von 0,03 eingesetzt, für Naturstrassen 0,06, auf Wiesland gar 0,09.

In der gelb hinterlegten Formel ist die konstante Erdbeschleunigung g (9,81 m/s²) bereits verrechnet und sind die Einheiten so angepasst, dass die Geschwindigkeit in Stundenkilometern resultiert, wenn man die Leistung am Rad in Kilowatt und das Gesamtgewicht in Kilogramm einfügt. Die Neigung des zu berechnenden Strassenstücks muss dabei von Prozent in Grad umgerechnet werden, wozu die Zwischengröße b dient. Rechenbeispiel: Ein beladener Transporter mit einer Nennleistung von 55 kW (ca. 85 % am Rad: 46,75 kW) und einem Totalgewicht von 5340 kg kann auf einem 10 % geneigten Strassenstück bergwärts höchstens eine Geschwindigkeit von 20,1 km/h (Naturstrasse) bzw. 24,8 km/h (Teerstrasse) erreichen.

Tab. 4: Mittlere Geschwindigkeit (km/h) und mittlerer Zeitbedarf pro Tonne bewegte Nutzlast und Kilometer (AKmin/tkm) auf Teerstrassen. Die Mittelwerte in den letzten vier Spalten sind proportional zur Streckenlänge gewichtet. Das heisst, dass die Strecke T2 beispielsweise fast doppelt so stark wie die Strecke T1 in die Mittelwertberechnung eingeflossen ist.

Zugfahrzeug	Gewicht	Teerstrecke T1 (505 m)				Teerstrecke T2 (1501 m)				Teerstrecke T3 (5877 m)				Mittelwert, gewichtet			
		Bergfahrt		Talfahrt		Bergfahrt		Talfahrt		Bergfahrt		Talfahrt		Bergfahrt		Talfahrt	
		km/h	AKmin/tkm	km/h	AKmin/tkm	km/h	AKmin/tkm	km/h	AKmin/tkm	km/h	AKmin/tkm	km/h	AKmin/tkm	km/h	AKmin/tkm	km/h	AKmin/tkm
Traktor 70 kW	12 240	22.2	0.6	25.0	0.5	19.4	0.6	21.4	0.6	15.4	0.8	19.4	0.6	16.6	0.8	20.1	0.6
	7 460	28.6	–	26.1	–	26.1	–	25.0	–	23.1	–	26.1	–	24.0	–	25.9	–
Traktor 53 kW	7 100	23.1	1.0	24.0	0.9	20.7	1.1	21.4	1.1	17.6	1.3	20.0	1.1	18.5	1.2	20.5	1.1
	4 440	27.3	–	27.3	–	26.1	–	27.3	–	23.1	–	28.6	–	23.9	–	28.3	–
Transporter 55 kW	5 340	30.0	0.9	31.6	0.9	30.0	0.9	30.0	0.9	25.0	1.1	28.6	1.0	26.3	1.1	29.1	1.0
	3 200	37.5	–	35.5	–	33.3	–	35.3	–	33.3	–	35.3	–	33.6	–	35.3	–
Transporter 34 kW	4 040	22.2	1.6	22.2	1.6	20.7	1.7	18.8	1.9	13.3	2.7	18.8	1.9	15.3	2.3	19.0	1.9
	2 340	24.0	–	25.0	–	24.0	–	26.1	–	22.2	–	26.1	–	22.7	–	26.0	–
Zweiwegtraktor	2 290	25.0	–	27.3	–	26.1	–	26.1	–	18.2	–	25.0	–	20.1	–	25.4	–
	1 720	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Fass die pro Tonne Nutzlast und Kilometer Fahrtdistanz nötige Transportzeit (AKmin/tkm) dank zusätzlichem Volumen (+ 29 %) und höherer Geschwindigkeit (bergwärts: + 53 %, talwärts: + 72 %) halbiert werden. Auf der Naturstrasse fällt der Unterschied mit rund 40 % etwas tiefer aus.

Beim Wechsel von der Traktorkombination mit 2,7 m³-Fass zu einer Kombination mit 5,0 m³-Fass (+ 85 %) resultiert auf der Teerstrasse ein Zeitgewinn von rund 40 %, auf der Naturstrasse von rund 30 % pro Tonnenkilometer (tkm).

Zur Verdeutlichung wird als typisches Beispiel eine Fahrt vom Hof zu einer sechs Kilometer entfernten Fläche auf der Maiensässstufe berechnet, die auf den letzten 1000 Metern auf Naturstrassen verläuft, ansonsten aber auf Teerstrassen (Tab. 6). Je nach gewählter Fahrzeugkombination ist mit neun (100 %) bis 25 Minuten (177 %) reiner Fahrzeit pro Tonne bzw. pro Kubikmeter Gülle zu rechnen.

Neigungsabhängige Geschwindigkeiten

Die Auswertung der Messungen innerhalb der 15 bzw. 21 Teilabschnitte erlaubt die Modellierung von neigungsabhängigen Geschwindigkeitsfunktionen. Durch die teilweise Mehrfachbefahrung einzelner Teilabschnitte besteht die Datengrundlage auf den Teerstrassen aus je 36, auf der Naturstrasse aus je 22 Messwerten. Der aufgrund der Versuchsanlage relativ geringe Umfang der Datengrundlage erfordert eine kritische Betrachtung der Resultate. Die in Tabelle 7 dargestellten Ergebnisse sind für Teerstrassen nur für Steigungen von 2,0 % bis 12,7 %, für Naturstrassen von 9,4 % bis 18,1 % abgestützt.

Die Funktionen in der Form $v = c - a \cdot \text{Neigung}$ beruhen auf Regressionsrechnungen. Dieser Form wurde gegenüber

Tab. 5: Mittlere Geschwindigkeit (km/h) und mittlerer Zeitbedarf pro Tonne bewegte Nutzlast und Kilometer (AKmin/tkm) auf Naturstrassen. Die Mittelwerte in den letzten vier Spalten sind wie in Tabelle 4 längenproportional gewichtet.

Zugfahrzeug	Gewicht	Naturstrecke N1 (598 m)				Naturstrecke N2 (1751 m)				Mittelwert, gewichtet			
		Bergfahrt		Talfahrt		Bergfahrt		Talfahrt		Bergfahrt		Talfahrt	
		km/h	AKmin/tkm	km/h	AKmin/tkm	km/h	AKmin/tkm	km/h	AKmin/tkm	km/h	AKmin/tkm	km/h	AKmin/tkm
Traktor 70 kW	12 240	11.8	1.1	9.5	1.3	8.1	1.5	7.5	1.7	9.0	1.4	8.0	1.6
	7 460	13.6	–	12.5	–	13.6	–	12.5	–	13.6	–	12.5	–
Traktor 53 kW	7 100	11.3	2.0	9.5	2.4	10.9	2.1	11.1	2.0	11.0	2.1	10.7	2.1
	4 440	14.3	–	13.0	–	14.1	–	14.0	–	14.2	–	13.7	–
Transporter 55 kW	5 340	15.0	1.9	13.3	2.1	15.0	1.9	13.6	2.1	15.0	1.9	13.5	2.1
	3 200	15.0	–	14.0	–	15.0	–	14.3	–	15.0	–	14.2	–
Transporter 34 kW	4 040	10.2	3.5	11.3	3.1	9.0	3.9	12.2	2.9	9.3	3.8	12.0	2.9
	2 340	10.9	–	10.5	–	13.0	–	12.5	–	12.5	–	12.0	–
Zweiwegtraktor	2 290	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	1 720	15.8	–	15.4	–	16.2	–	16.2	–	16.1	–	16.0	–

Tab. 6: Zeitbedarf für den Transport von einem Fass Gülle auf die Maiensässstufe (5000 m Teerstrasse plus 1000 m Naturstrasse). Die Bergfahrt erfolgt mit gefülltem, die Talfahrt mit leerem Fass. In der letzten Spalte wird als vergleichbare Grösse der Zeitbedarf für eine Tonne Gülle ausgewiesen.

Zugfahrzeug	Nutzlast	Bergfahrt (voll)		Talfahrt (leer)		total	pro Tonne
		5 km Teer	1 km Natur	5 km Teer	1 km Natur		
		AKmin	AKmin	AKmin	AKmin		
Traktor 70 kW	4 780	18.1	6.6	11.6	4.8	41.1	8.6
	2 660	16.2	5.5	10.6	4.4	36.6	13.8
Transporter 55 kW	2 140	11.4	4.0	8.5	4.2	28.1	13.1
	1 700	19.6	6.4	11.5	5.0	42.6	25.1

einer rein auf der physikalischen Theorie abgestützten Form (Abb. 8) der Vorzug gegeben, da sie die Messwerte besser nachbilden kann. Der fixe Term c (km/h) tritt in jeder modellierten Funktion auf, der neigungsabhängige Term a (km/h pro % Steigung) kann nur auf geteerten Strassen bergwärts generell als relevant betrachtet werden (Abb. 11). Bei Talfahrten auf Teerstrassen spielt die Neigung nur bei beladenen Fahrzeugen (ohne den Zweiwegtraktor) eine signifikante Rolle und hängt dabei eng mit dem Verhältnis zwischen Leistung und bewegtem Gesamtgewicht zusammen. In jenen Fällen, in denen der neigungsabhängige Term a signifikant ist, kann er zwischen 16 % und 76 % der Einflüsse auf die Geschwindigkeit erklären.

Auf der Naturstrasse ist in der hier vorgestellten Versuchsanlage keine Abhängigkeit der Geschwindigkeit von der Neigung nachweisbar (Abb. 12). Andere Einflussfaktoren wie die Anzahl der Querrinnen oder die Übersichtlichkeit der Strasse haben einen deutlich höheren Einfluss auf die Geschwindigkeit.

Durchschnittlicher Treibstoffverbrauch

Tabelle 8 zeigt den Dieselbedarf für die einzelnen Fahrten, je Kilometer Fahrt und je Tonnenkilometer. Auf Bergfahrten müssen auf geteerten Strassen zwischen 120 g und 251 g Diesel pro gefahrenen Kilome-

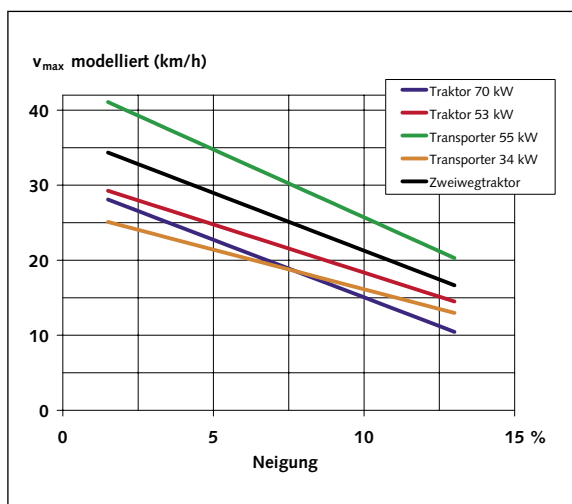


Abb. 11: Modellierter, neigungsabhängiger Maximalgeschwindigkeit der beladenen Fahrzeugkombinationen bei der Bergfahrt auf Teerstrassen.

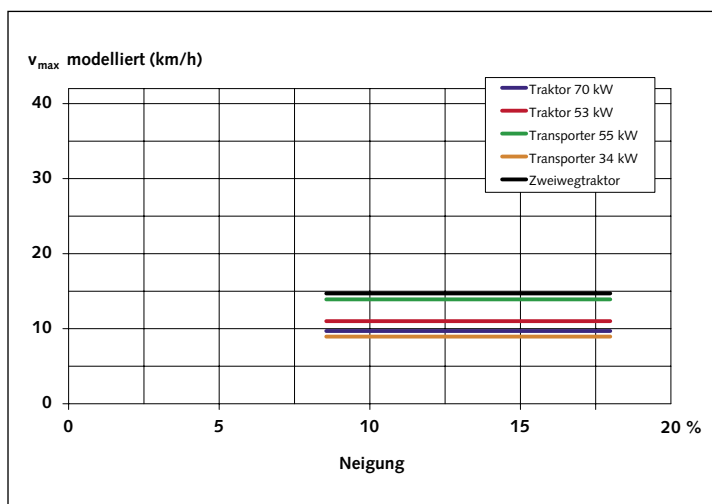


Abb. 12: Modellierter, neigungsabhängiger Maximalgeschwindigkeit der beladenen Fahrzeugkombinationen bei der Bergfahrt auf Naturstrassen (Zweiwegtraktor unbeladen).

ter und Tonne Nutzlast eingesetzt werden (1,4 dl bis 3,0 dl). Auf der Naturstrasse liegen die Verbrauchswerte mit 307 g bis 452 g (3,7 dl bis 5,4 dl) aufgrund der steileren Strassenlage und der grösseren Rollreibung deutlich höher. Den mit 452 g höchsten Verbrauch je Tonnenkilometer hat die leichter motorisierte Traktorvariante.

Der Treibstoffbedarf der jeweils stärker motorisierten Traktor- und Transporterkombinationen je Tonnenkilometer ist tiefer als bei den schwächer motorisierten Kombinationen. Auf Bergfahrten beträgt die Treibstoffeinsparung bei einem Wechsel zur stärkeren Mechanisierung zwischen 13 % und 31 %.

Nimmt man zur Verdeutlichung dasselbe Beispiel einer Fahrt vom Hof zu einer sechs Kilometer entfernten Fläche auf der Maisenssstufe, wird pro Tonne Gülle zwischen 1365 g (100 %) und 1811 g (133 %) Diesel verbraucht, was einem Dieselverbrauch von 27 bis 36 Litern pro 100 km entspricht.

Tab. 7: Aus Regressionsrechnungen bestimmte Geschwindigkeitsfunktionen in der Form $v \text{ [km/h]} = c \text{ [km/h]} - a \text{ [km/h/\%]} \cdot \text{Neigung [\%]}$. Die hangneigungsabhängige Geschwindigkeitsabnahme a tritt ausschliesslich auf Teerstrassen und primär bei relativ tiefen Leistungs-Gewichts-Verhältnissen auf. Der Erklärungsanteil (R^2) der Neigungskomponente an der Geschwindigkeit beträgt dabei zwischen 16 % und 76 %. Wo für a kein Wert angegeben ist, kann von einer konstanten, neigungsunabhängigen Geschwindigkeit c ausgegangen werden.

Zugfahrzeug	Gewicht	Leistung	Teerstrasse							Naturstrasse	
			Bergfahrt			Talfahrt				Berg-	Tal-
			c	a	R ²	c	a	R ²		fahrt	fahrt
	kg	kW	kW/t	km/h	km/h / %	–	km/h	km/h / %	–	km/h	km/h
Traktor 70 kW	12 240	70	5.7	30.4	1.5	0.76	29.7	1.0	0.67	9.7	10.0
	7 460	70	9.4	33.7	0.9	0.69	27.1	–	–	13.8	12.6
Traktor 53 kW	7 100	53	7.5	31.2	1.3	0.72	27.9	0.7	0.40	11.2	10.0
	4 440	53	11.9	41.9	2.1	0.63	29.4	–	–	14.3	13.2
Transporter 55 kW	5 340	55	10.3	43.8	1.8	0.62	37.3	0.7	0.17	13.8	12.7
	3 200	55	17.2	43.0	0.7	0.16	37.2	–	–	12.6	13.8
Transporter 34 kW	4 040	34	8.4	26.7	1.1	0.36	26.4	0.8	0.16	9.3	11.4
	2 340	34	14.5	25.3	–	–	27.2	–	–	10.5	11.9
Zweiwegtraktor	2 290	35	15.3	36.7	1.5	0.52	29.6	–	–	...	...
	1 720	35	20.3	...	...	...	...	...	...	14.6	15.5

Tab. 8: Dieselverbrauch (g) für die gesamte Strecke und je Kilometer (g/km). Als vergleichbare Grösse ist auch der Dieselbedarf (g/tkm) pro Tonne bewegte Nutzlast und Kilometer angegeben.

Zugfahrzeug	Gewicht	Teerstrecke T2 (1501 m)						Teerstrecke T3 (5877 m)						Naturstrecke N2 (1751 m)					
		Bergfahrt			Talfahrt			Bergfahrt			Talfahrt			Bergfahrt			Talfahrt		
	kg	g	g / km	g / tkm	g	g / km	g / tkm	g	g / km	g / tkm	g	g / km	g / tkm	g	g / km	g / tkm	g	g / km	g / tkm
Traktor 70 kW	12 240	917	611	128	410	273	57	5 678	966	202	557	95	20	2 599	1 484	311	34	19	4
	7 460	539	359	–	295	197	–	3 242	552	–	418	71	–	1 586	906	–	40	23	–
Traktor 53 kW	7 100	635	423	159	319	213	80	3 923	668	251	408	69	26	2 106	1 203	452	58	33	12
	4 440	450	300	–	246	164	–	2 662	453	–	406	69	–	1 278	730	–	17	10	–
Transporter 55 kW	5 340	386	257	120	195	130	61	2 471	420	196	277	47	22	1 150	657	307	15	9	4
	3 200	283	189	–	149	99	–	1 628	277	–	251	43	–	749	428	–	17	10	–
Transporter 34 kW	4 040	394	262	154	179	119	70	2 499	425	250	258	44	26	1 217	695	409	59	34	20
	2 340	274	183	–	157	105	–	1 433	244	–	234	40	–	632	361	–	38	22	–
Zweiwegtraktor	2 290	335	223	–	203	135	–	1 885	321	–	397	68	–	–	–	–	–	–	–
	1 720	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	694	396	–	156	89	–

Diskussion

Die auf Testfahrten ermittelten Werte können für arbeitswirtschaftliche Berechnungen herangezogen werden, wenn die Fahrgeschwindigkeit landwirtschaftlicher Fahrzeuge in Abhängigkeit von bekannten Einflussgrössen wie Strassenneigung,

Nutzlast, Gesamtgewicht, Fahrstrecke oder Qualität des Strassenbelags berücksichtigt werden soll.

Die Unterschiede des Transportzeitaufwandes zwischen den einzelnen Mechanisierungskombinationen sind dabei gross (Abb. 13). Insbesondere zur Zeit der Futterernte, in der die verfügbaren Arbeitskräfte ausgelastet sind und Wetterumschläge einen schnellen Abtransport

nötig machen, ist ein Zeitgewinn oftmals wünschenswert. Die Traktorkombination weist dabei dank grossem Nutzlastvolumen und starker Motorisierung die beste Voraussetzung auf. Wo der Einsatz eines Traktors mit Anhänger aufgrund der steilen Lage nicht mehr möglich ist, kann auch der Wechsel von einem kleinen Transporter ohne Lastschaltgetriebe zu einem stärkeren Modell, welches unter Last schaltbar ist, eine massive Zeitersparnis bringen.

Der Treibstoffbedarf fällt vor allem bergwärts, unter Last ins Gewicht. Auch hier birgt der Wechsel von einer schwächeren zu einer stärkeren Mechanisierung mit grösserer Nutzlast Einsparungsmöglichkeiten (Abb. 14).

Zeit- und Treibstoffersparnis dürfen aber nicht darüber hinwegtäuschen, dass eine stärkere Mechanisierung nicht nur Vorteile mit sich bringt. Schlecht ausgenützte, kostspielige Maschinen können das landwirtschaftliche Einkommen im Berggebiet, in dem der Anteil der Eigenmechanisierung an den Fremdkosten durchschnittlich bei über 20 % liegt, stark negativ beeinflussen. Ein Blick in den FAT-Bericht «Maschinenkosten» (Ammann et al. 2005) und ein kritisches Hinterfragen der dort zugrunde gelegten Abschreibungsdauer und jährlichen Auslastung für den eigenen Betrieb sind für einen Investitionsentscheid unabdingbar.

Tab. 9: Dieselverbrauch für den Transport von einem Fass Gülle auf die Maiensässstufe (5000 m Teerstrasse plus 1000 m Naturstrasse). Die Bergfahrt erfolgt mit gefülltem, die Talfahrt mit leerem Fass. Für die Teerstrasse wurden die längengewichteten Verbrauchswerte der Messungen T2 und T3 eingesetzt. In der letzten Spalte wird als vergleichbare Grösse der Dieselbedarf pro Tonne transportierter Gülle ausgewiesen.

Zugfahrzeug	Nutzlast	Bergfahrt (voll)		Talfahrt (leer)		total	pro Tonne
		5 km Teer	1 km Natur	5 km Teer	1 km Natur		
	kg	g	g	g	g	g	g/t
Traktor 70 kW	4 780	4 469	1 484	655	19	6 628	1 387
Traktor 53 kW	2 660	3 089	1 203	493	33	4 817	1 811
Transporter 55 kW	2 140	1 936	657	320	9	2 921	1 365
Transporter 34 kW	1 700	1 961	695	296	34	2 985	1 756

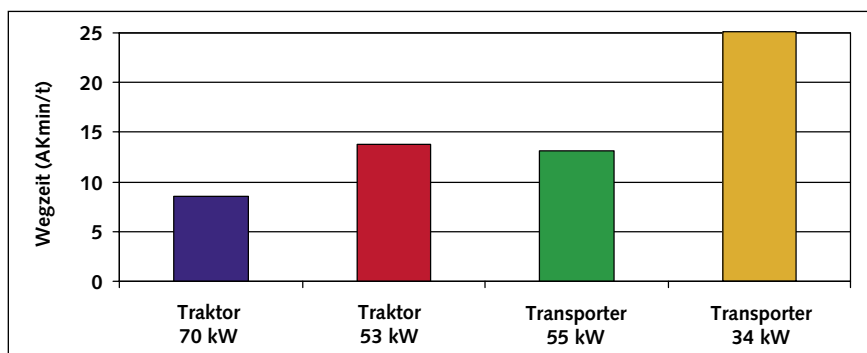


Abb. 13: Zeitbedarf für einen 6 km-Transport von einer Tonne Gülle auf die Maiensässstufe (5000 m Teerstrasse plus 1000 m Naturstrasse) unter der Annahme, dass das Fassvolumen voll ausgenützt wird (Werte aus Tabelle 6).

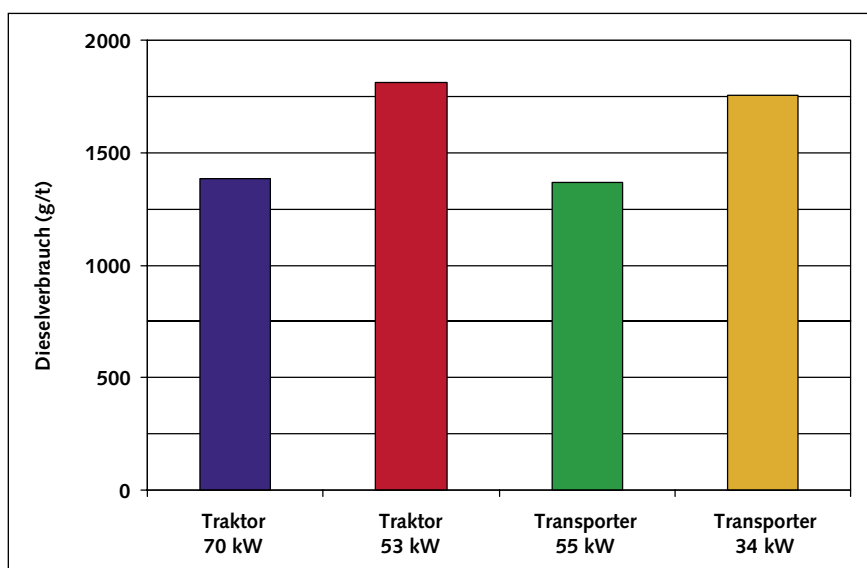


Abb. 14: Dieselverbrauch bei einem 6 km-Transport von einer Tonne Gülle auf die Maiensässstufe (5000 m Teerstrasse plus 1000 m Naturstrasse) unter der Annahme, dass das Fassvolumen voll ausgenützt wird (Werte aus Tabelle 9).

Literatur

- Ammann H. (Redaktion), 2005. Maschinenkosten 2005. Kostenansätze Gebäude und mechanische Einrichtungen. FAT-Berichte Nr. 621.
- Schick M., 1995. Arbeit auf dem Berggebiet. Zeitbedarf für Rohfutter-Konservierungsverfahren. FAT-Berichte Nr. 472.
- Stadler E., Schiess I. und Ammann H., 2004. Transportleistung und -kosten. Einfluss von Traktorgrösse und Höchstgeschwindigkeit. FAT-Berichte Nr. 611.