

Universität für Bodenkultur Wien

University of Natural Resources and Life Science, Vienna



Department für Nachhaltige Agrarsysteme

Institut für Landtechnik



Untersuchung des Kraftstoffverbrauchs in der 75 kW Traktorenklasse mit einem leistungsverzweigten und lastschaltbaren Getriebe

Masterarbeit

an der Universität für Bodenkultur

vorgelegt von

Georg Gastinger Bakk. techn.

betreut und begutachtet von

Ao. Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Herbert Weingartmann
Univ.Ass. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Gerhard Moitzi

Wien, im November 2011



Danksagung

Bei der Durchführung des Versuchs und der vorliegenden Arbeit wurde ich von vielen Personen unterstützt.

Ich möchte mich besonders bei meinen Eltern und meiner ganzen Familie, die mir das Studium ermöglicht und mich dabei in jeder Weise unterstützt haben, bedanken.

Für den fachlichen Rat und die zahlreichen anregenden Diskussionen danke ich meinen Studienkollegen.

Für die Hilfe bei Planung und Erstellen der Arbeit bedanke ich mich ganz herzlich bei meinen Betreuern, Herrn Gerhard Moitzi und Herrn Herbert Weingartmann sowie bei Herrn Karl Refenner von der Versuchswirtschaft Groß Enzersdorf, für die Unterstützung bei der Versuchsdurchführung.

Weiters bedanke ich mich bei der Geschäftsführung, sowie bei allen Mitarbeitern der Firma Deutz-Fahr Austria für die Unterstützung und zur Verfügung stellen der beiden Traktoren und der beiden Mähwerke.

Kurzfassung

Energieeffizienz ist ein für den Landwirt wesentliches Werkzeug, um die Produktionskosten zu drücken und wettbewerbsfähig zu bleiben. Eine Möglichkeit zur Energiereduktion ist das Einsparen von Kraftstoff beim Einsatz von Landmaschinen, dessen Anteil zirka 40 % an den Maschinenkosten ausmacht. Der Kraftstoffverbrauch der seit einiger Zeit auf dem Markt erhältlichen stufenlosen Getrieben im Vergleich zu den klassischen Schaltgetrieben wird kontrovers diskutiert. Diese Arbeit vergleicht den Kraftstoffverbrauch bei einem Traktor mit stufenlosem und einem mit lastschaltbarem Getriebe und analysiert weiters die Auswirkungen der Fahrgeschwindigkeit beim Mähen auf den Kraftstoffverbrauch. Bei zwei Mähversuchen mit zwei verschiedenen Mähgeschwindigkeiten und einem Transportversuch mit hohem Zugkraftbedarf wurde der Kraftstoffverbrauch erhoben und verglichen. Zum Einsatz kamen die beiden Traktoren Agrofarm 430 Profiline (lastschaltbar) und Agrofarm 430 TTV (stufenlos) von Deutz-Fahr, die sich nur im Getriebe unterschieden. Die Versuche zeigten, dass der Traktor mit stufenlosem Getriebe, bezogen auf die Fläche, bei einer Mähgeschwindigkeit von 11,5 km/h in etwa 9,8 % (0,30 l/ha) und bei einer Geschwindigkeit von 16 km/h in etwa 9,3 % (0,23 l/ha) mehr an Kraftstoff benötigt. Wie zu erwarten stieg mit höherer Fahrgeschwindigkeit der Kraftstoffverbrauch pro Zeiteinheit an, allerdings stieg auch die Flächenleistung an, was in Summe zu einem Einsparungspotential von etwa 17 % bei beiden Traktoren führte. Beim Transportversuch ergab sich, bezogen auf die Weglänge, ein Mehrverbrauch von 12,8 % (0,027 l/km) für das stufenlose Getriebe. In Summe war der Treibstoffverbrauch des Schaltgetriebes in jedem Fall um zirka 9 – 13 % unter jenem des stufenlosen Getriebes, was die Überlegenheit des Schaltgetriebes hervorhebt. Das wichtigste Argument für die Ersparnis ist sicherlich der höhere mechanische Wirkungsgrad des Lastschaltgetriebes.

Abstract

Energy efficiency is one option of the farmer to lower production costs and remain competitive. One possibility to reduce energy consumption is the economization of fuel usage when operating with agricultural machinery. Fuel expenditure amount to about 40 % of the costs of the machinery. Fuel consumption of the continuous variable transmission compared to the classical power shift transmission is discussed controversially. This thesis compares the fuel consumption of a tractor with continuous variable transmission to one with a power shift transmission. Further, this work analyses the impact of the driving speed of mowing on fuel consumption. By executing two mowing trials with different driving speeds and a transport trial with the need of high drag force, the fuel consumption was recorded and compared. For carrying out the trials, the two tractors Agrofarm 430 Profiline (power shift) and Agrofarm 430 TTV (continuous variable transmission) of Deutz-Fahr were used, which differ only in the kind of transmission. The trials showed that the tractor with continuous variable transmission operating at a mowing speed of 11,5 km/h uses about 9,8 % (0,30 l/ha) and at a mowing speed of 16 km/h about 9,3 % (0,23 l/ha) more fuel than the power shift transmission, in relation to the acreage. As expected, with higher driving speeds the fuel consumption per unit of time increases, but also the acreage performance increases which, altogether, leads to a fuel reduction of 17 % for both tractors. The transport trial showed that the continuous variable transmission consumes 12,8 % (0.027 l/km) more fuel, in relation to the path length. Altogether, the fuel consumption of the shift transmission exceeds the one of the continuous variable transmission in any case of about 9 – 13 % which highlights the superiority of the power shift gear. The most important reason of the reduction is the higher mechanical efficiency factor of the shift transmission.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG.....	12
2	STAND DES WISSENS	14
2.1	KRAFTSTOFFVERBRAUCH UND ENERGIEEFFIZIENZ BEI LANDMASCHINEN	14
2.2	DIESELMOTOREN UND DEREN KRAFTSTOFFEINSPARUNGSPOTENTIALE.....	16
2.2.1	<i>Funktionsweise</i>	<i>16</i>
2.2.2	<i>Betriebsverhalten.....</i>	<i>16</i>
2.2.3	<i>Einfluss des Motors auf den Kraftstoffverbrauch.....</i>	<i>21</i>
2.3	GETRIEBE UND DEREN KRAFTSTOFFEINSPARUNGSPOTENTIALE.....	22
2.3.1	<i>Anforderungen.....</i>	<i>22</i>
2.3.2	<i>Stufengetriebe.....</i>	<i>23</i>
2.3.3	<i>Stufenlose Getriebe.....</i>	<i>27</i>
2.3.4	<i>Einfluss des Getriebes auf den Kraftstoffverbrauch.....</i>	<i>35</i>
2.3.5	<i>Stufengetriebe vs. stufenlose Getriebe.....</i>	<i>37</i>
2.4	KRAFTSTOFFEINSPARUNG DURCH TRAKTORABSTIMMUNG	40
2.5	KRAFTSTOFFEINSPARUNG BEIM ARBEITSEINSATZ	43
2.5.1	<i>Allgemeines zur Kraftstoffeinsparung</i>	<i>43</i>
2.5.2	<i>Schaltbar vs. stufenlos.....</i>	<i>44</i>
3	ZIELSETZUNG UND FRAGESTELLUNG	47
4	MATERIAL UND METHODEN.....	48
4.1	VERSUCHSSTANDORT	48
4.1.1	<i>Großraum.....</i>	<i>48</i>
4.1.2	<i>Standort, Klima und Boden</i>	<i>48</i>
4.2	VERSUCHSFELD	49
4.3	EINGESETZTE MASCHINEN.....	50
4.3.1	<i>Traktoren Agrofarm 430 TTV und Agrofarm 430 Profiline</i>	<i>50</i>
4.3.2	<i>Mähwerk.....</i>	<i>56</i>
4.4	VERSUCHSDURCHFÜHRUNG.....	57
4.4.1	<i>Allgemein.....</i>	<i>57</i>
4.4.2	<i>Versuchsdurchführung Transport</i>	<i>58</i>
4.4.3	<i>Versuchsdurchführung Mähen</i>	<i>60</i>
4.5	STATISTISCHE AUSWERTUNG.....	63
5	ERGEBNISSE UND DISKUSSION.....	64

5.1	MÄHVERSUCH.....	64
5.1.1	<i>Vergleich unterschiedlicher Getriebe.....</i>	64
5.1.2	<i>Zusammenfassung und Diskussion des Mähversuchs mit unterschiedlichen Getrieben</i>	67
5.1.3	<i>Vergleich unterschiedlicher Fahrstrategien.....</i>	67
5.1.4	<i>Zusammenfassung und Diskussion des Mähversuchs bei unterschiedlicher Mähgeschwindigkeit ..</i>	70
5.2	TRANSPORTVERSUCH AUF STRASSE MIT HOHER ZUGLAST.....	70
5.2.1	<i>Ergebnis</i>	70
5.2.2	<i>Zusammenfassung und Diskussion des Transportversuches</i>	72
6	ZUSAMMENFASSUNG	73
7	WEITERFÜHRENDE ARBEITEN.....	75
8	LITERATURVERZEICHNIS.....	76

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Energiekosten als Anteil der landwirtschaftlichen Erzeugung, in der EU in % [EUROSTAT, 2010].....	15
Abbildung 2: Volllastkennlinie [LAMPEL, 2011].....	20
Abbildung 3: Motorkennfeld [LAMPEL, 2011]	21
Abbildung 4: Modernes Full-Powershift-Lastschaltgetriebe [CASE, 2011].....	25
Abbildung 5: Geschwindigkeitsplan von Getrieben bei 2-fach-, 3-fach-, 4-fach-, 6-fach und Volllastschaltung im Vergleich [EICHHORN, 1999].....	27
Abbildung 6: Funktionsweise des hydrostatisch leistungsverzweigten Getriebes [BISAGLIA et al. 2003]	29
Abbildung 7: Darstellung des leistungsverzweigten Getriebes T 5100 CVT [SDF, 2011].....	30
Abbildung 8: Darstellung des leistungsverzweigten Getriebes T 5100 CVT [SDF, 2011].....	31
Abbildung 9: Planetengetriebe bei ZF ECCOM, ZF S-Matic und SDF TTV[SDF, 2010b]	32
Abbildung 10: Anteil der hydrostatischen und der mechanischen Kraftübertragung in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit [SDF, 2011].....	33
Abbildung 11: Das hydrostatisch leistungsverzweigte Getriebe von AGCO [FENDT, 2011] ..	34
Abbildung 12: Anteil der hydrostatischen und der mechanischen Kraftübertragung in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit. Links Vario Getriebe von AGCO, rechts TTV Getriebe von SDF [SDF, 2011]	35
Abbildung 13: Wirkungsgrad und Bedienbarkeit unterschiedlicher Getriebebauarten [SZENTE UND LAMPEL, 2002]	36

Abbildung 14: Gesamtbewertung des stufenlosen Fahrtriebs und des Fahrtriebs mit vierfach-Lastschaltung [BEA, 1997]	40
Abbildung 15: Praktische Einsatzgeschwindigkeiten bei Arbeiten mit Traktoren [RENIUS, 1985]	44
Abbildung 16 Versuchsflächen für den Mähversuch. Zweimal zirka fünf Hektar.....	49
Abbildung 17: Leistungsdiagramm des AF 430 PL vor Adjustierung	53
Abbildung 18: Leistungsdiagramm des AF 430 PL nach Adjustierung	53
Abbildung 19: Leistungsdiagramm des AF 430 TTV vor Adjustierung	54
Abbildung 20: Leistungsdiagramm des AF 430 TTV nach Adjustierung	54
Abbildung 21: Motordrehzahlmessung an der Lichtmaschine	55
Abbildung 22: Radarsensor am linken Einstieg.....	56
Abbildung 23: Frontmähwerk und Heckmähwerk mit Aufbereiter.....	57
Abbildung 24: Achslasten im Leerzustand	58
Abbildung 25: Traktor beim Transporteinsatz.....	59
Abbildung 26: Messvorgang beim Auslitern	60
Abbildung 27: Traktor beim Mäheinsatz	61
Abbildung 29: Kraftstoffmesseinrichtung	63
Abbildung 30: Mittlerer Kraftstoffverbrauch (l/ha) beim Mähen mit einer Arbeitsgeschwindigkeit von 11,5 und 16 km/h	65

Abbildung 31: Mittlerer Kraftstoffverbrauch (l/ha) beim Mähen mit dem Schaltgetriebe PL und dem Stufenlosgetriebe TTV 69

Abbildung 32: Mittlerer Kraftstoffverbrauch (l/km) beim Transport..... 72

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Nicht-monetäre und monetäre Nutzenkriterien [BEA, 1997].....	38
Tabelle 2: Kraftstoffeinsparungspotential bei Traktoren [BÖTTINGER, 2008].....	42
Tabelle 3: Technische Daten von Agrofarm 430 TTV / PL Quelle: [SDF, 2010].....	51
Tabelle 4: Gegenüberstellung der mittleren Verfahrensparameter beim Mähen bei einer Arbeitsgeschwindigkeit von 11,5 km/h mit den Traktoren AF 430 PL und AF 430 TTV.....	64
Tabelle 5: Gegenüberstellung der mittleren Verfahrensparameter beim Mähen mit einer Arbeitsgeschwindigkeit von 16 km/h mit den Traktoren AF 430 Profiline und AF 430 TTV ..	66
Tabelle 6: Gegenüberstellung der mittleren Verfahrensparameter beim Mähen mit dem AF 430 Profiline bei einer Arbeitsgeschwindigkeit von 11,5 km/h und 16 km/h	68
Tabelle 7: Gegenüberstellung der mittleren Verfahrensparameter beim Mähen mit dem AF 430 TTV bei einer Arbeitsgeschwindigkeit von 11,5 km/h und 16 km/h	69
Tabelle 8: Gegenüberstellung der mittleren Verfahrensparameter beim Transport	71

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AF	Agrofarm (Traktortyp der Marke Same Deutz-Fahr)
AF 430 PL	Agrofarm 430 Profiline (Traktortyp mit mechanischem Lastschaltgetriebe)
AF 430 TTV	Agrofarm 430 Tractor Transmission Variable (Traktortyp mit stufenlosem Getriebe)
B	Treibstoffverbrauch
BMLFUW	Bundesmin. für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft
DAPP	Dep. für Angewandte Pflanzenwissenschaften und Pflanzenbiotechnologie
LK	Landwirtschaftskammer
PL	Profiline
SDF	Same Deutz-Fahr
TTV	Tractor Transmission Variable
Vf	Versuchsfahrt
EHR	Elektronische Hubwerksregelung
ASM	Antriebssteuerungsmanagement
v:	Fahrgeschwindigkeit

Einleitung

Energieeinsparung ist auf Grund der knapp werdenden fossilen Energieträger und deren derzeit noch beschränkter Ersatz ein wichtiges Thema. Energieeffizienz und die damit verbundene Verringerung des Einsatzes von Rohstoffen trägt zu einem erhöhten Umweltschutz bei. Neben der Umweltdebatte ist Energie vor allem ein Kostenfaktor für Haushalte und Unternehmen, insbesondere der landwirtschaftlichen Betriebe. Energieträger, in welcher Form auch immer, stellen einen für die landwirtschaftliche Betriebsführung relevanten Kostenpunkt dar, welcher in letzter Zeit und vor allem in Zukunft aufgrund der steigenden Rohölpreise immer wichtiger wird. Energieeffizienz ist für die Landwirtschaft vor allem ein Weg zur Kostenreduktion und unterstützt die Betriebe in ihrem Bestreben wettbewerbsfähig zu bleiben. Die Landwirte werden bemüht sein müssen den Treibstoffverbrauch zu minimieren um möglichst kostengünstig zu produzieren. Wird berücksichtigt, dass die Kraftstoffkosten in etwa 40 % der Gesamtkosten des Traktoreinsatzes darstellen [DEIMEL, 2011], wird dessen Bedeutung ersichtlich. Ein möglicher Weg Kraftstoff einzusparen, führt über den Einsatz von sparsamen Maschinen, insbesondere Traktoren und der optimalen Auswahl der Fahrstrategie.

Traktoren werden traditionell mit mechanisch schaltbaren Stufengetrieben ausgerüstet. Diese haben, obwohl sie technisch bereits auf sehr hohem Niveau sind, den Nachteil, dass ihre Geschwindigkeit nicht stufenlos den Fahrbedingungen angepasst werden kann und es bei Schaltvorgängen zu sog. Stufensprüngen kommt. So begann bereits im Jahre 1959 die Entwicklung von stufenlosen Getrieben in Traktoren; allerdings ohne Durchbruch [MEYER, 1959]. Im Jahre 1996 hat AGCO mit dem selbst entwickelten stufenlosen Getriebe „Vario“ die Serienreife erlangt. Im Jahre 2000 und 2001 folgte die Serieneinführung der Getriebe ZF Eccom und ZF S-Matic [GRAD, 2003]. Diese und die meisten anderen stufenlosen Getriebe, welche heute in hohen Leistungsklassen zum Einsatz kommen beruhen auf dem Prinzip der hydrostatischen Leistungsverzweigung. Traktoren mit solchen Getrieben arbeiten je nach Fahrgeschwindigkeit mit einem unterschiedlichen Anteil an mechanisch und hydraulisch übertragbarer Kraft. Hydraulisch übertragbare Leistung hat einen geringeren Wirkungsgrad als Mechanische [SZENTE UND LAMPEL, 2002]. Allerdings entfallen beim stufenlosen Getriebe Schaltvorgänge und der Traktor kann zweifelsohne näher am Leistungsoptimum betrieben

werden. Traktorenhersteller werben mit einer von unabhängigen Studien [KNECHTGES UND TEWES, 2000; SZENTE UND LAMPEL, 2002; BEA, 1997] bestätigten höheren Flächen- und Fahrleistung und einer damit verbundenen Kraftstoffeinsparung. Allerdings belegen andere Studien, welche vor allem den Systemwirkungsgrad der Traktoren untersuchen [FRABL, 2008; WILMER, 2004], eine Überlegenheit der Schaltgetriebe hinsichtlich Kraftstoffverbrauch. Das Kraftstoffeinsparpotential wird daher kontrovers diskutiert. Es kann aber angenommen werden, dass eine Getriebeart nicht per se weniger Treibstoff verbraucht und eventuelle Treibstoffvorteile abhängig sind von der Arbeitstätigkeit und dem damit verbundenen Zugkraftbedarf, der Fahrgeschwindigkeit und nicht zuletzt von der Fahrweise des Fahrers.

Diese Arbeit untersucht den Kraftstoffverbrauch mittels beider Getriebearten (stufenlos vs. lastschaltbar) anhand eines Mähvorganges und eines Transportvorganges mit hohem Zugbedarf auf asphaltierter Straße. Als Versuchstraktoren werden der AF 430 PL (Schaltgetriebe) und der AF 430 TTV (stufenlos) eingesetzt, welche baugleich sind und sich nur in der Getriebeart unterscheiden. Zudem wird die Auswirkung der Mähgeschwindigkeit auf den Kraftstoffverbrauch untersucht. Der Dieselverbrauch bei einer Mähgeschwindigkeit von 11,5 km/h wird jenem bei einer Geschwindigkeit von 16 km/h gegenübergestellt.

Stand des Wissens

1.1 Kraftstoffverbrauch und Energieeffizienz bei Landmaschinen

Die steigenden Preise für Energie, im Besonderen jener der fossilen Energieträger, rücken die Themen Kraftstoffverbrauch und Energieeffizienz in den Mittelpunkt der öffentlichen Diskussion. Für landwirtschaftliche Unternehmen stellt Energie eine notwendige Ressource zur Produktion dar, wo sie unter anderem in Form von Kraftstoff zum Antrieb von landwirtschaftlichen Maschinen und Geräten Verwendung findet. Rund 9 % der Produktionskosten entfallen auf Energie und Treibstoffe [BMLFUW, 2010]. Der Anteil von Kraftstoff an den Gesamtkosten des Maschineneinsatzes ist mittlerweile auf ca. 30 – 50 % angestiegen [BÖTTINGER, 2008; DEIMEL 2011]. . Zwar ist den letzten beiden Jahrzehnten der Dieserverbrauch in der österreichischen Landwirtschaft bei ungefähr 230.000 t konstant geblieben [MOITZI, 2005]. Allerdings stieg im Vergleichszeitraum der Dieselpreis immer stärker. Abbildung 1 zeigt die Energiekosten als Anteil an der landwirtschaftlichen Erzeugung. Der Anteil liegt in Ostösterreich unter 6 % und in Westösterreich um die 6 – 8 %. Im europäischen Vergleich ist der Anteil der Energiekosten an der landwirtschaftlichen Produktion in Österreich als eher gering anzusehen. Hohe relative Energiekosten sind vor allem in den wenig mechanisierten osteuropäischen Regionen anzutreffen. Dies liegt vor allem an der geringeren Produktion und den niederen Erzeugerpreise und weniger am hohen Maschineneinsatz [EUROSTAT, 2010].

Dem Landwirt stehen verschiedene Ansatzpunkte zur Verfügung, um den Maschineneinsatz hinsichtlich Energieeffizienz zu optimieren. Ein wesentliches Handlungsfeld ist, den Wirkungsgrad der eingesetzten Geräte zu verbessern. Weiters muss eine Anpassung der Maschinen an die landwirtschaftlichen Gegebenheiten erfolgen. Beispielsweise muss die Arbeitsgeschwindigkeit an das jeweilige Verfahren angepasst werden. Nicht außer Acht gelassen werden dürfen die Schlagform und Schlaggröße. Große Schläge reduzieren Wendezeiten und erhöhen somit die Flächenleistung. Aber auch ein abgestimmtes Arbeits- und Transportsystem erhöht die Effizienz des Systems und führt zu einer Treibstoffeinsparung [BÖTTINGER, 2008].

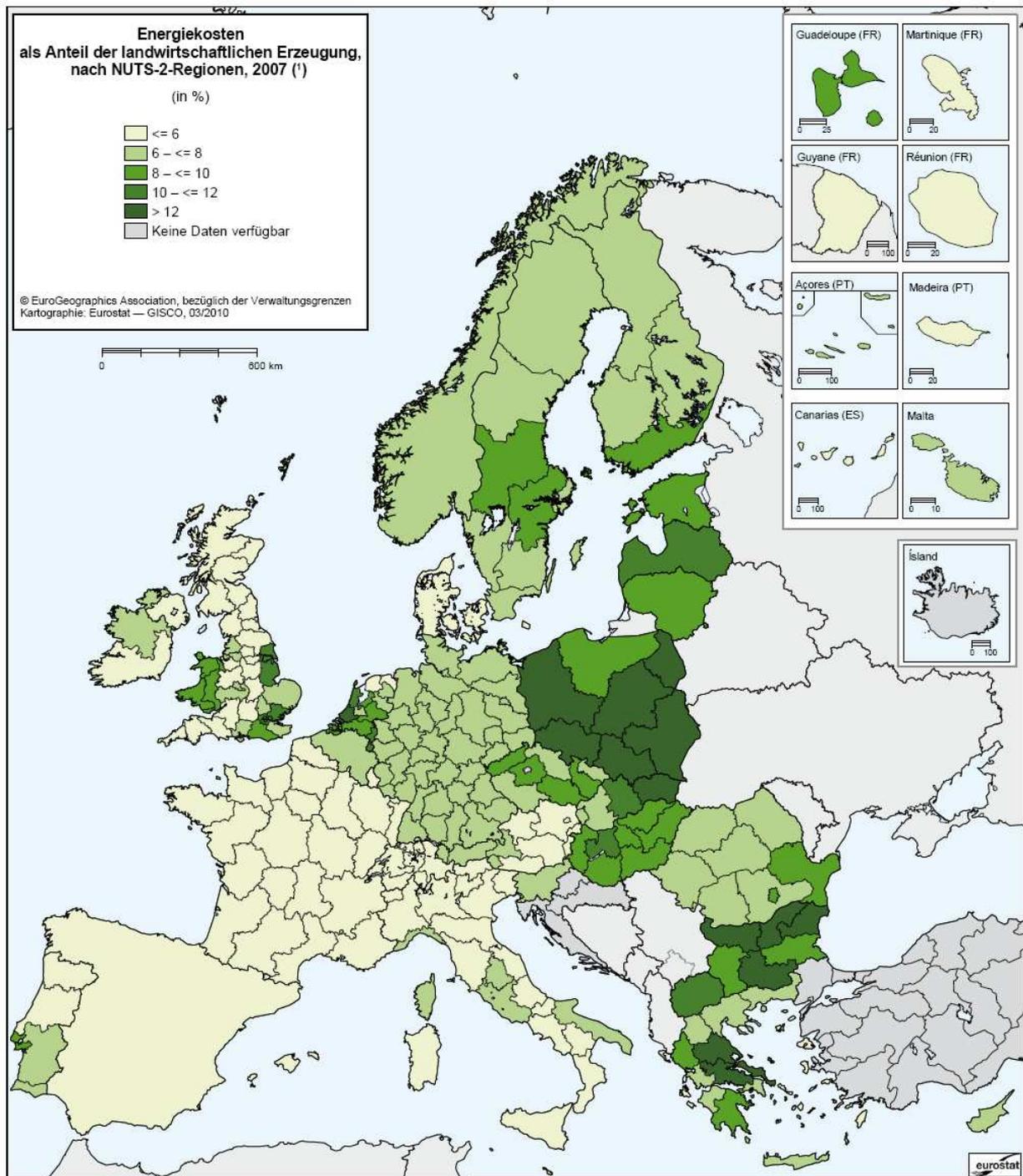


Abbildung 1: Energiekosten als Anteil der landwirtschaftlichen Erzeugung, in der EU in % [EUROSTAT, 2010]

1.2 Dieselmotoren und deren Kraftstoffeinsparungspotentiale

Funktionsweise

In der Landwirtschaft kommen überwiegend direkt einspritzende Dieselmotoren zum Einsatz um mechanische Energie zu gewinnen. Diese haben gegenüber Benzinmotoren eine zirka 20 % bessere thermische Effizienz. Das ergibt sich aufgrund des höheren Wirkungsgrades des Dieselverbrennungsprozesses und dem höheren Energieinhalt des Diesels [BÖTTINGER, 2008]. Bei den eingesetzten Hubkolbenmotoren erfolgt eine innere und damit ungleichmäßige Gemischbildung von Dieselkraftstoff und Luft. Die angesaugt Luft wird im Brennraum auf zirka 35 – 60 bar verdichtet und so auf 500 – 700 °C erhitzt. Gegen Ende des Kompressionshubes wird der Dieselkraftstoff eingespritzt und es kommt zur Selbstzündung. Pro Liter Kraftstoff werden 15 l Luft benötigt. In Traktoren eingesetzte Dieselmotoren haben einen Wirkungsgrad von etwa 32 %, der Rest geht als Abwärme verloren [SCHÖN, 1998]. Ein hoher Motorwirkungsgrad ist möglich durch eine

- 1) bestmögliche Füllung (geringe Drosselung und Verwirbelung beim Ansaugen),
- 2) Kühlung der Ansaugluft (dadurch höhere Luftdichte),
- 3) Vorverdichtung der Ansaugluft in Verbindung mit Ladeluftkühlung [SCHÖN, 1998].

Der Motor gibt die durch den Verbrennungsvorgang gewonnene Leistung über Fahrkupplung und Zapfwellenkupplung an das Getriebe ab [RENIUS, 1985].

Betriebsverhalten

Unter Betriebsverhalten werden die Eigenschaften des Motors beim praktischen Einsatz verstanden. Um das Verhalten unterschiedlicher Motoren zu vergleichen werden diverse Kenngrößen wie beispielsweise Drehzahl, Drehmoment oder Leistung herangezogen [SCHÖN, 1998].

Das Betriebsverhalten wird durch folgende Kennlinien charakterisiert [SCHÖN, 1998]:

- 1) Volllastkennlinien
- 2) Motorkennfeld

Um gleiche Bedingungen zu garantieren erfolgt die Motorprüfung nach einem OECD-Standard-Code der in 22 Ländern angewandt wird [EICHHORN, 1999].

Volllastkennlinien

Die Volllastkennlinien werden bei maximaler Einspritzmenge des Dieselmotors, bei größtmöglicher Auslenkung der Regelstange („Vollgas“) ermittelt. In Abhängigkeit von der Motordrehzahl werden folgende Kenngrößen beschrieben [SCHÖN, 1998]:

- 1) Drehmoment (M)
- 2) Motorleistung (P)
- 3) Absoluter Kraftstoffverbrauch (B)
- 4) Spezifischer Kraftstoffverbrauch (b_e)

Die Motorleistung (P) ist das Produkt von Drehmoment (M) und Winkelgeschwindigkeit (ω) der Kurbelwelle:

$$\text{Leistung (P)} = \text{Drehmoment (M)} * \text{Winkelgeschwindigkeit (}\omega\text{)} = M \frac{2 * \pi * n}{60}$$

Bei der Nenndrehzahl (n_N) hat der Motor das Nenndrehmoment (M_N) und es wird die Nennleistung (P_N) erreicht. Die Nenndrehzahl liegt bei den meisten Motoren, welche in Traktoren eingesetzt werden bei 2000-2400 U/min. Bei höheren Drehzahlen wird der Wirkungsgrad immer schlechter und die Geräusentwicklung nimmt zu [EICHHORN, 1999].

Der absolute Kraftstoffverbrauch (B) wird in kg/h angegeben. Wird der Kraftstoffverbrauch auf die im jeweiligen Betriebszustand gemessene Leistung (P) bezogen, so erhält man den

spezifischen Kraftstoffverbrauch b_e in kg/kWh oder g/kWh. Eine Kennzahl, die besonders zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit von Bedeutung ist [EICHHORN, 1999].

Spezifischer Kraftstoffverbrauch (b_e) = Kraftstoffverbrauch (B) / Motorleistung (P)

Wird nun das Fahrpedal voll durchgezogen, stellt sich die Motordrehzahl in Abhängigkeit von der aufgegeben Last (Drehmoment) ein. Die Volllastkennlinie beschreibt dann den Zusammenhang zwischen Drehzahl und Drehmoment (Abbildung 2) [EICHHORN, 1999]. Wirkt keine Last, so wird die maximale Drehzahl erreicht [SCHÖN, 1998]. Mit zunehmender Last (Anstieg des Drehmoments) fällt die Drehzahl ab, bis die zum maximalen Drehmoment (M_{max}) gehörige Drehzahl (n_{Mmax}) erreicht wird. Die Differenz zwischen Nenndrehzahl und maximaler Drehzahl bezogen auf die Nenndrehzahl wird als Drehzahlabfall bezeichnet.

$$\text{Drehzahlabfall [\%]} = \frac{\text{Nenndrehzahl} - \text{maximale Drehzahl}}{\text{Nenndrehzahl}} * 100$$

Als Drehmomentanstieg wird nun die Differenz zwischen dem maximalen Drehmoment und dem Nenndrehmoment, bezogen auf das Nenndrehmoment bezeichnet.

$$\text{Drehmomentanstieg [\%]} = \frac{\text{maximales Drehmoment} - \text{Nenndrehmoment}}{\text{Nenndrehmoment}} * 100$$

Das Drehmoment steigt über einen bestimmten Drehzahlabfall, der sogenannten Drückung, an. Dadurch wird bei zunehmender Belastung, mit einhergehendem Drehzahlabfall, das Drehmoment erhöht. Diese Eigenschaft wird als Durchzugsvermögen bezeichnet und sollte bei modernen Traktoren stark ausgeprägt sein [EICHHORN, 1999].

Bei heutigen Traktoren kann bei einem Drehzahlabfall von 20 % mit einem Drehmomentanstieg von 30 % und mehr gerechnet werden [SCHÖN, 1998]. Ein möglichst hoher Drehmomentanstieg macht es möglich auch unter wechselnden Lasten das Gangwechseln zu minimieren. Kommt es jedoch zu einem erhöhten Drehzahlabfall, fällt auch die Motorleistung ab. Der Drehmomentanstiegsverlauf wird heute versucht so auszulegen, dass über einen Teilbereich, bei fallender Drehzahl die Leistung trotzdem konstant bleibt. So kann auch unter

schweren Zug- und Transportarbeiten mit schaltarmer Fahrweise gearbeitet werden [EICHHORN, 1999]. Beim Anfahren ist es wichtig, dass man zum Schonen der Fahrkupplung mit möglichst niedrigen Motordrehzahlen anfahren kann und danach lediglich durch „Gasgeben“ kräftig beschleunigen kann. Je mehr Drehmoment im unteren Bereich zur Verfügung steht, desto leichter gestaltet sich das Anfahren. Bei 45 % der Nenndrehzahl sollte noch mindestens das Nenndrehmoment verfügbar sein und der Verlauf der Volllastkennlinien nicht einer Hängematte gleichen. Die Volllastkennlinie sollte bei Nenndrehzahl möglichst scharf abknicken und steil abfallen, damit die Überdrehzahl im hohen Leerlauf einen Wert von 6 – 7 % nicht überschreitet [RENIUS, 1985]. Der Verlauf der Volllastkennlinie wird im Wesentlichen durch die Einspritzanlage bestimmt [SCHÖN, 1998]. In Abbildung 2 ist die Leistungskennlinie eines Traktormotors ersichtlich. Der absolute Kraftstoffverbrauch steigt unter Volllast parallel zu Motorleistung an und fällt beim Erreichen der Nenndrehzahl schnell ab. In der Regel liegt der minimale spezifische Kraftstoffverbrauch bei Traktoren dort, wo die Motorleistung am höchsten ist und strebt oberhalb der Motornenndrehzahl gegen unendlich, da im Leerlauf keine Leistung erbracht wird, aber dennoch Kraftstoff verbraucht wird [EICHHORN, 1999].

Nicht außer Acht gelassen werden darf allerdings, dass vor allem beim Arbeiten mit zapfwellengetriebenen Geräten eine konstante Drehzahl wünschenswert ist um eine konstante Drehzahl des Endgerätes zu garantieren [EICHHORN, 1999].

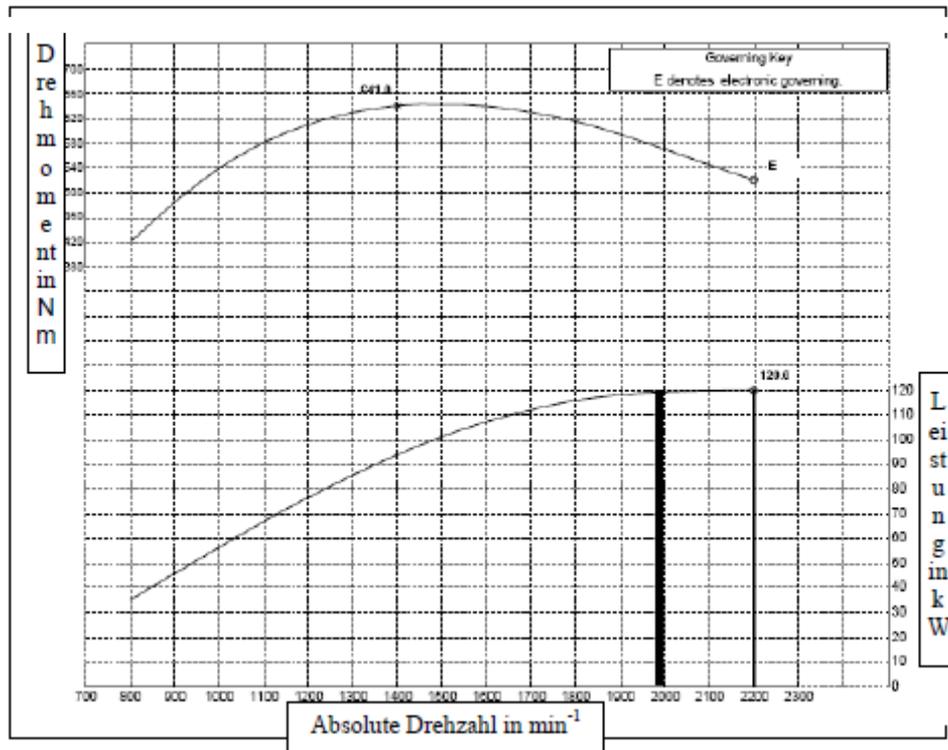


Abbildung 2: Volllastkennlinie [AGCO, 2005]

Motorkennfeld

Die oben beschriebene Volllastkennlinie beschreibt das Verhalten unter Volllast. Allerdings wird der Traktor natürlich nicht immer unter Volllast gefahren. Der Landwirt gibt mittels Fahrpedalstellung eine gewünschte Drehzahl vor, den der Regler der Einspritzpumpe mittels Einstellung der Einspritzmenge einzuhalten versucht. Die Volllastkennlinie begrenzt diesen Regelbereich und darunter ist jeder Betriebspunkt möglich. Durch Verbinden von Betriebspunkten mit gleichem spezifischem Kraftstoffverbrauch erhält man ein Muscheldiagramm (Abbildung 3) [EICHORN, 1999].

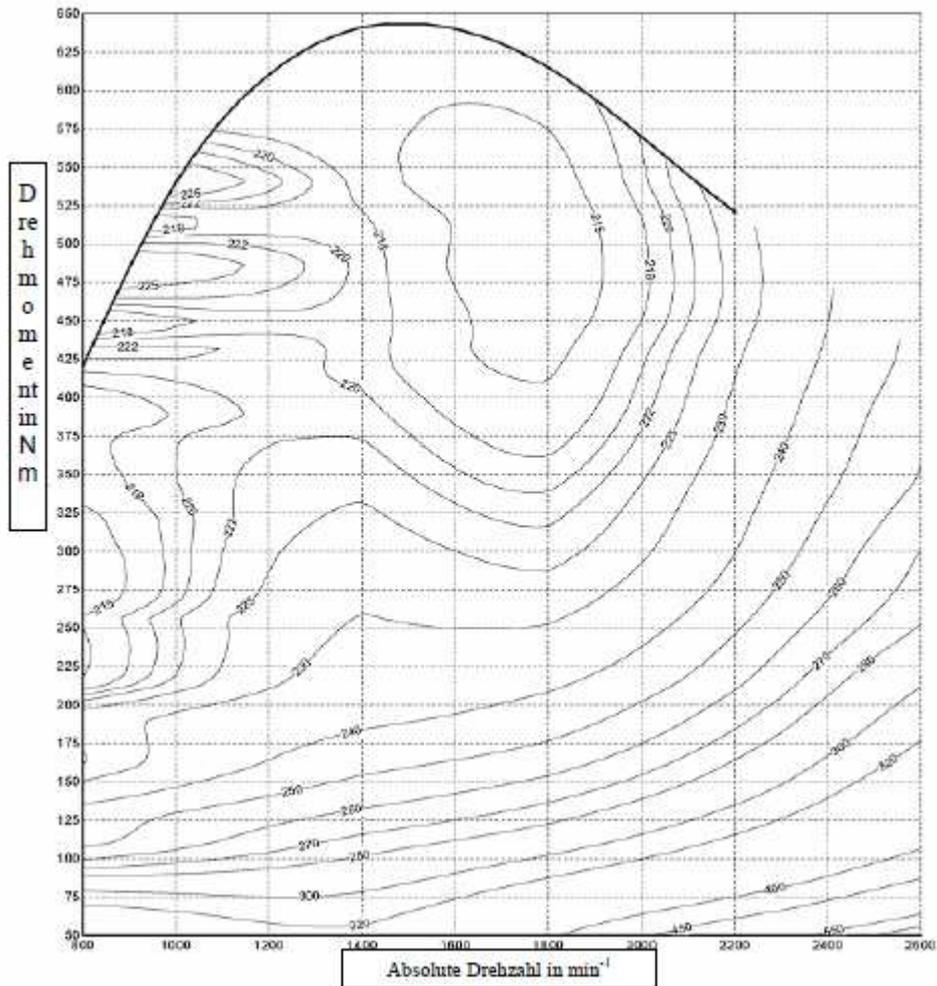


Abbildung 3: Motorkennfeld [AGCO, 2005]

Einfluss des Motors auf den Kraftstoffverbrauch

Ein bedeutender Ansatz zur Steigerung des Wirkungsgrades bei Landmaschinen liegt zweifelsohne beim Verbrennungsmotor. Die Leistung der Dieselmotoren konnte vorwiegend durch Einspritzsysteme mit höheren Drücken und besserer Regelbarkeit, durch die Erhöhung der Anzahl der Ventile, durch Turbolader und durch Ladeluftkühlung gesteigert werden. Vor allem aber der Einsatz von Elektronik erhöhte in den letzten Jahren die Effizienz der Motoren. Die Steuerung des Einspritzzeitpunktes und der Einspritzmenge machte es möglich den spezifischen Kraftstoffverbrauch über einen größeren Drehzahlbereich zu optimieren. Auch

ermöglicht die Elektronik das Motorkennfeld zu ändern und an die Gegebenheiten anzupassen, was den Wirkungsgrad zusätzlich erhöht [BÖTTINGER, 2008].

Der niedrigste spezifische Kraftstoffverbrauch liegt im Bereich von 60 – 80 % der Motornennleistung und bei 60 – 70 % der Nenndrehzahl [DEIMEL, 2011]. Vor allem bei schweren Zugarbeiten kann mittels günstiger Gangwahl in diesem günstigen energetischen Punkt gefahren werden [SCHÖN, 1998]. Der Motor kann jedoch nicht permanent in diesem Bereich betrieben werden. Zum einen da der Motor in diesem Bereich nicht seine maximale Leistung erbringt, die hinsichtlich der Flächenleistung aber ausgenutzt werden sollte. Weiters erfordern Zapfwellenarbeiten eine von diesem Bereich abweichende Motordrehzahl. Bei Pflegearbeiten und insbesondere Leerfahrten wird der Motor aufgrund der geringen Auslastung bei niederen Drehmomenten und einer hohen Drehzahl betrieben. Zudem ist der Betrieb des Motors unter voller Last in der Nähe der Drehzahl des maximalen Drehmomentes sehr instabil da eine geringe Lastveränderung eine große Drehzahlveränderung bewirkt [EICHHORN, 1999]. Um aber auch im Teillastbereich mit verringerten Motordrehzahlen kraftstoffsparend arbeiten zu können bieten sich zum einen ein Spargang und eine Sparzapfwellendrehzahl an. Ein Spargang ermöglicht die Höchstgeschwindigkeit anstelle mit Nenndrehzahl mit einer verminderten Drehzahl zu fahren [SCHÖN, 1998]. Hohe Drehzahl kostet Diesel, weshalb ein guter Fahrer versucht stets im optimalen Bereich zu fahren [DEIMEL, 2011]. So bieten beispielsweise John Deere in der Baureihe 6020 zwei unterschiedlich untersetzte 40 km/h Gänge im gleichen Getriebe an. Ein Gang für hohe Lasten bei voller Motordrehzahl und einen Gang als Overdrive für Teillasten oder Leerfahrten mit reduzierter Motordrehzahl [RENIUS, 2005]. Eine Sparzapfwelle mit 750 oder 1000 U/min ermöglicht das Arbeiten mit Kraftstoff sparenden Motordrehzahlen [SCHÖN, 1998].

1.3 Getriebe und deren Kraftstoffeinsparungspotentiale

Anforderungen

Das Getriebe wurde in letzter Zeit zur wichtigsten Traktorbaugruppe. Seine Entwicklung ging in den letzten 4 Jahrzehnten vom einfachen 5-Ganggetriebe mit Schubradschaltung über

Lastschaltgetriebe mit 40 Gängen bis hin zum stufenlosen Getriebe [GRAD, 2003]. Das Getriebe dient einerseits zur Wandlung der Motorkennwerte (Drehmoment und Drehzahl) und andererseits durch die Zapfwelle zur direkten Energieübertragung an die Anbaugeräte. [RENIUS, 1985]. Die Motoren geben ihre volle Leistung bei Erreichen der Nenndrehzahl ab. Das Getriebe dient dazu, die Leistung des Motors an die Fahrbedürfnisse anzupassen. So kann eine möglichst konstante Drehzahl wie beispielsweise bei Zapfellenarbeiten gefordert sein, oder aber auch möglichst hohe Drehmomente wie beispielsweise bei schweren Zugarbeiten von Nöten sein [ALSING, 2002]. Der Grundaufbau des Getriebes erfolgt in Blockbauweise, welcher mit der Hinterachse einen kompakten Block bildet und sich als besonders kostengünstig erweist [RENIUS, 1985]

In den heute verfügbaren Traktoren kommen traditionell Schaltgetriebe oder sogenannte Stufengetriebe zum Einsatz, aber die seit den 90er Jahren eingeführten Traktoren mit stufenlosen Getrieben, hauptsächlich basierend auf der hydrostatischen Leistungsverzweigung, entwickeln sich immer mehr zur Alternative, vor allem in leistungsstarken Klassen, aber zusehends auch für mittlere und untere Leistungsklassen.

Stufengetriebe

Traktoren sollten über den gesamten Geschwindigkeitsbereich bei einer Vielzahl an Arbeiten die volle Motorleistung und/oder eine hohe Motordrehzahl für die Zapfwelle erbringen. Dies erfordert einen feinstufigen Getriebeaufbau um die Geschwindigkeitssprünge zwischen den Gängen gering zu halten [EICHHORN, 1999]. Die heutigen Standardstufengetriebe besitzen bis zu 40 Gänge und mehr und haben häufig 2-, 3- und 4 fach Lastschaltung, manche sind auch volllastschaltbar [GRAD 2003].

Zum Einsatz bei Schaltgetrieben kommen folgende Getriebebauarten [AUER und KLETZL, 2006; HERMANN und MEYER-ÖTTING, 1998]:

- Schubradgetriebe
- Leichtschaltgetriebe (Klauenschaltgetriebe)
- Synchrongetriebe

- Lastschaltgetriebe

Beim **Schubradgetriebe** hat die Getriebewelle entsprechend der Zahl der Gänge verschiebbare Zahnräder. Über die Gangschaltung werden die Zahnräder der Hauptwelle mit den festsitzenden Zahnradern der Vorgelegewelle zusammengeschaltet. Somit ist jeweils nur ein Zahnradpaar im Eingriff [ALSING, 2002].

Beim **Leichtschaltgetriebe** sind ständig alle Zahnradpaare der Haupt- und Vorgelegewelle im Eingriff. Die Zahnräder der Hauptwelle sind drehbar gelagert und werden über eine verschiebbare Schaltmuffe kraftschlüssig mit der Hauptwelle verbunden.

Beim **Synchrongetriebe** werden die Schaltvorgänge erleichtert, da über Reibflächen zwischen Schaltring und Zahnrad Gleichlauf herrscht [HERMANN und MEYER-ÖTTING, 1998]. Das feinstufige Synchrongetriebe ist die am meisten verbreitete Getriebeform bei Traktoren [SCHÖN 1998].

Bisher musste für jeden Gangwechsel durch Betätigen der Kupplung der Kraftfluss unterbrochen werden, wodurch der Traktor bei hohem Zugkraftbedarf zum Stillstand kommen kann. Eine Alternative dazu bieten Lastschaltgetriebe, wo einige oder auch alle Gangstufen ohne Kupplungsbetätigung geschaltet werden und so auch unter Last schaltbar sind. Der Gangwechsel erfolgt über hydraulisch angesteuerte Lamellenkupplungen. Es kann zwischen teillastschaltbaren und volllastschaltbaren Getrieben unterschieden werden [SCHÖN, 1998].

Teillastschaltgetriebe kommen heute vor allem in Traktoren mit mehr als 60 kW Motorleistung zur Anwendung. Als ein Standard stehen meist 4 Lastschaltstufen in 4 Gruppen zu Verfügung [ALSING, 2002]. Dem Grundgetriebe ist ein Zusatzgetriebe angebaut das unter Last schaltbar ist.

Volllastschaltgetriebe werden vorwiegend in der Leistungsklasse über 100 kW eingesetzt. Zur Anwendung kommen in etwa 15 – 18 Gänge die alle ohne zu Kuppeln schaltbar sind. Der Gangwechsel wird hydraulisch, mechanisch oder elektronisch vollzogen [SCHÖN, 1998].

Im Hauptarbeitsbereich zwischen 4 und 12 km/h liegen die Stufensprünge um die 1,2 km/h. Bei höheren Geschwindigkeiten können auch höhere Sprünge akzeptiert werden. Feinstufige Traktorgetriebe setzen sich aus mehreren Getriebegruppen zusammen, die meist deckungsgleich mit den Schalthebeln übereinstimmen. Das Feinstufigere wird Grundgetriebe genannt, während die Gruppengetriebe den Geschwindigkeitsbereich nur grobstufig bestimmen. Zum Reversieren werden eigene Wendegetriebe verwendet oder aber im Gruppengetriebe auch die Rückwärtsfahrgruppe eingebaut [EICHORN, 1999]. Abbildung 4 zeigt ein Full-Powershift-Getriebe von CASE mit 19 Vorwärts- und 4 Rückwärtsgängen.

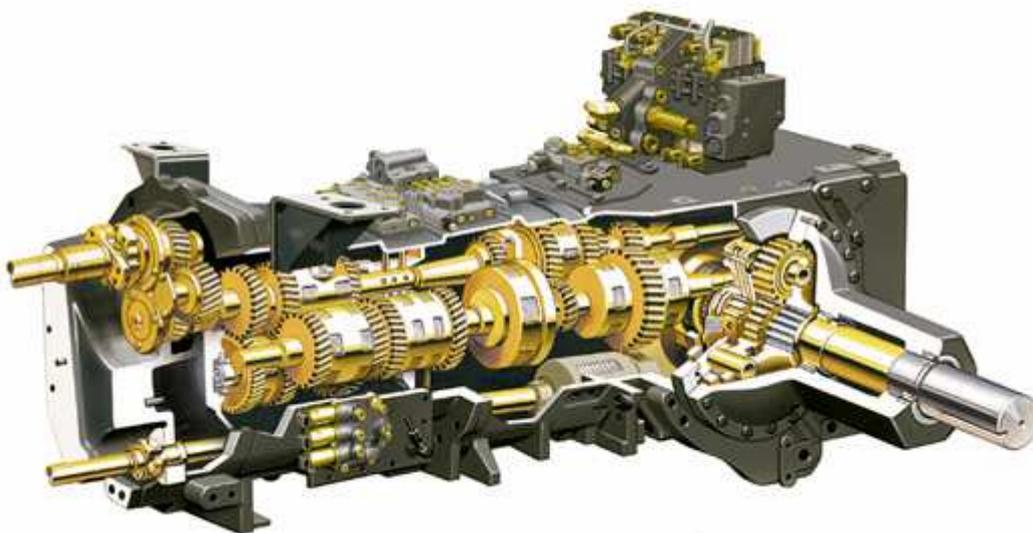


Abbildung 4: Modernes Full-Powershift-Lastschaltgetriebe [CASE, 2011]

Abbildung 5 zeigt die Geschwindigkeitspläne verschiedener Lastschaltgetriebe. Bei Lastschaltung wäre es optimal, wenn die mittlere Arbeitsgeschwindigkeit im Bereich der mittleren Geschwindigkeit der Lastschaltgruppe ist, damit nach oben und unten genügend Spielraum vorhanden ist. Dies ist aber nicht zwangsläufig zu erwarten und liegt die Arbeitsgeschwindigkeit beispielsweise im unteren Bereich der Lastschaltgruppe, kann die Motorleistung bei einer Steigung eventuell nicht mehr ausreichen und es muss mittels Kuppeln ein Gang im Hauptgetriebe zurückgeschaltet werden. Um dieses Problem zu umgehen kann das Geschwindigkeitsangebot im Hauptgetriebe noch enger gestaffelt werden wodurch es zu

Überlappungen der Geschwindigkeitsbereiche der Gänge des Hauptgetriebes kommt, oder die Anzahl der unter Last schaltbaren Gänge kann erhöht werden. In Abbildung 5 ist dies deutlich zu erkennen: Bei der 3-fach und 4-fach Lastschaltung zeigt sich eine starke Überlappung der Geschwindigkeitsbereiche, welche bei der 5-fach Lastschaltung nahezu wegfällt. Allerdings setzen eine erhöhte Anzahl von Lastschaltstufen den Wirkungsgrad des Getriebes herab [RENIUS, 1985]. Ohne Lastschaltung brauchen sich die Gruppen nicht zu überlappen, da das Fahrzeug ohnehin zum Stillstand kommt, das Betätigen von einem oder zwei Ganghebeln ist hier eher eine Frage des Komforts [EICHHORN, 1999].

Stufengetriebe haben einen hohen technischen Stand erreicht. Die derzeitigen Entwicklungen konzentrieren sich auf die Automatisierung der Lastschaltung, automatisierte Shift-by-Wire Konzepte für die Schaltung der Synchrongänge sowie Managementsysteme [GRAD 2003].

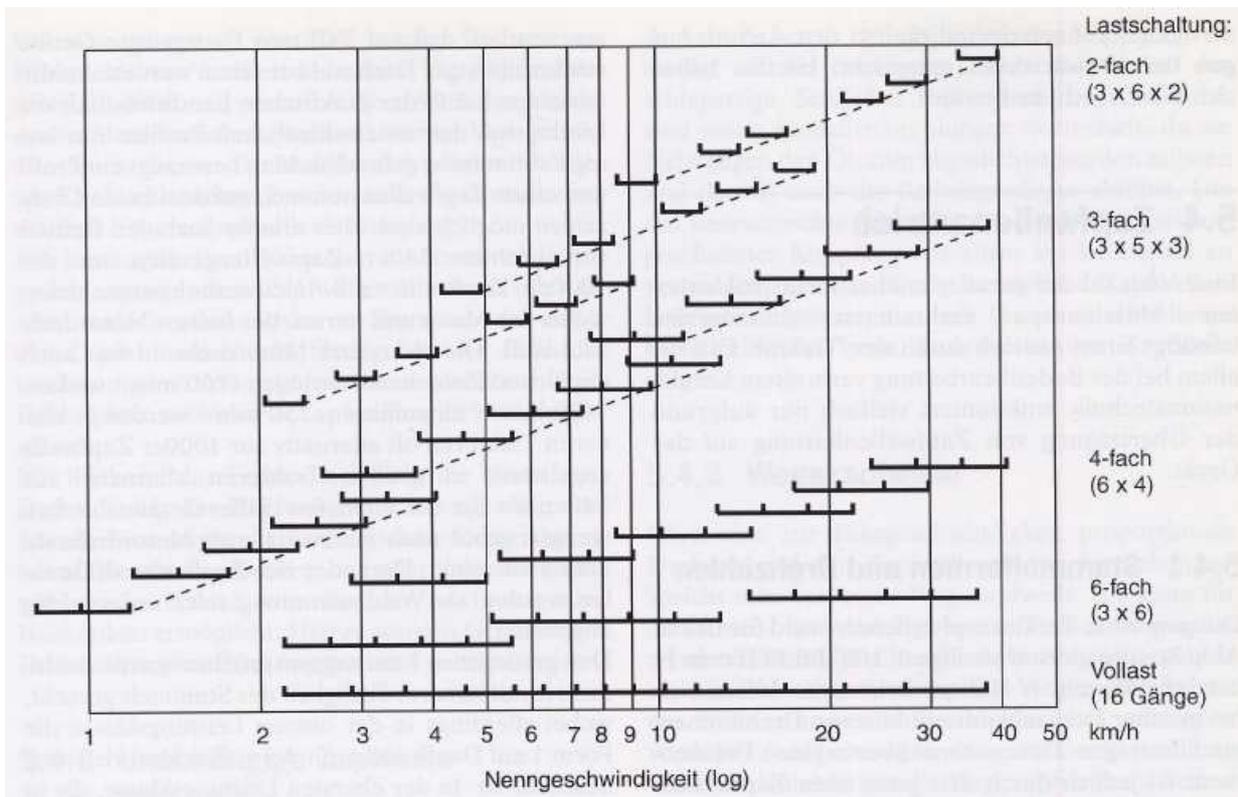


Abbildung 5: Geschwindigkeitsplan von Getrieben bei 2-fach-, 3-fach-, 4-fach-, 6-fach und Volllastschaltung im Vergleich [EICHORN, 1999]

Stufenlose Getriebe

Stufenlose Getriebe ermöglichen die Fahrgeschwindigkeit variabel (stufenlos) und ohne Schaltvorgänge unabhängig von der Motordrehzahl einzustellen. Dies ermöglicht es, bei jeder Fahrgeschwindigkeit die maximale Motorleistung für die Zugleistung zu verwenden [KNECHTGES und TEWES, 2000].

In Europa geht die Entwicklung bei stufenlosen Getrieben in 3 Richtungen [RENIUS, 1995]:

- 1) Direkte hydrostatische Wandler
- 2) Hydrostatische Wandler mit äußerer Leistungsverzweigung
- 3) Stufenlose Umschlingungsgetriebe

Für Traktorserien unter 35 kW geht die Entwicklungstendenz in Richtung rein hydrostatischer Antriebe [GRAD, 2003]. Beim rein hydrostatischen Kompaktwandler ist allerdings ein Wirkungsgrad von 80 % kaum zu übersteigen [RENIUS, 1995].

Eine Alternative zum sich derzeit durchsetzenden leistungsverzweigten Getriebe stellt das Umschlingungsgetriebe, insbesondere der Zugkettenwandler als mechanischer Variator, dar. Untersuchungen zeigen ein hohes Potential des Kettenwandlers für die untere und mittlere Leistungsklasse [RENIUS, 1995; RESCH, 2003]. Besonders für die mittlere Leistungsklasse (35 – 75 kW), wo ein besonders hoher Bedarf an stufenlosen Getrieben herrscht, könnten Umschlingungsgetriebe Einzug halten. Den leistungsverzweigten Getrieben stehen in dieser Leistungsklasse hohe Stückkosten sowie schlechte Gesamtwirkungsgrade entgegen [GRAD, 2003]. Der Vorteil des Kettenwandlers liegt in seinem sehr hohen Wirkungsgrad (>95 %) [RESCH, 2003]. Diese sind allerdings aus verschiedenen technischen Schwierigkeiten noch nicht in Serienreife.

Bei Traktoren mit einem Leistungsbereich über 75 KW konnte sich das hydrostatisch leistungsverzweigte Getriebe immer mehr durchsetzen und wird in Zukunft seinen Marktanteil weiter ausbauen können. Im unteren Leistungsbereich fehlt es derzeit noch an serienreifen Entwicklungen, da hier vor allem der hohe Kostenfaktor solcher Getriebe ins Gewicht fällt. Stufenlose hydrostatisch leistungsverzweigte Getriebe sind heute erhältlich in den Traktoren der Firma AGCO unter der Bezeichnung Vario (Eigenentwicklung), der Firma John Deere unter der Bezeichnung AutoPowr (ZF Eccom und Eigenentwicklung), der Firma CNH unter der Bezeichnung CVX/CVT/TVT (ZF S-Matic) und der Firma Deutz-Fahr unter der Bezeichnung TTV (ZF Eccom, ZF S-Matic und Eigenentwicklung) [GRAD, 2003].

Hydrostatisch leistungsverzweigte Getriebe

Der große Vorteil von hydrostatisch leistungsverzweigten Getrieben ist die Kombination von mechanischer und hydraulischer Kraftübertragung. Die mechanische Kraftübertragung bietet einen hohen Wirkungsgrad, während die hydraulische Kraftübertragung stufenlos erfolgen kann. Stufenlos leistungsverzweigte Getriebe unterscheiden sich in der Größe des hydrostatischen Anteils und der Anzahl und Art der Schaltstellen [RENIUS, 1985].

Obwohl verschiedene Lösungen zur hydrostatischen Leistungsverzweigung entwickelt wurden, funktionieren alle nach demselben grundlegenden Prinzip. Herzstück der Kraftübertragung ist ein Planetengetriebe (Abbildung 6). Während das Sonnenrad direkt vom Motor mechanisch angetrieben wird, erfolgt der Antrieb des Hohlrades mittels hydrostatischen Motors. Die Planetenräder inklusive Planetenträger übertragen letztendlich die Kraft auf die Traktorräder. Der hydrostatische Motor wird über eine hydrostatisch angetriebene Axialkolbenpumpe gesteuert, welche durch den Traktormotor angetrieben wird. Erbringt der hydrostatische Motor maximale Leistung, wird das Hohlrad in die andere Richtung als das vom Motor angetriebene Sonnenrad bewegt und der Planetenträger steht still und es erfolgt keine Kraftübertragung auf die Reifen, da sich hydrostatische und mechanische Kraftübertragung aufgrund des gegenläufigen Spins aufheben (Abbildung 6a). Wird nun die Pumpleistung der hydrostatischen Pumpe herabgesetzt (sie wird in Richtung waagrechte Position gebracht) verliert der Hydromotor an Leistung und die Drehzahl am Hohlrad wird minimiert. Da das Sonnenrad jetzt

mit höherer Drehzahl läuft als das Hohlrade fährt der Traktor los. Erbringt die Hydraulikpumpe aufgrund der waagrechten Position keine Leistung mehr bleibt das Hohlrade stehen und die Kraftübertragung erfolgt dann rein mechanisch (Abbildung 6b). Wird die Axialkolbenpumpe in die andere Richtung ausgeschwenkt verändert sich die Drehrichtung des Hohlrades und es dreht sich in dieselbe Richtung wie das Sonnenrad wodurch sich der Planetenträger immer schneller dreht und der Traktor mit steigenden Winkel der Axialkolbenpumpe an Geschwindigkeit zunimmt. Wird die hydrostatische Axialkolbenpumpe voll ausgeschwenkt fährt der Traktor Maximalgeschwindigkeit im gewählten Fahrbereich (Abbildung 6c) [BISAGLIA et al. 2003].

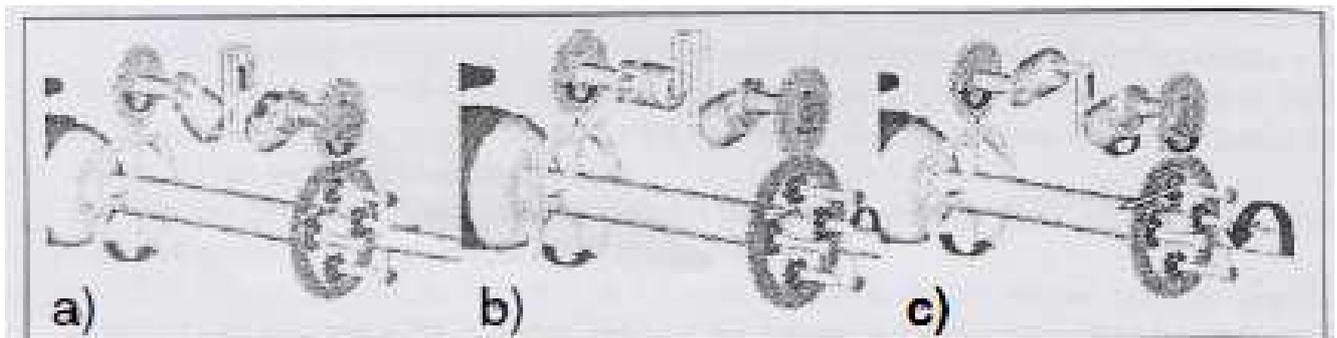


Abbildung 6: Funktionsweise des hydrostatisch leistungsverzweigten Getriebes [BISAGLIA et al. 2003]

Abbildung 7 zeigt schematisch das hydrostatisch leistungsverzweigte Getriebe T 5100 CVT von SDF. Die Hydrostatischeinheit (Hydrostatic Unit), zusammengesetzt aus Hydraulikpumpe und Hydraulikmotor sowie die mechanische Antriebseinheit (Input drive Unit), übertragen die Kraft auf das Planetengetriebe (Planetary Unit).

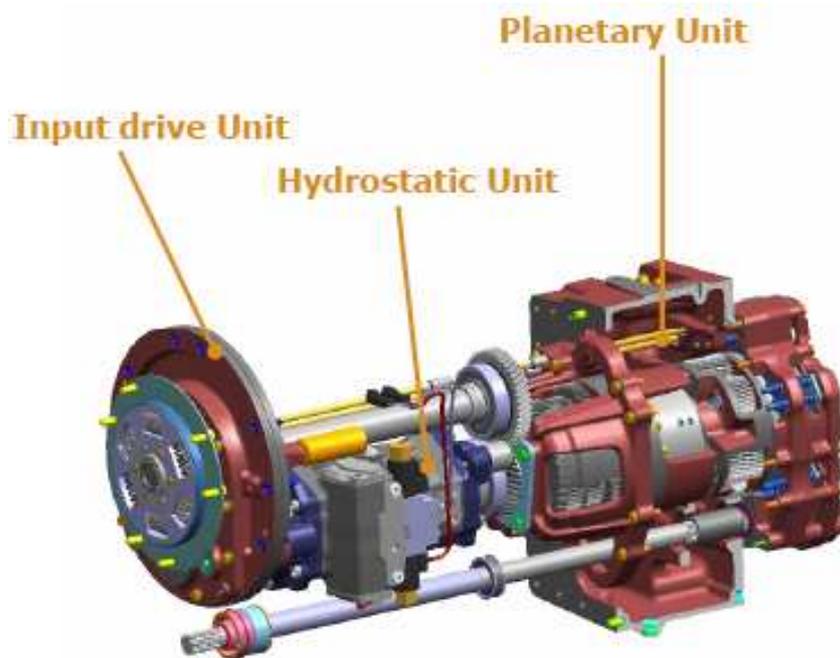


Abbildung 7: Darstellung des leistungsverzweigten Getriebes T 5100 CVT [SDF, 2011]

Abbildung 8 zeigt nochmals das Getriebe T 5100 CVT. Gut ersichtlich ist das zum Reversieren nötige Wendegetriebe in Vorgelegebauweise (Forward/Reverse drive). Das T 5100 CVT Getriebe ist in zwei Gruppen fahrbar, der Heavy Duty Gruppe für schwere Zugarbeiten, sowie Feldarbeiten von 0 – 23 km/h und der Normal Gruppe für den Feldarbeiten mit geringer Zuglast, sowie Transportarbeiten mit schwerer Last von 0 – 40 km/h.

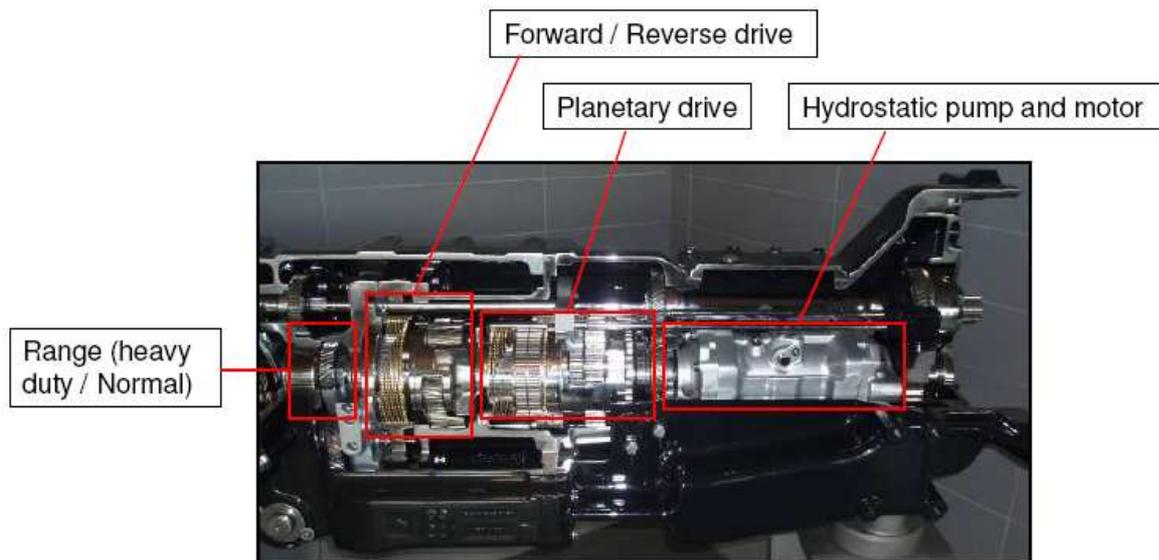


Abbildung 8: Darstellung des leistungsverzweigten Getriebes T 5100 CVT [SDF, 2011]

Abbildung 9 verdeutlicht nochmals die Funktionsweise des hydrostatisch leistungsverzweigten Getriebes T 5100 CVT im Agrofarm TTV und stellt gleichzeitig das Verhältnis vom mechanischen zum hydrostatischen Anteil an der Kraftübertragung dar. Ein Unterschied zur oben beschriebenen Funktionsweise besteht darin, dass bei den ZF Getrieben und dem TTV das Hohlräder mechanisch und das Sonnenrad hydraulisch betrieben werden. Das Hohlräder wird direkt durch den Motor angetrieben und rotiert immer in dieselbe Richtung. Das Sonnenrad hingegen wird durch den hydrostatischen Konstantmotor, der wiederum die hydraulische Verstellpumpe antreibt, angetrieben. Der Schwenkwinkel beträgt lediglich 20° in Positive, wie auch in die umgekehrte Richtung. Die Geschwindigkeit und die Rotationsrichtung des Sonnenrads kann eben mittels dieser hydrostatischen Axialkolbenpumpe variiert werden. Bei „Stage 1“ drehen Sonnenrad und Hohlräder mit derselben Drehzahl in entgegengesetzte Richtung wodurch der Planetenträger und so auch der Traktor stehen. An diesem Punkt erfolgt die Kraftübertragung zu 50 % mechanisch und zu 50 % hydrostatisch. Wird nun die Leistung der Hydraulikpumpe zunehmend minimiert fährt der Traktor los und legt an Geschwindigkeit zu. Gleichzeitig wird auch der mechanische Anteil an der Kraftübertragung erhöht. Bei Erreichen von „Stage 2“ wurde die Leistung der Hydraulikpumpe gänzlich zurückgefahren, wodurch das Sonnenrad zum Stehen kommt und nur mehr das mechanisch betriebene Hohlräder angetrieben wird. An diesem Punkt ist die Fahrgeschwindigkeit halbmaximal und die Kraftübertragung erfolgt rein

mechanisch, wodurch der Wirkungsgrad am höchsten ist. Wird die Hydraulikpumpe zusehends in die andere Richtung ausgeschwenkt nimmt das Sonnenrad wieder an Drehzahl zu, diesmal aber ist die Drehrichtung kongruent zum Hohlrade, wodurch die Traktorfahrgeschwindigkeit weiter erhöht wird. Der mechanische Anteil an der Kraftübertragung nimmt wieder kontinuierlich ab. Bei Erreichen von „Stage 3“ drehen das Sonnenrad und das Hohlrade mit maximaler Drehzahl in dieselbe Richtung, wodurch sich der Planetenträger am schnellsten dreht und der Traktor nun mit Höchstgeschwindigkeit im gewählten Fahrbereich fährt. Die Kraftübertragung erfolgt hier wieder zu 50% mechanisch und zu 50% hydraulisch [SDF, 2010b.]

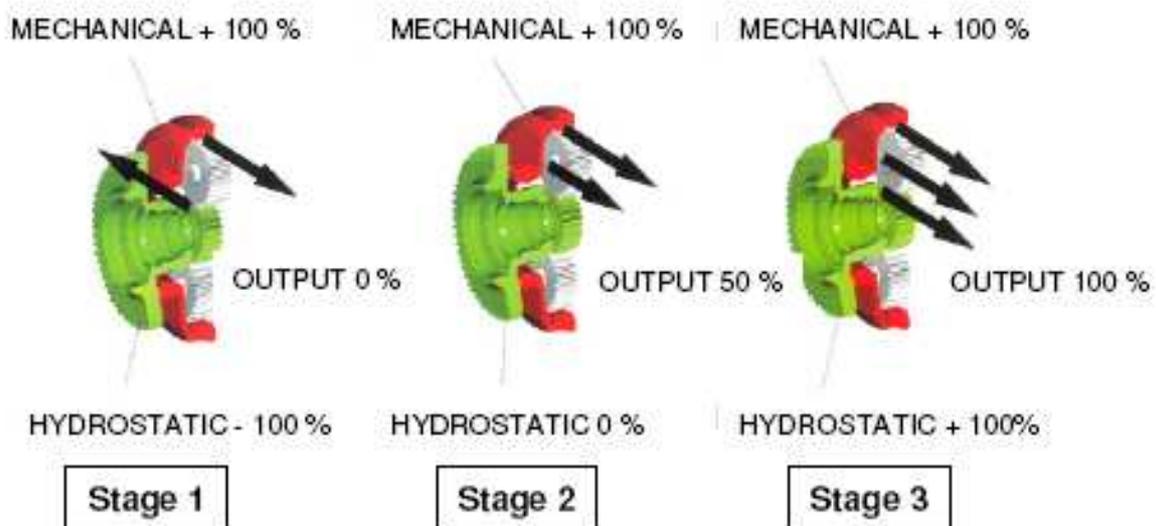


Abbildung 9: Planetengetriebe bei ZF ECCOM, ZF S-Matic und SDF TTV[SDF, 2010b]

Je nach Geschwindigkeit ist das Verhältnis hydrostatisch zu mechanischen also verschieden. Der mechanische Anteil ist konstant, der hydrostatische Anteil ist variabel um die Geschwindigkeit stufenlos zu regeln. Abbildung 10 zeigt den prozentuellen Anteil von hydraulischer und mechanischer Kraftübertragung an der gesamten Kraftübertragung abhängig von der Fahrgeschwindigkeit am Beispiel der ZF Getriebe und des TTV, welches im verwendeten Versuchstraktor AF 430 TTV von Deutz-Fahr zur Anwendung kommt. Die Getriebe sind in zwei Gruppen fahrbar (Heavy Duty, Normal).

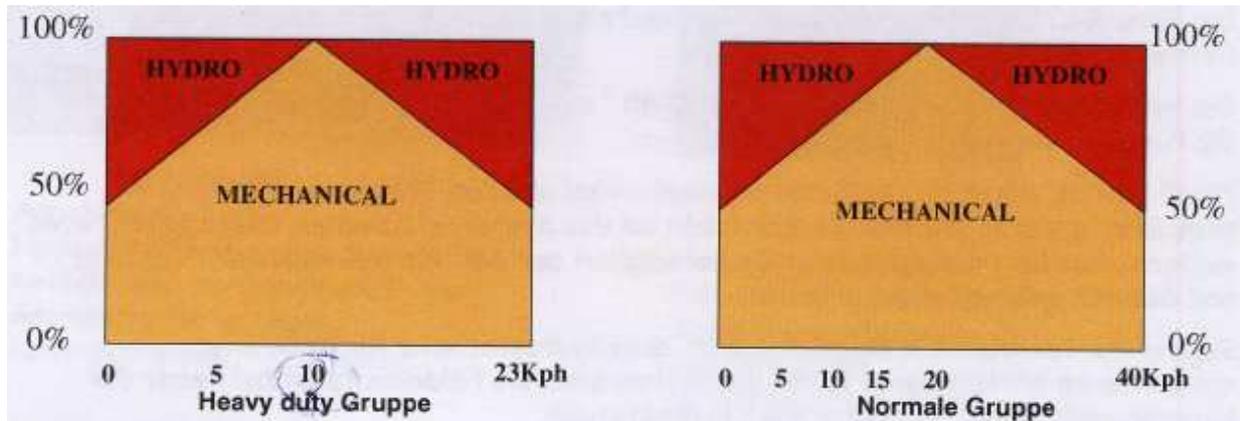


Abbildung 10: Anteil der hydrostatischen und der mechanischen Kraftübertragung in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit [SDF, 2011]

Einen etwas anderen Ansatz verfolgt das hydrostatisch leistungsverzweigte Getriebe von AGCO, welches in den Fendt Vario Traktoren (200er und 300er Serie) zu finden ist (Abbildung 11) [FENDT, 2011]. Diese Traktoren befinden sich in der gleichen Leistungsklasse wie der Agrofarm TTV. Die vom Dieselmotor angetriebene Hydraulikpumpe steuert auch bei diesem Getriebe den Hydraulikmotor. Ist die Pumpe waagrecht hat der Hydraulikmotor maximales Schluckvolumen und die vom Dieselmotor mechanisch übertragene Kraft wird durch den Hydraulikmotor gänzlich ausgeglichen und der Traktor steht. Wird die Hydraulikpumpe ausgeschwenkt startet der Traktor und mit steigendem Schwenkwinkel nehmen die Geschwindigkeit des Traktors und der mechanisch übertragene Anteil der Traktorleistung zu. Das Getriebe von AGCO arbeitet daher beim Anfahren gänzlich hydrostatisch. Wird der Hydraulikmotor gänzlich in Richtung „Null“ zurückverstellt kommt die Drehung am Hohlrad vollständig zum Erliegen und die Höchstgeschwindigkeit in den jeweiligen Fahrbereichen wird erreicht und der mechanische Leistungsanteil ist nahezu 100 %. Zum Rückwärtsfahren wird der Hydraulikmotor durch „Null“ hindurch in die andere Richtung verschwenkt [HONZEK, 2011].

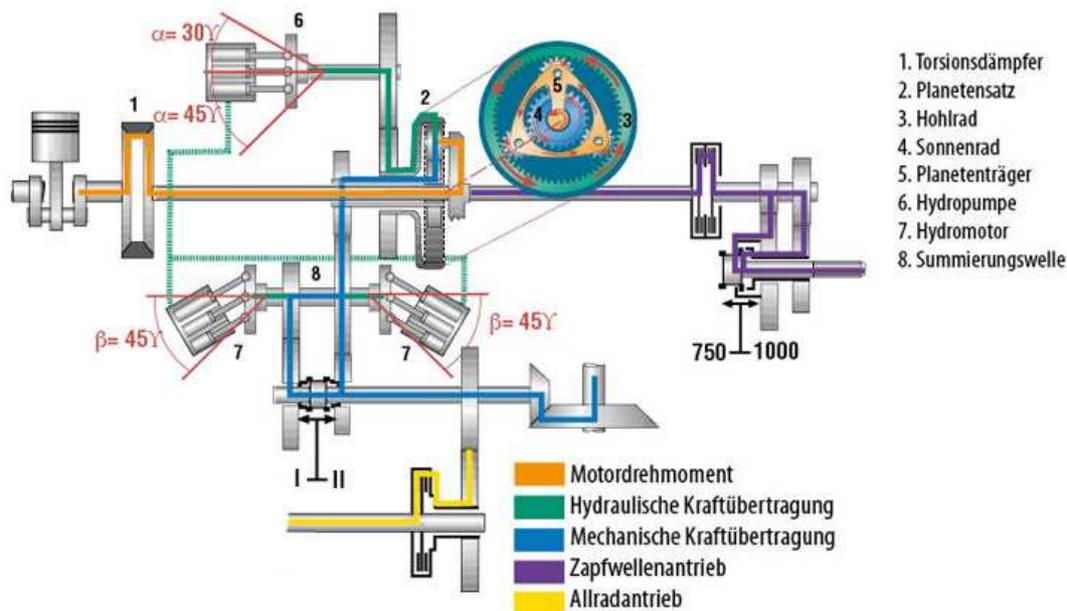


Abbildung 11: Das hydrostatisch leistungsverzweigte Getriebe von AGCO [FENDT, 2011]

Zum Reversieren verwendet das AGCO Getriebe also die hydrostatische Einheit, während beim ZF und SDF Getriebe der Hydromotor ausschließlich zur stufenlosen Geschwindigkeitsregulierung verwendet wird und das Rückfahren mit einem eigenen Wendegetriebe gelöst wird. Daraus ergibt sich zwischen den ZF Getrieben und den AGCO Getriebe einen Unterschied im mechanischen und hydraulischen Anteil der Kraftübertragung je nach Geschwindigkeit. Abbildung 12 verdeutlicht den Unterschied bei einer Fahrgeschwindigkeit von 5 km/h. Bei dieser Geschwindigkeit fährt das AGCO Getriebe mit zirka 90 % hydrostatischer Kraftübertragung, während beim TTV Getriebe lediglich 30 % hydrostatisch übertragen wird. Wird berücksichtigt, dass mechanisch übertragene Kraft einen höheren Wirkungsgrad hat, wird ersichtlich, dass im unteren und mittleren Geschwindigkeitsbereich das TTV Getriebe einen wesentlich höheren Wirkungsgrad hat, während das Variogetriebe einen höheren Wirkungsgrad im oberen Geschwindigkeitsbereich besitzt. Da die meisten Feldarbeiten bei niedrigen und mittleren Geschwindigkeiten erfolgen (Abbildung 15), ist bei den ZF Getrieben und dem SDF TTV ein höherer Wirkungsgrad zu erwarten.

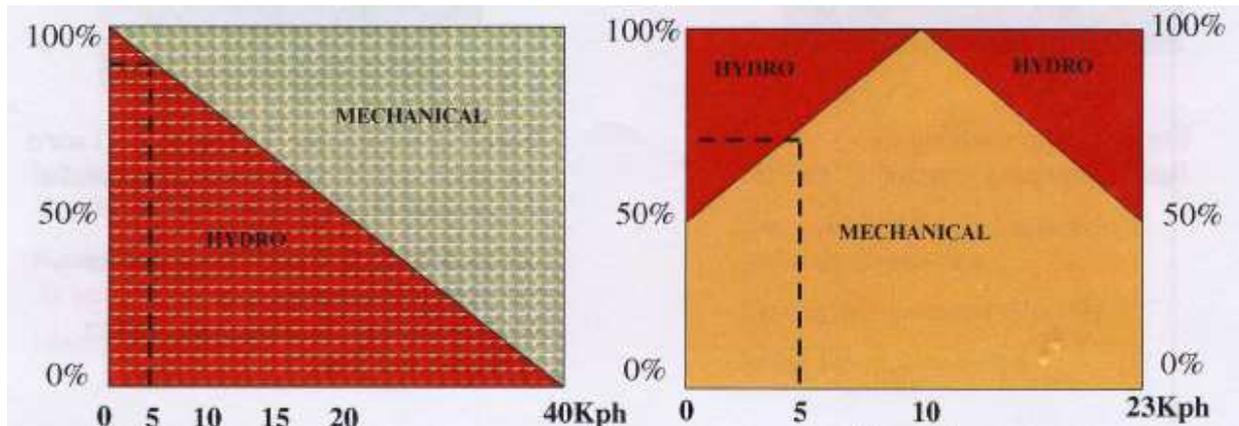


Abbildung 12: Anteil der hydrostatischen und der mechanischen Kraftübertragung in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit. Links Vario Getriebe von AGCO, rechts TTV Getriebe von SDF [SDF, 2011]

Einfluss des Getriebes auf den Kraftstoffverbrauch

Der Getriebewirkungsgrad trägt wesentlich zum Gesamtwirkungsgrad des Traktors bei und ist deshalb wesentlich mitbestimmend für den Kraftstoffverbrauch [LECHNER UND NAUNHEIMER, 1994]. Je schlechter der Wirkungsgrad, desto höher der Treibstoffverbrauch. Der Getriebewirkungsgrad wird durch die Getriebebauart bestimmt [RENIUS, 1985]. Haben Stirnradpaare einen Wirkungsgrad von 99,0 – 99,8 %, so kommen rein hydrostatische Getriebe über einen Wirkungsgrad von 80 – 86 % nicht hinaus [LECHNER UND NAUNHEIMER, 1994]. Abbildung 13 zeigt den Wirkungsgrad und die Bedienbarkeit unterschiedlicher Getriebebauarten. Erfolgt die Kraftübertragung rein mechanische (bspw. Schubradgetriebe oder Synchrongetriebe) ist der Wirkungsgrad sehr hoch, aber die Bedienbarkeit stark eingeschränkt. Bei stufenlosen bzw. hydrostatischen Getrieben ist zwar ein hoher Bedienkomfort gegeben, dafür ist aber der Wirkungsgrad herabgesetzt [SZENTE UND LAMPEL, 2002].

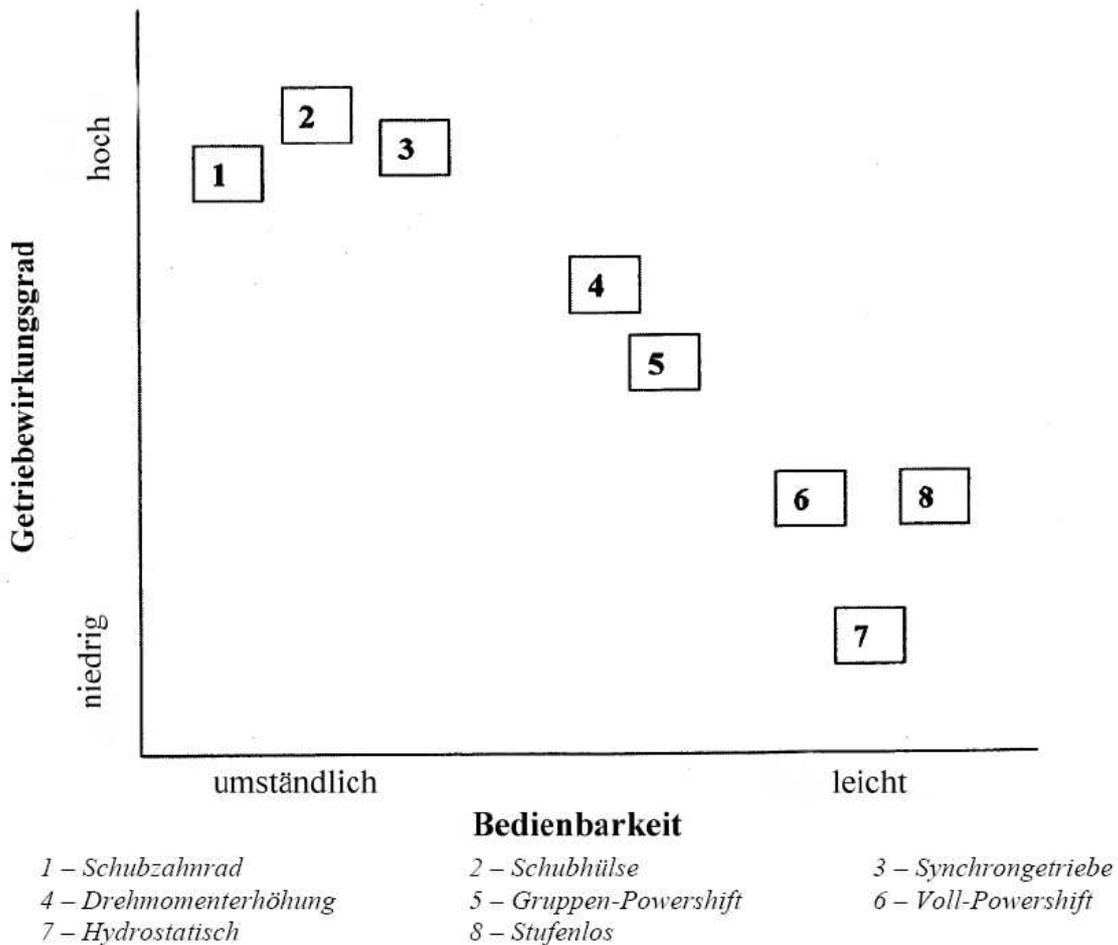


Abbildung 13: Wirkungsgrad und Bedienbarkeit unterschiedlicher Getriebebauarten [SZENTE UND LAMPEL, 2002]

Der Triebstrangwirkungsgrad beschreibt den Wirkungsgrad von Motorausgangswelle bis hin zu den Antriebsrädern und ist daher wesentlich zur Berechnung des optimalen Motorbetriebspunktes. Er setzt sich aus folgenden Wirkungsgraden bzw. Verlustleistungen zusammen [LECHNER UND NAUNHEIMER, 1994; RENIUS, 1985].

- Verzahnungsverluste
 - o Reibungsverluste (lastabhängig)
 - o Plansch- und Quetschverluste (drehzahlabhängig)
- Lagerverluste

- Dichtungsverluste
- Synchronisierungsverluste
- Kupplungsverluste
- Wandlerverluste
- Nebenaggregate (Lichtmaschine, Hydraulik, etc.)

Die Verluste finden an folgenden Triebstrangkomponenten statt [LECHNER UND NAUNHEIMER, 1994]:

- Anfahrlement (Kupplung, etc.)
- Fahrgetriebe
- Endantrieb

Berechtigung von Stufengetriebe und stufenlosen Getriebe

Die Entscheidung stufenloses Getriebe oder Schaltgetriebe hat eine große Auswirkung auf die Fahreigenschaften von Traktoren. BEA (1997) definiert die in Tabelle 1 genannten monetären und nicht monetären Nutzenkriterien für ein Traktorgetriebe. Es gilt zu berücksichtigen, dass nicht-monetäre Eigenschaften auch ökonomische Auswirkungen haben, wenn die Folgewirkungen miteinbezogen werden. So schlagen sich technische Funktionen sowie Fahrkomfort vor allem langfristig auch finanziell zu Buche (z.B. Gesundheit).

Tabelle 1: Nicht-monetäre und monetäre Nutzenkriterien für Traktorgetriebe [BEA, 1997]

Nicht-monetäre Nutzenkriterien
<p>a) Technische Funktionen</p> <ul style="list-style-type: none"> Potentiale zur Anpassung an unterschiedliche Arbeitseinsätze Potentiale zur Automatisierung von Arbeitsabläufen Beschleunigungsvermögen <p>b) Fahrkomfort</p> <ul style="list-style-type: none"> Art und Anzahl von Schaltvorgängen Schaltqualität Art der Automatisierungsvorgänge Anforderungen an den Fahrer Geräuschabstrahlung
Monetäre Nutzenkriterien
<ul style="list-style-type: none"> Arbeitseffizienz Fahr- bzw. Flächenleistung Kraftstoffverbrauch Service- und Reparaturkosten Anschaffungskosten

Der große Vorteil von stufenlosen Getrieben liegt in der Möglichkeit die Fahrgeschwindigkeit weitestgehend unabhängig von der Motordrehzahl stufenlos und feinfühlig einzustellen und so den verschiedenen Arbeitseinsätzen anzupassen [GRAD, 2003]. Die Automatisierung durch verschiedene Hilfen wie Tempomat und Schnellreversierung erhöhen die Leistungsfähigkeit von Schlepper und Fahrer. Das Beschleunigungsvermögen ist bei stufenlosen Getrieben wesentlich höher und für die Beschleunigung von 0 auf 40 km/h werden lediglich 6,2 sec. benötigt. Bei einem Lastschaltgetriebe dauert die Beschleunigung wesentlich länger und es kann mit bis zu 11 sec. gerechnet werden [BEA, 1997]. Weiters zu nennen sind erhöhte Fahrgeschwindigkeiten (50 km/h), welche durch Stufengetriebe nur aufwendig realisierbar sind sowie die Aktive Stillstandsregelung (Geared-Neutral-Betrieb), die es ermöglicht Lasten im

Fahrzeugstillstand zu halten und aus dieser Position heraus über das Fahrpedal anfahren zu können [GRAD, 2003]. Die Meinungen über den Wirkungsgrad gehen auseinander. Während manche Autoren von einem leicht schlechteren Wirkungsgrad des stufenlosen Getriebes ausgehen [RENIUS, 1985; BÖTTINGER, 2008] geben andere an, dass der Wirkungsgrad bei beiden ungefähr ähnlich ist und sich im Bereich von 80 – 90 % bewegt [BEA, 1997; ISENSEE et al. 2001].

Die Beschleunigen und das Reduzieren der Geschwindigkeit benötigt beim stufenlosen Getriebe keine Schaltvorgänge mehr, sondern wird durch Vor- und Rückwärtsbewegung eines Fahrhebels geregelt. Im Vergleich zum Lastschaltgetriebe reduzieren sich die Schaltvorgänge deutlich da nur mehr die Fahrbereiche gewählt werden müssen. Auch die Betätigung der Kupplung ist nicht mehr notwendig [BEA, 1997]. Es entfallen aufwendige Schaltgestänge und Schalthebel, wodurch flexiblere Betätigungskonzepte und erweiterte Möglichkeiten zur Kabinengestaltung möglich sind. Für den Fahrer nützlich und günstig sind auch die erleichterte Bedienbarkeit sowie die Arbeitserleichterung, welche sich aus den Betriebsstrategien und der kombinierten Motor-/Getriebesteuerung ergeben [GRAD, 2003]. Die Automatisierungsmöglichkeiten vermindern Arbeitsschritte für den Fahrer und erhöhen somit den Fahrkomfort und führen zu einer exakteren Arbeitsweise [BEA, 1997].

Für einen finanziellen Vergleich spielen vor allem die Flächen- und Fahrleistung sowie der Kraftstoffverbrauch eine übergeordnete Rolle. Eine Reihe von Studien [BEA, 1997; BÖTTINGER 2008] zeigen eine höhere Flächen- bzw. Fahrleistung bei niedrigerem Kraftstoffverbrauch für das stufenlose Getriebe. Der Leistungsvorsprung nimmt laut BEA [1997] mit steigender Beanspruchung zu. Scheint die erhöhte Flächenleistung des stufenlosen Getriebes als bewiesen, gibt es zum Kraftstoffverbrauch auch gegensätzliche Studien die das Stufengetriebe favorisieren [WILMER, 2004; FRABL, 2008]. In Kapitel 1.4 wird das stufenlose gegenüber dem Stufengetriebe hinsichtlich Kraftstoffverbrauchs aufgrund der Relevanz für diese Diplomarbeit ausführlich behandelt. Service und Reparaturkosten sind in etwa vergleichbar, Vorteile für das stufenlose Getriebe liegen im Wegfall der Kupplung und der geringeren Anzahl an Zahnradern. Allerdings sind die Anschaffungskosten des stufenlosen Getriebes höher.

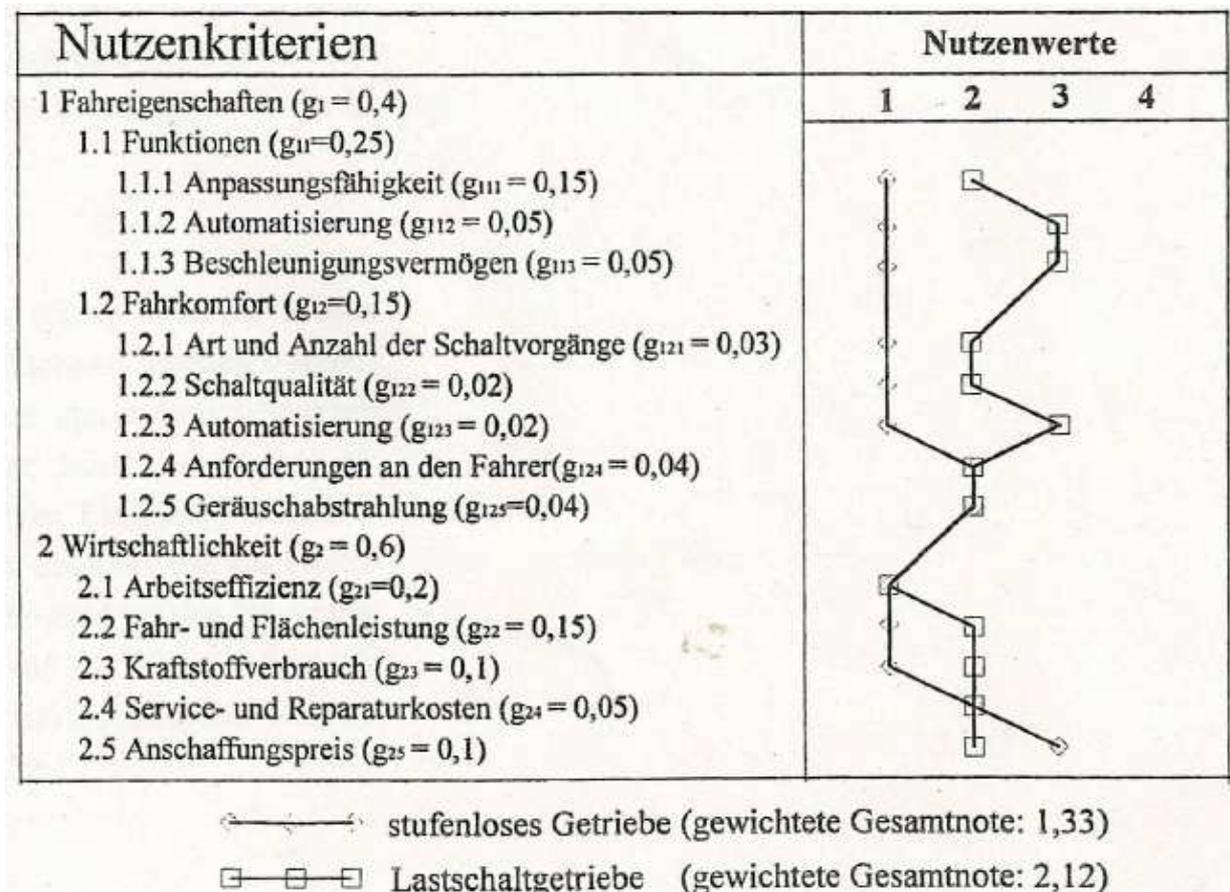


Abbildung 14: Gesamtbewertung des stufenlosen Fahrtriebs und des Fahrtriebs mit vierfach-Lastschaltung [BEA, 1997]

Abbildung 14 zeigt ein Polaritätenprofil der beiden Getriebearten die anhand von Nutzenkriterien berechnet wurden. Die Werte in Klammern geben die Gewichtung der einzelnen Nutzenkriterien an. Die Fahreigenschaften wurden mit 0,4 Punkten bewertet, während die Wirtschaftlichkeit mit 0,6 Punkten bewertet wurde. Daraus ergibt sich ein möglicher Gesamtnutzenwert zwischen 1 und 4, wobei 1 der höchste und 4 der niedrigste Wert ist. Der Gesamtnutzenwert liegt in dieser Bewertung beim stufenlosen Getriebe mit 1,33 höher als beim Lastschaltgetriebe mit 2,12 [BEA, 1997].

1.4 Kraftstoffeinsparung durch Traktorabstimmung

Die Auslastung des Motors und der Betriebspunkt im Kennfeld bestimmen den Kraftstoffverbrauch. Auslastung und Betriebspunkt werden beeinflusst durch die Komponenten

des Traktors selbst (Getriebe, Nebenaggregate, Lichtmaschine, Kühlwasserpumpe etc.), deren Zusammenspiel sowie durch seine Einsatzweise wie die Fahrweise oder Betriebseinstellungen [BÖTTINGER, 2008]. Bei der Zugleistung bspw. kann der Traktor bei einem Dieserverbrauch von 25 Liter je Hektar nur zirka fünf Liter in effektive Zugleistung umsetzen. Der größte Teil der Energie geht über die Motorkühlung und die Abgase verloren. Bei sehr ungünstigen Traktionsverhältnisse kann durch Schlupf und Rollwiderstand der Gesamtwirkungsgrad des Traktors unter 20 % sinken [DEIMEL, 2011].

Eine Untersuchung von KIM et al. [2008] zeigte auf, dass der spezifische Kraftstoffverbrauch im Zeitraum 1959 bis 2002 um circa 20 % gesunken ist. Wobei zu berücksichtigen gilt, dass bis zirka 1980 kaum Veränderungen erkennbar waren. Die Masse des Traktors beeinflusst die Zugleistung positiv, allerdings nimmt der Kraftstoffverbrauch aufgrund der erhöhten Masse zu. Von 1959 bis 2002 stieg die auf die Masse bezogene Zugleistung um 66 % auf 1,28 kW/kN.

Die Leistungsübertragung auf angebaute oder angehängte Geräte erfolgt durch Zapfwelle und Hydraulik. Die hydraulische Leistung ist je nach Traktorklasse verschieden. Während bei kleineren Baureihen einfache Konstantstromsysteme Verwendung finden kommen bei größeren Klassen vermehrt Load-Sensing-Systeme zum Einsatz, welche die Effizienz erhöhen. Während Konstantpumpen Öl permanent und unabhängig vom Gebrauch fördern, fördern Load-Sensing-Systeme das Öl nur bei Bedarf. Das Load-Sensing-System ist eine hydraulische Regelung, die den Druck und den Volumenstrom der Pumpe an die vom Fahrer geforderten Bedingungen anpasst. Die Pumpe fördert nur so viel Öl, um beim jeweils geforderten Volumen den benötigten Druck zu gewährleisten. Zusätzlich erhöhen Power Beyond Anschlüsse die Kraftübertragung. Durch diese Anschlüsse wird das Öl ohne Drosselung durch Ventile, direkt zum Anbaugerät geleitet [BÖTTINGER, 2008].

Die mechanische Leistungsübertragung erfolgt durch die Zapfwelle und wird durch die Motordrehzahl bestimmt. Sparzapfwellen ermöglichen den Betrieb auch bei geringerer Motordrehzahl. Die Entkoppelung der Motordrehzahl durch ein stufenloses Zapfwellengetriebe befindet sich zwar bei verschiedenen Herstellern in der Entwicklung, wurde aber noch nicht in die Praxis eingeführt [BÖTTINGER, 2008].

Reifenbauart und Luftdruck bestimmen über Rollwiderstand und Spurbildung das Triebkraftverhalten. Reifeninnendruckregelanlagen ermöglichen eine Anpassung an die verschiedenen Bodenverhältnisse und können so nicht nur die Bodenverdichtung vermindern sondern auch Treibstoff sparen [BÖTTINGER, 2008]. Radialreifen haben gegenüber Diagonalreifen wegen ihrer weicheren Flanken eine größere Aufstandfläche und einen geringeren Rollwiderstand. Bei Straßenfahrten ist ein hoher Druck im Reifen zu bevorzugen (min 1,6 bar), da so der Rollwiderstand minimiert wird. Bei Feldarbeiten sollte der Druck möglichst gering sein (etwa 0,6 bar), da so der Auflagedruck und der Schlupf minimiert werden, was zusätzlich die Bodenverdichtung minimiert. Auf dem Markt erhältlich sind vollautomatische Reifendruckregelanlagen mit denen der Reifendruck je nach Bedarf eingestellt werden kann [DEIMEL, 2011].

Auch eine sorgfältigen Wartung hilft Kraftstoff zu sparen. Das Einsparungspotential liegt bei 5 – 10 %. Der Gesamtwirkungsgrad kann bspw. durch verschmutzte Ölfilter, undichte Ladeluftleitungen, zu hohe Einspritzmenge oder falsches Ventilspiel deutlich herabgesetzt werden. [DEIMEL, 2011]. Tabelle 2 zeigt zusammenfassend das Einsparungspotential vom Gesamtpaket Traktor

Tabelle 2: Kraftstoffeinsparungspotential bei Traktoren [BÖTTINGER, 2008]

Maßnahme	Einsparung von bis zu
Richtige Schleppermasse	10 %
Richtige Radlastverteilung	2 %
Richtige Bereifung und Luftdruck	8 %
Gangwahl	26 %
Schlepper-Geräte-Kombination	20 %
Anpassung Fahrgeschwindigkeit	8 %
Zuschalten von Allradantrieb	8 %
Zuschalten von Differenzialsperre	5 %
Fahren quer zum Hang	5 %

1.5 Kraftstoffeinsparung beim Arbeitseinsatz

Allgemeines zur Kraftstoffeinsparung

Hinsichtlich Fahrstrategie sind große Arbeitsbreiten und hohe Fahrgeschwindigkeiten im Sinne eines geringen Kraftstoffverbrauchs zu bevorzugen. Prinzipiell geht bei hohen Fahrgeschwindigkeiten die Effizienz stärker zurück als bei großen Arbeitsbreiten, wodurch gemäßigt fahren in Verbindung mit breiten Geräten sich als sparsam erweist [BÖTTINGER, 2008]. Abbildung 15 zeigt in der Praxis gängige Einsatzgeschwindigkeiten von Traktoren.

Der Transport von kleinen Lasten (weit unter der zul. Anhängerlast) ist hinsichtlich spezifischem Treibstoffverbrauchs besonders unwirtschaftlich und lässt sich nicht durch hohe Fahrgeschwindigkeiten ausgleichen. Ein bedeutender Parameter zur Bestimmung der Transport-Energieintensität ist der auf die Einheiten von Nutzlast und Fahrstrecke bezogene Kraftstoffverbrauch ($l/t/km$), welcher umso besser ist je besser die zulässige Anhängerlast ausgenutzt wird [REHRL, 1977]. MOITZI et al. [2008] ermittelten in diesem Sinne eine optimale Geschwindigkeit von 25 – 30 km/h. Beim landwirtschaftlichen Transport steigt der Kraftstoffverbrauch überproportional zur Fahrgeschwindigkeit an. Beim Transport ist das Kraftstoffeinsparpotential am Höchsten wenn der Motor am optimalen Motorbetriebspunkt betrieben wird. Als Faustzahl gilt, dass die Motordrehzahl bei ungefähr 70 – 80 % der Nenndrehzahl liegen soll [MOITZI 2008].

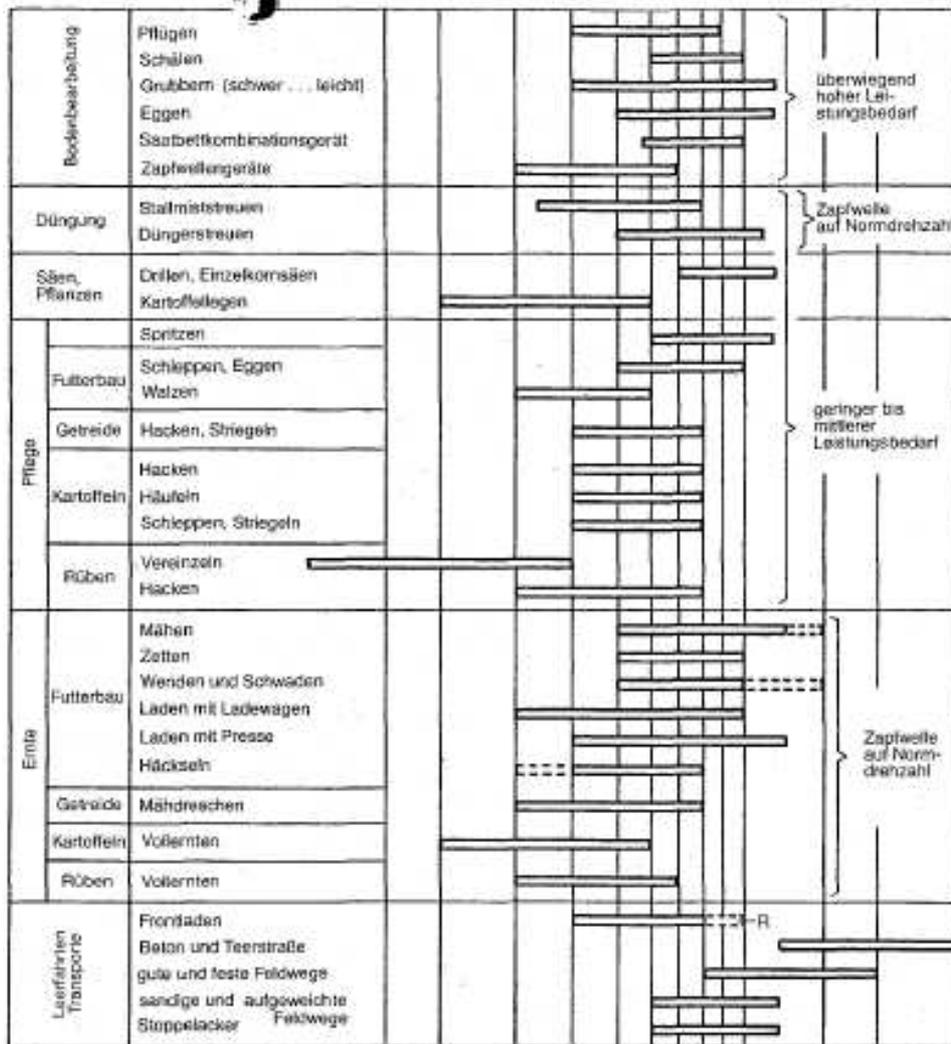


Abbildung 15: Praktische Einsatzgeschwindigkeiten bei Arbeiten mit Traktoren [RENIUS, 1985]

Schaltbar vs. stufenlos

Eine Studie von KNECHTGES UND TEWES [2000] untersuchten die Auswirkungen des Getriebes (stufenlos oder schaltbar) auf Kraftstoffverbrauch und Flächenleistung bei der Mäharbeit. Verwendet wurden die Traktoren Fendt Favorit 916 Vario (stufenlos) und der Fendt Favorit 816 mit einem vierstufigen lastschaltbaren Getriebe. Die gewählte Fahrstrategie war „Maximierung der Flächenleistung“. Das Ergebnis zeigt die Überlegenheit des stufenlosen Getriebes. Es verbrauchte 10,7 % weniger Kraftstoff bei einer gleichzeitig um 7,8 % erhöhten

Flächenleistung (ha/h). Mit zunehmender Drückung sinkt der spezifische Leistungsbedarf des Mähwerks, der Motor bleibt jedoch im Konstantleistungsbereich und der dadurch entstehende Leistungsüberschuss kann für eine höhere Fahrgeschwindigkeit verwendet werden. Dieser Effekt kann besonders beim stufenlosen Getriebe genutzt werden. Die starken dynamischen Belastungen durch den Schaltvorgang steigern den spezifischen Kraftstoffverbrauch. Allerdings wurde in Laborversuchen nachgewiesen, dass dieser erhöhte Verbrauch nur sehr schwach ausgeprägt ist [KNECHTGES UND TEWES, 2000].

Eine Studie von WILMER [2004] zeigte hingegen, dass ein Fendt 930 mit stufenlosem Getriebe bezogen auf die Zugleistung gleich viel Kraftstoff verbrauchte wie zwei andere Traktoren mit Vielstufen-Lastschaltgetrieben.

FRABL [2008] untersuchte den Kraftstoffverbrauch von stufenlosen und Stufengetriebe mittels Tiefenlockerer, Grubber und beim Transport an zwei baugleichen (lediglich das Getriebe war verschieden) Massey Ferguson Traktoren. Die Studie zeigte, dass der stufenlose Traktor beim Transport einen um 6 % niedrigeren Verbrauchswert hatte (Geschwindigkeit wurde konstant gehalten). Beim Arbeiten unter Last (Tiefenlockerer und Grubber) erwies sich das stufenlose Getriebe als nachteilig und verbrauchte je nach Versuchsreihe 6 – 17 % mehr Treibstoff. Motordrehzahl und Fahrgeschwindigkeit wurden stets konstant gehalten.

SZENTE UND LAMPEL [2002] zeigten in einer Reihe von Versuchen (Zugkraft und Fahrgeschwindigkeit waren konstant), dass das stufenlose Getriebe in jedem Fall um 5 – 15 % niedriger als beim Schaltgetriebe war. Sie kamen weiters zu folgenden Ergebnisse:

- Traktoren mit stufenlosen Getrieben verfügen über besseres Beschleunigungsvermögen und niedrigerem spezifischen Treibstoffverbrauch
- Die Hauptursache des niedrigeren spezifischen Treibstoffverbrauches liegt in der rechtzeitig vorgenommenen Reduktion der Motordrehzahl
- Der Unterschied zwischen stufenlosen und Stufengetrieben ist bei Transportaufgaben noch markanter
- Der Zusammenklang von Motorregelungs- und Kraftübertragungssysteme eines Traktor mit stufenlosen Getrieben ist besser möglich als bei einem Stufengetriebe.

Es zeigt sich also, dass eine Reihe von Studien zu unterschiedlichen Ergebnissen hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs kommt. Zumindest bei Transportarbeiten zeigt sich in allen Studien, dass stufenlose Getriebe überlegen sind. Bei erhöhtem Zugkraftbedarf zeigt sich jedoch, dass zumindest wenn die Geschwindigkeit konstant gehalten wird, das Lastschaltgetriebe im Vorteil ist. Ist aber das Ziel „Maximierung der Flächenleistung“, schneidet das stufenlose Getriebe wiederum besser ab, da zumindest beim Mähen eine höhere Flächenleistung erwartet werden kann, was zur Reduktion des Kraftstoffverbrauches bezogen auf die Fläche führt.

Zielsetzung und Fragestellung

Hauptziel dieser Arbeit ist es, festzustellen ob zwischen den Traktoren der 75 kW-Klasse mit einem Stufengetriebe und einem stufenlosen Getriebe ein Unterschied im Kraftstoffverbrauch besteht. Als Nebenziel wird die Auswirkung der Fahrstrategie beim Mähen auf den Kraftstoffverbrauch untersucht. Aus der Zielsetzung lassen sich folgende Forschungsfragen ableiten:

Gibt es Unterschiede im Kraftstoffverbrauch zwischen einem stufenlosen und einem lastschaltbaren Getriebe bei der Mäharbeit?

Gibt es Unterschiede im Kraftstoffverbrauch zwischen einem stufenlosen und einem lastschaltbaren Getriebe beim Transport von schweren Lasten?

Gib es Unterschiede im Kraftstoffverbrauch zwischen unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten beim Mähen.

Zur Versuchsdurchführung wurden die beiden Traktoren Agrofarm 430 TTV (stufenlos) und Agrofarm 430 Profiline (lastschaltbar) von der Firma Deutz-Fahr Austria zur Verfügung gestellt. Die beiden Traktoren waren bis auf das Getriebe baugleich.

Die zwei unterschiedlichen Getriebearten wurden beim Mähen auf den Kraftstoffverbrauch [l/h] und [l/ha] hin untersucht. Zur Anwendung kamen zwei praxisnahe Geschwindigkeiten von 11,5 km/h und 16 km/h.

Beim Transportversuch wurde der Kraftstoffverbrauch [l/km], [l/h] und [l/t\km] untersucht um ein Ergebnis ableiten zu können.

Material und Methoden

1.6 Versuchsstandort

Großraum

Das Marchfeld ist mit einer Fläche von zirka 1000 km² die größte Ebene Niederösterreichs. Begrenzt von der Donau im Süden, der March im Osten, dem Weinviertler Hügelland im Norden und dem Bisamberg im Westen – geographisch jedoch zum Wiener Becken zählend – liegt die so genannte Kornkammer Österreichs. Unterteilt wird das Marchfeld in zwei Ebenen, zwischen 137 und 165 m Seehöhe.

Intensive Landwirtschaft, speziell bewässerungsbedürftige Kulturen im Gemüsebau und Ackerbau, ließen den Grundwasserspiegel auf einen gefährlich niedrigen Stand sinken. Dem wurde 1983 mit dem Bau des Marchfeldkanals entgegengewirkt. Dieser stellt eine gelungene Lösung sowohl aus ökologischer und ökonomischer Sicht dar [FÜRST, 2011].

Standort, Klima und Boden

Die Versuchswirtschaft der Universität für Bodenkultur in Groß Enzersdorf liegt zirka 5 km östlich der Stadtgrenze von Wien im gemäßigten Klima. Die Versuchsflächen befinden sich 3 km in nordöstlicher Richtung von der Versuchswirtschaft.

Mit einem mittleren Jahresniederschlag von 554 mm zählt diese Region zu den niederschlagsarmen in Österreich. Durch die offene Lage begünstigen die häufigen Winde die Bodenaustrocknung. Das Klima zeichnet sich durch heiße, trockene Sommer und kalte schneearme Winter aus. Die Jahresmitteltemperatur beträgt 9,8° C.

Rund um Raasdorf findet man Tschernoseme, entstanden aus kalkhaltigen Feinsedimenten des Tertiärs. Sie sind teil der Praterterrassen. Der Humusgehalt des A-Horizontes beträgt liegt zwischen 2,5 % und 4,8 %. Der ph-Wert liegt mit 7,5–7,6 im leicht alkalischen Bereich, wobei

die Böden ausreichend bis gut mit Phosphor, Kalium und Magnesium versorgt sind [DAPP, 2011].

1.7 Versuchsfeld für den Mähversuch

Zur Durchführung des Mähversuchs musste ein geeignetes Feldstück gefunden werden. Herr Dipl. Ing. Refenner unterstützte mich bei der Suche. Da die Flächen der BOKU nicht geeignet waren, stellte uns der Hof Biorind Schauer seine Pachtfläche zur Verfügung. Diese entsprachen den Anforderungen:

- Gesamtfläche von zirka 10 ha
- eine Gesamtlänge von 500 m um mit einer Versuchsfahrt genau ein halbes Hektar zu mähen
- Breite von 200 m
- Homogener Pflanzenbestand, oder Unregelmäßigkeiten nur quer zur Fahrtrichtung
- gleichmäßiger Aufwuchs der Luzerne



Abbildung 16: Versuchsfelder für den Mähversuch. Zweimal zirka fünf Hektar, Mähfläche A: 5 ha, Mähfläche B: 5 ha

Diesen Anforderungen entsprachen zwei, durch einen Feldweg getrennten Flächen. Bei einer Feldstücklänge von 500 m und einer Arbeitsbreite von 10 m, bestehend aus Hin- und Rückfahrt, ergibt sich eine gemähte Fläche von einem halben Hektar.

Gefahren wurde abwechselnd auf beiden Flächen, da die rot markierte beim vorherigen Schnitt, um eine Woche früher gemäht wurde als die andere und somit der Bestand etwas älter war. Gewichtsmäßig gab es bei der Frischmasse keine Unterschiede.

1.8 Eingesetzte Maschinen

Traktoren Agrofarm 430 TTV und Agrofarm 430 Profiline

Die Firma Deutz-Fahr Austria stellte zur Versuchsdurchführung zwei Vorführtraktoren, sowie ein Front-Trommelmäherwerk und ein Heck-Scheibenmäherwerk mit Fingeraufbereiter zur Verfügung.

Die beiden Deutz-Fahr Agrofarm Traktoren werden von einem elektronisch geregelten turbogeladenen 4.038 cm³ Vierzylinder Deutz- Motor mit Ladeluftkühlung vom Typ TCD 2012 L04Tier III angetrieben. Die maximale Leistung beträgt 80 KW /109 PS. Beide Typen sind bis auf das Getriebe, baugleich. Weitere technische Daten sind der Tabelle 1 zu entnehmen.

Im Agrofarm 430 TTV befindet sich das leistungsverzweigte Getriebe CVT T 5100. Dieses Getriebe wird mechanisch per Schalthebel, rechts neben dem Fahrersitz, in zwei Fahrbereiche geschaltet, wobei der maximale Anteil des hydrostatischen 50 % und der mechanische Anteil minimal 50 % bis 100 % am gesamten Kraftstrang beträgt. Im Fahrbereich 1 von 0 – 24 km/h lassen sich schwere Zugarbeiten oder die meisten Feldarbeiten durchführen. Für Transportarbeiten mit hoher Last, oder leichten Feldarbeiten steht der Fahrbereich 2, von 0 – 40 km/h Endgeschwindigkeit, bei reduzierter Motordrehzahl, zur Verfügung. Je nach Fahrbereich fährt der Traktor bei der Hälfte der Endgeschwindigkeit, entweder bei zirka 11 km/h oder 22 km/h Traktor zu 100 % im mechanischen Bereich.

Tabelle 3: Technische Daten von Agrofarm 430 TTV / PL [SDF, 2010]

Technische Daten	Agrofarm 430 TTV	Agrofarm 430 PL
Max. Leistung	79kW/109PS	79kW/109PS
Max. Drehmoment (Nm)	400 Nm	400 Nm
Hubraum (ccm)	4038	4038
Nenndrehzahl (U/min)	2100	2400
Turbo/Intercooler	Ja/Ja	Ja/Ja
Getriebe	Stufenloses SDF TTV	3 Lastschaltstufen
Gänge	Nein	60x60
Kupplung	Nasse Lamellen-Kupplung	PowerShuttle
Differenzialsperre	Elektro-hydraulische Zusch.	Elektro-hydraulische Zusch.
Bremssystem	Nasse Scheibenbremsanlage	Nasse Scheibenbremsanlage
Lenksystem	hydrostatisch	hydrostatisch
Heckzapfwelle (U/min)	540/540 E/1000	540/540 E/1000/1000E
Frontzapfwelle (U/min)	1000	1000
Tankinhalt (l)	160	160
EHR	Ja	Ja
ASM	Ja	Ja
Radstand (mm)	2340	2340
Länge (mm)	4150	4150
Breite Min.-Max. (mm)	2050/2230	2050/2230
Gewicht (kg)	4600	4600
Zul. Gesamtgewicht (kg)	7500	7500

Im Agrofarm 430 Profiline ist ein lastschaltbares mechanisches Getriebe mit 60 x 60 Gängen verbaut. Aufgeteilt in vier Gruppen, fünf Gängen und drei Lastschaltstufen, jeweils vor und zurück.

Die Bereifung war bei beiden Traktoren vorne 480/65 R 24 und hinten 540/65 R 34. Der Luftdruck in den Reifen wurde für den Transport- und Mähversuch gleichermaßen, vorne auf 1,3 bar und hinten auf 1,4 bar eingestellt. Dies ist ein durchaus praxisüblicher Wert, bei dem Schwingungen und Schläge, bedingt durch Fahrbahnunebenheiten und Löcher, bzw. Fahrspuren am Feld, gut von den Reifen aufgenommen wurden. Außerdem befand sich am Traktor ein luftgefederter Sitz mit zahlreichen Einstellmöglichkeiten an der Rückenlehne. Laut Herstellerangaben ist das Gesamtgewicht beider Traktoren ident, allerdings ergab eine Kontrollwägung leicht unterschiedliche Ergebnisse, welche Abbildung 24 zu entnehmen sind.

Um beide Traktoren miteinander vergleichen zu können musste die Leistung an der Zapfwelle angepasst werden. In der Werkstätte der Firma Deutz-Fahr Austria wurden beide Traktoren an das Dynamometer Eggers angeschlossen. Um den Versuch objektiv durchführen zu können, wurde die Leistungskurve des etwas schwächeren Agrofarm 430 TTV an die des Agrofarm 430 Profiline angepasst. Der Prüfablauf ist nach DIN 70020 und die Leistungsreduktion/steigerung nach DIN ISO 3046 zertifiziert. In Abbildung 17 bis 20 sind die Leistungskurven (Motorkennfeld) beider Traktoren im ursprünglichen und veränderten Zustand dokumentiert. Durch Abstimmung der Einspritzpumpe wurde für eine ähnliche Motorcharakteristik gesorgt. Die Adjustierung der Motorsoftware erfolgte mittels elektronischer Motorregelung.

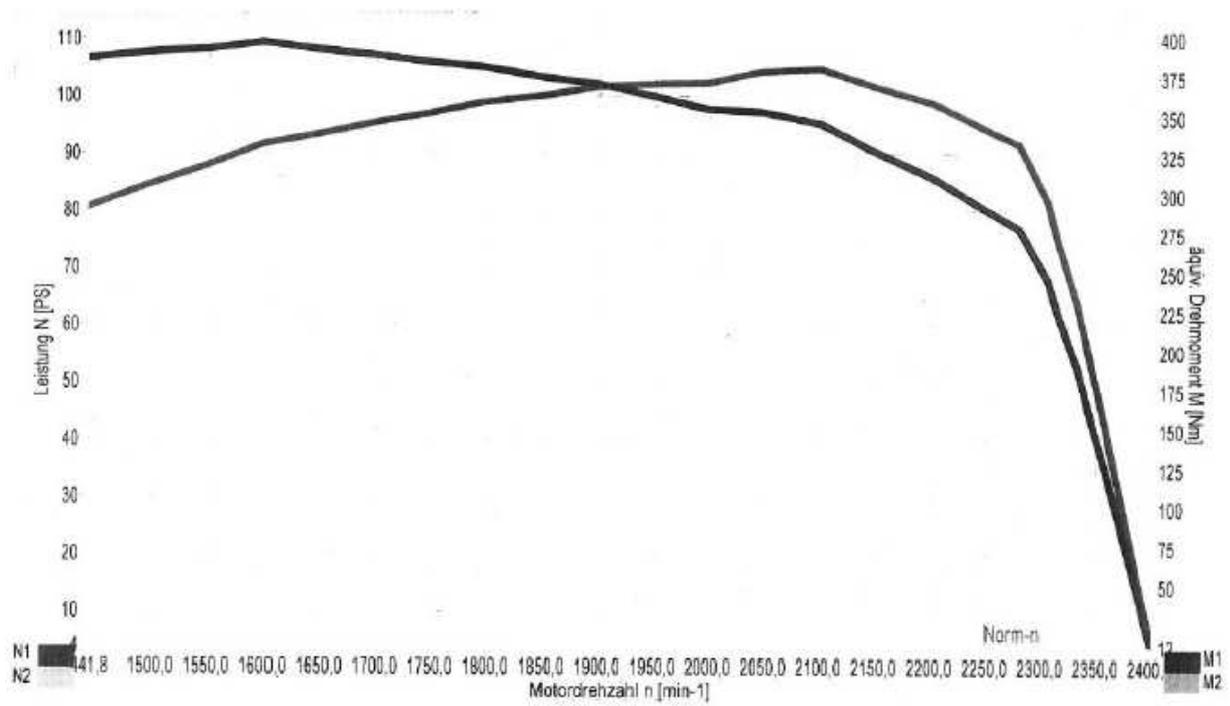


Abbildung 17: Leistungsdiagramm des AF 430 PL vor Adjustierung

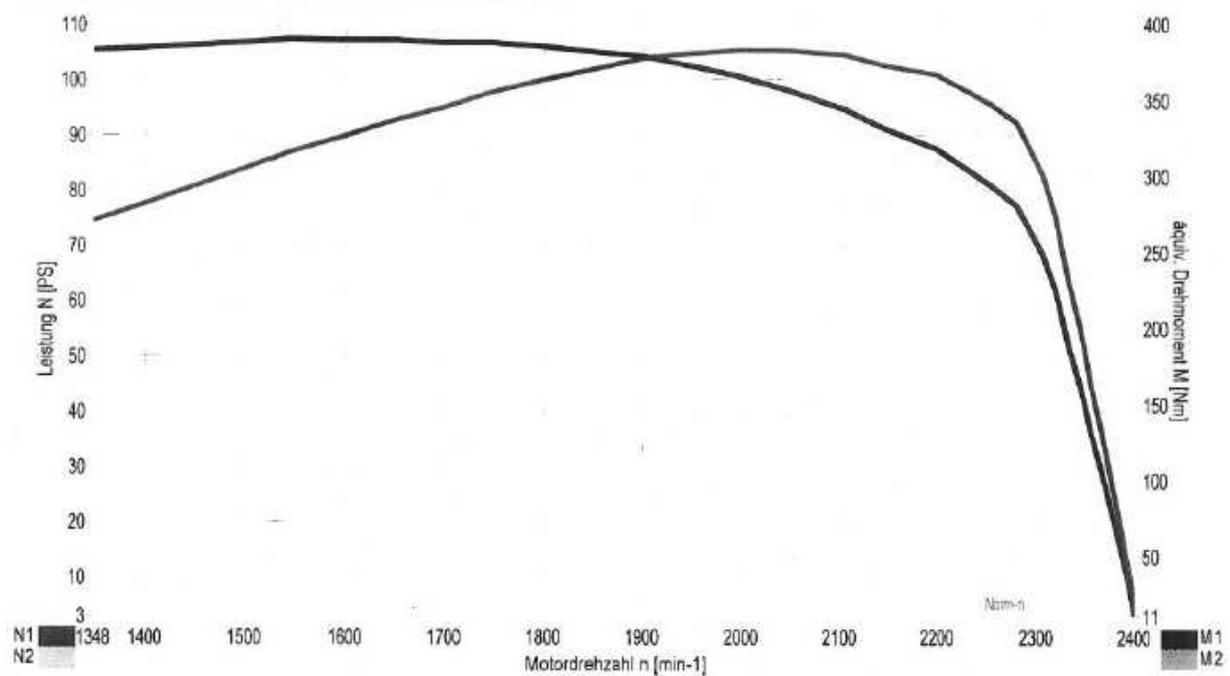


Abbildung 18: Leistungsdiagramm des AF 430 PL nach Adjustierung

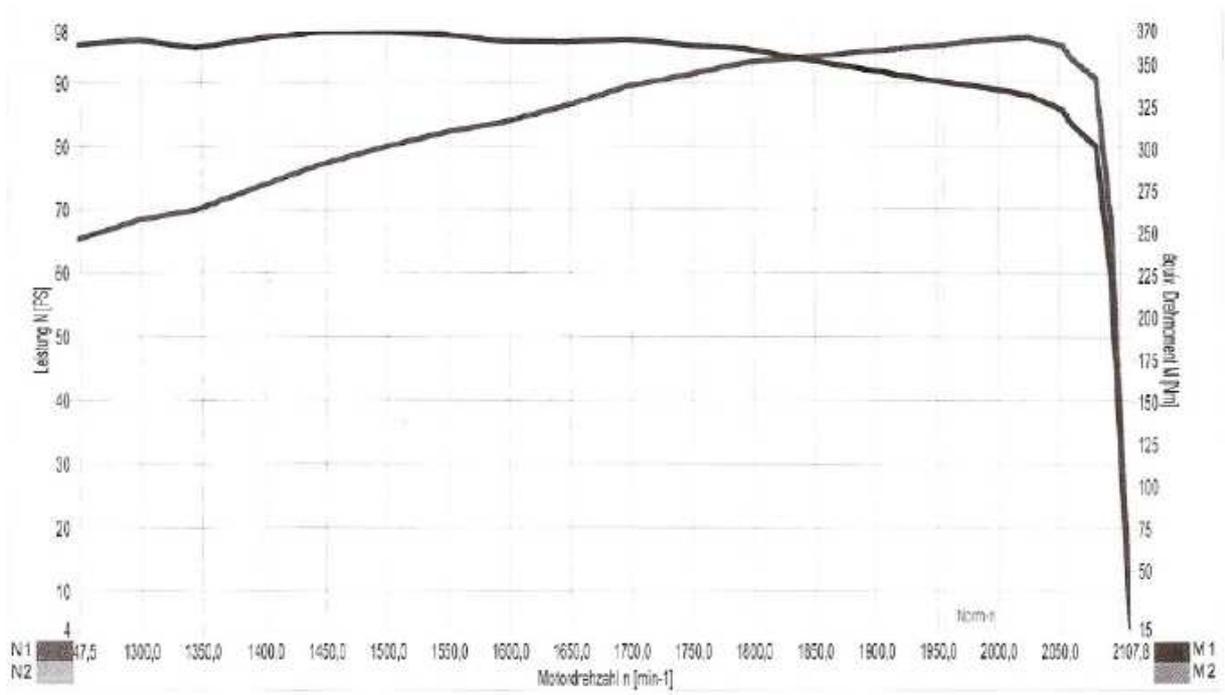


Abbildung 19: Leistungsdiagramm des AF 430 TTV vor Adjustierung

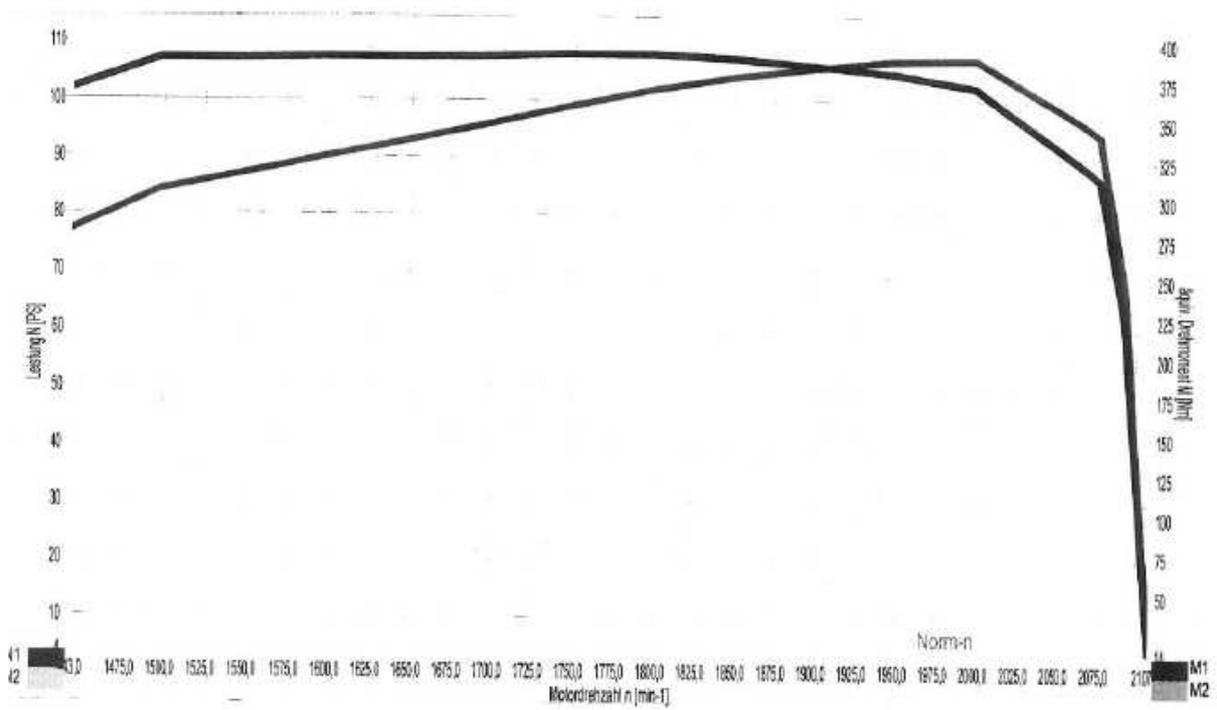


Abbildung 20: Leistungsdiagramm des AF 430 TTV nach Adjustierung

Um die Motordrehzahl und in Folge auch die Zapfwellendrehzahl zu erfassen, wurde die Spannung an der Lichtmaschine, bei der W-Klemme, abgenommen (Abbildung 21). Mittels Analog-Digital- Wandlers konnte die von der Lichtmaschine gelieferte Sinuskurve, in ein Rechteck-Digital-Signal umgewandelt werden. Die gesamten Daten wurden durch einen direkt angeschlossenen DataLogger (Squirrel 2020) erfasst. Die Kalibrierung erfolgte für jeden Traktor separat, da die Nenndrehzahl des PL 2.400 U/min, die des TTV jedoch 2.100 U/min betrug. Die lineare Gleichung ergab den Wert für den TTV: $f(x) = 3255,81x - 19,91$ und für den PL: $f(x) = 3177,04x + 4,72$.



Abbildung 21: Motordrehzahlmessung an der Lichtmaschine

Zur Geschwindigkeitsmessung wurde ein Radarsensor (RADAR II GROUND SPEED SENSOR) links beim Aufstieg zur Kabine montiert (Abbildung 22). Dessen Winkel betrug 35° zur Erdoberfläche.



Abbildung 22: Radarsensor am linken Einstieg

Die Kalibrierung erfolgte laut Bedienungsanleitung und betrug 27,8 Hz/km/h. Motordrehzahl, sowie tatsächliche Fahrgeschwindigkeit wurden sekundlich vom DataLogger aufgezeichnet.

Mähwerk

Als Frontmähwerk wurde das Drummaster 431F von Deutz-Fahr eingesetzt (Abbildung 23). Dieses Trommelmähwerk mit einer Arbeitsbreite von 3,10 m hat insgesamt 4 Trommeln mit jeweils 3 Klingen. Die 3 Klingen gewährleisten eine hohe Schnittqualität auch bei hoher Fahrgeschwindigkeit. Die Schnitthöhenverstellung erfolgt stufenlos und wurde bei beiden Versuchen (PL und TTV) vorab eingestellt. Das Mähwerk hatte ein Gesamtgewicht von 550 kg [SDF, 2011d].

Als Heckmähwerk wurde das SM 5.24 TC, ebenfalls von Deutz-Fahr verwendet (Abbildung 23). Das Mähwerk mit einem Gesamtgewicht von 810 kg besteht aus 6 Mähscheiben (jeweils 3 Klingen) und hat eine Breite von 2,40 m. Der Aufbereiter des Mähwerks deckt die gesamte

Mähbreite mit einem Rotor ab, welcher mit V-förmigen Nylonfingern bestückt ist. Das Futter wird gegen ein Prallblech geschleudert, das entsprechend der Futterbeschaffenheit und der gewünschten Aufbereitungsintensität einstellbar ist [SDF, 2011c].



Abbildung 23: Heckmähwerk mit Aufbereiter (links) und Frontmähwerk (rechts)

1.9 Versuchsdurchführung

Allgemein

Nachdem beide Traktoren am 14. September 2010 zur Versuchswirtschaft Groß Enzersdorf angeliefert wurden, fand am folgenden Tag die Montage der Messtechnik, die Wägung und das Probemähen auf Flächen der BOKU, sowie das Ausmähen der Versuchsflächen statt. Dies war notwendig um sich mit den Traktoren, der aufgebauten Messtechnik sowie den Mähwerken vertraut zu machen.

Abbildung 24 zeigt die Traktoren in Leer- sowie im Arbeitszustand mit den Mähwerken. Aus den Angaben in der Abbildung geht hervor, dass der Traktor mit dem Lastschaltgetriebe etwas leichter ist als der Stufenlose.



Abbildung 24: Achslasten im Leerzustand

Die Mähversuche fanden auf zwei privaten Flächen statt, die dankenswerter Weise zur Luzerneheumahd zur Verfügung gestellt wurden. Somit war man vom Wetter abhängig und konnte vorerst, wegen Schlechtwetterprognosen nicht mit dem Mähversuch starten. Der Transportversuch wurde vorgezogen, da hier keine Abhängigkeit vom Wetter bestand.

Versuchsdurchführung Transport

Am 16. September 2010 wurde der Transportversuch durchgeführt. Dazu lud man auf einen 2-Achs-Kipper Schotter auf, bis ein Gesamtgewicht von 16.540 kg erreicht war (Abbildung 25). Der 2-Achs-Kipper (Brantner) wurde von der Versuchswirtschaft Groß Enzersdorf zur Verfügung gestellt. Die beiden Versuchstraktoren waren mit keiner Druckluftbremsanlage ausgestattet. Um aber in dieser PS-Klasse eine Zugkraft feststellen zu können entschied man sich doch mit dieser enormen Anhängelast zu fahren. Aus Sicherheitsgründen wurde die zu erreichende Höchstgeschwindigkeit anstatt auf 40 km/h, auf 37 km/h herabgesetzt. Außerdem musste die Deichsel bei beiden Maschinen in eine möglichst waagrechte Position gebracht werden, um die Kräfte beim Bremsen auf die Hinterachse zu verschieben. Die eingestellte Schlittenhöhe am Traktor betrug 62 cm vom Boden bis zur Unterkante des Zugmauls.



Abbildung 25: Traktor beim Transporteinsatz

Der Transportstrecke verlief auf einem zirka 8,2 km langen Kurs, vom Zuckerrübensammelplatz in Raasdorf, über die L11 nach Gross Enzersdorf und wieder zurück. Um Bedingungen aus der Praxis zu simulieren, waren 5 fixe Stopps vorgegeben. Mit jeweils drei Wiederholungen wurden die Fahrten statistisch abgesichert.

Ein Problem ergab anfangs der Tank, der aus Platzgründen sehr verwinkelt war. Durch eine nicht immer zu vermeidende ruckende Fahrweise, schaukelte sich der Diesel im Tank auf und lies Lufträume zu, die wiederum beim Auslitern (Abbildung 26) zu widersprüchlichen Ergebnissen führten. Trotzdem konnte, bei jeweils drei Wiederholungen, die Fahrweise als angepasst bewertet und die Ergebnisse zur weiteren Berechnung herangezogen werden.

Beim TTV wurde die Tempomatfunktion genutzt und auf 37 km/h eingestellt. Die Motordrückung lies sich mittels Potentiometer an die jeweilige Arbeit anpassen. Als praxistauglichen Wert wurde eine Mischregelung aus POWER und ECO angesehen – diese ermöglichte eine zügige Beschleunigung und bei Erreichen der Zielgeschwindigkeit ein Absenken der Motordrehzahl auf Treibstoff sparende 1.750 U/min. Durch das Motor-Getriebe-Management und die eingestellte mittlere Motordrückung und die große Anhängelast war ein konstanter Drehzahlverlauf nicht zu beobachten, da bei einer geringen Steigung im Straßenverlauf, der Motor sofort reagierte und die Drehzahl erhöhte. Nur so konnte die eingestellte Geschwindigkeit gehalten werden. Wiederum kehrte, bei ebenem Straßenverlauf, die Drehzahl sofort auf die 1.750 U/min zurück.



Abbildung 26: Volumetrische Messung des Kraftstoffverbrauches mittels Messzylinder und Messbecher

Um einen ähnlichen Effekt beim PL feststellen zu können, wurde ausschließlich in der vierten Gruppe (Hase) gefahren. Hier hatte man immerhin 15 Gänge zur Verfügung. Um der Zielgeschwindigkeit am nächsten zu kommen wurde ab Erreichen der Zielgeschwindigkeit mit dem größtmöglichen Gang und der höchsten Lastschaltstufe gefahren. Mittels Drehzahlmesser konnte die Motordrehzahl auf 1.850 U/min eingestellt werden um 37 km/h zu fahren. Bei kleinen Steigungen reagierte der Motor sehr elastisch und zeigte, wie zu erwarten einen parallelen Verlauf der Motordrehzahl zur Fahrgeschwindigkeit.

Versuchsdurchführung Mähen

Vor dem eigentlichen Mähversuch fand ein Probemähen auf Luzerne an den Versuchsflächen der BOKU statt, um eine sinnvolle Einstellung zu wählen und ein einwandfreies Funktionieren aller Geräte und der Datenaufzeichnung zu gewährleisten.

Das Feld, 500 m lang, bebaut mit biologisch bewirtschafteter Luzerne, war wie bereits oben beschrieben durch einen Feldweg in eine Ost- und Westhälfte getrennt. Der Luzernebestand in der Osthälfte war jung und jener in der Westhälfte bereits etwas älter, hinsichtlich Ertrag gab es

aber nur wenig Unterschied. Der Boden war sehr eben und homogen über den gesamten Mähbereich (Abbildung 27). Die gesamte Mähbreite der Mähkombination ergab mit Überlappung des Front- und Heckmähwerkes 5 m, wodurch sich bei einer Feldlänge von 500 m und bei einem einmaligen Hin- und Herfahren ein Mähfeld von 0,5 ha je Wiederholungen ergab.



Abbildung 27: Traktor beim Mäheinsatz

Der Mähversuch wurde mit 2 verschiedenen Mähgeschwindigkeiten (11,5 km/h und 16 km/h) durchgeführt. Mit dem AF 430 PL wurden jeweils 4 Wiederholungen bei beiden Mähgeschwindigkeiten durchgeführt und beim AF 430 TTV jeweils 3.

Beim stufenlosen Getriebe wurden die 11,5 km/h mit der Heavy Duty Gruppe gefahren und die 16 km/h mit der Normal Gruppe. Der Anteil mechanisch/hydrostatisch an der Kraftübertragung war deshalb bei beiden Geschwindigkeiten annähernd gleich (Abbildung 10). Bei Erreichen der Zielgeschwindigkeit wurde der Tempomat aktiviert. Die Zapfwelldrehzahl lag hinten bei 500 U/min und vorne bei 850 U/min. Um eine konstante Zapfwelldrehzahl zu gewährleisten wurde die Motordrehzahl elektronisch konstant gehalten. Die Bedienelemente zur Steuerung des AF 430 TTV sind in Abbildung 28 dargestellt.

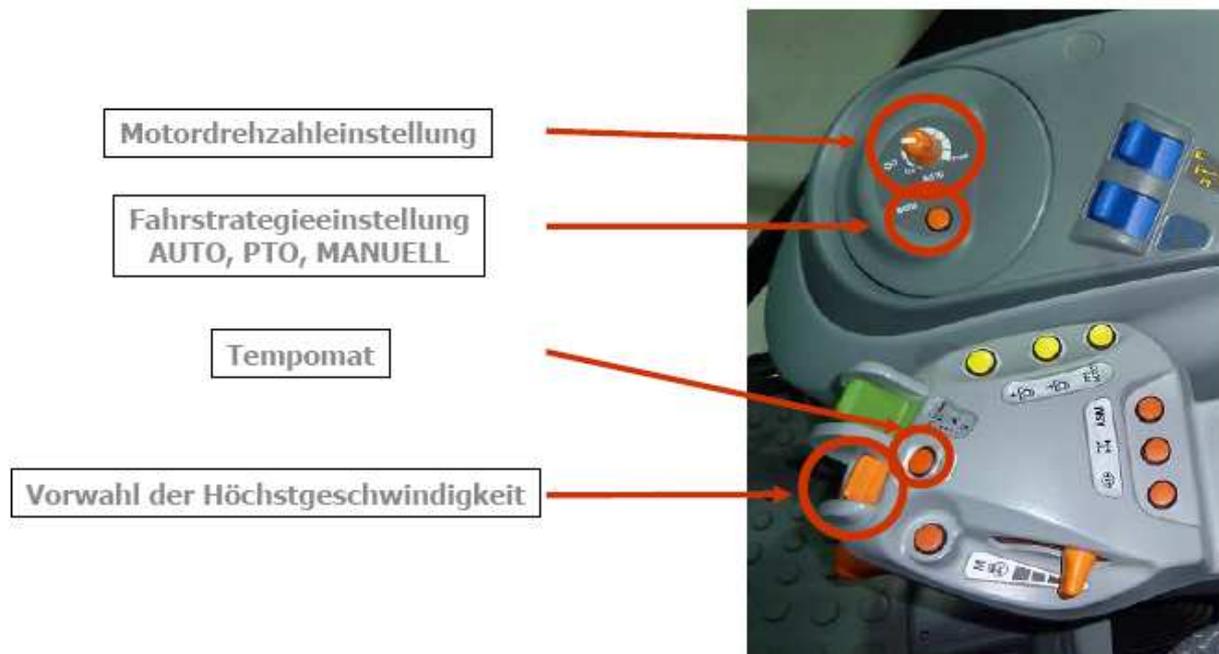


Abbildung 28: Bedienelemente des TTV

Beim Traktor mit dem Schaltgetriebe (PL) hatte der Fahrer manuell zu schalten. Er war stets bemüht die Zielgeschwindigkeit mit einer möglichst Sprit sparenden Fahrweise konstant zu halten. Als Unterstützung wurde die automatische Drehzahlsteuerung verwendet, die es wesentlich erleichterte den Traktor mit konstanter Motordrehzahl zu betreiben. Zudem wurde versucht den Traktor stets bei einer Motordrehzahl von 1800 U/min zu betreiben. Somit konnten an der Vorderen Zapfwelle 850 U/min und ab der Hinteren 470 U/min gemessen werden. Die Zapfwellendrehzahl lag also bei beiden Traktoren unter der Nenndrehzahl von 1000 U/min vorne und 540 U/min hinten. Trotzdem konnte eine gute Mähqualität gewährleistet werden. Beim Wechsel der Traktoren wurden die Messerklingen der Mähwerke umgedreht um annähernd gleiche Schärfe bei den Versuchen zu garantieren. Die Höhe der Unterlenker wurde bei beiden Traktoren vorab auf gleiche Höhe eingestellt.

Da wie bereits oben erwähnt, der ursprüngliche Ansatz zum Messen des Kraftstoffverbrauchs aufgrund des Lufteinschlusses gerade bei holprigen Arbeiten zu Problemen führte, wurde beim Mähversuch eine neue Erfassungsmethode verwendet. Diesmal wurde ein externer Tank

(Kanister) verwendet, der den Motor mit neu gelegten Zu – und Abläufen mit Diesel versorgte (Abbildung 29). Da der Kanister ohne Verwinkelungen war, konnten sich keine Luftblasen bilden. Dieser war zudem leicht zu befüllen und beim Auslitern waren die Messwerte klar ablesbar. Zusätzlich wurde ein Absperrhahn montiert, welcher ein zurückfließen des Treibstoffes bei abgestellten Motor verhindert.



Abbildung 29: Kraftstoffmesseinrichtung

1.10 Statistische Auswertung

Zur statistischen Auswertung wurde der 2-seitige T-Test für unabhängige Stichproben verwendet. Als Konfidenzintervall wurde der Wert von 95 % angenommen. Bei einem p-Wert (=empirisches Signifikanzniveau) von unter 0,05 wurde die Nullhypothese (=Kraftstoffverbrauch von PL und TTV sind gleich) verworfen. Vor dem T-Test wurde die Varianzhomogenität mittels Levene-Test überprüft. Die Auswertung erfolgte mit dem Statistikpaket SPSS (Version 18).

Ergebnisse und Diskussion

1.11 Mähversuch

Vergleich unterschiedlicher Getriebe

Der Mähversuch wurde mit zwei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten mit je drei Wiederholungen durchgeführt. Einmal mit 11,5 km/h und einmal mit 16 km/h. Der Versuch wurde mit baugleichen Traktoren durchgeführt, die sich lediglich im Getriebe unterschieden. Auch wurde versucht alle anderen Parameter zwischen den Versuchen so konstant wie möglich zu halten. Diese sind im Speziellen die Motordrehzahl und die Nebenzeiten für Wendemanöver und Anfahrt, um die Flächenleistung zwischen den Getrieben so ähnlich als möglich zu halten, damit ein eventueller Unterschied im Kraftstoffverbrauch lediglich auf das Getriebe zurückzuführen ist.

Mähversuch mit einer Zielgeschwindigkeit von 11,5 km/h

Beim Mähen lag die durchschnittliche Versuchsgeschwindigkeit (V_f) wie zu erwarten leicht unter der Zielgeschwindigkeit von 11,5 km/h, da sie durch Anfahren und Wenden herabgesetzt wurde (Tabelle 4).

Tabelle 4: Gegenüberstellung der mittleren Verfahrensparameter beim Mähen bei einer Arbeitsgeschwindigkeit von 11,5 km/h mit den Traktoren AF 430 PL und AF 430 TTV

Mähen 11,5 km/h	PL	TTV	Mittlere Differenz		t-test	
			Absolut	%	p-Wert	Signifikanz
Ø Verbrauch (l/Vf)	1,42	1,67	0,25	16,38	0,002	s.
Ø Verbrauch (l/h)	15,90	17,14	1,24	7,52	0,042	s.
Ø Verbrauch (l/ha)	2,85	3,15	0,30	9,85	0,028	s.
Ø Flächenleistung (ha/h)	5,58	5,45	0,13	2,28	0,090	n.s.
Ø V_f (km/h)	11,16	10,90	0,25	2,28	0,090	n.s.
Ø Drehzahl (U/min)	1833,09	1823,08	10,01	0,55	0,181	n.s.

Glücklicherweise konnte die durchschnittliche Geschwindigkeit bei beiden Traktoren mit etwa 11 km/h gleich gehalten werden, was auch zu einer nahezu gleichen Flächenleistung führte. Dies war wichtig um den Versuch vergleichbar im Sinne des Treibstoffverbrauches zu machen. Zudem bestand kein signifikanter Unterschied in der Motordrehzahl (U/min) was das Versuchsergebnis zusätzlich erhärtet.

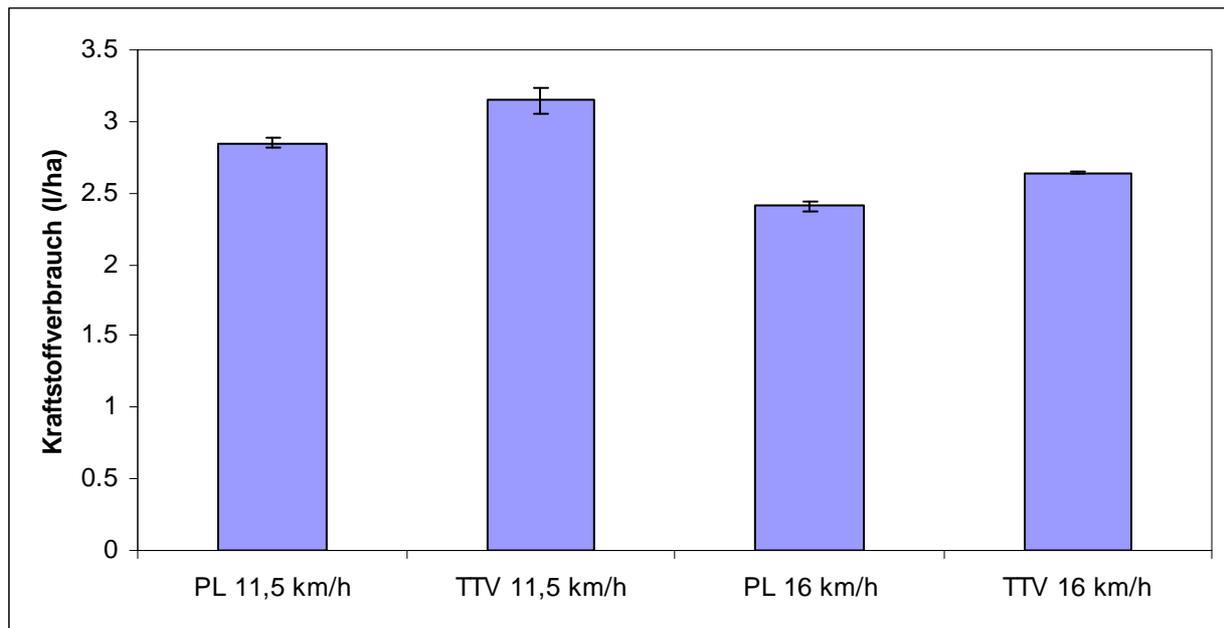


Abbildung 30: Mittlerer Kraftstoffverbrauch (l/ha) mit Standardabweichung beim Mähen mit einer Zielgeschwindigkeit von 11,5 und 16 km/h

Bei einer Arbeitsgeschwindigkeit von 11,5 km/h war ein deutlicher und statistisch signifikanter Unterschied im Kraftstoffverbrauch zwischen den beiden Traktoren zu erkennen (Tabelle 4). Pro Versuchsfahrt verbrauchte der Traktor mit dem stufenlosen Getriebe im Vergleich zum schaltbaren Getriebe im Schnitt um 16,4 % mehr Treibstoff. Umgerechnet auf die für die Landwirte wichtigste Kennzahl, dem Verbrauch je Flächeneinheit (l/ha), verbraucht das PL Getriebe 0,30 l/ha weniger Treibstoff als das TTV Getriebe, was zu einer doch beachtlichen mittleren Ersparnis von 9,9 % bezogen auf die Fläche führt. Der Traktor mit dem Schaltgetriebe verbraucht 2,85 l/ha und jener mit dem stufenlosen Getriebe 3,15 l/ha. Der Unterschied im Verbrauch ist in Abbildung 30 nochmals graphisch mittels Balkendiagramm dargestellt. Bei einer Mähfläche von 100 ha kann so 30 l an Kraftstoff eingespart werden, was doch eine

beachtliche Zahl ist. Pro Stunde verbraucht das PL Getriebe in unserem Versuch nur 7,5 % weniger Treibstoff, dies deshalb da die durchschnittliche Versuchsgeschwindigkeit beim PL Getriebe geringfügig höher war.

Mähversuch mit einer Zielgeschwindigkeit von 16 km/h

Die Bedingungen beim Mähversuch mit 16 km/h waren ähnlich gut wie jene bei 11,5 km/h. Die Motordrehzahl konnte im Mittel bei beiden Traktoren gleich gehalten werden (Tabelle 5). Auch bei diesem Versuch lag die durchschnittliche Versuchsgeschwindigkeit unter der Zielgeschwindigkeit. Sie betrug für den Profiline 14,7 km/h und für den TTV 14,5 km/h. Die Abweichung von der Zielgeschwindigkeit war hier zwar größer, dies ist aber darauf zurückzuführen, da sich bei hohen Geschwindigkeiten die Nebenzeiten (vor allem die Wendezeiten) stärker auf die Durchschnittsgeschwindigkeit auswirken. Die Abweichung zwischen beiden Traktoren lag im Schnitt bei nur 1,6 % und war somit noch geringer als beim vorherigen Versuch. Aufgrund derselben Fahrgeschwindigkeit war auch die Flächenleistung (ha/h) sehr ähnlich, sie unterschied sich ebenfalls um nur 1,6 %.

Tabelle 5: Gegenüberstellung der mittleren Verfahrensparameter beim Mähen mit einer Arbeitsgeschwindigkeit von 16 km/h mit den Traktoren AF 430 Profiline und AF 430 TTV

Mähen 16 km/h	PL	TTV	Mittlere Differenz		t-test	
			Absolut	%	p-Wert	Signifikanz
Ø Verbrauch (l/Vf)	1,24	1,40	0,16	12,12	0,003	s.
Ø Verbrauch (l/h)	17,70	19,12	1,42	7,71	0,013	s.
Ø Verbrauch (l/ha)	2,41	2,64	0,23	9,29	0,005	s.
Ø Flächenleistung (ha/h)	7,36	7,24	0,12	1,58	0,214	n.s.
Ø V_f (km/h)	14,71	14,48	0,23	1,58	0,214	n.s.
Ø Drehzahl (U/min)	1810,40	1816,03	5,63	0,31	0,206	n.s.

Das Ergebnis bei 11,5 km/h und bei 16 km/h ist sehr ähnlich. Zwar kann der TTV leicht aufholen, aber der PL verbraucht immer noch wesentlich weniger Treibstoff. Pro Versuchsfahrt braucht der PL im Durchschnitt um 12,1 % weniger Diesel als der TTV. Bezogen auf Verbrauch pro ha müssen für den TTV um 9,3 % (0,23 l) mehr Treibstoff aufgebracht werden.

Abbildung 30 illustriert den Unterschied graphisch. In dieser Abbildung ist auch ersichtlich, dass die Standardabweichung sehr gering ist und die Werte deshalb gut reproduzierbar waren, was zusätzlich die Gründlichkeit der Versuchsausführung unterstreicht. Aufgrund der leicht höheren Versuchsgeschwindigkeit beim Traktor mit Lastschaltgetriebe liegt die Ersparnis pro Stunde mit 7,7 % unter jener des Stufenlosen.

Diskussion des Mähversuchs mit unterschiedlichen Getrieben

Der Versuch zeigt, dass das Profiline Getriebe für die für den Landwirt wichtigste Kennzahl, also den Verbrauch je Flächeneinheit (l/ha) eine wesentliche Ersparnis gegenüber dem TTV Getriebe erbringt. Bei einer Versuchsgeschwindigkeit von 11,5 km/h lag die Ersparnis, berechnet auf die Fläche, 9,8 % und bei einer Geschwindigkeit von 16 km/h lag sie bei 9,3 %. Somit kann davon ausgegangen werden, dass bei praxisüblichen Mähgeschwindigkeiten von 5 – 15 km/h [Renius, 1985] ca. 9,5 % an Treibstoff eingespart werden kann, was ein doch überraschend hoher Wert ist.

Die Versuchsausführung erfolgte sehr exakt. Bei beiden Traktoren konnte die Fahrgeschwindigkeit, die Flächenleistung und die Motordrehzahl annähernd gleich gehalten werden. Dies war besonders wichtig, da diese Faktoren sonst das Ergebnis verzerrt hätten. Einzig das Gewicht der beiden Traktoren war verschieden, der TTV wog um zirka 200 kg mehr. Inwieweit sich dies auf den Treibstoffverbrauch auswirkt lässt sich allerdings nur schwer abschätzen.

Vergleich unterschiedlicher Fahrstrategien

Die im letzten Kapitel vorgestellten Daten werden nun erneut statistisch verglichen. Diesmal werden aber die unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten (11,5 und 16 km/h) mit demselben Traktor gegeneinander getestet, um die Auswirkungen der Mähgeschwindigkeit auf den Treibstoffverbrauch zu untersuchen.

Mähversuch mit AF 430 PL (Lastschaltbar)

Tabelle 6 zeigt das Ergebnis des Versuches. Wesentlich in dieser Tabelle ist der Kraftstoffverbrauch pro Flächeneinheit (l/ha). Mit erhöhter Geschwindigkeit kann 17 % (0,44 l) an Treibstoff pro Fläche eingespart werden (Abbildung 31). Für alle anderen Parameter war eine Abweichung schon im Vorhinein zu erwarten, da mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten gemäht wurde. Mit erhöhter Geschwindigkeit liegt der Verbrauch pro Versuchsfahrt (l/Vf) und Zeiteinheit (l/h) klarerweise höher, und zwar um 13,5 % bzw. 10,7 %, allerdings stieg auch die Flächenleistung um beachtliche 27,5 %, wodurch der Verbrauch pro ha wesentlich reduziert wurde. Die Motordrehzahl war bei 11,5 km/h signifikant höher als bei 16 km/h. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Motor bei 11,5 km/h weniger ausgelastet war.

Tabelle 6: Gegenüberstellung der mittleren Verfahrensparameter beim Mähen mit dem AF 430 Profiline bei einer Arbeitsgeschwindigkeit von 11,5 km/h und 16 km/h

Mähen PL	11,5 km/h	16 km/h	Mittlere Differenz		t-test	
			Absolut	%	p-Wert	Signifikanz
Ø Verbrauch (l/Vf)	1,42	1,24	0,18	13,53	0,001	s.
Ø Verbrauch (l/h)	15,90	17,70	1,80	10,70	0,003	s.
Ø Verbrauch (l/ha)	2,85	2,41	0,44	16,93	0,000	s.
Ø Flächenleistung (ha/h)	5,58	7,36	1,78	27,51	0,000	s.
Ø V_f (km/h)	11,16	14,71	3,56	27,51	0,000	s.
Ø Drehzahl (U/min)	1833,09	1810,40	22,69	1,25	0,002	s.

Mähversuch mit AF 430 TTV (Stufenlos)

Das Ergebnis des TTV (Tabelle 7) zeigte annähernd dasselbe Ergebnis wie jenes des PL (Tabelle 6). Auch der Mähvorgang mit dem stufenlosen Getriebe führte bei erhöhter Geschwindigkeit zu einem markanten und statistisch signifikanten Rückgang des Kraftstoffverbrauches je Flächeneinheit. Bei 16 km/h konnten 17,48 % (0,51 l) pro Hektar

eingespart werden. Die erhöhte Geschwindigkeit führte zu einem Anstieg des Kraftstoffverbrauches um 17,8 % je Versuchsfahrt, jedoch konnte die Flächenleistung (ha/h) um 28,2 % gesteigert werden, was zu einer Reduktion des Dieserverbrauches pro Hektar führte, dargestellt in Tabelle 7. Beim TTV Getriebe konnte kein statistisch signifikanter Unterschied bei der Motordrehzahl festgestellt werden.

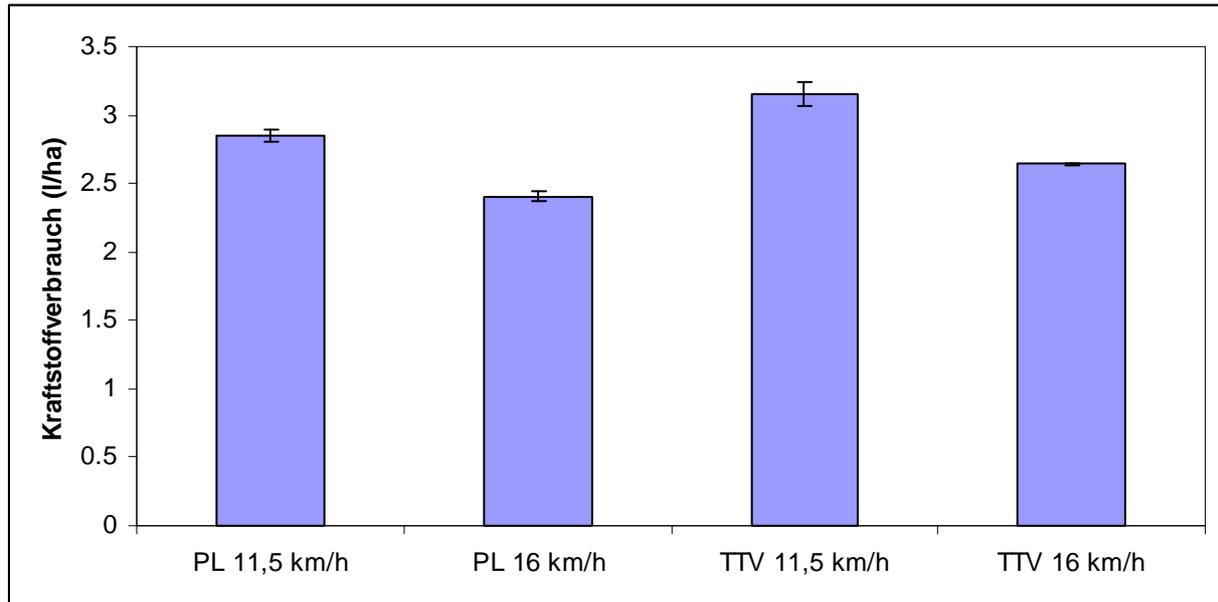


Abbildung 31: Mittlerer Kraftstoffverbrauch (l/ha) mit Standardabweichung beim Mähen mit dem Schaltgetriebe PL und dem Stufenlosgetriebe TTV

Tabelle 7: Gegenüberstellung der mittleren Verfahrensparameter beim Mähen mit dem AF 430 TTV bei einer Arbeitsgeschwindigkeit von 11,5 km/h und 16 km/h

Mähen TTV	11,5 km/h	16 km/h	Mittlere Differenz		t-test	
			Absolut	%	p-Wert	Signifikanz
Ø Verbrauch (l/Vf)	1,67	1,40	0,27	17,79	0,004	s.
Ø Verbrauch (l/h)	17,14	19,12	1,98	10,89	0,014	s.
Ø Verbrauch (l/ha)	3,15	2,64	0,51	17,48	0,008	s.
Ø Flächenleistung (ha/h)	5,45	7,24	1,79	28,20	0,000	s.
Ø V_f (km/h)	10,90	14,48	3,58	28,20	0,000	s.
Ø Drehzahl (U/min)	1823,08	1816,03	7,05	0,39	0,358	n.s.

Diskussion des Mähversuchs bei unterschiedlicher Mähgeschwindigkeit

Das Ergebnis zeigt, dass eine erhöhte Geschwindigkeit zu einer sehr starken Treibstoffeinsparung führt. Wie zu erwarten stieg mit höherer Fahrgeschwindigkeit der Kraftstoffverbrauch pro Versuchsfahrt an, allerdings stieg die Flächenleistung noch stärker an, was in Summe zu einem recht großen Einsparungspotential führte. Der Traktor mit dem Schaltgetriebe brauchte 16,9 % (0,44 l/ha) und jener mit dem stufenlosen Getriebe 17,5 % (0,51 l/ha) weniger Treibstoff bei erhöhter Geschwindigkeit. Interessant ist, dass die Motordrehzahl beim TTV zwischen den beiden Mähversuchen statistisch nicht verschieden war, während beim PL bei 16 km/h mit einer geringeren Motordrehzahl gearbeitet wurde.

1.12 Transportversuch auf Straße mit hoher Zuglast

Ergebnis

Dieser Versuch untersuchte den Kraftstoffverbrauch der zwei verschiedenen Getriebearten unter hohem Zugkraftbedarf auf asphaltierter Straße. Beide Traktoren wurden mit einem 2-Achs Kipper bis 16.540 kg Gesamtlast beladen. Die Höchstgeschwindigkeit betrug 37 km/h. Es wurde eine Strecke von 8,2 km befahren und 5 Stopps simuliert.

Beim TTV wurde die Geschwindigkeit mittels Tempomat auf 37 km/h reguliert und fixiert. Bei Erreichen der Zielgeschwindigkeit sank die Motordrehzahl bis auf 1.750 U/min. Bei Steigungen konnte die Drehzahl nicht gehalten werden und sie stieg aufgrund der Einstellung des Power/ECO Potentiometers an, allerdings bei Ebenen ging sie sofort wieder auf 1.750 U/min zurück.

Um eine vergleichbare Fahrstrategie beim PL zu erlangen, wurde ausschließlich in der vierten Gruppe (Hase) gefahren. Ab Erreichen der Zielgeschwindigkeit wurde mit dem größtmöglichen Gang und der höchsten Lastschaltstufe gefahren. Mittels Drehzahl Speicher konnte die Motordrehzahl auf 1.850 U/min eingestellt werden um 37 km/h zu fahren. Allerdings war auch hier die Motordrehzahl elastisch. Es gilt deshalb im Besonderen zu berücksichtigen, dass bei

Zielgeschwindigkeit und ebener Fahrt die Motordrehzahl des PL um 100 U/min geringer war als beim TTV.

Tabelle 8 zeigt die Verfahrensparameter des Transportversuches. Es ist ersichtlich, dass die mittlere Motordrehzahl beim PL um 100 Umdrehungen höher war als beim TTV. Allerdings waren die Gesamtfahrzeit und somit auch die Geschwindigkeit wie beabsichtigt bei beiden Traktoren praktisch gleich. Auf der 8,2 km Versuchstrecke war im Mittel nur eine Sekunde unterschied. Im Mittel, mit Beschleunigung zu Beginn und den 5 Stopps, wurde bei beiden Traktoren eine Durchschnittsgeschwindigkeit von etwa 29 km/h erreicht.

Tabelle 8: Gegenüberstellung der mittleren Verfahrensparameter aus je drei Wiederholungen beim Transport

Transport	PL	TTV	Mittlere Differenz		t-test	
			Absolut	%	p-Wert	Signifikanz
Ø Verbrauch (l/Vf)	1,69	1,92	0,23	12,77	0,002	s.
Ø Verbrauch (l/h)	6,10	6,94	0,84	12,88	0,001	s.
Ø Verbrauch (l/km)	0,201	0,229	0,027	12,77	0,002	s.
Ø Verbrauch (l/t/km)	0,0122	0,0138	0,0017	12,77	0,002	s.
Ø Gesamtfahrzeit (s)	999,25	998,33	0,92	0,09	0,889	n.s.
Ø V_f (km/h)	28,63	28,69	0,06	0,22	0,764	n.s.
Ø Drehzahl (U/min)	1779,87	1680,19	99,68	5,76	0,046	s

Der Unterschied im Treibstoffverbrauch zwischen den beiden Getriebearten war signifikant. Der Traktor mit dem Profiline Getriebe war sparsamer als jener mit dem TTV. Pro km verbrauchte der PL um 0,027 l weniger Treibstoff, umgerechnet auf den Verbrauch pro Gewicht und Strecke (l/t/km) verbrauchte er 0,0017 l weniger. Abbildung 32 stellt diesen Sachverhalt dar, die geringe Standardabweichung weist auf eine gute Reproduzierbarkeit der Ergebnisse hin. Relativ ausgedrückt war der Verbrauch beim stufenlosen Getriebe bezogen auf die Fahrstrecke um 12,8 % höher. Da die beiden Traktoren nahezu dasselbe Gesamtgewicht haben ist auch der Verbrauch, bezogen auf Gewicht und Fahrstrecke, bei TTV Getriebe um 12,8 % höher.

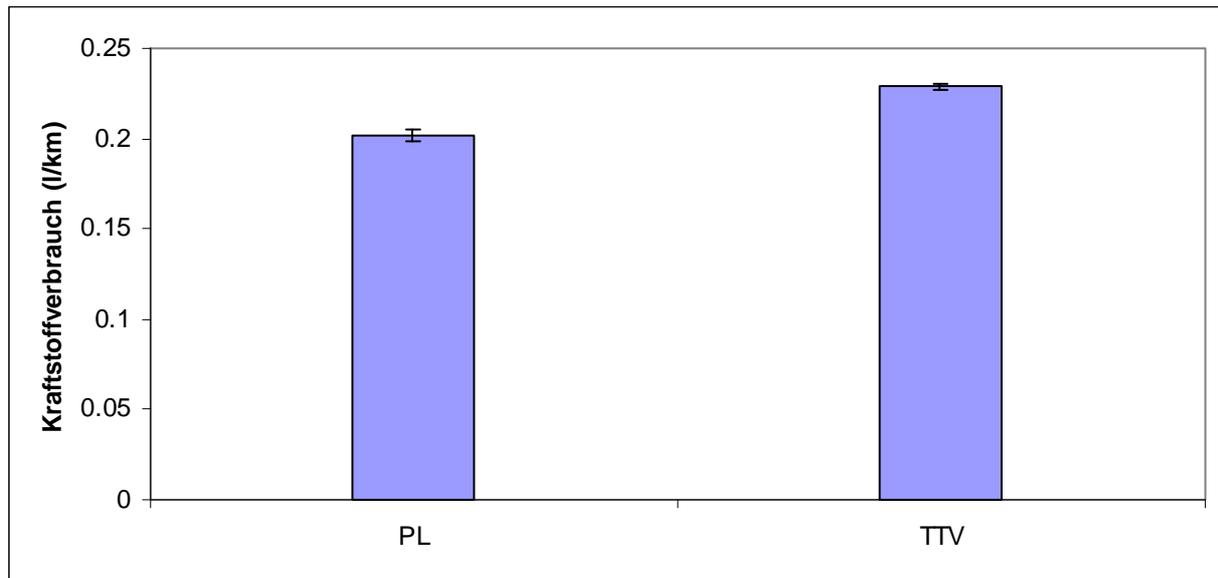


Abbildung 32: Mittlerer Kraftstoffverbrauch (l/km) mit Standardabweichung beim Transport

Diskussion des Transportversuches

Gegenüber dem stufenlosen Getriebe verbrauchte das Schaltgetriebe, bezogen auf die Fahrtstrecke, 12,8 % weniger Treibstoff. Auch hier gilt zu sagen, dass die Fahrweise des Fahrers, im Besonderen Schaltzeitpunkt, Schaltverhalten und das Verhalten an den 5 Stopps somit das Ergebnis beeinflussen. Aufgrund der Erfahrung des Fahrers ist die Verzerrung allerdings als gering anzunehmen.

Zusammenfassung

Für den Landwirt ist es von großer Wichtigkeit die Produktionskosten so gering wie möglich zu halten um sein Einkommen zu stabilisieren. Ein Weg führt über die Einsparung von Treibstoffkosten durch die Wahl geeigneter Maschinen und Fahrweisen.

Diese Arbeit untersuchte die Unterschiede im Kraftstoffverbrauch zwischen einem Lastschaltgetriebe und einem stufenlosen Getriebe. Da die beiden Traktoren bis auf das Getriebe baugleich waren (Deutz-Fahr Agrofarm 430, 75 kW) sind die Ergebnisse besonders aussagekräftig. Einzig der stufenlose Traktor wog um ca. 200 kg mehr. Untersucht wurde der Kraftstoffverbrauch beim Mähen und beim Transport mit schwerer Last. Zudem wurde die Auswirkung der Fahrgeschwindigkeit beim Mähen auf den Kraftstoffverbrauch untersucht.

Der Mähversuch zeigte, dass der Traktor mit stufenlosem Getriebe bei einer Mähgeschwindigkeit von 11,5 km/h in etwa 9,8 % (0,30 l/ha) und bei einer Geschwindigkeit von 16 km/h in etwa 9,3 % (0,23 l/ha) mehr an Kraftstoff, bezogen auf die Fläche, benötigt. Das Fahren bei unterschiedlichen Mähgeschwindigkeiten zeigte, dass mit höherer Fahrgeschwindigkeit der Kraftstoffverbrauch pro Zeiteinheit wie erwartet ansteigt, allerdings stieg auch die Flächenleistung an, was in Summe zu einer Ersparnis von etwa 17 % bei beiden Traktoren führte. Beim Transportversuch ergab sich, bezogen auf die Weglänge, ein Mehrverbrauch von 12,8 % (0,027 l/km) für das stufenlose Getriebe. In Summe war der Treibstoffverbrauch des Schaltgetriebes zwischen 9 – 13 % unter jenem des stufenlosen Getriebes.

Die Versuche ergaben, dass das Schaltgetriebe, hinsichtlich Treibstoffverbrauchs, dem stufenlosen Getriebe überlegen ist. Eine Erklärung für die Ersparnis des Schaltgetriebes ist sicherlich der höher mechanische Wirkungsgrad des Lastschaltgetriebes, das eine optimale Kraftübertragung gewährleistet. Bei dem Transportversuch, wo der hydrostatische Anteil nahezu 50 % betrug, konnte noch mehr Kraftstoff eingespart werden, als beim Mähversuch, wo der hydrostatische Anteil an der Kraftübertragung gering war. Dies bekräftigt die Annahme, dass durch die hydrostatische Kraftübertragung der Treibstoffverbrauch zunimmt.

Das Ergebnis steht allerdings im Widerspruch zum Großteil der in der Literatur gefundenen Ergebnisse, die hinsichtlich Treibstoffverbrauchs, das stufenlose Getriebe favorisieren (Kapitel 2.5.2). Hauptargumente sind, dass Traktoren mit stufenlosen Getrieben permanent am Optimum betrieben werden können und Schaltvorgänge entfallen. Was jedoch die meisten Studien von meinen Versuchen unterscheidet, ist die Versuchsausführung. Während bei meiner Versuchsausführung die Fahrgeschwindigkeit und somit die Flächenleistung konstant gehalten wurde, versuchten andere die Flächenleistung zu maximieren.

Obwohl mein Versuch eindeutig das Schaltgetriebe im Bezug auf Treibstoffverbrauch favorisiert, ist ein endgültiges Urteil letztlich schwierig zu treffen, vor allem da andere Studien zu einem entgegengesetzten Ergebnis kamen. Wesentlich ist die Fahrweise, welche vor allem beim Schaltgetriebe stark den Treibstoffverbrauch beeinflussen kann.

Weiterführende Arbeiten

Aufgrund der Erfahrungen die beim Ausführen der Versuche gemacht wurden, sollten für weiterführende Studien folgende Punkte berücksichtigt werden:

- Da die Kraftstoffbehälter der Traktoren aufgrund des Platzmangels häufig sehr verwinkelt sind, können die Messmethoden, wo mittels Auslitern der Kraftstoffverbrauch gemessen wird, fehleranfällig sein. Anstelle sollte ein 2-Tanksystem verwendet werden und eine eigene Zu- und Ableitung gelegt werden. Dies ermöglicht ein einwandfreies Ablesen des Kraftstoffverbrauches. Am Besten ist natürlich das Anbringen eines Durchflussmengenmessgerätes, mit welchem der Dieserverbrauch am genauesten ermittelt werden kann.
- Der Fahrer sollte mit beiden Systemen (schaltbar, stufenlos) sehr gut vertraut sein. Sollte er nur mit einem Fahrantrieb geübt sein, ist eine Verzerrung des Ergebnisses zu erwarten.
- Vor allem bei stufenlosen Traktoren kann zwischen mehreren Fahreinstellungen gewählt werden. Bei Studien wäre es sinnvoll alle oder zumindest mehrere zu vergleichen. Bei den vorliegenden Mähversuchen stand zu wenig Fläche zur Verfügung.

Die verschiedenen Studien die im Literaturteil aufgearbeitet wurden, inklusive der vorliegenden Versuche, kamen doch zu recht unterschiedlichen Ergebnissen. Jene Versuche die als Fahrstrategie „Maximale Flächenleistung“ hatten, favorisierten hinsichtlich Kraftstoffverbrauchs, die stufenlosen Getriebe. War aber die Geschwindigkeit bei beiden Getriebearten dieselbe, so schnitt das Schaltgetriebe besser ab. Da keine Studien vorliegen, die beide Fahrstrategien vereinen, ist es sicherlich sehr interessant in diese Richtung Versuche anzustreben.

Literaturverzeichnis

ALSING, I. (2002): Lexikon Landwirtschaft. 4.Auflage. Stuttgart: Eugen Ulmer.

AUER, S. und KLETZL, W. (2006): Handbuch Reparaturen an Landmaschinen und Traktoren. Praktische Selbsthilfe für Wartung, Einstellung, Instandsetzung. 6., korrigierte Auflage. Stuttgart: Eugen Ulmer.

BEA, S. (1997): Nutzwertanalyse eines neuen stufenlosen leistungsverzweigten Traltorgetriebes. Agrartechnische Forschung 3, H. 1, 28-33.

BISAGLIA, C.; CUTINI, M. und GRUPPO, G. (2003): Potential and testing of continuously variable transmissions Management and technology applications to empower agro-food systems. XXX CIOSTA-CIGRV Congress, 251-262.

BMLFUW (2011): Grüner Bericht 2010. Bericht über die Situation der österreichischen Land- und Forstwirtschaft. Published by BMLFUW, at: www.gruenerbericht.at (25.07.2011)

DAPP (2011): Versuchswirtschaft Großenzersdorf. Published by BOKU, at: <http://www.dapp.boku.ac.at/5827.html> (04.08.2011).

BOXBERGER, J. und MOITZI, G. (2008): Energieeinsatz in der Landwirtschaft im Wandel. KTBL-Schrift 463, 7 – 16.

BÖTTINGER, S. (2008): Entwicklung der Energieeffizienz bei Landmaschinen. KTBL-Schrift 463, 31 – 41.

CASE, (2011): Powershuttle- und Full-Powershift-Getriebe. Published by Case, at: <http://www.caseih.com/germany/Products/Traktoren/Magnum/Pages/ProfessionellesSchaltenmitdemperfektenGetriebe.aspx#> (26.07.2011).

DEIMEL, M. (2011): Nur runter vom Gas ist zu wenig. Published by LK-Österreich, at: <http://www.agrarnet.info/?id=2500%2C1585571%2C%2C> (22.07.2011).

EICHHORN, H. (1999): Landtechnik. 7. Auflage. Stuttgart: Eugen Ulmer.

EUROSTAT (2010): Jahrbuch der Regionen 2010. Landwirtschaft. Published by Eurostat, at: http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_OFFPUB/KS-HA-10-001-13/DE/KS-HA-10-001-13-DE.PDF (25.07.2011).

FENDT: Vario Getriebe 900, Published by AGCO-Fendt, at: http://www.fendt.com/int/de/images/VarioGetriebe900_Schema_zoom.jpg (18.07.2011)

FRABL, F. (2008): Untersuchungen zum Einfluss von Lastschaltgetriebe und "stufenlosen" Getriebe auf den Kraftstoffverbrauch bei Bodenbearbeitung und Transport. Wien Diplomarbeit Universität für Bodenkultur.

FÜRST, J. (2011): Hydrologie Österreichs Marchfeld. Published by BOKU, at: http://iwhw.boku.ac.at/hydroest/downloads/9b_marchfeld.pdf (26.07.2011).

GRAD, K. (2003): Getriebetechnologie für Traktoren. Landtechnik 58, 178-180.

HERMANN, H. und MEYER-ÖTTING, U. (1998): Grundstufe Agrarwirtschaft. Neuausgabe. München: BLV Verlagsgesellschaft.

HONZEK, R. (2011): Firmenpräsentation: Stufenlose Getriebe und Motormanagement. Neues stufenloses leistungsverzweigte Traktorgetriebe. Published by BMLFUW, at: <http://www.blt.bmlfuw.gv.at/vero/veranst/005/17.pdf> (25.07.2011).

ISENSEE, E.; WEIßBACH, M.; und THIESSEN, J. (2001): Vergleich von lastschaltbarem mit stufenlosem Getriebe bei schwere Zugarbeit. Landtechnik 56, 130-132.

KIM, K. U.; BASHFORD, L.L. und SAMPSON, B.T. (2005): Improvement of tractor performance. Applied Engineering in Agriculture, 21 Nr. 6, 949-954.

KNECHTGES, H.J. und TEWES, G (2000): Vergleich von gestuften und stufenlosen Lastschaltgetrieben bei der Mäharbeit. Kurzfassung der Vorträge VDI-Tagung Landtechnik 2000. Münster, 219 –223.

LECHNER G. und NAUNHEIMER H. (1994): Fahrzeuggetriebe. Berlin: Springer.

MEYER, H. (1959): Die Bedeutung eines stufenlosen Getriebes für den Ackerschlepper und seine Geräte. Grundl. Landtechnik Heft 11 (1959) S.5-12.

MOITZI, G. (2005): Kraftstoffverbrauch in der Pflanzenproduktion. ÖKL-Kolloquium 2005.

MOITZI, G.; REFENNER, K.; WEINGARTMANN, H. und BOXBERGER, J. (2008): Kraftstoffverbrauch beim landwirtschaftlichen Transport. Landtechnik 63, 284 – 285.

RENIUS, K. T. (1985): Traktoren. Technik und ihre Anwendung. München: BLV.

RENIUS, K. T. (1995): Stufenlose Fahrtriebe für Traktoren. Landtechnik 5, 254-255.

RENIUS, K.T. (2005): Motoren und Getriebe bei Traktoren. In: Harms, H.-H. und Meier, F. (Hrsg): Jahrbuch Agrartechnik. Band 17. Münster: Landwirtschaftsverlag GmbH.

REHRL, K.: Der Kraftstoffbedarf landwirtschaftlicher Transporte auf Straßen und Wegen. ÖKL – Landtechnische Schriftenreihe, Heft 37, 1977).

RESCH, R. (2003): Stufenlose Kettenwandler in Traktorgetrieben. Landtechnik 58, 174-175.

SCHÖN, H.; Auernhammer, H.; Bauer, R.; Boxberger, J.; Demmel, M.; Estler, M.; Gronauer, A.; Haidn, B.; Meyer, J.; Pirkelmann, H.; Strehler, A. und Widmann, B. 353290(1998): Landtechnik Bauwesen. Band 3. Neunte, völlig neubearbeitete und erweiterte Auflage, München: BLV Verlagsgesellschaft.

SDF (2010): Agrofarm Profiline/TTV. Verkaufsprospekt.

SDF (2010b): Product Information. Agrofarm TTV 420, Agrofarm TTV 430. Verkaufsunterlagen.

SDF (2011): Wettbewerbsvergleich Agrofarm TTV zu Fendt 300 Vario. Verkaufsunterlagen.

SDF (2011c): Scheibenmäherwerke mit Aufbereiter. Verkaufsprospekt.

SDF (2011d): Trommelmäherwerke-Drummaster. Verkaufsprospekt.

SZENTE, M.; und LAMPEL, H. (2002). Bewertung von Traktorgetrieben nach Wirkungsgrad Bedienbarkeit und Überlappung der Schaltstufen. Abschlussbericht A-2/02. HBLFA Wieselburg.

WILMER, H. (2004): Große Leistung, kleine Kabine. Profi 16, H. 4, 14-20.