

Lars Klimentew, Julius F. W. Jenek und Henning J. Meyer

Wirkungsgradvergleich elektrischer Antriebsstränge mittels Simulation

Die Optimierung des Energieverbrauchs von Antrieben wird durch die Verwendung von elektrischen Maschinen mit ihrem sehr guten Wirkungsgrad bereits unterstützt. Durch die Anpassung der mechanischen Antriebsstrangkomponenten an die Aufgabe ergeben sich weitere Möglichkeiten den elektrischen Antrieb möglichst effizient zu nutzen. Um dies bereits in der Konzeptionsphase des Antriebsstranges realisieren zu können, wurde ein Simulationsmodell auf Basis von Kennfeldern der einzelnen Elemente erstellt, welches den Vergleich verschiedener Kombinationen aus einem elektrischen Antrieb und unterschiedlichen Getrieben ermöglicht.

Schlüsselwörter

Energieeffizienz, Getriebewirkungsgrad, Simulationswerkzeug

Keywords

Energy efficiency, degree of efficiency for gearbox, simulationtool

Abstract

Klimentew, Lars; Jenek, Julius F. W. and Meyer, Henning J.

Comparison of energy efficiency by using simulation tools

Landtechnik 67 (2012), no. 4, pp. 256–259, 3 figures, 1 table, 5 references

Using electrical engines is one step to optimize the energy consumption of the power train. The adaption of mechanical elements of the power train to its task offers more options to reduce the losses. When simulation is used to compare different power trains with different gearboxes, the efficiency can be calculated already in an early stage of the conceptual design. Therefore a simulation model was build to compare different settings of electric drives with gearboxes.

■ Die Verwendung von Antrieben im mobilen Einsatz stellt vielfältige Anforderungen, wozu geringe Kosten, hohe Regelbarkeit, hohe Energieeffizienz und geringes Gewicht zählen. Um diese Anforderungen zu erfüllen, werden vermehrt elektrische Antriebe in allen Bereichen der Antriebstechnik und zunehmend auch in mobilen Landmaschinen eingesetzt [1]. Der Einsatz elektrischer Antriebe bei mobilen Maschinen er-

möglicht neue Optimierungsmöglichkeiten im Antriebsstrang. Potenzial zur Optimierung bieten hierbei neben einem verbesserten Antrieb auch der mechanische Triebstrang. So muss der Aufbau des Antriebsstranges an die Aufgabe und die Antriebsmaschine angepasst sein, um eine geringe Masse des Antriebes und Energieeinsparungen zu erzielen. An dem nachfolgenden Beispiel wird anhand eines am Markt erhältlichen Antriebes gezeigt, wie sich dessen Energieverbrauch durch den Einsatz eines schaltbaren Stufengetriebes reduzieren lässt.

Leistungsgewicht

Neben der Erfüllung der Arbeitsaufgabe müssen mobile Arbeitsmaschinen den Weg zu ihrem Arbeitsumfeld zurücklegen. Bei gleicher Leistung des Antriebes soll das Verhältnis aus Gewicht zu Leistung (Leistungsgewicht) möglichst klein sein, um eine geringe Masse zu haben.

Für die Auslegung einer elektrischen Maschine können die Anforderungen an Leistung, Drehzahl und Drehmoment eingesetzt werden.

Wird die Auslegungsformel (Gl. 1) auf einen Betriebspunkt mit gegebener Leistung und Drehzahl angewendet, ergeben sich der Durchmesser und die Länge der Maschine. Aus diesen beiden Größen kann das Gewicht der Maschine abgeschätzt werden [2].

$$P \sim C \cdot d^2 \cdot l \cdot n \quad (\text{Gl. 1})$$

P – Leistung/power

d – Durchmesser/diameter

l – Länge/length

n – Drehzahl/revolution speed

C – Ausnutzungsziffer/utilisation factor [kW · min/m³]

Für eine Maschine mit gleicher Leistung ergibt sich aufgrund eines höheren Drehmomentes bei einer niedrigen Dreh-

Tab. 1

Maximaler Leistungsbedarf für PTO Typ 1 [4]

Table 1: Maximum power for PTO type 1 [4]

PTO Typ PTO type	Durchmesser [mm] Diameter [mm]	Angegebene Drehzahl [U/min] Rated rotational frequency [U/min]	Maximale Leistung [kW] Maximum power at rated engine speed [kW]	Resultierendes Drehmoment [Nm] Torque at rated engine speed [Nm]
1	35	540	60	1062
	35	1000	92	879

zahl ein höheres Gewicht und umgekehrt. Entsprechend besteht die Möglichkeit hoch drehende Motoren mit Untersetzungsgetrieben zu koppeln, um ein besseres Leistungsgewicht zu erzielen. Die Verwendung eines Untersetzungsgetriebes wird in vielen Bereichen angewendet und wurde bereits bei Geisler [3] für Traktionsantriebe in selbstfahrenden Landmaschinen beschrieben.

In vorliegendem Beitrag soll gezeigt werden, dass für die Kombination aus Motor und Getriebe bzw. der Variation der Getriebekenndaten weitere Freiheitsgrade hinsichtlich der Optimierung des Gesamtantriebsstranges bestehen.

Das nachfolgende Beispiel zeigt, wie sich der Wirkungsgrad des elektrischen Antriebes in Kombination mit einem schaltbaren Stufengetriebe für einen Betriebspunkt, im Vergleich zu einem Getriebe mit nur einer Übersetzung, verbessern lässt.

Aufgabe des Antriebes

Als Aufgabe wurde der Antrieb einer Zapfwelle PTO Typ 1 nach ISO 500 betrachtet. Die benötigten Antriebsdaten für den PTO Typ 1 sind in der **Tabelle 1** aufgelistet und um die Werte für das benötigte Abtriebsmoment erweitert worden.

Auswahl einer Antriebsmaschine

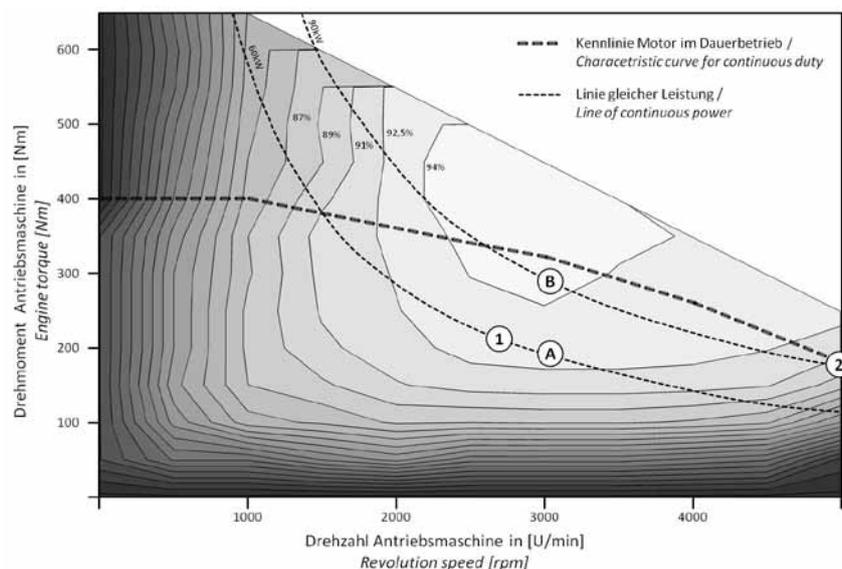
Um die geforderten Aufgaben erfüllen zu können, muss die Antriebsmaschine dauerhaft die maximalen Anforderungen jeder Teilaufgabe aus Tabelle 1 erfüllen können:

- eine Leistung von 92 kW
- eine Drehzahl $\leq 1\,000$ U/min
- ein maximales Drehmoment von ca. 1 060 Nm

Wird die Auslegung der elektrischen Maschine nach Gleichung 1 durchgeführt, ergibt sich für den Antrieb eine geschätzte Masse von 250 kg. Wird ein mechanisches Untersetzungsgetriebe verwendet, kann die Masse des Antriebes, je nach Wahl der Übersetzung, auf unter 100 kg gesenkt werden – bei gleicher Leistung und Erfüllung aller Anforderungen.

Die Verwendung eines Antriebes in Verbindung mit einem Untersetzungsgetriebe wird nun weiter betrachtet. Für die hier beschriebene Anwendung kann eine elektrische Maschine von am Markt verfügbaren Anbietern ausgewählt werden. Das Kennfeld der ausgewählten Maschine ist in **Abbildung 1** dargestellt. Das maximale Drehmoment der Antriebsmaschine wird über der Drehzahl aufgetragen und im dargestellten Diagramm der Antriebsmaschine kann der Wirkungsgrad für jeden Betriebspunkt abgelesen werden.

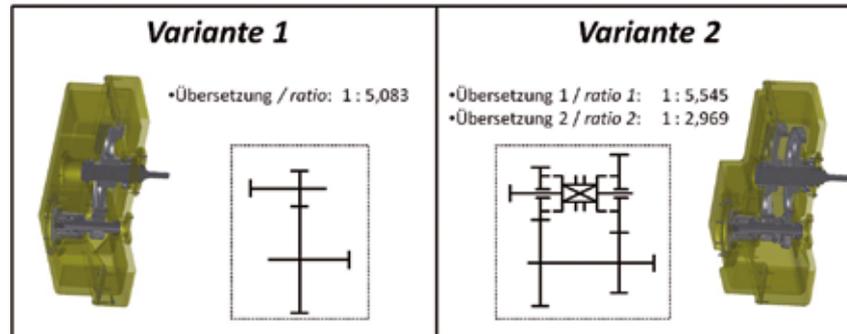
Abb. 1



Motorkennlinie mit Wirkungsgrad

Fig. 1: Characteristic curve with efficiency map

Abb. 2



Darstellung der Getriebevarianten 1 und 2
 Fig. 2: Illustration of the gear concepts 1 and 2

In **Abbildung 1** sind zusätzlich die Isolinien für konstante Leistung bei 60 kW und 90 kW eingetragen. Bei der Aufgabe die Drehzahlen von 540 U/min und 1 000 U/min zu erzeugen, ergibt sich bei nur einer Übersetzung eine Einschränkung, da die Drehzahlspitzung innerhalb des Motorkennfeldes liegen muss. Entsprechend der gewählten Übersetzung ergeben sich bei Volllast die Betriebspunkte 1 (bei 540 U/min) und 2 (bei 1 000 U/min) (**Abbildung 1**). Bei der Verwendung einer schaltbaren Getriebebestufe mit zwei Übersetzungen zeigt sich eine größere Freiheit bei der Wahl der Übersetzungsstufen, sodass die Punkte A und B wie in **Abbildung 1** gewählt werden. Dieser zusätzliche Freiheitsgrad bei der Auslegung ermöglicht die Beeinflussung der Betriebspunkte der Antriebsmaschine mittels der Getriebeübersetzung zu energetisch besseren Arbeitspunkten.

Wirkungsgrad und Energieverbrauch

Per Definition wandelt eine Maschine eine Energieform in eine andere um [5] – in diesem Beispiel elektrische Energie in mechanische. Die Leistung stellt sich als Energie pro Zeit dar und ist somit eine zeitdiskrete Größe, welche sich für die Beschreibung von Prozessen über einen Zeitraum oder für instationäre Prozesse gut verwenden lässt. Wird die einer Maschine zugeführte Leistung durch die nutzbare abgegebene Leistung dividiert, ergibt dies den Wirkungsgrad. Die Differenz aus diesen beiden Leistungen geht bei der Wandlung der Energie in der Maschine verloren und steht im Regelfall dem Prozess nicht mehr zur Verfügung. Aus dem Wirkungsgrad und einer bekannten Leistung können alle anderen Leistungen bestimmt werden sowie mithilfe der Dimension Zeit auch die Energiemenge.

Antriebsstrang

Der zu betrachtende Antriebsstrang umfasst die Antriebsmaschine, ein Getriebe und die Last als variable Größe. Die Regelung stellt das Drehmoment der Antriebsmaschine so ein, dass eine konstante Drehzahl gehalten wird.

Nach der Auswahl der Antriebsmaschine wurden zwei Getriebevarianten entworfen. Das Getriebe in der Variante 1 mit einer festen Übersetzung und in Variante 2 mit zwei schaltba-

ren Übersetzungen weisen vergleichbare Kenngrößen für die Lebensdauer und Haltbarkeit der Zahnradstufen und Lager auf. Für das Gewicht ergibt sich aus den Daten der Konstruktion für Variante 2 ein um etwa 20 % höheres Gewicht gegenüber der Variante 1. Dies ist auf die höhere Anzahl von Bauteilen zurückzuführen. In **Abbildung 2** sind beide Varianten dargestellt.

Simulation

Für den Vergleich zwischen verschiedenen aufgebauten Antriebssträngen wurde ein Simulationsmodell entwickelt, welches die Verlustleistungen last- und drehzahlabhängig berechnet.

Dieses Modell wurde in SimulationX erstellt und berücksichtigt die Motor- und Getriebeverluste des gesamten Antriebsstranges. Das Modell wurde zur einfacheren Berechnung aus Kennfeldern aufgebaut, welche den Wirkungsgrad über der Drehzahl und dem Drehmoment darstellen.

Als Regelglied stellt ein Proportionalglied das Drehmoment an der Antriebsmaschine so ein, dass die Abtriebsdrehzahl von 540 bzw. 1 000 U/min gehalten wird, während sich die Last kontinuierlich zwischen Teil- und Volllast ändert.

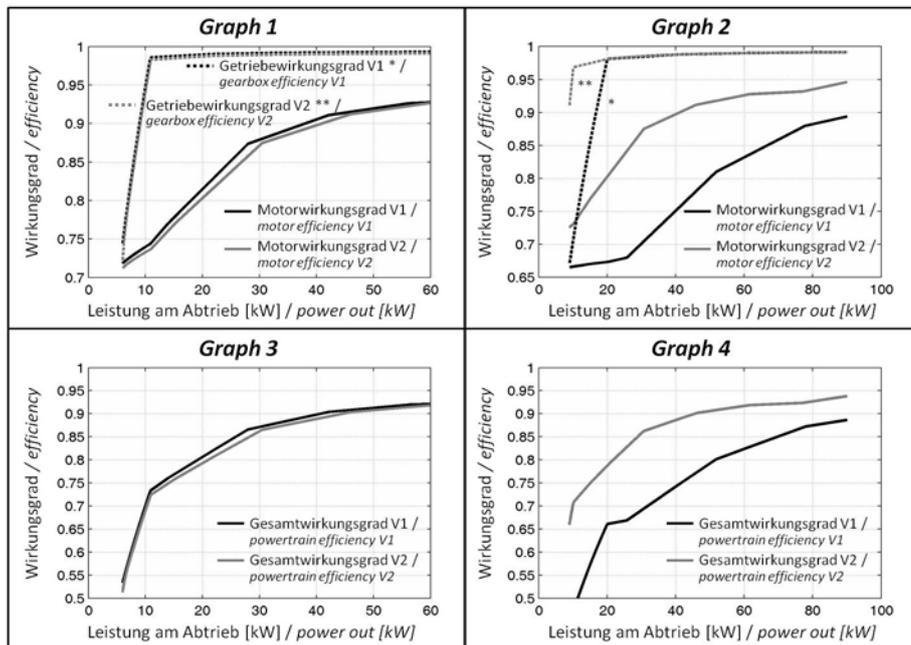
Als Eingangsdaten wurden die Kennfelder aus den zur Verfügung stehenden Datenblättern übertragen bzw. aus eigenen Berechnungen ermittelt. Das Wirkungsgradkennfeld für den gewählten Elektromotor wurde aus dem Datenblatt des Herstellers interpoliert und in das Modell übertragen. Aus den Daten der Getriebekonstruktionen wurden mittels verschiedener Berechnungsprogramme (z. B. KiSSsoft) die Verluste für die Lagerung, den Zahneingriff und weiterer Reib- und Dichtungsstellen bestimmt und im Simulationsprogramm berücksichtigt. Die Berechnungsansätze sind so gewählt worden, dass die Ergebnisse die jeweiligen Verluste für das Getriebe in Abhängigkeit der Drehzahl und des Drehmomentes erzeugen.

Auswertung

Für die Auswertung können die Wirkungsgrade der jeweiligen Kombinationen direkt miteinander verglichen werden.

Normiert auf die Abtriebsdrehzahl und die Leistung gibt Graph 1 der **Abbildung 3** den Getriebewirkungsgrad über der Leistung wieder. Das Getriebe mit einem Zahnradpaar (Vari-

Abb. 3



Auswertung der Simulation

Fig. 3: Results of the simulation

ante 1) hat bei einer Drehzahl von 540 U/min einen besseren Wirkungsgrad. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Getriebevariante 2 ein weiteres Zahnradpaar aufweist, wodurch höhere Plansch- und Lagerverluste entstehen. Der Motorwirkungsgrad ist für Variante 1 und 2 bei einer Abtriebsdrehzahl von 540/min nahezu gleich, wobei die Abweichung bei den verschiedenen Motordrehzahlen durch die verschiedenen Übersetzungen bei Variante 1 und 2 herrührt.

Bei einer Abtriebsdrehzahl von 1000 U/min und Gang 2 der Getriebevariante 2 sind die Getriebewirkungsgrade der Varianten 1 und 2 nahezu gleich (Graph 2, **Abbildung 3**). Dies ist auf die, im Vergleich zur Variante 2, höhere Umfangsgeschwindigkeit des im Eingriff befindlichen Zahnradpaares bei Variante 1 und die damit einhergehenden Verluste zurückzuführen. Bei der höheren Abtriebsdrehzahl von 1000 U/min liegt der Wirkungsgrad des Antriebsmotors der Variante 2 bei allen Lastbereichen deutlich über denen der Variante 1.

Wird der Gesamtwirkungsgrad der Motor-Getriebe-Kombination betrachtet (Graph 3 und 4, **Abbildung 3**), zeigt sich, dass bei einer Abtriebsdrehzahl von 1000 U/min Variante 2 mit einer Antriebsdrehzahl von ca. 3000 U/min deutliche Vorteile gegenüber Variante 1 bietet.

Schlussfolgerungen

Die für die Simulation verwendeten Elemente sind am Markt verfügbare Elemente bzw. wurden selbst anhand der Anforderungen konstruiert. Der Vergleich der Getriebevarianten beruht auf einem neuen Simulationsmodell, welches den Wirkungsgrad des Getriebes last- und drehzahlabhängig auf Grundlage der verwendeten Maschinenelemente und deren Anordnung,

ermittelt. Um die Energieeffizienz zu optimieren, muss der gesamte Antriebsstrang einer Aufgabe hinsichtlich des Wirkungsgrades betrachtet werden. Die vorgestellte Antriebsaufgabe lässt sich mit einem Antrieb und einer festen Getriebeübersetzung erfüllen. Aufgrund der verschiedenen Drehzahlen am Abtrieb kann jedoch die Antriebsmaschine nur zeitweise in ihrem Bestpunkt arbeiten. Durch die Drehzahlanpassung mittels eines mechanischen schaltbaren Stufengetriebes lässt sich trotz des geringfügig schlechteren Getriebewirkungsgrades eine Energieeinsparung durch einen besseren Gesamtwirkungsgrad erreichen.

Literatur

- [1] VDI-MEG (2010): Positionspapier zum Kolloquium „elektrische Antriebe in der Landtechnik“, HBLFA Franciso Josephinum, TU Dresden
- [2] Bolte, E. (2012): Elektrische Maschinen, Springer Verlag, Heidelberg
- [3] Geisler, M.; Lindner, M.; Aumer, W.; Herlitzius, T.; Budig, P.-K.; Steinbach, H.; Gräf, H. (2009): Dieselelektrisches Antriebssystem in selbstfahrenden Landmaschinen, Beitrag Fachtagung Baumaschinentechnik 2009, TU Dresden, EAAT GmbH Chemnitz, 14.-15. Mai 2009, S. 136-144
- [4] International Standard (2004): Agricultural tractors - Rear-mounted power take-off types 1, 2 and 3, Part 1
- [5] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.H. (2003): Konstruktionslehre - Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung, Methoden und Anwendung, Springer Verlag, 6. Auflage, S. 37

Autoren

Prof. Dr. Henning J. Meyer leitet das Fachgebiet Konstruktion von Maschinensystemen an der TU Berlin, Straße des 17. Juni 144, 10623 Berlin, www.km.tu-berlin.de.

Dipl.-Ing. Lars Klimentew ist als wissenschaftlicher Mitarbeiter seit 2009 am Fachgebiet Konstruktion von Maschinensystemen der TU Berlin angestellt, E-Mail: lars.klimentew@tu-berlin.de.

B.Sc. Julius F. W. Jenek studiert an der TU Berlin im Masterstudiengang Maschinenbau mit dem Schwerpunkt Konstruktion und Entwicklung.