



**HTL ST. PÖLTEN**

# **Antriebstechnik**

**Part IV - Gleichstrommaschinen**

**V: 0.3.0**

**Dipl. Ing. Erich Schubert**  
HTBLuVA St.Pölten  
A-3100 St. Pölten, Waldstraße 3

# Inhaltsverzeichnis

<b>29 Allgemeines zu elektrischen Maschinen</b>	29-1
29.1 Physikalische Grundprinzipen . . . . .	29-2
29.1.0.1 Rotationsspannung . . . . .	29-5
29.2 Motoren . . . . .	29-6
29.2.1 Mikroantriebe . . . . .	29-6
29.2.2 Mini- und Kleinmotoren . . . . .	29-6
29.2.3 Industrieantriebe, Mittelmaschinen . . . . .	29-6
29.2.4 Großantriebe . . . . .	29-6
29.3 Generatoren . . . . .	29-7
29.3.1 Generatoren kleiner Leistung . . . . .	29-7
29.3.2 Generatoren mittlerer Leistung . . . . .	29-7
29.3.3 Großgeneratoren . . . . .	29-7
29.4 Von der Zeit überholte Maschinenkonzepte . . . . .	29-7
29.5 statische el. Maschinen . . . . .	29-7
<b>30 Gleichstrommaschinen</b>	30-1
30.1 Grundlegender Aufbau . . . . .	30-1
30.1.1 Ständer, Joch . . . . .	30-2
30.1.2 Anker . . . . .	30-2
30.1.3 Stromwender, Kollektor . . . . .	30-2
30.2 Spannungsinduktion . . . . .	30-2
30.3 Drehzahlstellung . . . . .	30-3
30.4 Betriebsverhalten . . . . .	30-3
30.4.1 Fremderregt . . . . .	30-3
30.4.2 Reihenschlussmaschinen . . . . .	30-3
30.4.3 Nebenschlussmaschinen . . . . .	30-3
30.4.4 Compoundmaschinen . . . . .	30-3
<b>Literaturverzeichnis</b>	30-3
<b>Stichwortverzeichnis</b>	30-4

# 29 Allgemeines zu elektrischen Maschinen

ID: maschinen-allgemeines.tex

Das vorliegende Skriptum befasst sich mit dem Aufbau, der Wirkungsweise und dem Betriebsverhalten der elektrischen Maschinen. Der Maschinenentwurf (Berechnung und Konstruktion) wird aus Zeitgründen nicht behandelt, bzw. nur so weit wie es für das Wirkungsverständnis notwendig ist.

Das Funktionsprinzip rotierender elektrischer Maschinen kann, stark vereinfacht, mithilfe der Lorentzkraft eines stromdurchflossenen Leiters in einem (sich u.U. ändernden) Magnetfeld erklärt werden. Diese Kraft führt schließlich aufgrund der radialen Anordnung der Leiter (Wicklungen) zu einem Drehmoment  $m_m$  (in Nm) an der Welle der Maschine, welches zur Beschleunigung des mechanischen Systems gezielt genutzt werden kann. Eine präzisere Modellierung der Drehmomententstehung erfolgt in den entsprechenden Maschinenkapiteln.

Statische elektrische Maschinen (Transformatoren) nutzen vorrangig die Wirkungen des Induktionsgesetzes aus, wobei dieses auch bei den rotierenden el. Maschinen von Bedeutung ist!

Die Modellierung elektrischer Maschinen erscheint oft kompliziert und nicht intuitiv. Dabei existiert im Prinzip nur die eine elektrische Kerngleichung

$$u = Ri + \frac{d}{dt}\psi \quad (29.1)$$

welche die elektrischen Zusammenhänge zwischen

- angelegter (oder abgreifbarer) Spannung  $u$  (in V) an den Wicklungs-/Maschinenklemmen,
- dem Spannungsabfall über dem Widerstand  $R$  (in  $\Omega$ ) aufgrund des Stromes  $i$  (in A), und
- der induzierten Gegenspannung  $\frac{d}{dt}\psi$  (in V)

voll umfassend beschreibt. Der verkettete Fluss oder die Flussverkettung  $\psi$  (in  $\text{Wb} = \text{Vs}$ ) hängt im allgemeinen vom Strom  $i$  und anderen Größen (z.B. Maschinenwinkel, Temperatur und den anderen Wicklungsströmen) nichtlinear ab. Die induzierte Gegenspannung setzt sich aus zwei Termen zusammen: dem Spannungsabfall in den Wicklungen aufgrund von Stromänderungen und dem Spannungsabfall aufgrund der elektro-motorischen Kraft (EMK), die durch die Drehung der Maschine induziert wird. Die Kerngleichung (Gl.: 29.1) kann mit Hilfe der Kirchhoff'schen Spannungs- und Stromknotenregeln für jede Wicklung der elektrischen Maschine separat hergeleitet werden. Daher lässt sich das elektrische Verhalten jeder elektrischen Maschine (oder jedes magnetisch gekoppelten Systems (z.B. Transformator)) mit einem Satz bestehend aus dieser Gleichung für alle Wicklungen beschreiben. Das unterschiedliche Verhalten der verschiedenen Maschinen wird lediglich durch unterschiedliche nichtlineare Zusammenhänge in der Flussverkettung modelliert.

## 29.1 Physikalische Grundprinzipien

ID: maschinen-phys-grundprinzip.tex

Es empfiehlt sich die Kapitel 1 (Feldbegriff) und insbesondere Kapitel 3 (Kräfte und Energie im Magnetfeld) noch einmal genauer durchzuarbeiten.

Bei rotierenden elektrischen Maschinen wird vor allem die Wirkung der Lorentzkraft (magnetischer Anteil)

$$\vec{F}_L = q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (29.2)$$

ausgenutzt. Entsprechend Kapitel 3.1.2 (Lorentzkraft am stromdurchflossenen Leiter der Länge  $l$ ) ergibt dies die Gleichung

$$\vec{F}_L = I(\vec{\ell} \times \vec{B}) \quad (29.3)$$

Da man bestrebt ist, das Feld optimal auszunützen sorgt man konstruktiv dafür, dass die Leiter immer gerade und senkrecht im Magnetfeld ausgerichtet sind (Bild 29.1)

### Lorentzkraft:

Die Lorentzkraft ist die Kraft, die eine Ladung in einem magnetischen oder elektrischen Feld erfährt. Ein Magnetfeld übt dabei Kraft auf bewegte Ladungen (=Strom) aus, während ein elektrisches Feld auf bewegte und unbewegte Ladungen gleichermaßen wirkt. ([2])

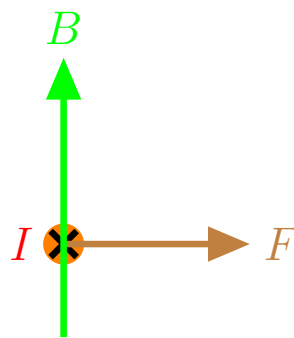


Abbildung 29.1: Kraftwirkung auf einen stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld  
(Quelle:[1])

ID: Tikz/feldkraft.pdf

Die magnetische Komponente der Kraft ist am größten, wenn die Bewegungsrichtung der Ladung senkrecht zu den magnetischen Feldlinien verläuft, und gleich Null, wenn die Ladung sich entlang einer Feldlinie bewegt. Sie wirkt immer senkrecht zur Bewegungsrichtung der Ladung und zu den Magnetfeldlinien.

Der reale Einfluss der Nutung bei der Berechnung der Kraftbildung wird somit im Folgenden immer vernachlässigt. Neben der Tangentialkraft wirkt auf die gegenüberliegenden Eisenflächen von Stator und Rotor durch das Luftspaltfeld eine anziehende Normalkraft. Bei LinearMotoren mit einseitiger Leiteranordnung tritt diese Kraft als einseitiger magnetischer Zug auf und beträgt oft das Zehnfache der Tangentialkraft. Er muss durch eine entsprechend kräftige mechanische Lagerung abgestützt werden.

Neben der Lorentzkraft ist das Induktionsgesetz das zweite wichtige Gesetz für el. Maschinen:

Das Induktionsgesetz gibt die Verknüpfung vom el. Feld mit dem magn. Feld an (2. MAXWELLSche Gleichung):

$$\oint_S \vec{E} d\vec{s} = e = -\frac{d}{dt} \int_A \vec{B} d\vec{A} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (29.4)$$

$$U_{ind} = \frac{d\Phi}{dt} \quad (29.5)$$

### Induktionsgesetz:

Bedeutung (allg.): Eine zeitliche Änderung der magnetischen Flussdichte erzeugt eine Induktionsspannung, die der Änderung des magnetischen Flusses entgegenwirkt (Energieerhaltungssatz).

Entsprechend der Lenzschen Regel (Kap. 3.1.4) wandelt ein Generator eine wirkende Kraft (Drehmoment) ... mech. Leistung in elektrische Leistung um.

Bewegt man ein gerades Leiterstück der Länge  $l$  mit der Geschwindigkeit  $v$  in einem homogenen Magnetfeld mit der konstanten Flussdichte  $B$ , wird eine Bewegungsspannung induziert. Sie hat nach dem Induktionsgesetz folgende Größe:

$$U_i = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d}{dt} \int \vec{B} d\vec{A} = \vec{B} \cdot \frac{d\vec{A}}{dt} = \vec{B} \cdot \vec{1} \cdot \frac{d\vec{s}}{dt} = (\vec{B} \times \vec{v}) \cdot \vec{l} \quad (29.6)$$

Für den bei elektrischen Maschinen meist zutreffenden Sonderfall, dass die Vektoren  $\vec{B}$ ,  $\vec{1}$ , und  $\vec{v}$  senkrecht aufeinander stehen vereinfacht sich die Gleichung zu der einfachen Form:

$$U_i = B \cdot l \cdot v \quad (29.7)$$

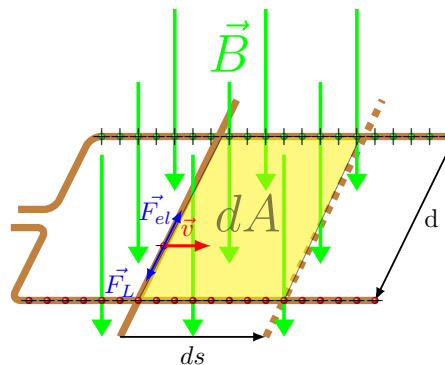


Abbildung 29.2: Wirkung der Lenz'schen Regel, Stromerzeugung in geschlossener Leiterschleife

ID: images/leiterschleife.pdf

(Quelle:[1])

die Richtung des „Induktionsstromes“ ist dabei nicht zufällig. Sie steht vielmehr in ursächlichem Zusammenhang mit der jeweiligen Ursache für das Entstehen einer Induktionsspannung. Es gilt:

### Lenz'sche Regel

Der „Induktionsstrom“ ist stets so gerichtet, dass er der Ursache seiner Entstehung entgegenwirkt.

Dieses Gesetz, das nichts anderes ist als der Energieerhaltungssatz für die elektromagnetische Induktion ist, wird nach seinem Entdecker als Lenz'sches Gesetz oder Lenz'sche Regel bezeichnet.

Die Lenzsche Regel ist für das Induktionsgesetz maßgebend, da diese die Richtung des induzierten Stroms vorgibt.

Die in einem Leiter induzierten Ströme sind also immer so gerichtet, dass sie die Kraft durch die sie hervorgerufen werden, zu hemmen versuchen. Das bedeutet einfach ausgedrückt, dass der „Induktionsstrom“ immer probiert, den Zustand vom Anfang beizubehalten (erinnere auch Induktionsspannung beim Abschalten einer Spule).

Eine genauere Erläuterung ist im Kapitel 4 (Induktionsvorgänge) zu finden.

### 29.1.0.1 Rotationsspannung

ID: maschinen-rotationsspannung.tex

Eine Leiterschleife befinde sich in einem homogenen und zeitlich konstanten Magnetfeld; die Schleife habe die Fläche  $A$ .

Wird die Schleife um den Winkel  $\varphi$  aus der horizontalen Lage herausgedreht, so nimmt die vom Feld durchsetzte Fläche ab, nur noch die Projektion  $A \cdot \cos\varphi$  ist mit dem Feld verkettet. Durch die um den Winkel  $\varphi$  gedrehte Schleife tritt der Fluss

$$\Phi = B \cdot A \cdot \cos\varphi \quad (29.8)$$

Wenn die Schleife mit konstanter Drehzahl rotiert, ist die Kreisfrequenz  $d\varphi/dt = \omega$  konstant:

$$\frac{d\varphi}{dt} = \omega = 2\pi \cdot n = \text{const} \quad (29.9)$$

bzw.

$$\varphi = \omega t$$

Setzt man  $\varphi = \omega t$  in Gl. 29.8 ein ( $\Phi = B \cdot A \cdot \cos\omega t$ ) erhält man durch Differenzierung die Spannung

$$u(t) = \frac{d\Phi}{dt} = -B \cdot A \cdot \omega \cdot \sin\omega t \quad (29.10)$$

Wir haben hier die einfachste Form eines Generators für eine sinusförmige Wechselspannung vor uns.

## 29.2 Motoren

ID: rotierende-maschinen.tex

Die rotierenden elektrischen Energiewandler decken sowohl als Generatoren als auch als Motoren - ein weites Spektrum der Bemessungsleistung von ca.  $0.1 \text{ W} \dots 10^9 \text{ W}$  ab, wobei die unterschiedlichsten Bauarten und Wirkprinzipien zum Einsatz kommen.

Elektrische Motoren wandeln elektrische in mechanische Energie um.

Unterschieden werden Stationäransätze und Fahrzeugantriebe. Elektrische Fahrzeugantriebe werden im Elektrokarren (z.B. batteriegespeiste Gabelstapler: typisch einige kW Antriebsleistung), dem Elektroauto (typisch 10 kW bis 100 kW), den Elektrolokomotiven (Fahrmotoren bis ca. 1.6 MW als Einzelachsenantrieb), aber auch den dieselelektrischen Loks und den Schiffsantrieben (je nach Schiffsgröße bis ca. 30 MW) benötigt. Stationäransätze sind im weiten Leistungsbereich von den Mikromotoren (Bruchteile von Watt), Minimotoren (z.B. Videokamera: mehrere Antriebe mit wenigen Watt als Antriebsleistung), dem weiten Feld der Kleinmotoren (typisch 10 W bis 1 kW, z.B. Haushaltsgeräte oder Gerätelüfterantriebe in Computern etc.), dem unteren und "mittleren" Leistungsbereich (1 kW bis 100 kW bzw. 100 kW bis 1 MW) als Industrieantriebe (Pumpen, Lüfter, Extruder, Werkzeugmaschinen, Aufzüge, ...) und den Großantrieben (1 MW bis ca. 100 MW als Kesselspeisepumpenantriebe in Kraftwerken, Verdichterantriebe bei Gaspipelines etc.) im Einsatz.

### 29.2.1 Mikroantriebe

ID: mikroantriebe.tex

### 29.2.2 Mini- und Kleinmotoren

ID: kleinmotoren.tex

### 29.2.3 Industrieantriebe, Mittelmaschinen

ID: mittelmaschinen.tex

### 29.2.4 Großantriebe

ID: grossantriebe.tex

## 29.3 Generatoren

ID: generatoren.tex

### 29.3.1 Generatoren kleiner Leistung

ID: generatoren-kleinerleistung.tex

### 29.3.2 Generatoren mittlerer Leistung

ID: generatoren-mittlererleistung.tex

### 29.3.3 Großgeneratoren

ID: generatoren-grosserleistung.tex

## 29.4 Von der Zeit überholte Maschinenkonzepte

ID: maschinen-ueberholt.tex

## 29.5 statische el. Maschinen

ID: statische-maschinen.tex

Stellen die große Gruppe der Transformatoren. ....

# 30 Gleichstrommaschinen

ID: at-gm-einleitung.tex

Historisch gesehen entstand als erster elektromechanischer Energiewandler die Gleichstrommaschine.

Mit der Einführung des Drehstroms etwa ab 1890 verlor die Gleichstrommaschine ihre beherrschende Stellung an die Synchrongeneratoren und Induktionsmotoren. Begünstigt durch ihre sehr gute Regelbarkeit mit galvanisch und magnetisch getrennten Kreisen für Ankerwicklung und Erregerwicklung sowie den einfachen Aufbau gesteuerter Gleichrichter mit hoher Regelqualität konnte die Gleichstrommaschine bislang einen begrenzten Marktanteil behaupten.

Der mögliche Fertigungsbereich reicht von Kleinstmotoren mit Leistungen von weit unter einem Watt bis zu den Großmaschinen. Dauermagneterregte Motoren bis ca. 100W werden in großer Stückzahl in der Kfz-Elektrik als Scheibenwischer-, Gebläse- und Stellmotoren eingesetzt. Im Bereich der Servoantriebe bis zu Leistungen von einigen kW gibt es auch eine Reihe spezieller Bauformen wie Scheibenläufer- und Glockenankermotoren. Mit der starken Verbreitung von Frequenzumrichtern hat die Gleichstrommaschine im Industriebereich stark an Bedeutung verloren. In ihrer Hochzeit bis in die 1970er Jahre wurden Motoren mit Leistungen von über 10MW gebaut. Der Gleichstromgenerator hat seit der Erfindung der gesteuerten Stromrichter keine Bedeutung mehr. Trotz des hohen Anteils von Drehstrommotoren werden auch heute noch Gleichstrommaschinen, überwiegend als stromrichtergespeiste Motoren für drehzahlveränderbare Antriebe, eingesetzt.

Die rotierenden elektrischen Energiewandler, denen dieses Skriptum gewidmet ist, decken sowohl als Generatoren als auch als Motoren - ein weites Spektrum der Bemessungsleistung von ca. 0.1W ... 10<sup>9</sup>W ab, wobei die unterschiedlichsten Bauarten und Wirkprinzipien zum Einsatz kommen.

## 30.1 Grundlegender Aufbau

ID: at-aufbau.tex

Gleichstrommaschinen sind rotierende elektrische Maschinen mit ausgeprägten Magnetpolen. Diese Pole sind fest (unbeweglich) im Stator der Maschine angeordnet

und enthalten die permanentmagnetische oder elektrische Erregung (konzentrierte Erregerwicklung) zur Erzeugung des Hauptflusses. Wie in Bild 30.1 am Beispiel einer zweipoligen Maschine ersichtlich, wird der magnetische Hauptfluss außen über das Gehäuse (Joch) und den Hauptpol, bestehend aus Polschaft und Polschuh geführt. Über den Luftspalt geht der Hauptfluss in den Rotor der Maschine über.

Die Grundkonstruktion einer Gleichstrommaschine kann man am Beispiel des Motorbetriebs anschaulich als Anwendung des Kraftwirkungsgesetzes nach

$$F = B \cdot l \cdot I \quad (30.1)$$

erklären. Man benötigt danach ein Magnetfeld der Flussdichte  $B$  im Luftspalt der Feldpole und darin drehbar angeordnet Leiter der Länge  $l$ , die einen Strom  $I$  führen. Die Stromzufuhr muss dabei so erfolgen, dass stets alle Leiter eines Polbereichs gleichsinnig durchflossen sind. Dieser Gedanke ist in der einfachen Anordnung nach Bild 30.1 das bereits alle wesentlichen Bauteile der Gleichstrommaschine enthält, verwirklicht. Moderne Gleichstrommaschinen sind heute meist in quadratischer Bauform, nicht mehr in Rundbauform ausgeführt.

### 30.1.1 Ständer, Joch

ID: at-aufbau-joch.tex

### 30.1.2 Anker

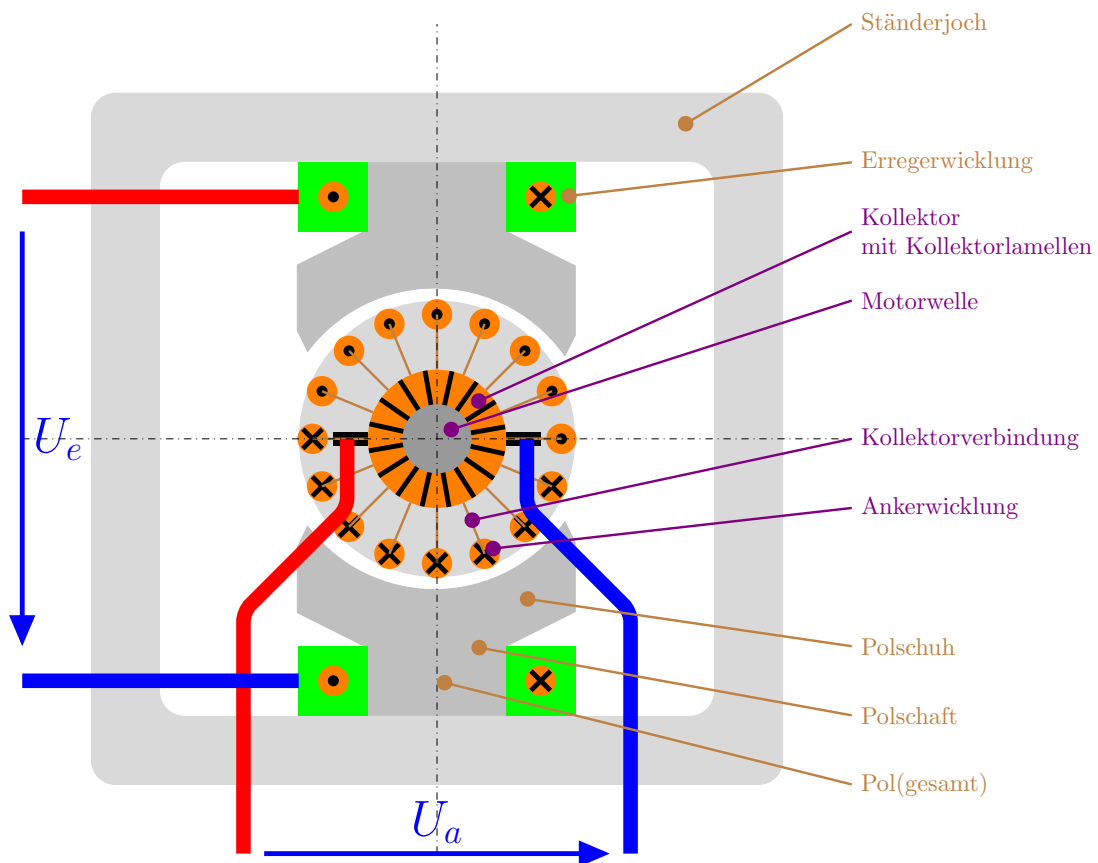
ID: at-aufbau-anker.tex

### 30.1.3 Stromwender, Kollektor

ID: at-aufbau-kollektor.tex

## 30.2 Spannungsinduktion

ID: at-spannungsinduktion.tex



ID: Tikz/gm-basis/gs-motor.pdf

Abbildung 30.1: Allgemeiner Aufbau einer 2-poligen Gleichstrommaschine  
(Quelle:[1])

## 30.3 Drehzahlstellung

## 30.4 Betriebsverhalten

### 30.4.1 Fremderregt

### 30.4.2 Reihenschlussmaschinen

### 30.4.3 Nebenschlussmaschinen

### 30.4.4 Kompoundmaschinen

# Literaturverzeichnis

- [1] E. Schubert. Von Autor selbst erstellt mit TIKZ, 2015...2020.
- [2] Wikipedia. Lorentzkraft — Wikipedia, Die freie Enzyklopädie, 2019. [Online: Stand 3. August 2019].

Generierdatum: 30. April 2020