

KION 
G R O U P



6. Fachtagung – Hybride und energieeffiziente Antriebe

Energieeffiziente elektrisch Antriebe im Technologievergleich

Wolfgang Klüpfel– Karlsruhe, 15.02.2017

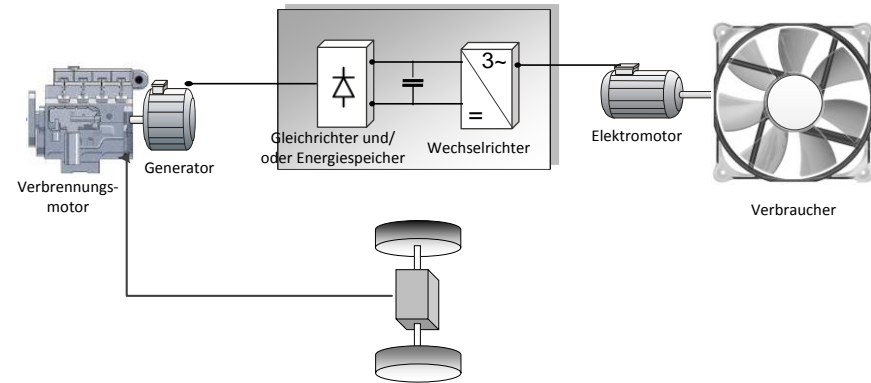
- 1. Elektrifizierung von Nebenantrieben**
- 2. Hybridisierung der mobilen Arbeitsmaschine**
 - a. Dieselelektrischer Antrieb - Serienhybrid
 - b. Parallelhybrid
- 3. Vollelektrische mobile Arbeitsmaschine**
 - a. Der Energiespeicher (Batterie)
 - b. Elektrische Maschinen im Vergleich
 - c. Betrachtung von Direktantrieben (Radnabenmotoren)

Energieeffiziente Antriebe

Elektrifizierung von Nebenantrieben

Motivation

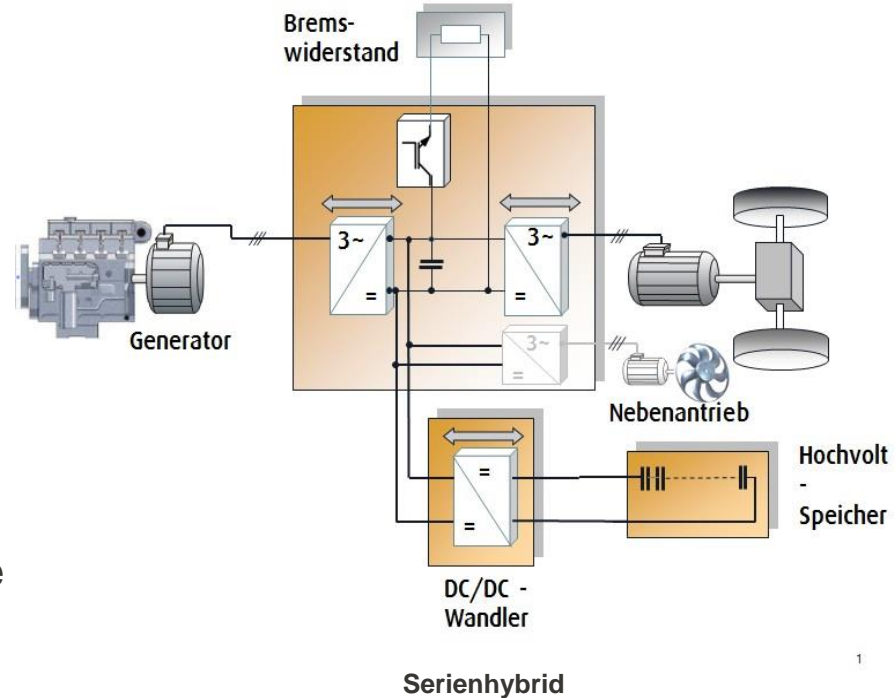
- Hauptvorteil des elektrifizierten Nebenantriebs ist die bedarfsgerechte Nutzung
- Reduzierung der Leistung des Verbrennungsmotors
- Intelligente Regelungen des Antriebsstrangs sind dabei essentiell



Elektrifizierter Nebenantrieben

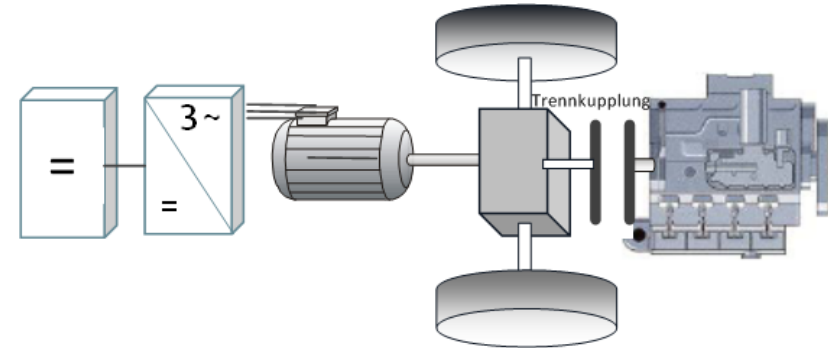
Motivation

- Hauptverbraucher in der mobilen Arbeitsmaschine ist der Fahrtrieb
- Im Serienhybrid wird der Verbrennungsmotor im optimalen Arbeitspunkt betrieben
- Je nach Energiespeicherauslegung kann die mobile Arbeitsmaschine tlw. Rein elektrisch fahren
- Zusätzlich Maßnahmen durch Energiespeicher für die Rekuperationsenergie möglich



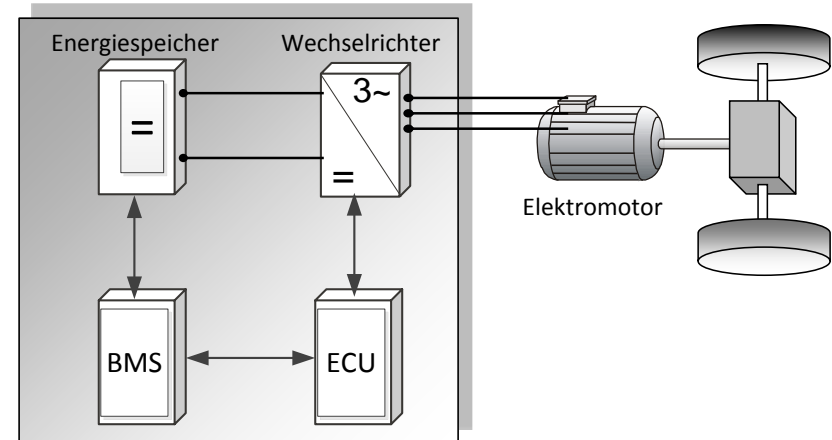
Eigenschaften

- Parallelhybrid ist mit weniger Leistung der Einzelkomponenten darstellbar, da beide Motoren zugeschaltet werden können
- Bei kleinen Leistungsbedarfen rein elektrisch
- Im Normalfall günstiger als ein Serienhybrid
- Gesamtwirkungsgrad hängt stark von der Anwendung ab



Motivation

- Ein rein elektrischer Antrieb hat den höchsten Wirkungsgrad
- Verzicht auf fossile Brennstoffe
- Der elektrische Antrieb ist im Vergleich sehr einfach aufgebaut



Vollelektrischer Antrieb

Auch der Energiespeicher trägt zum Gesamtwirkungsgrad wesentlich bei

- Die aus mobilen Arbeitsmaschinen bekannte Blei-Säure Batterie hat einen relativ schlechten Wirkungsgrad. Je nach Belastung kann nur 70 % - 80 % der Energie die man zum Laden benötigt auch wieder genutzt werden
- Lithium-Ionen Batterien haben Wirkungsgrade von 90 % - 95 %
 - Energiedichte bis zu 5x (200 Wh/kg) höher als bei Bleibatterien
 - Wesentlich höhere Belastbarkeit (Laden und Entladen)
 - Flachere Entladekennlinie – Einfluss auf Wirkungsgrad im Antriebsstrang

Folgende Technologien elektrischer Maschinen sollen betrachtet werden:

- Asynchronmotor (ASM)
- Permanenterregter Synchronmotor (PSM)
- Synchronreluktanzmaschine (SyRM)
- Permanenterregte Transversalflussmaschine (TFM)

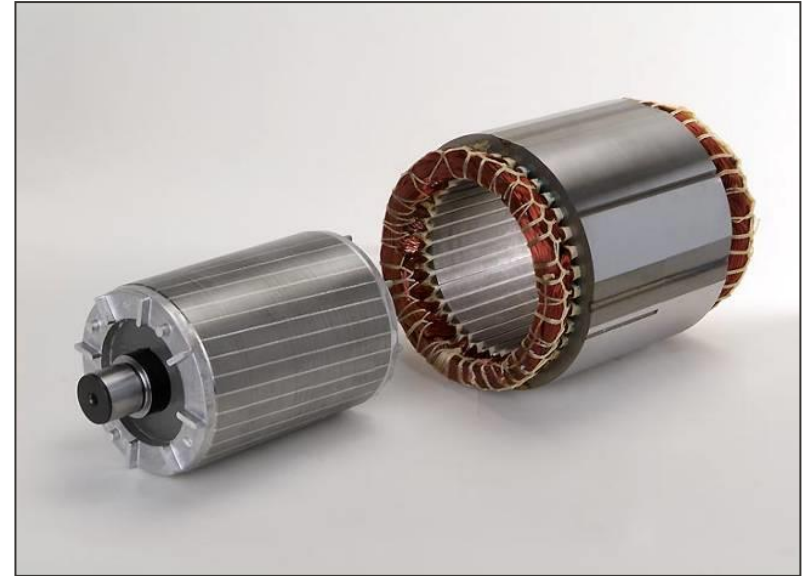
Es werden nur Motoren mit dreiphasigen Statorwicklungen betrachtet
(Standard B6 Umrichter)

Typischer Aufbau

- Einfacher Aufbau des Rotors als Käfigläufer (Kurzgeschlossene elektrisch leitende Stäbe)
- Stator mit Drehstromwicklung in der durch die Ansteuerung das magnetische Drehfeld erzeugt wird

Eigenschaften

- Sehr kostengünstig herstellbar
- Niedrige Drehmomentdichte
- Einfache Regelbarkeit
- Hohe Verluste im Rotor
- Wirkungsgrad begrenzt ($< 90\%$)



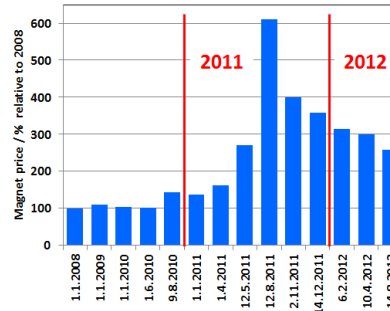
Asynchronmotor

Typischer Aufbau

- Auf dem Rotor sind Permanentmagnete aufgebracht die Selbsterregung erzeugen
- Stator mit Drehstromwicklung in der durch die Ansteuerung das magnetische Drehfeld erzeugt wird

Eigenschaften

- Durch Kosten der Permanentmagnete getrieben
- Mittlere Regelbarkeit (Lagegeber erforderlich, Feldschwächung schwierig)
- Hohe Drehmomentdichte
- Hoher Wirkungsgrad (bis zu 95 %)



Permanenterregter Synchronmotor
(Rotor)

Energieeffiziente Antriebe

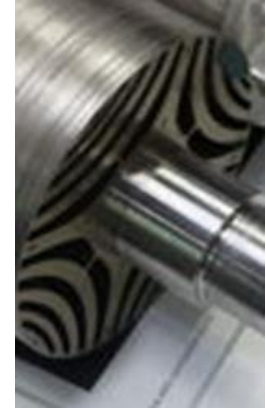
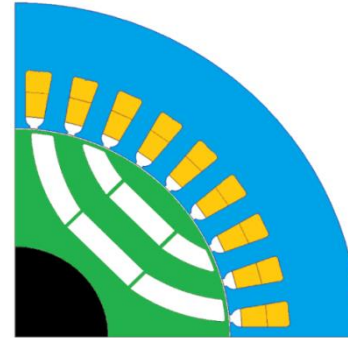
Der Synchronreluktanzmotor

Typischer Aufbau

- Der Rotor wird durch die Reluktanzkraft bewegt
- Spezieller Rotor mit abwechselnd hohem und niedrigem magnetischen Widerstand
- Weitere Verbesserung des Flusses durch „eingegrabene Magnete“ möglich
- Stator mit Drehstromwicklung

Eigenschaften

- Rotorfertigung aufwändiger als bei ASM
- Aufwändigere Leistungselektronik (Lagegeber)
- Relativ hohe Drehmomentdichte
- Hoher Wirkungsgrad (bis zu 90 %)



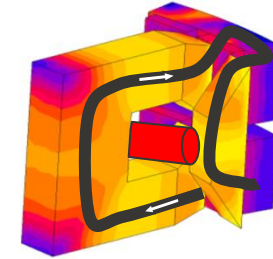
Synchronreluktanzmotor

Typischer Aufbau

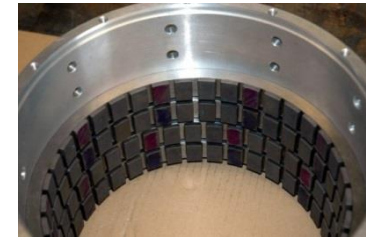
- Der magnetische Fluss verläuft transversal (senkrecht) zur Drehebene
- Stator mit einfacher Umfangswicklung, die von U-Jochen zur Flussführung umschlossen ist
- Rotor (häufig Außenläufer) mit Permanentmagneten zur Selbsterregung

Vor- und Nachteile

- Durch Kosten der Permanentmagnete getrieben
- Fertigung komplex
- Hohe Drehmomentdichte
- Hoher Wirkungsgrad (bis zu 95 %)



Stator

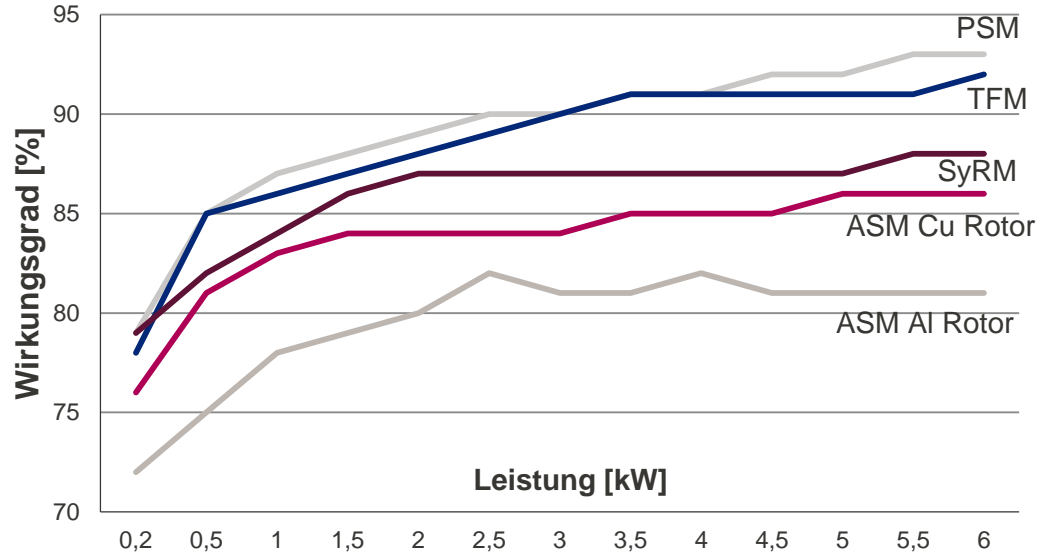


Rotor

Transversalflussmaschine

Motor	Asynchronmaschine (ASM)	Permantenerregte Synchronmaschine (PSM)	Synchron-Reluktanzmaschine (SyRM)	Transversalfeldmaschine (TFM)
Motorpreis	Niedrig (100 %)	Hoch (150 %)	Niedrig (110 %)	Hoch (150 %)
Wirkungsgrad	Niedrig	Hoch	Mittel	Mittel/ Hoch
Verhältnis Drehmoment / kg	Gering (100 %)	Hoch (130 %)	Mittel (115 %)	Hoch (130 %)
Regel-/Steuerbarkeit	Einfach	Einfach	Aufwändig	Aufwändig
Feldschwächung	Einfach	Aufwändig	Einfach	Aufwändig
Leistungsfaktor	Mittel	Hoch	Niedrig/ Mittel	Hoch
Steuerungsverfahren	Frequenzumrichter, ohne Resolver	Frequenzumrichter, ohne/mit Resolver	Frequenzumrichter, ohne/mit Resolver	Frequenzumrichter, ohne/mit Resolver
Stand der Technik	++	++	o	o

Typische Wirkungsgrade von 3-phasen Maschinen



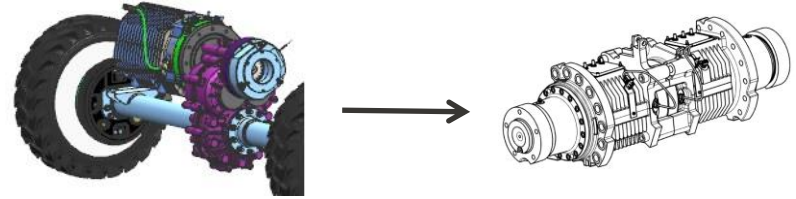
Effizienzklassen nach IEC60034-30

Leistung	5,5 kW	11 kW	18,5 kW	30 kW
IE4	90,7 %	92,3 %	93,3 %	94,1 %
IE3	88,0 %	90,1 %	91,5 %	92,6 %
IE2	85,9 %	88,4 %	89,9 %	91,1 %

Energieeffiziente Antriebe

Betrachtung des Differentials und Getriebes

Der nächste Schritt zur Optimierung des Antriebs ist der Schritt vom mechanischen zum elektrischen Differential



Durch den kompletten Verzicht auf ein Untersetzungsgetriebe würde man eine erneute Erhöhung der Gesamteffizienz erreichen

→ Direktantriebe, Radnabenmotoren als Langsamläufer (Torquemotor)

Die Auslegung als Torquemotor ist schwieriger,

Die Fertigung der Motoren aufwändiger → Hochpolig

Die Ausführung als Außenläufer ist sinnvoll → Höheres Drehmoment

Bei mobilen Arbeitsmaschinen benötigen Radnabenmotoren als Direktantriebe eine sehr geringe Drehzahl (< 500 U/min) und ein hohes Drehmoment (Drehmomentmotor)





















ASM und SyRM Motoren nur sehr bedingt geeignet

- Große Nachteile bei Größe, Gewicht und Verlustleistung (ASM)

PSM und TFM Motoren technisch gut geeignet

- Hoher Wirkungsgrad und hohe Drehmomentdichte
- Der heutige Stand der Produktionstechnik spricht ganz klar für die PSM im Vergleich zur TFM
- Lösungen mit TFM prinzipiell denkbar (Produktionskosten bislang hoch)

Eignung der gezeigten Maschinen als Direktantrieb - Radnabenmotoren

	ASM	SyRM	PSM	TFM
Gewicht / Größe (Drehmomentdichte)				
Verlustleistung				
Preis				
Produktionsaufwand				
Robustheit / Störanfälligkeit				

Momentan gibt es sehr viele Forschungen und Entwicklungen im Bereich von Reluktanzmaschinen und deren Regelung

Dabei werden im allgemeinen den synchronen Maschinen größere Erfolgsaussichten eingeräumt

- Verschiedene Verwendungen von Ferriten zur Verstärkung der magnetischen Eigenschaften und Leistungsdichte
- Sensorlose Regelungsverfahren

Mittelfristig sind kostengünstige und effiziente Reluktanzmaschinen auch als Radnabenmotoren zu erwarten

