

Anforderungen an einen elektrischen Radantrieb

Die theoretischen Grundlagen für die Beschreibung der Anforderungen an einen Fahrtrieb sind bekannt. Trotzdem ist eine Auslegung ohne exakte Kenntnis der Eingangsparameter schwer möglich. Extremwerte führen zu einer Überdimensionierung.

In Dresden wurden in Vorbereitung auf den Aufbau eines Traktors mit elektrischen Einzelradantrieben Messfahrten durchgeführt, um die tatsächlich auftretenden Lasten in ihrem zeitlichen Verlauf berücksichtigen zu können. Die gewonnenen Erkenntnisse bilden die Grundlage für die Auslegung des elektrischen Einzelradantriebes.

Dipl.-Ing. Andi Günther ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Landmaschinen (Leitung: Prof. Dr.-Ing. habil. G. Bernhardt), Institut für Verarbeitungsmaschinen, Landmaschinen und Verarbeitungstechnik der TU Dresden, Bergstraße 120, 01069 Dresden; e-mail: Guenther@landmaschinen.tu-dresden.de

Schlüsselwörter

Radnabenmoment, Radantriebsleistung, Elektrischer Einzelradantrieb

Keywords

Wheel hub torque, wheel driving power, electrical single wheel drive

Literatur

Literaturhinweise sind unter LT 05412 über Internet <http://www.landwirtschaftsverlag.com/landtech/localliteratur.htm> abrufbar.

Als bedeutendster Fortschritt der letzten Jahre auf dem Gebiet der Traktortechnik können stufenlose hydraulisch-mechanisch leistungsverzweigte Getriebe gesehen werden. Seit dem sich Traktoren mit starrgekuppeltem Allradantrieb Mitte der 1970er Jahre durchgesetzt haben, wurde am Grundaufbau des Fahrwerkes wenig geändert. Produktivitätssteigerungen wurden vor allem durch größere Motorleistungen in schweren Traktoren bei besserem Komfort erzielt.

Bei heutigen Allradtraktoren wird die Vorderachse größtenteils mit konstanter, konstruktiv festgelegter Voreilung angetrieben [1]. Um die jeweils maximal mögliche Radzugkraft nutzen zu können, werden Differenzialsperren in den Achsen eingesetzt. Unterschiedliche Rollradien und ungleiche Fahrwege, die jedes Rad zurückzulegen hat, führen zu erzwungenem unterschiedlichen Schlupf an den Rädern und sind Ursache dafür, dass nicht immer die projektierte Zugkraft und -leistung des Fahrzeuges umgesetzt werden kann. Hier wirken die Nachteile des Zentralantriebes, bei dem alle Räder von einem Getriebe bedient werden.

Eine Steigerung der Produktivität und der Effektivität des Fahrtriebes ist zukünftig zu erreichen, wenn die mechanische Kopplung der Räder untereinander aufgehoben wird. Jedem Rad muss unabhängig von den anderen Rädern ein den jeweiligen Erfordernissen angepasstes Drehmoment bei sinnvoller Drehzahl zugeführt werden. Somit kann jedes Rad trotz unterschiedlicher Bedingungen energieeffizient betrieben werden oder sein volles Potenzial an Zugkraft ausschöpfen. Es existieren bereits PKW und Off-Road-Fahrzeuge mit elektrischem wie auch hydrostatischem Einzelradantrieb [2] und Traktoren mit elektrischem Zentralantrieb [3].

Anforderungen an den Traktortrieb

Von Traktoren wird erwartet, dass sie kurzzeitig bei niedrigen Fahrgeschwindigkeiten (und im Stillstand) jederzeit ihre maximale - physikalisch durch die Fahrzeugmasse und die jeweiligen Traktionsbedingungen zwischen Reifen und Fahrbahn begrenzte - Zug-

kraft aufbringen können. Im Feld muss davon ausgegangen werden, dass bis zu einer technologisch zweckmäßigen Arbeitsgeschwindigkeit (bis ~ 7 km/h) dauerhaft an der Schlupfgrenze gearbeitet werden kann.

Dynamisch veränderte Radlasten führen zu einer Überdimensionierung des Fahrtriebes. Die Summe der in den vier Rädern installierten Antriebsleistung muss größer sein als die von der Energiequelle bereitgestellte Leistung.

Auslegungskriterien Elektromotor

Die Landtechnikentwicklung ist Anwender der Elektromotorentchnik und muss die mechanischen Anforderungen und konstruktiven Randbedingungen für die Elektromotorenentwickler definieren. Für den Einsatz der Motoren im Bereich mobiler Maschinen sind die Forderungen nach minimalem Raumbedarf und minimaler Masse unumgänglich.

Anzustreben ist für Elektrofahrzeuge ein hoher Wirkungsgrad über den gesamten Drehzahlbereich. Grundlage der Auslegung ist der große Drehzahlbereich mit konstanter Leistung (1:7) und das bei der jeweiligen Drehzahl abzugebende Nenn- und Maximalmoment. Bekannt ist, dass Norm-Elektromotoren kurzzeitig mindestens das 1,6fache des Nennmomentes abgeben können. Der Motor muss nicht nur in der Lage sein, das geforderte Drehmoment (Kurzzeit-Überlast- und Dauermoment) bereitzustellen, sondern auch die dabei entstehende Verlustwärme muss für jeden geforderten Einsatzfall (vor allem im Dauereinsatz) ausreichend abgeführt werden.

Die Auslegung eines Elektromotors kann in erster Näherung anhand theoretisch ermittelter Kennfelder für den Radantrieb erfolgen. Das Radnabenmoment berechnet sich aus der Summe des notwendigen Momentes zur Überwindung des Rollwiderstandes (Produkt aus der Radlast F_G und dem Hebel der rollenden Reibung f) und des Momentes zu Generierung der Radzugkraft F_T (multipliziert mit dem statischen Halbmesser r) [4].

$$M = F_T \cdot r + F_G \cdot f \quad \text{Gl.1}$$

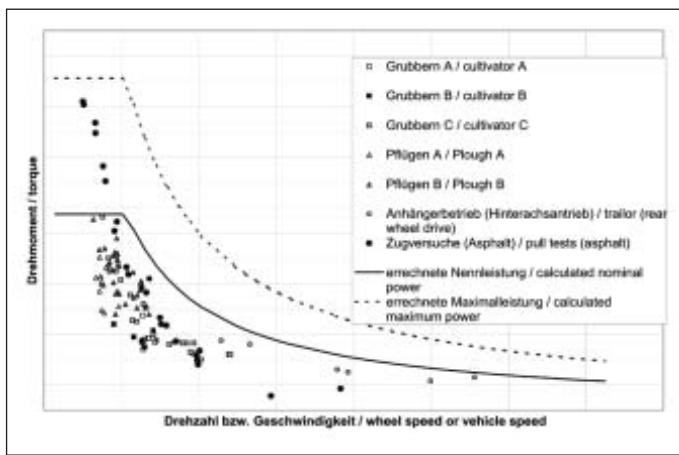


Bild 1: Errechnete und gemessene Radantriebsmomente

Fig. 1: Calculated and measured torque of wheel hub

wobei vereinfachend mit der Zusammenfassung des Triebkraftbeiwertes κ und dem Rollwiderstandsbeiwert ρ zum Kraftschlussbeiwert μ

$$F_T = \kappa \cdot F_G \quad \text{Gl. 2,}$$

$$\rho = f / r \quad \text{Gl. 3 und}$$

$$\mu = \kappa + \rho \quad \text{Gl. 4}$$

für folgende Formel zum Einsatz kommt

$$M = \mu \cdot F_G \quad \text{Gl. 5}$$

Sowohl für die Radlast F_G als auch für den Kraftschlussbeiwert μ können für einzelne Einsatzfälle nur Erfahrungswerte eingesetzt werden. Maximalwerte führen zu einem unnötig überdimensionierten oder nicht realisierbaren Elektromotor.

In bisherigen Überlegungen wurde eine dauerhaft auftretende Radlast von 35% der zulässigen Fahrzeugesamtmasse angenommen. Für Feldarbeiten wurde eine Kraftschlussbeiwert von 0,65 und auf befestigter Fahrbahn von 1,1 festgelegt. Auch aufwändige Simulationen verbessern die Genauigkeit nur, wenn das Simulationsmodell und die verwendeten Parameter anhand von praktischen Messungen verifiziert werden.

Unter anderen Fragestellungen wurden an Traktoren Messungen zur Ermittlung des Radantriebsmomentes und der Raddrehzahl durchgeführt. Hier stand die Schaffung von Dimensionierungsgrundlagen für mechanische Elemente des Antriebsstranges in Form von Lastkollektiven im Vordergrund. Aus den Lastkollektiven können rückwirkend keine Aussagen über die Radleistung und deren Verlauf getroffen werden [6, 7, 8].

Der zeitliche Verlauf des Drehmomentes im Praxiseinsatz ist von entscheidendem Interesse. Stochastisch wechselnde Einsatzbedingungen und somit Belastungen für die elektrische Radnabe führen zu komplexen thermischen Belastungen, die mit einfachen Kennwerten nur unsicher wiedergegeben werden.

Messfahrzeug und Messfahrten

Aufgrund des Mangels an frei zugänglichen, verwertbaren Messdaten wurde am Lehrstuhl Landmaschinen der TU-Dresden ein Traktor (MB-Trac 1300) mit Messtechnik ausgerüstet. Zur Messung des Radantriebsmomentes wurden auf dem Rohrstück der

Glockennabe des Planetenendanztriebes Dehnmessstreifen in Vollbrückenschaltung appliziert. Die Messsignale werden von den Vorderrädern mit analogen Nahfeldtelemetriesystemen und von den Hinterrädern mit Schleifringen übertragen. Die Drehzahlmessung erfolgt mit Hilfe einer Zahnscheibe auf der Bremstrommel und eines Näherungsschalters. Zusätzlich misst ein Radarsensor die reale Fahrgeschwindigkeit, die Motordrehzahl wird aufgezeichnet.

Den repräsentativen Einsatzfall gibt es nicht. Gleichung 5 verdeutlicht, dass die Variablen Radlast und Kraftschlussbeiwert das maximale Antriebsmoment festlegen. Die Radlast kann durch Ort und Lage von Ballast am Traktor sowie durch die Art des Gerätes und dessen Kopplung mit dem Fahrzeug beeinflusst werden. Das Versuchsfahrzeug wurde im Frontanbau und auf der Ladefläche über der Hinterachse zusätzlich belastet. Damit ist die Radlast über die bei dieser Traktorbauf orm in der Praxis üblichen Ballastierung hinaus erhöht worden. Ziel der Ballastierung war nicht, den Werten der theoretischen Annahmen möglichst nahe zu kommen, sondern den größten Teil praktischer Einsatzfälle abzudecken, ohne die Vielzahl der Traktor-Geräte-Kombinationen testen zu müssen.

Extreme Arbeitsaufgaben und eine unverhältnismäßig ungünstige Ballastierung des Versuchsfahrzeuges werden bewusst ausgeschlossen.

Das Versuchsprogramm gliederte sich in zwei Hauptaufgabenfelder: Messfahrten zur Ermittlung des vom Elektromotor zu liefernden Dauermomentes und Messungen zur Bestimmung des Maximalmomentes.

Im ersten Teil wurde der Traktor unter Praxisbedingungen in Kombination mit zwei Schwergrubbern (3 m und 4,5 m) und einem Anbauendepflug (4-scharig, 1,8 m) mit Untergrundpacker an zwei Standorten bei wechselnden Bedingungen eingesetzt. Für unterschiedliche Getriebschaltstufen wurde die Arbeitstiefe des Gerätes angepasst. Die Grubber wurden vom Traktor getragen oder stützten sich über Packerwalzen ab (Hubwerk in Schwimmstellung). Der Pflug wurde mit geregelten Unterlenkern und funktionslosem oder stützendem Oberlenker

betrieben. Es fanden Transportfahrten mit zwei beladenen Anhängern auf der Straße und auf dem Feld statt.

Im zweiten Versuchsteil zur Bestimmung des maximalen Radantriebsmomentes wurde der Traktor mit einem Geräterahmen mit Zusatzgewicht im Heckanbau versehen. Dabei wurde die statisch zulässige Hinterachslast nahezu erreicht. In dieser Kombination wurde der Traktor auf asphaltierter Fahrbahn mit einem bedeutend schwereren Fahrzeug gebremst. Der Angriffspunkt der Zugkraft wurde hoch gewählt, um eine zusätzliche Belastung der hinteren Räder bei hohen Zugkräften zu erreichen.

In der genannten Konfiguration war bei praxisüblichen Maschineneinstellungen und Arbeitsgeschwindigkeiten immer die Leistung des Dieselmotors die limitierende Größe, nicht die Traktionsbedingungen. Zur Auswertung kommen Bereiche maximaler Dieselmotorleistung. Bild 1 zeigt die Messwerte des jeweils höchstbelasteten Rades im Vergleich zu den im Vorfeld errechneten Werten.

Fazit

Mit den theoretisch getroffenen Annahmen für die Radlast und den Kraftschluss wird der Antrieb überdimensioniert. Die Messwerte der Maximalleistung liegen deutlich unter den berechneten Werten. Der geringe Bedarf an Überleistung im Vergleich zur Nennleistung oder Maximalmoment im Konstantleistungsbereich ($v > 7 \text{ km/h}$) wirkt sich positiv auf die Elektromotorentwicklung aus.

Das Bauvolumen eines Elektromotors wird neben der abzugebenden Leistung entscheidend durch das notwendige Drehmoment bestimmt. Eine Überdimensionierung zur Erzielung einer im Vergleich zur Dauerleistung bedeutend größeren Maximalleistung ist nicht erforderlich. Dazu ist allerdings eine effiziente Kühlung notwendig. Zu beachten ist auch die positive Auswirkung auf den Strombedarf der Antriebsumrichter.

Die Messungen verdeutlichen die Bedeutung einer ausgewogenen Ballastierung für die Dimensionierung der Radantriebe. Der Drehmomentbildung im Luftspalt sind physikalische Grenzen gesetzt. Bauraumanforderungen schränken die Größe des Elektromotors ein. Eine ungünstigere Radlastverteilung kann durch eine ausgewogene Ballastierung vermieden werden. Um in der Praxis die Leistung moderner Traktoren mit realisierbaren und bezahlbaren Elektroantrieben zu erreichen, kann über technische Einrichtungen zur dynamischen Achslastverschiebung (verschiebbarer Ballast, verschiebbare Achsen) nachgedacht werden.