

Methodische Auswahl des Antriebsstrangs hinsichtlich Motoren und Getriebe für ein Elektrofahrzeug

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Kevin Kuhlmann, B. A. Daniel Schaub¹⁾, Dipl.-Ing. Martin Schünemann²⁾, Dipl.-Ing. Carsten Haugwitz³⁾

¹⁾IMK, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, kuhlmann@ovgu.de, 0391/67 12054

²⁾IMS, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, martin.schuenemann@ovgu.de, 0391/67 12952

³⁾IMK, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, carsten.haugwitz@ovgu.de, 0391/67 12693

Kurzreferat

Die Preise für fossile Brennstoffe und der Druck der Politik auf die Autobauer, emissionsfreie Fahrzeuge zu bauen, steigen stetig. Vor allem in den Großstädten und deren Umfeld ist die Nutzung von Elektrofahrzeugen wesentlich effizienter, sauberer und kostengünstiger als der Einsatz von Autos mit klassischen Verbrennungsmotoren.

Um die Elektromobilität und vor allem deren Akzeptanz zu erforschen, wurde an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (OvGU) im Juli 2011 das Projekt "smarter als smart" ins Leben gerufen. In deren Folge wurde durch Mitarbeiter von fünf Lehrstühlen der Fakultät für Maschinenbau und externen Partnern ein konventioneller Smart der ersten Generation auf rein elektrischen Antrieb umgerüstet. Die Initiative zur Umsetzung entstand aus dem Bestreben, Lehre, Forschung und Praxis für die Studierenden, Lehrenden und Mitarbeiter der OvGU besser "erfahrbar" zu machen.

Bereits zu Beginn eines solchen Projektes ist die Frage des Antriebskonzepts zu klären. Auf der einen Seite stehen die Möglichkeiten, das Originalgetriebe beizubehalten, es durch ein einfaches Differenzial zu ersetzen oder einen gänzlich getriebelosen Antrieb zu realisieren. Auf der anderen Seite muss geklärt werden, mit welcher Art von Elektromotor gearbeitet werden soll. Theoretisch sind mehr als 20 verschiedene Elektromotorbauarten möglich. Jede Bauart zeichnet sich durch unterschiedliche Vor- und Nachteile aus. Zu den verbreitetsten Motoren zählen unter den Gleichstrommotoren die permanent erregte und fremderregte Gleichstrommaschine. Bei den Drehstrommaschinen sind die Synchron- oder Asynchronmotoren am häufigsten zu finden.

Um aus der Masse an Kombinationsmöglichkeiten, das für die Anwendung richtige Antriebskonzept herauszufinden, wurde methodisch entsprechend der Konstruktionslehre von Pahl/Beitz und der Bewertung nach VDI 2225 vorgegangen. Dieser Beitrag zeigt den Ablauf dieses methodischen Konzipierens von der Erstellung der Anforderungsliste bis hin zur Bewertung und der damit verbundenen Motoren- und Getriebeauswahl.

Schlüsselwörter: Elektromobilität, Antrieb, Elektromotoren, Konstruktionsmethodik, editha

1. Einleitung

Das Ziel des Projektes ist, einen Smart der ersten Generation mit Verbrennungsmotor auf rein elektrischen Antrieb umzurüsten. Der Antriebsstrang ist dabei maßgeblich für den Erfolg eines Elektrofahrzeugs verantwortlich. Von ihm hängen Fahrverhalten, Wartung, Geräuschemission, nicht zuletzt die Effizienz und damit auch die Reichweite ab. Um aus der Masse an Möglichkeiten das Optimum für die Anwendung zu finden, wird methodisch entsprechend der Konstruktionslehre von Pahl/Beitz vorgegangen.

Am Anfang steht dabei die Klärung der Aufgabenstellung. Sie dient der Informationsbeschaffung über die Anforderungen, die an das Produkt gestellt werden [1].

Im Fall eines Elektrofahrzeuges besteht die Aufgabe des Antriebs darin, die elektrische Energie unter der Berücksichtigung von verschiedenen Voraussetzungen und Ansprüchen in mechanische Energie zu wandeln und an die Räder weiterzuleiten.

Aus den fahrzeugspezifischen Gegebenheiten und Ansprüchen wie Fahrleistung und den Regeln der StVO lässt sich die Anforderungsliste erstellen. Deren Aussagen und Festlegungen sind auf das zu entwickelnde Produkt zugeschnitten und abgestimmt. Außerdem sind diese in Forderungen (F) und Wünsche (W) gegliedert [1]. Die Anforderungsliste für den Antriebsstrang von editha ist in Tabelle 1 dargestellt. Für jede Anforderung sind die Teammitglieder entsprechend ihres Fachbereichs bzw. alle Teammitglieder gemeinsam verantwortlich.

Tabelle 1: Anforderungsliste

F/W	Anforderung	Verantw.
	<u>Geometrie</u>	
F	muss in vorhandenen Bauraum passen (abhängig vom Konzept)	KK, CH
F	keine baulichen Veränderungen an Karosserie	KK, CH
W	Platz für zusätzliche Batterien	KK, MS
	<u>Kraft</u>	
W	geringes Gewicht (kompletter Antriebsstrang < 60 kg)	CH
F	Leistung > 15kW	Team
F	Drehmoment am Rad > 250 Nm	Team
W	Wirkungsgrad > 90 %	MS
W	Mind. 1000 1/min am Rad	Team
F	Mind. 850 1/min am Rad	Team
	<u>Stoff</u>	
F	resistent gegen Öl, Schmutz, Salz, Wasser	Team
	<u>Signal</u>	MS
W	leichte Steuerung	
W	Temperaturüberwachung Steuerung	
W	Anbindung an vorhandene Fahrzeugkommunikation möglich	
	<u>Fertigung</u>	KK
F	Motor (und ggf. Getriebe) Zukaufteile	
W	Verbindungen Eigenfertigung	
	<u>Montage</u>	
W	Montage mit handelsüblichen Mitteln	KK
W	von max. 2 Personen durchführbar	KK, CH
	<u>Gebrauch</u>	Team
W	Geräuschlos	
F	Geräuscharm	
F	keine Funktionseinschränkung gegenüber konventionellem Antrieb	
	<u>Wartung</u>	Team
W	Wartungsfrei	
F	wartungsarm (Intervalle > 10000 km)	
	<u>Kosten</u>	KK
F	Anschaffungskosten des kompletten Antriebsstrangs < 6000 €	
	<u>Termin</u>	KK
F	Verfügbarkeit innerhalb von 2 Wochen	
W	Verfügbarkeit innerhalb von 2 Tagen	

Aus den gesetzten Anforderungen an das Fahrzeug bzw. dem Fahrzeug selbst ergeben sich die Anforderungen für den Antrieb. So ist die Geometrie durch die spezifischen Platzverhältnisse des Fahrzeugs vorgegeben, denn zu große Komponenten passen nicht in den vorhandenen Bauraum und Anpassungen an der Karosserie sind nicht möglich. Wünschenswert ist ein Antriebsstrang, der Platz für zusätzliche Batterien schafft. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die benötigte Leistung. Sie lässt sich aus den Fahranforderungen an das Fahrzeug ermitteln. Das Fahrzeug soll mind. 85 km/h schnell fahren, was mit dem gegebenen Raddurchmesser einer Raddrehzahl von ca. 850 1/min entspricht. Für die Beschleunigung und das Anfahren am Berg muss der Antrieb mindestens 15 kW und je Rad 250 Nm Drehmoment zur Verfügung stellen. Weitere Anforderungen betreffen die Steuerung,

die Geräuschemission, die Wartung sowie den Preis und die Verfügbarkeit. Zur Realisierung einer schnellen und wirtschaftlichen Umrüstung muss der Preis für den Antriebsstrang unter 6000 € liegen und innerhalb von 2 Wochen verfügbar sein.

Dem Klären der Aufgabenstellung mithilfe der Anforderungsliste folgt das Konzipieren. Hierbei werden mit verschiedenen Lösungsfindungsmethoden mehrere Konzepte erarbeitet. Zum Beispiel lassen sich aus der Funktionsstruktur die Gesamtfunktion und Teilfunktionen ableiten [1]. Bei der Kombination Elektromotor und Antriebsstrang, wie Sie bei einem Elektrofahrzeug vorkommt, ist die Gesamtfunktion die Wandlung der elektrischen Energie in Bewegungsenergie. Der Elektromotor übernimmt dabei die Funktion der Wandlung der elektrischen Energie in mechanische Energie und der Antriebsstrang leitet diese über die Räder auf die Straße.

In der Konstruktionslehre nach Pahl/Beitz folgt der Funktionsstruktur das Suchen von Wirkprinzipien zur Erfüllung der Teilfunktionen. Anschließend werden geeignete Kombinationen ausgewählt, die gefundenen Lösungsvarianten konkretisiert und abschließend nach technischen sowie wirtschaftlichen Kriterien bewertet.

Bei der Auswahl des Antriebsstrangs hinsichtlich Elektromotor und Getriebe sind die Lösungsvarianten durch den Stand der Technik vorgegeben und werden direkt für die Bewertung übernommen. Die Charakteristiken sowie Vor- und Nachteile der Komponenten werden in den folgenden Kapiteln beschrieben. Abschließend erfolgt die Bewertung und Auswahl der Kombination.

2. Antriebsstrangtopologien

Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren besitzen fast ausnahmslos einen zentralen Antrieb. Der Antriebsstrang besteht dabei aus zentralem Motor, Getriebe, Differenzial und Antriebswellen. Bei der schrittweisen Elektrifizierung des Antriebsstrangs ergeben sich hingegen eine Vielzahl von Kombinationsmöglichkeiten und Betriebsstrategien. So eröffnet der rein elektrische Antriebsstrang durch die Möglichkeit der Verteilung der Antriebsleistung auf mehrere Motoren weitere Varianten.

Ausgehend von der konventionellen Lösung mit einem Zentralmotor, Schaltgetriebe und Differenzialgetriebe bilden der Achsantrieb direkt am Differenzial, der Einzelradantrieb mit fest übersetzendem Getriebe sowie der Einzelrad-Direktantrieb mittels kurzer Antriebswelle oder der Radnabenantrieb mögliche Konfigurationen.

Es ergeben sich gegenüber herkömmlichen Systemen vollkommen neue Möglichkeiten der Einflussnahme auf die Fahrdynamik des Fahrzeugs und der Methoden der Fahrdynamikregelung. [2, 3]

2.1 Zentralmotor mit Schaltgetriebe und Differenzial

Die bisher bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor als auch bei elektrisch angetriebenen Fahrzeugen am häufigsten verwendete Antriebsstrangvariante besteht aus einem zentral angeordneten Motor (M) mit Schaltgetriebe (G) und Differenzial (DG). Abhängig von der individuellen Auslegung werden zwei oder vier Räder angetrieben. Bei Elektrofahrzeugen ermöglicht das verbaute Schaltgetriebe, den Elektromotor in üblichen Drehzahlbereichen und mit moderaten Drehmomentanforderungen zu betreiben, es verringert aber auch spürbar den Gesamtwirkungsgrad des Antriebsstrangs. Die Leistungsdaten der Elektromotoren liegen dabei in einem Nennleistungsbereich von 20 bis 120 kW. Die Nenndrehzahlen betragen 4000 bis 16.000/min und die Nenndrehmomente 40 bis 200 Nm. Vor allem bei umgebauten Verbrennungsfahrzeugen können andere Geräuschquellen stören, da sie nicht durch die Geräusche des Verbrennungsmotors übertönt werden. Unter Umständen dominiert das Schaltgetriebe die Geräuschkulisse. Besonders bei Verwendungen von Getrieben, die nicht speziell auf einen Elektromotor abgestimmt sind, wird dies bei höheren Geschwindigkeiten deutlich [2, 3]. Tabelle 2 zeigt die Anordnung des zentralen Motors mit Schaltgetriebe und Differenzial sowie die Vor- und Nachteile dieses Antriebskonzepts.

Tabelle 2: Zentralmotor mit Schaltgetriebe und Differenzial

	Vorteile:	Nachteile:
	Einfache Umrüstung	Keine Innovation
	Standardmotoren	Verluste durch G und DG
		Gewicht von G und DG

2.2 Zentralmotor mit Differenzial

Baut man den Antriebsstrang ohne Schaltgetriebe, treibt der Elektromotor mit fester Übersetzung direkt das Differenzial an. Dabei nutzt man drehmomentstarke Elektromaschinen, welche für die notwendige Beschleunigung sorgen. Durch die direkte Kopplung läuft der Elektromotor allerdings bei hohen Geschwindigkeiten mit sehr hohen Drehzahlen. Dies führt je nach Motorenbauart zu höheren Verlusten und zu negativen akustischen Einflüssen. Als Verlustbringer auf den Gesamtwirkungsgrad bleibt das Differenzial zur konventionellen Drehmomentverteilung erhalten. Der Leistungsbereich der verwendeten Elektromotoren liegt zwischen 30 und 120 kW, wobei Drehzahl und Drehmoment zwischen 4000 und 12.000 1/min bzw. 90 und 300 Nm liegen [2, 3]. Tabelle 3 stellt auf der linken Seite die Anordnung der Komponenten des Antriebsstrangs dar. Auf der rechten Seite der Tabelle 3 sind die Vor- und Nachteile aufgeführt.

Tabelle 3: Zentralmotor mit Differenzial

	Vorteile:	Nachteile:
	Einfache Steuerung	Fertigung des DG
	Standardmotoren	Effizienzverlust durch DG
	Bauraum- und Gewichtseinsparung durch Wegfall des Automatikgetriebes	

2.3 Radnah (kurze Welle)

Die Antriebsstrang-Topologie mit kurzer, starrer Welle ist ein möglicher Entwicklungsschritt zum radindividuellen Antrieb und erlaubt eine flexible, elektronisch gesteuerte Drehmomentverteilung. Dabei werden die Vorder- und/oder Hinterräder getrennt voneinander von jeweils zwei Elektromotoren angetrieben. Ein weiterer Vorteil aus Sicht der Effizienz liegt hierbei in dem sehr hohen Wirkungsgrad des optional zu verwendenden einstufigen Getriebes gegenüber eines Schaltgetriebes bzw. Differenzials. Drehmoment- und Drehzahlanforderungen sind mit dem Zentralmotor mit Differenzial vergleichbar, die Leistung wird dabei auf die zwei Elektromotoren aufgeteilt. Das Splitten von Elektromaschine und Getriebe ermöglicht eine höhere Flexibilität bei der Anordnung ($0^\circ/90^\circ$). Dies führt jedoch zu höheren Kosten, mehr Gewicht und größerem Bauraumbedarf [2,3]. Tabelle 4 zeigt den Aufbau sowie die Vor- und Nachteile dieser Antriebsstrangvariante.


Tabelle 4: Zwei Motoren, einstufige Getriebe, kurze Welle (Radnah)

	Vorteile:	Nachteile:
	Effizienz (kein PG)	Ungefederte Masse
	Bauraum- und Gewichtseinsparung durch Wegfall des Automatikgetriebes	Ggf. einstufiges Getriebe notwendig
	Standardmotoren	Fertigung Antriebswelle

2.4 Radnabe

Eine weitere Variante ist die Verwendung von Radnabenmotoren als Direktantrieb. Diese sorgen für die Bereitstellung der benötigten Fahrleistung ohne weitere mechanische Übertragungselemente direkt am Rad. Die direkte Kopplung bedeutet, dass eher niedrigdrehende Elektromotoren mit hohem Drehmoment zur Anwendung kommen, da die Motordrehzahl der Raddrehzahl entspricht. Die Leistungsdaten von Radnabenmotoren, die für den Einsatz im Pkw angeboten werden, liegen zumeist im Bereich von 15 bis 60 kW bei einer Drehzahl bis 2000/min und einem Drehmoment bis zu 600 Nm. Die schnelle radindividuelle Steuerung des Drehmoments und damit eine gezielte und effiziente Beeinflussung der Fahrdynamik des Fahrzeugs gehen auf die hohe Dynamik der Elektromotoren zurück. Durch die Integration des Elektromotors in das Rad und den damit verbundenen Wegfall der Getriebe und Antriebswellen bleibt viel Bauraum für zusätzliche Komponenten. Bei der Fahrdynamik ist die Zunahme der ungefederten Massen zu beachten [2, 3]. In Tabelle 5 ist der Radnabenantrieb mit seinen charakteristischen Vor- und Nachteilen dargestellt.

Tabelle 5: Radnabenmotoren

	Vorteile:	Nachteile:
	Effizient (kein Getriebe, DG)	Ungefederte Masse
	Bauraum- und Gewichtseinsparung durch Wegfall des Automatikgetriebe	Keine Erfahrung (Prototypen)
		Hoher Preis (Sonderanfertigung)

3. Elektromotoren

Als Energiewandler ist der Elektromotor die zentrale Komponente eines elektrischen Antriebes. Im Motorbetrieb setzt er die zugeführte elektrische Energie in mechanische Energie um. Im Generatorbetrieb (z. B. bei Bremsvorgängen) kehrt sich der Energiefluss um. Dieser als Rekuperation bezeichnete Vorgang wandelt mechanische Energie in elektrische Energie um, die in die Batterie zurückgeführt wird. Die so „zurückgewonnene“ Energie trägt zur Vergrößerung der Reichweite bei.

Der Elektromotor ist ein äußerst vielfältiger Energiewandler, der für fast jede Anforderung die entsprechend angepasste Variante bereithält [4]. Die Abbildung 1 dient zur Gliederung der gebräuchlichsten Motoren. Die für das Projekt relevanten Motoren werden nachfolgend genauer beschrieben.

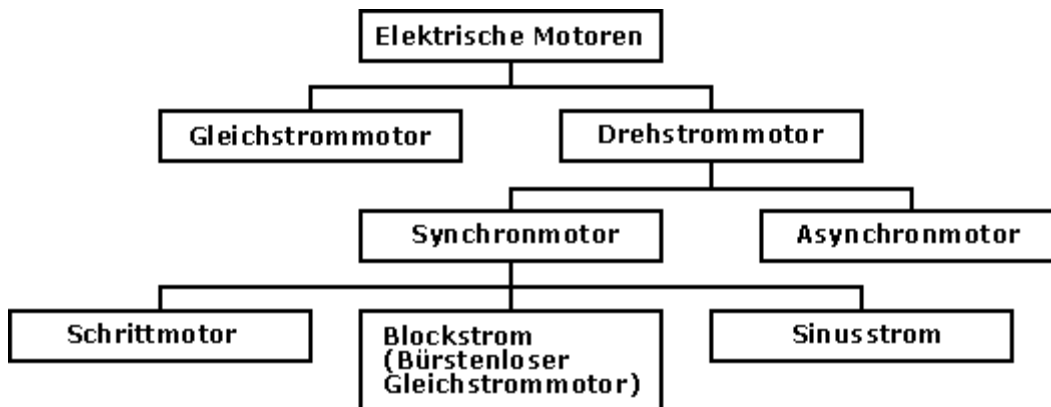


Abbildung 1: Übersicht Elektromotoren [4]

3.1 Gleichstrommotoren

Gleichstrommotoren zeichnen sich durch eine hohe Dynamik und relativ leichte Regelbarkeit aus. Sie werden mit einer Gleichspannung betrieben, deren Betrag und Polarität zum Zweck der Drehzahl- bzw. Drehrichtungsbeeinflussung verändert wird. Über Bürsten wird die elektrische Energie auf den konstruktionsbedingten Kommutator und von dort in die Rotorwicklung übertragen. Durch den direkten Kontakt der Bürsten mit dem Kollektor verschleiben diese und müssen regelmäßig ersetzt werden. Diese fehlende Wartungsfreiheit und dadurch auch eingeschränkte Robustheit bilden den größten Nachteil des Gleichstrommotors [3, 4]. In Tabelle 6 sind die Pros und Kontras des Gleichstrommotors aufgeführt.

Tabelle 6: Gleichstrommotoren

Vorteile:	Nachteile:
lineares Übertragungsverhalten	verschleißbehaftet aufgrund Kommutator, Bürsten
sehr einfache Ansteuerung, Drehzahleinstellung	vergleichsweise geringe Leistungsdichte
hohe Überlastfähigkeit	Verluste (thermisch) entstehen im Rotor und sind deshalb schwer abzuführen
	Magnetmaterial (Seltene Erden) sehr teuer
	maximale Drehzahl durch Kommutator begrenzt

3.2 Drehstrommotoren

Das grundlegende Prinzip aller Drehstrommotoren ist das rotierende elektromagnetische Feld. Es entsteht entweder direkt aus einer mehrphasigen Drehstromversorgung oder wird durch Hilfskondensatoren erzeugt, wenn z. B. eine 2-phasige Versorgung anliegt [4]. Wie bereits in Abbildung 1 gezeigt, lassen sich die Drehstrommotoren weiter unterteilen. Aufbau und Charakteristika werden nachfolgend erläutert.

Synchronmotoren

Synchronmotoren verfügen konstruktionsbedingt über einen Rotor mit magnetischen Vorzugsrichtungen. Diese werden bei permanent erregten Motoren durch Permanentmagnete erzeugt, die auf dem Rotor aufgebracht sind, bei fremd bzw. elektrisch erregten Motoren durch eine stromdurchflossene Erregerwicklung hervorgerufen oder bei Reluktanzmotoren durch einen ungleichmäßigen Luftspalt (Nutzung der Oberfläche) erreicht. Die Konstruktion des Rotors legt die magnetischen Vorzugsrichtungen fest. Entsprechend kann bei diesem Bautyp der Rotor anhand des magnetischen Feldes vom Stator ausgerichtet werden und diesem synchron folgen. Die Winkelgeschwindigkeit des Statorfeldes und die Winkelgeschwindigkeit des Rotors sind immer gleich, also synchron, woraus sich der Name Synchronmotor ableitet. Bei Belastung der Maschine stellt sich allerdings abhängig vom Drehmoment eine Phasenverschiebung zwischen Statorfeld und Rotor ein, der als Polradwinkel bezeichnet wird und die maximale Leistung der Maschine bestimmt.

Die Drehzahländerung erfolgt über die Veränderung der Frequenz der speisenden Spannung. Durch die Frequenzänderung ändert sich die Winkelgeschwindigkeit des Statorfeldes und damit auch die Winkelgeschwindigkeit des Rotorfeldes. Diese Änderung erfolgt synchron, daher auch der Name des Motors [4]. Tabelle 7 stellt die Vorteile und Nachteile dar.

Tabelle 7: Synchronmotoren

Vorteile:	Nachteile:
sehr hohe Leistungsdichte	aufwendige Drehzahlsteuerung (Frequenz, Spannung)
sehr gute Rundlaufgüte bei geringer Drehzahl	Gefahr der Entmagnetisierung bei Überlastung
hohe Dynamik durch Permanentmagnete	Winkellagemesssystem notwendig
hohes Moment vom Stillstand an	Magnetmaterial (seltene Erden) sehr teuer
Wartungsfrei	

Bürstenloser Gleichstrommotor (BLDC-Motor)

Im Gegensatz zum Gleichstrommotor erfolgt beim bürstenlosen Gleichstrommotor die Umkehr der Stromrichtung (Kommutierung) in den einzelnen Wicklungen nicht mehr durch einen mechanischen Kommutator mit verschleißenden Bürsten, sondern elektronisch. BLDC-Motoren sind somit annähernd wartungsfrei. Der bürstenlose Gleichstrommotor und der Synchronmotor sind konstruktiv und steuerungstechnisch sehr ähnlich. Im Gegensatz zur sinusförmigen Ansteuerung der Synchronmaschine, werden die Phasen des BLDC-Motors mit rechteckförmiger Spannung angesteuert. Hierdurch können sowohl die Rotorlagesensoren als auch die Stellglieder für BLDC-Motoren einfacher und kostengünstiger realisiert werden. Gleichzeitig entsteht jedoch bei geringen Drehzahlen eine erhöhte Drehmomentwelligkeit [4]. Die Vor- und Nachteile des bürstenlosen Gleichstrommotors sind in Tabelle 8 gegenübergestellt.

Tabelle 8: Bürstenloser Gleichstrommotor

Vorteile:	Nachteile:
lineares Übertragungsverhalten	Momentenwelligkeiten (ruckeln beim Anfahren)
sehr einfache Ansteuerung, Drehzahleinstellung	vergleichsweise geringe Leistungsdichte
einfache Messung der Rotorlage für Einstellung der blockförmigen Spannung möglich	Magnetmaterial (seltene Erden) sehr teuer
gute Wärmeabführung über Oberfläche des Motors	
Wartungsfrei	

Asynchronmotoren

Zu den am weitesten verbreiteten Motortypen zählt der Asynchronmotor mit Kurzschlussläufer. Der Aufbau ist simpel, robust und der Motor ist annähernd wartungsfrei. Er kann ohne ein zusätzliches Steuergerät direkt am

Drehstrom- oder Wechselstromnetz betrieben werden. Diese Eigenschaften sorgen für die hohe Verbreitung in allen Bereichen der Industrie, des Verkehrswesens, aber auch im Konsumgüterbereich.

Wird der Rotor dem magnetischen Feld des Stators ausgesetzt, induzieren die kurzgeschlossenen Leiter des Rotors eine Spannung, die wiederum einen Stromfluss bewirkt. Die Folge des Stromflusses ist der Aufbau eines magnetischen Feldes im Rotor. Das Magnetfeld des Rotors tritt dann in Wechselwirkung mit dem Drehfeld des Stators. Die dabei auftretenden Kräfte bewirken eine Drehbewegung des Rotors.

Damit die Drehbewegung anhält, muss zwischen dem Feld des Stators und dem Feld des Rotors eine Relativbewegung stattfinden. Im Gegensatz zum Synchronmotor verhalten sie sich zueinander asynchron - daher der Name Asynchronmotor. Der Asynchronmotor erzeugt dementsprechend nur Drehmoment, wenn sich die Drehzahl von der synchronen Drehzahl unterscheidet. Diese üblicherweise als Schlupf bezeichnete Abweichung verhält sich abhängig vom Drehmoment bzw. der Belastung der Maschine.

Die Drehzahl wird wie bei Synchronmotoren über eine Veränderung der Frequenz der speisenden Spannung geregelt. Der Einsatz der Motoren für dynamische Anwendungen erfordert jedoch aufwendige Regelverfahren [3, 4]. Die folgende Tabelle 8 stellt die Vor- und Nachteile von Asynchronmotoren gegenüber.

Tabelle 8: Asynchronmotor

Vorteile:	Nachteile:
sehr robust (kurzzeitige Überlastung)	geringere Dynamik als Synchron
keine Entmagnetisierungsgefahr	höhere Verlustleistung im Rotor wegen Felderzeugung
großer Drehzahlstellbereich durch Feldschwächung	geringer Wirkungsgrad
einfacher Aufbau (keine seltenen Erden)	komplexe Steuerung
Wartungsfrei	

4. Bewertung und Auswahl

Bei der Auswahl einer Antriebsstrangkombination für ein Elektroauto ist die Auswahl des Elektromotors abhängig von der Antriebsstrangtopologie, denn nicht jede Kombination passt zueinander. So sind z.B. Asynchronmotoren aufgrund ihrer relativ geringen Leistungsdichte nicht für einen Radnabenantrieb geeignet.

Basierend auf den Vor- und Nachteilen der Antriebsstrangtopologien sowie der Elektromotorbauarten wurden durch die Teammitglieder Bewertungen für beide Teilfunktionen/Komponenten nach VDI 2225 durchgeführt. Die Bewertung erfolgt dabei von 0 bis 4 Punkten, 0 Punkte sind für ungenügende bzw. nicht mögliche Lösungen zu vergeben, 4 Punkte erhält eine ideale/optimale Lösung. Die Bewertungskriterien orientieren sich an der Anforderungsliste [1]. Da die Ergebnisse der Varianten nach einer ersten Bewertungsrunde teilweise sehr dicht beieinander lagen, wurden die Kriterien in einem zweiten Iterationsschritt entsprechend ihrer Bedeutung für das Projekt gewichtet. Tabelle 9 stellt das Ergebnis der Bewertung für die Antriebsstrangtopologie dar.

Tabelle 9: Bewertung Antriebsstrangtopologie

Bewertung Antriebsstrangtopologie		Zentralmotor, G, DG		Zentralmotor, DG		2 Motoren, G, Radnah		2 Motoren, Radnabe	
Kriterium	Gewichtung [%]	Wert	Gew. Wert	Wert	Gew. Wert	Wert	Gew. Wert	Wert	Gew. Wert
Kosten u. Verfügbarkeit	30	4	1,2	2	0,6	3	0,9	1	0,3
Innovation	20	1	0,2	2	0,4	4	0,8	3	0,6
Bauraum u. Gewicht	30	1	0,3	2	0,6	3	0,9	4	1,2
Wirkungsgrad	20	2	0,4	2	0,4	3	0,6	4	0,8
Summe	100	8	2,1	8	2	13	3,2	12	2,9
Wertigkeit [%]		50	52,5	50	50	81,2	80	75	72,5

Bei der Auswahl der Antriebsstrangtopologie kommt es vor allem auf die Kosten, die Verfügbarkeit sowie auf den genutzten Bauraum und das Gewicht der Komponenten an. Der Radnabenantrieb erhält zwar bei den 3 technischen Kriterien (Innovation, Bauraum und Gewicht, Wirkungsgrad) 11 von 12 möglichen Punkten, hat aber aufgrund ihrer speziellen Konstruktion den Nachteil der schweren bzw. nur sehr teuren Beschaffung. Bei anderen Varianten besteht hingegen die Möglichkeit schnell verfügbare Standardmotoren und -getriebe einzusetzen. Als beste Variante geht mit einer Wertigkeit von 81,2 % (80 % mit Gewichtung) die Antriebsstrangtopologie mit zwei radnah verbauten Motoren hervor. Die Variante besticht durch die gute

Verfügbarkeit, aufgrund der Nutzung von Standardkomponenten und den hohen Innovationsgrad. Da auf Schaltgetriebe und Differenzial verzichtet wird, ist der Wirkungsgrad hoch, das Gewicht und der benötigte Bauraum klein.

Auf der Grundlage der gewählten Antriebsstrangtopologie erfolgt anschließend die Bewertung der Elektromotoren, welche in Tabelle 10 aufgeführt ist.

Tabelle 10: Bewertung Elektromotoren

Bewertung Elektromotoren		Gleichstrommotor		Synchronmotor		Asynchronmotor		Bürstenloser Gleichstrommotor	
		Wert	Gew. Wert	Wert	Gew. Wert	Wert	Gew. Wert	Wert	Gew. Wert
Kriterium	Gewichtung [%]								
Kosten u. Verfügbarkeit	25	3	0,75	2	0,5	3	0,75	2	0,5
Steuerung u. Rundlauf	15	3	0,45	3	0,45	3	0,45	2	0,3
Haltbarkeit u. Wartung	25	1	0,25	3	0,75	3	0,75	3	0,75
Wirkungsgrad	15	3	0,45	3	0,45	2	0,3	2	0,3
Leistungsgewicht	20	3	0,6	3	0,6	1	0,2	2	0,4
Summe	100	13	2,5	14	2,75	12	2,45	11	2,25
Wertigkeit [%]		65	62,5	70	68,75	60	61,25	55	56,25

Bei einem Elektromotor kommt es technisch gesehen vor allem auf die Haltbarkeit und das Leistungsgewicht an. Dem folgen der Wirkungsgrad sowie Steuerung und Rundlauf. Wirtschaftlich gesehen kommt es, wie bei der Antriebsstrangtopologie, ausschließlich auf die Verfügbarkeit und die Kosten an.

Bezogen auf das Projekt mit der spezifischen Anforderungsliste und den daraus abgeleiteten Bewertungskriterien geht der Synchronmotor als bester Elektromotor hervor. Er überzeugt mit durchweg guten Eigenschaften bei den technischen Bewertungskriterien. Die Recherche ergab verschiedene Firmen, die kundenspezifische Elektromotoren liefern, jedoch betragen die Lieferzeit bis zu 12 Wochen und die Kosten bis zu 25000 € je Motor. Da die Umrüstung des Fahrzeugs in kürzerer Zeit und zu geringeren Kosten, vor allem in Hinblick auf eine mögliche Serienproduktion, durchgeführt werden soll, ist dieser Motor nicht optimal. Als zweiter Sieger geht der Gleichstrommotor aus der Bewertung hervor. In den Punkten Steuerung und Rundlauf, Wirkungsgrad sowie Leistungsgewicht liegt er mit dem Synchronmotor gleich auf. Sein Nachteil sind die verschleißenden Bürsten und der damit verbundene Wartungsaufwand. Die Marktrecherche liefert mehrere Anbieter von Gleichstrommotoren. Die Motoren sind Serienmotoren, d. h. sie sind schnell und zu moderaten Preisen verfügbar, außerdem versprechen die Hersteller eine lange Standzeit der Bürsten. Auf dem dritten Platz folgt der Asynchronmotor, der jedoch für die gewählte Antriebsstrangtopologie aufgrund seiner geringen Leistungsdichte zu schwer ist. Ein Antriebsstrang mit zwei radnah verbauten Asynchronmotoren würde weit über 60 kg wiegen und damit die Anforderung an das Gewicht nicht einhalten. Aufgrund der Ausschlusskriterien Gewicht und Kosten/Verfügbarkeit scheiden Synchron- sowie Asynchronmotor aus. Damit fällt die Entscheidung auf den Gleichstrommotor.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die Integration elektrischer Maschinen in den Antriebsstrang von Hybrid- und Elektrofahrzeugen eröffnet verschiedene Gestaltungsmöglichkeiten. Häufig wird zunächst auf die etablierte Fahrzeugplattform mit konventioneller Antriebsstrangtopologie, bestehend aus einem Zentralmotor, Schaltgetriebe und Differenzialgetriebe, zurückgegriffen. Die spezifischen Eigenschaften der elektrischen Maschine erlauben aber viele neue Gestaltungsmöglichkeiten des Antriebsstrangs. In diesem Beitrag wurden diese vorgestellt, projektbezogen bewertet und ausgewählt.

Bei der Bewertung der Antriebsstrangtopologie ist der Radnabenantrieb technisch als beste Variante hervorgegangen. Er überzeugt vor allem durch die optimale Nutzung des Bauraumes (Integration in die Felge) und die hohe Effizienz. Da Radnabenmotoren aber nicht bzw. nur zu Preisen von über 25000 € je Stück verfügbar sind, gewinnt letztendlich die Variante mit zwei radnah verbauten Motoren. Hierbei kann konstruktionsbedingt auf schnell verfügbare und kostengünstige Standardkomponenten zurückgegriffen werden. So wird sich für den Antrieb von editha für diese Antriebsstrangtopologie entschieden.

Bei der Auswahl des Elektromotors fällt die Entscheidung nicht auf den Synchronmotor, obwohl dieser als die beste Variante aus der Bewertung hervorging. Aufgrund der schlechten Verfügbarkeit bzw. dem hohen Preis dieser Motoren in der angestrebten Leistungsklasse fällt die Wahl auf den Gleichstrommotor. Er überzeugt durch

seinen günstigen Preis bei hoher Verfügbarkeit, der einfachen Steuerung sowie dem guten Leistungsgewicht. Als negativ erweisen sich die bauartbedingt verschleißenden Bürsten. Weder in der Literatur noch bei den Herstellern von Gleichstrommotoren lassen sich Angaben über die Haltbarkeit der Bürsten beim Einsatz der Maschinen in Elektrofahrzeugen finden, sodass es diese zu erforschen gilt.

Es bleibt ein erhebliches Verbesserungspotential bei der Wahl der Antriebsmaschinen. Sowohl bei der Antriebsstrangtopologie als auch bei den Motoren konnte aufgrund der mangelnden Verfügbarkeit bzw. Umsetzbarkeit nicht die technisch beste Variante der Bewertung gewählt werden. Vor allem die Realisierung eines quasi wartungsfreien Antriebes wird zukünftig angestrebt. Wenn sich die Preise und die Verfügbarkeit der besten Varianten geändert haben, sollte die Bewertung und Auswahl erneut durchgeführt werden. Bis dahin wird editha mit ihrem zwischenzeitlich realisierten Antriebsstrang (siehe Abbildung 2) erprobt.

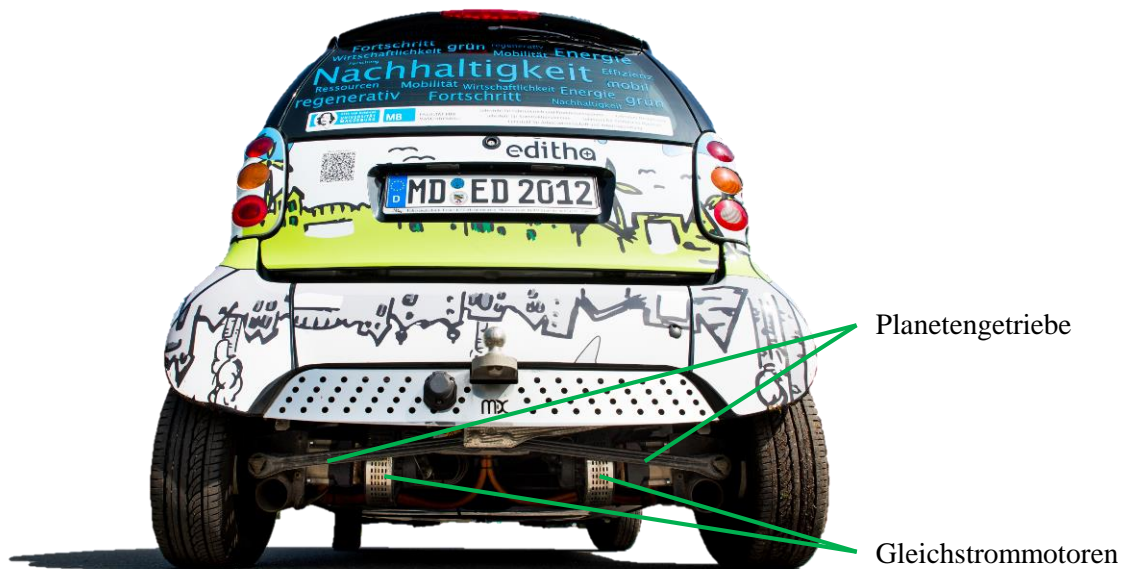


Abbildung 2: editha mit realisiertem elektrischem Antrieb

Literaturverzeichnis

- [1] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K-H.: Konstruktionslehre - Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung - Methoden und Anwendung, 7. Aufl., Springer, 2007
- [2] Kasper, R.; Schünemann, M.: Elektrische Fahrtriebe- Topologien und Wirkungsgrad, MTZ Ausgabe 10/2012, Springer Automotive Media Wiesbaden GmbH, 2012
- [3] Pautzke, F.: Radnabenantriebe, Shaker Verlag Aachen, 2010
- [4] http://www.schrittmotoren.de/fachwissen/motoren/f_beitr_00_300.htm, Zugriff: 10.07.13