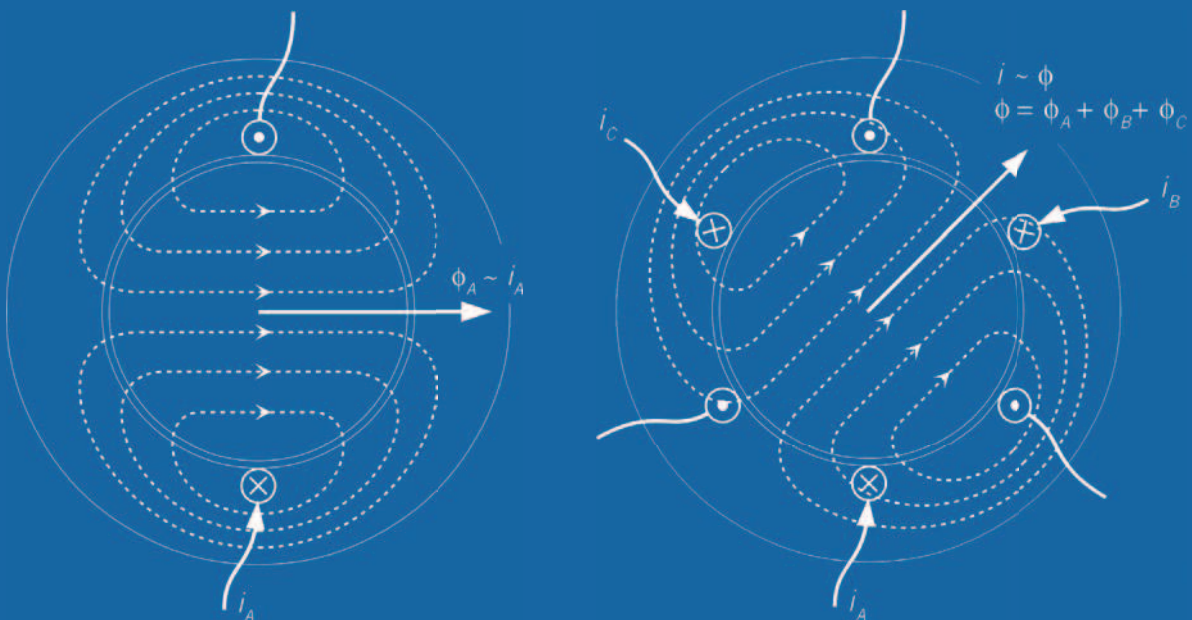


2.1 Elektrotechnische Grundlagen

2.2 Elektrische Maschinen

2.3 Elektrische Fahrtriebe

2.4 Potentiale elektrischer Einzelradantriebe



2.1 Elektrotechnische Grundlagen

Der Fahrtrieb im Elektro- oder Hybridfahrzeug wird ganz oder teilweise elektrisch realisiert, das heißt mit einer oder mit mehreren elektrischen Maschinen im Antriebsstrang. Die hierfür erforderliche elektrische Energie wird von einem Generator, angetrieben von einem Verbrennungsmotor oder – bei der Bremsenergieerückgewinnung – von den Antriebsrädern, oder aus dem stationären Stromnetz über ein Ladegerät zur Verfügung gestellt. Die Speicherung der Energie erfolgt in einem Akkumulator, meist als Batterie bezeichnet, oder in einem geeigneten Kondensator (Doppelschichtkondensator, auch Supercap genannt). Die Umformung von Gleich- in Wechselstrom oder umgekehrt sowie die Regelung der Leistungsflüsse übernimmt eine Leistungselektronik. In diesem Kapitel werden die elektrotechnischen Grundlagen elektrischer Maschinen und Antriebe sowie der für Antriebe und Ladegeräte erforderlichen Leistungselektronik im Bordnetz skizziert.

2.1.1 Definitionen, Grundfunktionen

Der elektrische Antrieb hat – unabhängig von der genauen Konfiguration des Antriebsstrangs, wie sie in dieser Reihe bereits behandelt wurde – die Aufgabe, das zum Fahren oder auch Bremsen erforderliche Drehmoment über den im Betrieb auftretenden Drehzahlbereich zu erzeugen. Dies übernehmen elektrische Maschinen. Ihre Funktionsweise – welche sich gravierend von derjenigen eines Verbrennungsmotors unterscheidet – wird in Abschnitt 2.1.2 skizziert [2.3, 2.4]. Elektrische Maschinen können auch generatorisch arbeiten, das heißt sie können mechanisch über die Welle zugeführte Energie

in elektrische Energie umwandeln. Daher kommen sie nicht nur im Fahrtrieb, sondern auch in hybridisierten Antrieben, in denen sie durch einen Verbrennungsmotor angetrieben werden, zum Einsatz.

Die elektrischen Maschinen werden am Bordnetz drehzahlvariabel mithilfe einer Leistungselektronik betrieben. Sie wirkt als Stellglied für die Umsetzung des Fahrerwunschs unter Berücksichtigung der Antriebsregelung. Abschnitt 2.1.2 beschreibt die Grundfunktionen solcher leistungselektronischen Antriebumrichter [2.5, 2.6].

Die Leistung der elektrischen Fahrtriebe überschreitet mit einer Größenordnung von zumindest einigen 10 kW die bisher im konventionellen elektrischen Bordnetz umgesetzte Leistung deutlich. Daher befasst sich Abschnitt 2.1.3 mit der Erweiterung des Bordnetzes. In der Regel muss ein sogenanntes Hochspannungsbordnetz implementiert werden. Der Begriff der Hochspannung wurde geprägt, weil die konventionelle Spannungsebene von 12 V/14 V im Bordnetz deutlich überschritten wird. Er ist jedoch nicht mit dem gleichlautenden Begriff aus der Energieübertragung im elektrischen Netz zu verwechseln, wie er beispielsweise bei einer sogenannten Hochspannungsleitung verwendet wird.

Abschließend widmet sich Abschnitt 2.1.4 leistungselektronischen Stromversorgungen, die den 12-V-Generator ersetzen können, sowie Ladegeräten. Mit ihnen kann die Batterie im Hochspannungsbordnetz wiederum mithilfe von Leistungselektronik aus dem Energieversorgungsnetz geladen werden.

2.1.2 Elektrische Antriebe

Die grundsätzliche Funktionsweise elektrischer Maschinen wird im Folgenden am Beispiel rotierender Drehstrommaschinen erläutert, wie sie im Fahrzeug fast ausschließlich zum Einsatz kommen. Der

Läufer einer solchen Maschine erfährt eine magnetische Kraftwirkung und kann hierdurch in Drehung versetzt werden.

Den zugrundeliegenden physikalischen Zusammenhang [2.1, 2.2] illustriert (**Bild 2-1**): Einen vom Strom i durchflossenen Leiter (blau durchgezogen) umgibt ein Magnetfeld der Feldstärke H – im einfachsten Falle bei kreisförmigen Feldlinien (grau gestrichelt) mit dem Radius r :

$$H = \frac{i}{2\pi r} \quad (2.1)$$

Hieraus ergibt sich die magnetische Flussdichte nach der Magnetisierungskennlinie $B(H)$ beziehungsweise bei linearer Approximation

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (2.2)$$

mit der Permeabilitätskonstanten des Vakuums $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}$ und der relativen Permeabilität μ_r als Materialkonstante, zum Beispiel $\mu_r = 1$ für Luft und $\mu_r \gg 1$ für ferromagnetische Stoffe wie Eisen.

Die Idee ist nun, eine Kraftwirkung auf einen Läufer zu erzeugen beziehungsweise diesen in Rotation zu versetzen. Dazu wird elektrisch ein rotierendes Drehfeld erzeugt, das den Läufer gewissermaßen „mitnimmt“. Wie dies prinzipiell umgesetzt wird, zeigt **Bild 2-2**. Man erkennt in der schematischen Darstellung den Ständer (Stator) einer Drehstrommaschine (blau), welcher aus Eisen mit entsprechend hoher relativer Permeabilität gefertigt wird. Er enthält drei um jeweils 120° gegeneinander gedrehte Polpaare. Diese tragen jeweils eine Wicklung, wie sie exemplarisch nur beim senkrecht stehenden Polpaar eingezeichnet ist (grau). Fließt nun ein Strom i_{L1} durch diese Wicklung, so erzeugt dieser entsprechend der Darstellung in Bild 2-1 ein Magnetfeld H, B , wie es in Bild 2-2 eingezeichnet ist. Im Bereich des Läufers ist es nach oben gerichtet (grauer gestrichelter Pfeil); die Feldlinien schließen sich außen

im Eisenkreis des Ständers. Polt man den Strom i um, so kehrt sich auch die Richtung des Magnetfeldes H, B um. Man kann also – wie in **Bild 2-3** mit den senkrechten Pfeilen dargestellt – durch geeignete Bestromung der gezeigten Wicklung ein nach oben oder nach unten gerichtetes Magnetfeld erzeugen. Gleiches gilt für die auf die beiden anderen Polpaare aufgebrauchten Wicklungen. Bei Bestromung können somit jeweils einer Wicklung insgesamt die sechs in Bild 2-3 eingezeichneten Richtungen des Magnetfelds eingeprägt werden. Eine solche Maschine könnte also prinzipiell so betrieben werden, dass diese sechs Magnetfelder sequentiell nacheinander angelegt werden und sich ein Drehfeld ergibt. In diesem Magnetfeld würde sich ein permanentmagnetischer Läufer, welcher in der Mitte des Ständers drehbar gelagert ist, ausrichten und damit entsprechend der Umlaufgeschwindigkeit

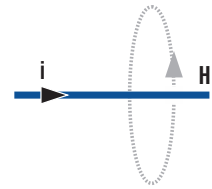


Bild 2-1
Magnetfeld H eines von einem Strom i durchflossenen Leiters

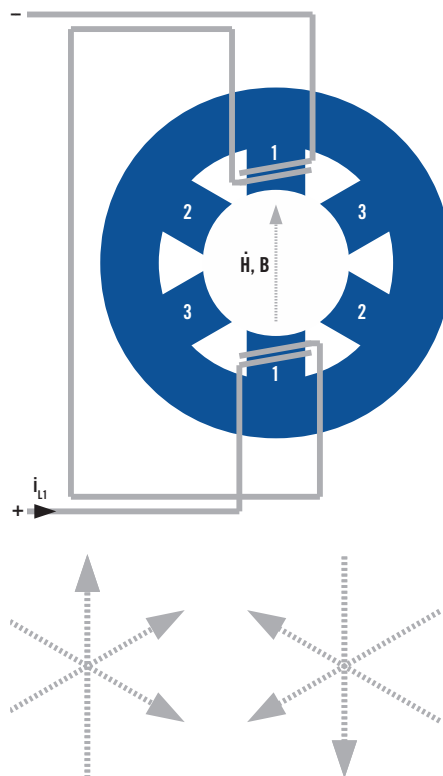


Bild 2-2
Schematische Darstellung des Ständers einer Drehstrommaschine mit einem Polpaar für jede der drei Phasen (1-1, 2-2, 3-3) sowie einer von drei stromdurchflossenen Wicklungen i_{L1} und dem von dieser erzeugten Magnetfeld im Bereich des Läufers H, B

Bild 2-3
Richtungen der von den drei Ständerwicklungen einer Drehstrommaschine zu erzeugenden Magnetfelder

des Magnetfelds drehen. Dies ist das Funktionsprinzip einer Drehstrom-Synchronmaschine.

Ein solchermaßen stufig umgeschaltetes Drehfeld würde naturgemäß bei jedem Umschaltvorgang zu einer Drehmomentänderung und damit zu einem Ruck führen. Ein runder Lauf der elektrischen Maschine lässt sich durch Überlagerung der Magnetfelder der drei Wicklungen erreichen, wenn man sie vektoriell addiert. Wenn mehrere Wicklungen in geeigneter Weise bestromt werden, wird anstelle des springenden ein rund umlaufendes Drehfeld eingestellt. Es lässt sich zeigen, dass dies bei um $120^\circ = 2\pi/3$ versetzten, sinusförmigen Phasenströmen der Fall ist:

$$\begin{aligned} i_{L1} &= \hat{I}_L \sin(\omega t + \varphi) \\ i_{L2} &= \hat{I}_L \sin(\omega t + \varphi - 2\pi/3) \\ i_{L3} &= \hat{I}_L \sin(\omega t + \varphi - 4\pi/3) \end{aligned} \quad (2.3)$$

Aus diesem Funktionsprinzip elektrischer Maschinen ergeben sich einige für den Einsatz im Fahrzeug relevante und vorteilhafte Unterschiede zum Verbrennungsmotor. Elektrische Maschinen können in vier Quadranten betrieben werden, das heißt bei positivem und negativem Drehmoment und positiver oder negativer Drehzahl. Um in der beschriebenen Weise ein Drehmoment auf den Läufer zu erzeugen, bedarf es keiner Drehung der Maschine. Das heißt, dass elektrische Maschinen ab dem Stillstand volles Drehmoment abgeben können, was für die Fahrdynamik bei Beschleunigungsvorgängen von Vorteil ist. Darüber hinaus bedarf es keiner trennbaren Kupplung zwischen elektrischer Maschine und Antriebsrädern. Für die Energieeffizienz elektrischer Fahrzeugantriebe besonders im Stadtverkehr ist von großer Bedeutung, dass die Maschine generatorisch betrieben werden kann, sodass beim Bremsen elektrische Energie ins Bordnetz zurückgespeist wird. Es ist auch unerheblich, in welcher Richtung

das Drehfeld erzeugt wird. Daher kann grundsätzlich auf ein Getriebe verzichtet werden. Dies ist beispielsweise bei Radnabenmotoren der Fall. Hier ergeben sich für Maschinen mit einer Polpaarzahl von 1, Bild 2-3, Speisefrequenzen $\omega/2\pi$ bis zu einigen 10 Hz im Fahr- beziehungsweise Bremsbetrieb. Zur Anpassung von Drehzahl und Drehmoment genügt andernfalls ein Getriebe mit festem Übersetzungsverhältnis – ein elektrischer Antriebsstrang bedarf keiner Gangwechsel und auch keiner getriebeseitigen Drehrichtungsumkehr über einen Rückwärtsgang. Nicht zuletzt sei erwähnt, dass die elektrischen Zeitkonstanten für die Änderung der momentenbildenden Ströme typischerweise im Millisekundenbereich liegen. Dies eröffnet neue Möglichkeiten für die Regelung der Fahrdynamik. Bei Verzicht auf eine Dämpfung im Steuergerät kann es allerdings auch zu unerwünschten ruckartigen Beschleunigungsänderungen kommen. Dies gilt speziell für Fahrer, die an verbrennungsmotorisches Fahren gewöhnt sind.

Wie oben erläutert, müssen die Wicklungen der Drehstrommaschine bestromt werden. In Bild 2-2 könnte $i_{L1} > 0$ durch Anlegen einer Spannung in der mit Plus und Minus angegebenen Polarität getrieben werden. Die umgekehrte Polarität des Stroms ließe sich wiederum durch Anlegen einer Spannung umgekehrter Polarität einprägen. Im Bordnetz steht hierfür eine meist von einer Batterie gepufferte Gleichspannung zur Verfügung. Es bedarf also prinzipiell einer Vorrichtung, die die Anschlüsse der Wicklungen der Maschine wahlweise mit dem positiven oder dem negativen Potenzial des Bordnetzes verbindet. Dies ist die Aufgabe der Leistungselektronik. Als elektronische Schalter kommen Leistungshalbleiter-Bauelemente, das heißt Transistoren und Dioden, zum Einsatz. Durch geeignete Ansteuerung werden die Ströme so moduliert, dass das in Gl. (2.3) angegebene dreiphasige Sinusystem entsteht.

Aus schaltungstechnischer Sicht übernimmt die Leistungselektronik damit hier die Funktion eines Wechselrichters – aus einer Gleichspannung erzeugt sie ein Wechsel- beziehungsweise Drehspannungssystem. Regelungstechnisch lässt sich die Leistungselektronik als Stellglied interpretieren: Über das Gas- oder Bremspedal teilt der Fahrer der Antriebsregelung seinen Drehmomentwunsch mit. Die Regelung kann unter Berücksichtigung des Arbeitspunkts der Maschine die Parameter \hat{I}_L und ω sowie φ des von der Leistungselektronik zu erzeugenden Drehstromsystems ermitteln. An der Schnittstelle zwischen dem Steuergerät der Antriebsregelung und dem elektrischen Leistungskreis prägt die Leistungselektronik als Stellglied dann dieses Drehstromsystem ein. In der elektrischen Maschine wird es in ein entsprechendes Drehmoment gewandelt.

2.1.3 Hochspannungsbordnetz

Während im konventionellen Bordnetz zwar stetig steigende, aber dennoch bisher in der Größenordnung von höchstens wenigen kW liegende Leistungen umgesetzt werden, geht die Elektrifizierung des Antriebsstrangs mit deutlich höheren Leistungen einher. Die Auswirkungen sollen am einfachen Beispiel eines Kupferkabels erläutert werden: Nimmt man zunächst an, dass ein elektrischer Antrieb von 20 kW Leistung am konventionellen 12-V-Bordnetz betrieben werden sollte, so ergäbe sich ein Strom von:

$$I = \frac{P}{U} = \frac{20 \text{ kW}}{12 \text{ V}} \approx 1667 \text{ A} \quad (2.4)$$

In einem $l = 1 \text{ m}$ langen Kupferkabel mit einem recht großen Querschnitt von $A = 50 \text{ mm}^2$ würde bei diesem Strom eine Verlustleistung von 1 kW entstehen (Gl. (2.5)). Eine solche Lösung wäre offensichtlich äußerst ineffizient und angesichts

$$\begin{aligned} P &= I^2 \frac{\rho l}{A} \\ &= (1667 \text{ A})^2 \frac{0,0178 \text{ } \Omega \text{ mm}^2 / \text{m} \cdot 1 \text{ m}}{50 \text{ mm}^2} \quad (2.5) \\ &\approx 1 \text{ kW} \end{aligned}$$

hoher Kosten, hohen Gewichts sowie Volumens und des geringen Wirkungsgrads letztlich nicht praktikabel.

Erhöht man die Spannung auf 400 V und reduziert gleichzeitig den Kabelquerschnitt auf nur noch 6 mm^2 , so verringert sich die Verlustleistung im Kabel auf 7,5 W. Dies illustriert, dass wegen der von den elektrischen Antrieben umgesetzten Leistung in Elektro- und Hybridfahrzeugen ein Bordnetz mit höherer Spannungsebene erforderlich ist. Bei der Definition dieser Spannungsebene ist auch die Auslegung der Batterie zu berücksichtigen. In der Regel wirkt sie als Energiespeicher puffernd und wird als Reihenschaltung einzelner Zellen mit jeweils niedriger Nennspannung in der Größenordnung weniger V ausgeführt.

Um den Berührungsschutz im Hochspannungsbordnetz zu gewährleisten, wird es entkoppelt vom 12-V/14-V-Bordnetz ausgeführt. Durch die Verwendung von Hin- und Rückleitern ist es auch isoliert von der Karosserie, welche beim konventionellen Bordnetz als Rückleiter auf negativem Potenzial dient. Im konventionellen Kraftfahrzeug treten, außer in der Zündanlage und beim Zünden eventueller Entladungslampen der Scheinwerfer, in der Regel keine hohen elektrischen Spannungen auf. Daher muss Werkstattpersonal, das an Elektro- und Hybridfahrzeugen arbeitet, entsprechend zusätzlich qualifiziert und zur Arbeitssicherheit – insbesondere hinsichtlich Maßnahmen zur Vermeidung von Elektrounfällen – geschult werden. Auch die Gestaltung elektrischer Betriebsmittel für das Hochspannungsbordnetz trägt Sicherheitsaspekten Rechnung. So ist beispielsweise zur Vermeidung von Lichtbögen sicherzustellen, dass Steckverbinder nur

im stromlosen Zustand getrennt werden können.

Das bewährte 12-V/14-V-Bordnetz wird weiterhin Verbraucher kleinerer Leistung wie Beleuchtung oder Unterhaltungselektronik versorgen; das Hochspannungsbordnetz ergänzt es mithin, ersetzt es aber nicht. Die benötigte Leistung bezieht das 12-V/14-V-Bordnetz in Elektrofahrzeugen aus dem Hochspannungsbordnetz. Auch bei Hybridfahrzeugen, die über einen Verbrennungsmotor verfügen, bietet sich eine solche Systemarchitektur an. Sie erlaubt es, den 12-V/14-V-Generator einzusparen. Stattdessen wird eine leistungselektronische Stromversorgung implementiert, welche die dann häufig deutlich kleinere 12-V/14-V-Batterie aus dem Hochspannungsbordnetz lädt.

2.1.4 Stromversorgungen, Ladegeräte

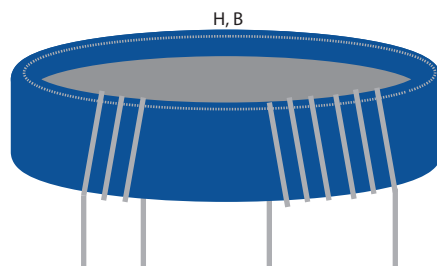
Eine als Gleichspannungswandler ausgeführte Stromversorgung zur Energieübertragung zwischen dem Hochspannungsbordnetz und dem 12-V/14-V-Bordnetz muss deren bereits in Abschnitt 2.1.3 erwähnte galvanische Trennung sicherstellen. Die Kopplung erfolgt daher nicht über eine direkte elektrische Verbindung, sondern magnetisch über einen Transformator, **Bild 2-4**. Wie bereits bei der Erläuterung von Bild 2-1 ausgeführt, erzeugt Stromfluss in einer der beiden in Bild 2-4 gezeigten Wicklungen (links und rechts, grau durchgezogen) ein Magnetfeld H , B (grau gestrichelt) im Kern (blau) hoher relativer Permeabilität $\mu_r \gg 1$. Ändert sich das eine

Wicklung durchdringende Magnetfeld, so wird dort eine Spannung induziert. Man kann also die Primärwicklung eines Transformators mit einem Wechselstrom speisen und damit an der nicht elektrisch verbundenen Sekundärwicklung eine Spannung erzeugen. Diese wiederum führt bei Anschluss einer Last zu sekundärseitigem Stromfluss. Die Speisung der Primärwicklung des Transformators mit einem Wechselstrom erfolgt beim betrachteten Gleichspannungswandler zwischen den Bordnetzen in gleicher Weise wie in Abschnitt 2.1.2 zur Speisung der Maschine ausgeführt: Leistungselektronische Schalter, also Transistoren oder Dioden, verbinden die beiden Anschlüsse der Primärwicklung abwechselnd mit dem Plus- und Minuspol des Hochspannungsbordnetzes. An den Klemmen der Sekundärwicklung liegt dann eine galvanisch getrennte, rechteckförmige Wechselspannung an, deren Amplitude proportional zur Spannung des Hochspannungsbordnetzes sowie zum Verhältnis der Windungszahlen von Sekundär- und Primärwicklung ist. Der in Bild 2-4 schematisch dargestellte Transformator weist beispielhaft ein Verhältnis der Windungszahlen von sechs (rechts) zu drei (links) auf. Die sekundärseitige Wechselspannung wird im einfachsten Falle über Dioden wieder gleichgerichtet, sodass sie einen Ladestrom ins 12-V/14-V-Bordnetz treibt und damit die dortige Batterie lädt beziehungsweise die Verbraucher versorgt.

Bei Verwendung geeigneter Kernmaterialien können solchermaßen leistungselektronisch gespeiste Transformatoren in Stromversorgungen mit Frequenzen in der Größenordnung von mehreren 10 kHz betrieben werden. Das erlaubt eine sehr kompakte Ausführung, wie sie im Kraftfahrzeug erforderlich ist.

Mit einer ähnlichen leistungselektronischen Schaltung wie beim Antriebsumrichter kann also auch ein Gleichspannungswandler zur Leistungsübertragung vom Hochspannungsnetz ins 12-V/14-V-Bordnetz realisiert werden. Gleiches gilt für das in Elektro- und Plug-in-Hyb-

Bild 2-4
Schematische Darstellung eines Transformators mit zwei Wicklungen unterschiedlicher Windungszahl (rechts sechs, links drei) und des diese koppelnden Magnetfelds H , B im Kern



ridfahrzeuge in der Regel aus Gründen der Autonomie mitgeführte Ladegerät: Es kann in gleicher Weise wie oben erläutert als Stromversorgung aufgebaut werden, die aus der gleichgerichteten Netzspannung die Hochspannungsbatterie lädt.

2.1.5 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurden die elektrotechnischen Grundlagen der Funktionsweise von Drehstrommaschinen skizziert. Auch die resultierenden, für den Einsatz im Antriebsstrang eines Elektro- oder Hybridfahrzeugs wesentlichen Eigenschaften, welche sich in vielerlei Hinsicht als vorteilhaft erweisen, wurden aufgezeigt. Darüber hinaus wurde die Notwendigkeit illustriert, in Elektro- und Hybridfahrzeugen mit höherer elektrischer Antriebsleistung zusätzlich zum 12-V/14-V-Bordnetz ein Hochspannungsbordnetz einzuführen. Anstelle des Generators für das 12-V/14-V-Bordnetz sowie als Ladegerät für die Batterie im Hochspannungsbordnetz für den elektrischen Antrieb bedarf es entsprechender Stromversorgungen. Ihre elektrotechnischen Grundlagen wurden ebenfalls erläutert. Sowohl bei diesen Stromversorgungen als auch bei den Antriebswechselrichtern, die den drehzahlvariablen Betrieb der elektrischen Maschinen ermöglichen, handelt es sich um leistungselektronische Stellglieder. Ihre grundsätzliche Funktionsweise, die sich in den verschiedenen Anwendungen ähnelt, wurde ebenfalls umrissen.

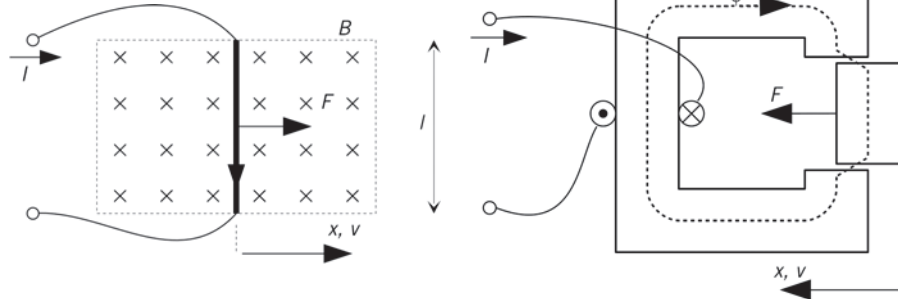
2.2 Elektrische Maschinen

Eine wesentliche Antriebskomponente von Elektro- oder Hybridfahrzeugen ist die elektrische Maschine, die den Verbrennungsmotor beim reinen Elektrofahrzeug ersetzt oder – im Fall eines Hybridfahrzeugs – unterstützt. Elektrische Maschinen wandeln elektrische Energie in mechanische um und umgekehrt, das heißt die Energie-flussrichtung ist umkehrbar. Abhängig von dieser Energieflussrichtung werden sie als Motor oder Generator bezeichnet oder besser als elektrische Maschine im Motor- oder Generatorbetrieb. Dies ist eine wichtige Eigenschaft für Elektroantriebe in Fahrzeugen, da über die gleiche Maschine, die für den Antrieb benutzt wird, Bremsenergie zurückgewonnen werden kann.

2.2.1 Grundlagen der elektrischen Energiewandlung

Die Kraft beziehungsweise das Drehmoment kann in elektrischen Maschinen durch zwei unterschiedliche Prinzipien entstehen: Zum einen durch die Lorentzkraft und zum anderen durch die Reluktanzkraft. Bei der Lorentzkraft handelt es sich um die Wechselwirkung zwischen einem stromdurchflossenen Leiter und einem magnetischen Feld. Dieser Effekt wird in **Bild 2-5** (links) an der elementaren elektrischen Maschine erläutert. Ein Leiter mit der Länge l hat einen translatorischen Freiheitsgrad in Richtung x und wird von einem Strom I durchflossen. Der Leiter steht unter einem homogenen magnetischen Feld mit der Flussdichte B , die sich senkrecht zur Abbildungsebene ausrichtet. Ein in **Bild 2-5** senkrechter Fluss oder Strom wird mit einem Kreuz dargestellt, wenn er in die Bildebene eindringt und mit einem Punkt, wenn er aus der

Bild 2-5
Elementare elektrische Maschine basierend auf: Lorentzkraft (links), Reluktanzkraft (rechts)



Bildebene herauskommt. Die Wechselwirkung zwischen Strom und Fluss bewirkt dann eine Kraft:

$$F = l \cdot B \cdot I \quad (2.6)$$

Befindet sich der Leiter in Bewegung, induziert er eine Spannung e , abhängig von der Geschwindigkeit v , die als elektromotorische Kraft (EMK) bezeichnet wird:

$$e = l \cdot B \cdot v \quad (2.7)$$

Die mechanische Leistung aus der Kraft und der Geschwindigkeit ergibt sich dann zu:

$$P = F \cdot v = I \cdot e \quad (2.8)$$

So wird die Umwandlung der mechanischen Leistung (linke Seite von Gl. (2.8)) in elektrische Leistung (rechte Seite von Gl. (2.8)) oder umgekehrt deutlich. Natürlich sind in der Energiewandlung auch die Leistungsverluste zu berücksichtigen. Auf der elektrischen Seite entstehen aufgrund von Stromwärmeverluste in den Leitern und wegen des Wirbelstroms und der Ummagnetisierung Verluste im magnetischen Kern. Auf der mechanischen Seite entstehen Verluste aufgrund der Reibung.

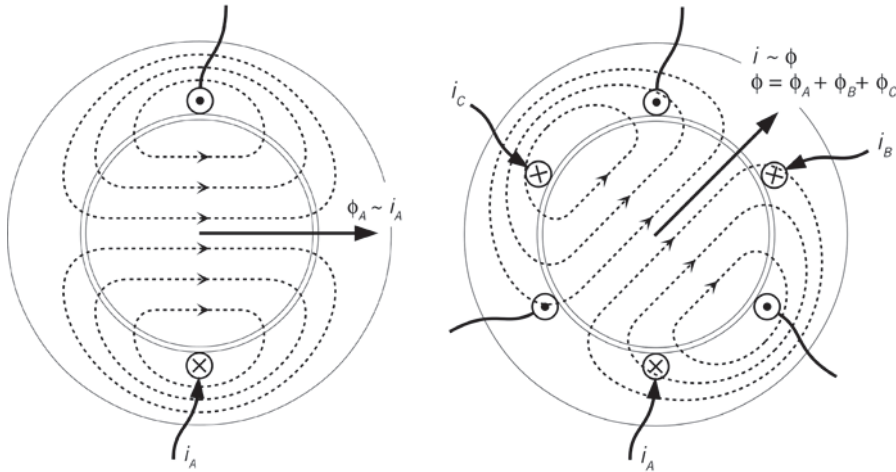
Die Reluktanzkraft entsteht durch eine Änderung des magnetischen Widerstands

(Reluktanz) in einem magnetischen Kreis. Eine elementare Maschine, basierend auf der Reluktanzkraft, wird in Bild 2-5 (rechts) gezeigt. Der magnetische Kreis besteht aus einem stationären und einem beweglichen Kernteil, beide aus einem ferromagnetischen Material (zum Beispiel Eisen). Aufgrund der hohen Permeabilität der ferromagnetischen Materialien kann folgendes angenommen werden:

- ♦ Der Fluss Φ wird grundsätzlich auf den Bereich innerhalb des Kerns und des Luftspalts zwischen den Kernteilen eingeschränkt.
- ♦ Die Reluktanz ist vernachlässigbar im Kern und entsteht hauptsächlich im Luftspalt.

Die Reluktanz hängt dann vom Querschnitt des Luftspalts ab, das heißt von der gemeinsamen Fläche der gegenüberstehenden Teile. Wenn sich der bewegliche Teil vom stationären versetzt (nach rechts in Bild 2-5 (rechts)) steigt die Reluktanz, da die gemeinsame Fläche abnimmt. Ist der magnetische Kreis von einem Fluss Φ durchdrungen, so entsteht auf den beweglichen Teil eine Kraft, die versucht, diesen in eine Lage mit niedrigerer Reluktanz zu bewegen (nach links in Bild 2-5 (rechts)). Die niedrigste Reluktanz wird erreicht, wenn der bewegliche Kernteil auf den stationären ausgerichtet ist, das heißt keinen Versatz zu diesem in x -Richtung hat.

Die Reluktanzkraft für die Maschine in Bild 2-5 (rechts) beträgt:

**Bild 2-6**

Ständer einer Drehstrommaschine: Feldlinien der Phase A (links), Feldlinien resultierend aus den Beiträgen aller drei Phasen (rechts)

$$F = I^2 \cdot \frac{\mu_0 \cdot h}{2 \cdot d} \quad (2.9)$$

Darin ist μ_0 die Permeabilität der Luft, h die Tiefe der Kernteile und d der Luftspalt.

In der Vergangenheit wurden fast ausschließlich Gleichstrommaschinen für drehzahlvariable Elektroantriebe eingesetzt (zum Beispiel Straßenbahnen), da diese sehr einfach zu steuern sind. Allerdings zeichnen sie sich, im Vergleich mit den Drehstrommaschinen, durch eine aufwendige Konstruktion aus. Die notwendigen Schleifkontakte unterliegen Verschleiß, sind störanfällig und erfordern Wartung. Mit dem verstärkten Einsatz von Leistungselektronik und Mikroprozessoren seit den 1980er-Jahren sind auch Drehstrommaschinen gut regelbar.

Die Drehstrommaschinen zeichnen sich nicht nur durch ihre einfache Konstruktion, einen fast wartungsfreien Betrieb und hohe Zuverlässigkeit aus, sondern auch durch höhere Leistungsdichte und Wirkungsgrade im Vergleich zu Gleichstrommaschinen. Daher sind heutzutage für Elektroantriebe in Pkw ausschließlich Drehstrommaschinen im Einsatz.

2.2.2 Elektrische Maschinen für Elektro- und Hybridfahrzeuge

Rotierende Maschinen bestehen aus einem Ständer (stationärer Teil) und einem Läufer (rotierender Teil), häufig auch als Stator und Rotor bezeichnet. Durch den Läufer wird die mechanische Leistung übertragen. Moderne elektrische Maschinen werden in der Regel so konzipiert, dass die elektrische Leistung nur in den Ständer eingespeist wird und somit Schleifkontakte zur Übertragung des Stroms zum Läufer vermieden werden.

Die Funktionsweise der rotierenden elektrischen Maschine wird in **Bild 2-6** an einer schematischen Konfiguration erläutert. Dabei handelt es sich um einen äußeren, hohlzylindrischen Ständer und einen inneren, zylindrischen Läufer. Ausgehend von der Wirkungsweise können die Maschinen für Elektroantriebe in Fahrzeugen eingeordnet werden, **Tabelle 2-1**.

Obwohl alle Motorvarianten in Prototypen von Elektro- und Hybrid-Pkw zu finden sind [2.7], wurden in der Praxis bisher nur Asynchronmaschinen (zum Beispiel BMW Mini, Reva, Tata, Think) und permanenterregte Synchronmaschinen (zum Beispiel Smart E und Hybridfahrzeuge von Toyota, Honda und Daimler) eingesetzt [2.8].

Tabelle 2-1
Einordnung von
Maschinen für
Elektroantriebe in
Fahrzeugen

Wirkungsweise	Typ	Prinzip
Asynchronmaschine		Lorentzkraft
Synchronmaschine	Permanenterregt	Lorentzkraft
	Reluktanz	Reluktanzkraft
	Hybrid (permanenterregt mit Schenkelpole)	Beide

In rotierenden Maschinen werden der Drehstrom und das resultierende Drehfeld genutzt. Für die Analyse der Maschine betrachten wir zuerst nur den Ständer, der sowohl in Asynchron- als auch in Synchronmaschinen gleich ist. Der Ständer besteht in der einfachsten Dreiphasenausführung aus drei Wicklungen, die 120° zueinander versetzt sind und im ferromagnetischen Kern des Ständers eingebaut werden, wie Bild 2-6 (rechts) zeigt. Der Läufer wird zunächst als ein voller Eisenzylinder betrachtet. Jede Wicklung trägt zum magnetischen Feld in die entsprechende Richtung bei. In Bild 2-6 (links) werden die Feldlinien dargestellt, die aus der Wicklung der Phase A entstehen, wobei die Flussdichte proportional zum Strom ist und ihre Richtung 0° entspricht (abhängig von der Ausrichtung der Wicklung). Der Fluss sowie der Strom können als Raumzeiger mit Richtung der Flusslinien und mit dem Betrag des Flusses beziehungsweise des Stroms dargestellt werden.

In gleicher Form wie in der Phase A entstehen aus den Wicklungen der Phasen B und C Flusskomponenten, aber mit den Richtungen 120° beziehungsweise 240° . Der Gesamtfluss besteht aus den Beiträgen jeder Spule und wird durch die Vektoraddition der drei Raumzeiger dargestellt, Bild 2-6 (rechts). Der Strom, der den Fluss verursacht, wird ebenso mit einem Raumzeiger gleicher Richtung dargestellt.

In Bild 2-7 (oben) wird der zeitliche Verlauf eines symmetrischen Drehstroms dargestellt. Wird damit der Ständer gespeist, kann daraus für jeden Zeitpunkt der Fluss- oder Stromraumzeiger berechnet

werden, wie Bild 2-7 (unten) zeigt. Im Zeitpunkt t_0 sind die Momentanwerte der Ströme $i_A = 1$ A, $i_B = -0,5$ A, und $i_C = -0,5$ A. Daraus ergibt sich ein Raumzeiger mit einem Winkel von 0° . Folgt man den Zeitpunkten t_0, t_1, t_2, t_3 , so ist zu erkennen, dass der zeitliche Verlauf einem drehenden Raumzeiger entspricht, mit einer Drehzahl gleich der Kreisfrequenz des Ständerstroms.

Die Konstruktion des Läufers hängt vom Motortyp ab. So besteht der Läufer im Fall einer permanenterrregten Synchronmaschine zum Beispiel aus einem Zylinder, bestückt mit Magneten auf der Oberfläche, Bild 2-8 (links). Die Magnete erzeugen ein Magnetfeld, das auf den Läufer ausgerichtet ist, das heißt der Fluss hat den gleichen Winkel wie der Läufer. Da die Permeabilität der Magneten sehr niedrig ist, ist die Reluktanz im magnetischen Kreis des Ständers entsprechend hoch. Deshalb verursacht der Statorstrom nur einen sehr niedrigen Fluss. So ist das gesamte Magnetfeld fast ausschließlich vom Magneten des Läufers abhängig.

Nun soll der Läufer im Zusammenhang mit dem Ständer betrachtet werden. In Bild 2-8 (rechts) sind der Raumzeiger des Gesamtflusses Φ und der des Ständerstroms i dargestellt. Aus der Wechselwirkung zwischen dem Fluss Φ und der zum Fluss normalen Stromkomponente i_q (Querkomponente), entsteht eine tangentiale Kraft beziehungsweise ein Drehmoment:

$$M_{MS} = \frac{3}{2} \cdot C_{MS} \cdot |\Phi| \cdot i_q \quad (2.10)$$

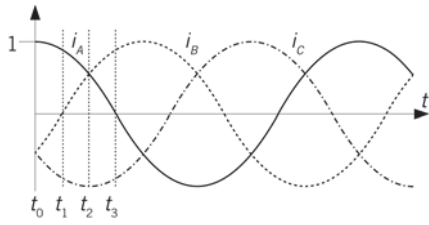
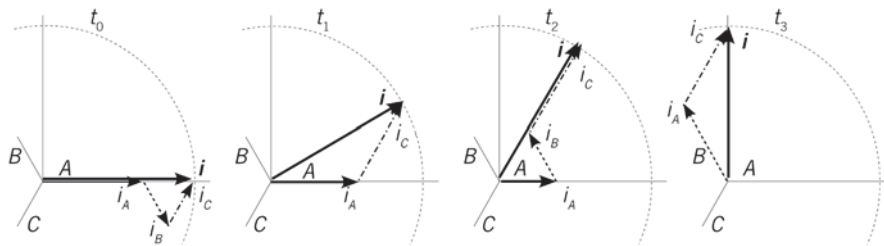


Bild 2-7
Symmetrischer Drehstrom: zeitlicher Verlauf (oben), Raumzeiger (unten)



Darin ist C_{MS} eine Konstante, die von der Konstruktion abhängig ist. Die Längskomponente hat keine Wirkung. Sobald sich der Läufer dreht, induziert sich in den Ständerspulen eine Spannung e , die von der Drehzahl des Läufers abhängig ist. Sie wird auch als ein zum Fluss senkrecht stehender Raumzeiger dargestellt und hat den Betrag:

$$e = C_{MS} \cdot |\Phi| \cdot \omega_M \quad (2.11)$$

Im Fall der Asynchronmaschine besteht der Läufer aus einem ferromagnetischen Zylinder mit längs ausgerichteten Stäben am Außendurchmesser aus

elektrisch leitendem Material, **Bild 2-9** (links). Die Stäbe sind an den Enden mit einem leitenden Ring verbunden. Da die Anordnung der Stäbe und der Endringe einem zylindrischen Käfig ähneln, wird diese Art von Läufer auch als Käfigläufer bezeichnet.

Angenommen wird zunächst ein magnetisches Feld Φ , das sich mit einer Drehzahl ω_1 dreht, **Bild 2-9** (rechts). Wenn die Drehzahl des Läufers ω_M niedriger als ω_1 ist, „schneidet“ der Fluss die Stäbe des Käfigläufers und induziert eine Spannung. Da die Stäbe über dem Ring kurzgeschlossen sind, entsteht der Strom i_R . Der Raumzeiger des im Rotor induzierten Stroms ist zum Fluss

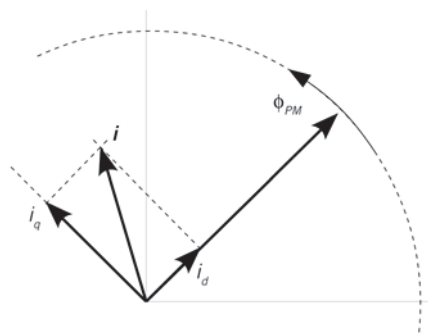
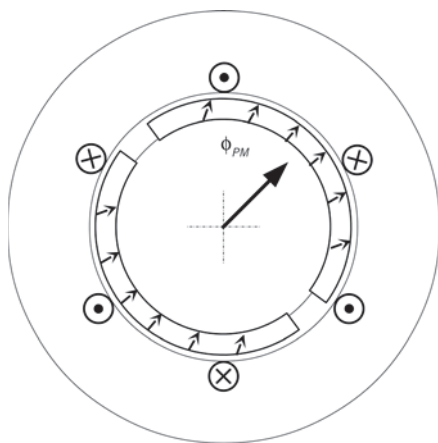
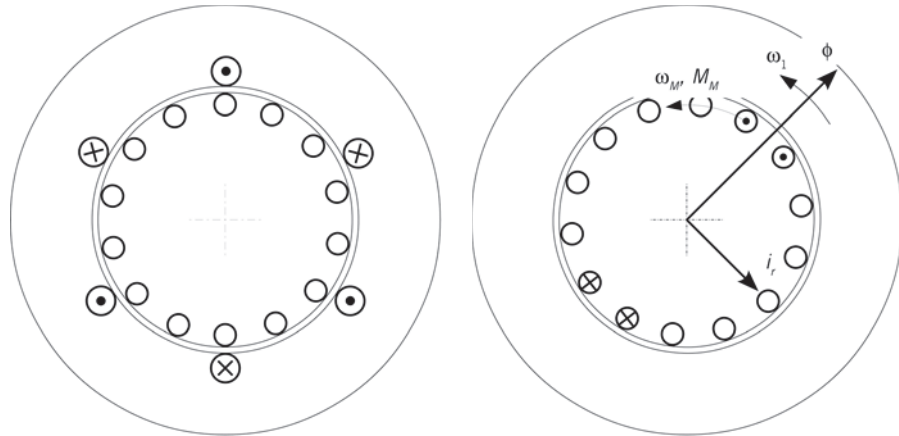


Bild 2-8
Permanenterregte Synchronmaschine: Querschnitt (links), Raumzeigerdiagramm (rechts)

Bild 2-9
Asynchronmaschine:
Querschnitt (links),
Fluss und der im Läufer
induzierte Strom
(rechts)



senkrecht und im Betrag proportional zum Fluss und zur relativen Drehzahl des Flusses:

$$\omega_2 = \omega_1 - \omega_M \quad (2.12)$$

Diese Differenz der Kreisfrequenz des Ständerstroms zur Drehzahl des Läufers wird Schlupfdrehzahl genannt und verdeutlicht das asynchrone Verhalten der Maschine.

Der Fluss Φ wiederum entsteht aus den Flussbeiträgen des Ständers und des Läufers und kann für eine ideale Maschine wie folgt berechnet werden:

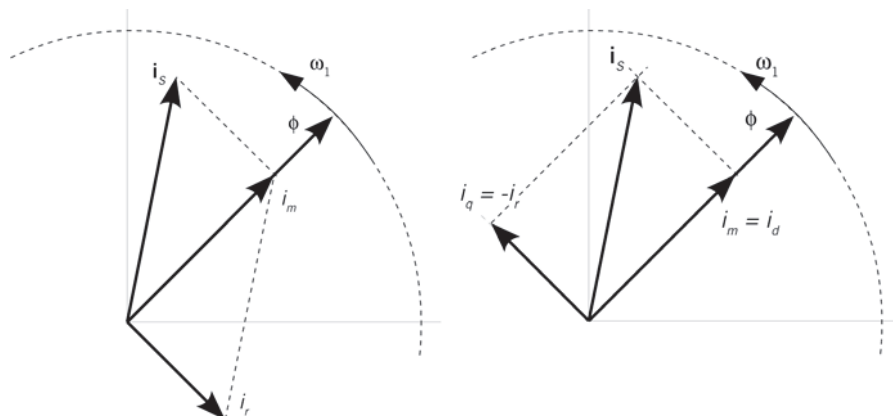
$$\Phi = L_h(i_S + i_R) = L_h \cdot i_m \quad (2.13)$$

Dabei ist L_h die Hauptinduktivität und $i_m = i_S + i_R$ der Magnetisierungsstrom. In **Bild 2-10** (links) wird die Raumzeiger-summe des Ständer- und Läuferstroms, aus dem der Magnetisierungsstrom und der Fluss entstehen, dargestellt.

Der Ständerstrom i_S kann, bezogen auf die Flussrichtung, in eine Längskomponente i_d und eine Querkomponente i_q zerlegt werden, **Bild 2-10** (rechts). Da der Läuferstrom i_R nur eine Querkomponente hat, ist $i_q = -i_R$ und $i_d = i_m$. Aus **Bild 2-10** (rechts) ist zu entnehmen, dass eine tangentiale Kraft und ein entsprechendes Drehmoment aus der Wechselwirkung zwischen dem Fluss Φ und dem Läuferstrom i_R entstehen (Gl. (2.14)).

Hierbei ist C_{MA} eine Konstante, die ebenfalls von der Konstruktion abhängig

Bild 2-10
Raumzeigerdiagramm der Asynchronmaschine:
Ständer-, Läufer- und Magnetisierungsstrom (links),
Längs- und Querkomponente des Ständerstroms (rechts)



$$\begin{aligned}
 M_M &= -\frac{3}{2} \cdot C_{MA} \cdot |\Phi| \cdot i_R \\
 &= \frac{3}{2} \cdot C_{MA} \cdot |\Phi| \cdot i_q \\
 &= \frac{3}{2} \cdot C_{MA} \cdot L_h \cdot i_d \cdot i_q
 \end{aligned} \tag{2.14}$$

ist. Anders als bei den permanenterrregten Synchronmaschinen kann hier der Fluss durch i_d gesteuert werden. Im Ständer induziert sich eine Spannung aus der relativen Bewegung der Ständerwicklungen zum Fluss mit der Drehzahl ω_1 :

$$\begin{aligned}
 e &= C_{MA} \cdot |\Phi| \cdot \omega_1 \\
 &= C_{MA} \cdot L_h \cdot i_d \cdot \omega_1
 \end{aligned} \tag{2.15}$$

In der vorhergehenden Analyse wurden die permanenterrregte Synchron- und die Asynchronmaschine als ideal modelliert. Weitere Effekte, wie der Streufluss, werden in der Regel bei der Auslegung betrachtet. Der Streufluss ist der Anteil des Flusses, der nur die Ständerwicklung oder nur die Läuferwicklung einschließt und somit nicht zum Drehmoment beiträgt. Des Weiteren wurde eine Maschine mit einem Polpaar behandelt. Bei einer Maschine mit p Polpaaren ist das Drehmoment p -mal höher und die Drehzahl p -mal kleiner als bei einer Maschine mit einem Polpaar und gleicher Frequenz.

2.2.3 Steuerung und Regelung

Bei vielen stationären Anwendungen wird die Asynchronmaschine direkt aus dem Drehstromnetz gespeist, welches eine konstante Spannung und Frequenz liefert. Bei Elektro- oder Hybridfahrzeugen steht die elektrische Energie nur in Form von Gleichstrom zur Verfügung. So ist eine leistungselektronische Vorrichtung (siehe auch Kapitel 2.1) erforderlich, um den Gleichstrom in Drehstrom umzuwandeln. Diese Aufgabe wird von einem

Wechselrichter erfüllt, der nicht nur die Umwandlung der elektrischen Energie übernimmt, sondern auch als Stellglied wirkt [2.9]. Dabei wird die Momentanspannung jeder Phase über ein Stellsignal, das von einem Regler übermittelt wird, gesteuert. Ein Wechselrichter ist auch für die Steuerung der permanenterrregten Synchronmaschine erforderlich.

In **Bild 2-11** wird der Wechselrichter als Block innerhalb eines Schaltbilds des Regelungsverfahrens dargestellt. Dabei hat der Wechselrichter einen Gleichstromanschluss und einen Drehstromanschluss. Der erste wird an einer Gleichspannungsquelle oder an einen Energiespeicher angeschlossen, der zweite an die elektrische Maschine. Zusätzlich fließen noch die Spannungswerte als Steuersignale, in **Bild 2-11** mit Pfeilen dargestellt, ein.

Bei einem Wechselrichter sind einige Einschränkungen zu betrachten. Zum einen kann der Betrag der Wechselspannung nur kleiner als die eingespeiste Gleichspannung werden. Für das übliche Steuerungsverfahren der Wechselrichter (Raumzeiger Pulsweitenmodulation) gilt daher:

$$|u| < \frac{u_{dc}}{\sqrt{3}} \tag{2.16}$$

Dabei ist u der Spannungsraumzeiger der Drehstromseite und u_{dc} die Spannung auf der Gleichstromseite. Zum anderen soll der Strombetrag den zulässigen Strom der Halbleiter und der angeschlossenen Maschine nicht überschreiten:

$$|i| = \sqrt{i_q^2 + i_d^2} < i_{max} \tag{2.17}$$

Außerdem erfolgt die Umsetzung der Spannungswerte erst nach einer kurzen Laufzeit, die von der Schaltfrequenz abhängt und zwischen 60 bis 200 μ s liegt. Sie ist für die Auslegung eines Stromregelkreises zu beachten.

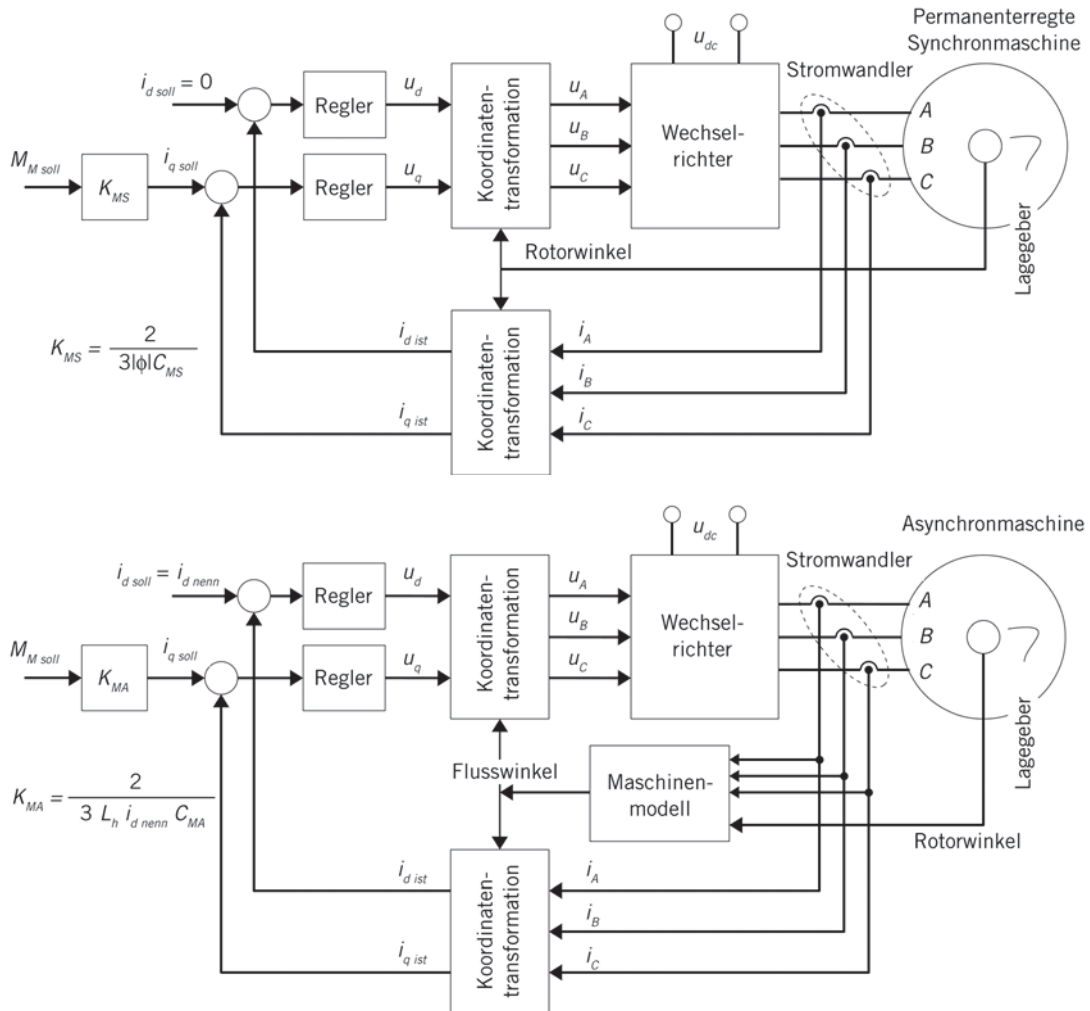


Bild 2-11 Blockschaltbild der Drehmomentregelung: permanenterregte Synchronmaschine (oben), Asynchronmaschine (unten)

Diese Strom- und Spannungseinschränkungen beeinflussen den Betriebsbereich der Maschine. Für die permanenterregte Synchronmaschine ist das Drehmoment proportional zum Strom i_q . Da der Strom aber begrenzt ist, ist auch das Drehmoment entsprechend begrenzt. Außerdem fließt der Strom nur ein, wenn die Spannung des Wechselrichters (u) größer als die induzierte Spannung (e) ist. Da u begrenzt ist und e mit der Drehzahl zunimmt, ist auch die Höchstdrehzahl limitiert. Die Einschränkungen für die permanenterregte Synchronmaschine werden in dem Dreh-

moment-Drehzahl-Diagramm in **Bild 2-12** (links) dargestellt.

Für die Asynchronmaschine tritt ebenfalls eine Begrenzung des Drehmoments aufgrund des zulässigen Stroms auf. Im Unterschied zur permanenterregten Synchronmaschine kann in der Asynchronmaschine der Fluss über die Längskomponente des Stroms (i_d) gesteuert werden. Im unteren Drehzahlbereich wird der Fluss auf seinen Maximalwert gesetzt, dieser ist durch die Sättigung des Eisens bedingt, um so das höchstmögliche Drehmoment zu erhalten. Wenn aufgrund der zunehmenden

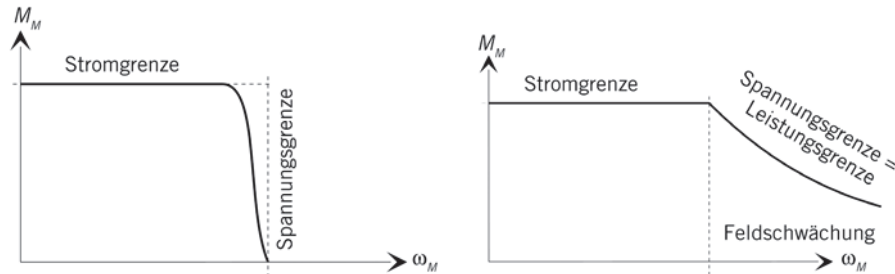


Bild 2-12
Zulässiger Betriebsbereich in der Drehmoment-Drehzahl-Ebene: permanenterregte Synchronmaschine (links), Asynchronmaschine (rechts)

Drehzahl die induzierte Spannung (e) die des Wechselrichters (u) erreicht, kann die induzierte Spannung durch eine Feldschwächung reduziert werden, das heißt eine Reduktion von i_d . Damit können höhere Drehzahlen bei abnehmendem Drehmoment erreicht werden, das heißt die erreichbare Leistung bleibt konstant. Der zulässige Betriebsbereich für eine Asynchronmaschine wird in Bild 2-12 (rechts) dargestellt.

Eine Erweiterung des Drehzahlbereichs von permanenterregten Synchronmaschinen ist auch möglich, wenn die Induktivität ausreichend hoch ist. Der Betrieb im erweiterten Drehzahlbereich ist dann aber mit höheren Verlusten verbunden.

Wenn der zulässige Strom überschritten wird, führt die Stromwärme zu Übertemperatur in den Halbleitern des Wechselrichters und in den Wicklungen der Maschine. Dabei handelt es sich um einen thermischen Vorgang, der eine Zeitkonstante von einigen Sekunden bis zu wenigen Minuten erreichen kann. Für beide Maschinentypen ist dadurch eine kurzzeitige Überschreitung des Stroms beziehungsweise des Drehmoments möglich, sofern die Temperaturen der Halbleiter und der Maschine überwacht werden.

Grundlegendes Ziel der Regelung in Elektroantrieben für Pkw ist das Drehmoment. Darauf aufbauend kann eine Drehzahlregelung oder eine Wirkungsgradoptimierung umgesetzt werden. Für die Drehmomentregelung in einer permanenterregten Synchronmaschine gilt die Gleichung des Drehmoments, das pro-

portional von der Querkomponente des Stroms abhängig ist. Da der Wechselrichter auf direktem Weg nur die Spannung stellen kann, wird zusätzlich ein Stromregelkreis eingeführt. Dieser kann auf einem nach dem Fluss orientierten Koordinatensystem umgesetzt werden, das heißt in einer feldorientierten Regelung [2.10]. Dafür werden die Phasengrößen (zum Beispiel i_A, i_B, i_C) auf Längs- und Querkomponenten (zum Beispiel i_d, i_q) transformiert. Die Transformation erfordert der Winkel des Flusses, der im Fall der permanenterregten Synchronmaschine gleich dem des Läufers ist.

Bild 2-11 (links) zeigt das Blockschaltbild der Drehmomentregelung einer permanenterregten Synchronmaschine. Rechts in der Abbildung sind der Wechselrichter, die damit gespeiste Synchronmaschine, die Stromwandler und der Lagegeber dargestellt. Die restlichen Blöcke gehören zum Regelungssystem und werden per Software in einem Mikrocontroller mit einer Abtastperiode von 1 bis 60 μs realisiert.

Im Regelungssystem werden die Signale der Phasenströme (i_A, i_B, i_C) in die Längs- und Querkomponenten des Raumzeigers transformiert (i_d, i_q). Nach dem Vergleich mit den Sollwerten werden die Abweichungen von den Reglern verarbeitet. Die Regler stellen die Längs- und Querkomponenten des Spannungsraumzeigers mit dem Ziel, die Regelabweichung zu Null zu machen. Dabei stellen die Regler eine höhere Spannung ein, wenn der Strom-Istwert kleiner als der Sollwert ist und umgekehrt. Die Wirkung der Regler ist proportional zum Betrag und zur Dauer

der Abweichung (PI-Regler). Anschließend wird die Spannung zur Steuerung des Wechselrichters in die Phasengrößen rücktransformiert. Die Transformation und Rücktransformation benötigen den Winkel des Läufers, der vom Lagegeber ermittelt wird.

Bei der permanenterrregten Synchronmaschine hat die Längskomponente des Stroms (i_d) keine Wirkung auf das Drehmoment. Daher wird ihr Sollwert auf null gesetzt. Die Querkomponente i_q bestimmt das Drehmoment und ihr Sollwert wird aus dem Drehmomentsollwert berechnet.

Das Blockschaltbild der Regelung einer Asynchronmaschine ist in Bild 2-11 (rechts) dargestellt. Sie unterscheidet sich im Wesentlichen durch zwei Funktionen von der Regelung der Synchronmaschine. Erstens dreht sich im Fall der Asynchronmaschine der Flussraumzeiger asynchron zum Läufer. Der Winkel des Flusses, der für die Transformation erforderlich ist, muss daher mit einem Modell der Maschine berechnet werden. Dafür sind die Signale des Läuferwinkels und der Phasenströme sowie die Motorparameter nötig. Zweitens ist der Betrag des Flusses von der Längskomponente des Stroms (i_d) abhängig, deshalb muss sein Sollwert auf den Nennwert ($i_{d,nenn}$) gesetzt werden.

Die permanenterrregte Synchronmaschine weist gegenüber der Asynchronmaschine sowohl einen höheren Wirkungsgrad als auch eine höhere Leistungsdichte auf. Sie ist jedoch für einen größeren Drehzahlbereich weniger gut geeignet, da die Feldschwächung ineffizient ist. Wird eine permanenterrregte Synchronmaschine für hohe Drehzahl ausgelegt, so verringert sich das Drehmoment im gesamten Drehzahlbereich. Bei Asynchronmaschinen ist die Feldschwächung effizienter. Dadurch kann die Maschine für hohes Drehmoment im unteren Drehzahlbereich ausgelegt werden und mit reduziertem Drehmoment hohe

Drehzahlen erreichen. Dank ihrer hohen Leistungsdichte und einer kompakten, flachen Ausführung ist die permanenterrregte Synchronmaschine besonders für Radnabenmotoren geeignet.

2.2.4 Zusammenfassung

Die Grundlagen der elektrischen Maschinen, sowohl motorisch als auch generatorisch betrieben, wurden in diesem Beitrag kurz vorgestellt. Für den Elektroantrieb von Pkw werden in der Praxis bevorzugt permanenterrregte Synchronmaschinen und Asynchronmaschinen eingesetzt. Beide Maschinentypen können mit einer Raumzeigerdarstellung der elektrischen Größen in einem feldorientierten Koordinatensystem modelliert werden. Durch den Einsatz eines Mikrocontrollers und eines leistungselektronischen Stellglieds kann eine Regelung umgesetzt werden, die auf diesem Modell beruht. Dies ermöglicht die hochdynamische Drehmomentregelung und, im Fall der Asynchronmaschine, auch eine Erweiterung des Drehzahlbereichs.

Die elektrischen Maschinen werden während der Beschleunigung und der Konstantfahrt des Fahrzeugs durch die Drehmomentregelung im Motorbetrieb und während des Bremsbetriebs im Generatorbetrieb geführt. Aus dem Stillstand heraus kann das Nenndrehmoment erreicht und kurzzeitig auch überschritten werden. Die permanenterrregte Synchronmaschine hat den Vorteil eines höheren Wirkungsgrads und einer höheren Leistungsdichte, während die Asynchronmaschine den Vorteil hat, dass sie in einem größeren Drehzahlbereich betrieben werden kann.

2.3 Elektrische Fahrtriebe

Die Integration elektrischer Maschinen in den Antriebsstrang von Hybrid- und Elektrofahrzeugen eröffnet verschiedene Gestaltungsmöglichkeiten. Häufig wird zunächst auf die etablierte Fahrzeugplattform mit konventioneller Antriebsstrang-Topologie, bestehend aus einem Zentralmotor, Schaltgetriebe und Differenzialgetriebe, zurückgegriffen. Die spezifischen Eigenschaften der elektrischen Maschine erlauben aber neue Gestaltungsmöglichkeiten des Antriebsstrangs, die nachfolgend aufgezeigt werden. Anhand von Beispielen werden die Potenziale bei der Wirkungsgradsteigerung vom Energiespeicher zum Rad (*tank to wheel*) qualitativ und quantitativ dargestellt. Der Einsatz radindividueller Direktantriebe, zum Beispiel Radnabenmotoren, mit ihren Vor- und Nachteilen werden ebenso diskutiert.

2.3.1 Einleitung

Die Verwendung elektrischer Maschinen für den Fahrtrieb ermöglicht aufgrund ihrer Eigenschaften einen wesentlich größeren Gestaltungsfreiraum bei der Anordnung der Komponenten des Antriebsstrangs. Die Tatsache, dass ein Elektromotor ein hohes Drehmoment über fast den gesamten Drehzahlbereich zur Verfügung stellen kann, erlaubt die Verwendung von Getrieben mit weniger Stufen und Gängen bis hin zu Getrieben mit fester Übersetzung oder sogar den Einsatz getriebeloser Direktantriebe. Das Wegfallen von Verlusten und Massenträgheiten des klassischen Antriebsstrangs (zum Beispiel bei Verbrennungsmotor, Getriebe und Differenzial) ermöglicht zusätzlich zum ohnehin sehr guten Wirkungsgrad eines Elektromotors eine weitere Steigerung des Antriebsstrang-Gesamtwirkungsgrads. Gleichzeitig kann bei gleichbleibenden Leistungsdaten in Grenzen auch die Bauform des Elektro-

motors individuell gestaltet werden. Dies erlaubt die Integration der elektrischen Maschine in kompakte, radnahe Antriebskomponenten, wie die vom Fraunhofer ZKLM [2.18] entwickelte elektrische Hinterachse mit zwei individuell steuerbaren Elektromotoren oder das sogenannte eDifferenzial mit aktiver Querverteilung des Antriebsmoments einer Antriebsmaschine von Schaeffler [2.19] dokumentieren. Der Wunsch, die Antriebsleistung so nahe wie möglich am Rad zu erzeugen, um die oben genannten Wirkungsgradvorteile optimal zu nutzen, wird in letzter Konsequenz von einem Radnabenmotor erfüllt, der direkt in die Felge des Rads integriert wird. Der gewonnene Gestaltungsspielraum für die Antriebskomponenten und deren Anordnung im Fahrzeug eröffnet zudem eine flexiblere Festlegung der Schwerpunkt- und Achslage des Fahrzeugs und des Designs der Fahrgastzelle, da beispielsweise die übliche Mittelkonsole nicht mehr benötigt wird, bis hin zu völlig neuen Fahrzeugformen [2.21]. Darüber hinaus ergeben sich durch den Wegfall des Verbrennungsmotors, des Getriebes oder von Getriebestufen auch Verbesserungspotenziale bei der Akustik des Antriebs.

2.3.2 Antriebsstrang-Topologien

Wie aus Kapitel 1.1 über Hybridantriebe bereits ersichtlich wurde, ergibt sich bei der schrittweisen Elektrifizierung des Antriebsstrangs eine Vielzahl von Kombinationsmöglichkeiten und Betriebsstrategien. Der rein elektrische Antriebsstrang eröffnet 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

Tabelle 2-2
Bewertungsmatrix möglicher Antriebsstrang-Topologien für reine Elektroantriebe (M: Elektromotor, SG: Schaltgetriebe, DG: Differentialgetriebe, G: Getriebe mit fester Übersetzung)

	Zentralmotor, Schaltgetriebe und Differential	Achsantrieb mit Differential	Getriebeübersetzter Einzelradantrieb	Einzelrad-Direktantrieb, Radnabenmotoren	Ohne mechanische Kopplung	Achs-Differential
Vorderachse						
Hinterachse						
	Zwei Schaltgetriebe unüblich	Boost, Längsverteilung	Boost, Längsverteilung, (Querverteilung)	Boost, Längsverteilung, (Querverteilung)	Heckantrieb konventionell	Allrad konventionell
	Boost, Längsverteilung	Längsverteilung	Längs- und Querverteilung vorne	Längs- und Querverteilung vorne	Heckantrieb	Nicht kombinierbar
	Boost, Längs- und Querverteilung	Längs- und Querverteilung hinten	Längs- und Querverteilung	Längs- und Querverteilung	Leistungsverzweigter Heckantrieb	Nicht kombinierbar
	Boost, Längs- und Querverteilung	Längs- und Querverteilung hinten	Längs- und Querverteilung	Längs- und Querverteilung	Leistungsverzweigter Heckantrieb	Nicht kombinierbar
	Frontantrieb konventionell	Frontantrieb	Leistungsverzweigter Frontantrieb	Leistungsverzweigter Frontantrieb	Keine Antriebs-einheit	Keine Antriebs-einheit
	Allrad konventionell	Nicht kombinierbar	Nicht kombinierbar	Nicht kombinierbar	Keine Antriebs-einheit	Keine Antriebs-einheit

mögliche Konfigurationen. Diese verschiedenen Antriebsstrang-Topologien an Vorder- und Hinterachse verteilt ergeben die in **Tabelle 2-2** gezeigten Kombinationsmöglichkeiten.

Neben der konventionellen Antriebsstrang-Topologie mit reinem Front- oder Heckantrieb ergeben sich durch die Kombination mit einer weiteren elektrisch angetriebenen Achse die Möglichkeiten der Beschleunigungsunterstützung (Boost) und der individuellen Längs- und/oder Querverteilung der Antriebsleistung, was in heutigen Hybridkonzepten mit Verbrennungsmotor und Elektroantrieb auf verschiedenen Achsen (hybrid through the road oder axle-split hybrid) bereits praktiziert wird. Ebenso können leistungsverzweigte Front- und Heckantriebe zu

einem elektrischen Allradantriebsstrang mit individueller Leistungsverteilung auf allen vier Rädern erweitert werden. Dies eröffnet vollkommen neue Möglichkeiten der Einflussnahme auf die Fahrdynamik des Fahrzeugs und der Methoden der Fahrdynamikregelung gegenüber herkömmlichen Systemen [2.13], angefangen bei Kurvenfahrten mit hohen Geschwindigkeiten bis hin zur Traktionskontrolle für unebene Strecken abseits der Straße, was zu einem späteren Zeitpunkt genauer erörtert werden soll. Aufgrund der in Kapitel 1.2 über den Range Extender erörterten Reichweitenproblematik heutiger Elektrofahrzeuge werden rein batteriebetriebene Fahrzeuge wohl eher im Bereich Kleinst- und Kleinwagen bis hin zur unteren Mittelklasse oder in speziellen Anwendungsbereichen,

beispielsweise Liefer- und Servicewagen im städtischen Bereich, zum Einsatz kommen. Damit möglichst viel der in der Batterie gespeicherten Energie für den Fahrtrieb verwendet werden kann, gilt es, Bauraum-, Gewichts- und Effizienzpotenziale bei der Wahl der Antriebsstrang-Topologie zu erschließen.

Die Antriebsstrangvariante, die derzeit sowohl in verbrennungsmotorisch als auch in elektrisch angetriebenen Fahrzeugen am häufigsten verwendet wird, besteht aus einem zentral angeordneten Motor mit Schaltgetriebe und Differenzial. Das Schaltgetriebe erlaubt den Einsatz des Elektromotors in üblichen Drehzahlbereichen und mit moderaten Drehmomentanforderungen, verringert jedoch spürbar den Gesamtwirkungsgrad des Antriebsstrangs. Die elektrische Maschine liegt dabei in einem Nennleistungsbereich von 20 bis 120 kW, bei Nenndrehzahlen von 4000 bis 16.000 1/min sowie Nenndrehmomenten von 40 bis 200 Nm. Durch den Wegfall der Verbrennungsmotorengeräusche beim Einsatz eines Elektromotors können andere Geräuschquellen wie das Schaltgetriebe dominierend werden. Besonders bei umgerüsteten Fahrzeugen, die das ursprüngliche, nicht auf einem Elektromotor abgestimmte Getriebe verwenden, wird dies bei höheren Geschwindigkeiten deutlich. Zum kompletten Elektroantriebsstrang gehören noch die Leistungselektronik zur Ansteuerung der Motoren und die Traktionsbatterie. **Bild 2-13** zeigt für den beschriebenen Antriebsstrang die gesamte Energiekette von der Batterie bis zum Rad.

Verzichtet man auf das Schaltgetriebe, kann der Elektromotor mit fester Übersetzung direkt am Differenzial betrieben werden, **Bild 2-14**. Hierfür kommen drehmomentstarke Elektromaschinen zum Einsatz, welche für die notwendige Beschleunigung sorgen. Bei höheren Geschwindigkeiten läuft der Elektromotor allerdings bei sehr hohen Drehzahlen, was je nach Motorentyp zu höheren Verlusten

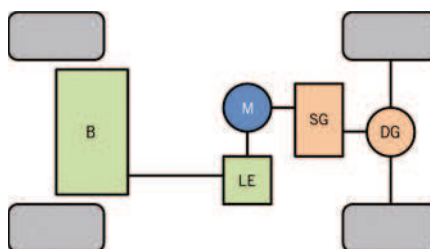


Bild 2-13
Konventioneller Antriebsstrang mit Elektromotor, Schalt- und Differenzialgetriebe beispielsweise an der Vorderachse sowie Batterie (B) und Leistungselektronik (LE) (Topologie 1)

und zu negativen akustischen Einflüssen führt. Die Drehmomentverteilung auf die Antriebsräder wird konventionell vom Differenzial übernommen, das als Verlustbringer erhalten bleibt. Der Leistungsbereich des verwendeten Elektromotors liegt bei 30 bis 120 kW, wobei Drehzahl und Drehmoment zwischen 4000 und 12.000 1/min beziehungsweise 90 und 300 Nm liegen.

Die Antriebsstrang-Topologie in **Bild 2-15** veranschaulicht einen möglichen Entwicklungsschritt zum radindividuellen Antrieb, der eine flexible, elektronisch gesteuerte Drehmomentverteilung erlaubt. Ein weiterer Vorteil aus Sicht der Effizienz liegt hierbei in dem sehr hohen Wirkungsgrad des verwendeten Getriebes gegenüber einem Schaltgetriebe beziehungsweise Differenzial. Drehmoment- und Drehzahlenforderungen sind mit Topologie 2 vergleichbar, die Leistung wird dabei auf die zwei Antriebsmaschinen aufgeteilt. Durch die Teilung der Elektromaschine und der Getriebe ergibt sich eine höhere Flexibilität bei der Anordnung, jedoch bei höheren Kosten, mehr Gewicht und größerem Bauraumbedarf.

Im letzten Schritt erlaubt die Verwendung von Radnabenmotoren als

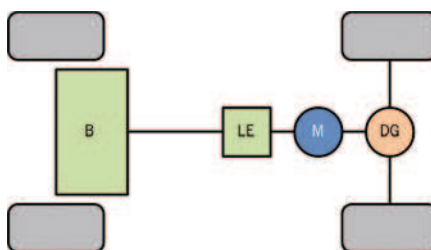
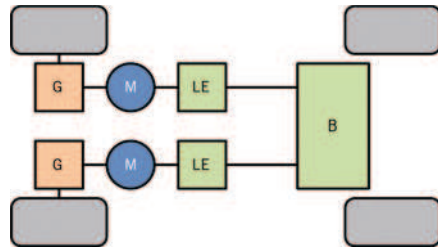


Bild 2-14
Elektrischer Zentralantrieb mit fester Getriebeübersetzung und Verteilung des Drehmoments über das Differenzial an der Vorderachse (Topologie 2)

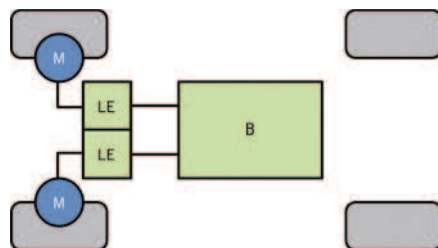
Bild 2-15
Getriebeübersetzter Einzelradantrieb mit individuell steuerbaren Elektromotoren an der Hinterachse sowie Batterie und Leistungselektronik (Topologie 3)



Direktantrieb die Bereitstellung der benötigten Fahrleistung ohne weitere mechanische Übertragungselemente direkt am Rad, **Bild 2-16**. Durch die direkte Kopplung der Motordrehzahl an die Raddrehzahl sind Radnabenmotoren eher niedrigdrehende Elektromaschinen, die allerdings ein sehr hohes Drehmoment bereitstellen müssen. Heutige Radnabenmotoren für den Einsatz im Pkw liegen zumeist im Bereich von 15 bis 60 kW bei einer Drehzahl bis 2000 1/min und einem Drehmoment bis zu 600 Nm. Die hohe Dynamik der Elektromotoren ermöglicht zudem eine sehr schnelle, radindividuelle Steuerung des Drehmoments und damit eine gezielte und effiziente Beeinflussung der Fahrdynamik des Fahrzeugs. Durch den Einbau des Motors direkt im Rad ist die Zunahme der ungefederten Massen infolge der mitbewegten Motormasse zu berücksichtigen.

Um eine qualitative und quantitative Aussage über die Effizienz der vorgestellten Antriebsstrang-Topologien durchzuführen, werden im nächsten Kapitel die Einzelkomponenten und deren Eigenschaften näher erläutert.

Bild 2-16
Direktantrieb mittels Radnabenmotoren zum Beispiel an der Hinterachse sowie Batterie und Leistungselektronik (Topologie 4)



2.3.3 Effizienzanalyse

Inwieweit das schrittweise Entfernen mechanischer Komponenten im Antriebsstrang den Gesamtwirkungsgrad vom Energiespeicher zum Rad beeinflusst, soll zunächst analytisch betrachtet werden. Um eine bessere Vorstellung der Auswirkungen auf den Energieverbrauch zu bekommen, werden die getroffenen Aussagen im Anschluss mithilfe einer Simulation von Fahrversuchen quantitativ überprüft. Im Folgenden werden lediglich die oben eingeführten Antriebsstrang-Topologien 1, 3 und 4 betrachtet, da sich Topologie 2 und 3 aus Sicht der Energiewandlungskette kaum unterscheiden.

Geht man von der chemischen Energie in der Batterie als primäre Energiequelle aus, entstehen auch beim elektrischen Antriebsstrang Verluste durch die verschiedenen Prozesse der Energiewandlung bis zur eigentlichen, mechanischen Fahrleistung. Moderne Batteriesysteme auf Lithium-Ionen-Basis erreichen bei der Bereitstellung elektrischer Energie durch optimierte Betriebsstrategien heute bereits Wirkungsgrade über 96 %. Auch seitens der Leistungselektronik sind in dem für den Fahrtrieb benötigten Leistungsbereich durch den Einsatz hochintegrierter Leistungshalbleiter Wirkungsgrade von 97 % und mehr darstellbar. Die Effizienz der Wandlung von elektrischer in mechanische Energie im Elektromotor hängt stark von der verwendeten Bauart des Motors ab. Während eine permanenterregte Synchronmaschine Wirkungsgrade von über 95 % erreichen kann, liegen sie bei einer Drehstrom-Asynchronmaschine meist bei circa 87 %. Die Verwendung eines Schaltgetriebes (automatisch/manuell) erlaubt eine Anpassung von Drehzahl und Drehmoment an die aktuelle Fahrsituation (Geschwindigkeit, Fahrwiderstand). Mit den heute verbreitet eingesetzten Fünf- und Sechsgang-Schaltgetrieben kann der Verbrennungsmotor über einen großen Fahrgeschwindigkeitsbereich in leistungs- oder verbrauchsoptimalen

Komponenten	Wirkungsgrad	
	Minimum	Maximum
Batterie	92 %	96%
Leistungselektronik	95 %	97 %
Schaltgetriebe	80 %	95 %
Getriebe mit fester Übersetzung	93 %	98 %
Differenzial	92 %	98 %
Motor	87 %	95 %

Tabelle 2-3
Übersicht der Wirkungsgradbereiche heutiger Elektroantriebskomponenten (Richtwerte)

Betriebsbereichen betrieben werden. Jedoch schwankt der Wirkungsgrad dieser Getriebe lastpunktabhängig sehr stark zwischen 80 und 95 %. Zudem muss bei Beschleunigungen des Fahrzeugs die Massenträgheit der Getriebeteile nicht verwendeter Gänge überwunden werden. Hier zeigt sich besonders das Optimierungspotenzial der Getriebe für Elektroantriebe durch eine Reduzierung der Anzahl der Gänge [2.12]. Getriebe mit fester Übersetzung in einer Getriebestufe erreichen dagegen Wirkungsgrade bis 98 %. Ausgehend von den in **Tabelle 2-3** zusammengefassten Wirkungsgradbereichen der Antriebsstrangkomponenten lässt sich für den Gesamtwirkungsgrad ebenfalls ein Bereich ermitteln. Da im Antriebsstrang nach Bild 2-13, bestehend aus einer Antriebsmaschine und anschließendem Schalt- und Differenzialgetriebe, mehrere Energie- und Drehmomentwandlungsstufen wirken, ergibt sich hierfür im Vergleich mit den anderen Antriebsstrang-Topologien der niedrigste Gesamtwirkungsgrad (Speicher zu Rad) von durchschnittlich 66,5 %. Der resultierende Wirkungsgradbereich fällt allerdings mit 54,8 bis 79,8 % sehr groß aus. Durch Verwendung angepasster Getriebe

oder Getriebe mit fester Übersetzung und Einzelradantrieb, Bild 2-15, können aber mittlere Wirkungsgrade von 78 % erreicht werden (70,7 bis 86,7 %). Wird das Getriebe eingespart und stattdessen, wie in Bild 2-16 gezeigt, ein Direktantrieb mit Radnabentmotoren eingesetzt, steigt der mittlere Gesamtwirkungsgrad auf 82 % (76,0 bis 88,5 %).

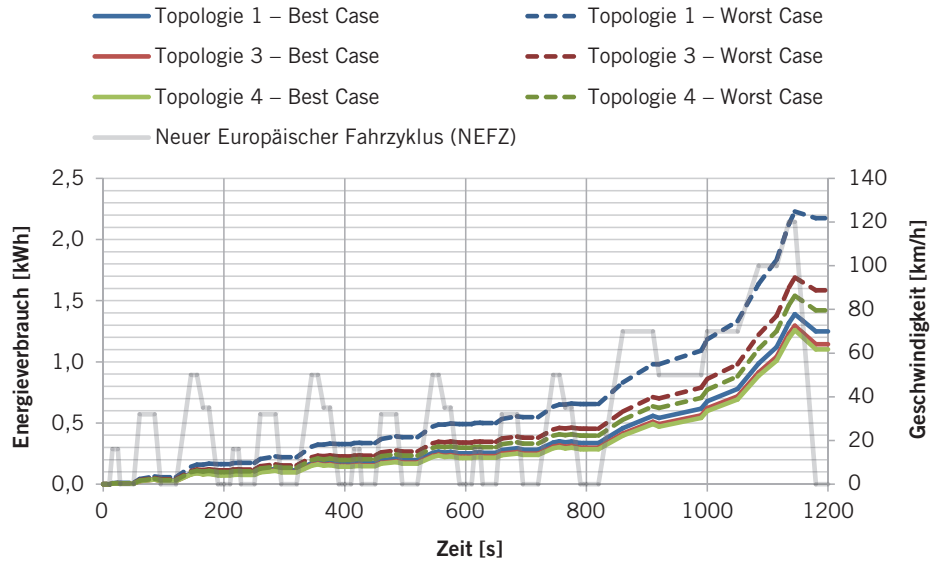
Um den Einfluss dieser Wirkungsgradanalysen auf den Verbrauch eines Fahrzeugs zu untersuchen, wurde eine Fahrt im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) mit einem Durchschnittsfahrzeug, **Tabelle 2-4**, simuliert. Dabei wurde immer dasselbe Fahrzeug mit den oben genannten Antriebssträngen betrieben. In erster Näherung wurde die Gesamtmasse des Fahrzeugs als konstant angenommen, da der Wegfall des Getriebes und/oder des Differenzials die Verwendung leistungsfähigerer und damit schwererer Motoren bedingt [2.14].

Für die in **Bild 2-17** dargestellten Energieverbrauchsverläufe wurden jeweils der höchste Wirkungsgrad (*Best Case*) und der geringste Wirkungsgrad (*Worst Case*) angenommen, um den darstellbaren Bereich zu verdeutlichen. Die Verläufe spiegeln die Ergebnisse der qualitativen Untersuchung

Fahrzeugmasse	$m = 1506 \text{ kg}$
Luftwiderstandsbeiwert	$c_W = 0,33$
Stirnfläche	$A = 2,14 \text{ m}^2$
Rollwiderstandsbeiwert	$c_R = 0,01$
Dichte von Luft (bei 20 °C)	$\rho_L = 1,2 \text{ kg/m}^3$

Tabelle 2-4
Parameter des verwendeten Fahrzeugmodells (Durchschnittsmodell für Mittelklassefahrzeug nach [2.11])

Bild 2-17
Zeitlicher Verlauf des Energieverbrauchs für den Fahrantrieb im NEFZ



der Gesamtwirkungsgrade für die oben genannten Antriebstrang-Topologien wider. Das Einsparpotenzial durch die Verwendung leistungsverzweigter Antriebe gegenüber Zentralantrieben mit Schaltgetriebe und Differenzial liegt im jeweiligen Worst Case bei 26,4 %, im Best Case bei 6,9 %. Auffällig sind die Auswirkungen des Gesamtwirkungsgrads auf die Rekuperation, da die zurückgewonnene Energie dieselbe Energiewandlungskette zweimal durchlaufen muss. Unter der Annahme, dass die gespeicherte kinetische Energie des Fahrzeugs vollständig für die Rekuperation zur Verfügung steht, steigt das Einsparpotenzial mit Rekuperation im Best Case auf 34,7 % und im Worst Case auf 11,8 %.

Aus den ermittelten Energieverbrauchs-werten lassen sich die Durchschnittsverbräuche für die drei Antriebsstrangvarianten nach **Tabelle 2-5** abschätzen. Der Energieverbrauch eines Mittelklassefahrzeugs mit Elektroantrieb im NEFZ könnte durch die Wahl eines geeigneten Antriebsstrangs demnach um circa 32 % gesenkt werden. Die Verwendung radindividueller Direktantriebe für Elektroantriebsstränge ermöglicht also eine Verringerung des Verbrauchs und eine Verbesserung der Rekuperationsausbeute. Welche Herausforderungen und Chancen diese Antriebsstrang-Topologie mit sich bringen, wird im Folgenden näher beleuchtet.

Tabelle 2-5
Energieverbrauch bei Fahrt im NEFZ für unterschiedliche Antriebsvarianten mit und ohne Rekuperation

Antrieb	Verbrauch ohne (mit) Rekuperation		
	Minimum [kWh/100 km]	Durchschnitt [kWh/100 km]	Maximal [kWh/100 km]
Topologie 1	23,0 (20,3)	18,9 (15,6)	15,6 (11,7)
Topologie 3	18,2 (14,8)	16,4 (12,6)	14,9 (10,7)
Topologie 4	17,0 (13,3)	15,7 (11,7)	14,6 (10,3)

2.3.4 Radindividuelle Direktantriebe

Mit dem Ziel, die benötigte Antriebsleistung so nahe wie möglich am Rad zu erzeugen, können Elektromotoren auch für den Direktantrieb der Räder ausgelegt werden. Die Einsparung einer oder mehrerer Getriebestufen verbessert den Wirkungsgrad des Antriebs und ermöglicht neue Anordnungsvarianten der Antriebskomponenten. Darüber hinaus erlaubt eine individuelle Ansteuerung der Räder eine aktive Verteilung der Antriebsleistung, die durch die Verwendung moderner Leistungselektronik schneller, gezielter und effizienter wirkt als aktuelle Fahrdynamikregelsysteme wie ABS, ASR oder ESP [2.15, 2.16]. Somit können gegenüber einem Antriebsstrang mit Zentralmotor die für die Fahrdynamikregelung erforderlichen Steuergeräte und mechatronischen Komponenten [2.15] vereinfacht oder gar ersetzt werden. Die entsprechende Funktionalität wird dann durch die verwendete Motorsteuerung realisiert [2.14, 2.16].

Konstruktiv kann ein Direktantrieb entweder durch eine kurze Antriebswelle zwischen Rad und der im Fahrzeugaufbau angeordneten elektrischen Maschine oder durch einen Radnabenmotor direkt in der Radfelge realisiert werden. Die Integration des Antriebsmotors und der Leistungselektronik direkt ins Rad bietet einerseits die größten gestalterischen Freiheiten, da kein Bauraum im Fahrzeug benötigt wird, stellt andererseits jedoch die größten Herausforderungen hinsichtlich Stabilität, Zuverlässigkeit und Sicherheit dar. Daneben spielen die Temperaturbeständigkeit, die Dauerfestigkeit infolge der Belastungen durch Vibrationen, Stöße und Fahrbewegungen, die Dichtheit und die technische sowie funktionale Sicherheit eine wichtige Rolle [2.14, 2.22]. Zur Sicherstellung der Betriebsfähigkeit im automobilbauüblichen Temperaturbereich von -40 bis $+85$ °C ist gerade bei höheren Temperaturen aufgrund des verlustbedingten Wärmeeintrags in der

elektrischen Maschine eine aktive Kühlung notwendig. Damit werden die verwendeten Dauermagnete, die Sensoren und die Elektronik im Motor geschützt sowie die Isolationsmaterialien der Leitungen und Motorwicklungen erhalten [2.20]. Um die Dichtheit des Motors sicherzustellen, sind besondere Anforderungen an die verwendeten Dichtungen und Passungen der Bauteile zu stellen. Darüber hinaus müssen Druckunterschiede durch Temperaturschwankungen verhindert werden, um das Eindringen von Feuchtigkeit über Dichtungen und Zuleitungen zu vermeiden. Durch die Integration des Antriebs in das Rad werden die ungefederten Massen und damit das Massenverhältnis zwischen Rad und Aufbau erhöht, was sich negativ auf das Fahrverhalten und den Fahrkomfort auswirken kann. Hier ist gegebenenfalls eine gezielte Feinabstimmung des eingesetzten Feder-Dämpfer-Systems erforderlich [2.14, 2.20]. Neuere Entwicklungen zeigen [2.17], dass Radnabenmotoren mit Leistungsgewichten von 2 kW/kg technisch darstellbar sind, wodurch ein 40-kW-Radnabenmotor nur mit 20 kg ins Gewicht fällt. Trotz dieser Herausforderungen sind Radnabenantriebe bezüglich des Wirkungsgrads, des benötigten Bauvolumens und des Gewichts sowie durch die Möglichkeiten der Fahrdynamikregelung einem Antrieb mit Zentralmotor überlegen [2.14].

2.3.5 Zusammenfassung

Die Entwicklung von Antriebssträngen für Elektrofahrzeuge bietet weit mehr Potenziale als der einfache Austausch des Verbrennungsmotors durch einen Elektromotor. Mit den Möglichkeiten der leistungsspezifischen Dimensionierung und vielfältigen Bauarten einer elektrischen Maschine lassen sich neue Antriebsstrang-Topologien für Elektrofahrzeuge entwerfen. Sie reichen vom konventionellen Zentralmotor mit Zweigang-Schaltgetriebe und Differenzial über radindividuelle, getriebeübersetzte

Antriebe bis hin zu Radnabenmotoren. Die schrittweise Verringerung mechanischer Antriebskomponenten erhöht den Gesamtwirkungsgrad des Antriebsstrangs (tank to wheel). Der Energieverbrauch könnte dadurch bei einem Mittelklassewagen im NEFZ um circa 32 % verringert werden. Für die Entwicklung eines serienreifen Radnabendirektantriebs sind jedoch noch Verbesserungen vor allem in den Bereichen Leistungsgewicht und technische sowie funktionale Sicherheit erforderlich. Die Vorteile und Möglichkeiten der radindividuellen Direktantriebe in Bezug auf Fahrdynamikregelungen, Wirkungsgradoptimierung sowie Gewichts- und Komponentensparnis sind jedoch bereits heute ersichtlich und werden zu sinnvollen Lösungen führen.

2.4 Potentiale elektrischer Einzelradantriebe

Im Kapitel 2.3 wurde bereits die Verwendung von Einzelradantrieben mit fester Getriebeübersetzung oder als Direktantrieb hinsichtlich Antriebsstrang-Effizienz und neuen Gestaltungsmöglichkeiten der Fahrgastzelle analysiert und positiv bewertet. Der Wegfall mechanischer Übertragungselemente, beispielsweise Differential, Antriebswellen und Getriebe mit fünf oder mehr Gängen, in Verbindung mit der hohen Stelldynamik moderner elektrischer Antriebe erlauben schnelle und genaue, sowohl positive als auch negative Änderungen des Drehmoments am Rad ohne merkliche Schwingungen im Antrieb zu erzeugen. Gleichzeitig erschließen sich neue Methoden zur Fahrdynamikregelung, da im Gegensatz zu mechanischen Lösungen [2.30] eine schnellere und effizientere Verteilung der Antriebsleistung auf die einzelnen Räder und damit eine elektronische Darstellung zum Beispiel der Torque-Vectoring-Funk-

tionalität ermöglicht werden. Hierdurch kann beispielsweise ein Über- oder Untersteuern des Fahrzeuges bei Lenkeingriffen unter Ausnutzung des maximalen Kraftschlusspotentials verhindert werden.

2.4.1 Einleitung

Die technische Realisierbarkeit eines getriebeübersetzten Einzelradantriebes und dessen fahrdynamisches Potential wurde bereits in Fahrzeugen wie dem Mercedes SLS AMG Electric Drive [2.25] oder dem Audi A5 Technologieträger von Bosch [2.26] untersucht. Zur Darstellung eines Direktantriebes mit Radnabenmotoren stellt die mechanische Integration des Antriebes und der benötigten Leistungselektronik in die Radfelge angesichts der Anforderungen an Temperatur-, Stoß- und Vibrationsbeständigkeit sowie Dichtheit eine große Herausforderung dar [2.24]. Hinzu kommen unter anderem konstruktive Anforderungen aus dem elektromotorischen Prinzip nach einem möglichst kleinen und homogenen Luftspalt, der auch bei Überlagerung von Lasten aus dem Fahrtrieb und der Straßenanregung gewährleistet sein muss. Die Untersuchung derartiger Antriebskonzepte fand beispielsweise im Rahmen der Fraunhofer-Systemforschung Elektromobilität statt [2.27]. In [2.17] wird ein sehr leichter Radnabenmotor für eine 15“ Felge vorgestellt, welcher bei einer Leistung von 40 kW ein Radgewicht (ohne Felge und Reifen) von lediglich 20 kg ermöglicht und somit nur zu einer unwesentlichen Erhöhung der ungefederten Radmassen führt. Zur Regelung von Drehzahl oder Drehmoment am Rad mit Hilfe einer elektrischen Maschine werden moderne leistungselektronische Stellglieder eingesetzt, die aus der näherungsweise konstanten Gleichspannung der Traktionsbatterie eine je nach Maschinentyp angepasste, auch mehrphasige, Anspannung generieren. Die dabei erreichte Qualität hinsichtlich Drehmomentwelligkeit und Rundlauf sowie die Regeldy-

namik basieren auf einer genauen Kenntnis der Maschinenparameter und der aktuellen Rotorlage sowie der elektrischen Ströme und Spannungen. Hierfür werden speziell für hochpolige Torque-Motoren mit hoher Leistungsdichte, die für mobile Anwendungen prädestiniert sind, Sensoren mit hohen Auflösungen benötigt. Somit liegen im Gegensatz zu konventionellen Antrieben sehr genaue Messwerte für Drehzahl und Drehmoment an jedem Rad vor, was neue Konzepte zur Fahrzustandsbeobachtung und schließlich verbesserte Fahrdynamikregelsysteme ermöglicht. Im Folgenden soll kurz auf die Bauformen elektrischer Einzelradantriebe und die verwendete Sensorik in einer konventionellen Fahrzeuginfrastruktur eingegangen werden. Ausgehend von der erreichbaren Stelldynamik wird anschließend ein Ansatz zur Regelung der Längs- und Querdynamik auf Basis einer radindividuellen Schlupfregelung gegeben. Die Einsatzfähigkeit dieses Konzeptes wird anhand simulierter typischer Fahrversuche, wie das Anfahren am Hang oder dem ISO Doppelspurwechsel, verdeutlicht.

2.4.2 Elektrischer Einzelradantrieb

Die vorgestellten praktischen Umsetzungen von Fahrzeugen mit elektrischen Einzelradantrieben zeigen, dass zwischen einem getriebeübersetzten oder direkten Einzelradantrieb unterschieden werden kann, wobei prinzipiell auch Mischformen an

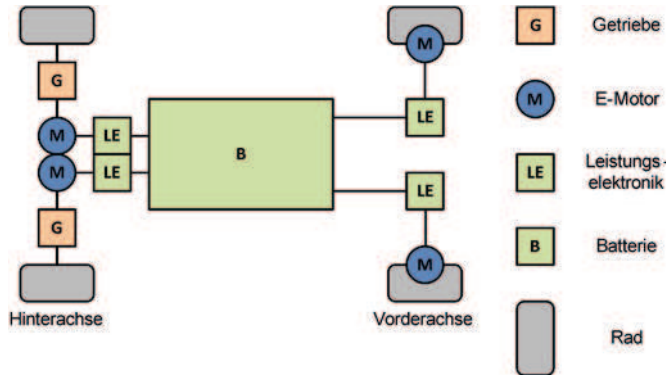


Bild 2-18
Mögliche achsweise Anordnungen der Antriebsstrangkomponenten eines elektrischen Einzelradantriebs

Vorder- und Hinterachse verbaut werden können, **Bild 2-18**. Gleichzeitig wird das Spektrum möglicher Bauweisen durch einen radnahen Antrieb mit Antriebswellen oder einem Radnabenantrieb ergänzt [2.29]. Abhängig von der projektierten Schwerpunktlage des Fahrzeuges kann bereits bei der Auslegung des Antriebsstranges eine sinnvolle Verteilung der Antriebsleistung vorgenommen werden. Je nach Fahrzeugtyp und Einsatzgebiet liegt die benötigte mechanische Leistung eines Antriebsrades zwischen 20 und 120 kW. **Bild 2-19** zeigt den qualitativen Verlauf des Drehmoments und der Leistung eines Drehstromantriebes in Abhängigkeit der Drehzahl. Um einen Direktantrieb zu realisieren, leitet sich der geforderte Drehzahlbereich aus der gewünschten Höchstgeschwindigkeit ab. Legt man ein Fahrzeug der Kompaktklasse zu Grunde, **Tabelle 2-6**, würde eine Höchstgeschwindigkeit von beispielsweise 160 km/h etwa

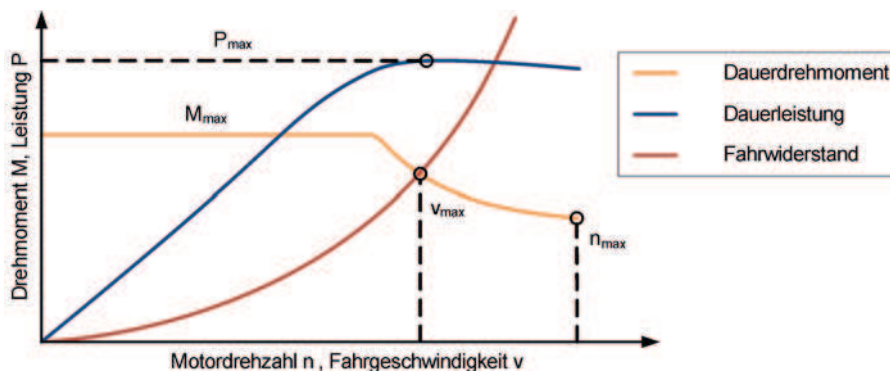


Bild 2-19
Qualitativer Verlauf der Drehzahl/Drehmoment-Kennlinie eines Drehstrommotors und des Fahrwiderstands

Tabelle 2-6
Fahrzeugdaten des
Referenzfahrzeuges
der Kompaktklasse

Fahrzeugmasse	$m = 1463 \text{ kg}$
Rollradius (Reifen 195/65R15)	$r = 0,315 \text{ m}$
Luftwiderstandsbeiwert	$c_W = 0,37$
Stirnfläche	$A = 2,22 \text{ m}^2$
Rollwiderstandsbeiwert	$c_R = 0,01$
Dichte von Luft (bei 20 °C)	$\rho_L = 1,2 \text{ kg/m}^3$

eine Drehzahl von 1350 1/min erfordern. Gleichzeitig muss der Antrieb den entsprechenden Fahrwiderstand durch Bereitstellen der benötigten Dauerleistung überwinden. Ist das genannte Beispielfahrzeug mit einer einzelradgetriebenen Antriebsachse ausgestattet, werden je Motor etwa 130 Nm Drehmoment beziehungsweise 18 kW mechanische Leistung benötigt. Das maximal benötigte Drehmoment ergibt sich einerseits aus der geforderten Steigfähigkeit des Fahrzeuges zum anderen aus der gewünschten Beschleunigungsleistung. In Deutschland sind Straßensteigungen über 15 % zulässig, was bei dem oben gewählten Fahrzeugtyp für das Anfahren am Hang ein Drehmoment von über 340 Nm je Motor erfordert [2.28]. Die Leistung, die der Antrieb über den Fahrwiderstand hinaus bereitstellen kann, beschleunigt das Fahrzeug. In diesem Beispiel wird auf ebener Fahrbahn ein Dauerdrehmoment von etwa 650 Nm beziehungsweise eine mittlere Leistung von 28 kW pro Rad benötigt, um in 10 s auf 100 km/h zu beschleunigen. Da moderne Elektromotoren mit Permanentmagneten eine Leistungsdichte von über 2 kW/kg erreichen [2.17], würde eine Antriebsachse mit zwei Einzelradantrieben zu je 30 kW etwa 15 kg je Motor benötigen.

Zur Umsetzung eines gewünschten Drehmoments der elektrischen Maschine, muss die verwendete Leistungselektronik von einem elektronischen Steuergerät angesprochen werden. Die häufigsten Verfahren zur Regelung des Drehmoments mit hoher Dynamik, Feldorientierte Regelung und Direct Torque Control, benötigen Sensoren zur Ermittlung der Rotorlage und der

Strangströme, deren Messgenauigkeit die Qualität der Regelung beeinflussen. Darüber hinaus ist unter Kenntnis der Eigenschaften der eingesetzten elektrischen Maschine das Drehmoment sehr gut aus einem Maschinenmodell bestimmbar. Es kann folglich davon ausgegangen werden, dass die zur Regelung des Elektromotors benötigten Messgrößen wie Drehzahl und Drehmoment auch der restlichen Fahrzeuginfrastruktur zur Verfügung stehen und eine hohe Genauigkeit aufweisen. Die erreichbare Dynamik zur Regelung des Drehmoments hängt von den Werten des elektrischen Widerstands und der Induktivität des Stators sowie des verwendeten leistungselektronischen Stellgliedes ab und liegt für den in Frage kommenden Leistungsbereich zwischen 1 und 25 ms.

2.4.3 Neue Methoden der Fahrdynamikregelungen

Da im gewöhnlichen Straßenverkehr nur selten Längs- und Querschleunigungen über 0,3 g auftreten, ergeben sich nur kleine Schräglauf- und Schwimmwinkel sowie kleine Beträge für den Radumfangschlupf. Folglich befindet sich das Fahrzeug im stabilen linearen Bereich der Reifenschlupfkennlinie, **Bild 2-20**, und reagiert entsprechend auf Brems-, Antriebs- oder Lenkanforderungen des Fahrers. Geraten die Reifen in den Grenzbereich zwischen Haft- und Gleitreibung wird das Verhalten des Fahrzeugs nichtlinear oder bei Überschreiten des kritischen Schlupfes gar instabil, da mit zunehmenden Schräglaufwinkeln bzw. Radschlupfwerten nicht mehr Kraft zwischen Reifen und Fahrbahn

übertragen werden kann, Bild 2-20. Die Folgen sind geringere Verzögerungs- bzw. Beschleunigungskräfte auf Grund von blockierenden oder durchdrehenden Rädern und der Verlust von Lenkbarkeit und Spurlaufhaltbarkeit des Fahrzeugs, da die benötigten Seitenführungskräfte nicht aufgebaut werden können. Aktive Sicherheitssysteme zur Fahrdynamikregelung heutiger Kraftfahrzeuge wie ABS, ASR und ESP sollen in diesen Situationen das Fahrzeug wieder stabilisieren, um den mit der Situation möglicherweise überforderten Fahrer die Kontrolle über das Fahrzeug zurück zu geben. Neben Konzepten zum kombinierten Lenk- und Bremseneingriff durch aktive elektromechanische Lenksysteme verwenden aktuelle Fahrdynamikregelungen die Bremse als radindividuellen Stelleingriff [2.23, 2.15].

Die Verwendung elektrischer Einzelradantriebe bricht die Antriebsstrang-Topologie eines konventionellen Antriebes mit einem Zentralmotor auf und ermöglicht eine radindividuelle Stellung sowohl positiver als auch negativer Drehmomente mit hoher Dynamik. Im Gegensatz zur Bremse, die überschüssige Antriebsleistung in Wärme umwandelt, bieten elektrische Maschinen die Möglichkeit, die Antriebsleistung gezielt zu verringern oder einen Teil der kinetischen Energie zu rekuperieren. Somit wäre auch mit kooperativen



Bild 2-20
Qualitative Darstellung der Kraft/Schlupf-Kennlinie am Reifen

Eingriffen von Bremse und Elektromotor eine verschleißärmere und effizientere Fahrdynamikregelung realisierbar. Unerlässlich bleibt jedoch die bereits heute in Serienfahrzeugen gängige Sensorik zur Erfassung oder Schätzung fahrdynamikrelevanter Kenngrößen, wie Lenkwinkel, Gierrate, Raddrehzahlen, Schwimmwinkel oder Schlupf. Die Kenntnis von Drehmoment und Drehzahl jedes Antriebes mit hoher Genauigkeit ergibt neue Ansätze zur Fahrdynamikschätzung mit Hilfe von Beobachtern und darauf aufbauend neue Methoden zur Fahrdynamikregelung, wie beispielsweise in **Bild 2-21** als Kaskadenstruktur dargestellt. Die innere Regelschleife beschreibt den Einzelradantrieb als drehmomentgeregelten Elektromotor. Auf Basis der vorliegenden Messwerte wird mit Hilfe eines mathematischen Modells für die Rad- und Fahrdynamik im Beobachter der Schlupf an jedem Rad geschätzt. Der Anteil des Schlupfes in Umfangsrichtung

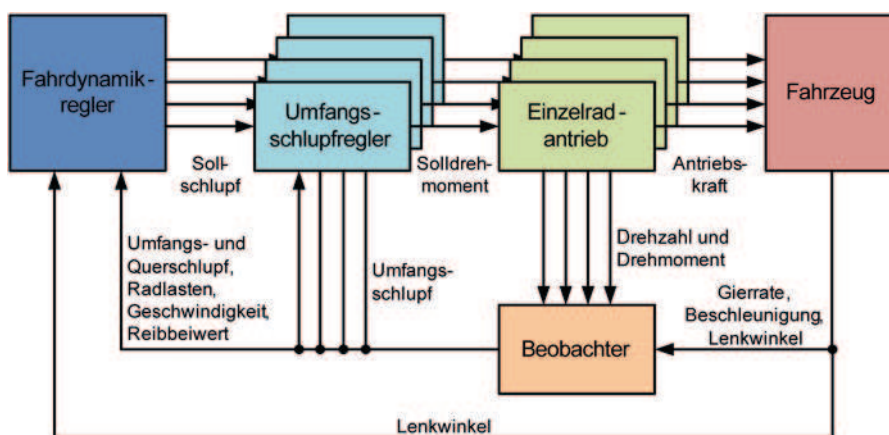
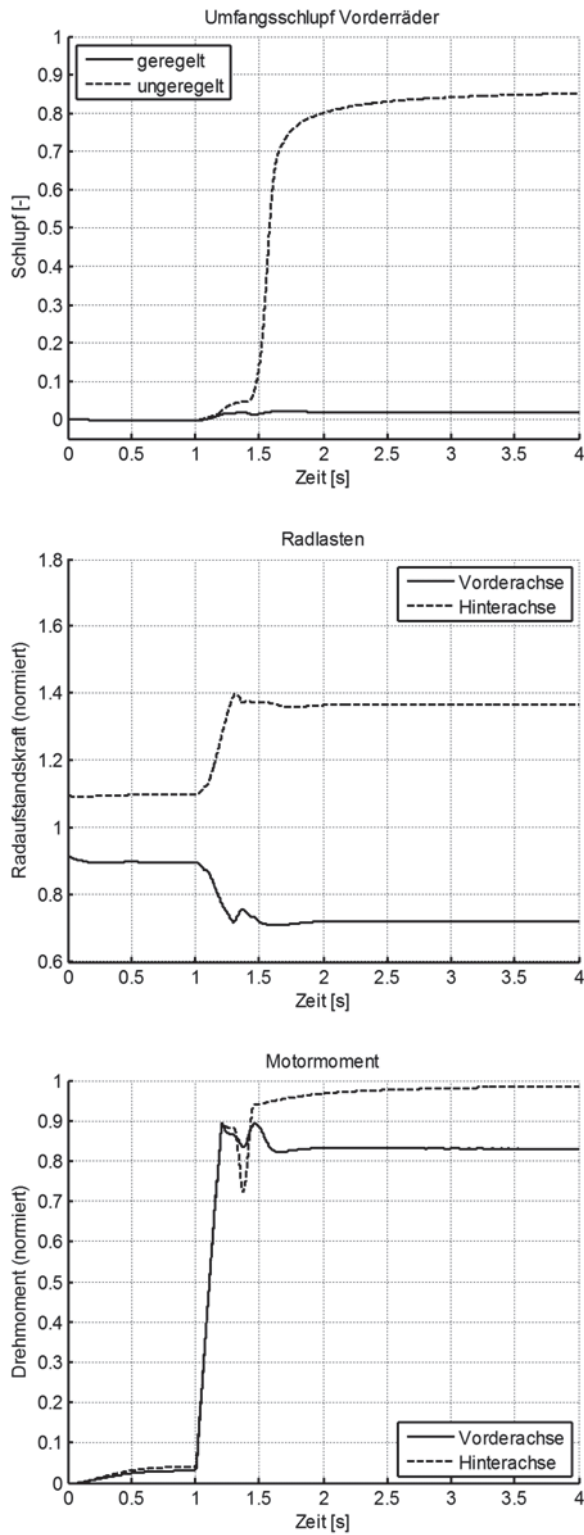


Bild 2-21
Konzept zur Fahrdynamikregelung mit elektrischen Einzelradantrieben



stellt die Regelgröße für die nächste Regelschleife dar. Schließlich erfolgt die Vorgabe der Sollwerte für den radindividuellen Umfangsschlupf unter Ausnutzung des maximalen Kraftschlusspotentials durch einen überlagerten Fahrdynamikregler.

Im Folgenden wird anhand von Beispielen kritischer Fahrmanöver, wie das Anfahren am Hang oder dem ISO Doppelspurwechsel, die entwickelte Fahrdynamikregelung mit Hilfe der Simulationsumgebungen *IPG CarMaker* und *Matlab/Simulink* getestet. Es wird, wie bereits in Abschnitt 2.4.2, ein Fahrzeug der Kompaktklasse betrachtet, das mit elektrischen Einzelradantrieben an allen vier Rädern ausgestattet ist. Jeder Radantrieb kann ein Dauerdrehmoment von 300 Nm aufbringen und kurzzeitig mit dem doppelten Drehmoment überlastet werden.

Im ersten Fahrversuch soll der Fahrer an einem Hang anfahren. Insbesondere Fahrzeuge mit Frontantrieb neigen auf Grund der Verschiebung der Radlasten auf die Hinterachse zum Durchdrehen der Antriebsräder. Dieser Effekt wird durch eventuelle Zuladung im Heck oder schlechter Fahrbahnbeschaffenheit noch begünstigt. **Bild 2-22** zeigt die zeitlichen Verläufe des Umfangsschlupfes an den Vorderrädern im unregelmäßigten und geregelten Fall, wenn der Fahrer auf gleicher Art und Weise anfahren würde. In Folge der Nickbewegung des Fahrzeuges bei Beschleunigung, stellt sich die dargestellte Radlastverteilung an Vorder- und Hinterachse ein. Die Regelung des Umfangsschlupfes berücksichtigt dies und passt die Drehmomente radindividuell an. Weitere Untersuchungen [2.16] zeigen, dass dieser Regelungsansatz ebenfalls auf plötzliche Änderungen des Reibwertes an den Reifen während einer Beschleunigung reagieren kann.

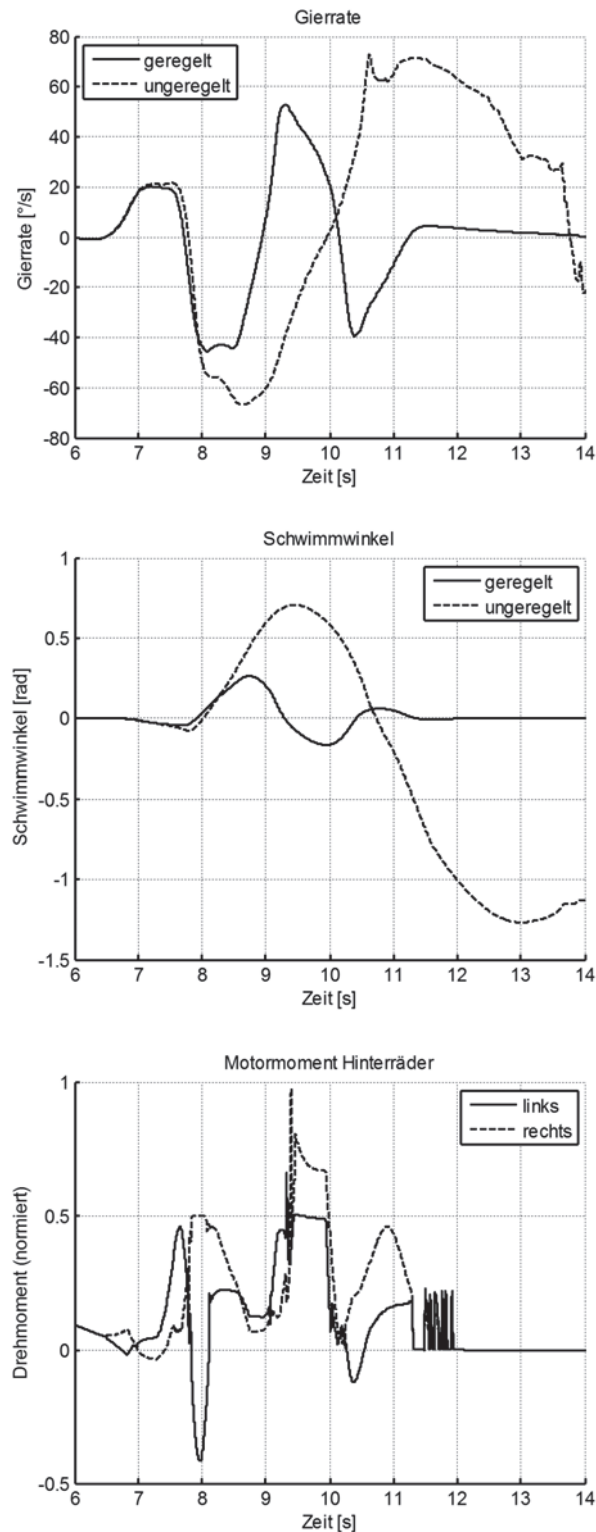
Bild 2-22

Umfangsschlupf an den Vorderrädern, Radlasten und Antriebsmoment während des Anfahrens am Hang

Ein typisches Fahrmanöver zur Untersuchung des Fahrzeugverhaltens in querdynamischen Grenzsituationen stellt der Doppelspurwechsel nach ISO 3888 dar, der auch „Elchtest“ genannt wird. Hierbei muss bei einer vorgeschriebenen Geschwindigkeit ein von den Abmaßen des Fahrzeugs abhängiger Parcours aus Korridoren absolviert werden. Das plötzliche Wechseln der Fahrspur mit heftigen Lenkbewegungen bei hoher Geschwindigkeit bedingt hohe Querschleunigungen und damit hohe Seitenführungskräfte der Reifen. Neigt das Fahrzeug zum Übersteuern, kann der Fahrer wie im eingangs beschriebenen Beispiel das Fahrzeug unter Umständen nicht mehr stabilisieren. Unter Verwendung eines einfachen Fahrzeugmodells kann überprüft werden, ob die querdynamischen Kenngrößen Gierrate und Schwimmwinkel mit eingestelltem Lenkwinkel und bei aktueller Fahrzeuggeschwindigkeit einen stabilen Fahrzustand ergeben. Ist dies nicht mehr der Fall, leitet der Fahrdynamikregler in Bild 2-20 durch Anpassung der Sollwerte für den Umfangsschlupf und damit der Reifenkräfte ein zusätzliches Giermoment ein. Die Verringerung der Gierrate verhindert ein Übersteuern des Fahrzeuges und begrenzt den Schwimmwinkel, was die Stabilität des Fahrzeuges erhält [2.15]. In **Bild 2-23** sind die zeitlichen Verläufe der querdynamischen Kenngrößen für einen Doppelspurwechsel bei 80 km/h dargestellt. Der Eingriff des Fahrdynamikreglers begrenzt die Gierrate und somit den Schwimmwinkel des Fahrzeuges während des Gegenlenkens, was im unregelmäßigen Fall zum Ausbrechen des Fahrzeuges etwa zum Zeitpunkt 9 s führt. Im geregelten Fall wird dies durch gezieltes Einbringen von Differenzdrehmomenten und damit

Bild 2-23

Gierrate, Schwimmwinkel und Motormomente (normiert bezüglich des Maximaldrehmoments) an den Hinterrädern bei ISO 3888 Doppelspurwechsel



einem entgegenwirkenden Giermoment verhindert, was am Verlauf der Drehmomente an den Hinterrädern in Bild 2-23 gut erkennbar ist.

2.4.4 Zusammenfassung

Der Einsatz elektrischer Einzelradantriebe als Antriebsstrang erhöht Effizienz, Sicherheit und Komfort beim Fahren. Neben der drastischen Verbrauchsminde- rung durch die hohe Energiewandlungs- effizienz elektrischer Antriebe, werden im vorliegenden Beitrag weitere Vorteile im Bereich der Fahrsicherheit und des Fahr- komforts aufgezeigt, welche durch die hohe Stelldynamik und die ausgezeichnete Regel- barkeit elektrischer Antriebe erschlossen werden können. Exemplarisch wird anhand einer sehr genauen Simulation mit *CarMaker* und *Matlab/Simulink* gezeigt, wie heute verwendete Fahrdynamikre- gelkonzepte sehr einfach mit Hilfe eines Einzelradantriebes implementiert und in ihrer Wirkung sogar übertroffen werden können. Neue Fahrdynamikregelkonzepte auf der Basis der hohen Stelldynamik und der sehr guten Sensorqualität elektrischer Antriebe versprechen zukünftig weitere Verbesserungen der Funktionen ohne weitere Zusatzkosten zu erzeugen.

Daneben bieten Einzelradantriebe, ins- besondere Radnabenantriebe durch ihren geringen Bauraumbedarf und ihr flexibles Packaging neue Freiheitsgrade bei der Gestaltung der Fahrgastzelle und letzt- endlich der gesamten Fahrzeugarchitektur. Durch die Auflösung des traditionellen Antriebsstrangs als Rückgrat heutiger Fahrzeuge und die dadurch gewonnene Flexibilität, wird die Zukunft stärker indi- vidualisierten und auf spezielle Aufgaben und Anforderungen zugeschnittenen Fahrzeugen gehören. Neue Entwicklungs- und mit ihnen verzahnte und auf sie abge- stimmte Produktionsmethoden werden benötigt, um diese Potentiale wirtschaftlich zu nutzen.

Literaturhinweise

- [2.1] Pregla, R.: Grundlagen der Elektro- technik. Heidelberg: Hüthig, 8. Auflage, 2009
- [2.2] Philippow, E.; Bonfig, K. W.; Becker, W.-J.: Grundlagen der Elektrotechnik. Berlin: Technik, 10. Auflage, 2000
- [2.3] Müller, G.; Ponick, B.: Grundlagen elektrischer Maschinen. Weinheim: Wiley-VCH, 9. Auflage, 2005
- [2.4] Schröder, D.: Elektrische Antriebe – Grundlagen. Berlin/Heidelberg: Springer, 4. Auflage, 2009
- [2.5] Schröder, D.: Leistungselektronische Schaltungen – Funktion, Auslegung und Anwendung. Berlin/Heidelberg: Springer, 2. Auflage, 2008
- [2.6] Michel, M.: Leistungselektronik – Einführung in Schaltungen und deren Verhalten. Berlin/Heidelberg: Springer, 5. Auflage, 2011
- [2.7] Ehsani, M.; Yimin, G.; Miller, J. M.: Hybrid Electric Vehicles: Architecture and Motor Drives. Proceedings of the IEEE, Vol. 95, S. 719–728, 2007
- [2.8] VDE-Studie Elektrofahrzeuge: Bedeutung, Stand der Technik, Handlungsbedarf. VDE (Verband der Elektrotechnik, Elektronik, Informati- onstechnik) e.V., 2011
- [2.9] Schröder, D.: Leistungselektronische Schaltungen. Berlin: Springer, 2008
- [2.10] Leonhard, W.: Regelung elektrischer Antriebe. Berlin: Springer, 2000
- [2.11] Schramm, D.; Hiller, M.; Bardini, R.: Modellbildung und Simulation der Dynamik von Kraftfahrzeugen. Berlin/ Heidelberg: Springer, 2010
- [2.12] Knödel, U.; Stein, F.-J.; Schlenkermann, H.: Variantenvielfalt der Antriebskon- zepte für Elektrofahrzeuge. In: ATZ 113 (2011) Nr. 7/8, S. 552-557
- [2.13] Frömmig, K.; Henze, R.; Küçükay, F.: Systematische Analyse quer- und längsverteiler Antriebsysteme. In: ATZ 113 (2011) Nr. 10, S. 792-799
- [2.14] Pautzke, F.: Radnabenantriebe. Aachen: Shaker, 2010

- [2.15] Reif, K.: Fahrstabilisierungssysteme und Fahrerassistenzsysteme. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2010
- [2.16] Schünemann, M.; Kasper, R.: Neuartige Methoden zur Regelung der Fahrzeuglängsdynamik für Elektrofahrzeuge mit radindividuellen Direktantrieben. In: Fachtagung Mechatronik 2013, Aachen, S. 61-66.
- [2.17] Borchart, N.; Kasper, R.; Heinemann, W.: Design of a wheel-hub motor with air gap winding and simultaneous utilization of all magnetic poles. IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC), Greenville, SC (USA), 04.-08.03.2012
- [2.18] Schröder, C.: Fraunhofer IISB entwickelt Hybridfahrzeug auf Audi-TT-Basis. ATZonline vom 03.09.2008: <http://www.atzonline.de/Aktuell/Nachrichten/1/8346/Fraunhofer-IISB-entwickelt-Hybridfahrzeug-auf-Audi-TT-Basis.html>, abgerufen am 25.06.2012
- [2.19] Smetana, T.; Biermann, T.; Höhn, B.-R.; Kurth, F.; Wirth, C.: Schaeffler active eDifferenzial: The active differential for future drive trains. 9th Schaeffler Symposium, 13.-14. April 2010
- [2.20] Gombert, B.; Fischer, R.; Heinrich, W.: Elektrische Radnabenmotoren – Konstruktionskriterien und Fahrzeugintegration. In: ATZelektronik (2010) Nr. 1, S. 8-14
- [2.21] Brünglinghaus, C.: Keine Zukunftsmusik: elektrische Radnabenmotoren. ATZonline vom 24.10.2012: <http://www.springerprofessional.de/keine-zukunftsmusik-elektrische-radnabenmotoren/2338676.html>, abgerufen am 05.09.2013
- [2.22] Gröninger, M.; Horch, F.; Kock, A.; Pleteit, H.: Elektrischer Radnabenmotor. In: ATZelektronik (2012) Nr. 1, S. 46-50
- [2.23] Winner, H.; Hakuli, S.; Wolf, G.: Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Wiesbaden: Vieweg, 2009
- [2.24] Pautzke, F.: Radnabenantriebe. Aachen: Shaker, 2010
- [2.25] Feustel, J.; Lang, S.; Hand, M.: Der Supersportwagen SLS AMG Electric Drive. In: ATZ 01 (2013), S. 8-14
- [2.26] Vollmer, A.: Konzeptfahrzeug mit über 3000 Nm. In: Automobil-Elektronik 05 (2011), S. 32-33
- [2.27] Heim, R.; Hanselka, H.; El Dsoki, C.: Potential von Radnabenantrieben für Elektrostraßenfahrzeuge. In: ATZ 10 (2012), S. 752-758
- [2.28] Heißing, B.; Ersoy, M.; Gies, S.: Fahrwerkhandbuch, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013
- [2.29] Knödel, U.; Stein, F.-J.; Schlenkermann, H.: Variantenvielfalt der Antriebskonzepte für Elektrofahrzeuge. In: ATZ 07-08 (2011), S. 552-557
- [2.30] Frömmig, K.; Henze, R.; Küçükay, F.: Systematische Analyse quer- und längsverteilerender Antriebssysteme. In: ATZ 10 (2011), S. 792-799