

Auszug aus dem Vorlesungsskript *Fahrzeugkonzepte*

von Prof. Horst Friedrich, DLR Institut für Fahrzeugkonzepte

erstellt von Volker Bosch, Institut für Fahrzeugkonzepte, Abt. AEW.

4.8 Elektro-mechanische Energiewandler

4.8.1 Grundlagen

Die elektromagnetische Energiewandlung wird durch die folgenden Gleichungen beschrieben

Das **Induktionsgesetz** stellt den Zusammenhang zwischen der Änderung des Magnetfeldes und der dadurch induzierten elektrischen Feldstärke E beziehungsweise der elektrischen Spannung u dar.

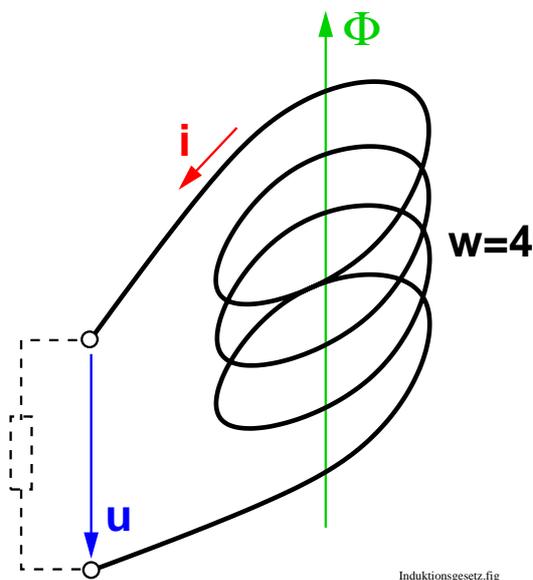


Abbildung 4.1: Anwendung des Induktionsgesetzes: Induktion der Spannung u in einer Spule mit w Windungen durch den veränderlichen magnetischen Fluss Φ .

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{dB}{dt} \quad (4.1)$$

oder in der Integralform

$$\oint_c \vec{E} d\vec{s} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (4.2)$$

Der magnetische Fluss Φ , der die Fläche A durchsetzt, ist definiert als das zweidimensionale Integral der magnetischen Flussdichte B über dieser Fläche A .

$$\iint_A \vec{B} \, d\vec{A} = \Phi \quad (4.3)$$

In der Technik wird für das Induktionsgesetz oftmals die folgende Schreibweise verwendet:

$$u_i = -w \frac{d\Phi}{dt} \quad (4.4)$$

u_i stellt die in einer Wicklung mit w Windungen induzierte Spannung dar, ausgelöst von der zeitlichen Änderung des magnetischen Flusses Φ , der diese Wicklung durchsetzt. Das Minuszeichen soll andeuten, dass die Richtung der Spannung stets so orientiert ist, dass der durch sie erzeugte Strom der Änderung des magnetischen Flusses Φ entgegen wirkt (*Lenz'sche Regel*).

Das **Durchflutungsgesetz** beschreibt den Zusammenhang zwischen dem elektrischen Strom I , bzw. der Durchflutung Θ und der magnetischen Feldstärke H . Im magnetischen Feld ist der Wirbel der magnetischen Feldstärke H gleich der Stromdichte J .

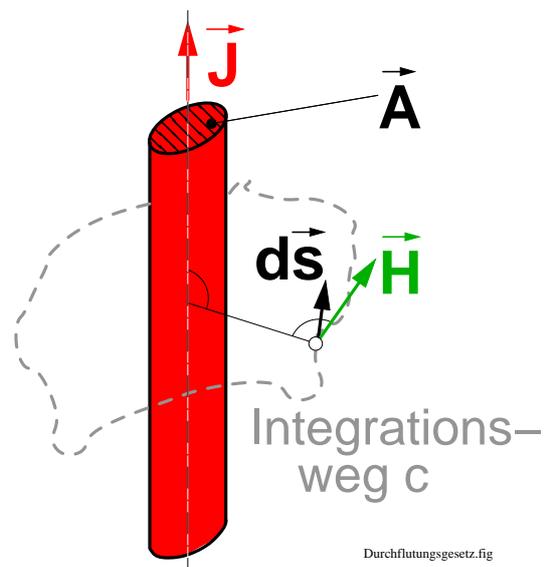


Abbildung 4.2: Anwendung des Durchflutungsgesetzes

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J} \quad (4.5)$$

Oder in der Integralform

$$\oint_c \vec{H} \, d\vec{s} = \iint_A \vec{J} \, d\vec{A} = \theta \quad (4.6)$$

Das geschlossene Linienintegral über der magnetischen Feldstärke stellt die Durchflutung Θ dar. Diese ist die Summe der von dem Ringintegral umschlossenen Ströme. In technischen

Anwendungen ist die Durchflutung Θ , die von einer Wicklung erzeugt wird, das Produkt aus Windungszahl w und Leiterstrom I .

Der Zusammenhang zwischen magnetischer Feldstärke H und magnetischer Flussdichte B wird durch die Materialeigenschaften der Materie bestimmt, die vom Magnetfeld durchsetzt wird.

$$B = \mu_r \mu_0 H \quad (4.7)$$

Die absolute Permeabilität, bzw. die Permeabilität des Vakuums μ_0 ist definiert als

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{Vs/Am} \quad (4.8)$$

Die relative Permeabilität μ_r ist eine Eigenschaft des von dem Magnetfeld durchsetzten Materials. Im Vakuum und, in guter Näherung auch in Luft, ist $\mu_r = 1$. In ferromagnetischen Werkstoffen, wie Eisen, Kobalt oder Nickel kann μ_r sehr große Werte von mehr als 10000 annehmen. Jedoch ist die relative Permeabilität nicht konstant, sondern hängt von der Sättigung des Materials ab. Der genannten Wert gilt also nur am Anfang der Magnetisierungskurve. Abbildung 4.8.1 zeigt eine typische Magnetisierungskurve von Trafoblech. Die Permeabilität des Materials entspricht der Steigung der Kurve.

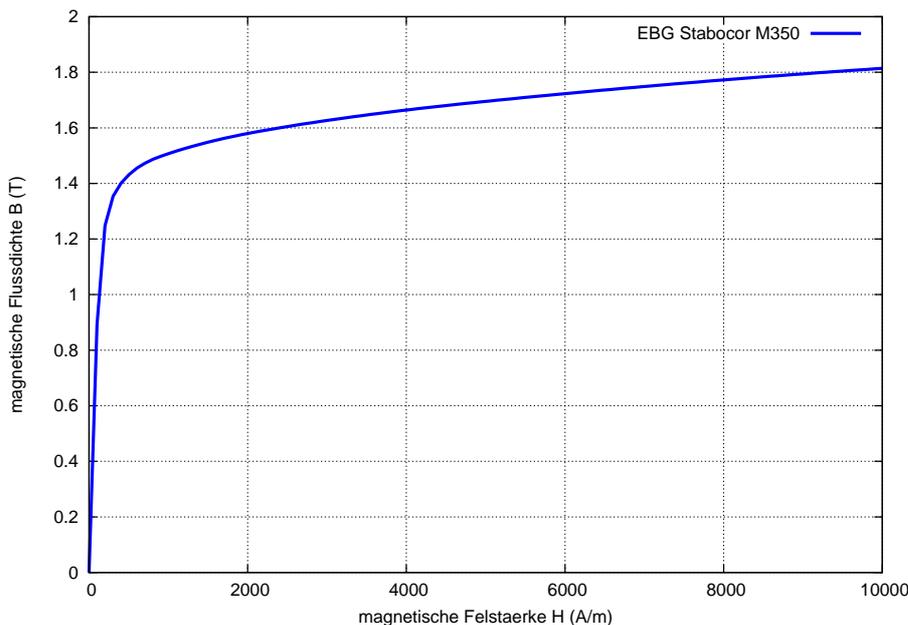


Abbildung 4.3: Magnetisierungskurve von Trafoblech

Die **Lorentzkraft** beschreibt die Kraftwirkung auf eine in einem magnetischen Feld bewegte elektrische Ladung q . Für die technische Anwendung ist in der Regel nur die Kraft \vec{F} auf einen von einem elektrischen Strom der Stromstärke I durchflossenen Leiter relevant, der sich über die Länge l in einem homogenen Magnetfeld der Flussdichte B befindet, wie in Abbildung 4.4 dargestellt.

$$\vec{F} = i (\vec{l} \times \vec{B}) \quad (4.9)$$

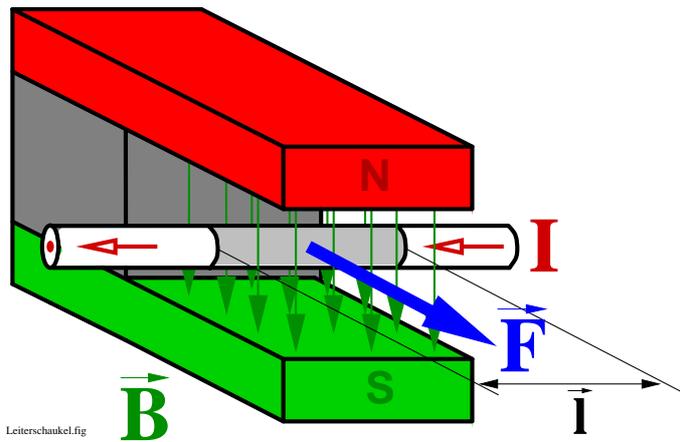


Abbildung 4.4: Kraftwirkung \vec{F} auf einen vom Strom I durchflossenen Leiter, der über die Länge l im homogenen Magnetfeld \vec{B} verläuft.

Abbildung 4.5 zeigt das Prinzip einer Gleichstrom-Nebenschlussmaschine. Auf dem Anker ist lediglich eine einzige Spule mit der Windungszahl w dargestellt. Rotiert der Anker, der den Durchmesser D aufweist, mit der Drehzahl n , so wird in der Spule die Spannung U_i induziert, solange sich die Spule im Bereich des Erregerfeldes B , also im Bereich $\alpha = [-x, +x]$ bewegt.

$$U_i = 2\pi w B l n D \tag{4.10}$$

Die Größe l stellt die axiale Länge von Anker und Erregersystem dar. Fließt der Strom I_A durch die Ankerspule, so wird im Rotor das Drehmoment M erzeugt, solange sich die

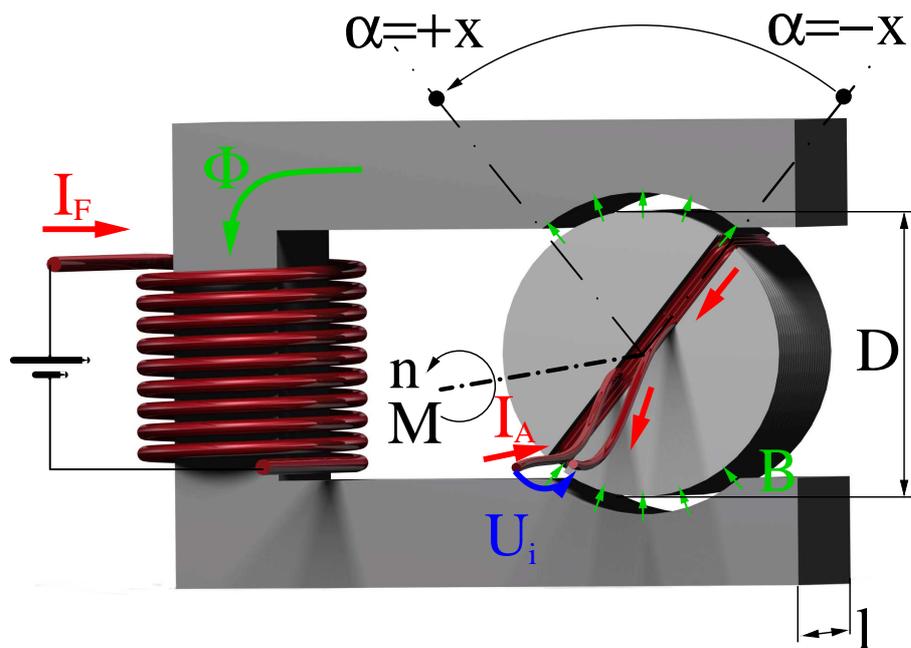


Abbildung 4.5: Vereinfachte Darstellung einer Gleichstrommaschine

Spule im Bereich des Erregerfeldes B , also im Abschnitt $\alpha = [-x, +x]$ befindet.

$$M = I w B l n D \quad (4.11)$$

Technisch ausgeführte elektrische Maschinen bestehen aus einer Erregerwicklung (Index F für Feld) und einer Ankerwicklung (Index A) bzw. einer Statorwicklung (Index 1).

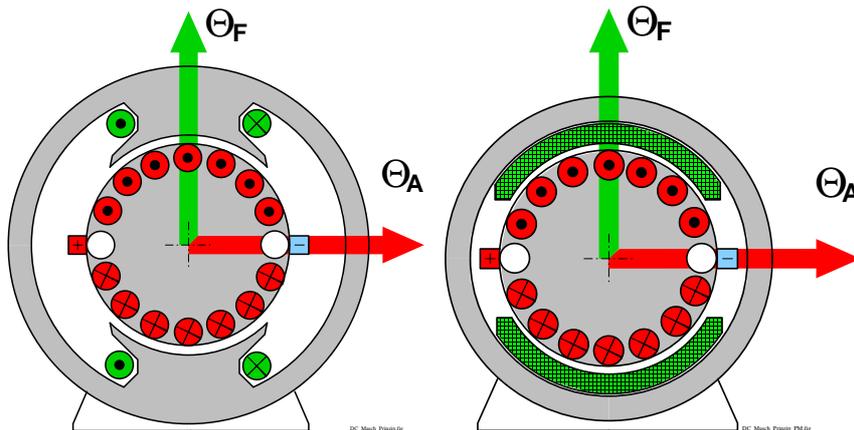


Abbildung 4.6: Technische Ausführung von Gleichstrommaschinen. Links: elektrisch erregt. Rechts: permanentmagnet-erregt.

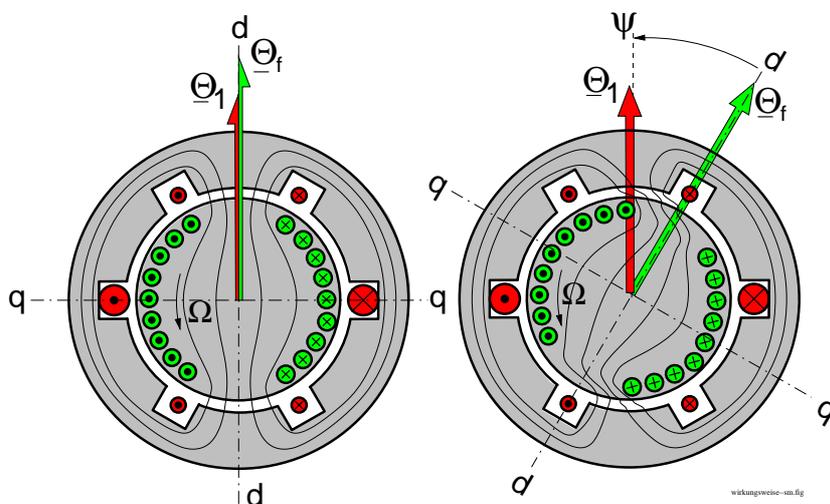


Abbildung 4.7: Wirkungsweise einer Drehfeldmaschine. Hier ausgeführt als Vollpol-Synchronmaschine. Links dargestellt im Leerlauf, rechts belastet im Motorbetrieb.

Die Anker- oder Statorwicklung wird stets von einem elektrischen Strom durchflossen. Anstelle einer stromdurchflossenen Erregerwicklung kann auch ein Permanentmagnet für die Erzeugung der Erregerdurchflutung eingesetzt werden. Aufgrund der räumlichen Orientierung der Wicklung bzw. der Magnetisierung des Permanentmagnets kann auch die zugehörige Durchflutung Θ_A , bzw. Θ_F als Vektor dargestellt werden.

Das Drehmoment der elektrischen Maschine ist in guter Näherung proportional zum Vektorprodukt von Anker- und Erregerdurchflutung, wenn man die Eisensättigung und die magnetische Streuung vernachlässigen kann.

Gleichstrommaschinen weisen konstruktionsbedingt einen elektrisch wirksamen Winkel von 90° zwischen Erreger- und Ankerdurchflutung auf, der durch die räumliche Lage der Bürsten in Bezug zum Erregersystem vorgegeben wird. Bei Synchronmaschinen stellt sich dieser so genannte Durchflutungswinkel selbsttätig ein. Sein Wert hängt von der jeweiligen Belastung ab.

4.8.2 Die Gleichstrommaschine

Gleichstrommaschinen weisen eine räumlich feststehende Erregerwicklung und eine rotierende Ankerwicklung auf. Der Ankerstrom wird der Ankerwicklung über feststehende Schleifkontakte zugeführt, welche über die Kupferlamellen eines Kommutators schleifen. Der Kommutator rotiert gemeinsam mit der Ankerwicklung auf der Welle der Maschine. Zwischen zwei benachbarten Kommutator-Lamellen ist jeweils eine Spule der Ankerwicklung angeschlossen. Alle Ankerspulen sind somit elektrisch in Reihe geschaltet und jede Spule wird bei der zweipoligen Maschine vom halben Ankerstrom durchflossen. Drehen sich die beiden Kommutatorsegmente, die zu einer Ankerspule gehören, unter einer Bürste hindurch, so kehrt sich die Stromrichtung in der zugehörigen Spule um, woraus sich auch der aus dem Lateinischen abgeleitete Name des Kommutators erklärt (*commutare vertauschen*). Kommutator und Bürstenhalter werden so eingestellt, dass sämtliche Spulen unter dem einen Pol in die eine Richtung bestromt werden und die unter dem anderen Pol in die entgegengesetzte Richtung.

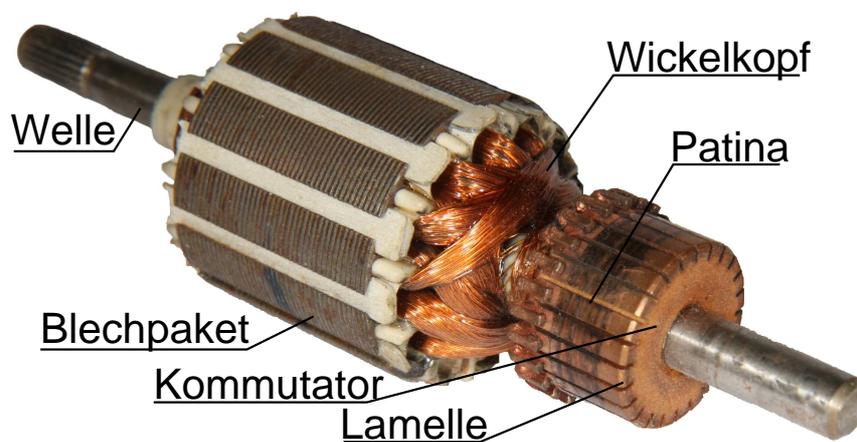
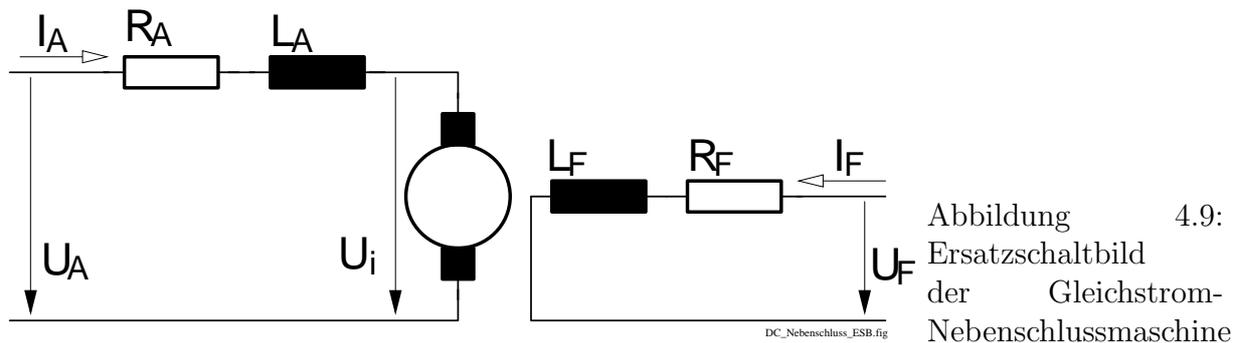


Abbildung 4.8: Anker einer kleinen Gleichstrom-Kommutatormaschine.

Die Gleichstrom-Nebenschlussmaschine

Bei der Nebenschlussmaschine werden Anker- und Erregerwicklung von unterschiedlichen Strömen durchflossen. Die Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie ist eine Gerade. Sie wird durch das Blockiermoment (bei Drehzahl 0) und die Leerlaufdrehzahl (bei Drehmoment 0) be-



stimmt. Die folgenden Gleichungen beschreiben das Verhalten der Gleichstrom-Nebenschlussmaschine im stationären Betrieb:

$$U_A = U_i + R_A I_A \quad (4.12a)$$

$$U_i = c_1 n = c_1^* \Phi_F n \quad (4.12b)$$

$$M = c_2 I_A = c_2^* \Phi_F I_A \quad (4.12c)$$

$$\frac{c_2^*}{2\pi} = c_1^* \quad (4.12d)$$

Aus den Gleichungen 4.12a, 4.12b und 4.12c ergibt sich die Kennlinie der Nebenschlussmaschine als Funktion $M(n)$

$$M = \underbrace{c_2^* \frac{\Phi_F}{R_A} U_A}_{M_B} - c_1^* c_2^* \frac{\Phi_F^2}{R_A} n \quad (4.13)$$

Wobei M_B das Blockier- bzw. Anlaufdrehmoment darstellt.

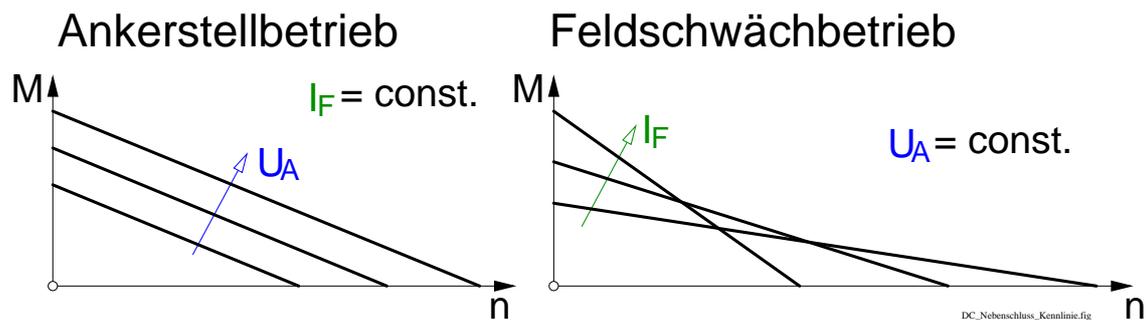


Abbildung 4.10: Kennlinien der Gleichstrom-Nebenschlussmaschine. Links bei konstanter Erregung und variabler Ankerspannung, rechts bei variabler Erregung und konstanter Ankerspannung.

Hält man den Erregestrom konstant und variiert die Ankerspannung U_A , so ändern sich Leerlaufdrehzahl und Blockiermoment proportional mit der Ankerspannung: Die Kennlinie wird parallelverschoben, wie aus Formel 4.13 abgelesen werden kann. Hält man die

Ankerspannung konstant und reduziert den Erregerstrom I_F und damit den Erregerfluss Φ_F , so fällt das Blockiermoment proportional mit dem Erregerstrom. Gleichzeitig steigt die Leerlaufdrehzahl an: Die Kennlinie wird gekippt. Die Reduzierung des Erregerstromes und die damit verbundene Erhöhung der (Leerlauf-)Drehzahl wird auch als Feldschwächung bezeichnet.

Eine permanentmagnetisch erregte Gleichstrommaschine zeigt das Betriebsverhalten einer Gleichstrom-Nebenschlussmaschine. Ihre Erregung ist durch die Magnetisierung des Permanentmagnets fest vorgegeben und kann im normalen Betrieb nicht verändert werden.

Die Gleichstrom-Reihenschlussmaschine

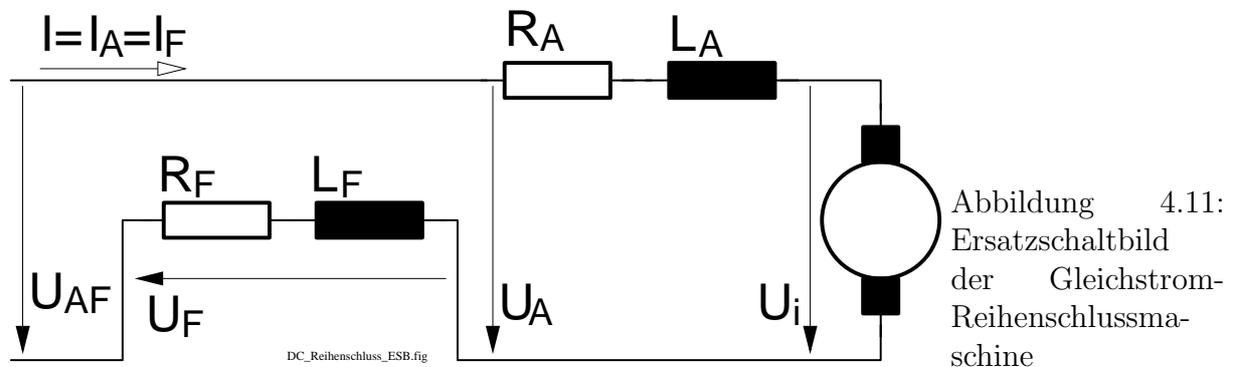


Abbildung 4.11:
Ersatzschaltbild
der Gleichstrom-
Reihenschlussma-
schine

Bei der Gleichstrom-Reihenschlussmaschine sind Erreger- und Ankerwicklung in Reihe geschaltet. Sie werden also vom selben Strom durchflossen. Die im Anker der rotierenden Maschine induzierte Spannung U_i ist nun also proportional zum Produkt aus Drehzahl und Ankerstrom. Das Drehmoment ist proportional zum Quadrat des Ankerstroms. Folgende Gleichungen beschreiben das Verhalten der Gleichstrom-Reihenschlussmaschine im stationären Betrieb:

$$U_{AF} = I(R_A + R_F) + U_i = I R + U_i \quad (4.14a)$$

$$U_i = c I n \quad (4.14b)$$

$$M = \frac{c}{2\pi} I^2 \quad (4.14c)$$

Aus den Gleichungen 4.14a, 4.14b und 4.14c ergibt sich die Kennlinie der Reihenschlussmaschine als Funktion $M(n)$:

$$M = \frac{c}{2\pi} \frac{U_{AF}^2}{(R + c n)^2} \quad (4.15)$$

Die Drehzahl-Drehmomentkennlinie weist nun den Verlauf einer Hyperbel auf. Das Drehmoment fällt mit zunehmender Drehzahl überproportional ab. Dieser Verlauf wird auch als *Reihenschluss-Charakteristik* bezeichnet und ist prädestiniert für Traktionsantriebe. Die Reihenschlussmaschine ermöglicht sowohl ein hohes Drehmoment für das Anfahren

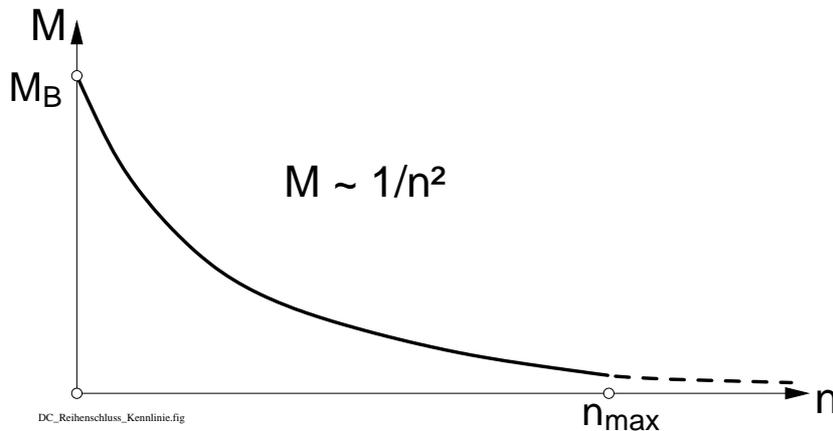


Abbildung 4.12: Die Kennlinie der Gleichstrom-reihenschluss-Maschine gemäß Gleichung 4.15.

des Fahrzeugs, als auch, ohne Umschaltung der Maschine, sehr hohe Drehzahlen bei entsprechend geringerem Drehmoment. Aus diesem Grund stellte die Reihenschlussmaschine in der Vergangenheit die wichtigste Traktionsmaschine dar. Erst die Leistungselektronik führte dazu, dass auch andere elektrische Maschinen als Traktionsmaschinen wirtschaftlich eingesetzt werden können.

4.8.3 Die Synchronmaschine

Eine Synchronmaschine ist eine Drehfeldmaschine. Sie weist im Stator mindestens drei, jeweils um 120° räumlich gegeneinander versetzte Spulen auf.

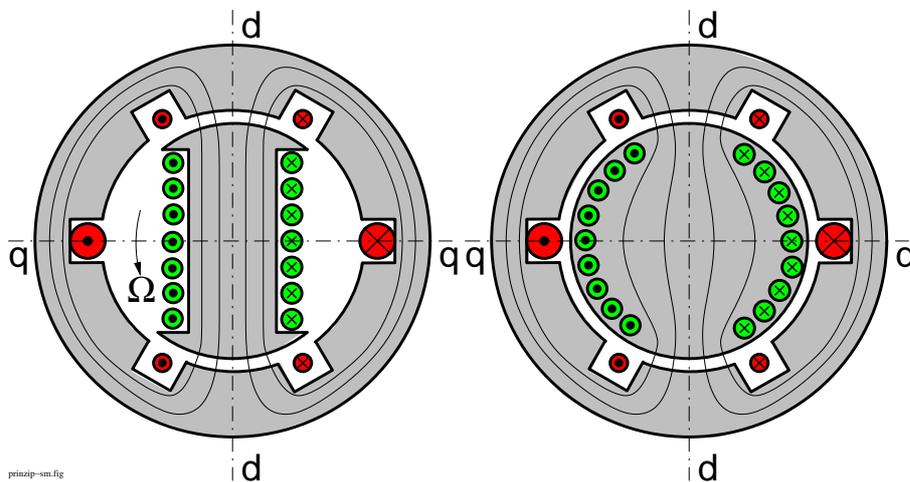


Abbildung 4.13: Prinzipieller Aufbau einer Drehstrom-Synchronmaschine. Links eine *Schenkelpolmaschine*, rechts eine *Vollpolmaschine*.

Wird an diese Wicklung ein dreiphasiges Drehstromsystem angelegt, so addieren sich die Durchflutungen der Spulen zu einem resultierenden Vektor, der mit der Frequenz des Drehstromsystems im Stator der Maschine umläuft und mit der Erregerdurchflutung des Rotors ein Drehmoment erzeugt. Man kann den umlaufenden Durchflutungsvektor auch als eine im Stator der elektrischen Maschine umlaufende Durchflutungswelle interpretieren.

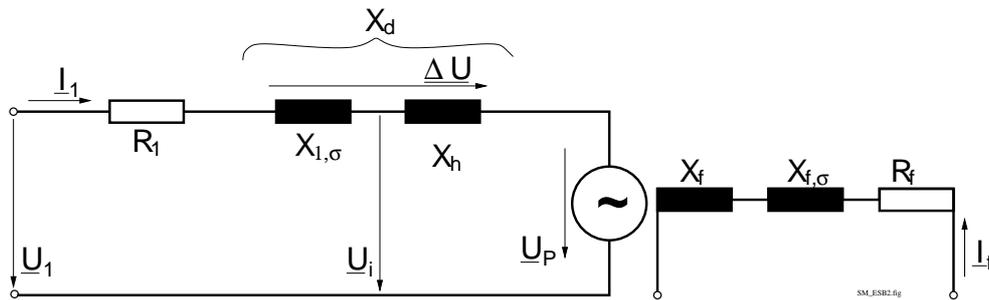


Abbildung 4.14: Einphasiges elektrisches Ersatzschaltbild einer ungesättigten elektrisch erregten Synchronmaschine.

Das Ersatzschaltbild einer Synchronmaschine besteht im Wesentlichen aus einer Stromquelle mit der parallel geschalteten Hauptinduktivität X_h . Der Strom I'_f der Stromquelle ist der im Verhältnis der Windungszahlen von Erreger- und Ankerwicklung umgerechnete Erregerstrom I_f . Die im Stator der Maschine räumlich umlaufende Erregerdurchflutung wirkt wie ein Drehstromsystem, da sie synchron mit der Ankerdurchflutung umläuft und somit ebenfalls eine Durchflutungswelle darstellt. Das Drehstromsystem induziert in der Hauptinduktivität X_h die Polradspannung U_P . Diese kann an den offenen Klemmen der angetriebenen Maschine (idealer Leerlauf) gemessen werden. Die Amplitude der Polradspannung ist proportional zur Drehzahl der Maschine. Es ergibt sich das in Abbildung 4.14 dargestellte Ersatzschaltbild. Vorsicht, die Polradspannung kann nur so lange als konstante Größe betrachtet werden, wie die Maschine ungesättigt ist!

Feldorientierte Regelung der Synchronmaschine

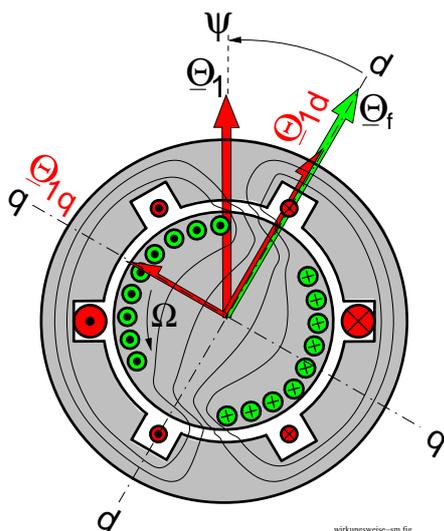


Abbildung 4.15: Die belastete Synchronmaschine im Motorbetrieb. Die Stator- bzw. Ankerdurchflutung Θ_1 wird vektoriell in die Komponente Θ_{1d} , die in Richtung der d-Achse, bzw. der Erregerdurchflutung Θ_f orientiert ist und in die dazu senkrecht stehende Komponente Θ_{1q} zerlegt.

Die Stator- bzw. Ankerdurchflutung Θ_1 wird in eine Komponente Θ_{1d} in Richtung der Erregerwicklung (*d-Achse*, bzw. *direct axis*) und in eine Komponente Θ_{1q} senkrecht dazu

(*q*-Achse, bzw. *quadrature axis*) zerlegt, wie in Abbildung 4.15 dargestellt. Lediglich die Komponente Θ_{1q} in der *q*-Achse bildet mit der Erregerdurchflutung Θ_f ein Drehmoment. Wird die Rotorlage über einen Lagegeber auf der Welle der Maschine erfasst, so kann die Maschine so bestromt werden, dass die Ankerdurchflutungs-Komponente in der *d*-Achse zu Null wird. Auf diese Weise kann mit dem minimalen Statorstrom I_1 das maximale Drehmoment erzeugt werden.

Feldschwächbetrieb

Um mit der Synchronmaschine eine Drehzahl zu erreichen, die über ihrer natürlichen Leerlaufdrehzahl liegt, muss die Erregung reduziert werden. Nur so kann auch bei hohen Dreh-

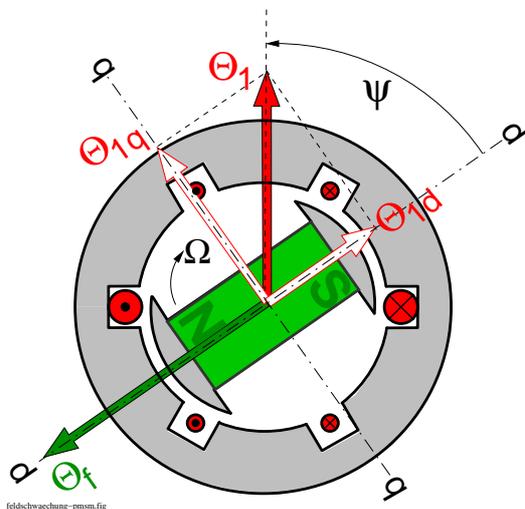


Abbildung 4.16: Feldschwächbetrieb einer permanentmagnetisch erregten Synchronmaschine).

zahlen sichergestellt werden, dass die Polradspannung stets kleiner ist als die speisende Ankerspannung. Bei umrichter gespeisten Maschinen wird die Amplitude der Polradspannung durch die Höhe der Zwischenkreisspannung begrenzt, die wiederum von der Spannungsquelle des Fahrzeugs abhängt.

Da die Erregung auch das Drehmoment der Maschine bestimmt, ist ersichtlich, dass dieses im Feldschwächbetrieb absinkt. Bei einer permanentmagnetisch erregten Maschine kann die Erregung nicht verändert werden. Um diese Maschine in den Feldschwächbetrieb zu bringen, muss eine Komponente Θ_{1d} der Statordurchflutung Θ_1 erzeugt werden, die in der Achse der Erregerdurchflutung liegt, also in der *d*-Achse. Diese Komponente muss so orientiert sein, dass sie die Erregerdurchflutung reduziert, also dieser entgegen wirkt. Die Feldschwächung einer permanentmagnetisch erregten Synchronmaschine reduziert somit den Wirkungsgrad.

Als Ankerstellbereich wird der Betriebsbereich einer Synchronmaschine bezeichnet, in welchem diese das maximale Drehmoment erbringen kann. Der Ankerstellbereich wird begrenzt vom Grenzstrom des Umrichters und der Entmagnetisierung des Rotors, die jedoch temperaturabhängig ist.

Schenkelpolmaschine

Weist eine Synchronmaschine konzentrierte Erregerwicklungen auf einzelnen Zähnen bzw. Jochschenkeln auf, spricht man von einer *Schenkelpolmaschine*. Eine solche Maschine ist in der linken Zeichnung in Abbildung 4.13 schematisch dargestellt. Der Rotor ist magnetisch unsymmetrisch, woraus sich eine Abhängigkeit der Statorinduktivitäten von der Rotorlage ergibt, das so genannte *Schenkelpolverhalten* oder die so genannte *magnetische Einachsigkeit*.

Eine Schenkelpolmaschine kann prinzipiell auch mit einem unerregtem Rotor ein Drehmoment erzeugen. Das Magnetfeld in der Maschine ist bestrebt sich über den Rotor zu schließen, da dieser einen deutlich größeren magnetischen Leitwert aufweist als die Luft in der Polücke. Das Magnetfeld „reißt“ sozusagen die Rotorzähne mit sich, wobei man sich die Feldlinien in der Wirkung wie gespannte Gummibänder vorstellen kann. Eine solche Maschine ohne Erregerwicklung wird als *Reluktanzmaschine* (lat. *reluctari*: *sträuben*, *widersetzen*) bezeichnet.

Vollpolmaschine

Wird die Erregerwicklung als verteilte Wicklung in Nuten auf der Oberfläche eines zylinderförmigen Rotors eingelegt, so spricht man von einer *Vollpolmaschine*. Diese zeichnet sich durch magnetische Symmetrie aus. Die Induktivität der Statorwicklung ist bei der Vollpolmaschine unabhängig von der Rotorlage. Die Vollpolmaschine ist in der rechten Skizze in Abbildung 4.13 dargestellt.

Transversalflussmaschine

Die Transversalflussmaschine stellt eine besondere Bauform einer permanentmagnetisch erregten Synchronmaschine dar. Die Ankerwicklung besteht aus mehreren parallel angeordneten Ringwicklungen, die gegeneinander um einen Bruchteil einer Polteilung τ_p verdreht werden. Die Joche der beiden Spulen einer zweisträngigen Wicklung sind um $\tau_p/2$ gegeneinander verdreht, was einem elektrisch wirksamen Winkel von 90° (el.) entspricht. Die drei Spulen einer dreisträngigen Wicklung um jeweils $2/3 \tau_p$, bzw. 120° (el.). Der magnetische Fluss wird transversal (lat. *transversus*: *quer liegend*), also senkrecht zur ihrer Hauptachse durch bzw. um diese Spule geführt. Die Maschine zeichnet sich in der Regel durch eine sehr hohe Polpaarzahl aus. Die einfache Statorbauform wird durch einen vergleichsweise hohen konstruktiven Aufwand im Rotor erkauft, der erforderlich ist um die hohe Polzahl zu erzielen. Die Transversalflussmaschine zeichnet sich durch ein hohes Drehmoment aus, ist aber aufgrund der hohen Polzahl nur bedingt für große Drehzahlen geeignet.

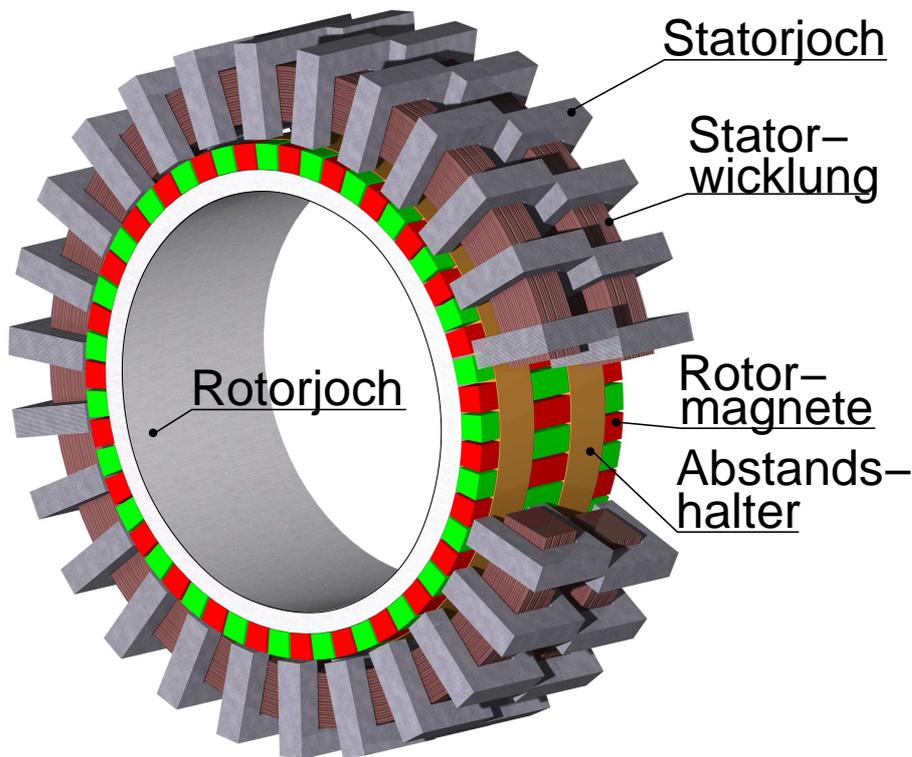


Abbildung 4.17: Schematischer Aufbau einer Transversalflussmaschine (TFM).

4.8.4 Asynchronmaschine mit Käfigläufer

Der Stator einer Asynchronmaschine weist eine Drehstromwicklung auf, wie sie bereits mit der Drehstrom-Synchronmaschine vorgestellt wurde. Der Rotor besteht aus kurzgeschlossenen Spulen. Diese sind aufgebaut aus Leiterstäben, die stirnseitig durch Endringe unter-

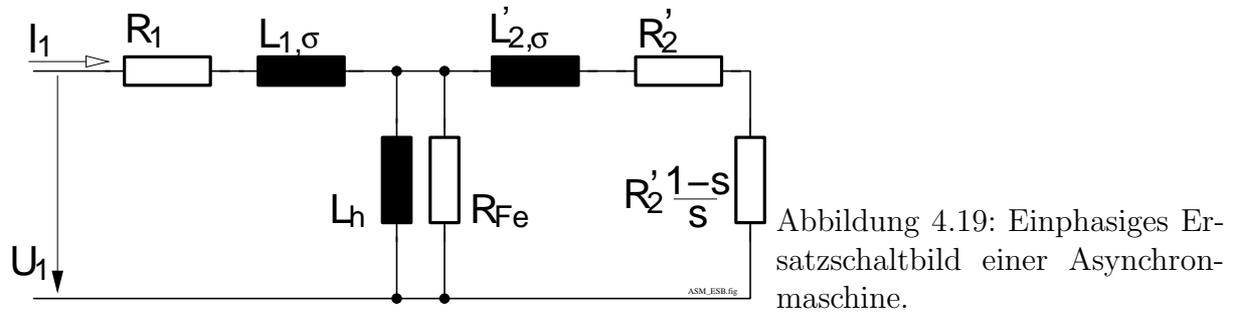


Abbildung 4.18: Käfigläufer einer kleineren Asynchronmaschine.

einander kurzgeschlossen sind. Stäbe und Endringe werden in Druckgussverfahren um das Blechpaket gespritzt. Als Material wird für die Läuferstäbe meist Aluminium verwendet. Wird ein hoher Wirkungsgrad gefordert, so kann auch Kupfer verwendet werden.

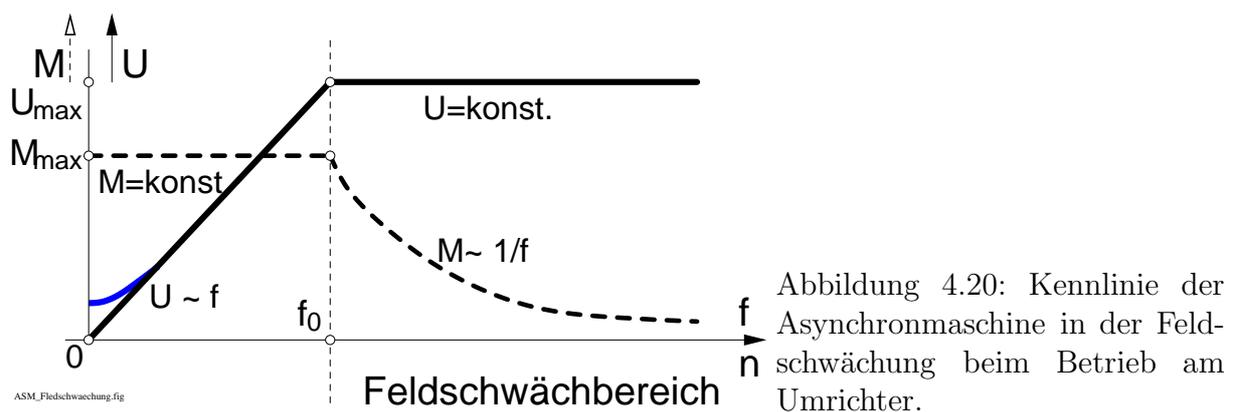
Wird der Stator durch ein Drehstromsystem bestromt, so induziert die im Luftspalt der Maschine umlaufende magnetische Fluss-Welle elektrische Spannungen in den Rotorspulen. Da

diese untereinander kurzgeschlossen sind, bildet sich im Rotor ein vielphasiges Drehstromsystem, welches die Maschine erregt. Da dieser Wirkungsmechanismus nur funktioniert, wenn sich Rotor und Stator durchflutung relativ zueinander bewegen, läuft die Asynchronmaschine im Motorbetrieb stets langsamer als das speisende Drehstromsystem und im Generatorbetrieb stets schneller.



Das Ersatzschaltbild der Asynchronmaschine ähnelt dem eines Transformators. Der Rotorkreis wird anhand des Verhältnisses der Windungszahlen auf den Stator umgerechnet. Die Umrechnung wird durch einen Strich hinter dem jeweiligen Formelzeichen gekennzeichnet. Der Faktor $\frac{1-s}{s}$, mit welchem der auf die Statorseite umgerechnete Rotorwiderstand R_2' multipliziert wird, stellt die mechanisch umgesetzte Leistung der Maschine dar. Hierbei ist s der Schlupf der Asynchronmaschine, also die Drehzahl des Rotors bezogen auf die Drehzahl der im Ständer umlaufenden Durchflutungswelle. Bei stillstehendem Rotor, also beim Anlauf der Asynchronmaschine, besitzt der Schlupf den Wert eins.

Feldschwächbetrieb der Asynchronmaschine



Wird die Asynchronmaschine an einem Drehspannungssystem mit variabler Frequenz, beispielsweise an einem Umrichter betrieben, so muss die Amplitude des an die Maschine angelegten Drehspannungssystem proportional mit dessen Frequenz ansteigen, damit der magnetische Fluss in der Maschine konstant bleibt (siehe Induktionsgesetz). Da jedoch die Zwischenkreisspannung des Umrichters und auch die Spannungsfestigkeit der Isolation in

der Wicklung begrenzt sind, kann die Spannung nicht beliebig steigen. Der Drehzahlbereich, in welchem die angelegte Spannung ihren Maximalwert erreicht hat und nicht mehr proportional zur Frequenz ansteigt, heißt *Feldschwächbereich*. Wie bei Gleichstrom- und Synchronmaschine fällt in diesem Bereich das Drehmoment der Maschine hyperbelförmig mit steigender Drehzahl ab.

Feldorientierte Regelung der Asynchronmaschine

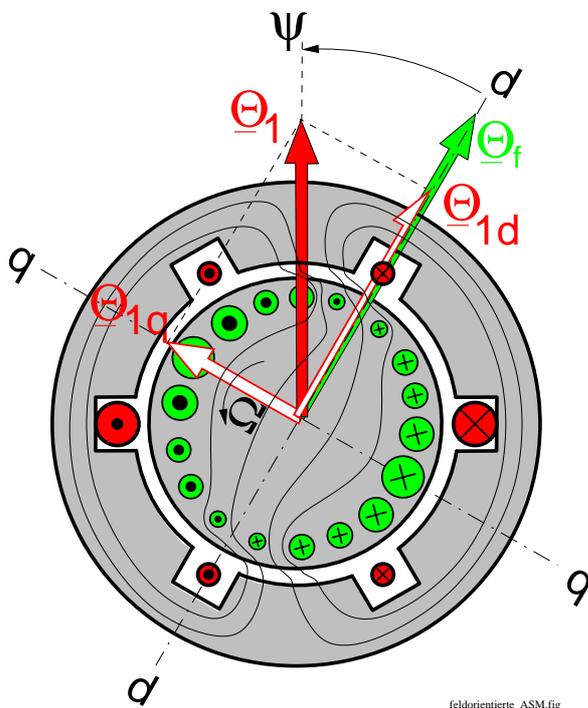


Abbildung 4.21: Prinzip der feldorientierten Regelung einer Asynchronmaschine. Die Statordurchflutung Θ_1 wird vektoriell in eine Komponente Θ_{1d} in Richtung der d- und in eine Komponente Θ_{1q} in Richtung der q-Achse zerlegt.

Die räumliche Orientierung der Rotordurchflutung Θ_f definiert die Lage der q- und der d-Achse zum aktuellen Zeitpunkt t . Die Statordurchflutung Θ_1 wird vektoriell in Richtung der q- und der d-Achse zerlegt. Diese Achsen sind nun aber nicht mehr starr mit dem Rotor gekoppelt, sondern werden von dem in den Rotorleiterstäben fließenden Drehstromsystem definiert. Die Komponente Θ_{1d} baut über die transformatorische Kopplung zwischen Stator- und Rotorwicklung die Rotordurchflutung auf. Die Komponente Θ_{1q} bildet mit der Rotordurchflutung das Drehmoment. Über ein geeignetes Maschinenmodell kann die Lage der d- und q-Achse mit guter Genauigkeit geschätzt werden.

Im Gegensatz zur Synchronmaschine kann die Asynchronmaschine nicht ohne Statordurchflutung in der d-Achse betrieben werden, da diese das Drehstromsystem im Rotor, und damit die Erregung aufbauen muss. Wichtig hierzu ist eine große magnetische Zeitkonstante der Rotorwicklung.

4.8.5 Auswahl der optimalen Traktionsmaschine

Die eine optimale Traktionsmaschine, die für jeden denkbaren Anwendungsfall bestens geeignet ist, gibt es nicht! Eine elektrische Maschine muss stets auf die jeweilige Anwendung optimiert werden. Leider verhalten sich die Optimierungsziele meist gegenläufig. So ist das Drehmoment einer elektrischen Maschine in guter Näherung proportional zum Volumen der elektromagnetisch aktiven Bauteile und damit auch zur Masse der Maschine. Ein hohes Drehmoment bedingt somit automatisch auch eine große und schwere elektrische Maschine. Die Forderung nach einem hohen Drehmoment führt somit meist zu einer Maschine mit vergleichsweise geringer Leistungsdichte.

Die Leistungsdichte einer elektrischen Maschine kann durch die Wahl einer hohen Drehzahl vergrößert werden. Leider geht damit auch eine Erhöhung der Eisen- und Reibungsverluste einher. Auch das dann in der Regel erforderliche externe Getriebe verursacht zusätzliche Verluste, die bei einer Optimierung berücksichtigt werden müssen.

Ein anderer Ansatz, die Leistungsdichte einer elektrischen Maschine zu steigern, ist die Erhöhung der Ausnutzung der elektrisch und magnetisch aktiven Werkstoffe, also des Kupfers und des Eisens, indem die elektrische Stromdichte und die magnetische Flussdichte erhöht werden. Die Stromdichte wird durch die Kühlung der Maschine begrenzt, die Flussdichte durch die Sättigung des Eisens. Beide Maßnahmen führen jedoch wieder zu erhöhten Verlusten und beeinflussen somit den Wirkungsgrad der Maschine negativ. Die gesteigerte magnetische Ausnutzung kann darüber hinaus auch die akustischen Eigenschaften der Maschine negativ beeinflussen, also zu höheren Geräusch-Emissionen führen.

Ein weitere Parameter der Optimierung einer elektrischen Maschine ist deren Polpaarzahl. Eine Vergrößerung der Polpaarzahl reduziert den magnetischen Polfluss und damit den erforderlichen Eisenquerschnitt der Maschine. Jedoch wird mit steigender Polzahl die magnetische Streuung in der Maschine vergrößert, was bei permanentmagnetisch erregten Maschinen zu einer verminderten Ausnutzung des Magnetmaterials führt und darüber hinaus auch die Streuinduktivität der Maschine erhöht. Eine große Streuinduktivität reduziert den maximalen Strom der Maschine und damit deren Leistung. Außerdem erfordert eine hochpolige Maschine bei gleicher Drehzahl eine entsprechend höhere elektrische Frequenz, wodurch unter Umständen die Schaltverluste in der Leistungselektronik vergrößert werden können.

Durch eine verbesserte Kühlung kann die Baugröße einer elektrischen Maschine ebenfalls reduziert werden. Hier bietet sich beispielsweise der Übergang von einer Luft- auf eine Wasserkühlung an. Diese wird im Kraftfahrzeug üblicherweise als Wassermantelkühlung ausgeführt.

Die Bauformen unserer heutigen elektrischen Maschinen sind bereits weit über 100 Jahre alt. Man kann Werner von Siemens' *dynamoelektrisches Prinzip* aus dem Jahre 1867 als den Vorläufer unserer heutigen Gleichstrommaschinen bezeichnen. Die Urform der heutigen Drehstrom-Synchronmaschinen entwickelten im Jahre 1887 Friedrich August Haselwander und Charles Schenk Bradley unabhängig voneinander als Drehstromgenerator. Michail von

Dolivo-Dobrowolsky stellte im Jahre 1891 eine praxistaugliche Asynchronmaschine vor. Ihr Schleifringläufer erlaubte den Anlauf mit hohem Lastdrehmoment. Großartige Verbesserungen durch innovative Bauformen der klassischen elektrischen Maschinen sind heute somit nicht mehr zu erwarten. In den letzten Jahrzehnten verschoben die Verfügbarkeit von kostengünstiger Leistungselektronik und Magnetwerkstoffen mit sehr hohem Energiedichte-Produkt die Bedeutung der elektrischen Maschinen und sorgten dafür, dass Kommutator-Gleichstrommaschinen in vielen Bereichen durch Drehstrom-Maschinen ersetzt wurden.

Eigenschaften der vorgestellten Traktionsmaschinen

	PM-SM mit Oberflächenmagneten	PM-SM mit vergrabenen Magneten	elektrisch erregte Synchronmaschine	Asynchronmaschine	(Geschaltete) Reluktanzmaschine	Transversalfussmaschine
Leistungsdichte	+	+	0	0	0+	+
Überlastbarkeit	--	-	++	++	+	--
Feldschwächbarkeit	-	0	+	+	0	--
Wirkungsgrad	+	+	0	-	-	+
Kosten	-	-	0	0	0+	--
Wartungsfreiheit	+	+	-	+	+	+
Ausnutzung Leistungsel.	++	++	++	-	--	+
Geräusch	0	-	+	++	--	0
Freilauf, Entregbarkeit	-	-	+	+	+	--

Tabelle 4.1: Eigenschaften der vorgestellten Traktionsmaschinen.

++: sehr gut, +: gut, 0+: neutral bis positiv, 0: neutral, -: schlecht, --: sehr schlecht.

Die Tabelle zeigt lediglich die allgemeinen Tendenzen. Der Einzelfall kann je nach Optimierungsziel der jeweiligen Maschine variieren.

Gleichstrom-Kommutatormaschinen werden heutzutage aufgrund von Bürsten- und Kommutierungsverlusten sowie der Problematik des Bürstenverschleißes nur noch selten für Traktionsaufgaben verwendet. Die restlichen hier vorgestellten Traktionsmaschinen können prinzipiell für den Antrieb von Elektrofahrzeugen verwendet werden. Die Tabelle 4.1 vergleicht die wichtigsten grundsätzlichen Eigenschaften der verschiedenen Traktionsmaschinen. Das Kriterium *Freilauf*, *Entregbarkeit* bewertet, mit welchem Aufwand das magnetische Feld, die *Erregung*, in der Maschine abgeschaltet werden kann, bzw. wie hoch die Eisenverluste im Auslauf (Freilauf) der Maschine sind oder mit welchen Verlusten das Fahrzeug rollen kann.

Beispiele für Fahrzeugantriebe

Kleines Elektro-Stadtfahrzeug Für ein kleines Elektrofahrzeug, das überwiegend im Stadtverkehr eingesetzt werden soll, bietet sich eine hocheffiziente permanentmagnetisch erregte Synchronmaschine an. Diese zeichnet sich durch eine geringe Baugröße und einen vernünftigen Wirkungsgrad aus. Für eine Low-Cost-Version des Fahrzeugs kann auch eine hocheffiziente Asynchronmaschine eingesetzt werden. Hierbei muss aber die Ausnutzung des Umrichters in die Optimierung miteinbezogen werden, da diese bei einer Asynchronmaschine geringer ist als bei einer Synchronmaschine und der zugehörige Umrichter größere und damit teurere Leistungshalbleiter benötigt.



Abbildung 4.22: Beispiel für ein kleines Elektrofahrzeug, angetrieben durch eine Asynchronmaschine mit Käfigläufer. Daten der elektrischen Maschine: Nennleistung 12 kW (dauerhaft), Nenndrehzahl $5920 \frac{1}{\text{min}}$ bei 200 Hz, Nennspannung 100 V und Nennstrom 86 A in Dreieck-Schaltung.

Radnabenantrieb Für einen Direktantrieb, der in die Radnabe integriert werden soll, ist der naheliegende Ansatz eine niedertourige permanentmagnetisch erregte Synchronmaschine. Nachteilig ist hier die große erforderliche Menge an Magnetmaterial, die ein Direktantrieb benötigt. Eine Ausführung der Rotors mit Oberflächen-Magneten ist aufgrund der Klebeverbindung und der erforderlichen Bandagierung im Hinblick auf den Fertigungsaufwand (Kosten) nicht optimal. Wie bei allen permanentmagnetisch erregten Maschinen mit Oberflächenmagneten weist auch diese aufgrund der Entmagnetisierung durch das Ankerquerfeld und Temperaturempfindlichkeit des Magnetmaterials eine vergleichsweise geringe Überlastfähigkeit auf. Darüber hinaus eignen sich permanentmagnetisch erregte Synchronmaschinen mit Oberflächen-Magneten nur bedingt für den Feldschwächbetrieb. Sie weisen also einen vergleichsweise geringen Wirkungsgrad bei hohen Drehzahlen auf. Aus diesen Gründen wäre eine niedertourige Asynchronmaschine unter Umständen eine bessere Wahl.

Fahrzeug mit weitem Drehzahlbereich Soll das Fahrzeug ohne Schaltgetriebe eine hohe Endgeschwindigkeit erreichen, muss die elektrische Maschine feldschwächbar sein. Stellt dieser Betriebsbereich einen nennenswerten Anteil des Fahrzeug-Fahrzyklus dar,

muss eine Feldschwächung der Maschine ohne Zusatzverluste möglich sein. Die klassische permanentmagnetisch erregte Maschine scheidet somit aus. Eine sinnvolle Alternative wäre neben der klassischen Asynchronmaschine mit Käfigläufer auch eine elektrisch oder eine hybrid-elektrisch erregte Synchronmaschine.



Abbildung 4.23: Opel Ampera, Beispiel für ein Hybridfahrzeug. Der Blick in den Motorraum zeigt links die Verbrennungskraftmaschine, in der Mitte die beiden elektrischen Maschinen in einem gemeinsamen Gehäuse und hinten rechts den Umrichter.

Hybridfahrzeug Im Hybridfahrzeug Opel Ampera treibt eine 1,4-Liter-Verbrennungskraftmaschine einen 54 kW-Generator an, ausgeführt als permanentmagnetisch erregte Synchronmaschine. Für die elektrische Traktion steht eine 111 kW Asynchronmaschine bereit. Durch die Umschaltung des Getriebes können zusätzlich zur Asynchronmaschine auch die Synchronmaschine, die Verbrennungskraftmaschine oder beide gleichzeitig für die Traktion des Fahrzeugs genutzt werden. Als Energiespeicher dient dem Fahrzeug eine 16 kWh-Lithium-Ionen-Traktionsbatterie.

Nutzfahrzeuge Für den Einsatz in Nutzfahrzeugen sind wartungsfreie permanentmagnetisch erregte Synchronmaschinen oder Käfigläufer-Asynchronmaschinen prädestiniert. Elektrisch erregte Synchronmaschinen in klassischer Bauform sind aufgrund der Bürsten und des damit verbundenen Wartungsaufwands eher weniger geeignet. Radnabenantriebe für sehr hohe Drehmomente könnten auch mit Transversalflussmaschinen realisiert werden, da Nutzfahrzeuge in der Regel keine besonders hohen Geschwindigkeiten erfordern und somit die Motordrehzahl in einem vernünftigen Bereich liegt.