



GET it digital

Modul 11:

Elektrische Maschinen

Dr.-Ing. Ralf Wegener
Grzegorz Pawel Lisicki
Josef Kirschner

Ein Kooperationsvorhaben
empfohlen durch die

gefördert durch



Ministerium für
Kultur und Wissenschaft
des Landes Nordrhein-Westfalen



Stand: 5. September 2025



Weiternutzung als OER ausdrücklich erlaubt: Dieses Werk und dessen Inhalte sind lizenziert unter CC BY 4.0. Ausgenommen von der Lizenz sind die verwendeten Logos sowie alle anders gekennzeichneten Elemente. Nennung gemäß [TULLU-Regel](#) bitte wie folgt: „GET it digital Modul 11: Elektrische Maschinen“ von Dr.-Ing. Ralf Wegener, Grzegorz Pawel Lisicki, Josef Kirschner Lizenz: CC BY 4.0.

Der Lizenzvertrag ist hier abrufbar:

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>

Das Werk ist online verfügbar unter:

<https://getitdigital.uni-wuppertal.de/module/modul-11-elektrische-maschinen>

Inhaltsverzeichnis

1	Klassifizierung elektrischer Maschinen	1
2	Der Transformator	1
2.1	Prinzip des Transformators	5
2.2	Aufbau des Transformators	6
2.3	Ersatzschaltbild	8
3	Gleichstrommaschine	10
3.1	Exkurs Prinzip des Elektromotors	10
3.2	Aufbau und Gehäusekonstruktion	11
3.3	Magnetische Felder	13
3.4	Berechnung des Drehmoments	14
3.5	Fremderregte Gleichstrommaschine	14
3.6	Reihenschlussmaschine	15
4	Synchronmaschine	16
4.1	Aufbau	17
4.2	Feldverläufe	18
4.3	Ersatzschaltbild	19
5	Asynchronmaschine	19
5.1	Aufbau	20
5.2	Käfigläufer	20
5.3	Anlauf der ASM	21
5.4	Betrieb der ASM	21
5.5	Drehzahl/Drehmomenten-Kennlinie	21
A	Übungsaufgaben	25
A.1	Gleichstrommaschine 1	25
B	Lösungen zu den Übungsaufgaben	25
B.1	Gleichstrommaschine 1	25
	Index	27

Verwendete Größen und Formelzeichen

Formelzeichen

ω_r	Drehfrequenz des Rotors	$\frac{1}{s}$
ω_s	Synchrone Drehfrequenz des speisenden Netzes	$\frac{1}{s}$
ϑ	Polradwinkel der Synchronmaschine	°
L_h	Hauptinduktivität eines Transformators	
L_σ	Streuinduktivität eines Transformators	
M_K	Kippmoment der Asynchronmaschine	Nm
n	Drehzahl	$\frac{1}{\text{min}}$
p	Polpaarzahl	
s	Schlupf der Asynchronmaschine	
s_K	Kippschlupf der Asynchronmaschine	

1 Klassifizierung elektrischer Maschinen

Elektrische Maschinen ist eine andere Bezeichnung für elektromagnetische Energiewandler und beschreibt zum einen den Transformator als ruhende elektrische Maschine und zum anderen Elektromotoren und Generatoren. Elektromotoren treiben viele alltägliche Geräte wie Haushaltsgeräte und Elektrofahrzeuge an, während Generatoren und Transformatoren die Erzeugung und Verteilung von elektrischer Energie sicherstellen.

Dieses Kapitel bietet eine Einführung in die grundlegenden Konzepte und Funktionsweisen elektrischer Maschinen. Zunächst werden die verschiedenen Typen elektrischer Maschinen vorgestellt, einschließlich ihrer Prinzipien der Energieumwandlung und ihrer Hauptkomponenten. Es folgt eine detaillierte Betrachtung der Funktionsweise von Elektromotoren und Generatoren, der Relevanz von Transformatoren für die Energieübertragung sowie der Einfluss neuer Technologien auf die Effizienz und Leistung elektrischer Maschinen.

Lernziele: Elektrische Maschinen

Die Studierenden

- kennen die verschiedenen elektrischen Maschinen.
- können grundlegende Aufgabenstellung im Themenbereich der elektrischen Maschinen lösen.

Elektrische Maschinen sind Energieumwandler. Es wird vornehmlich zwischen Transformatoren und Motoren bzw. Generatoren unterschieden. Transformatoren wandeln elektrische Energie in eine andere Form von elektrischer Energie um, indem sie ein Spannungsniveau auf ein anderes übertragen. Motoren und Generatoren hingegen wandeln elektrische Energie in mechanische Energie um und umgekehrt. Motoren konvertieren elektrische Energie in mechanische Energie, während Generatoren mechanische Energie in elektrische Energie umwandeln. Da der Umwandlungsprozess umkehrbar ist, können Motoren auch als Generatoren und umgekehrt eingesetzt werden. Eine weitere Klassifizierung bei Motoren bzw. Generatoren findet je nach betriebem Strom in Gleichstrommaschinen und Wechselstrommaschine statt. Die Wechselstrommaschinen werden des Weiteren in Synchron- und Asynchronmaschine gegliedert.

Die Funktionsweisen aller elektrischen Maschinen basieren auf den in Modul 6 besprochenen elektromagnetischen Prinzipien der Induktion und der Lorentzkraft. Während der Transformator rein auf dem Prinzip der Induktion beruht, nutzt der Motor bzw. Generator je nach Wandlungsprozess unterschiedliche elektromagnetische Prinzipien. In der Funktion als Generator basiert er auf Induktion, um elektrische Energie durch sich ändernde Magnetfelder zu erzeugen. Das Prinzip der Lorentzkraft macht er sich als Motor zu nutze.

2 Der Transformator

Der Transformator ist eine ruhende elektrische Maschine und dient der Energiewandlung von elektrischer Energie über den magnetischen Kreis zurück in elektrische Energie, wobei insbesondere die Spannungshöhe gewandelt wird. Transformatoren gibt es in verschiedenen Ausführungen und Leistungsklassen von wenigen Watt (Abbildung 2.2) bis in den hohen Megawattbereich (Abbildung 2.1).

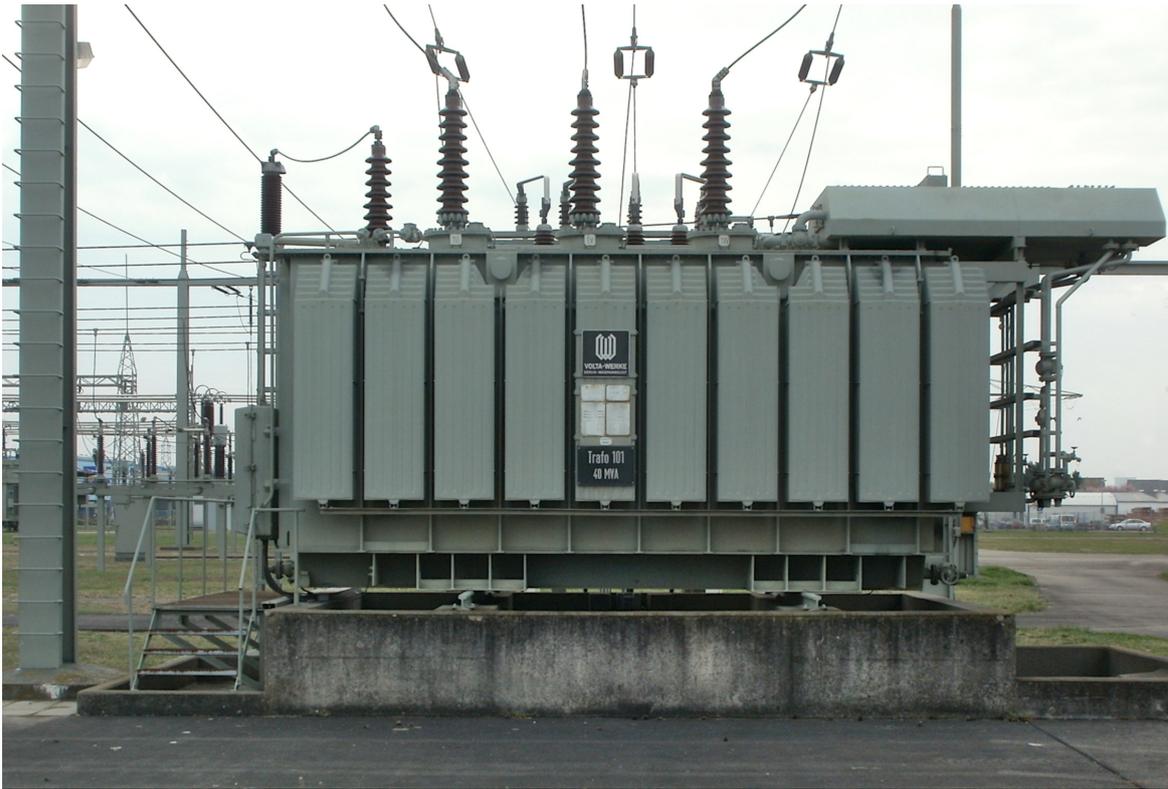


Abbildung 2.1: Ein 40 MVA Leistungstransformator. Aufgenommen im Umspannwerk Altlußheim. (Quelle: Wikimedia, Lizenz CC0)

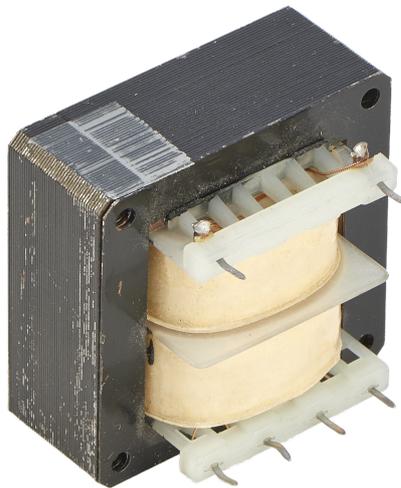


Abbildung 2.2: Fotografie eines Kleintransformators.

In der öffentlichen Energieversorgung wird die von Kraftwerken erzeugte Energie auf eine höhere Spannung transformiert, um sie über weite Strecken transportieren zu können. Die Übertragungsverluste sinken mit höherer Spannung und damit bei gleicher Leistung sinkendem Strom quadratisch (Gleichung 2.1 im Dreiphasenwechselstrom).

$$P_v = 3 \cdot R_L \cdot I_L^2 \quad (2.1)$$

Die übertragene Leistung im Dreiphasenwechselstrom beträgt:

$$\underline{S}_N = \sqrt{3} \cdot \underline{U}_N \cdot \underline{I}_L^* \quad (2.2)$$

Die Verluste sind damit proportional zu $\frac{1}{\underline{U}_N^2}$

Ein Transformator macht dadurch erst eine flächendeckende Energieversorgung möglich, da Kraftwerke auch verbraucherfern positioniert werden können.

In Energieversorgungsnetzen (siehe Abbildung 2.3) gibt es mehrere Spannungsebenen. Die Höchstspannungsebene, die in Europa überwiegend 380 kV beträgt, dient als Übertragungsnetz zum Transport elektrischer Leistung über weitere Strecken, also mehrere hundert Kilometer auch über Ländergrenzen hinweg. Große Kraftwerke sind dort direkt angekoppelt. Die Hochspannungsebene (110 kV oder 220 kV) nennt sich Verteilnetz und dient der Ankopplung von Städten und großen Industrien. Die Mittelspannungsebene (5 – 35 kV) sorgt für die Ankopplung der Ortsnetztransformatoren zur Versorgung von einzelnen Straßenzügen. Während die höheren Spannungsebenen normalerweise mit Freileitungen ausgeführt sind, ist das Mittelspannungsnetz überwiegend mit Erdkabeln realisiert. Im ländlichen Bereich werden aber auch hier Freileitungen eingesetzt.

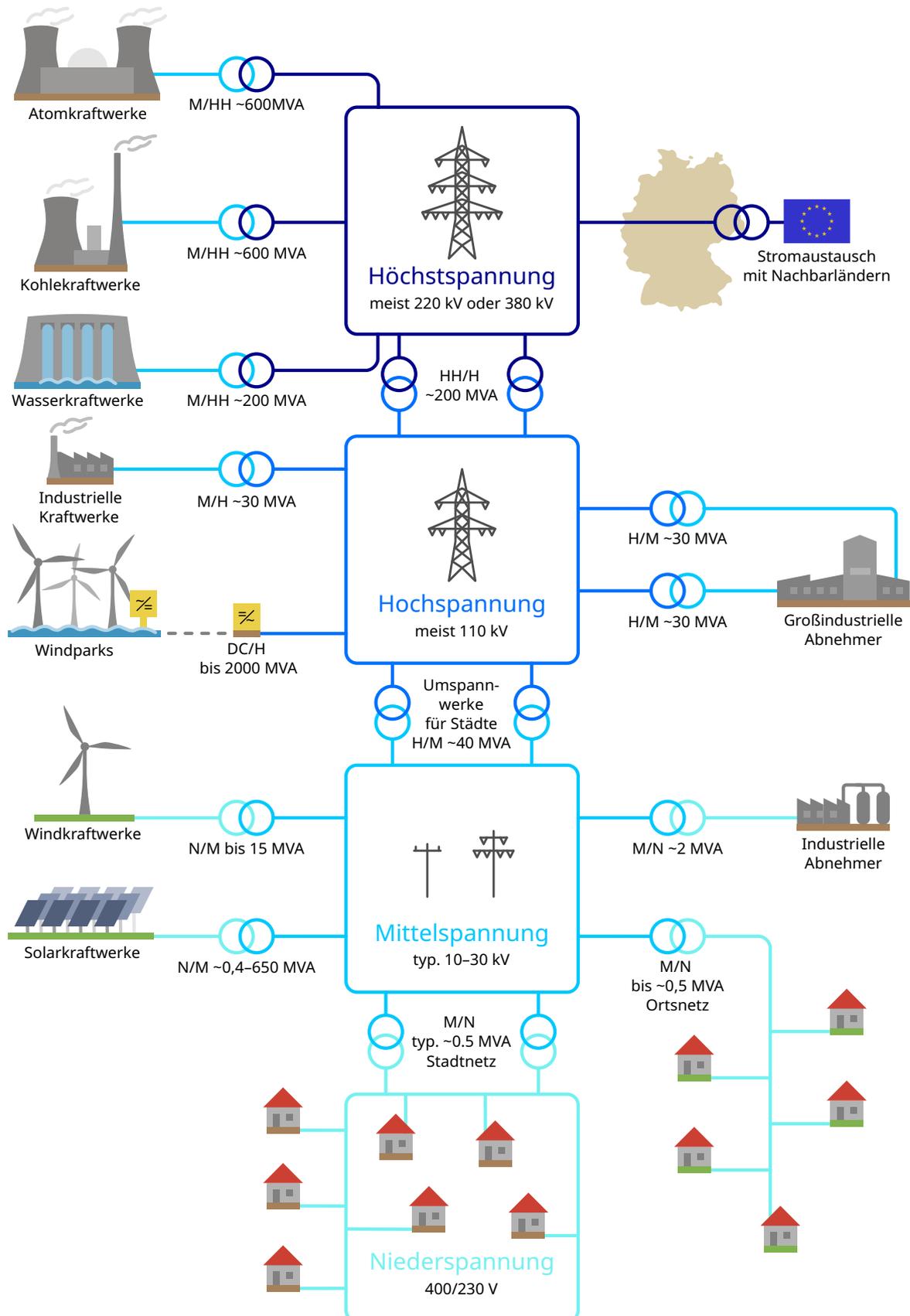


Abbildung 2.3: Struktur der öffentlichen Stromversorgung.

Das Stromnetz ist in mehrere Spannungsebenen unterteilt, die den Transport und die Verteilung der Energie ermöglichen.

2.1 Prinzip des Transformators

Um das Prinzip des Transformators zu erörtern, starten wir mit einem vollständig verlustfreien, idealen Transformator. An der Primärspule wird eine sinusförmige (eigentlich Kosinusförmig, was aber die gleiche Form ist und nur einer Phasenverschiebung von 90° entspricht) Spannung \underline{U}_1 angelegt. Der zeitliche Verlauf von \underline{U}_1 entspricht u in Gleichung 2.3.

$$u = \hat{U} \cdot \cos(\omega t) \quad (2.3)$$

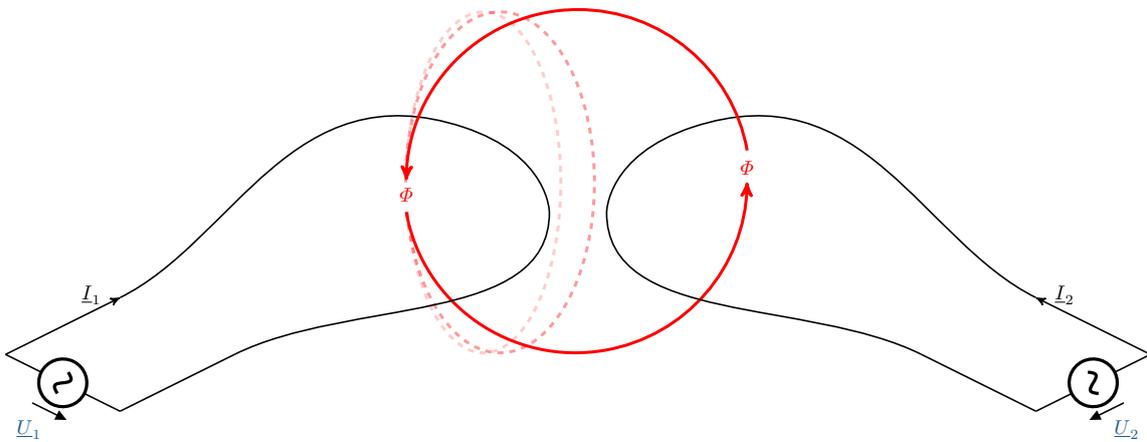


Abbildung 2.4: **Prinzip der magnetische Kopplung eines Transformators.** Die Spannung \underline{U}_1 der linken Leiterschleife erzeugt einen magnetischen Fluss Φ , welcher in der rechten Leiterschleife die Spannung \underline{U}_2 induziert.

Diese Spannung bewirkt entsprechend der Umkehrung des Induktionsgesetzes (Gleichung 2.4) einen wechselnden magnetischen Fluss.

$$u = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.4)$$

Die Form des magnetischen Flusses ist bei sinusförmiger Spannungsform ebenfalls sinusförmig, da das Integral eines Kosinus der Sinus ist. Der Effektivwert des magnetischen Flusses kann daher durch Gleichung 2.5 dargestellt werden, indem das Induktionsgesetz nach Φ aufgelöst wird und der Effektivwert gebildet wird. Der Sinus und damit die zeitliche Abhängigkeit fällt dadurch weg.

$$\Phi = \frac{\sqrt{2} \cdot \underline{U}_1}{2\pi \cdot N_1 \cdot f} \quad (2.5)$$

Die Flussrichtung des Magnetfelds bewegt sich stets gemäß der „rechten Handregel“ (siehe Modul 4), in diesem Beispiel gegen den Uhrzeigersinn. Der so erzeugte magnetische Fluss induziert wiederum an der Sekundärspule des Transformators, die optimalerweise mit dem gleichen Fluss Φ durchdrungen wird, eine Spannung \underline{U}_2 , die sich auch nach dem Induktionsgesetz (Gleichung 2.4) berechnen lässt.

$$u_2 = -N_2 \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.4)$$

Die angelegte Primärspannung \underline{U}_1 und die Sekundärspannung \underline{U}_2 können in ein Verhältnis gesetzt werden (Gleichung 2.6). Die Änderungsrate des magnetischen Flusses Φ kürzt sich dadurch heraus, es bleiben nur noch die Windungszahlen der Primärseite N_1 und der Sekundärseite N_2 übrig. Dieses Verhältnis wird Übersetzungsverhältnis \ddot{u} (Gleichung 2.6) genannt. Ist das Übersetzungsverhältnis \ddot{u} größer als Eins wird die Spannung herabgesetzt (Spannungsabwärtstransformator). Ist das Übersetzungsverhältnis \ddot{u} kleiner als Eins, wird die Spannung erhöht (Spannungsaufwärtstransformator). Da der Transformator in beide Richtungen eingesetzt werden kann, wird in den technischen Daten immer ein Übersetzungsverhältnis größer oder gleich Eins angegeben.

$$\frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2} = \frac{-N_1 \cdot \frac{d\Phi}{dt}}{-N_2 \cdot \frac{d\Phi}{dt}} = \frac{N_1}{N_2} = \ddot{u} \quad (2.6)$$

$\ddot{u} < 1 \rightarrow$ Spannung hoch

$\ddot{u} > 1 \rightarrow$ Spannung runter

Angegeben wird immer $\ddot{u} > 1$

Bei einem realen Transformator durchdringt nicht der komplette magnetische Fluss, der durch die Primärwicklung erzeugt wird, auch die Sekundärseite (in Abbildung 2.4 rot gestrichelt dargestellt). Diese Verluste werden Streufluss genannt und werden im Ersatzschaltbild durch die Streuinduktivität dargestellt. Daher ist die reale Sekundärspannung kleiner als die hier berechnete ideale Sekundärspannung.

2.2 Aufbau des Transformators

Vereinfacht dargestellt besteht der Transformator aus zwei Spulen, die mittels eines magnetisch leitenden Kerns miteinander gekoppelt werden (siehe Abbildung 2.5). Der Kern besteht aus einem ferromagnetischen Material. Durch seine hohe Permeabilität hat das ferromagnetische Material die Fähigkeit, den magnetischen Fluss möglichst effizient zwischen zwei Spulen zu leiten (siehe Modul 6). Effekte wie die Hysterese und Wirbelstromverluste stören jedoch den widerstandslosen Fluss. Diese Effekte werden als Eisenverluste bezeichnet.

Die Spulen sind um den magnetischen Leiter gewickelt. Wie oben erwähnt, bestimmen die Windungszahlen das Übersetzungsverhältnis der Spannung (Gleichung 2.6). Sie bestehen aus elektrisch gut leitenden Drähten wie Kupfer. Auch diese weisen in der Realität Widerstandsverluste auf, die auch Kupferverluste genannt werden.

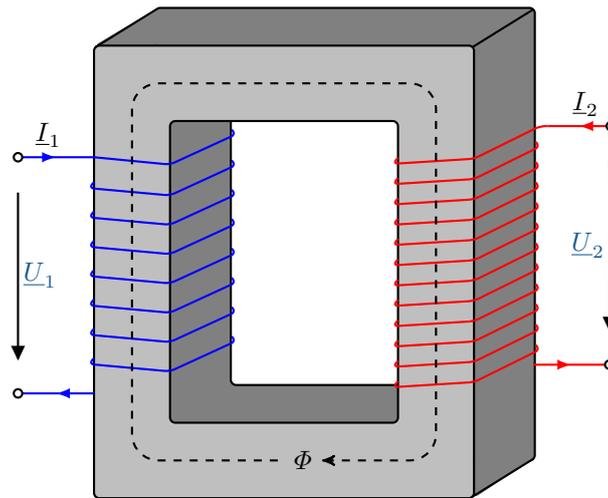


Abbildung 2.5: **Schematischer Aufbau des Transformators.** Zwei Spulen sind mittels eines ferromagnetischen Kerns miteinander gekoppelt. Die Windungszahlen bestimmen dabei das Übersetzungsverhältnis der Spannung.

In dem Schaltbild des idealen Transformators werden die magnetisch gekoppelten Spulen als nebeneinanderstehende, schwarz ausgefüllte Rechtecke dargestellt (siehe Abbildung 2.6). Die zwei Striche zwischen den Spulen weisen darauf hin, dass diese mittels eines durchgehenden magnetisch leitenden Kerns verbunden sind. Die Punkte an den jeweiligen Spulen geben Anschluss über die Führung der Wicklung. Sie können sich unten oder oben befinden. Liegen sie dabei auf der gleichen Höhe, ist die Phasenlage der beiden Spulen gleich. Liegen diese auf unterschiedlichen Höhen, bedeutet dies einen umgekehrten Wicklungssinn und dadurch eine Phasenverschiebung von 180° .

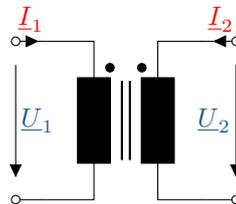


Abbildung 2.6: **Ideales Schaltbild eines Transformators.**

Beispiel 2.1: Idealer dreiphasiger Netztransformator

Ein idealer dreiphasiger Netztrafo hat eine Leistung von $\underline{S}_N = 100 \text{ kVA}$, eine Oberspannung von $\underline{U}_1 = 20 \text{ kV}$ (Dreieck) und eine Unterspannung von $\underline{U}_2 = 400 \text{ V}$ (Dreieck).

- a) Wie groß ist das Übersetzungsverhältnis?

$$\begin{aligned} \dot{u} &= \frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2} = \frac{N_1}{N_2} \\ &= \frac{20 \text{ kV}}{400 \text{ V}} = 50 \end{aligned}$$

- b) Wie groß sind der Primär- und Sekundärstrom im Nennbetrieb bei einem Leistungsfaktor

$$\cos(\varphi) = 1?$$

$$\cos(\varphi) = 1 \rightarrow |\underline{S}| = P$$

$$P = U \cdot I$$

$$I_1 = \frac{P}{U} = \frac{100 \text{ kW}}{20 \text{ kV}} = 5 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{P}{U} = \frac{100 \text{ kW}}{400 \text{ V}} = 250 \text{ A}$$

2.3 Ersatzschaltbild

Zum besseren Verständnis wird das Ersatzschaltbild des realen Transformators (Abbildung 2.7) zunächst funktionsgetreu als galvanisch getrenntes System mit einem Primär- und einem Sekundärstromkreis dargestellt. Im Vergleich zum idealen Transformator ist dieses Ersatzschaltbild um die zuvor beschriebenen Verluste erweitert. Der magnetische Kreis wird mit der Hauptinduktivität L_h und den Streuinduktivitäten $L_{\sigma 1}$ und $L_{\sigma 2}$ in einen elektrischen Kreis transformiert. Die zuvor beschriebenen Kupferverluste in der Primär- und Sekundärspule werden durch die Widerstände R_1 und R_2 repräsentiert. Die Größe \underline{I}_μ steht für den Magnetisierungsstrom und beschreibt jene Komponente des Leerlaufstroms, die erforderlich ist, um den magnetischen Kern des Transformators zu erregen. Die Eisenverluste werden aus Gründen der Vereinfachung in diesem Beispiel außer acht gelassen. Wenn sie berücksichtigt werden sollen, werden die Eisenverluste durch eine Parallelschaltung eines Widerstandes zur Hauptinduktivität dargestellt.

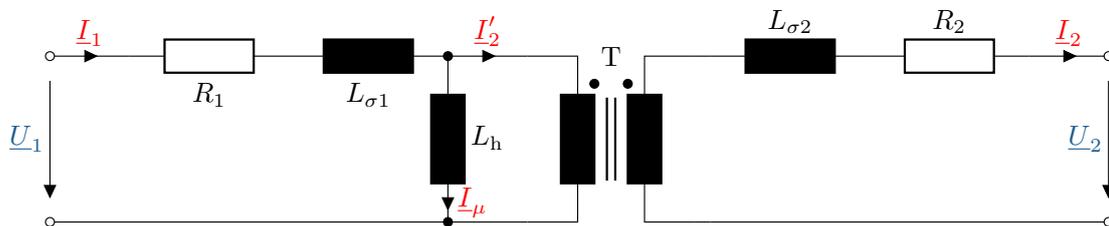


Abbildung 2.7: Ersatzschaltbild eines galvanisch getrennten Transformators.

Anschließend wird in dem T-Ersatzschaltbild des Transformators (Abbildung 2.8) unterstellt, dass keine galvanische Trennung zwischen Primär- und Sekundärseite besteht, obwohl dies in der Realität natürlich der Fall ist. Dieser Schritt ermöglicht die Umrechnung der Größen der Sekundärseite auf die Primärseite und die Anwendung der aus Modul 4 bekannten Rechenregeln. Die Umrechnungsgrößen werden als gestrichne Größen, in diesem Beispiel als \underline{U}'_2 , \underline{I}'_2 , R'_2 und $L'_{\sigma 2}$, gekennzeichnet.

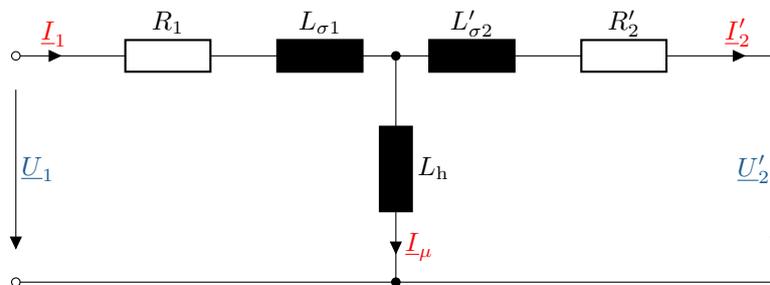


Abbildung 2.8: T-Ersatzschaltbild eines Transformators.

Für die Umrechnung der Spannung auf die Primärseite wird die Spannung \underline{U}'_2 mit dem Übersetzungsverhältnis multipliziert (Gleichung 2.7). Zur Berechnung des eingehenden Stroms \underline{I}_1 wird der Strom \underline{I}_2 mit dem umgekehrten Übersetzungsverhältnis multipliziert und anschließend mit dem Magnetisierungsstrom \underline{I}_μ addiert (Gleichung 2.8).

$$\underline{U}_1 = \underline{U}'_2 = \frac{N_1}{N_2} \cdot \underline{U}_2 \quad (2.7)$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}'_2 + \underline{I}_\mu = \frac{N_2}{N_1} \cdot \underline{I}_2 + \underline{I}_\mu \quad (2.8)$$

Die auftretenden Verluste auf der Sekundärseite $L'_{\sigma 2}$ und R'_2 werden mit dem quadrierten Übersetzungsverhältnis auf die Primärseite umgerechnet (Gleichungen 2.9 und 2.10).

$$L'_{\sigma 2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \cdot L_{\sigma 2} \quad (2.9)$$

$$R'_2 = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \cdot R_2 \quad (2.10)$$

Beispiel 2.2: Realer dreiphasiger Netztransformator

Ein realer dreiphasiger Netztrafo ($f = 50 \text{ Hz}$) hat folgende Daten:

- Leistung: $\underline{S}_N = 100 \text{ kVA}$
- Oberspannung $\underline{U}_1 = 20 \text{ kV}$
- Übersetzungsverhältnis: 50
- $L_h = 500 \text{ H} \Rightarrow \underline{Z}_{Lh} = j157,08 \text{ k}\Omega$
- $L_{\sigma 1} = L'_{\sigma 2} = 190 \text{ mH} \Rightarrow \underline{Z}_{L\sigma} = j59,69 \Omega$
- $R_1 = R'_2 = 30 \Omega$

a) Wie groß ist die Leerlaufspannung \underline{U}_2 bei diesem Übersetzungsverhältnis?

$$\begin{aligned} \underline{U}'_2 &= \underline{U}_1 \cdot \frac{\underline{Z}_h}{\underline{Z}_h + \underline{Z}_{\sigma 1} + R_1} \\ &= 19,992 \text{ kV} \cdot e^{j0,011^\circ} \\ \underline{U}_2 &= 399,85 \text{ V} \cdot e^{j0,011^\circ} \end{aligned}$$

b) Wie groß ist der Leerlaufstrom (auf der Primärseite)?

$$\begin{aligned} \underline{I}_1 &= \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_h + \underline{Z}_{\sigma 1} + R_1} \\ &= \frac{20 \text{ kV}}{157,139 \text{ k}\Omega \cdot e^{j89,989^\circ}} \\ &= 127,28 \text{ mA} \cdot e^{-j89,989^\circ} \end{aligned}$$

c) Wie groß sind die Leerlaufverluste?

$$\begin{aligned} \underline{S}_v &= \underline{U} \cdot \underline{I}^* \\ &= 20 \text{ kV} \cdot (127,28 \text{ mA} \cdot e^{-j89,989^\circ})^* \\ &= 2,546 \text{ kVA} \cdot e^{j89,989^\circ} \end{aligned}$$

3 Gleichstrommaschine

Gleichstrommaschinen sind Elektromaschinen, die mit Gleichstrom betrieben werden und sowohl als Motoren als auch als Generatoren verwendet werden können. Sie zeichnen sich durch eine präzise Steuerbarkeit der Drehzahl und des Drehmoments aus, was sie ideal für Anwendungen mit variabler Geschwindigkeit und Last macht. Gleichstrommaschinen haben einen hohen Anlaufdrehmoment und ermöglichen eine einfache Umkehrung der Drehrichtung. Sie werden häufig in Elektrofahrzeugen, industriellen Steuerungsanlagen und batteriebetriebenen Geräten eingesetzt.

Vorteile:

- Einfacher und kostengünstiger Aufbau der Stromrichter
- Hohe Regeldynamik
- Direkter Betrieb der Maschine mit Akkumulatoren möglich
- Große Überlastfähigkeit

Nachteile:

- Hoher Konstruktionsaufwand
- Wartungsintensiv (Bürsten)
- Geringe Leistungsdichte
- Kosten

3.1 Exkurs Prinzip des Elektromotors

Zu Beginn werden die im Modul 6 vorgestellten Prinzipien aufgefrischt. Die Abbildung 3.1 zeigt in drei Schaubildern kurzgefasst die Wirkweise eines Elektromotors. Zum grundlegenden Aufbau eines Elektromotors gehören ein feststehender Teil, Ständer oder Stator genannt, und ein sich drehender Teil, auch Läufer oder Rotor genannt. In den drei Abbildungen ist eine Leiterspule in einem Hufeisenmagnet zu sehen. Der Hufeisenmagnet bildet hier den Stator und eine um die eigene Achse bewegliche Leiterspule stellt den Rotor dar. Das erste Schaubild illustriert den isolierten Verlauf der magnetischen Feldlinien des Hufeisenmagneten. Sie verlaufen innerhalb des Hufeisenmagneten vertikal von Nord- zum Südpol. Das zweite Schaubild zeigt den isolierten Verlauf der magnetischen Feldlinien der stromdurchflossenen Leiterschleife. Durch den Stromfluss entstehen an der Leiterschleife zwei entgegengesetzte Wirbelfelder. Im dritten Schaubild wird die Wechselwirkung des Hufeisenmagneten (Statorfeld) und der stromdurchflossenen Leiterschleife (Rotorfeld) aufgezeigt. Die beiden Felder überlagern sich. Die aus der Überlagerung resultierende Lorentzkraft bringt gemäß der Rechten-Hand-Regel die Leiterschleife zum rotieren. Aus der elektromagnetischen Energie entsteht mechanische Energie.

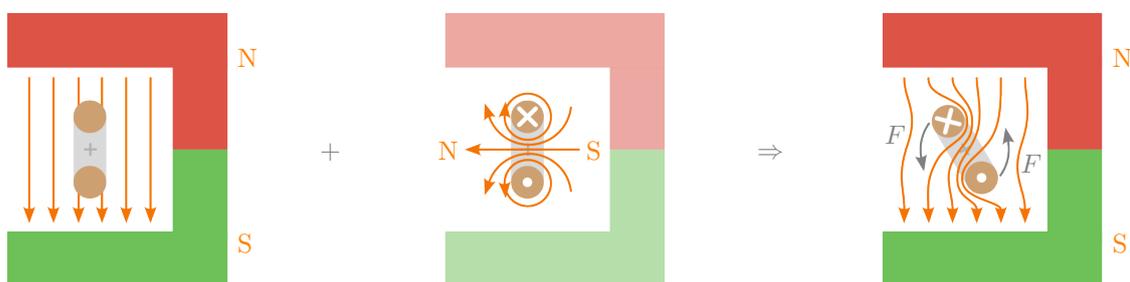


Abbildung 3.1: **Prinzip des Elektromotors.** Die Lorentzkraft bringt die sich im Magnetfeld befindende stromdurchflossene Leiterschleife in eine Drehbewegung.

Die Lorentzkraft kann mit der aus Modul 6 bekannten Formel berechnet werden:

$$F = B \cdot I \cdot \ell \cdot N \quad (3.1)$$

Beispiel 3.1: Kraft einer Gleichstrommaschine

Ein Gleichstrommotor hat im Luftspalt eine magnetische Flussdichte von $B = 0,8 \text{ T}$. Unter den Polen befinden sich insgesamt $N = 400$ Ankerdrähte, die mit einem Strom von $I = 10 \text{ A}$ durchflossen werden. Die wirksame Leiterlänge ist $\ell = 150 \text{ mm}$. Berechnen Sie die Kraft F am Umfang des Ankers.

$$\begin{aligned}
 F &= B \cdot I \cdot \ell \cdot N \\
 &= 0,8 \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2} \cdot 10 \text{ A} \cdot 0,15 \text{ m} \cdot 400 \\
 &= 480 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{A} \cdot \text{m}}{\text{s}^3 \cdot \text{A} \cdot \text{m}^2} = 480 \text{ N}
 \end{aligned}$$

3.2 Aufbau und Gehäusekonstruktion

Der Aufbau der Gleichstrommaschine wird anhand dreier Abbildungen dargestellt. Abbildung 3.2 zeigt ein diagonales Schnittmodell der Gleichstrommaschine, das eine allgemeine Übersicht über die Komponenten von Stator und Rotor gibt. Zur detaillierteren Veranschaulichung des Aufbaus werden die Abbildung 3.3 mit Fokus auf dem Stator und Abbildung 3.4 zur Veranschaulichung des Rotors einer Gleichstrommaschine herangezogen.

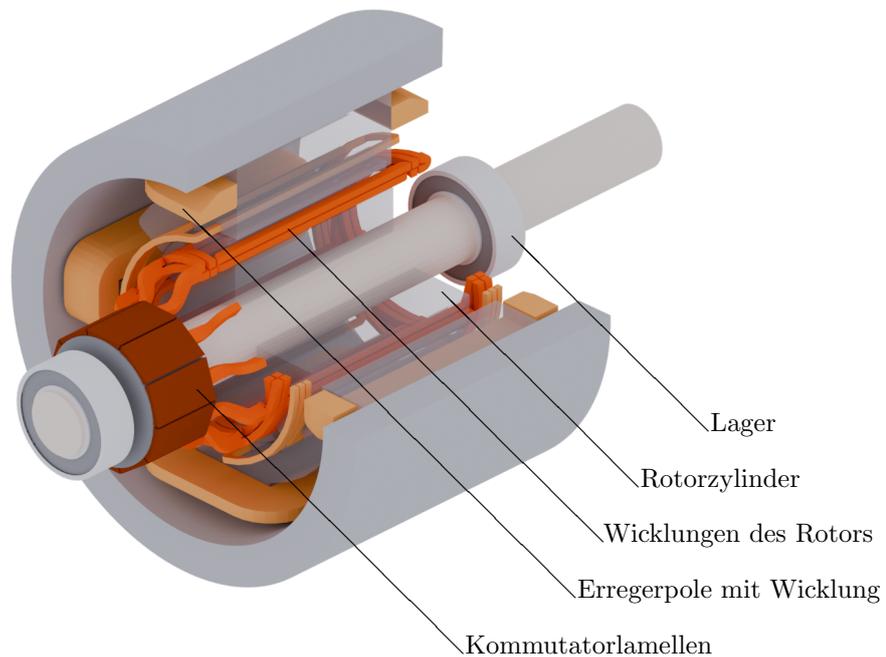


Abbildung 3.2: Grafik einer aufgeschnittenen Gleichstrommaschine.

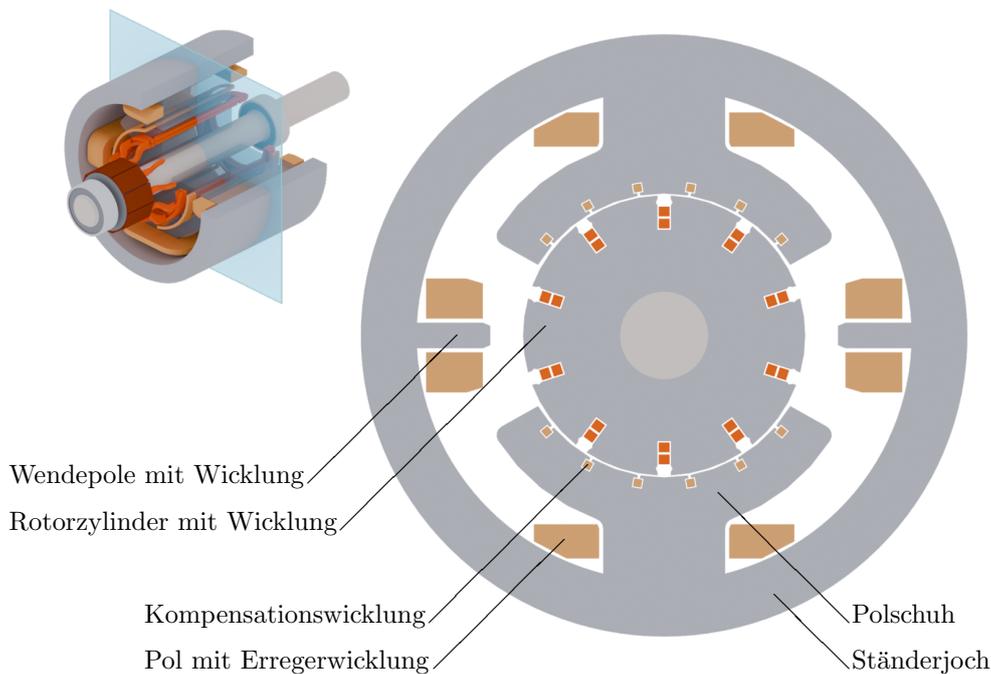


Abbildung 3.3: **Grundlegender Aufbau einer Gleichstrommaschine.** Hier mit nur einem Polpaar (Polpaarzahl $p = 1$).

Die Komponenten des Strators, auch Ständer genannt, werden im frontalen Querschnitt einer Gleichstrommaschine (Abbildung 3.3) gut veranschaulicht. Eine der grundlegenden Komponente ist die Erregerwicklungen, die um ein Polschuh gewunden, einen Pol darstellt. Die Pole haben die Aufgabe, ein Magnetfeld, Erregerfeld genannt, zu erzeugen.

Da ein magnetisches Feld immer einen Nord- und einen Südpol beinhaltet, werden die Pole paarweise gegenüber eingebaut. Die daraus resultierende Kenngröße, die Polpaarzahl, gibt Aufschluss über die Betriebseigenschaften der Gleichstrommaschine. Eine höhere Polpaarzahl verringert die Drehzahl, erhöht jedoch das Drehmoment. Bei Kleinmaschinen können die Erregerwicklungen durch Permanentmagnete ersetzt werden. Bei größeren Maschinen (ca. über 1 kW) sind zusätzlich Wendepolwicklungen vorhanden, die hier jedoch vernachlässigt werden.

In der Abbildung 3.4 sind die Komponenten des Rotors gut ersichtlich. Im Allgemeinen wird der Rotor auch Anker oder als Läufer bezeichnet. Die Funktion des Rotors besteht darin die elektromagnetische Energie durch Rotationen um die eigene Achse in mechanische Energie (und umgekehrt) zu wandeln. Hierzu ist der Rotor an einer Motorwelle befestigt, die die mechanische Energie überträgt. Das Kugellager am Ende der Motorwelle verringert dabei die Reibungsverluste bei der Energieübertragung. Um den Rotor in Bewegung zu bringen, ist das Zusammenwirken von Kommutator und Rotorwicklung wichtig. Die Rotorwicklung, auch Ankerwicklung bezeichnet, hat die Aufgabe ein magnetisches Feld, das Ankerfeld, zu erzeugen. Erst durch die Interaktion des Ankerfelds mit dem Erregerfeld wird ein Drehmoment auf den Rotor ausgeübt und setzt diesen in Bewegung. Die Blechwände, um die die Spulen gewickelt sind, bestehen aus isolierenden Blechen, um Wirbelströme in den Wicklungen zu reduzieren. Der Kommutator oder Stromwender hat die Funktion die Rotorwicklung getaktet mit Strom zu versorgen. Er besteht aus mehreren voneinander getrennten Lamellen, die jeweils mit einem Strang der Rotorwicklung verbunden. Der Strom wird nun über am Strator angebrachten Kohlebürsten an die Kommutatorlamellen geleitet. Durch die Drehung der Lamellen unter den Bürsten wirkt der Kommutator als mechanischer Schalter und sorgt dafür, dass die Stromrichtung in den Rotorwicklungen die sich jeweils unter den Hauptpolen befinden gleich bleibt.

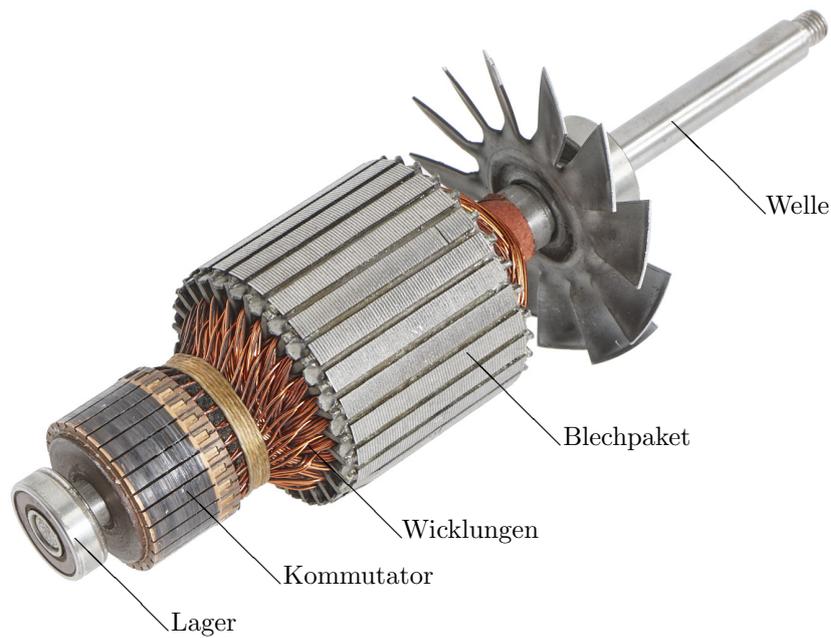


Abbildung 3.4: **Foto eines Rotors.** Zu erkennen sind hier die charakteristischen Bauelemente.

3.3 Magnetische Felder

Für die Lorentzkraft ist das magnetische Feld entscheidend, in dem sich der Leiter bewegt. Dieses Feld wird durch den Stator mit den Erregerwicklungen erzeugt und ist im Bereich des Rotors näherungsweise parallel und homogen.

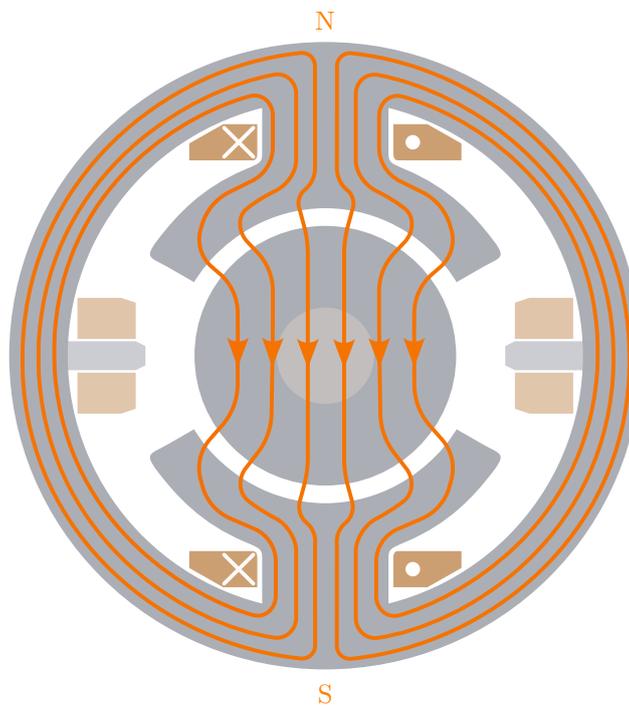


Abbildung 3.5: **Erregerfeld einer Gleichstrommaschine.** Schematische Darstellung in der Vorderansicht.

3.4 Berechnung des Drehmoments

In Modul 6 und Kapitel 3.1 ist bereits die Kraftwirkung auf einen stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld erklärt worden. Um das Drehmoment der Gleichstrommaschine zu berechnen, wird zuerst die induzierte Spannung ermittelt (siehe Modul 6). Dreht sich der Rotor einer erregten Gleichstrommaschine, wird in jeder Leiterschleife des Ankers eine Spannung induziert. Nach dem Induktionsgesetz (Gleichung 2.4) ist die Höhe der induzierten Spannung (Quellenspannung) U_q vom magnetischen Fluss Φ und der zeitlichen Änderung, in diesem Fall der Drehzahl n bzw. der damit verküpften Kreisfrequenz $\omega = 2\pi \cdot n$ abhängig. Werden hierzu noch die spezifischen geometrischen Gegebenheiten des Rotors in Form der Ankerkonstanten K multipliziert, so ergibt das Produkt aus diesen Kenngrößen die induzierte Spannung U_q der Gleichstrommaschine (siehe Gleichung 3.2)

$$U_q = K \cdot \Phi \cdot \omega \quad (3.2)$$

Wenn sowohl die elektrischen als auch mechanischen Verluste vernachlässigt wird, kann die induzierte Spannung kann auch direkt über die sogenannte innere Leistung P_i angegeben werden. Diese entspricht dann sowohl der elektrischen Leistung $U_q \cdot I_A$, als auch der mechanischen Leistung P_{mech} , welche sich aus dem Produkt des inneren Drehmoments M_i und der Winkelgeschwindigkeit ω errechnet.

$$P_i = U_q \cdot I_A = P_{\text{mech}} = M_i \cdot \omega \quad (3.3)$$

Wird diese Erkenntnis nun in Gleichung 3.2 eingesetzt, errechnet sich das inner Drehmoment M_i aus dem Produkt der Ankerkonstante K , den magnetischen Fluss Φ und dem Ankerstrom I_A

$$M_i = K \cdot \Phi \cdot I_A \quad (3.4)$$

Im Motorbetrieb ist das Drehmoment an der Welle der Maschine das innere Drehmoment M_i abzüglich der Verluste M_V . Das Maschinenmoment kann auch durch den Wirkungsgrad η_1 ausgedrückt werden. Dieser Wirkungsgrad vernachlässigt allerdings die elektrischen Verluste durch den Ankerwiderstand und der Erregung.

$$M = M_i - M_V \quad M = \eta_1 \cdot M_i \quad (3.5)$$

- Verlustmoment: M_V [Nm]
- Wirkungsgrad: η [1]

3.5 Fremderregte Gleichstrommaschine

Der Erregerkreis im Stator der Gleichstrommaschine und der Rotorkreis, der über den Kommutator mit Strom versorgt wird, sind prinzipiell unabhängig voneinander. Wenn beide Stromkreise von unterschiedlichen Spannungsquellen versorgt werden, wird die Maschine fremderregt genannt. Das Ersatzschaltbild ist in Abbildung 3.6 dargestellt.

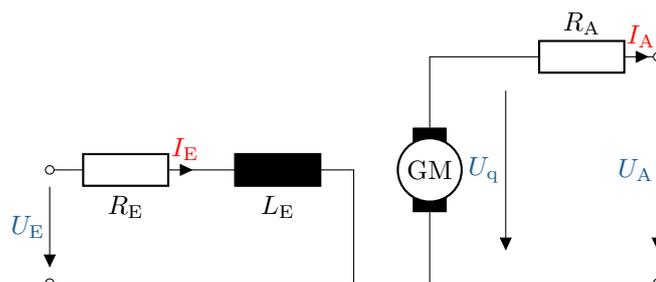


Abbildung 3.6: Ersatzschaltbild einer fremderregten Gleichstrommaschine.

Der Erregerkreis besteht aus der Induktivität der Erregerwicklung L_E und dem Kupferwiderstand R_E der Spule. Im Ankerkreis wird die Wicklung als Kreis mit angedeuteten Schleifringen dargestellt, da sie einerseits eine Induktivität, als auch eine Spannungsquelle darstellt. Auch der Anker hat einen ohmschen Widerstand R_A .

Der Maschenumlauf im Rotorkreis ergibt:

$$U_A = U_q + I_A \cdot R_A \quad (3.6)$$

Durch Einsetzen von Gleichung 3.2 und 3.4 ergibt sich die Drehzahl/Drehmoment- und Ankerstromkennlinie für die fremderregte Gleichstrommaschine:

$$n = \frac{U_A}{2\pi K \cdot \Phi} - \frac{R_A \cdot M_i}{2\pi(K \cdot \Phi)^2} \quad (3.7)$$

Beispiel 3.2: Fremderregte Gleichstrommaschine

Eine fremderregte Gleichstrommaschine mit der Ankerkonstante $K = \frac{1}{2\pi}$ hat bei der Spannung $U_A = 400 \text{ V}$ eine Leerlaufdrehzahl von $n = 1200 \frac{1}{\text{min}}$. Der Ankerwiderstand beträgt $R_A = 2,3 \Omega$.

a) Wie groß ist der Erregerfluss Φ ?

Im Leerlauf ist das innere Moment M_i gleich Null. Gleichung 3.7 vereinfacht sich daher zu:

$$\begin{aligned} n &= \frac{U_A}{2\pi K \cdot \Phi} \\ \Phi &= \frac{U_A}{2\pi K \cdot n} = \frac{400 \text{ V}}{\frac{2\pi}{2\pi} \cdot 1200 \frac{1}{\text{min}} \cdot 60 \frac{1}{\text{min}}} = 20 \text{ Vs} \end{aligned}$$

b) Wie schnell dreht die Maschine bei einem inneren Drehmoment von $M_i = 10 \text{ Nm}$?

$$\begin{aligned} n &= \frac{U_A}{2\pi K \cdot \Phi} - \frac{R_A \cdot M_i}{2\pi(K \cdot \Phi)^2} \\ &= \frac{400 \text{ V}}{\frac{2\pi}{2\pi} \cdot 20 \text{ Vs}} - \frac{2,3 \Omega \cdot 10 \text{ Nm}}{2\pi\left(\frac{1}{2\pi} \cdot 20 \text{ Vs}\right)^2} \\ &= 20 \frac{1}{\text{s}} - 0,362 \frac{1}{\text{s}} = 19,638 \frac{1}{\text{s}} = 1178,3 \frac{1}{\text{min}} \end{aligned}$$

c) Wie groß ist der Ankerstrom?

$$I_A = \frac{M_i}{K \cdot \Phi} = \frac{10 \text{ Nm}}{\frac{1}{2\pi} \cdot 20 \text{ Vs}} = 3,61 \text{ A}$$

3.6 Reihenschlussmaschine

Bei der Reihenschlussmaschine sind Erreger- und Rotorkreis in Reihe miteinander verbunden. Der Erregerstrom ist daher gleich dem Ankerstrom. Diese Art von Motor wird häufig in einfachen Elektrogeräten an Wechselspannung eingesetzt und wird daher auch Universalmotor genannt. Als Gleichstrommaschine wurde sie früher vor allem in Traktionsantrieben zum Beispiel von Straßenbahnen eingesetzt. Heutzutage sind diese allerdings wegen des besseren Wirkungsgrades durch Drehstromantriebe mit Umrichter ersetzt.

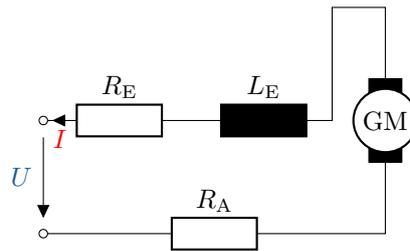


Abbildung 3.7: Ersatzschaltbild einer Reihenschlussmaschine.

- Auch für Wechselspannung einsetzbar
- hohes Anzugsmoment

Im Gegensatz zur fremderregten Gleichstrommaschine, deren Drehzahl-Drehmomentenkennlinie nach Gleichung 3.7 eine Gerade ist, verhält sich die Reihenschlussmaschine nichtlinear. Ohne Belastung ist die Drehzahl theoretisch unendlich, die Maschine wird also so stark beschleunigen, bis sie sich selbst durch die Fliehkraft zerstört. Die Maschine „geht durch“. Bei den Anwendungen als Traktionsantrieb kommt ein Leerlauf aber nie vor, das große Anlaufmoment ist hingegen gewünscht.

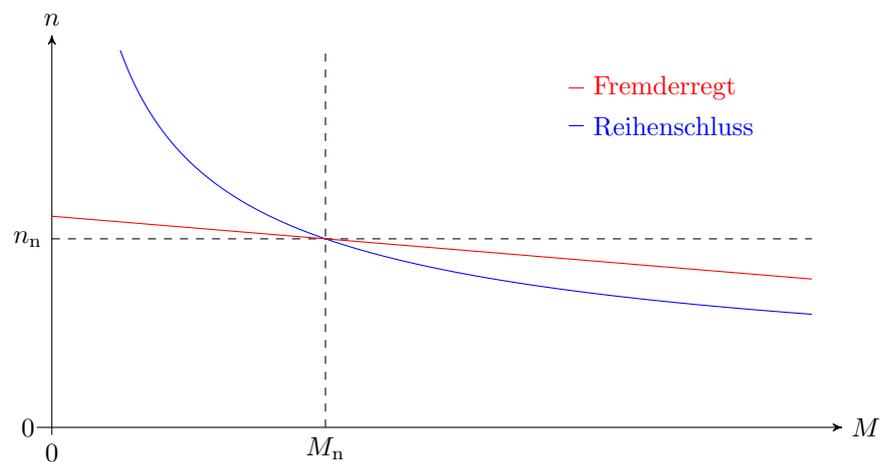


Abbildung 3.8: Drehzahl-Drehmomentenkennlinien. Kennlinie einer fremderregten Gleichstrommaschine sowie einer Reihenschlussmaschine.

4 Synchronmaschine

Die Synchronmaschine ist eine Drehfeldmaschine, die folglich mit einem dreiphasigen Drehstrom (siehe Modul 7) im Statorkreis betrieben wird. Der Rotor kann entweder permanent (mit Dauermagneten) oder durch einen Gleichstromkreis erregt werden. Dieser Maschinentyp wird in Kraftwerken zur Stromgewinnung eingesetzt, da er aber über einen sehr hohen Wirkungsgrad verfügt, wird er auch in der modernen Antriebstechnik in kleineren Leistungsklassen immer häufiger eingesetzt. Ein wesentlicher Nachteil besteht jedoch darin, dass die Synchronmaschine immer durch eine Leistungselektronik geregelt werden muss, da sie an einem einfachen Drehstromnetz nicht anläuft.

Vorteile:

- Robust und wartungsfrei.

- Hohe Regeldynamik.
- Hohe Leistungsdichte bei geringem Bauvolumen.
- Überlastfähigkeit.

Nachteile:

- Aufwendige Umrichtertechnik.
- Aufwendige Regelung.
- Gesteuerter Betrieb nur mit großem Aufwand oder gar nicht möglich.

4.1 Aufbau

- Drei Statorwicklungen, die 120° zueinander versetzt sind.
- Geblechte Ausführung des Stators, da dieser ein magnetisches Wechselfeld erfährt.
- Im Läufer befindet sich die Erregerwicklung.
- Der Läufer wird teilweise nicht geblecht.

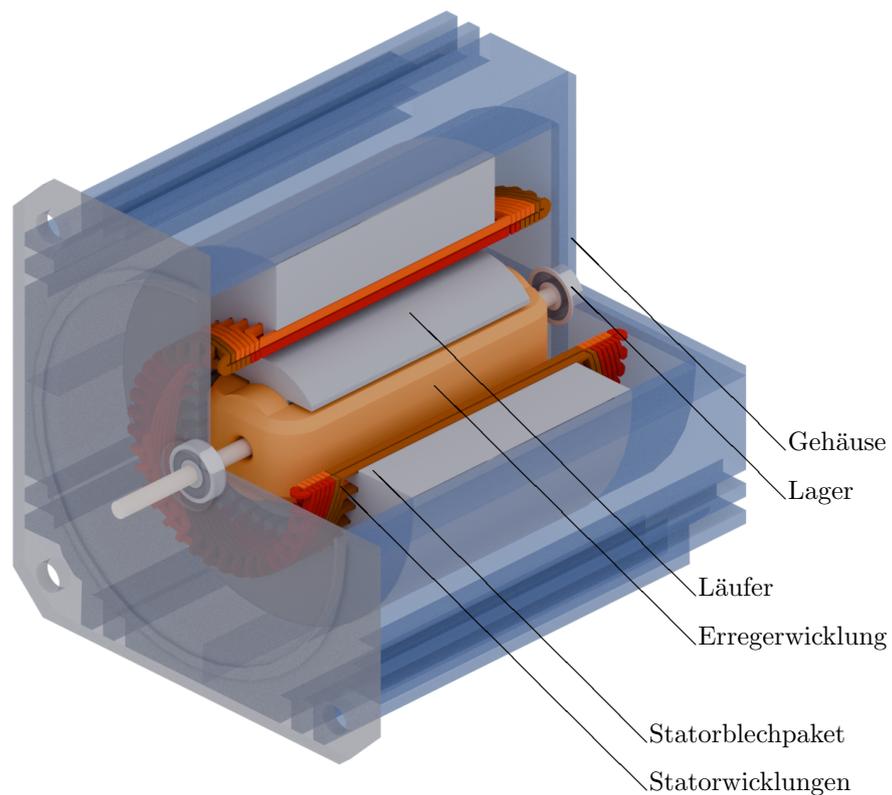


Abbildung 4.1: **Grafik einer aufgeschnittenen fremderregten Synchronmaschine.**

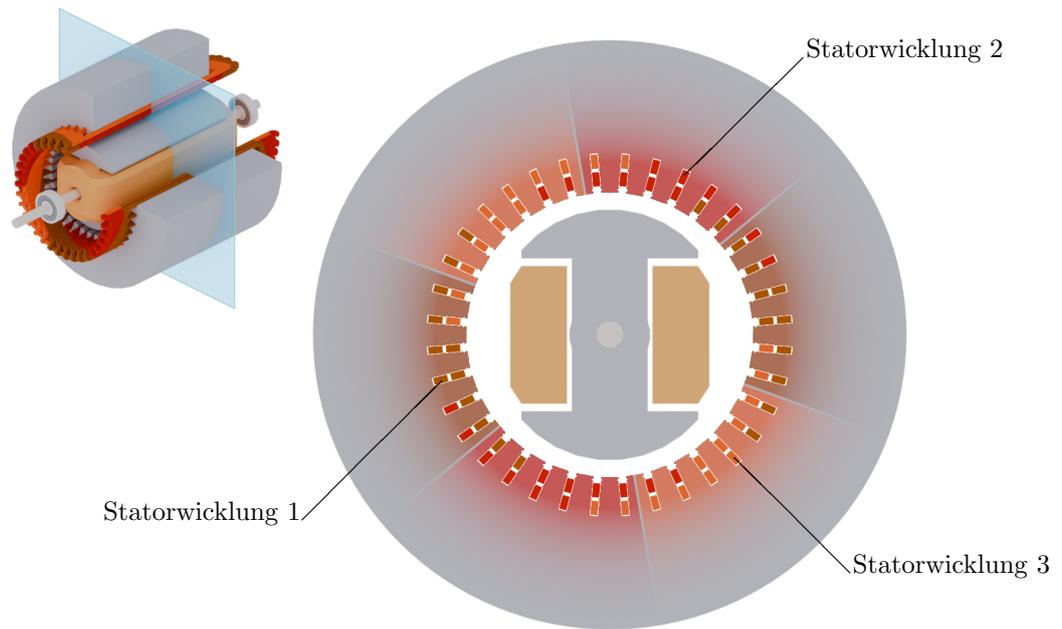


Abbildung 4.2: **Aufbau einer fremderregten Synchronmaschine.** Die um 120° zueinander versetzten Statorwicklungen sind hier farbig veranschaulicht.

4.2 Feldverläufe

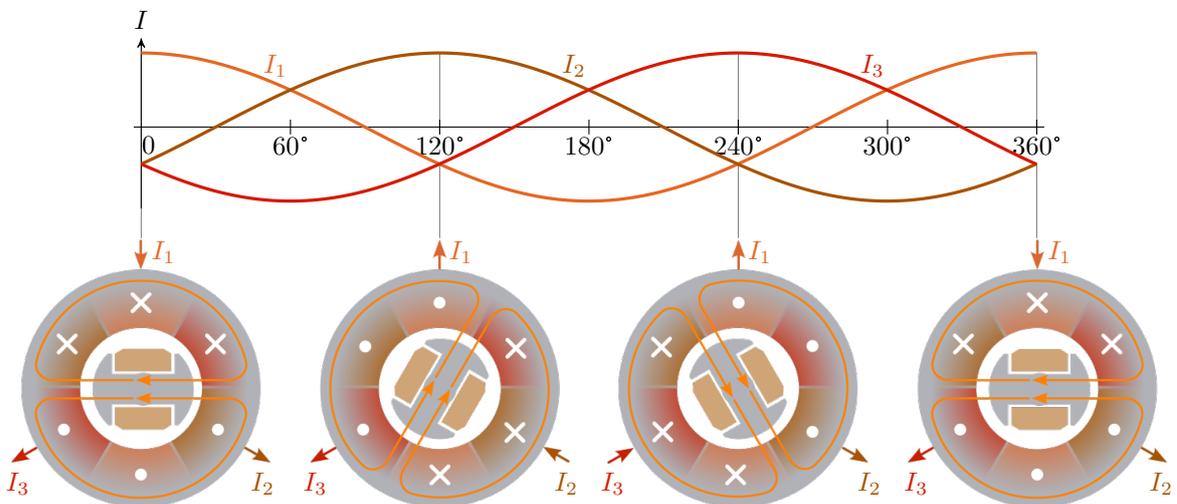


Abbildung 4.3: **Richtung des Drehfeldvektors.** Der Rotor dreht sich synchron zu den sinusförmigen, um 120° zueinander versetzten Drehfeldern des Stators.

Bei der Synchronmaschine bewirkt die magnetische Kopplung zwischen Stator und Rotor das Drehmoment. Im Motorbetrieb folgt das Rotorfeld dem Statorfeld. Die mechanische Drehzahl muss daher immer gleich der elektrischen Drehfrequenz sein. Zwischen dem Stator und dem Rotor befindet sich der lastabhängige sogenannte Polradwinkel ϑ . Bei $\vartheta = 90^\circ$ ist das Drehmoment am größten. Wird im Motorbetrieb der Polradwinkel durch eine zu hohe Belastung größer als 90° , sinkt das erzeugte Drehmoment und die Maschine „kippt“ – das heißt, sie bleibt schlagartig stehen.

- Der Statorfluss entsteht durch die Überlagerung der Flüsse der drei Wicklungen.
- Der Läuferfluss entsteht durch die Erregerwicklung.

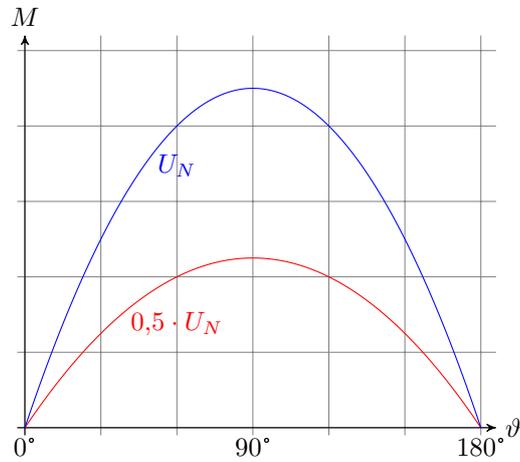


Abbildung 4.4: Drehmomentkennlinie in Abhängigkeit vom Polradwinkel.

4.3 Ersatzschaltbild

Im Netzbetrieb ist die Klemmenspannung U_1 und die Frequenz ω fest vorgegeben. Das ist ein häufiger Betriebsfall für die Synchronmaschine.

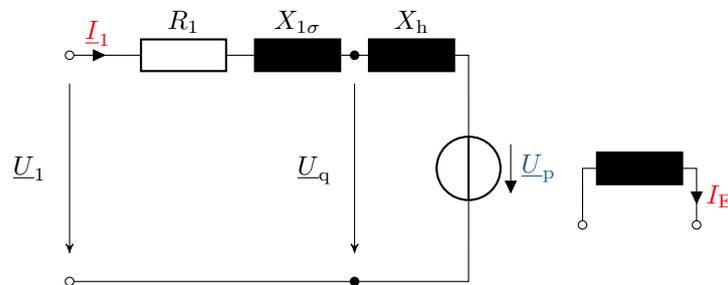


Abbildung 4.5: Komplexes einphasiges ESB eines Vollpolgenerators. Beispielsweise im Netzbetrieb.

5 Asynchronmaschine

Die Asynchronmaschine ist ebenfalls eine Drehfeldmaschine. Der Stator ist identisch zum Stator der Synchronmaschine, der Rotor ist hingegen in der häufigsten Version dieses Maschinentyps, beim sogenannten Käfigläufer, passiv.

5.1 Aufbau

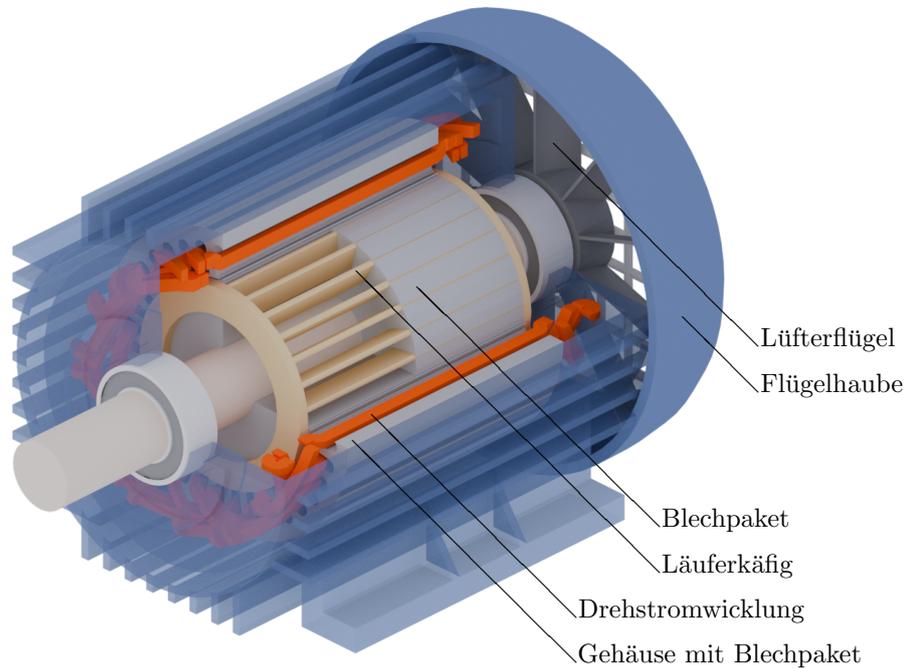


Abbildung 5.1: **Aufbau einer Käfigläufer-Asynchronmaschine.** Die Bleche des Rotorzylinders wurden der Anschaulichkeit halber zur Hälfte beschnitten, um den Käfig freizulegen.

5.2 Käfigläufer

- In den Nuten des Läuferblechpaketes liegen leitfähige Stäbe.
- Stirnseitig sind die Stäbe durch Kurzschlussringe miteinander verbunden.
- Zusammen bilden diese Komponenten einen Käfig (ähnlich Hamsterkäfig).
- Stäbe werden geschrägt ausgeführt zur Reduktion von Oberwellen im umlaufenden magnetischen Feld.

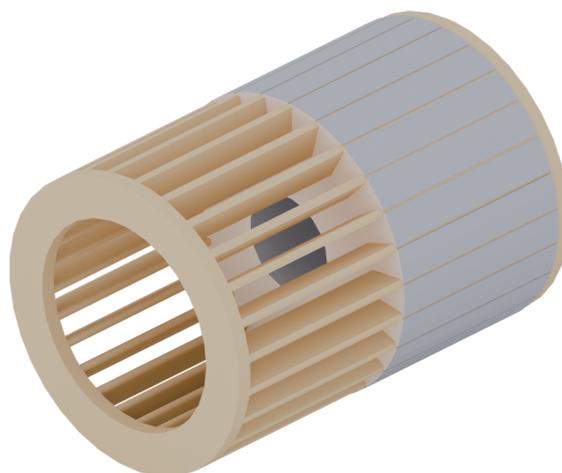


Abbildung 5.2: **Käfig eines Asynchronrotors.** Zur Hälfte mit Blechkpaket gezeigt.

5.3 Anlauf der ASM

- Der Stator erzeugt im Ständer eine umlaufende magnetische Wanderwelle mit der Winkelgeschwindigkeit: $\omega_s = \frac{\omega_0}{p}$.
- Der ruhende Läufer sieht ein veränderliches Feld mit der Frequenz ω_s .
- Das magnetische Drehfeld durchsetzt den Läufer und induziert eine Spannung mit der Frequenz ω_s .
- Aus der Spannungsinduktion resultiert ein Stromfluss, da die Läuferwicklungen kurzgeschlossen sind.
- Der induzierte Rotorstrom wirkt der von ihm gesehenen Änderung des Statorfeldes entgegen (Lenzsche Regel).
- Statorfeld und Rotorstrom wechselwirken durch die Lorentzkraft- es kommt zur Ausbildung eines Drehmoments.
- Das Drehmoment wirkt in Richtung des Ständerdrehfelds.
- Der Läufer beginnt sich zu drehen.

5.4 Betrieb der ASM

- Mit steigender Drehzahl des Läufers sieht dieser eine immer langsamere Änderung des Statorfeldes: $\omega_r = \omega_s - \omega_{\text{mech}}$.
- Mit steigender Drehzahl sinkt sowohl der Betrag als auch die Frequenz der induzierten Spannung im Rotor.
- Der Betrag des Drehmoments sinkt.
- Drehen sich der Läufer und Ständerfeld mit der gleichen Frequenz, ist die synchrone Drehzahl erreicht.
- Die Läuferwicklungen sehen keine Änderung des Feldes.
- Induzierter Strom und Moment der Maschine werden zu Null.
- Durch Reibungseffekte wird der Rotor wieder abgebremst - es kommt zur erneuten Ausbildung eines Moments.
- Im Gleichgewichtszustand stellt sich eine Drehzahl knapp unter der synchronen ein.

5.5 Drehzahl/Drehmomenten-Kennlinie

Die Drehzahl/Drehmomenten-Kennlinie ist bei der Asynchronmaschine nichtlinear und kann in mehrere Abschnitte unterteilt werden. Häufig wird die Kennlinie wie in Abbildung 5.3 gezeigt über den Schlupf s aufgetragen. Der Schlupf bezeichnet die prozentuale Abweichung der mechanischen Drehgeschwindigkeit des Rotors n_r von der elektrischen Drehgeschwindigkeit n_s des speisenden Netzes im Stator.

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (5.1)$$

Ein Schlupf von $s = 1$ (100%) entspricht daher dem Stillstand der Maschine oder Drehzahl $n = 0$, ein Schlupf von $s = 0$ entspricht dem netzsynchronen Betrieb, der jedoch bei der Asynchronmaschine niemals auftreten kann, da das Drehmoment in dem Fall Null wird.

Die Drehzahl/Drehmomenten-Kennlinie wird auch als Klosssche Kennlinie bezeichnet und kann durch die Gleichung 5.2 ausgedrückt werden:

$$M = \frac{2 \cdot M_K}{\frac{s_K}{s} + \frac{s}{s_K}} \quad (5.2)$$

Der Schlupf entspricht bei großen Maschinen in sehr guter Näherung den prozentualen Verlusten der Maschine:

$$\eta \approx 1 - s \quad (5.3)$$

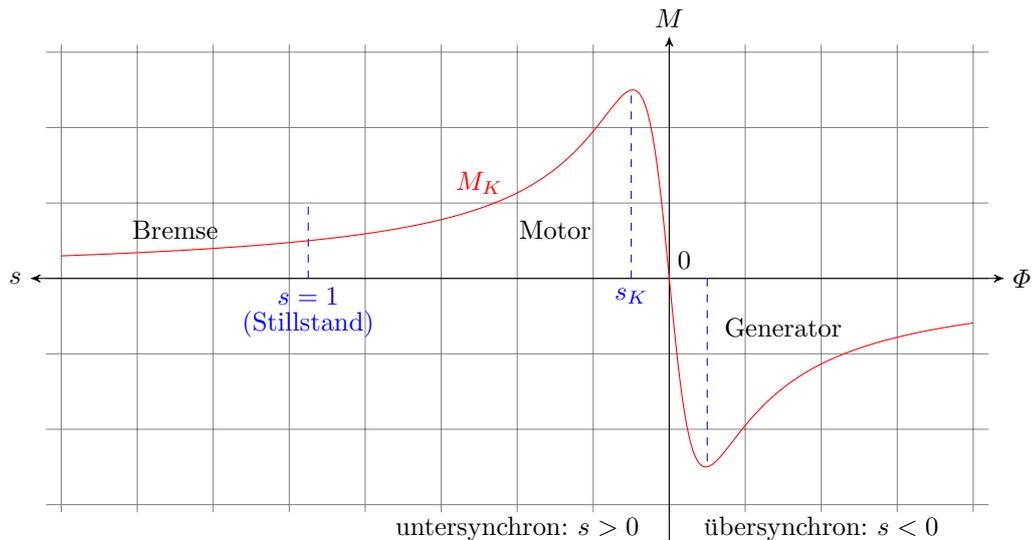


Abbildung 5.3: **Klossche Kennlinie.** Drehzahl/Drehmomenten-Kennlinie einer Asynchronmaschine.

Beispiel 5.1: Asynchronmaschine

Ein Drehstrom-Asynchronmotor hat die folgenden Typenschildangaben:

- Nennleistung: 10 kW
- Nenndrehzahl: $1440 \frac{\text{U}}{\text{min}}$
- Frequenz: 50 Hz
- Kippschlupf: 25%

Berechnen Sie das Nennmoment, das Kippmoment und das Anlaufmoment.

$$\begin{aligned} P_N &= M_N \cdot \omega_N = M_N \cdot 2\pi n_N \\ M_N &= \frac{P_N}{2\pi n_N} = \frac{10 \cdot 10^3 \text{ W}}{2\pi \cdot 1440 \frac{1}{60 \text{ s}}} = 66,31 \text{ Nm} \\ s_N &= \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \\ &= \frac{2\pi \cdot 1500 \frac{1}{60 \text{ s}} - 2\pi \cdot 1440 \frac{1}{60 \text{ s}}}{2\pi \cdot 1500 \frac{1}{60 \text{ s}}} \\ &= 0,04 \end{aligned}$$

Für die Berechnung der weiteren Momente wird Gleichung 5.2 für die Fälle Nennbetrieb und Stillstand ausgerechnet.

$$M = \frac{2 \cdot M_K}{\frac{s_K}{s} + \frac{s}{s_K}}$$
$$M_K = \frac{M_N}{2} \cdot \left(\frac{s_K}{s_N} + \frac{s_N}{s_K} \right)$$
$$= \frac{66,31 \text{ Nm}}{2} \cdot \left(\frac{0,25}{0,04} + \frac{0,04}{0,25} \right) = 212,54 \text{ Nm}$$
$$M_A = \frac{2 \cdot 212,54 \text{ Nm}}{\frac{0,25}{1} + \frac{1}{0,25}} = 100,02 \text{ Nm}$$

A Übungsaufgaben

A.1 Gleichstrommaschine 1

Eine fremderregte Gleichstrommaschine hat die folgenden Angaben auf ihrem Typenschild:

- Nennleistung: 41,8 kW
- Nenndrehzahl: $1900 \frac{1}{\text{min}}$
- Ankernennspannung: 440 V
- Ankernennstrom: 100 A
- Erregung: 240 V
- Erregerstrom: 10 A
- Leerlaufdrehzahl: $2000 \frac{1}{\text{min}}$

Hinweis: Die Nennleistung auf einem Motortypenschild bezeichnet immer die abgegebene mechanische Leistung im Nennpunkt.

- a) Wie groß ist das Drehmoment der Maschine im Nennpunkt?
- b) Berechnen Sie den Wirkungsgrad der Maschine im Nennpunkt.
- c) Berechnen Sie das Produkt aus Erregerfluss und der Ankerkonstanten $K \cdot \Phi$
- d) Wie groß ist der Ankerwiderstand R_A ?

B Lösungen zu den Übungsaufgaben

B.1 Gleichstrommaschine 1

- a) Aus der Nennleistung und der Nenndrehzahl ergibt sich direkt das Nenndrehmoment:

$$P_{\text{mech}} = M \cdot \omega$$

$$M = \frac{P_{\text{mech}}}{\omega} = \frac{41,8 \text{ kW}}{2\pi \cdot 1900 \frac{1}{\text{min}} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}} = 210,08 \text{ Nm}$$

- b) Im Motorbetrieb ist der Wirkungsgrad der Quotient aus mechanischer bezogen auf die elektrische Leistung. Hierbei muss sowohl die Ankerleistung, als auch die Erregerleistung berücksichtigt werden.

$$\eta = \frac{P_{\text{mech}}}{P_{\text{elektr}}} = \frac{41,8 \text{ kW}}{440 \text{ V} \cdot 100 \text{ A} + 240 \text{ V} \cdot 10 \text{ A}} = 90,08 \%$$

- c) Nach Gleichung 3.2 wird die induzierte Spannung berechnet. Im Leerlauf muss die induzierte Spannung der Ankerspannung entsprechen. Gleiches geht aus Gleichung 3.7 hervor, da im Leerlauf auch das Drehmoment Null sein muss.

$$U_q = K \cdot \Phi \cdot \omega \tag{3.2}$$

$$K \cdot \Phi = \frac{U_q}{\omega} = \frac{440 \text{ V}}{2\pi \cdot 2000 \frac{1}{\text{min}} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}} = 2,1 \text{ Vs}$$

- d) Hier sind zwei Ansätze möglich. Es kann Gleichung 3.7 auf den Ankerwiderstand umgeformt werden:

$$\begin{aligned}
 n &= \frac{U_A}{2\pi K \cdot \Phi} - \frac{R_A \cdot M_i}{2\pi(K \cdot \Phi)^2} & (3.7) \\
 R_A &= \left(\frac{U_A}{2\pi K \cdot \Phi} - n \right) \cdot \frac{2\pi(K \cdot \Phi)^2}{M_i} \\
 &= \left(\frac{440 \text{ V}}{2\pi \cdot 2,1 \text{ Vs}} - \frac{1900}{60 \text{ s}} \right) \cdot \frac{2\pi \cdot (2,1 \text{ Vs})^2}{210,08 \text{ Nm}} = 220 \text{ m}\Omega
 \end{aligned}$$

Die andere Berechnungsvariante führt über das Ersatzschaltbild in Abbildung 3.6. Im Nennbetrieb können wir die Quellenspannung U_q berechnen. Diese muss kleiner als die Quellenspannung im Leerlauf sein.

$$\begin{aligned}
 U_q &= K \cdot \Phi \cdot \omega & (3.2) \\
 U_{q,n} &= 2,1 \text{ Vs} \cdot 2\pi \cdot 1900 \frac{1}{\text{min}} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 418 \text{ V}
 \end{aligned}$$

Der Spannungsabfall am Widerstand R_A muss durch dem Maschenumlauf die Differenzspannung zwischen Ankerspannung und induzierter Spannung betragen. Da der Ankerstrom im Nennbetrieb bekannt ist, kann der Widerstand über das Ohmsche Gesetz berechnet werden.

$$R_A = \frac{U_A - U_q}{I_A} = \frac{440 \text{ V} - 418 \text{ V}}{100 \text{ A}} = 220 \text{ m}\Omega$$

Index

A	
Asynchronmaschine	
Anlauf	21
Aufbau	19
Funktionsprinzip	21
E	
Erregerwicklung	12
G	
Gleichstrommaschine	
Aufbau	11
Felder	13
Fremderregt	14
Rotor	13
H	
Hochspannung	3
K	
Käfigläufer	20
Kommutator	12
L	
Läufer	10
M	
Mittelspannung	3
N	
Netztransformator	7
P	
Polradwinkel	18
R	
Rotor	10
S	
Schlupf	21
Ständer	10
Stator	10
Stromwender	12
Synchronmaschine	
Aufbau	17
Ersatzschaltbild	19
T	
Transformator	1