

Lars Klimentew, Jan Krüger und Henning J. Meyer

# Einflussfaktoren des Getriebes auf die Effizienz elektrischer Traktionsantriebe

Der Einsatz elektrischer Antriebe in der Landwirtschaft erreicht inzwischen auch mobile Arbeitsmaschinen mit Zugkraftaufgaben. Elektrische Traktionsantriebe für Personenkraftwagen werden bereits mit verschiedenen Ansätzen und dem Ziel der Verbrauchsreduktion optimiert. Hierbei spielt die Betrachtung des Gesamtsystems, als zusammengesetztes System aus elektrischen und mechanischen Baugruppen, eine wichtige Rolle. Die Einflüsse von wichtigen Parametern und Kenngrößen sowie ein mögliches Vorgehen werden hier vorgestellt.

## Schlüsselwörter

Getriebespreizung, Ganganzahl, elektrischer Fahntrieb, Antriebswirkungsgrad

## Keywords

Overall gear ratio, number of gears, electrical traction drive, degree of drive-efficiency

## Abstract

Klimentew, Lars; Krüger, Jan and Meyer, Henning J.

Influencing factors of the gearbox in efficiency of electrical traction drives

Landtechnik 68(2), 2013, pp. 130–134, 9 figures, 1 table, 12 references

The usage of electrical drives in agriculture has reached mobile machines with drag force requirements, e. g. tractors. There are suggestions to optimize the electrical powertrain of passenger cars to reduce the energy consumption. During the optimization process the whole system, consisting of electrical and mechanical components, has to be considered. Effects of important factors and indicators are discussed in the following article.

Bei Traktionsantrieben im On-Road-Bereich werden überwiegend Drehstrommaschinen, und hier speziell Asynchronmaschinen (ASM) und permanentmagnetische Synchronmaschinen (PMSM), verwendet. Einer der wichtigsten Gründe für den Einsatz von Drehstromantrieben ist die hohe Leistungs-

dichte, also die Masse der Maschine bezogen auf die Antriebsleistung. Eine vergleichende Übersicht gibt **Tabelle 1**.

Beispielhaft soll ein Kennfeld (**Abbildung 1**) einer geregelten elektrischen Maschine vorgestellt werden. Durch die Regelung der Leistungselektronik ist es möglich ein konstantes Antriebsmoment  $M_{\text{nenn}}$  über einen Drehzahlbereich (hier Grunddrehzahlbereich GD) zu erreichen (**Abbildung 1, a**). Wird die Drehzahl über den GD hinaus erhöht, sinkt das Motormoment mit steigender Drehzahl, da bei gleichbleibender Ausgangsspannung der Magnetisierungsstrom abnimmt. Dieser Bereich wird Feldschwäcbereich (FB) genannt. Wie sich das Motormoment in diesem Bereich verhält, ist von der Art der Maschine, z. B. ASM oder PMSM, und vom konstruktiven Aufbau abhängig. Daraus resultierend stehen im Kennfeld der

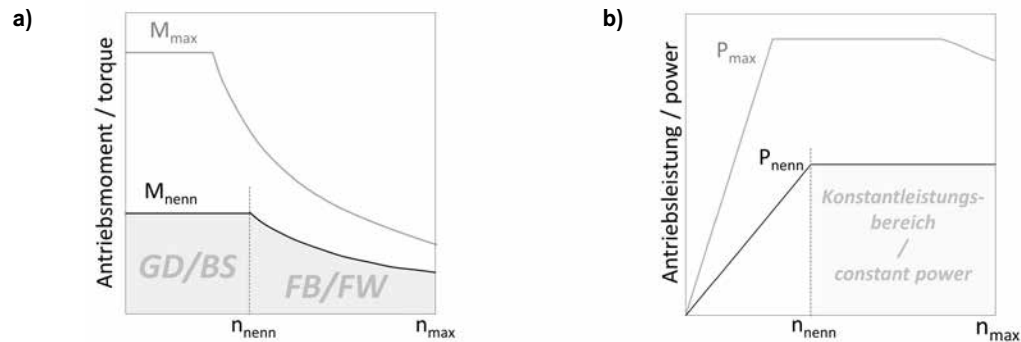
Tab. 1

Vergleich von permanentmagnetischer Synchronmaschine und Asynchronmaschine

Table 1: Comparison of permanent magnet synchronous machine and asynchronous machine

PMSM	ASM
Hohe Leistungsdichte <i>High power density</i>	mittlere Leistungsdichte <i>medium power density</i>
Sehr gute Regelbarkeit <i>Excellent controlability</i>	sehr gute Regelbarkeit <i>excellent controlability</i>
Mittlerer Regelaufwand <i>Medium control effort</i>	geringer Regelaufwand <i>small control effort</i>
Hoher Aufwand bei der Auslegung <i>High design effort</i>	aufgrund großer Erfahrung mittlerer Aufwand <i>medium design effort due to high knowledge</i>
Hohe Kosten zum aktuellen Zeitpunkt <i>Currently high costs</i>	geringere Kosten gegenüber PMSM <i>lower costs than PMSM</i>

Abb. 1



Beispiel Kennfelder geregelte elektrische Maschine

Fig. 1: Example characteristic curves of an electrical machine

Maschine Bereiche mit steigender und nahezu konstanter Leistung zur Verfügung (**Abbildung 1, b**).

Bei gegebener Spannung und endlicher thermischer Belastbarkeit der Maschine kann ein Antriebsmoment  $M_{max}$  (**Abbildung 1, a**) abgegeben werden. In diesem Zustand erwärmt sich die Maschine so stark, dass nach einer bestimmten Dauer eine Zerstörung der Maschine zu erwarten ist. Mit dem Moment  $M_{nenn}$  hingegen ist ein dauerhafter Betrieb der Maschine möglich. Die Erhöhung des Antriebsmoments über das Nennmoment hinaus soll hier als Überlastbetrieb bezeichnet werden.

Zusätzlich unterscheiden sich die beiden Maschinen in ihren Wirkungsgraden. So haben PMSM höhere Wirkungsgrade bei niedrigen Drehzahlen und im Teillastbereich. ASM können bei hohen Drehzahlen Vorteile gegenüber den PMSM aufweisen [1]. Für beide Maschinentypen existiert jeweils ein Leistungs- und Drehzahlbereich mit dem jeweils besten Wirkungsgrad (**Abbildung 2**).

### Elektrische Antriebe im On-Road-Bereich

Aufgrund der höheren Leistungsdichte finden PMSM eine höhere Verbreitung als ASM. Während Naben- bzw. Direktantriebe bei Kleinstfahrzeugen mit begrenztem Bauraum als

beste Lösung gelten, werden für stärker motorisierte Fahrzeuge zunehmend zentrale Antriebslösungen mit schaltbaren Mehrganggetrieben vorgestellt [2; 3; 4], die hohe Radmomente für eine hohe Beschleunigung und eine hohe Fahrzeugendgeschwindigkeit ermöglichen.

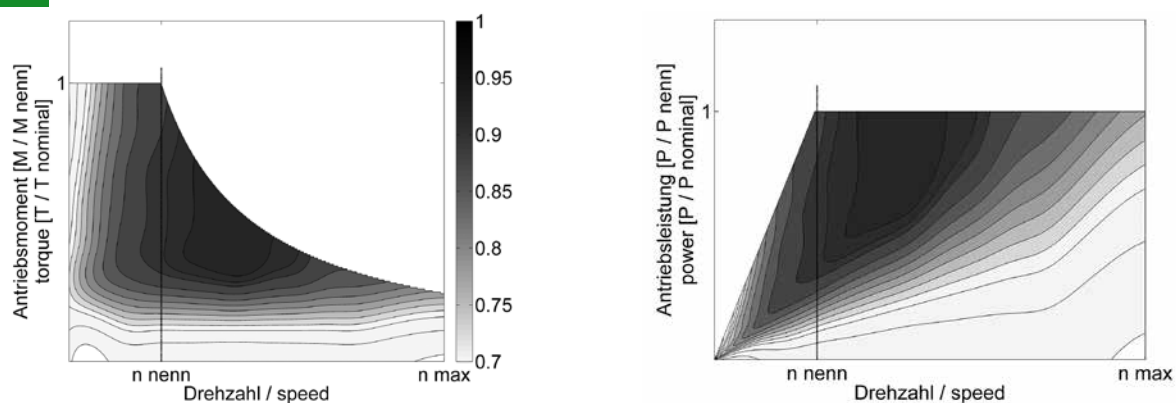
Die Forderung nach einem hohen Anfahrmoment lässt sich auch ohne zusätzliche mechanische Übersetzung durch eine entsprechend groß dimensionierte und somit schwere Maschine bzw. durch eine kurzzeitige Überlastung einer „kleineren“ elektrischen Maschine erreichen.

Die Endgeschwindigkeit ist von der Raddrehzahl abhängig. Hohe Drehzahlen stellen für elektrische Antriebe kein Problem dar. Aktuell am Markt verfügbare PMSM können im Feldschwäcbereich Drehzahlen von 12 000 U/min und mehr erreichen.

Da der Zugkraftbedarf mit steigender Geschwindigkeit zunimmt, das Antriebsmoment der elektrischen Maschine im Feldschwäcbereich mit steigender Drehzahl jedoch sinkt, ergibt sich daraus ein Betriebspunkt mit der maximalen Geschwindigkeit des Fahrzeuges.

Da bei rein elektrisch angetriebenen Fahrzeugen die Batterien einen Großteil der Produktionskosten und des Gewichts

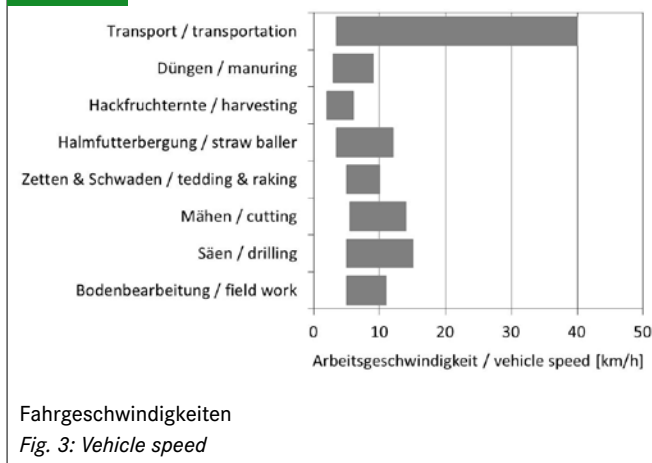
Abb. 2



Wirkungsgradkennfelder für eine Beispielmaschine

Fig. 2: Example efficiency map of an electrical machine

Abb. 3



ausmachen, beeinflusst bei einer vorgegebenen Reichweite der Energieverbrauch, und damit der Wirkungsgrad des Antriebsstranges, die Produktkosten wesentlich. Wird der Bereich des höchsten Wirkungsgrades im Kennfeld der elektrischen Maschine möglichst gut an den Leistungsbedarf des Fahrzeuges angepasst, können Energieeinsparungen bis zu 16 Prozent – bezogen auf den jeweiligen Fahrzyklus [4] – erreicht werden. Für elektrische Traktionsantriebe bei Personenkraftwagen wurden bereits Vorschläge zur Optimierung der Energieeffizienz des elektrischen Antriebsstranges vorgestellt [2].

### Zugkraftbedarf Traktor

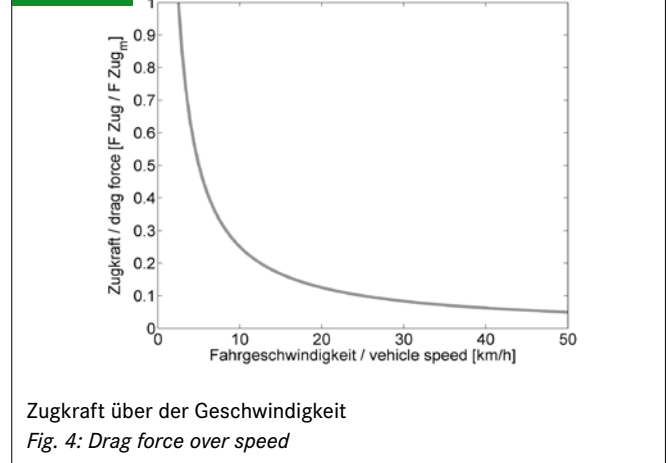
Mobile Arbeitsmaschinen können anhand ihrer Aufgaben in Maschinen mit und ohne Dauerzugkräfte eingeteilt werden. Bei Traktoren wird ein überwiegender Teil der Motorleistung zum Ziehen verwendet, weshalb sie den Maschinen mit Dauerzugkräften zugeordnet werden [5]. Um den Energieverbrauch weiter zu senken, werden auch für Fahrzeuge mit einem hohen Dauerzugkraftbedarf vermehrt elektrische Antriebe erprobt [6]. Die Anforderungen an Traktoren sollen an dieser Stelle nicht ausführlich dargelegt werden, sondern es wird stattdessen auf die einschlägige Literatur verwiesen, z. B. [7].

Wichtig für die Auswahl der Antriebe sind die geforderten Raddrehzahlen und Radmomente für die Erfüllung der Zugleistung. Wegen der breiten Verwendung der Maschine ist es wünschenswert, die maximale Antriebsleistung bei jeder Arbeitsgeschwindigkeit als Zugleistung verfügbar zu haben.

**Abbildung 3** zeigt eine Auflistung von Arbeiten, mit den jeweils typischen Geschwindigkeiten [8]. Der daraus resultierende Bereich für die Fahrgeschwindigkeiten reicht von ca. 4 bis 40 km/h. Die Höchstgeschwindigkeit von Traktoren von 50 km/h wird zunehmend stärker genutzt und eine Steigerung der Maximalgeschwindigkeit wird für die Zukunft erwogen [9].

Wird die Zugkraft  $F_{\text{zug}}$  nach Gleichung 1 aus der bereitgestellten Motornennleistung  $P_{\text{nenn}}$  bestimmt, ergibt sich mit der Zugkraft über der Geschwindigkeit ein Kennfeld wie in **Abbildung 4** dargestellt.

Abb. 4



$$F_{\text{zug}}(v) = P_{\text{nenn}} \cdot v^{-1} \quad (\text{Gl. 1})$$

Eine elektrische Maschine mit einem großen Feldschwächbereich und einer in diesem Bereich nahezu konstanten Leistung erscheint für die Aufgabe der Zugkraftenerzeugung sehr gut geeignet. Die Zugkraftkurve einer elektrischen Maschine legt sich an die Zugkrafthyperbel nahezu ideal an, da beide Kurven auf einer konstanten Leistungsabgabe bei steigender Drehzahl basieren (**Abbildung 1, a**) und (**Abbildung 4**).

Um das für die Zugkraft nötige Antriebsmoment ohne zusätzliche Übersetzung zu erzeugen, müsste die elektrische Maschine einen meist ungeeigneten großen Durchmesser sowie eine große Masse aufweisen. Dieser Konflikt wurde bereits vielfach diskutiert und bei [10] durch eine zusätzliche mechanische Übersetzung gelöst.

Für eine mobile Arbeitsmaschine mit Dauerzugkräften kommt nur der Dauerleistungsbereich einer elektrischen Maschine infrage. Kurzzeitiger Überlastbetrieb scheint nur in bestimmten Situationen mit sehr hohem Zugkraftbedarf nötig zu sein. Hierbei ist zu beachten, dass die Forderung nach einer hohen Momentenüberlastbarkeit und einem großen Feldschwächbereich sich nicht gleichzeitig erfüllen lassen [11].

Die aus den oben dargelegten Fahrgeschwindigkeiten bestimmte Spreizung beträgt für einen Geschwindigkeitsbereich von 4 bis 50 km/h nach Gleichung 2  $\varphi_{\text{Geschwindigkeit}} = 12,5$ . Diese Spreizung der Arbeitsgeschwindigkeiten lässt sich mit einer aktuell verfügbaren elektrischen Maschine nicht erreichen. Marktrecherchen haben ergeben, dass verfügbare automotivtaugliche PMSM und ASM einen Feldschwächbereich mit konstanter Leistung im Dauerbetrieb (Gleichung 3) von  $\varphi_{\text{Antrieb}} = 3$  bis 4 aufweisen.

Entsprechend muss bei der Verwendung von Standardantrieben eine Möglichkeit gefunden werden, die Geschwindigkeitspreizung  $\varphi_{\text{Geschwindigkeit}}$  an die Drehzahlspreizung des Antriebs  $\varphi_{\text{Antrieb}}$  anzupassen. Dies lässt sich üblicherweise durch die Nutzung von schaltbaren Getriebestufen erreichen, wobei das Getriebe die zusätzlich benötigte Spreizung aufweist (Gleichung 4). Die weiteren Berechnungen erfolgen in Anlehnung an [12].

Abb. 5

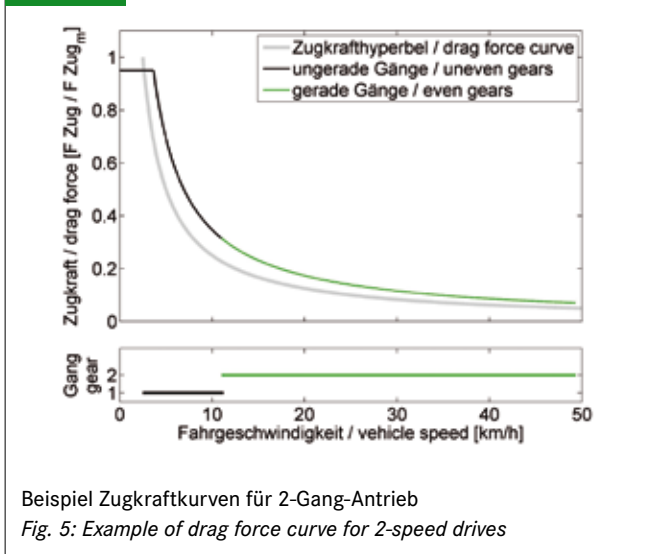
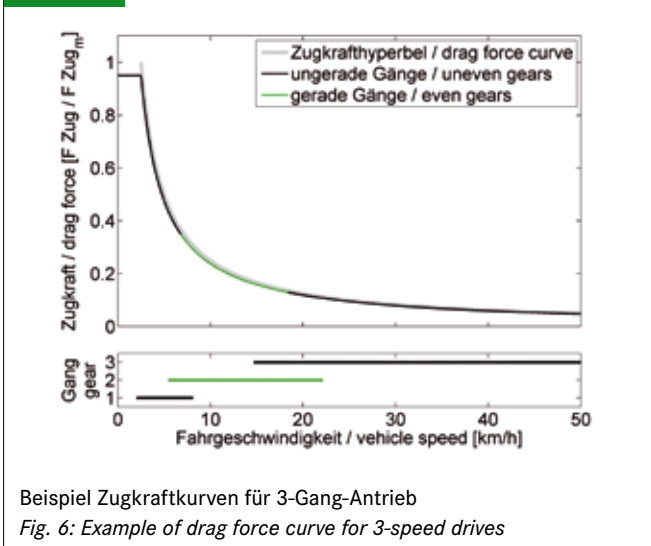


Abb. 6



Die Getriebespreizung  $\varphi_{\text{Getriebe}}$  muss in Gänge mit Übersetzungen unterteilt werden, sodass eine ununterbrochene Zugkraftkurve in Annäherung an die ideale Zugkrafthyperbel entsteht (**Abbildung 4**). Bei der Verwendung von Zahnradgetrieben muss eine ganzzahlige Anzahl von Gängen gewählt werden. Unter der Bedingung eines konstanten Stufensprunges und ohne eine Drehzahlüberschneidung des Antriebes bei verschiedenen Gängen errechnet sich die Anzahl der benötigten schaltbaren Gänge  $z_{\text{Gang}}$  nach Gleichung 5.

$$\varphi_{\text{Geschwindigkeit}} = v_{\text{max}} / v_{\text{min}} \quad (\text{Gl. 2})$$

$$\varphi_{\text{Antrieb}} = n_{\text{max}} / n_{\text{nenn}} \quad (\text{Gl. 3})$$

$$\varphi_{\text{Geschwindigkeit}} = \varphi_{\text{Antrieb}} \cdot \varphi_{\text{Getriebe}} \quad (\text{Gl. 4})$$

$$z_{\text{Gang}} = \log_{\varphi_{\text{Antrieb}}} (\varphi_{\text{Getriebe}}) + 1 \quad (\text{Gl. 5})$$

Eine Möglichkeit, eine ganzzahlige Ganganzahl zu erreichen, ist die Wahl eines überdimensionierten Antriebes und die Verwendung der nächstniedrigeren Ganganzahl. Hierdurch kann die Spreizung des Motors  $\varphi_{\text{Antrieb}}$  größer gewählt werden, da die geforderte Leistung bereits bei einer Drehzahl unterhalb der Eckdrehzahl  $n_{\text{nenn}}$  anliegt (**Abbildung 5**). Durch die Wahl einer elektrischen Maschine mit einer größeren Nennleistung, würde eine größere Zugleistung zur Verfügung stehen, wenn keine Begrenzungen durch die Energiequelle oder die Traktionsgrenze vorliegen.

Eine zweite Möglichkeit ist die Wahl der nächsthöheren Ganganzahl. Die Zugkraftkurve des Antriebes folgt der idealen Zugkrafthyperbel über den gesamten Geschwindigkeitsbereich (**Abbildung 6**). Durch die Anpassung der Stufensprünge entsteht eine Überschneidung der Geschwindigkeiten in den verschiedenen Gängen (**Abbildung 5**, unten). Die mögliche Fahrgeschwindigkeit für die Nennleistung im jeweiligen Gang ist unter den Zugkraftkurven dargestellt (**Abbildung 5** und **Abbildung 6**).

### Optimierungsansatz

Um die Verluste der elektrischen Maschine zu verringern, ist es sinnvoll, diese nur im Bereich ihres besten Wirkungsgrades zu betreiben. Durch eine Erhöhung der Anzahl der Gänge könnte die Arbeitsdrehzahl der Antriebsmaschine auf einen Bereich um den Bestpunkt herum gelegt werden. An einem Beispiel mit fünf Gängen (**Abbildung 7**) wird gezeigt, wie sich der Wirkungsgrad der Antriebsmaschine zur Fahrgeschwindigkeit verhält, wenn als Drehzahlbereich nur ein kleiner Teil des Konstantleistungsbereiches mit hohem Wirkungsgrad herangezogen wird.

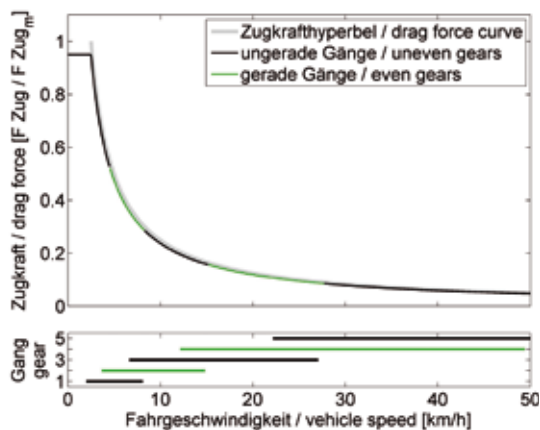
In **Abbildung 8** ist der Antriebswirkungsgrad für drei Beispiele mit zwei, drei und fünf Gängen dargestellt. Die Erhöhung der Anzahl der Gänge bewirkt, dass sich die Antriebsmaschine über einen großen Bereich der Fahrgeschwindigkeit im Bereich des besten Wirkungsgrades bewegt.

Da jede Getriebestufe Verluste verursacht, muss ein Optimum für die Motor- und Getriebeverluste gefunden werden. Hierfür wird ein iteratives Vorgehen auf der Grundlage von Simulationsrechnungen für die elektrischen und mechanischen Verluste nach **Abbildung 9** vorgeschlagen.

### Schlussfolgerungen

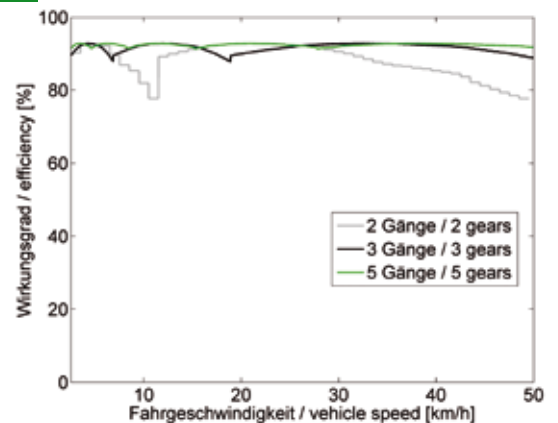
Elektrische Antriebe mit einem großen Konstantleistungsbe-  
 reich eignen sich sehr gut, um mit einer geringen Anzahl von  
 schaltbaren Gängen eine sehr gute Anpassung an die ideale  
 Zugkrafthyperbel zu erreichen. Die Erhöhung der Ganganzahl  
 ermöglicht eine Anpassung der Betriebspunkte der elektrischen  
 Maschine an die Fahrgeschwindigkeit und ermöglicht somit,  
 den hohen Wirkungsgrad der Maschinen noch besser zu nutzen.  
 Die Vorhersage der mechanischen und elektrischen Verluste im  
 Triebstrang stellt eine wesentliche Information für die Optimierung  
 dar. Zur Optimierung des Energieverbrauchs wird ein iteratives  
 Vorgehen vorgeschlagen.

Abb. 7



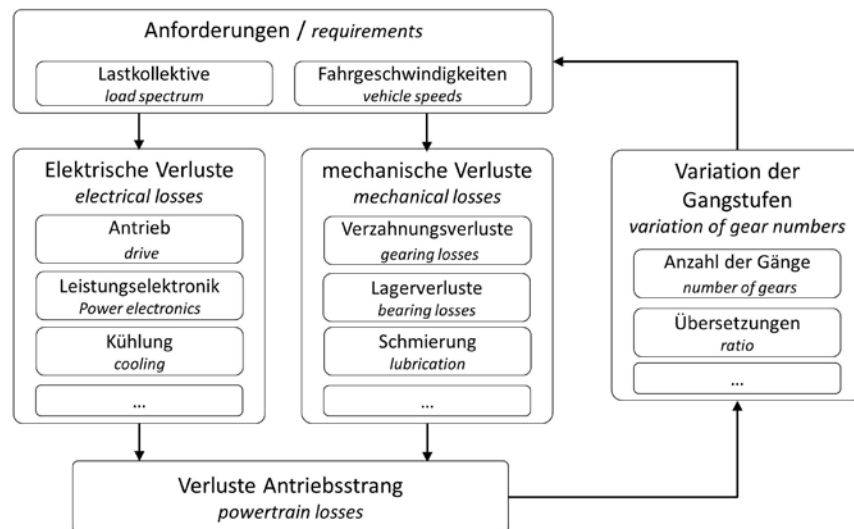
Beispiel Zugkraftkurven für 5-Gang-Antrieb  
 Fig. 7: Example of drag force curve for 5-speed drives

Abb. 8



Vergleich Wirkungsgrad mit verschiedenen Ganganzahlen  
 Fig. 8: Efficiency comparison for different numbers of gears

Abb. 9



Vorgehen zur Optimierung  
 Fig. 9: Optimization procedure

## Literatur

- [1] Schäfer, Uwe (2012): Elektrische Antriebe für Straßenfahrzeuge. Skript. Technische Universität Berlin, [http://www.ea.tu-berlin.de/menue/lehre\\_elekrotechnik/modul\\_elektrische\\_antriebe\\_fuer\\_strassenfahrzeuge/vorlesung/](http://www.ea.tu-berlin.de/menue/lehre_elekrotechnik/modul_elektrische_antriebe_fuer_strassenfahrzeuge/vorlesung/), Zugriff am 31.1.2013
- [2] Knödel, Ulrich; Strube, Alexander; Blessing, Uli Christian; Klostermann, Sven (2010): Auslegung und Implementierung bedarfsgerechter elektrischer Antriebe. Automobiltechnische Zeitschrift ATZ 2010(6), S. 462–466
- [3] Roberts, Simon (2012): Multispeed-Getriebe für Elektrofahrzeuge. Automobiltechnische Zeitschrift ATZ 114(4), S. 298–303
- [4] Schneider, Erik; Fickel, Frank; Cebulski, Bernd; Leibold, Jens (2011): Elektrische Antriebseinheit für E-Fahrzeuge. Hochintegrativ und Flexibel. Automobiltechnische Zeitschrift ATZ 113(5), S. 360–365
- [5] Renius, Karl Theodor (2004): Hydrostatische Fahrtriebe für mobile Arbeitsmaschinen. Überblick zum Stand der Technik. In: Wissensportal Bau- und Baustoffmaschinen 3(1), S. 1–15, [http://www.baumaschine.de/wissensportal-archiv/2004-01/wissenschaft-und-technik/fahrtriebe\\_dateien/fahrtriebe.pdf](http://www.baumaschine.de/wissensportal-archiv/2004-01/wissenschaft-und-technik/fahrtriebe_dateien/fahrtriebe.pdf), Zugriff am 30.1.2013
- [6] Renius, Karl Theodor; Geimer, Marcus (2012): Traktoren. Motoren und Getriebe bei Traktoren. In: Jahrbuch Agrartechnik 2012, Hg. Frerichs, Ludger, Braunschweig, Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge, S. 1–9
- [7] Renius, Karl Theodor (1985): Traktoren. Technik und ihre Anwendung. München, BLV Verlagsgesellschaft
- [8] KTBL (2009): Faustzahlen für die Landwirtschaft. Darmstadt, KTBL
- [9] Nadlinger, Manfred (2005): Fahrkomfort und Fahrsicherheit moderner Traktoren. Stand der Technik; Bedeutung im Praxiseinsatz, Anforderungen in der Zukunft. Landtechnische Schriftenreihe 223, Wien, Österr. Kuratorium für Landtechnik und Landentwicklung ÖKL
- [10] Geißler, Mike; Lindner, Mirko; Aumer, Wolfgang; Herlitzius, Thomas; Budig, Peter; Steinbach, Heinz; Gräf, Heinz (2009): Deselektisches Antriebssystem in selbstfahrenden Landmaschinen. Fachtagung Baumaschinentechnik 2009, Dresden, 14.-15.5.2009, Schriftenreihe der Forschungsvereinigung Bau- und Baustoffmaschinen 37, S. 134–144
- [11] Canders, W.R.; Mosebach, H. (1999): Technologien und Grenzen von High-Torque-Antrieben. Jahresbericht TU Braunschweig, Institut für elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen (IMAB), [https://www.tu-braunschweig.de/Medien-DB/imab/09-Jahresberichte/1999/03\\_Canders-Mosebach-Laube\\_1999.pdf](https://www.tu-braunschweig.de/Medien-DB/imab/09-Jahresberichte/1999/03_Canders-Mosebach-Laube_1999.pdf), Zugriff am 16.01.2013
- [12] Nauenheimer, H.; Bertsche, B.; Lechner, G.; Ryborz, J.; Novak, W. (2007): Fahrzeuggetriebe. Grundlagen, Auswahl, Auslegung und Konstruktion, 2. Aufl., Berlin, Springer

## Autoren

**Dipl.-Ing. Lars Klimentew** und **Dipl.-Ing. Jan Krüger** sind wissenschaftliche Mitarbeiter am Fachgebiet Konstruktion von Maschinensystemen (Leiter: **Prof. Dr. Henning J. Meyer**) der Technischen Universität Berlin, Straße des 17. Juni 144, 10623 Berlin, E-Mail: [lars.klimentew@tu-berlin.de](mailto:lars.klimentew@tu-berlin.de)