

Der Antrieb eines Fahrzeugs durch einen Elektromotor ist kein Gedanke unserer Zeit. Er wurde bloß getrieben durch die öffentliche Diskussion zur Reduzierung des Treibhausgases CO_2 wieder aufgegriffen. Das erste Straßenfahrzeug, das die 100-km/h-Marke bei einer Rekordfahrt überschritten hat, war ein torpedoartiger Einsitzer im Jahre 1899. Angetrieben wurde der Rekordwagen von zwei 25-kW-Elektromotoren an der Hinterachse. Dass sich der Elektroantrieb bei Straßenfahrzeugen zu dieser Zeit nicht durchsetzen konnte, hatte mehrere Gründe, wovon einer heute noch von Bedeutung ist: Das sperrige Volumen und die große Masse des Energiespeichers, der Batterie. Enorme Fortschritte gab es in der Zwischenzeit jedoch auf dem Gebiet der Elektronik, was für die Ansteuerung der Elektromotoren und die Lebensdauer der Batterien von Bedeutung ist. Für Rennfahrzeuge mit ihren von Alltagsfahrzeugen abweichenden Anforderungen¹ sieht die Betrachtung von Elektroantrieben besonders vor dem Hintergrund einiger Umwelt-Kritikpunkte am Rennsport wesentlich anders aus.

¹ Vgl. Handbuch Rennwagenteknik Bd. 1, Kap. A.

1 Grundlagen *Fundamentals*

Betrachtet man das Drehmomentangebot über der Drehzahl von Elektromotoren, so stellen sich diese für ein Straßenfahrzeug wesentlich geeigneter dar als Verbrennungsmotoren. Elektromotoren weisen eine geradezu ideale Zugkraftkennlinie über der Drehzahl bzw. Fahrgeschwindigkeit auf und benötigen dabei nicht einmal ein Schaltgetriebe. Das bedeutet auch einen Beschleunigungsvorgang ohne störende Zugkraftunterbrechung (vgl. Abb. E.44). Für eine bestimmte Fahrstrecke, wie sie typischerweise für Wettbewerbsfahrzeuge bekannt ist, kann die Batterie maßgeschneidert werden. Bei der Entwicklung von Elektrofahrzeugen wird noch mehr als bisher im Fahrzeugbau üblich auf Effizienz und Leichtbau geachtet. Kriterien, die für Rennfahrzeuge seit jeher entscheidend waren und sind. Ein Elektroantrieb bietet sich allein aus diesen Überlegungen heraus für Rennfahrzeuge an. Das Fehlen des infernalisches Motorengeräusches mag für die Einen ein Nachteil sein, für Andere ist das sogar ein weiteres gewinnbringendes Argument. Auch das Volumen der Batterie stellt ein beträchtlich geringeres Platzproblem dar als bei Pkw. Im Rennwagen benötigt man bloß Platz für maximal zwei Personen und ein Kofferraum wird erst gar nicht gebraucht. Auch eine Beheizung des Fahrzeuginnenraums wird nur bei Rally-Fahrzeugen in der kalten Jahreszeit erforderlich. Bei allen anderen Rennfahrzeugen wird die Abwärme des Verbrennungsmotors nicht vermisst. Im Gegenteil: Der höhere Wirkungsgrad des Antriebsstrangs ermöglicht eine Reduzierung des Luftwiderstands durch den geringeren Kühlbedarf im Vergleich zu Verbrennungsmotoren. Wärmetauscher und Lufteinlässe können kleiner ausgeführt werden. Der Rennsport könnte auch hier wieder einmal die Vorteile kurzer Entwicklungszeit gepaart mit Mut zu außergewöhnlichen Lösungen ausspielen und eine Vorreiterrolle für spätere Serienentwicklungen einnehmen. Der aktuelle Rundenzeitrekord eines Produktionssportwagens mit Elektroantrieb (Abb. E.125) auf der von Rennfahrzeugen wie Alltagsfahrzeugen gleichermaßen genutzten Messlatte Nürburgring Nordschleife liegt nur ca. 30 s über dem von Sportwagen mit Verbrennungsmotor [3].

Neben der erwähnten Batterieproblematik darf ein weiterer Nachteil vor allem am Anfang der Ära der „ungewohnten“ Technik nicht unterschätzt werden, nämlich die ernste Gefahr, die vom Hochvoltbordnetz ausgeht. Isolationsfehler können zu Stromschlägen, Körperdurchströmung und Bränden führen.

Der grundsätzliche Aufbau des Antriebsstrangs eines Elektrofahrzeugs oder EV (electric vehicle) unterscheidet sich nur wenig von dem in Abschn. E.1 dargestellten mit Verbrennungsmotor, Abb. B.1. Eine Traktionsbatterie (3) speichert Energie an Bord. Sie entspricht somit dem Kraftstofftank. Befüllt wird der Speicher von außen über den Netzanschluss (1) und über ein Ladegerät (2), das den Netzstrom (Wechselstrom) in eine für die Batterie brauchbare Form (Gleichstrom, andere Spannung) umwandelt. Der Fahrerwunsch wird über das Fahrpedal einem Steuergerät (4) bekannt gegeben. Meist wird somit wie beim Verbrennungsmotor das Antriebsmoment vorgegeben. Das Steuergerät wandelt die Energie aus der Batterie in für den Motor erforderliche Strom- und Spannungswerte um. Die Antriebssteuerung kann also mit der Kraftstoffzumessung bzw.

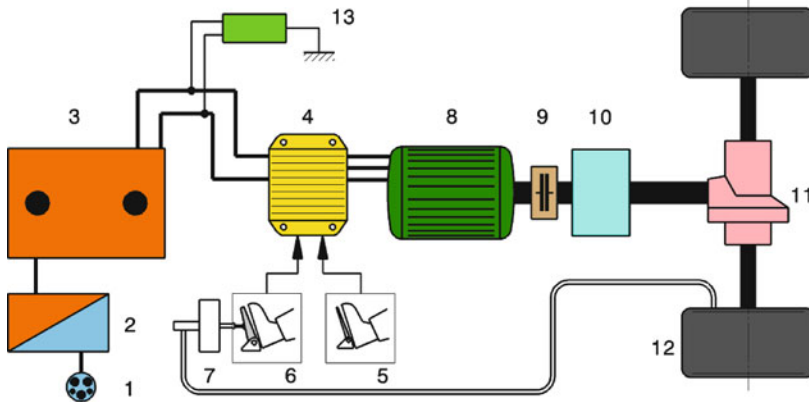


Abb. B.1 Antriebsstrang für Elektrofahrzeuge schematisch. 1 Netzanschluss *power connector*, 2 Bordladegerät *on-board charger*, 3 Traktionsbatterie (Hochvoltb.) *traction (HV) battery*, 4 Antriebssteuerung *motor controller*, 5 Fahrpedal *accelerator pedal*, 6 Bremspedal *brake pedal*, 7 mechanisches Bremssystem *mechanical brake system*, 8 Elektromotor *electric motor*, 9 mechanische Trennkupplung *mechanical safety clutch*, 10 Getriebe *transmission*, 11 Achsgetriebe *final drive*, 12 Antriebsräder *driving wheels*, 13 Isolationsüberwachung *insolation monitoring device*

dem Drosselorgan von Verbrennungsmotoren verglichen werden. Der Elektromotor (8) gibt das für den Vortrieb angeforderte Drehmoment ab. Er kann dieses direkt über ein Achsgetriebe (11) auf die Antriebsräder (12) verteilen oder das Moment bzw. die Drehzahl wird über ein Getriebe (10) angepasst und dann an die Räder weitergeleitet. Meist genügt ein einstufiges Getriebe mit fester Übersetzung. Genau genommen handelt es sich bei (8) um eine elektrische Maschine, denn sie kann als Motor und als Generator eingesetzt werden. Anders als bei herkömmlichen Antrieben kann bei Elektroantrieben auch eine Signalverbindung zwischen dem Bremspedal (6) und der Motorsteuereinheit (4) bestehen. Beim Bremsen kann so ein Teil der Bewegungsenergie des Fahrzeugs zurück gewonnen werden, wenn der Motor (8) in den generatorischen Betrieb übergeht und mit dem generierten Strom die Batterie speist (Nutzbremsung oder Rekuperation). Die übliche mechanische Bremsanlage (7) wird in jedem Fall gebraucht: Einer Nutzbremsung sind gewissen Grenzen auferlegt (siehe unten) und sie arbeitet nicht bis zum Stillstand. Was überhaupt nicht benötigt wird, sind ein Anfahr-element (Anfahrkupplung) und ein Rückwärtsgang. Elektromotoren können auch bei stillstehender Welle ein Moment freisetzen und ihre Drehrichtung kann durch Umpolen der Anschlüsse geändert werden. Bei manchen Motorarten (z. B. permanenterregte Motoren) wird aus Sicherheitsgründen eine mechanische Trenneinrichtung (9) benötigt, damit im Fehlerfall das Motormoment rasch von den Antriebsrädern genommen werden kann.

Ergänzend zu den dargestellten Komponenten kommen noch Hilfssysteme (z. B. Batteriemangement zur Temperatur und Ladungsüberwachung) und weitere Sicher-

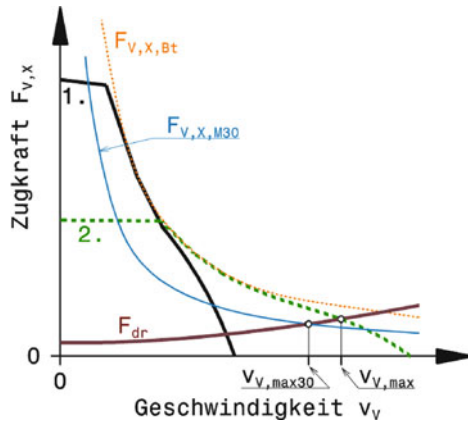


Abb. B.2 Zugkraftdiagramm eines Elektrofahrzeugs mit fremderregtem Gleichstromantrieb und 2-Ganggetriebe [4]. $F_{V,x,Bt}$ Zugkraft aus maximaler Batterieleistung, $F_{V,x,M30}$ Zugkraft aus 30-min-Leistung des Antriebs, F_{dr} Fahrwiderstand, $v_{V,max}$ Höchstgeschwindigkeit, $v_{V,max30}$ maximale Dauerleistungsgeschwindigkeit über 30 min. Im Gegensatz zu Verbrennungsmotoren ist bei Elektromotoren neben der Maximalleistung auch eine Dauerleistung über 30 min zu unterscheiden

heitseinrichtungen (12 – Isolationsüberwachung, galvanische Trenneinrichtungen, Motorschutz, ...) hinzu.

Auch wenn Elektrofahrzeuge je nach Motor und Einsatzbereich ohne Getriebe auskommen, ist eine Untersetzung zwischen Motor und Rädern jedoch allein deshalb vorteilhaft, weil der Motor kleiner und damit leichter ausgeführt werden kann. Für hohe Endgeschwindigkeiten können sogar Schaltgetriebe erforderlich werden. Allerdings reichen in der Regel zwei Gänge aus. Die Getriebeübersetzung i_G liegt bei Zweigang-Getrieben bei etwa 22 damit das Fahrzeug bei maximalen Drehzahlen des Elektromotors von über 20.000 min^{-1} 250 km/h erreicht [2].

Der Betriebsbereich des Fahrzeugs wird begrenzt durch die Maximalleistungsabgabe der Batterie, die Maximalleistung der Motorsteuerung oder durch die maximale Antriebsleistung des Motors [4]. Bei elektrischen Maschinen wird zwischen einer Kurzzeitleistung und einer Leistung, die über einen bestimmten Zeitraum abgegeben werden kann, unterschieden. Abb. B.2 zeigt beispielhaft eine Auslegung mit zwei Gängen im Zugkraftdiagramm. Zusätzlich zur Zugkraft, die aus der Maximalleistung der Batterie folgt, ist auch jene aus der Dauerleistung des Antriebs über 30 min angeführt. Zwei Gänge reichen für diesen Motor um die Grenze der maximal möglichen Zugkraft aus der Batterieleistung über den gesamten fahrbaren Bereich zu erreichen. Einzig für eine höhere Endgeschwindigkeit (Schnittpunkt F_{dr} mit $F_{V,x,2.Gang}$) könnte ein dritter Gang oder eine andere Übersetzung im 2. Gang eingeführt werden.

Die fahrbare Maximalgeschwindigkeit über 30 min liegt darunter, weshalb bei Elektrofahrzeugen oft zwei Höchstgeschwindigkeiten angeführt werden: Die maximal kurzzeitig erzielbare ($v_{V,max}$) und jene, die über eine halbe Stunde aufrechterhalten werden kann ($v_{V,max30}$).

2 Antriebskonfigurationen *Layouts of Drive Lines*

Die Variantenvielfalt von Elektromotoren eröffnet eine mindestens ebenso große Vielfalt von denkbaren Antriebsstrangausführungen. Elektromotoren können Achsen oder direkt einzelne Räder antreiben. Ein zwischengeschaltetes Getriebe konstanter Übersetzung ermöglicht die Erhöhung von Anfahrmoment oder Maximalgeschwindigkeit. Schaltgetriebe bieten die Möglichkeit Merkmale wie Package, Gewicht und Wirkungsgrad der elektrischen Maschine günstig zu beeinflussen. Höchste Fahrgeschwindigkeiten bei brauchbarem Anfahrmoment können somit dargestellt werden. Abb. B.3 bietet eine systematische Übersicht von Antriebssträngen mit Elektromotoren. Werden nur einzelne Achsen angetrieben (erste Zeile), kann die elektrische Maschine die Stelle des Verbrennungsmotors einnehmen. Eine weitere Möglichkeit ergibt sich durch die Kombination zweier Elektromotoren auf einer Achse (Tandemantrieb), wodurch das Differenzial entfallen kann. Die elektrische Maschine kann aber auch direkt im Rad untergebracht werden (Radnabenantrieb). Der Elektromotor kann direkt oder über ein zwischengeschaltetes Getriebe das Antriebsmoment für die Räder bereitstellen. Elektrische Antriebe können aber auch alle Räder antreiben (mittlere Zeile): Entweder konventionell wie von Allradantrieben mit Verbrennungsmotoren bekannt (Abschn. E.6) oder tatsächlich jedes Rad einzeln mit Radnabenmotoren. Diese Variante ermöglicht die ideale Form eines Allradantriebs mit bedarfsgerechter (d. h. radlast- und fahrzustandsabhängiger) Drehmomentbeaufschlagung

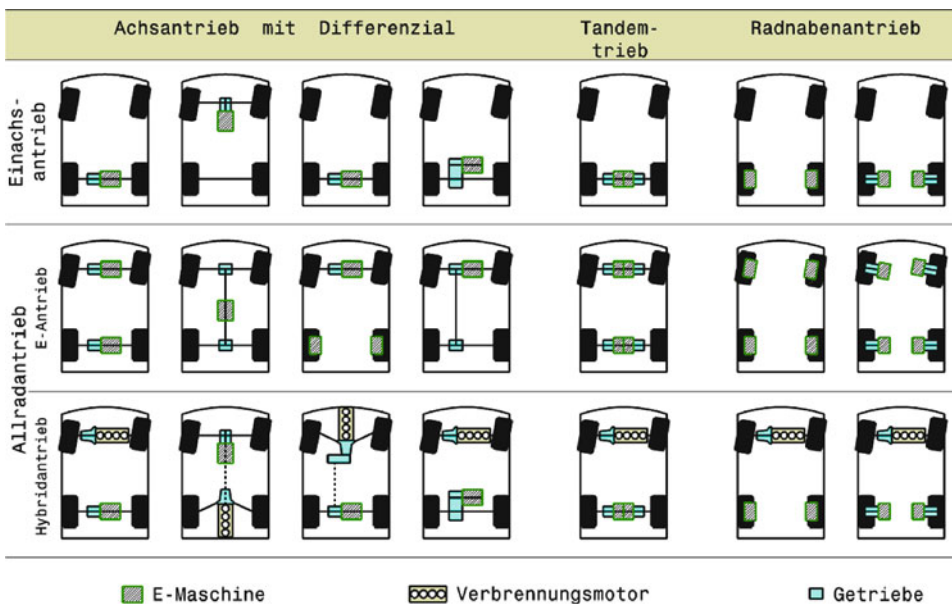


Abb. B.3 Antriebskonzepte für E-Fahrzeuge [2]. Unterschiedliche Bauarten und Ansteuerungen von Elektromotoren lassen viele Gestaltungsvarianten für Fahrzeugantriebe zu

der Räder (Torque Vectoring). Radnabenmotoren konnten sich jedoch bisher nicht durchsetzen. Sie erhöhen die ungefederten Massen, werden durch Temperatur- und Schwingungen zusätzlich beansprucht und müssen unter ungünstigen Bauraumverhältnissen untergebracht werden.

Der Vollständigkeit halber finden sich in dem Schema auch Hybridallradantriebe (letzte Zeile), also die Kombination von elektrischen Maschinen mit Verbrennungsmotoren. Die dargestellten Varianten sind dadurch gekennzeichnet, dass eine Motorart jeweils eine Achse antreibt. Die Verbindung zwischen Elektro- und Verbrennungsmotor erfolgt also nur durch die Straße, weshalb diese Allradantriebe auch *Through-the-Road-Hybrid* (engl. für: durch die Straße) heißen.

Bei der Konfiguration eines Antriebsstrangs für ein Rennfahrzeug werden u. a. folgende Aspekte berücksichtigt:

- Gesamtwirkungsgrad: Mechanisch (Welle bis Räder) und elektrisch (Batterie über Leistungselektronik bis Rotor)
- Gesamtgewicht
- Massenverteilung: Gefederte/ungefederte Massen, Massenträgheitsmomente
- Bauraum
- Bauhöhe: Schwerpunkthöhe und Luftwiderstand
- Massenträgheitsmoment der rotierenden Teile
- Grenzen der Rekuperation
- Anzahl von Schaltvorgängen auf einer bekannten Strecke.

Das es dabei nicht nur eine Lösung gibt, zeigt das Beispiel Formel E. Seit der Saison 2015/16 steht den Teams die Konfiguration des Antriebsstrangs frei. Motor, Leistungselektronik, Getriebe, Achsgetriebe, Kühlsystem und Software zählen zu dem betroffenen Umfang. Sämtliche Teilnehmer haben unterschiedliche Lösungen für dieselbe Aufgabenstellung gefunden [25].

Ein E-Motor mit hohem Drehmoment ermöglicht Beschleunigungsvorgänge aus dem Stand bis zur Höchstgeschwindigkeit mit einer fixen Übersetzung, d. h. das Schaltgetriebe kann eingespart werden. Der Nachteil eines solchen Motors aber ist sein großer Durchmesser, die hohe Masse und der starke Strom, den er zum Aufbauen des Drehmoments zieht. Dafür kann während des gesamten Bremsvorgangs (ohne Schaltunterbrechungen) rekuperiert werden. Ein schlanker Motor wiederum erzielt hohe Drehzahlen (z. B. Formel E bis 20.000 min^{-1}), bietet aber nur ein geringes Moment, so dass ein Schaltgetriebe erforderlich wird. Die Anzahl der Gänge und damit das Gewicht des Getriebes hängen von der Motorcharakteristik (Drehzahl, Momentenverlauf) und den gewünschten Fahrleistungen ab. Die Anzahl der Schaltstufen in der Formel E reicht von 2 bis 5 Gänge. Ein Schaltvorgang ist aber auch mit einer Zugkraftunterbrechung und einem Zeitverlust verbunden, so dass mit steigender Gangzahl dieser Nachteil größer wird.

In der Formel E schafft das Reglement einige Bedingungen, die bestimmte Konfigurationen des Antriebs vorteilhaft erscheinen lassen. Torque Vectoring, also das gezielte

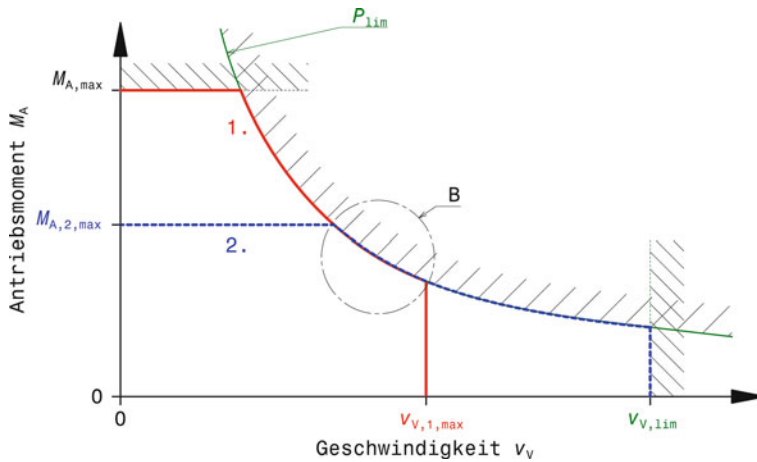
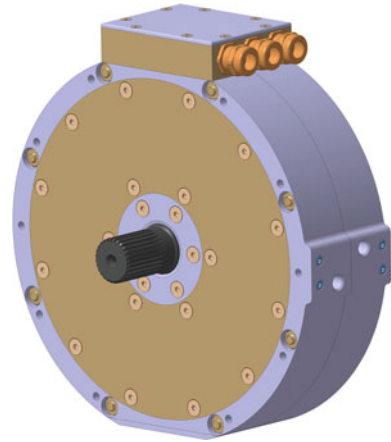


Abb. B.4 Antriebskonfiguration in der Formel E (schematisch). Das nutzbare Antriebsmoment M_A an der Hinterachse ist über der Fahrgeschwindigkeit v_V aufgetragen. Das Reglement gibt die maximale Leistung P_{lim} und die Höchstgeschwindigkeit $v_{v,lim}$ vor. Die Bereifung und die Achslast begrenzen zusammen mit der Fahrbahn das maximal übertragbare Anfahrmoment $M_{A,max}$. Kennung im 1. Gang (rot) und im 2. Gang (blau strichliert). Im Bereich B können weitere Getriebestufen vorteilhaft sein

Zuweisen von Antriebsmomenten an einzelne Räder, ist nicht erlaubt. Zwei Motoren führen damit nur zu mehr Masse ohne eben den Vorteil von Torque Vectoring nutzen zu können. Die maximale Motorleistung ist im Rennen mit 170 kW bei 800 V Nennspannung limitiert. Während eines Qualifikationslaufs darf der Antrieb maximal 200 kW abgeben. Die Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeugs wird mit 225 km/h abgeregelt. Betrachtet man nun mögliche Antriebskonfigurationen stellt sich die Situation wie folgt dar, Abb. B.4. Das Reglement begrenzt die maximale Leistung P_{lim} und die Höchstgeschwindigkeit $v_{V,lim}$. Die Reifen in Kombination mit der Fahrbahn lassen nur ein bestimmtes maximales Antriebsmoment $M_{A,max}$ zu. Damit ist der nutzbare Bereich in einem Antriebsmoment-Geschwindigkeitsdiagramm abgesteckt. Ein permanenterrregter Synchronmotor lässt zwar die Ausnutzung der vorgegebenen Leistungshyperbel zu, soll er aber mit einer festen Übersetzung arbeiten, muss er zum Ausnutzen des möglichen hohen Anfahrmoments überdimensioniert werden. Seine Leistung läge auch höher als erlaubt. Besser ist somit ein leichter kompakter Elektromotor, der mit einem Schaltgetriebe zusammenarbeitet. Das erlaubt darüber hinaus den Betrieb des Motors in hohen Drehzahlbereichen, in denen sein Wirkungsgrad höher ist. Im Bild ist die Kennung mit einem Zweigang-Getriebe dargestellt. Mit dem 1. Gang kann bis zu Geschwindigkeit $v_{V,1,max}$ gefahren werden. Der 2. Gang kann bereits bei geringeren Geschwindigkeiten eingelegt werden. Im Bereich B überlappen sich die Kennungen beider Gänge. Ein niedrigerer Gang bietet den Vorteil des höheren Motorwirkungsgrads wegen der höheren Motordrehzahl. Je nach Motorcharakteristik können auch weitere Getriebestufen im Bereich B interessant sein.

3 Elektromotoren *Motors*



Elektromotoren stellen sich mit ihrer Drehmoment-Drehzahl-Charakteristik als beinahe ideale Fahrmotoren dar. Sie können bereits bei Stillstand und geringen Drehzahlen ihr maximales Drehmoment abgeben und halten die Leistung nahezu konstant über dem Drehzahlbereich. Dadurch kann in vielen Fällen der Antrieb ohne ein mehrstufiges Getriebe ausgeführt werden und ein Anfahrlement (Anfahrkupplung, Wandler) entfällt völlig. Sie weisen auch keine funktionsbedingte Einbaulage auf, wie sie bei Verbrennungsmotoren durch das Kühl- und Schmiersystem vorgegeben ist.

Bei Fahrzeugstillstand wird keine Energie verbraucht. Im Nennlastbereich und in der Teillast ist der Wirkungsgrad von Elektromotoren mit 89 bis 93 % sehr hoch. Zur Verteidigung des Verbrennungsmotors muss allerdings gesagt werden, dass dieser die Energie im Kraftstoff erst über die Zwischenstufe Wärme in mechanische Energie umwandelt. Der Elektromotor erhält hingegen direkt die hochwertige Energie Strom.

Elektromotoren sind kurzzeitig stark überlastbar, was für Beschleunigungsvorgänge oder an extremen Steigungen vorteilhaft genutzt werden kann. Diese Kurzzeitleistung wird meist durch die Maximalleistung der Motoransteuerung (Leistungselektronik) begrenzt. Der Dauerleistung des Motors wiederum sind Grenzen durch die zulässige Motortemperatur gesetzt. Durch Zwangskühlung des Motors kann die Leistungsgrenze nach oben verschoben werden. Zu Beschreibung des Motorverhaltens wird daher bei Fahrmotoren zwischen der Maximalleistung und jener, die über einen Zeitraum von 30 min abgegeben werden kann unterschieden. Das Verhältnis zwischen maximaler und kurzfristiger Leistung liegt etwa bei 1,5 bis 3. Um Motorschäden auszuschließen wird dessen Temperatur überwacht und von der Motorsteuerung nach thermischen Grenzkennlinien beschränkt.

Die beiden charakteristischen Kennlinien eines Fahrzeug-Elektromotors sind in Abb. B.5 für einen umrichter gespeisten Asynchronmotor zu sehen. Das Maximalmoment liegt über dem Doppelten des über einen langen Zeitraum fahrbaren Nennmoments.

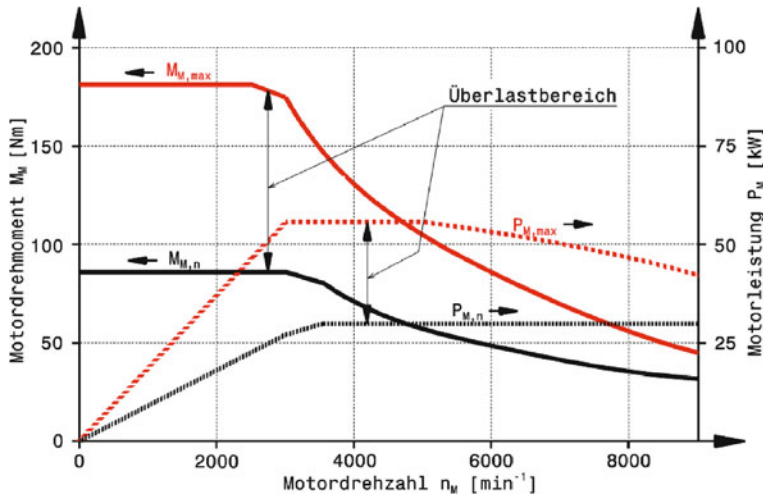


Abb. B.5 Motorcharakteristik einer umrichter gespeisten Asynchronmaschine als Fahrmotor [1]. $M_{M,max}$ maximales Motormoment *peak torque*, $M_{M,n}$ Motornennmoment *continuous torque*, $P_{M,max}$ maximale Motorleistung *peak output power*, $P_{M,n}$ Motornennleistung *nomial output power*

Ebenso verhalten sich die aus den Drehzahlen und den Momenten folgenden Leistungen. Die Nennleistung bleibt sogar bis zur Höchstdrehzahl konstant.

Weitere prinzipbedingte Kennlinien von Elektromaschinen fasst Abb. B.6 zusammen. Vom Stillstand des Rotors weg bis zu der Drehzahl n_{Grund} kann das maximale Motormoment eingestellt werden. Die Leistung wächst proportional mit der Drehzahl, bis die maximale Leistung $P_{M,max}$ erreicht ist. Diese Leistung wird hauptsächlich festgelegt durch die zulässige Wicklungstemperatur und die mechanische Festigkeit der belasteten Teile. Die so genannte Grunddrehzahl folgt aus dem Zusammenhang zwischen Leistung und Drehzahl zu:

$$n_{M,Grund} = \frac{30 \cdot P_{M,max}}{\pi \cdot M_{M,max}} \quad (\text{B.1})$$

$n_{M,Grund}$ Grunddrehzahl des Motors, min^{-1}

$P_{M,max}$ maximale Motorleistung, W

$M_{M,max}$ maximales Motormoment, Nm

Die Drehzahl steigt dabei mit der Ständerspannung U_f an und das Motormoment hängt vom magnetischen Fluss Φ_f und damit vom Strom I_f ab. Sobald die maximale Spannung $U_{f,max}$ erreicht ist, muss sie konstant gehalten werden und sie darf trotz steigender Drehzahl nicht mehr weiter ansteigen. Dies wird durch so genannte Feldschwächung (*field weakening*) erreicht, z. B. durch einen Widerstand im Erregerkreis, womit der magnetische Fluss reduziert wird. Im gleichen Sinn wie der Fluss sinkt auch das Moment. Soll die Leistung konstant bleiben, muss das Moment indirekt proportional zur Drehzahl abneh-

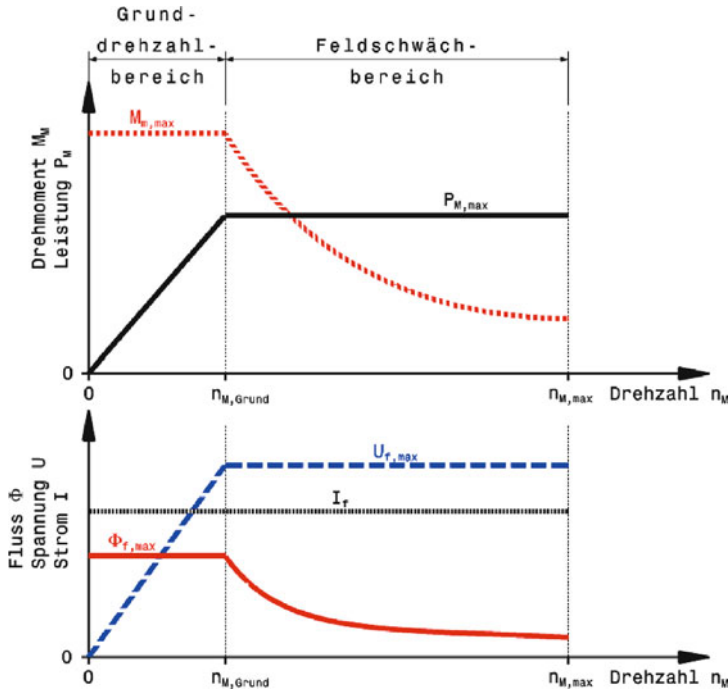


Abb. B.6 Idealierte Kennlinien von elektrischen Maschinen

men. Das Motormoment M_M folgt dann der Beziehung:

$$M_M = \frac{30 \cdot P_{M,n}}{\pi \cdot n_M} \quad (\text{B.2})$$

M_M größtes Dauermotormoment im Feldschwächebereich, Nm

$P_{M,n}$ Motornennleistung, W

n_M Motordrehzahl, min^{-1}

Der Grunddrehzahlbereich ist also der Bereich konstanten Motormoments und im Feldschwächebereich bleibt die Leistung konstant.

Grundsätzlich kommen unterschiedliche Bauarten von elektrischen Maschinen als Antriebsmotoren in Frage.

Elektromotoren lassen sich nach der Art der Eingangsspannung (Gleich- oder Wechselstrommaschinen) und weiter nach der Art der Magnetisierung (Permanentmagnete, Strom in Stator oder Rotor) sowie der Richtung des magnetischen Flusses in Bezug zur Motordrehachse (Radial-, Axial- und Transversalfluss) einteilen.

Die prinzipielle Wirkungsweise ist aber bei allen Motoren dieselbe: Die Antriebskraft entsteht aus der Änderung der Energiedichte im Luftspalt zwischen einem feststehendem Teil (Stator, Ständer) und einem drehenden (Rotor, Läufer, Anker).

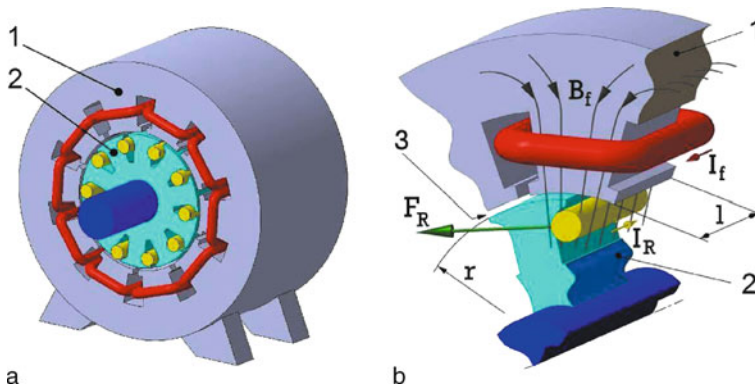


Abb. B.7 Wirkungsweise eines Elektromotors. **a** prinzipieller Aufbau, **b** Detail zur Erläuterung, 1 Ständer *stator*, 2 Läufer *rotor*, 3 Luftspalt *air gap*, B_f magnetischer Fluss im Ständer, I_f Strom im Ständer, I_R Strom im Rotor

Abb. B.7 zeigt den grundsätzlichen Aufbau einer elektrischen Maschine (a) und die Wirkungsweise eines Elektromotors (b).

Spulen im Ständer (1) erzeugen ein Magnetfeld mit der Flussdichte B_f . Stromdurchflossene Leiter im Rotor (2) bauen ebenfalls ein Magnetfeld auf. Beide Magnetfelder überlagern einander im Luftspalt (3). Im Detail b ist eine Ständerspule und ein gegenüber stehender Leiter im Rotor zu sehen. Auf den Leiter wirkt eine Kraft F_R , weil er sich im Magnetfeld des Ständers befindet und von einem Strom I_R durchflossen wird. Die geometrische Anordnung der Spulen und Leiter führt zu einem Drehmoment $F_R \times r$ auf den Rotor (2) um seine Drehachse. Durch passende Umpolung des Rotorstroms I_R in Abhängigkeit von der relativen Stellung zum Stator (1) kann eine umlaufende Drehbewegung erzielt werden.

Die Größe der Rotor-Antriebskraft F_R errechnet sich aus:

$$F_R = I_R \cdot B_f \cdot l \quad (\text{B.3})$$

F_R Umfangskraft auf den Rotor, N

I_R Strom im Rotor, A

B_f magnetische Flussdichte im Stator, Tesla: $1 \text{ T} = 1 \text{ Vs/m}^2$

l Länge der Maschine, m

Das Motordrehmoment folgt somit direkt zu:

$$M_R = F_R \cdot r \quad (\text{B.4})$$

M_R Rotormoment, Nm

r Rotorradius, m



<http://www.springer.com/978-3-658-15534-6>

Antrieb

Trzesniowski, M.

2017, XIX, 485 S. 50 Abb. Book + eBook., Hardcover

ISBN: 978-3-658-15534-6