

# Hochdrehzahlmotoren für mobile Arbeitsmaschinen

Svetlana Zhitkova, Björn Riemer, David Franck,  
Prof. Dr.-Ing. Kay Hameyer, Prof. Dr.-Ing. Richard Zahoransky  
*RWTH Aachen University, Institut für Elektrische Maschinen,  
52056 Aachen, Deutschland, E-Mail: svetlana.zhitkova@iem.rwth-  
aachen.de, Telefon: +49(0)241/80-97667*

## Kurzfassung

Durch eine stetige Preissteigerung der fossilen Energieträger werden auch im Bereich der mobilen Arbeitsmaschinen neben einer hohen Zuverlässigkeit u.a. Forderungen nach steigenden Gesamtwirkungsgraden, mit der hierdurch einhergehenden Energieeffizienz, forciert. Auch bei mobilen Arbeitsmaschinen ist der häufig eingeschränkt zur Verfügung stehende Bauraum für Traktionsantriebe eine Herausforderung. Ziel dieser Veröffentlichung ist ein allgemeingültiger Vergleich verschiedener elektrischer Antriebsarten als Traktionsantrieb für mobile Arbeitsmaschinen.

## Stichworte

Elektrifizierung, Drehmomentdichte, Leistungsdichte, Leistungsziffer, Hochdrehzahlmaschine, Motorvergleich

## 1 Einleitung

Durch eine stetige Preissteigerung der fossilen Energieträger und der CO<sub>2</sub> Problematik werden auch im Bereich der mobilen Arbeitsmaschinen neben einer hohen Zuverlässigkeit u.a. Forderungen nach steigenden Gesamtwirkungsgraden, mit der hierdurch einhergehenden Energieeffizienz, forciert. Als Beispiel seien hier Bestrebungen zur Elektrifizierung von Ackerschleppern oder Erntemaschinen genannt [1], [2]. Neben der Substitution von Antrieben für Anbaugeräte durch geregelte elektrische Motoren besteht ein weiteres

Potential zur Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades durch den Einsatz eines elektrischen Fahrtriebs. In modernen Ackerschleppern werden Antriebe mit hydrostatisch-leistungsverzweigtem Getriebe eingesetzt. Die verwendeten Hydromotoren, die bei geringen Geschwindigkeiten genutzt werden, haben eine hohe Energiedichte, sie weisen jedoch geringe Gesamtwirkungsgrade auf. Elektrische Antriebsmotoren bieten mit einem Gesamtwirkungsgrad  $>90\%$  klare Vorteile. Die im Vergleich zu Hydromotoren geringere Energiedichte elektrischer Antriebe stellt jedoch eine Herausforderung für die Auswahl geeigneter Maschinenkonzepte durch den in der Regel nur stark begrenzt zur Verfügung stehenden Bauraum dar.

## 2 Ausnutzung und Drehschub von elektrischen Maschinen

Ausgangspunkt für die weiteren Überlegungen ist die Schubkraft  $F_a$  bzw. der resultierende Drehschub  $\sigma$  einer elektrischen Maschine. Mit nur wenigen Parametern lässt sich hiermit schon eine erste Grobabschätzung des Bohrungsdurchmessers  $D$  der Maschine bestimmen.

Die Ausnutzung von elektrischen Maschinen wird ganz allgemein durch den Ausnutzungsfaktor  $C$  (Esson'sche Leistungsziffer) definiert:

$$C = \frac{P_{\text{mech}}}{D^2 l \cdot n} \quad (2.1)$$

Die Esson'sche Leistungsziffer bezieht die innere Leistung  $P_{\text{mech}}$  der Maschine auf das Volumen  $V \sim D^2 l$  und die Drehzahl  $n$  der Maschine (Reibung sei vernachlässigt).  $D$  ist der Bohrungsdurchmesser des Stators und  $P_{\text{mech}}$  die an der Welle der Maschine abgegebene Leistung.

Mit der inneren Leistung  $P = M \cdot \Omega = M \cdot 2\pi n$  und dem Drehschub  $\sigma_S$  als Kraft pro Rotorfläche  $\pi D l$

$$\sigma_S = \frac{\text{Kraft}}{\text{Rotoroberfläche}} = \frac{\text{Kraft}}{\pi D l} \quad (2.2)$$

errechnet sich das Drehmoment zu:

$$M = \frac{D}{2} \cdot \frac{F}{\pi D l} = \frac{D}{2} \cdot \sigma_S \cdot \pi D l = \sigma_S \frac{\pi}{2} D \quad (2.3)$$

Damit ergibt sich eingesetzt für die Leistungsziffer

$$C = \pi^2 \sigma_S \quad (2.4)$$

Die Ausnutzung  $C$  der Maschine lässt sich somit durch den Parameter des Drehschub  $\sigma_S$  bestimmen. Die Größe des Drehschubs ist abhängig von der Maschinentopologie und kann daher zum Vergleich von unterschiedlichen Maschinenkonzepten herangezogen werden.

Die elektromagnetisch erzeugte Kraft, bezogen auf die Rotorfläche, bezeichnet den Drehschub. Ausgedrückt für Werte in elektrischen Winkelgraden  $\beta$  errechnet sich der Drehschub zu

$$\sigma_S = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} B(\beta) A(\beta) d\beta \quad (2.5)$$

$B(\beta)$  ist die örtlich verteilte Luftspaltinduktion und  $A(\beta)$  ist der räumlich verteilte Strombelag am Umfang der Maschine. Ganz allgemein kann man durch Gl.(2.5) sagen das die am Energiewandlungsprinzip beteiligten, lokalen Kräfte über die Maxwell'schen Gleichungen bestimmt werden können und das der Drehschub proportional zum Produkt aus magnetischer Induktion und Strombelag ist. Dies besagt, das die Schubkraft

$$\sigma_S = H_t \cdot B_n \quad (2.6)$$

sich aus dem Produkt der Tangentialkomponente der magnetischen Feldstärke  $H_t$  und der Normalkomponente der magnetischen Induktion  $B_n$  im Luftspalt errechnen lässt. Mit dem Wissen das  $H_t$  den Strombelag  $A$  darstellt, der mit einer Statorwicklung erzeugt werden kann, und  $B_n$  das Luftspaltfeld der Elektrischen Maschine darstellt, kann die Lorenzkraft angegeben werden.

$$f = B \cdot A \quad (2.7)$$

Es ist deutlich zu erkennen, dass eine größere Umfangskraft erzeugt wird durch mehr Stromdichte und größere Luftspaltfelder, also durch mehr Kupfer in der Maschine um den Wert des Strombelags hoch zu treiben.

Die Grenzen der Steigerung der beiden Größen  $B$  und  $A$  sind für  $B$  gegeben durch die nichtlineare Sättigung des ferromagnetischen Eisens im Stator und Rotor der Maschine und für den Strombelag  $A$  durch die elektrische Beanspruchung bzw. die Kühlung der Maschine. Der Wert des Drehschubs ist im Allgemeinen abhängig von der

- Maschinentopologie (Maschinenart)
- Art der Felderregung
- Konstruktion (Radialfeld-, Axialfeldmaschine, Innenrotor-, Außenrotor-maschine)
- Betriebsart und Speisung
- Kühlung
- Den maschinenspezifischen Parametern Polpaarzahl  $p$ , Strombelag  $A$ , den magnetischen Verhältnissen im ferromagnetischen Eisen und im Luftspalt der Maschine.

Typische Werte für den Drehschub für die verschiedenen Maschinenarten sind in Tab. 1 zusammengefasst. Die hier zu bewertenden Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen befinden sich im Leistungsbereich von bis zu 60 kW. Hiermit ist deutlich, dass die Wahl einer permanentmagneterregten Synchronmaschine aus technischer Sicht erforderlich ist.

	Dreh Schub	Typische Werte	Dreh Schub [kN/m <sup>2</sup> ]
PMSM	$\sigma = \frac{\xi}{\sqrt{2}} A \cdot B \cdot \cos\psi$	A=40 000 A/m B=1,2 T cosψ=1 ξ=0,95	32,2
EC	$\sigma = \frac{2}{3} A \cdot B$	A=40 000 A/m B=1,2 T	32
ASM	$\sigma = \frac{\xi}{\sqrt{2}} A \cdot B \cdot \cos\varphi \cdot \eta$	A=40 000 A/m B=0,8 T ξ=0,95 cosφ=0,85 η=0,9	16,4
GRM	$= \frac{1}{2} \frac{\xi}{\sqrt{2}} A \cdot B \cdot 2 \sin 2p\epsilon$	A=40 000 A/m B=0,6 T ξ=1 sin2pε=1	8,5

Tab. 1: Typische Werte für den Dreh Schub verschiedener Motorarten (konservativ gerechnet).

Neben den maximal zu erzielenden Werten für die Stromdichte und die Höhe der Luftspaltinduktion ist für kompakte Maschinen die Magnetanordnung interessant. Um eine kompakte Konstruktion des magnetischen Kreises zu erzielen ist es wichtig zu sehen welche Felderregenanordnung für ein bestimmtes Konzept am günstigsten ist. Hierbei spielen die Permanentmagnete mit ihrem hohen Energiebeiwert ( $BH_{\max}$ ) eine zentrale Rolle. Es kann festgehalten werden, dass eine große Leistungsdichte der Maschine ganz wesentlich von der verwendeten Erregenanordnung abhängt. Durch die Erhöhung der Drehzahl kann die Leistungsdichte weiter gesteigert werden. Gleichung 2.8 verdeutlicht diesen Zusammenhang.

$$P_{\text{mech}} \approx \text{Volumen} \cdot \text{Drehzahl} \quad (2.8)$$

Zusammenfassend kann festgehalten werden:

- die Ausnutzungsziffer C steigt mit zunehmender Leistung  $P_{\text{mech}}$ , Gl.(2.1)
- die Ausnutzungsziffer ist proportional zum Dreh Schub, Gl.(2.4)

- abhängig von der magnetischen (Sättigung) und elektrischen Beanspruchung (Kühlung)
- die Leistungsziffer steigt mit steigender Polpaarzahl  $p$ , Gl.(2.5) ist in elektrischen Winkelgraden angegeben ( $\beta = \alpha \cdot p$ ).  $\alpha$  ist der mechanische Winkel
- bei gegebenem Dreh Schub wird das Volumen der Maschine unabhängig von der Drehzahl,
- Hochdrehzahlmaschinen haben bei gleicher Leistung ein kleineres Volumen, verglichen mit Langsamläufnern, Gl.(2.8)
  - es gilt keine strenge Proportionalität da die Verluste der Maschine mit zunehmender Drehzahl nichtlinear skalieren
  - das Volumen wird vom Drehmoment bestimmt, Gl.(2.2)
- die Kühlungsart hat einen wesentlichen Einfluss auf die Leistungsziffer und hat somit einen entscheidenden Einfluss auf Leistungsdichte.

### 3 Wachstumsgesetze elektrischer Maschinen

Der zuvor beschriebene Zusammenhang der magnetischen und elektrischen Größen in der elektrischen Maschine soll nun weiter vertieft werden um die relevanten Parameter für die Leistungsziffer, Rotordurchmesser  $D$ , aktive Eisenlänge  $l$ , Drehzahl  $n$ , Polpaarzahl, Luftspaltfeld und Strombelag für in geometrischen Abmessungen veränderlichen Maschinen zu bewerten. Oder von der anderen Seite betrachtet, wie groß wird die Maschine werden, wenn Drehmoment und Leistung vorgegeben werden, wie das bei Fahrzeugantrieben hauptsächlich der Fall ist. Die im Folgenden abgeleiteten Zusammenhänge gelten näherungsweise für alle Maschinenarten.

### 3.1 Wicklungsverluste

Die weiteren Überlegungen zu den Wachstumsgesetzen beschränken sich im Folgenden auf oberflächengekühlte Maschinen. Diese Kühlungsart ist relativ einfach zu behandeln und stellt für bessere Kühlbedingungen den "worst case" dar.

Bei oberflächengekühlten Maschinen müssen die Verluste über die Oberfläche abgeführt werden. Die ohmschen Wicklungsverluste  $P_{cu}$  werden in guter Näherung über die Oberfläche  $\pi D l$  abgeführt:

$$\frac{P_{cu}}{\pi D l} = \rho \cdot AS \quad (3.1)$$

$A$  ist der Strombelag,  $S$  die Stromdichte und  $\rho$  der spezifische Widerstand des Wicklungsmaterials.

Mit der Wärmeübergangszahl  $\alpha$  lässt sich überschlägig die Wicklungsüber-temperatur  $\Delta T$  bestimmen.  $\Delta T$  ist dem Produkt aus Strombelag und Stromdichte  $AS$  proportional.

$$\Delta T = \frac{P_{cu}}{\alpha \pi D l} \sim AS \quad (3.2)$$

Die maximale Wicklungsüber-temperatur ist durch die Auswahl der Wicklungs-isolation begrenzt. Der Standard im Elektromaschinenbau ist heute die Isolationsstoffklasse F (155°C) und H (180°C).

### 3.2 Skalierung der Maschinenparameter

Um die Frage zu beantworten, wie sich die Parameter einer Maschine für sich verändernde Geometrische Abmessungen einstellen, erweitert man den Durchmesser und die Maschinenlänge mit dem Skalierungsfaktor  $k$ . Die ursprünglichen Daten der Maschine sind in Gl.(3.3) mit einem \* gekennzeichnet.

$$D = D^* \cdot k \text{ und } l = l^* \cdot k \quad (3.3)$$

Die Abhängigkeiten der geometrischen Abmessungen zu den Parametern Leistung, Drehmoment, den Verlusten und dem Maschinengewicht lassen sich hieraus ableiten. Die Wicklungsverluste lassen sich nun mit Skalierungsfaktor angeben.

$$P_{cu} = \rho q_{cu} l S^2 \sim k^3 S^2 \tag{3.4}$$

$q_{cu}$  ist der Leiterquerschnitt. Die zur Kühlung beitragende Oberfläche ist:

$$O = \pi D l \sim k^2 \tag{3.5}$$

Die Erwärmung  $\Delta T$  errechnet sich über die Oberfläche  $O$  zu:

$$\Delta T = \frac{P_{cu}}{\alpha O} \sim AS^2 \tag{3.6}$$

Bei den hier zu bewertenden Motoren mit Konvektionskühlung, gegebener, konstanter Wärmeübergangszahl  $\alpha$  und Erwärmung  $\Delta T$  kann unterstellt werden, dass das Produkt  $AS$  konstant ist. Somit kann man schreiben:

$$S \sim \frac{1}{\sqrt{k}} \text{ und } A \sim \sqrt{k} \tag{3.7}$$

Aus Gl.(3.7) kann abgelesen werden, dass für wachsende Abmessungen die Stromdichte sinkt und der Strombelag steigt. Dieser Zusammenhang lässt sich für Maschinen kleinerer Leistung bestätigen.

			<b>Leistung</b>
Geom. Abmessungen	D~k und l~k	1	$P^{2/7}$
Gewicht	G~D <sup>2</sup> l	$k^3$	$P^{9/7}$
Oberfläche	O~Dl	$k^2$	$P^{4/7}$
Leistung	P~BAD <sup>2</sup> ln	$k^{7/2}$	1
Drehmoment	M~P	$k^{7/2}$	$P$
Wicklungsverluste	$P_{cu} \sim GS/P$	$k^{-3/2}$	$P^{-2/7}$

Tab. 2: Skalierung der Maschinenparameter für wachsende geometrische Abmessungen.

Mit den Zusammenhängen der Gl.(3.6 bis 3.7) ergibt sich für eine Maschine mit vergrößerten geometrischen Abmessungen die folgende Tab. 2. Diese Vorgehensweise mit dem Skalierungsfaktor ermöglicht den Vergleich verschiedener Motoren unterschiedlichen Typs. Man kann in der Tab. über die Leistung rechnen, oder über den Faktor  $k$  skalieren.

### 3.3 Überschlägige Abschätzung der Abmessungen verschiedener Motorkonzepte

Für die grobe Abschätzung der Abmessungen der verschiedenen Motor-konzepte soll die Tab. 1 als Basis dienen. Es wird der Drehschub auf das Konzept eines permanentmagneterregten Synchronmotors mit den Hochenergiemagneten NdFeB normiert. Für die Synchronmaschine mit Ferritmagnet wird eine Luftspaltinduktion von  $B=0,3$  T angenommen. Damit ergibt sich der Drehschub für die Motorvariante  $PMSM_{Fe}$  überschlägig zu  $8,05$  kN/m<sup>2</sup>. Auf Basis der Wachstumsgesetze aus Tab. 2 und unter Annahme der Proportionalität von Drehmoment und Leistung gilt:

$$M \sim P \sim \sigma_S \cdot k^3 \sim \sigma_S \cdot D \quad (3.8)$$

Alle anderen Daten wie die Wicklungsverluste, Gewicht etc., können bei Bedarf mit Hilfe der Tab. 2 abgeschätzt werden.

Normierter Drehschub		D <sup>2</sup> für gleiches Drehmoment wie $PMSM_{NdFeB}$
$PMSM_{NdFeB}$	1	1
$PMSM_{Fe}$	0,25	4
ASM	0,51	1,96

Tab. 3: Normierter Drehschub der betrachteten Motorvarianten.

Die Leistungsdaten bzw. das Drehmoment der  $PMSM_{NdFeB}$  Maschine soll für den Vergleich der Konzepte erreicht werden. Es ergibt sich für das Volumen

$D^2l$  die dritte Spalte in Tab. 3. Abb. 1 zeigt die Variation des Durchmessers und der Maschinenlänge für verschiedene Maschinenarten bei einem konstant angenommenen Drehmoment.

Die Asynchronmaschine kommt bei ca. doppeltem Durchmesser auf die gleiche Maschinenlänge als die  $\text{PMSM}_{\text{NdFeB}}$  Variante. Oder kann bei gleichem Durchmesser mit moderater Längenänderung das Drehmoment der  $\text{PMSM}_{\text{NdFeB}}$  erzeugen.

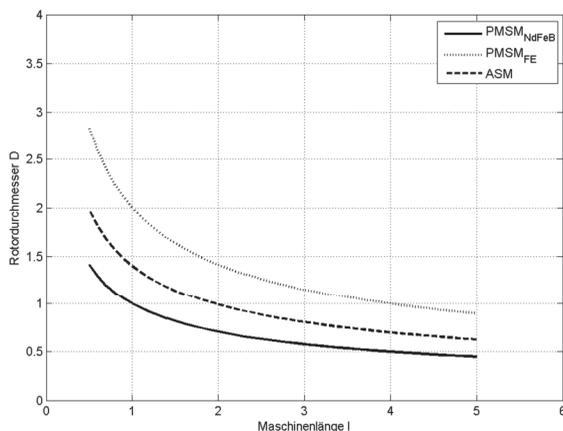


Abb. 1: Variation des Durchmessers und der Maschinenlänge für ein normiertes, konstantes Drehmoment für verschiedene Maschinenarten.

## 4 Ergebnis und Ausblick

Der bei der Elektrifizierung von mobilen Arbeitsmaschinen häufig begrenzt zur Verfügung stehende Bauraum, erfordert eine hohe Leistungsdichte des elektrischen Antriebs. Auf Basis der hier dargestellten allgemeingültigen Bewertungskriterien verschiedener Antriebsarten kann für diese Anwendung folgendes Fazit gezogen werden: Zur Reduktion der Baugröße bei gleichzeitigem Einhalten geforderter Drehmoment/Drehzahlkombination erscheinen Hochdrehzahlkonzepte als vorteilhaft. Die permanenterreichte Synchronma-

schine kann auf Grund der hohen Leistungsdichte und Wirkungsgrad als technisch beste Maschine für Traktionsantriebe genannt werden.

## Literaturverzeichnis

- [1] A. Szajek, „Motivation und Konzepte zum Einsatz elektrischer Antriebstechnik im Ackerschlepper am Beispiel MELA,“ in Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen, Karlsruhe, 2007.
- [2] M. Gallmeier und H. Auerhammer, Elektrische Antriebe in selbstfahrenden Landmaschinen, Weihenstephan:  
[http://www.tec.wzw.tum.de/fileadmin/Pressemappe/08\\_pressekonferenz\\_gallmeier.pdf](http://www.tec.wzw.tum.de/fileadmin/Pressemappe/08_pressekonferenz_gallmeier.pdf), 2008.