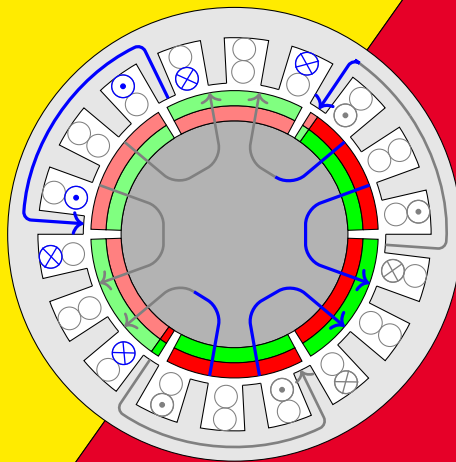


Jürgen Kiel

# Einführung in die elektrische Energie- und Antriebstechnik



ISBN 978-3-941334-31-1  
DOI 10.20385/02bm-mw68  
URN urn:nbn:de:hbz:due62-opus-23945



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons  
Namensnennung 4.0 International Lizenz

## Vorwort

Die zunehmende Automatisierung und der sensible Umgang mit (elektrischer) Energie spielen in der gesellschaftlichen Diskussion eine zunehmende Rolle. Die technischen Hintergründe sind hierbei nicht nur für die jeweiligen Experten von Bedeutung, sondern sind auch selbstverständlich Grundlagenwissen im Maschinenbau, in der Verfahrenstechnik und in der Energietechnik.

Für genau diese Zielgruppe ist dieses Buch konzipiert. Um eine möglichst große Bandbreite an Themen abzudecken, wurde in vielen Bereichen vereinfacht, verkürzt und verallgemeinert, um zumindest den *Kern* der jeweiligen Problematik verständlich zu machen. Daher wird auch als Voraussetzung lediglich das Verständnis des elektrischen Kreises mit ohm'schen, induktiven und kapazitiven Verbrauchern erwartet. Außerdem wurde der Spagat zwischen Grundlagen- und Praxiswissen gewagt.

Köln, im November 2020

Jürgen Kiel

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Kiel

1971 in Köln geboren, 1993 bis 1999 Studium der Elektrotechnik an der Universität Paderborn. 2000 bis 2011 Entwicklungs- und Applikationsingenieur bei Lust Antriebstechnik GmbH (heute Teil der KEBA AG) in Lahnau und Unna. 2005 Promotion an der Universität Paderborn. 2010 - 2013 Dozent für Regelungstechnik an der HS Gelsenkirchen. Seit 2011 Professor für Regelungstechnik und elektrische Antriebstechnik an der HS Düsseldorf.

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-4583-7555>

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Gleichstrommotor und Universalmaschine</b>	<b>7</b>
1.1 Prinzipielle Funktionsweise der Gleichstrommaschine . . . . .	8
1.1.1 Die physikalischen Grundlagen . . . . .	8
1.1.2 Von der Kraft- zur Drehmomentbildung . . . . .	9
1.1.3 Mechanische Zusammenhänge . . . . .	11
1.1.4 Der prinzipielle Aufbau der Gleichstrommaschine . . . . .	12
1.1.5 Einfluss der Polpaarzahl . . . . .	15
1.2 Ersatzschaltbild der Gleichstrommaschine . . . . .	16
1.2.1 Stationärer Betrieb . . . . .	17
1.2.2 Typische Wahl von Zählpeile und Leistungsfluss . . . . .	17
1.3 Das Betriebsverhalten der Gleichstrommaschine . . . . .	19
1.3.1 Der Arbeitsbereich der Gleichstrommaschine . . . . .	19
1.3.2 Wirkungsgrad der Gleichstrommaschine . . . . .	20
1.3.3 Beschreibung über Kenngrößen . . . . .	20
1.3.4 Beschreibung über Kennlinien . . . . .	21
1.4 Die fremderregte Gleichstrommaschine . . . . .	22
1.4.1 Nebenschlussmotor . . . . .	22
1.4.2 Reihenschlussmotor . . . . .	23
1.4.3 Feldschwächbetrieb . . . . .	23
1.5 Die Universalmaschine . . . . .	23
<b>2 Der Drehstrommotor</b>	<b>25</b>
2.1 Prinzipielle Funktionsweise . . . . .	25
2.2 Der magnetische Kreis . . . . .	26
2.3 Aufbau des Stators . . . . .	28
2.4 Erzeugung des Statorfeldes . . . . .	28
2.5 Funktionsweise der Drehstromwicklungen . . . . .	29
2.6 Einfluss der Polpaarzahl . . . . .	29
2.7 Aufbau und Funktionsweise der Asynchronmaschine . . . . .	31
2.7.1 Rotoraufbau und Funktionsweise . . . . .	31
2.7.2 Anschluss und Klemmkasten . . . . .	33
2.7.3 Gehäuse und Kühlung . . . . .	33
2.7.4 Leistungsdaten der Asynchronmaschine . . . . .	35
2.8 Betrieb der Asynchronmaschine am Netz . . . . .	35
2.8.1 Stationärer Betrieb der Asynchronmaschine am starren Netz . . . . .	36
2.8.2 Ersatzschaltbild der Asynchronmaschine für den stationären Betrieb . . . . .	38
2.8.3 Einschaltverhalten von Asynchronmaschinen beim Betrieb am starren Netz . . . . .	39

2.8.4	Drehrichtungsumkehr von Asynchronmotoren beim Betrieb am starren Netz	41
2.8.5	Gesteuerter Betrieb der Asynchronmaschine . . . . .	42
2.9	Aufbau und Funktionsweise der Synchronmaschine . . . . .	43
2.10	Betrieb von Synchronmaschinen am starren Stromnetz . . . . .	45
2.11	Geregelter Betrieb von Synchronmaschinen . . . . .	45
2.11.1	Aufbau des Servoreglers . . . . .	46
2.11.2	Regelungsstrategie für Synchronmaschinen . . . . .	46
2.11.3	Aufbau der Synchronmaschinen für Servoanwendungen . . . . .	47
2.12	Direktantriebe . . . . .	48
2.13	Antriebsauslegung und Überlastverhalten . . . . .	50
2.13.1	Auslegung von am Netz betriebenen Drehstrommaschinen . . . . .	51
2.13.2	Auslegung von frequenzumrichter gespeisten Motoren . . . . .	51
2.13.3	Auslegung von Servosystemen . . . . .	51
2.14	Motor- und Anlagenschutz . . . . .	52
<b>3</b>	<b>Der Transformator</b>	<b>55</b>
3.1	Grundlagen . . . . .	55
3.2	Der ideale Transformator . . . . .	56
3.3	Der reale Transformator . . . . .	58
3.3.1	Modellbildung und Ersatzschaltbild . . . . .	58
3.3.2	Vereinfachtes Ersatzschaltbild des Transformators zur Leistungsübertragung	59
3.3.3	Vereinfachtes Ersatzschaltbild für den Transformator als Messwandler . . .	59
3.4	Der Transformator in elektrischen Netzwerken . . . . .	60
3.4.1	Umrechnung zwischen Primär- und Sekundärseite . . . . .	60
3.4.2	Das T-Ersatzschaltbild bei transformierten Größen . . . . .	62
3.4.3	Zeigerdiagramme für Schaltungen mit Transformator . . . . .	62
3.5	Aufbau eines Transformators . . . . .	63
3.5.1	Eisenkern . . . . .	64
3.5.2	Frequenzabhängigkeit . . . . .	65
3.6	Der dreiphasige Transformator . . . . .	65
3.7	Schaltgruppen und Klemmbezeichnungen . . . . .	66
3.8	Typische Wirkungsgrade . . . . .	67
3.9	Anmerkungen . . . . .	68
<b>4</b>	<b>Energietransport durch das Wechselspannungsnetz</b>	<b>69</b>
4.1	Spannungsebenen in elektrischen Netzen . . . . .	69
4.2	Ein- und dreiphasige Netze . . . . .	70
4.3	Spannungen im dreiphasigen Wechselspannungsnetz . . . . .	70
4.4	Vor- und Nachteile des dreiphasigen Wechselstroms . . . . .	71
4.4.1	Historische Anmerkung . . . . .	73
4.4.2	Sonstige mehrphasige Netze . . . . .	73
4.5	Lasten im dreiphasigen Netz . . . . .	74
4.6	Übersicht über Netze zur Versorgung mit elektrischer Energie . . . . .	74
4.7	Aufbau von Versorgungsnetzen . . . . .	75
4.7.1	Schutzeinrichtungen . . . . .	76
4.7.2	Das TN-Netz . . . . .	78
4.7.3	Das TT-Netz . . . . .	78
4.7.4	Das IT-Netz . . . . .	79

4.7.5	Typischer Hausanschluss in einem TN-Netz . . . . .	79
4.7.6	Bedeutung des Stromnetzes und dessen Anschluss für den Maschinenbau . . . . .	80
4.8	Aufbau von Übertragungsnetzen . . . . .	81
4.8.1	Grundlagen der Energieübertragung . . . . .	82
4.8.2	„Qualität“ des Stromnetzes . . . . .	83
4.8.3	Maßnahmen zur Stabilisierung des Stromnetzes . . . . .	83
4.8.4	Verluste im Verbundnetz . . . . .	83
4.8.5	Fehlerzustände im Verbundnetz . . . . .	85
<b>5</b>	<b>Stromrichtertechnik</b>	<b>86</b>
5.1	Typische Bauelemente von Stromrichterschaltungen . . . . .	87
5.1.1	Die Diode . . . . .	87
5.1.2	Steuerbare Ventile . . . . .	88
5.1.3	Die Induktivität . . . . .	89
5.1.4	Die Kapazität . . . . .	89
5.1.5	Der Transformator . . . . .	90
5.2	Schaltfrequenz, schnelle und langsame Vorgänge . . . . .	90
5.3	Gleichrichter . . . . .	90
5.4	Tiefsetzsteller . . . . .	94
5.5	Hochsetzsteller . . . . .	100
5.6	Inverswandler . . . . .	102
5.7	Zwei- und Vier-Quadrantensteller . . . . .	104
5.8	Pulswechselrichter . . . . .	107
5.9	Schaltnetzteil . . . . .	108
5.10	Frequenzumrichter und Servoregler . . . . .	110
5.10.1	Frequenzumrichter . . . . .	111
5.10.2	Servoregler . . . . .	111
5.10.3	Auslegung von Frequenzumrichtern und Servoreglern . . . . .	113
5.10.4	Bremswiderstand . . . . .	114
5.10.5	Rückspeisefähige Frequenzumrichter . . . . .	114
5.10.6	Netzeinspeisung . . . . .	116
5.11	Weitere Stromrichterstrategien . . . . .	117
5.11.1	Direkte Stromregelung . . . . .	117
5.11.2	Direktumrichter . . . . .	118
5.11.3	Dreipunktwechselrichter . . . . .	119
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>120</b>
	<b>Anhang</b>	<b>122</b>
<b>A</b>	<b>Vorsatzzeichen und Formelzeichen</b>	<b>122</b>
A.1	Typische Vorsatzzeichen . . . . .	122
A.2	Verwendung von Formelzeichen . . . . .	122
A.3	Hinweise zum Satz von Formelzeichen . . . . .	125

<b>B Weitere Tabellen</b>	<b>126</b>
B.1 Klemmbezeichnung bei Gleichstrommaschinen . . . . .	126
B.2 Betriebsarten für elektrische Antriebe . . . . .	126
B.3 Übersicht über den IP-Code . . . . .	126
B.4 Bezeichnungsschlüssel für Betriebsmittel in Stromlaufplänen . . . . .	127
B.5 Thermische Klassen . . . . .	128

# Kapitel 1

## Gleichstrommotor und Universalmaschine

Der Gleichstrommotor ist eine elektrische Maschine und wird daher auch als Gleichstrommaschine bezeichnet. Beide Begriffe werden synonym gebraucht, eigentlich deutet der Wortbestandteil *Motor* an, dass die Maschine motorisch arbeitet, also elektrische Energie in mechanische Energie umsetzt.

Die Anfänge der Gleichstrommaschine liegen in der ersten Hälfte des 19. Jahrhundert, der Gleichstrommotor zählt damit zu den ersten elektrischen Maschinen. Durch eine Veränderung der Eingangsspannung kann man Einfluss auf die Drehzahl nehmen. Daher wurden bis in die 1980er Jahre hinein beispielsweise Straßen- und U-Bahnen oder auch Elektroautos mit Gleichstrommotoren für die Traktion ausgerüstet (Größenordnung ab 50 kW). Aufgrund seiner guten Regelbarkeit stellte die Gleichstrommaschine bis in die 1980er Jahre die klassische Lösung für dynamische Antriebsregelungen dar, also für Anwendungen, bei denen der Motor einem variablen Sollwert (Drehmoment, Drehzahl oder Lagesollwert) möglichst schnell und genau folgt. Die Größenordnung liegt hier im Bereich von 0,5 kW bis 50 kW. Sowohl bei den Anwendungen mit höherer Leistung als auch bei den dynamischen Anwendungen in der Automatisierungstechnik wurde der Gleichstrommotor inzwischen durch Drehstromantriebe abgelöst.

Heutzutage wird die Gleichstrommaschine meist in der Ausführung als permanenterregter Gleichstrommotor im Bereich von deutlich unter 100 mW bis in den 10 W-Bereich verwendet. Er kommt als einfacher Stellmotor oder in (batteriebetriebenen) Spielzeug zum Einsatz. In modernen Automobilen der Oberklasse werden Gleichstrommotoren in dreistelliger Anzahl verbaut (Sitzverstellung, Spiegelverstellung, Lüftungsverstellung, Scheibenwischer, Pumpen, ...).

Ferner wird der Gleichstrommotor in der Ausführung als Universalmotor gerne für Haushaltsgeräte und Elektrowerkzeug im niedrigen kW-Bereich verwendet. Außerdem bildet der Gleichstrommotor die Grundlage für das Verständnis weiterer elektrischer Antriebe.

Bei **Bürstenlosen Gleichstrommotoren** (Brushless DC-Motoren (BLDC), Electronically Commutated Motors (EC-Motoren)) handelt es sich entgegen der Namensgebung um einfache Synchronmaschinen, die elektronisch angesteuert (kommutiert) werden, und deren Betriebsverhalten dadurch dem des Gleichstrommotors entspricht.

## 1.1 Prinzipielle Funktionsweise der Gleichstrommaschine

### 1.1.1 Die physikalischen Grundlagen

Die Funktionsweise der Gleichstrommaschine beruht auf zwei physikalischen Effekten, der Lorentzkraft und dem Induktionsgesetz.

#### Kraftwirkung im elektromagnetischen Feld

Die Lorentzkraft<sup>1</sup>  $\underline{F}_L$  beschreibt die Kraftwirkung auf eine Ladung  $q$  durch ein elektromagnetisches Feld, also sowohl durch ein elektrisches Feld  $\underline{E}$  als auch durch ein magnetisches Feld  $\underline{B}$ :

$$\underline{F}_L = \underline{F}_E + \underline{F}_B = q \cdot \underline{E} + q \cdot \underline{v} \times \underline{B} \quad (1.1)$$

- Der Summand  $\underline{F}_E = q \underline{E}$  beschreibt die Kraftwirkung durch ein elektrisches Feld und wird als *Coulomb-Kraft*<sup>2</sup> bezeichnet. Sie wirkt in Richtung des elektrischen Feldes  $\underline{E}$ .
- Der Summand  $\underline{F}_B = q \underline{v} \times \underline{B}$  bezeichnet die *innere Lorentzkraft*: Die Wirkung der Kraft ist abhängig von der Geschwindigkeit  $\underline{v}$ , mit der eine Ladung  $q$  durch ein Magnetfeld der Stärke  $\underline{B}$  bewegt wird, und wirkt senkrecht auf der durch  $\underline{v}$  und  $\underline{B}$  aufgespannten Ebene. Die Richtung der Kraftwirkung  $\underline{F}_B$  kann über das Vektorprodukt oder durch die *Rechte-Hand-Regel*<sup>3</sup> anschaulich bestimmt werden.
- Die Lorentzkraft ist die Summe dieser beiden Kräfte  $\underline{F}_E$  und  $\underline{F}_B$  und entspricht einer mechanischen Kraft. Wenn sich eine Größe der Gleichung 1.1 ändert, muss sich auch mindestens eine weitere Größe ändern, damit die Gleichung noch gilt: So kann eine Geschwindigkeitsänderung  $a = \frac{v}{t}$  des Leiters zu einer geänderten Kraft  $\underline{F}_L$  führen.

Für das Verständnis der Kraftbildung bei Maschinen sind zwei weitere Zusammenhänge von Bedeutung:

- Strom beschreibt das Strömen von Ladungsträgern im Leiter, also die Ladungsänderung pro Zeit,  $I = \frac{dq}{dt} = \frac{q}{t}$ .
- Die Ladungsträger bewegen sich mit der Geschwindigkeit  $\underline{v} = \frac{dl}{dt} = \frac{l}{t}$  durch den Leiter.

Damit lässt sich die Lorentzkraft entsprechend

$$\underline{F}_B = q \underline{v} \times \underline{B} = I t \frac{l}{t} \times \underline{B} \quad (1.2)$$

$$= I \underline{l} \times \underline{B} \quad (1.3)$$

umformen. Auf einen vom Strom  $I$  durchflossenen Leiter, der sich mit der Länge  $l$  in einem Magnetfeld  $\underline{B}$  befindet, wirkt eine Kraft senkrecht zur Ebene des Magnetfeldes und des Stroms.

$$\underline{F}_L = q (\underline{v} \times \underline{B}) = I (\underline{l} \times \underline{B}) \quad (1.4)$$

<sup>1</sup>nach Hendrik Antoon Lorentz, 1853 - 1928

<sup>2</sup>nach Charles Augustin de Coulomb, 1736 - 1806

<sup>3</sup>Für eine negative Ladung gilt: Daumen: Bewegung, Zeigefinger: Magnetfeld, Mittelfinger: Kraft



### Faraday'sches Induktionsgesetz und die Lenz'sche Regel

Ändert sich zeitlich der von einer Kontur  $K$  umschlossene Fluss  $\Phi$ , dann entsteht in dieser Kontur ein der Flussänderung proportionales Gegenfeld  $\underline{E}$ . Liegt auf dieser Kontur ein Leiter, dann lässt sich an den Klemmen dieses Leiters die induzierte Spannung messen:

$$U_i = \oint_L \underline{E} dl = - \frac{d\Phi}{dt} = - \frac{d}{dt} \iint_A \underline{B} d\underline{A} \quad (1.5)$$

Dieser Zusammenhang heißt elektromagnetische Induktion oder auch nur kurz Induktion. Er wurde von Faraday<sup>4</sup> entdeckt. Ein aufgrund dieser Spannung fließender Strom  $I = \frac{1}{L} \int U dt$  heißt Induktionsstrom. Auch die magnetische Flussdichte  $\underline{B}$  wird gelegentlich als magnetische Induktion oder als Induktion bezeichnet.

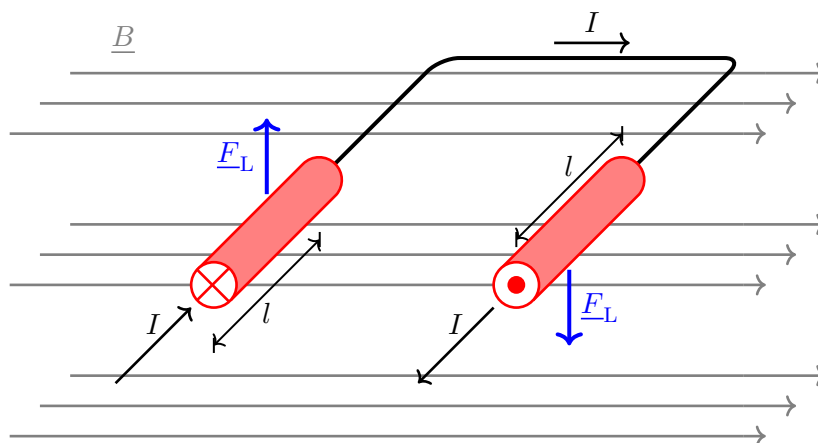
Das Minuszeichen in dieser Gleichung bedeutet, dass die Spannung  $U$  und damit auch das elektrische Feld ( $\underline{E}$ ) der Flussänderung  $\frac{d\Phi}{dt}$  entgegengerichtet sind. Das elektrische Feld wird daher auch als Gegenfeld, die Spannung als Gegenspannung bezeichnet.

Die Gesetzmäßigkeit, dass die induzierte Spannung  $U_i$  der Ursache, der Flussänderung entgegenwirkt, wird als *Lenz'sche Regel*<sup>5</sup> bezeichnet.

#### 1.1.2 Von der Kraft- zur Drehmomentbildung

Die Abbildung 1.1 zeigt schematisch eine Leiterschleife, die im rot markierten Bereich über die Länge  $l$  von einem magnetischen Feld  $\underline{B}$  durchsetzt wird. Wird die Schleife von einem Strom  $I$ , durchsetzt, erfahren die beiden rot gekennzeichneten Teile der Leiterschleife jeweils eine Kraft  $\underline{F}_L$ .

In der gezeigten Anordnung stehen die drei Vektoren  $\underline{l}$  respektive  $\underline{I}$ ,  $\underline{B}$  und  $\underline{F}_L$  zueinander senkrecht. Dies trifft so auch auf sinnvoll konstruierte Gleichstrommaschinen zu, daher wird aufgrund dieser klaren Verhältnisse im Folgenden auf die Vektorschreibweise verzichtet.



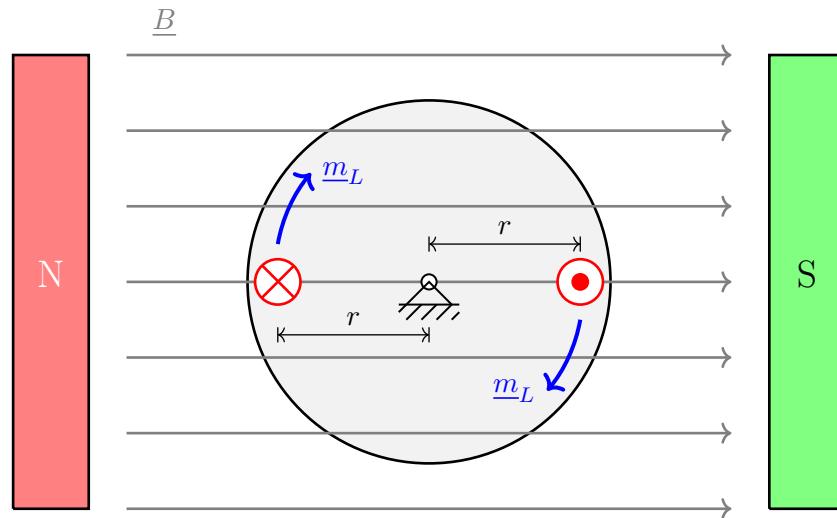
**Abbildung 1.1:** Kraftwirkung  $\underline{F}_L$  auf ein vom Strom  $I$  auf der Länge  $l$  durchflossenes Leiterpaar (rot gekennzeichnet) im Magnetfeld  $\underline{B}$

Jeder der Leiter bringt also nach Gleichung (1.1) die Kraft  $F_L = IlB$  auf, und zwar quer zur Radialrichtung. Dies entspricht damit einem Drehmoment  $m_L = r F_L$  um die Symmetrieachse,

<sup>4</sup>Michael Faraday, 1791 - 1867

<sup>5</sup>nach Heinrich Friedrich Emil Lenz, 1804 - 1865

in der in Abbildung 1.2 ein Lager eingezeichnet ist.



**Abbildung 1.2:** Drehmomentbildung  $m_{\text{Lorentz}}$  durch eine in einen Rotor eingebettete stromdurchflossene ( $I$ ) Leiterschleife im permanenten Magnetfeld  $\underline{B}$

Jede der beiden durchsetzten Leiter - in Abbildung 1.1 rot gekennzeichnet - erfährt daraufhin entsprechend Gleichung (1.1) die Kraftwirkung  $F_L$ , die aufgrund der unterschiedlichen Stromrichtung einmal nach oben, einmal nach unten gerichtet ist.

Sind diese beiden Leiter mechanisch verbunden, beispielsweise durch Anordnung auf einem Rotor wie in der Skizze 1.2 angedeutet, entsteht um die Mittelachse ein Drehmoment, welches natürlich abhängig vom Abstand der beiden Leiter von der Mittelachse ist.

Um das Drehmoment zu erhöhen, wird nicht nur eine Leiterschleife, sondern  $n$  Leiterschleifen übereinander gelegt (um den Rotor gewickelt) und mit demselben Strom  $I$  durchsetzt, so dass sich für das gesamte Drehmoment  $m_n$  das  $n$ -fache Drehmoment ergibt.

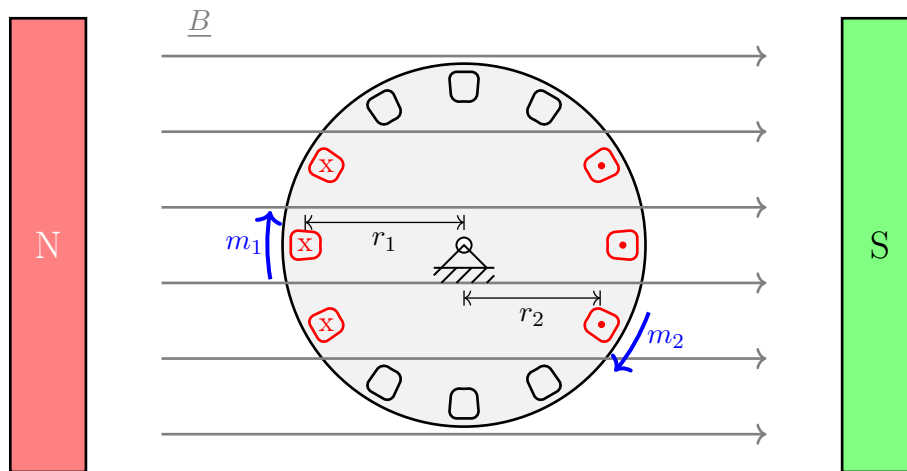
$$m_n = 2 n m_L = 2 n r I l B \quad (1.6)$$

Das offensichtliche Problem ist, dass das Drehmoment  $m_n$  den Rotor und damit das Leiterschleifenpaket drehen wird, bis die Lorentzkraft keinen Beitrag mehr zum Maschinenmoment  $m_M$  liefert. Dieses wäre in Abbildung 1.2 der Fall, wenn die Leiter oberhalb oder unterhalb der Rotorachse liegen, wo dann  $r = 0$  gilt.

Abhilfe wird dadurch erreicht, dass mehrere Leiterschleifenpakete entlang des Umfangs verteilt angeordnet werden und nur diejenigen bestromt werden, die einen nennenswerten Beitrag zum Maschinenmoment  $m_M$  liefern (siehe Abbildung 1.3).

Die Enden der Leiterschleifenpakete sind an Kupferlamellen angeschlossen, die auf der Rotorwelle befestigt sind. Für jedes Spulenpaket existieren also zwei Lamellen, die einander gegenüber angeordnet sind. Der Kontakt zur Stromversorgung erfolgt über Kohlebürsten, die einander gegenüberliegend am feststehenden Teil des Motors, am Stator, befestigt sind und mit Federn an die Lamellen gedrückt werden. Jede Bürste kontaktiert eine gewisse Anzahl von Lamellen und legt damit die an der Drehmomentbildung beteiligten Spulenpakete fest. Diese Umschalteneinrichtung nennt sich *Kommutator*, der Strom *kommutiert* zwischen den Spulenpaketen.

Diese Kohlebürsten bestehen aus Grafit und nutzen sich im Gebrauch natürlich ab. Daher werden sie in festgelegten Wartungsintervallen erneuert. Der Grafitstaub fungiert ferner als Gleitmittel zwischen Bürste und Kommutator.



**Abbildung 1.3:** Maschinendrehmomentbildung  $m_M$  durch mehrere bestromte Leiterpakete im permanentenerregten Magnetfeld  $\underline{B}$ ; die einzelnen Leiterpakete liefern jeweils ein vom Radius  $r_i$  abhängiges Teil Drehmoment  $m_i$

Die Erregung der Gleichstrommaschine kann, wie in den Abbildungen 1.2 und 1.3 angedeutet, durch Permanentmagnete oder durch Elektromagnete erfolgen. Durch die Magnete bilden sich ein Magnetfeld  $B_E$  und ein magnetischer Fluss  $\Phi_E$  aus. Luft ist ein schlechter magnetischer Leiter, daher wird der Luftspalt möglichst gering gehalten.

- Die Außenseiten der Magnete sind durch einen möglichst guten magnetischen Leiter, das Ständerjoch verbunden, das aus ferromagnetischem Material (Eisen) besteht.
- Die Innenseiten der Magnete oder Pole (bei Elektromagneten) sind möglichst weit an den Rotor herangeführt, um die Luftspaltlänge klein zu halten.

### 1.1.3 Mechanische Zusammenhänge

Im stationären Fall halten sich zugeführte und abgegebene Leistung die Waage, d.h. im motorischen Betrieb gilt

$$P_{\text{el}} = P_{\text{mech}} + P_{\text{Verluste}} \quad (1.7)$$

Ferner befindet sich die Maschine im Momentengleichgewicht, d.h., das Antriebsmoment  $m_M$  und Lastmoment  $m_L$  sind identisch,  $m_M = m_L$ , und die Drehzahl ist konstant.

Ändert sich eines dieser Momente ändert sich nach

$$m_M - m_L = J \frac{d\omega}{dt} = J \alpha_{\text{mech}} \quad (1.8)$$

so lange die Drehkreisfrequenz bzw. die Drehzahl, bis das Gleichgewicht wieder hergestellt ist. Typisch sind die beiden folgenden Fälle.

- Die Maschine wird gesteuert, d.h., die Ankerspannung wird vorgegeben: Durch eine höhere Ankerspannung ergibt sich ein höherer Ankerstrom und damit ein höheres Maschinenmoment. Die Maschine beschleunigt. Meist steigt durch die erhöhte Drehzahl auch das Lastmoment, z.B. durch Reibung. Die Maschine beschleunigt so lange, bis das Maschinenmoment wieder dem Lastmoment entspricht.



**Abbildung 1.4:** Zerlegter zweipolpaariger Gleichstrommotor: oben der Stator mit den aufgeklebten Magneten, unten der Rotor (Läufer) mit den Lamellen des Kommutators an der rechten Seite sowie die Kohlebürsten und Federn.

- Die Maschine wird mit einer konstanten Spannung betrieben. Erhöht sich das Lastmoment verringert die Maschine die Drehzahl. Dadurch sinkt die Gegenspannung und wegen der konstanten Ankerspannung erhöht sich damit der Spannungsabfall am Ankerwiderstand. Dadurch wiederum erhöht sich aber der Ankerstrom, womit sowohl die Leistungsaufnahme der Maschine als auch das abgegebene Maschinenmoment solange steigen, bis sich wieder ein Gleichgewicht unterhalb der ursprünglichen Drehzahl eingependelt hat.

#### 1.1.4 Der prinzipielle Aufbau der Gleichstrommaschine

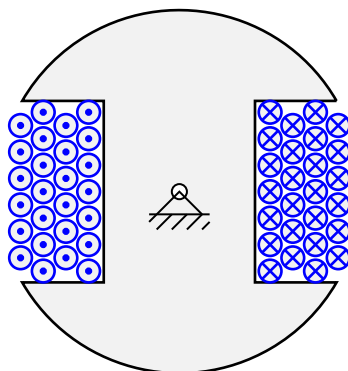
Der Gleichstrommotor besteht aus drei elementaren Baugruppen: dem Ständer oder dem Stator, der ein feststehendes Magnetfeld erzeugt, dem Rotor oder Anker, der ein Feld orthogonal zum Ständerfeld erzeugt und dem Kommutator, einer mechanischen Einrichtung, die dafür sorgt, dass die „richtigen“ Ankerspulen in die „richtige“ Richtung bestromt werden.

##### Der Anker

Der Anker oder Läufer einer Gleichstrommaschine bezeichnet den rotierenden Teil des Gleichstrommotors, der auf der Motorwelle befestigt ist. Er besteht funktional aus zwei Teilen, der Ankerwicklung und dem Kommutator, der weiter unten in diesem Abschnitt behandelt wird.

Zur Vermeidung von Wirbelströmen ist der Anker meist geblecht ausgeführt. Die Wicklungen sitzen auf einem Körper aus einzelnen gegeneinander isolierten Blechen, um Wirbelströme zu reduzieren und dadurch Verluste und die Rotorerwärmung auf einem möglichst niedrigen Niveau zu halten.

**Der Doppel-T-Anker** Maschinen mit einem Doppel-T-Anker besitzen nur eine Spule, die aus Symmetriegründen auf beide Ankerhälften verteilt ist. Zur Vermeidung von Wirbelströmen besteht der Anker aus geblechtem Eisen.



**Abbildung 1.5:** Prinzipieller Aufbau eines Doppel-T-Ankers

Der prinzipielle Aufbau des Ankers ist in Abbildung 1.5 angegeben. Die beiden Spulenden werden im Kommutator auf Lamellen geführt und dort über Kohlebürsten kontaktiert. Zwischen den beiden Lamellen befindet sich jeweils die neutrale Zone. Diese verhindert, dass über die Kohlebürsten beide (bei der einpolpaarigen Maschine) Lamellen kurzgeschlossen werden. Da der Anker lediglich eine Spule beinhaltet, benötigt der Kommutator auch lediglich zwei Lamellen. In diesen wird der Strom „gewendet“.

Wenn das Rotorfeld annähernd parallel zum Statorfeld (Erregerfeld)  $\Phi_E$  liegt, ist das erzeugte Drehmoment sehr klein, und der Motor läuft nur wegen seines Schwungs weiter. In dieser Lage würde der Motor aufgrund des geringen Drehmoments auch nicht anlaufen. Dazu kommt, dass in dieser Stellung die Bürsten ausschließlich die zwischen den Lamellen liegende neutrale Zone berühren und damit auch kein Strom fließt.

Aufgrund von Restmagnetisierung zieht sich der unbelastete stillstehende Motor aber genau in diese Stellung.

Um ein sicheres Anlaufen der Maschine zu gewährleisten, wird entweder eine Anlaufhilfe verwendet oder auf einen geänderten Aufbau (z.B. den Dreifach-T-Anker) zurückgegriffen.

Maschinen mit Doppel-T-Anker wurden bis in die 1960er Jahre als Generator (für Magnetzündler in Kraftfahrzeugen) verwendet, eine wirtschaftliche Bedeutung besitzen derartige Motoren seitdem nicht mehr.

Der Doppel-T-Anker wurde 1856 von Werner von Siemens entwickelt und ist in seiner stilisierten Form ein Bestandteil des Firmenlogos der Robert Bosch GmbH.

**Der Trommelanker** Beim Trommelanker werden die Leiter in Längsnuten an der Ankeroberfläche geführt. An den Trommelenden wird der Draht in eine andere Nut „umgeleitet“, so dass eine Schleife entsteht. Diese „Umlenkung“ erfolgt außerhalb des Einflusses der Statorerregung im sogenannten *Wickelkopf*. Wird diese Schleife mehrfach durchlaufen, sprechen wir hier von einer Wicklung anstatt von einer einzelnen Schleife. Je nach Wickelschema nimmt eine Nut die Adern mehrerer Schleifen oder Wicklungen auf.

Die Enden der einzelnen Wicklungen werden auf die Lamellen am Kommutator, auch Stromwender oder Kollektor genannt, geführt. Die einzelnen Lamellen sind durch kleine Stege, die die Lamellen gegeneinander isolieren, getrennt.

Die einzelnen Lamellen sind nach bestimmten (Wicklungs-)schemata verbunden, so dass möglichst viele der Schleifen der Wicklung zur Drehmomentbildung beitragen.

Größere und leistungsstärkere Maschinen werden typischerweise mit höheren Spannungen betrieben. Hier besteht die Gefahr der Lichtbogenbildung, wenn die Spannung zwischen zwei benachbarten Lamellen mehrere Dutzend Volt beträgt. Man spricht dann von *Bürstenfeuer*. Dieses wird dadurch vermieden, dass zwischen zwei benachbarten Lamellen nur verhältnismäßig wenige Windungen liegen, so dass die Spannung zwischen diesen Lamellen möglichst niedrig bleibt. Hierfür gibt es eine Reihe von Wicklungsschemen, wie die Schleifen- oder die Wellenwicklung. Sämtliche Wicklungen sind damit quasi zu einer großen Masche in Reihe geschaltet. Die volle Spannung liegt dann lediglich zwischen zwei gegenüberliegenden Lamellen an.

Ferner werden die Nuten leicht geschrägt, wie in Bild 1.4 zu erkennen. Hierdurch wird das Rastmoment, das aufgrund der „Restmagnetisierung“ des Ankers entsteht, reduziert.

Der Trommelanker wurde 1872 von Friedrich von Hefner-Alteneck erfunden und ist heute die häufigst verbreitete Ankerbauform.

## Der Ständer

Der Ständer oder Stator der Gleichstrommaschine stellt den feststehenden Teil der Maschine dar. Die Ständererregung, die das  $\underline{B}$ -Feld in Abbildung 1.3 erzeugt, kann durch Permanent- oder durch Elektromagneten generiert werden. Bei Elektromagneten gibt es ferner verschiedene Möglichkeiten, diese Erregerwicklung mit der Ankerwicklung zu verschalten. Hierdurch erhält die Gleichstrommaschine ein anderes Betriebsverhalten und dadurch auch unterschiedliche Einsatzgebiete.

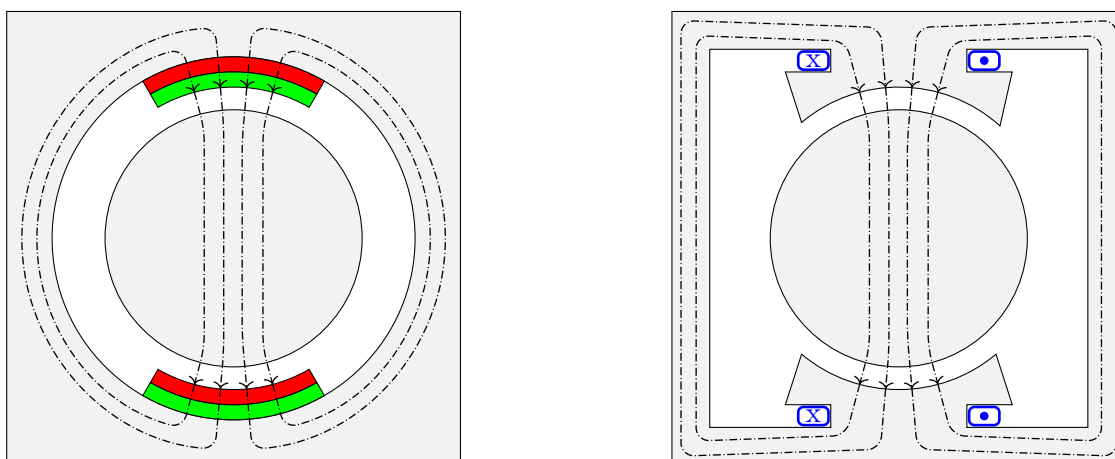
Natürlich besitzt jeder der entlang des Umfangs angeordneten Magnete einen eigenen Nord- und einen eigenen Südpol. Über das Ständereisen, das Ständerjoch, erfolgt allerdings ein magnetischer Rückschluss.

Die Magnete sind im Ständereisen (*Ständerjoch* oder auch einfach nur *Joch*) befestigt, beispielsweise durch Kleben. Aufgrund des Eisenrückschlusses ergeben sich durch die beiden Magnete zwei Pole bzw. ein Polpaar.

## Der Kommutator

Die Wicklungsenden sind auf Lamellen geführt, auf die von außen ein Kontakt, die „Bürste“, drückt. Dreht sich der Anker (und damit auch die Lamellen) weiter, drücken von außen die Bürsten auf ein neues Paar Lamellen, die Lamellen drehen unter der Bürste weiter. Dadurch wird eine andere Wicklung bestromt.

Bei einem sinnvollen Aufbau wird dadurch nur die Wicklung kontaktiert, die annähernd orthogonal zum Ständerfeld liegt. Der Strom wechselt - kommutiert - in die nächsten Wicklung.



**Abbildung 1.6:** Prinzipieller Aufbau des einpolpaarigen Stators einer Gleichstrommaschine, links mit permanentmagnetischer Erregung, rechts mit elektrischer Erregung. Mittig ist jeweils der magnetische Rückschluss durch den Rotor angedeutet. Gestrichelt sind die Feldlinien der magnetischen Flussdichte  $\underline{B}_E$ , die den (verketteten) magnetischen Fluss  $\Psi_E$  bilden, eingezeichnet. Die Feldlinien treten nahezu rechtwinklig in den Luftspalt ein bzw. aus.

Während der Begriff *Stromwendung* sich vorwiegend auf die Gleichstrommaschine bezieht, ist der Ausdruck *Kommutierung* im Bereich der Leistungselektronik ganz allgemein für Schaltvorgänge üblich.

### 1.1.5 Einfluss der Polpaarzahl

Anker und Ständer sind so konstruiert, dass sie die gleiche Polpaarzahl  $p$  besitzen. Die Pole treten immer paarweise auf, so dass alternativ die Polzahl  $2p$  verwendet wird. Entlang des Umfangs wechseln sich die Nord- und Südpole ab.

Typisch sind ein bis drei Polpaare, bei großen und langsam laufenden Maschinen sind auch größere Polpaarzahlen üblich.

- Größere Gleichstrommaschinen mit höherer Polpaarzahl lassen sich besser fertigen, da die einzelnen Magnete kleiner sind; generell ist die Verarbeitung und Montage größerer Magnete schwierig.
- Bei mehreren Polpaaren ist die effektive Eisenweglänge kürzer und das Ständereisen wird besser ausgenutzt.
- Durch mehrere Polpaare wird der Gesamtfluss in mehrere Teilflüsse aufgeteilt. Hierdurch können die Jochquerschnitte in Stator und Rotor kleiner ausgelegt werden (Materialeinsparung).
- Viele Polen bedeuten schmalere Wickelköpfe (geringerer Widerstand, geringere Verluste).
- Durch die geringeren Abstände bei höheren Polpaarzahlen erhält man auch höhere Verluste aufgrund einer größeren magnetischen Streuung.

- In den Leitungsschleifen des Ankers fließt wegen der Stromwendung ein Wechselstrom. Bei einer höheren Rotorfrequenz (Drehzahl) steigt die Frequenz des Wechselstroms und damit auch die Verluste.
- Durch die niedrige Drehzahl hochpolpaariger Antriebe kann ein Getriebe niedrigerer Übersetzung gewählt werden.

Die Wahl der Polpaare ist eine typische Optimierungsaufgabe des Elektromaschinenbaus. Der Großteil der heutzutage hergestellten Gleichstomantriebe besitzt eine Leistung unter 10 W und eine Polpaarzahl von  $p = 1$ .

## 1.2 Ersatzschaltbild der Gleichstrommaschine

Das Drehmoment, das die Gleichstrommaschinen aufgrund der stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld erzeugt, wird das *innere Drehmoment*  $m_i$  genannt. Ebenso wird die hier gewandelte elektrische Leistung als *innere Leistung* bezeichnet.

Zur Bestimmung des mechanisch abgegebenen Drehmoments  $m_{\text{mech}}$  muss vom inneren Drehmoment  $m_i$  noch die Reibung  $m_{\text{reib}}$  abgezogen werden.

$$m_i - m_{\text{reib}} = m_{\text{mech}} \quad \text{bzw.} \quad P_i - P_{\text{reib}} = P_{\text{mech}}$$

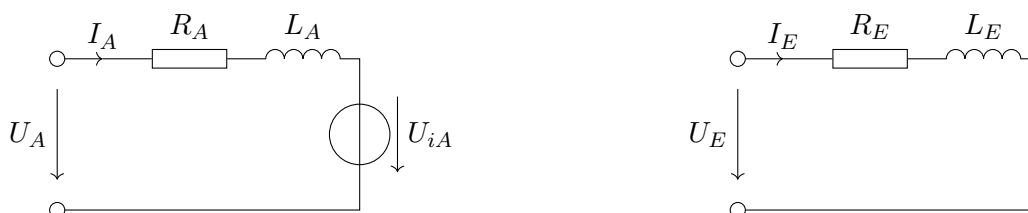
Wird lediglich das elektrische Betriebsverhalten betrachtet, arbeitet man mit den Größen inneres Drehmoment bzw. innere Leistung.

Sowohl der Anker als auch der Erreger bestehen rein physikalisch aus einer Spule, einem um einen Eisenkern gewickelten Kupferdraht. Daher erfolgt hier die Modellierung entsprechend der einer Spule. Dies sind hier jeweils eine Reihenschaltung aus ohm'schen Widerstand  $R$  und Induktivität  $L$ .

Wird in einem Magnetfeld  $B$  ein Leiter der Länge  $l$  mit der Geschwindigkeit  $v$  bewegt, wird in diesem eine Spannung  $U_{\text{ind}}$  induziert:

$$U_{\text{ind}} = l v B \quad (1.9)$$

Diese Gesetzmäßigkeit findet bei der Gleichstrommaschine Anwendung, da hier der Leiter der Ankerwicklung durch das Erregermagnetfeld  $B$  gedreht wird. Je höher die Drehzahl  $n$  (und damit die Geschwindigkeit  $v$ ) der Gleichstrommaschine ist, desto höher ist die in der Ankerwicklung induzierte Spannung  $U_{\text{ind}}$ . Diese Spannung wird als *innere Spannung*  $U_i$  oder Gegenspannung bezeichnet. Im Ersatzschaltbild wird diese innere Spannung als Spannungsquelle modelliert, deren Spannung proportional zur Drehzahl ist.



**Abbildung 1.7:** Ersatzschaltbild der Gleichstrommaschine, Ankerstromkreis (links) und Erregerstromkreis (rechts)

Das resultierende Ersatzschaltbild ist in Abbildung 1.7 dargestellt. Der auf der rechten Seite gezeigte Ständerstromkreis entfällt natürlich bei einer permanentmagnetischen Erregung.



Hieraus folgen für den stationären Zustand die beiden Gleichungen:

$$U_A = U_i + R_A I_A \quad (1.10)$$

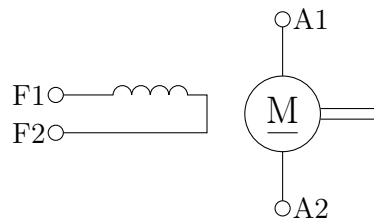
$$U_E = R_E I_E \quad (1.11)$$

Charakteristisch für diese beiden Stromkreise ist, dass aufgrund der Verhältnisse von Induktivität  $L$  und Widerstand  $R$

$$\tau_E = \frac{L_E}{R_E} > \tau_A = \frac{L_A}{R_A} \quad (1.12)$$

die Dynamik des Ankerstromkreises deutlich über der des Erregerstromkreises liegt. Daher wird für dynamische Anwendungen meist der Ankerstrom (durch die Veränderung der Ankerspannung) variiert.

Das Schaltzeichen einer elektrisch erregten Gleichstrommaschine ist in Abbildung 1.8 angegeben. Die Klemmbezeichnung ist genormt und in Tabelle B.1 verzeichnet.



**Abbildung 1.8:** typisches Schaltzeichen der fremderregten Gleichstrommaschine; der Doppellinienstrich auf der rechten Seite deutet die Motorwelle an.

### 1.2.1 Stationärer Betrieb

Bei Betrieb mit reinem Gleichstrom, wie es sich im stationären Betrieb (konstanter Drehzahl  $n$  und konstantes Drehmoment  $m_M$  bei konstanter Speisespannung  $U_A$  und konstanter Erregung  $U_E$  oder  $\Phi$ ) ergibt, entfällt nach  $U_L = L \frac{di}{dt} = 0$  der Spannungsabfall an der Induktivität  $L_A$ , so dass sich das Ersatzschaltbild auf die Gegenspannungsquelle  $U_{iA}$  und den Rotorwiderstand  $R_A$  vereinfacht.

Bei konstanter Spannung  $U$  bedeutet dies eine konstante Erregung, so dass für das erzeugte Drehmoment (inneres Moment)  $m_i \sim I_A$  gilt.

### 1.2.2 Typische Wahl von Zählpfeile und Leistungsfluss

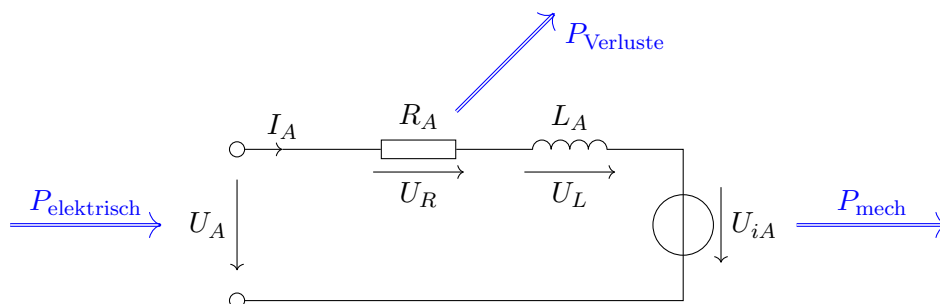
Die Wahl der Richtung des Leistungsflusses ist eine rein willkürliche Festlegung, meist wird bei einem Antrieb der motorische Betriebsfall betrachtet und es werden hierfür die Zählpfeile passend gewählt.

- Aus dem Energienetz wird elektrische Leistung entnommen.
- In den Wicklungen entsteht eine thermische Verlustleistung.
- Im inneren „Kern“ der Maschine erfolgt die Energiewandlung zwischen elektrischer und mechanischer Leistung.

- Die mechanische (*innere*) Leistung wird abgegeben.
- Von dieser werden die mechanischen Verluste (Reibung) abgezogen.

Die elektrische Energie lässt sich über das Produkt von Strom und Spannung bestimmen, wobei wie folgt unterschieden wird:

- Die Klemmspannung beschreibt den Motor aus Sicht des Stromnetzes. Da die Maschine als Motor betrachtet wird (siehe Abbildung 1.7), kommt das Erzeugerzählpeilsystem zum Einsatz.
- Für die Beschreibung der thermischen Verluste wird das Verbraucherzählpeilsystem gewählt.
- Die Wandlung der elektrischen Leistung in mechanische Leistung wird im Ersatzschaltbild in Abbildung (1.7) durch das Verhalten an der Gegenspannungsquelle beschrieben. Hier wird im motorischen Fall die Leistung abgeführt, darum auch hier das Verbraucherzählpeilsystem. Die hier umgesetzte Leistung wird auch als *innere Leistung* bezeichnet. Die Spannung  $U_{i,A}$  wird auch als Gegenspannung  $U_{\Psi}$ , induzierte Spannung  $U_{\text{ind}}$  oder innere Spannung  $U_i$  bezeichnet.
- An den Anschlussklemmen des Ankers wurde das Erzeugerzählpeilsystem gewählt, die in den Antrieb hineinfließende Leistung  $P_{\text{elektrisch}} = U_A I_A$  wird positiv gezählt.
- Die am Innenwiderstand der Ankerwicklung  $R_A$  umgesetzte Leistung ( $P_{\text{Verluste}}$ ) wird als Wärme abgeführt, daher das Verbraucherzählpeilsystem.
- Ebenso wird die an der Gegenspannungsquelle  $U_{iA}$  umgesetzte Leistung als mechanische Leistung  $P_{\text{mech}} = U_{i,A} I_A = m \omega$  abgeführt.



**Abbildung 1.9:** Ersatzschaltbild der festerregten Gleichstrommaschine mit Darstellung des Leistungsflusses ( $\Rightarrow$ ) bei motorischen Betrieb

Falls die mechanische Leistung  $P_{\text{mech}} = m_{\text{mot}} \omega$  positiv ist, erkennt man dies anschaulich daran, dass die Achse unabhängig von der aktuellen Drehrichtung  $\omega$  beschleunigt, also das Drehmoment  $m_{\text{mot}}$  in die Richtung der aktuellen Drehrichtung  $\omega$  weist. Per Definition wird der Rechtslauf als positive Drehrichtung festgelegt.

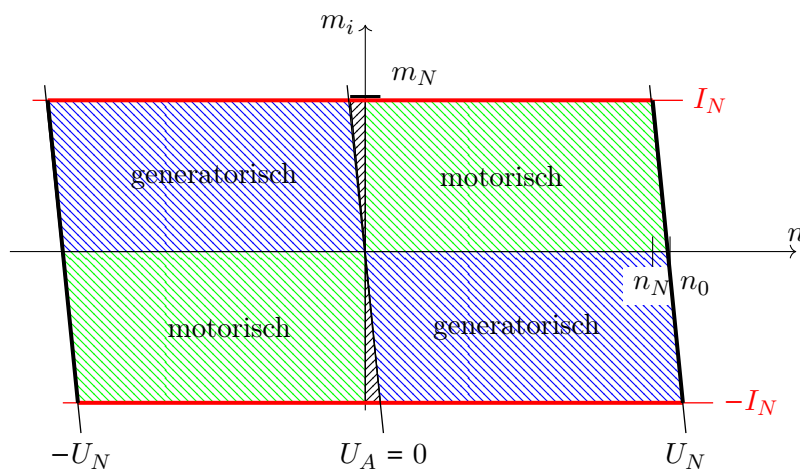
## 1.3 Das Betriebsverhalten der Gleichstrommaschine

### 1.3.1 Der Arbeitsbereich der Gleichstrommaschine

Prinzipiell kann die Gleichstrommaschine in allen vier Quadranten der Drehzahl-Drehmoment-Ebene betrieben werden. Dieser Arbeitsbereich wird begrenzt

- durch den Ankerstrom  $I_A$ , der bei einer dauerhaften Überschreitung von  $i_{\max}$  zu einer Überhitzung der Maschine führen würde. Diese Grenze ist von den thermischen Gegebenheiten wie Kühlung, Umgebungstemperatur oder vorausgegangener Belastung abhängig
- durch die maximal verfügbare Ankerspannung  $U_{A,\max}$  oder maximal zulässige Ankerspannung: Ein Überschreiten der zulässigen Ankerspannung kann zur Lichtbogenbildung am Kommutator führen. Meist jedoch ist die Spannung, zumindest im motorischen Fall, durch die Versorgungsspannung begrenzt auf  $U_{A,\max}$
- durch die aus mechanischen Gründen beschränkte maximale Drehzahl  $n_{\max}$

Die Kennlinie für die Drehzahl bzw. die Grenze durch eine konstante Ankerspannung ist geneigt. Dieses Verhalten kann aus dem Ersatzschaltbild in Abbildung 1.7 bzw. aus Gleichung 1.10 abgelesen werden. Die Ankerspannung  $U_A$  ist sowohl von der inneren Spannung  $U_{i,A} \sim \omega$  als auch vom Spannungsabfall am  $U_R = \frac{1}{R_A} I_A \sim m$  und daher auch vom inneren Drehmoment abhängig. Die Neigung der Kennlinie entspricht daher dem Ankerwiderstand  $R_A$ .



**Abbildung 1.10:** Arbeitsbereich der Gleichstrommaschine im Grundstellbereich, begrenzt durch Strom  $I_N$  und Spannung  $U_N$ ; eingezeichnet sind die drei Betriebsbereiche, in denen der Antrieb als Motor (blau schraffiert), Generator (grün schraffiert) oder als Bremse (schwarz schraffiert) arbeitet.

Die Grenzen sind so gewählt, dass bei entsprechenden thermischen Randbedingungen der Motor in diesem „Grundstellbereich“ dauerhaft betrieben werden kann. Die Grenzen werden dann als Bemessungsgrößen,  $m_N$  bzw.  $I_N$ ,  $n_N$  und  $U_N$  bezeichnet, siehe auch Tabelle A.4.

Je nach Richtung des Leistungsflusses spricht man von einem motorischen (Leistungswandlung von elektrischer in mechanische Leistung) oder vom generatorischen (Leistungswandlung von mechanischer in elektrische Leistung) Betriebsverhalten. Ob eine Maschine als Generator oder als Antrieb bezeichnet wird, hängt von der vorwiegenden Richtung des Leistungsflusses ab.

Außerdem gibt es den Fall, dass dem Motor sowohl mechanische als auch elektrische Energie zugeführt wird. Diese beiden Leistungszuflüsse werden an den Innenwiderständen der Wicklungen in Wärme umgesetzt. Der Motor arbeitet dann als Bremse.

### 1.3.2 Wirkungsgrad der Gleichstrommaschine

Entsprechend Abbildung 1.7 gilt für den Ankerkreis

$$u_A = R_A i_A + L_A \frac{di_A}{dt} + u_i \quad (1.13)$$

Um die Leistungsbilanz aufzustellen, wird beidseitig mit dem Ankerstrom  $i_A$  erweitert:

$$u_A i_A = R_A i_A^2 + L_A i_A \frac{di_A}{dt} + u_i i_A \quad (1.14)$$

Damit kann für den stationären Zustand der Wirkungsgrad des Ankerstromkreises berechnet werden,

$$P_{\text{el,zu}} = P_{\text{V,Cu}} + \frac{d}{dt} P_{\text{magnetisch}} + P_{\text{mech,ab}} \quad (1.15)$$

wobei die Änderung der im magnetischen Feld gespeicherten Energie im Mittel Null beträgt und damit hier entfallen durfte.

Die in mechanische Leistung gewandelte Leistung wird auch als *innere Leistung*  $P_i$  bezeichnet, für die dann  $P_i = u_i i_A = m_i \omega_M$  gilt. Das innere Moment  $m_i$  bezeichnet das durch die Wicklungen erzeugte Drehmoment. Für das Maschinen(dreh-)moment muss hiervon noch das Reibmoment abgezogen werden.

Ebenso müssen zur Berechnung der letztendlich vom Motor abgegebenen Leistung noch Reibverluste in den Lagern und am Kommutator berücksichtigt werden.

Der Wirkungsgrad berechnet sich ganz allgemein als Quotient zwischen mechanisch abgegebener Leistung und elektrisch aufgenommener Leistung im motorischen Fall  $\eta_{\text{mot}} = \frac{P_{\text{mech,ab}}}{P_{\text{el,auf}}}$ , beziehungsweise als Quotient zwischen elektrisch abgegebener Leistung und mechanisch aufgenommener Leistung im generatorischen Fall  $\eta_{\text{gen}} = \frac{P_{\text{el,ab}}}{P_{\text{mot,auf}}}$ . Verluste entstehen in den Wicklungen ( $P_A = R_A I_A^2$ ,  $P_E = R_E I_E^2$ ) durch Reibung in den Lagern der Welle, durch Bürstenreibung und durch Ummagnetisierungsverluste (Hystereseverluste, Wirbelstromverluste).

Typische Wirkungsgrade liegen bei kleineren Maschinen im Bereich von  $\eta = 0,5$ , bei größeren Maschinen im Bereich von  $\eta = 0,85 \dots 0,95$  oder noch darüber.

Diese Wirkungsgrade gelten natürlich nur im Bemessungspunkt, bei höherwertigen Maschinen ist der Wirkungsgrad in Abhängigkeit von diversen Einflussfaktoren angegeben, siehe auch Abbildung 1.11.

### 1.3.3 Beschreibung über Kenngrößen

Zur groben Beschreibung der Gleichstrommaschine wird häufig mit den folgenden Kenngrößen gearbeitet:

- Die **Nenngrößen** ermöglichen die Dimensionierung bezüglich Drehzahl und Drehmoment bzw. Strom und Spannung.

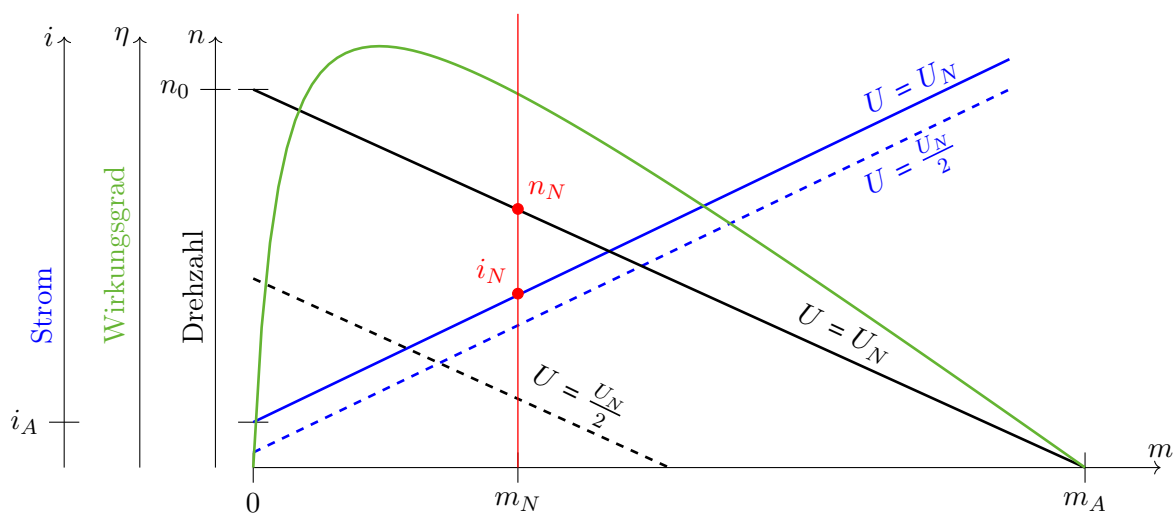
- Die **Spannungskonstante**  $k_e$  beschreibt die Drehzahl  $n$  im Verhältnis zur angelegten Spannung  $U_A$  bzw. die induzierte Spannung  $U_{\text{ind}}$  bei einem mit der Drehzahl  $n$  betriebenen Generator:  $k_e = \frac{n}{U_{\text{ind}}}$ . Wird die angelegte Spannung  $U_A$  verwendet, ergibt sich durch den vernachlässigten Spannungsabfall am Innenwiderstand ein kleiner Fehler. Die induzierte Gegenspannung kann nicht direkt gemessen werden. Lediglich im Leerlauf gilt  $U_A = U_{\text{ind}}$ .
- Die **Drehmomentkonstante**  $k_m$  beschreibt die Proportionalität vom Drehmoment  $m$  zum fließenden Ankerstrom  $I_A$ :  $k_m = \frac{m}{I_A}$

### 1.3.4 Beschreibung über Kennlinien

Zur systematischen Veranschaulichung des Betriebsverhaltens von Gleichstrommaschinen werden, zumindest für höherwertige Antriebe, zusätzlich zu den Nenngrößen Belastungskennlinien angegeben. Hierdrin sind

- der Wirkungsgrad
- der Strom
- die Nenndrehzahl

als Funktionen des Drehmoments angegeben.



**Abbildung 1.11:** Beispielhafte Lastkennlinie einer Gleichstrommaschine: Darstellung von Rotorstrom, Wirkungsgrad und Drehzahl in einem Diagramm. Zusätzlich ist der Arbeitsbereich für den Dauerbetrieb und für den Aussetzbetrieb angegeben.

Die Verläufe beziehen sich auf die angelegte Nennspannung  $U_N$ , oder wie in Abbildung 1.11 dargestellt, die Verläufe werden für mehrere repräsentative Spannungen dargestellt. Einflüsse durch Toleranzen bei der Fertigung oder Temperatureinflüsse werden meist vernachlässigt.

#### Die Stromkennlinie

Aus dem Ersatzschaltbild in Abbildung 1.7 geht hervor, dass sich der Ankerstrom  $i_A$  bzw.  $i$  und das erzeugte Drehmoment  $m$  linear zueinander verhalten.

Aufgrund von Reibung wird die Kennlinie aus dem Nullpunkt heraus verschoben. Markante Punkte der Kennlinie sind der **Spitzenstrom**, bei dessen Überschreitung die Wicklungen des (thermisch) Motors zerstört würden, der **Anlaufstrom**  $I_A$ , der sich bei stehender Maschine einstellt, und das maximale Drehmoment, das das Anlaufmoment  $m_A$  erzeugt, sowie der **Leerlaufstrom**  $I_0$ , der sich einstellt, wenn die Maschine ohne Lastmoment betrieben wird.

### Die Wirkungsgradkennlinie

Der Wirkungsgrad, das Verhältnis von mechanisch abgegebener zur elektrisch aufgenommenen Leistung, beträgt bei lastfreiem Betrieb ( $m=0$ ) oder im Stillstand ( $n=0$ ) Null. Verluste entstehen sowohl im Ankerwiderstand (proportional zum Stromfluss) und durch Reibung.

Bei niedrigen Drehmomenten  $m$  fällt das Reibmoment besonders deutlich ins Gewicht, so dass sich der dargestellte typische Kurvenverlauf ergibt. Der maximale Wirkungsgrad ist im Bereich von einem Siebtel des maximalen Drehmoments zu finden.

### Die Drehzahlkennlinie

Befinden sich das Lastdrehmoment und das antreibende Drehmoment nicht im Gleichgewicht, erfolgt so lange eine Drehzahländerung, bis sich ein Gleichgewicht eingestellt hat. Charakteristische Punkte der Kennlinie sind die Leerlaufdrehzahl  $n_0$ , die sich bei fehlendem Lastmoment einstellt, sowie das Anhaltmoment bzw. Anlaufdrehmoment  $m_A$ , bei dem sich die Maschine im Stillstand befindet. Die Kennlinie verschiebt sich proportional mit der angelegten Spannung  $U$ . Die Steigung der Kennlinie ist ein Maß für die Drehzahländerung aufgrund von Lastmoment-schwankungen.

## 1.4 Die fremderregte Gleichstrommaschine

Maschinen mit magnetischen Materialien lassen sich nur bis zu bestimmten Größenordnungen wirtschaftlich bearbeiten. Daher wird bei größeren Maschinen eine elektrische Erregung bevorzugt. Ferner erhält man über die Erregerspannung  $U_E$  neben der Ankerspannung  $U_A$  eine weitere Eingriffsmöglichkeit auf das Betriebsverhalten des Motors.

### 1.4.1 Nebenschlussmotor

Bei Nebenschlussmotoren werden Erreger- und Rotorwicklungen „nebeneinander“, also parallel geschaltet.

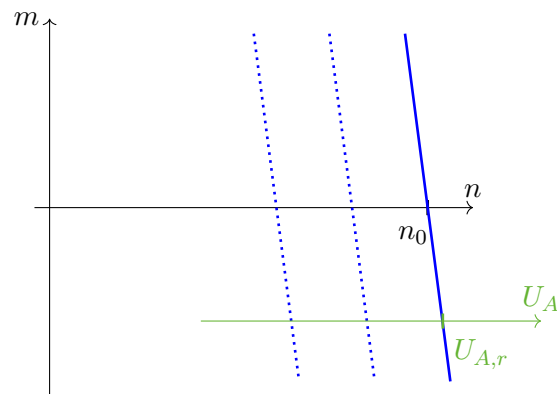
Für den Zusammenhang von Drehmoment und Drehzahl ergibt sich die typische Kennlinie aus Abbildung 1.12: Ausgehend von der Leerlaufdrehzahl  $n_0$  sinkt die Drehzahl bei Belastung nur im geringen Maße (eine sogenannte „harte Kennlinie“), bis die Drehzahl bei Erreichen des Nennmoments  $m_r$  die Nenndrehzahl  $n_r$  erreicht. Wird das Lastmoment weiter erhöht, gerät die Maschine an ihre Leistungsgrenze.

HSDgruen

Diese Kennlinie lässt sich durch Variation der Ankerspannung  $U_A$  verschieben, so dass sich ein fast lineares (drehmomentinvariantes) Spannungs-Drehzahlverhalten ergibt.

Dadurch ergeben sich zwei typische Einsatzfelder:

- Anwendungen, bei denen eine lastunabhängige konstante Drehzahl gefordert wird
- In Regelungen, da die Drehzahl über die Ankerspannung vorgegeben werden kann



**Abbildung 1.12:** Typischer Drehmomentverlauf bei Nebenschlussverhalten, gestrichelt mögliche Verläufe bei reduzierter Ankerspannung  $U_A$

### 1.4.2 Reihenschlussmotor

Beim Reihenschlussmotor werden die Wicklungen in Reihe geschaltet. Die Ständerwicklung ist verhältnismäßig niederohmig, damit genug Ankerspannung für höhere Drehzahlen zur Verfügung steht. Durch die bei niedriger Drehzahl geringe Gegenspannung  $U_i$  ergibt sich bei entsprechender Klemmspannung  $U_0 (= U_A = U_E)$  ein hoher Strom und damit ein hohes Anlaufmoment, z.B.  $m_{Anlauf} \approx 3 m_r$ .

Durch diese Charakteristik ergeben sich typische Anwendungsbereiche wie das Anlassen von Verbrennungsmotoren (Starter-Generator) oder als Antriebsmotor für die Traktionen.

Bei fehlender Last kann der Motor auf unzulässig hohe Werte bis hin zur Zerstörung beschleunigen, daher muss bei entsprechenden Anwendungen die Drehzahl überwacht und begrenzt werden.

### 1.4.3 Feldschwächbetrieb

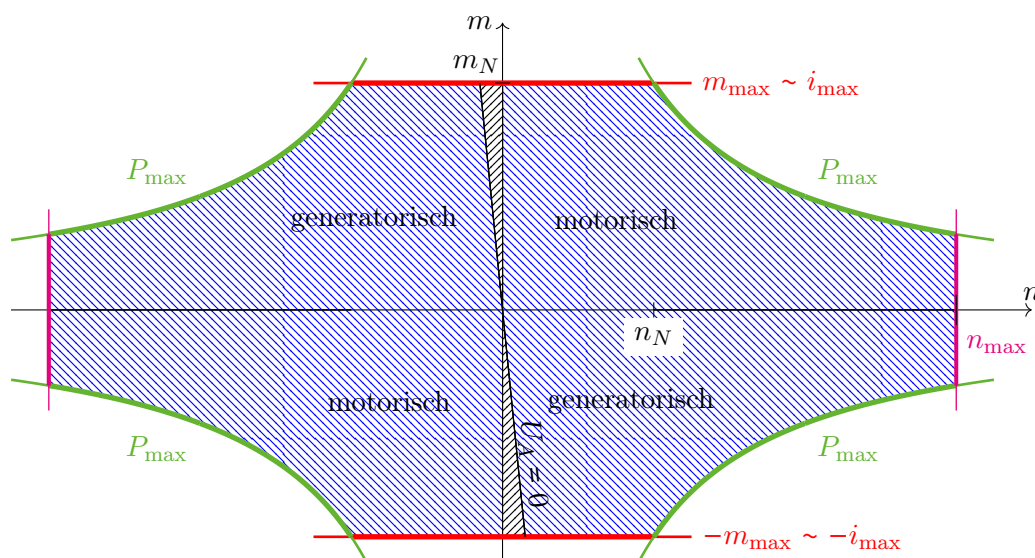
Durch Variation der Spannung  $U_E$  an der Erregerwicklung kann der Stromfluss  $I_E$  in der Erregerwicklung beeinflusst werden. Der Strom  $I_E$  ist direkt proportional zur magnetischen Flussdichte  $B_E = \mu_r \mu_0 I_E \frac{n}{l}$  und damit auch proportional zum magnetischen Fluss  $\Phi_E = \int \underline{B} d\underline{A}$  durch die Fläche  $A$ .

Durch Absenkung der Erregung  $\Phi_E$  bei fremderregten Gleichstrommaschinen sinkt entsprechend dem Induktionsgesetz die Gegenspannung  $U_{iA} = c_m \omega_M \Phi_E$ . Dies kann dazu verwendet werden, die Drehzahl über die Bemessungsdrehzahl  $n_r$  zu erhöhen. Bei einer Erhöhung der Drehzahl bleibt die Leistungsgrenze der Maschine natürlich weiterhin bestehen, siehe auch Abbildung 1.13.

Dadurch wird es möglich, die Maschine mit dem vollen Drehmoment (zügig) anlaufen zu lassen, und später mit einem geringeren Drehmoment weiter zu beschleunigen. Anwendung findet die feldgeschwächte Gleichstrommaschine als Traktionsantrieb oder bei Werkzeugmaschinen.

## 1.5 Die Universalmaschine

Als Universalmaschine oder auch als Allstrommotor wird ein Reihenschlussmotor bezeichnet, der mit einphasigem Wechselstrom betrieben wird. Während der positiven Halbwelle der Versorgungsspannung bildet sich nach Gleichung 1.6 ein positives Drehmoment, da der Strom im



**Abbildung 1.13:** Arbeitsbereich der Gleichstrommaschine im Feldschwächbereich: als rote Kante die Strombegrenzung ( $i_N = i_{\max}$ ), als grüne Kante die Leistungsgrenze, als lila Kante die maximale Drehzahl, die durch die mechanischen Aufbau der Maschine begrenzt wird

Anker  $\underline{I}_A$  und magnetisches Feld des Stators  $\underline{B}_S$  positiv sind. Während der negativen Halbwelle fließt der Strom sowohl in der Ankerwicklung als auch in der Ständerwicklung in die negative Richtung. Aufgrund des negativen Stroms in der Erregerwicklung kehrt sich auch das magnetische Feld um, und das Drehmoment ist nach

$$\underline{m} = 2nr(\underline{I}_l) \times \underline{B} = 2nr(-\underline{I}_l) \times (-\underline{B})$$

wiederum positiv.

Eine Universalmaschine kann meist problemlos mit Gleichstrom betrieben werden. Umgekehrt ist eine als Gleichstrommaschine ausgelegte Reihennebenschlussmaschine wegen der Auslegung (Wirbelströme, Streufelder) meist nicht für den Einsatz mit Wechselstrom geeignet.

Universalmaschinen kommen im Haushalt häufig als Küchen- oder Werkzeugmaschinen (Stabmischer, Bohrmaschine, ...) mit einer Nennleistung bis zu 3 Kilowatt und einer Nenndrehzahl von 3000 U/min bis zu 30.000 U/min zum Einsatz.



## Kapitel 2

# Der Drehstrommotor

Elektrische Maschinen sind in der elektrischen Energietechnik eingesetzte Energiewandler. Zu ihnen zählen neben Motoren und Generatoren auch Transformatoren. Ihnen ist gemein, dass sie über einen magnetischen Kreis verfügen.

Motoren bilden zusammen mit einer Regelung, einer Steleinrichtung und den erforderlichen Sensoren einen Antrieb. Steleinrichtungen werden im Kapitel 5 behandelt. Die erforderliche Regelungstechnik wird hier nicht behandelt. Elektromotoren sind Standardbeispiele in der regelungstechnischen Literatur.

Elektromotoren, insbesondere Drehstrommotoren, nutzen vorwiegend zwei Effekte:

- Die Lorentzkraft (magnetische Kraft)
- Die Reluktanzkraft

Diese Motoren werden auch unter dem Oberbegriff *induktive Motoren* zusammengefasst. Drehstrommotoren werden mit einem dreiphasigen Stromnetz (im Vergleich zur Gleichstrom- oder Universalmaschine) versorgt. Dieses Stromnetz kann das Versorgungsnetz (Niederspannungsnetz oder Mittelspannungsnetz) sein oder explizit über einen Frequenzumrichter bereit gestellt werden.

Im Folgenden beschränken wir uns auf die Asynchronmaschine und die Synchronmaschine.

### 2.1 Prinzipielle Funktionsweise

Die Funktionsweise von Maschinen, die auf der Lorentzkraft („Magnetkraft“) beruht, lässt sich am besten über das folgende Gedankenexperiment erläutern.

Auf einer Achse sind im kurzen Abstand zwei identische Stabmagnete drehbar montiert, siehe Abbildung 2.1:

- Liegen zwei Pole<sup>1</sup> der Magnete nebeneinander (Abbildung 2.1, i), stoßen sie sich in axialer Richtung ab oder ziehen sich an. In der radialen Ebene gibt es keine Kraftwirkung.
- Sind die Pole gegeneinander verschoben (Abbildung 2.1, ii), so stoßen sie sich ab bzw. ziehen sich an. Es existiert neben der axialen Komponente der Kraft auch eine in der Radialebene.
- Beträgt der Winkel zwischen den beiden Magneten  $\frac{\pi}{2}$  (Abbildung 2.1, iii), dann ist die Kraft in der Radialebene maximal.

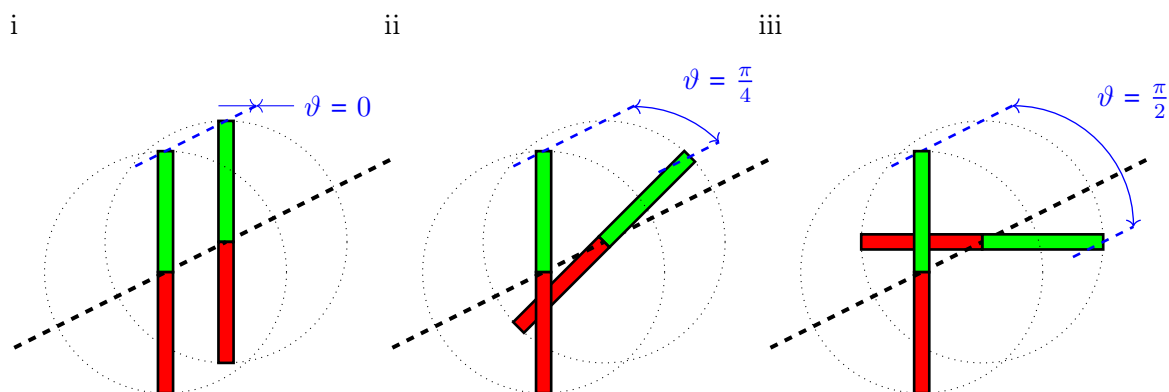


Abbildung 2.1: Prinzip von Drehstromantrieben nach der Lorentzkraft

Die Drehmomentwirkung zwischen den beiden Magneten lässt sich in guter Näherung als sinusförmig beschreiben:

$$m(\vartheta) = \hat{m} \sin(\vartheta) \tag{2.1}$$

Soll mit einem Motor ein Drehmoment erzeugt werden, dann ist dies gleichbedeutend mit der Aufgabe, zwei orthogonal zueinander stehende Felder zu erzeugen.

Eines dieser Felder ist am feststehenden Teil der Drehstrommaschine gekoppelt, der Ständer oder Stator heißt. Größen, die sich am Stator orientieren, können bei Bedarf zur Kennzeichnung den hochgestellten Index „S“ erhalten, sie werden als „statororientiert“ bezeichnet.

Der bewegliche Teil der Maschine heißt Rotor oder Läufer, bei der Gleichstrommaschine auch Anker. Am Rotor orientierte Größen werden zum Ausschluss von Verwechslungen, falls erforderlich, durch den hochgestellten Index „R“ gekennzeichnet und als „rotororientiert“ bezeichnet.

**Wichtig:** Das Rotorfeld ist nicht zwangsläufig fix an den Rotor gekoppelt, sondern das Feld kann zum Rotor auch relative Bewegungen ausführen.

Die Differenz zwischen Rotor und Stator (nicht von Rotor- und Statorfeld) ist der Rotorstellungswinkel, die Rotorlage  $\varepsilon_{RS}$ . Die Differenzgeschwindigkeit zwischen dem Rotor und dem (feststehenden) Stator ist die Rotorgeschwindigkeit  $\omega_{RS} = \frac{d\varepsilon_{RS}}{dt}$ . Der Zusammenhang zwischen der auf eine Polteilung bezogenen Rotorlage und der mechanischen Rotorlage wird im Abschnitt 2.6 dargestellt.

## 2.2 Der magnetische Kreis

Durch einen Permanentmagneten oder durch eine stromdurchflossene Spule wird ein Magnetfeld erzeugt. Dieses Magnetfeld ist nicht an einen materiellen Leiter gebunden und existiert auch im Vakuum. Mit der Bezeichnung „magnetischer Kreis“ wird die Analogie zum elektrischen Kreis angedeutet. Vergleichbar zum „ohm’schen Gesetz“ gibt das „hopkinson’sche<sup>2</sup> Gesetz“

$$V_{\text{mag}} = R_{\text{mag}} \cdot \Phi \tag{2.2}$$

<sup>1</sup>typisch: Nordpol rot, Südpol grün

<sup>2</sup>nach John Hopkinson, 1849 - 1898

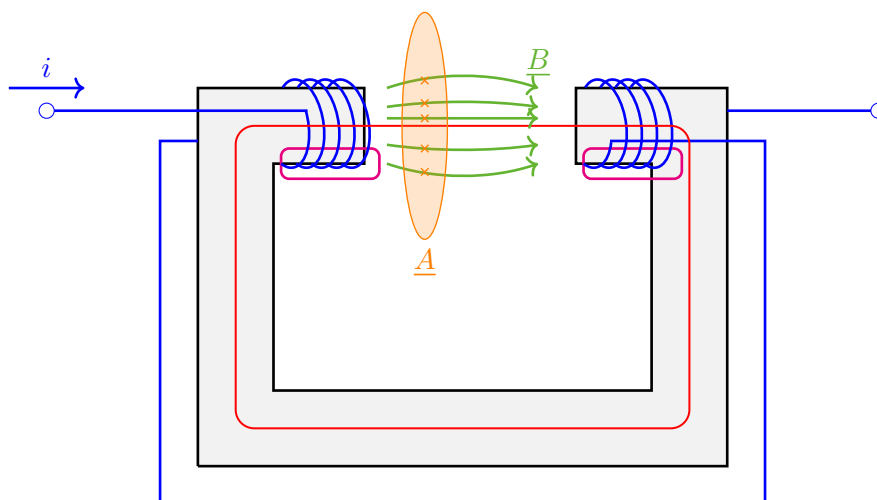
den Zusammenhang von magnetischer Spannung  $V_{\text{mag}}$ , magnetischem Widerstand  $R_{\text{mag}}$  und magnetischem Fluss  $\Phi$  an.

Der **magnetische Widerstand** ist sowohl geometrie- als auch materialabhängig:  $R_{\text{mag}} = \frac{l}{\mu_0 \mu_r \cdot A}$ . Eine größere Länge  $l$  erhöht den magnetischen Widerstand, ein größerer Querschnitt senkt ihn. Ferner geht die Permeabilität  $\mu = \mu_0 \mu_r$  in die Berechnung mit ein:  $\mu_0$  ist eine Naturkonstante,  $\mu_r$  ist materialabhängig und dimensionslos: Für weichmagnetische Werkstoffe (Eisen, Ferrite, Kobalt, Nickel) gilt  $\mu_r \gg 1$ , für Luft aber  $\mu_r \approx 1$ . Bei elektrischen Maschinen fällt die magnetische Spannung damit fast ausschließlich über den Luftspalt ab.

Die **magnetische Feldstärke**  $\underline{H}$  beschreibt die Ursache eines magnetischen Feldes, nämlich ein Strom  $I$  durch einen Leiter. Wenn der Strom aufgrund von 10 Windungen 10-fach durch eine Fläche (in Abbildung 2.2 der roten Kontur bzw. der lila Konturen) fließt, dann ist auch die magnetische Flussdichte zehnfach höher.

Die **magnetische Flussdichte**  $\underline{B}$  beschreibt die Wirkung eines magnetischen Feldes. Sie taucht daher auch in der Gleichung zur Lorentzkraft, Gln. (1.4) auf. Der Zusammenhang ergibt sich über die Gleichung  $\underline{B} = \mu \underline{H}$ : Im Eisen gilt also die gleiche magnetische Feldstärke wie im Luftspalt, die Flussdichte besitzt nur im Luftspalt eine nennenswerte Größe.

Der **magnetische Spannungsabfall**  $V_{\text{mag}}$  entspricht dem Wegintegral über die magnetische Feldstärke  $\underline{H}$ . Sie wird im Bereich der Wicklungen aufgebaut und in den übrigen Bereichen wieder abgebaut. Im Bereich der roten Linie in Abbildung 2.2 ist sie in Summe Null.



**Abbildung 2.2:** Feldbildung bei einem Polpaar: Der stromdurchflossene Leiter (blau) erzeugt ein magnetisches Feld  $\underline{H}$ , dessen Wirkung durch die magnetische Induktion  $\underline{B}$  (grün) beschrieben werden kann. Die magnetische Flussdichte, die die Fläche  $\underline{A}$  (orange) durchsetzt, ergibt die Ständerflussverkettung  $\Psi_S$ . Die rot eingezeichnete Linie stellt eine magnetische Masche dar, die die magnetische Durchflutung  $\Theta$  (die magnetische Spannungsquelle) erfolgt in dem lila eingezeichneten Bereichen, der magnetische Spannungsabfall erfolgt vorwiegend über den Luftspalt.

Die **magnetische Durchflutung**  $\Theta$  ist ein Maß für das magnetische Feld in einer Spule. Die alternative Bezeichnung *magnetische Quellspannung* weist auf die Bedeutung als magnetische Spannungsquelle im magnetischen Kreis hin. Sie ist bei Spulen und Drosseln abhängig von der Windungszahl und den die Wicklung durchfließenden Strömen,  $\Theta = n \cdot I$ . Sie ist eine typische Größe im Elektromaschinenbau und baut sich also vorwiegend über den Luftspalt wieder ab.

Der **magnetische Fluss**  $\Phi$  beschreibt die Wirkung eines Permanent- oder Elektromagneten, also der „Summe der Feldlinien“. Er ist daher eine skalare Größe. Er wird auch als Polfluss bezeichnet und ist eine typische Größe im Elektromaschinenbau.

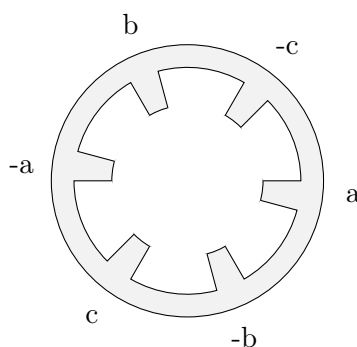
Der **verkettete magnetische Fluss**  $\Psi$  beschreibt den Einfluss, die „Verkettung“ des Rotorfelds auf das Feld der Ständerwicklungen. Der **Raumzeiger des Polradflusses**  $\underline{\Psi}_P$  ist fest am Polrad bzw. an die Magnete des Polrads gekoppelt. Er ist bei regelungs- und antriebstechnischen Fragestellungen die bevorzugte Größe.

## 2.3 Aufbau des Stators

Der Stator soll ein möglichst starkes Ständerfeld bereitstellen: Immer zwei gegenüberliegende Zähne bilden einen magnetischen Kreis. Dieser besteht jeweils, wie in Abbildung 2.2, aus den Erregerwicklungen um die Zähne, einem Luftspalt und dem Eisenrückschluss über das Ständerjoch. Durch die Anordnung bildet sich ein nahezu paralleles „Magnetfeld“ zwischen den beiden Zähnen aus. Die Stärke der magnetischen Feldstärke ist weitgehend linear zu dem Strom durch das Spulenpaar. Bei sinnvollem Aufbau ist der Rückschluss über die Zähne und das Statoreisen nahezu verlustfrei. Um die Verluste im Luftspalt zu minimieren, wird der Luftspalt zwischen Stator und Rotor möglichst gering gehalten.

## 2.4 Erzeugung des Statorfeldes

Ein Stator ist in der Regel so aufgebaut, dass die Polpaare auf einem Kreis nebeneinanderliegen, wie in Abbildung 2.3 schematisch dargestellt. Um das Feld, das sich zwischen zwei gegenüber-



**Abbildung 2.3:** Prinzipieller Aufbau eines Statorblechs mit Bezeichnung der zugehörigen Spulenpakete

liegenden Polen aufgebaut hat, rotieren zu lassen, wird nun der Strom von einem Polpaar bzw.

Strang auf das benachbarte Polpaar bzw. den benachbarten Strang umgeschaltet. In Abbildung 2.3 wäre dies ein Wechsel vom Strang  $a$  auf das Spulenpaar  $b$  bzw.  $-b$ .

Die Bezeichnung „ $-a$ “ deutet darauf hin, dass der Strang  $a$  vom Strom  $i_a$  in negative Richtung durchflossen wird. Durch Weiterschalten des Stroms liegt das Feld nacheinander in den Richtungen  $a$ ,  $-c$ ,  $b$ ,  $-a$ ,  $c$  und  $-b$  an, also in  $\pi/3$  oder  $60^\circ$ -Schritten.

## 2.5 Funktionsweise der Drehstromwicklungen

Durch Bestromung eines Wicklungspaares ergibt sich ein Feld in eine der drei Richtungen  $a$ ,  $b$  oder  $c$ , bzw., bei einem negativen Strom, in eine der drei Richtungen  $-a$ ,  $-b$  oder  $-c$ . Aufgrund des Superpositionsprinzips kann durch das gleichzeitige Bestromen mehrerer Wicklungspaare ein Feld in jede beliebige Richtung gestellt werden.

Die Funktion der Drehstromwicklung soll am folgenden Beispiel erläutert werden: Ein Drehstromnetz mit drei um  $\frac{2}{3}\pi$  versetzten Phasen wird an die drei Stränge angeschlossen.

Durch die Überlagerung (Addition) der drei Ströme  $i(t) = \hat{i} \sin(\omega_i t)$  ergibt sich ein

$$\underline{i}(t) = i_a(t) + i_b(t)e^{j\frac{2}{3}\pi} + i_c(t)e^{j\frac{4}{3}\pi} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} &= \hat{i} \cdot \sin(\omega_i t) + \hat{i} \cdot \sin\left(\omega_i t + \frac{2\pi}{3}\right) e^{j\frac{2}{3}\pi} + \hat{i} \cdot \sin\left(\omega_i t + \frac{4\pi}{3}\right) e^{j\frac{4}{3}\pi} \\ &= \frac{3}{2} \hat{i} e^{j\omega_i t} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Stromzeiger  $\underline{I}$ , der mit Netzfrequenz rotiert. Synchron mit diesem Stromzeiger rotiert der Zeiger der magnetischen Flussdichte  $\underline{B}$ .

Die Netzfrequenz, also die Frequenzen der einzelnen Ströme  $\omega_i$ , ist identisch mit der Frequenz des Stromzeigers  $\omega_S$  und der Frequenz der magnetischen Flussdichte.

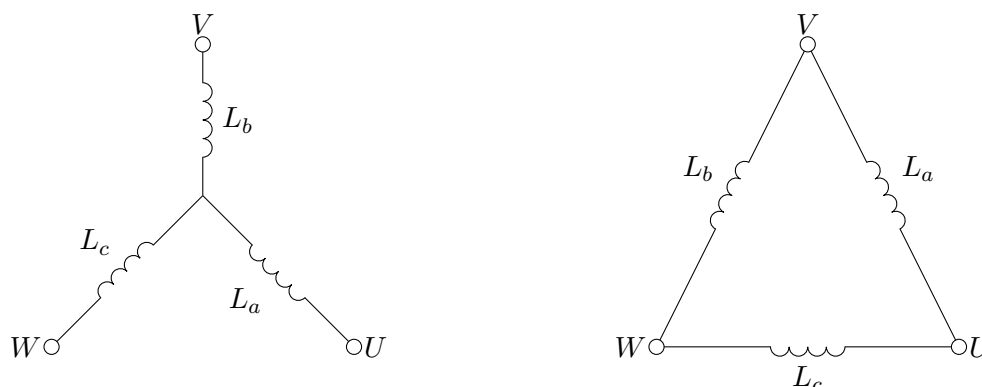
Es kann festgehalten werden: Durch die Vorgabe von Spannungen an den drei Statorwicklungen fließen in den Wicklungen die Ströme  $i_1(t)$ ,  $i_2(t)$  und  $i_3(t)$ . Diese drei Ströme in den räumlich versetzten Wicklungen  $a$ ,  $b$  und  $c$  können zu einem Stromzeiger  $\underline{I}$  zusammengefasst werden. Die Richtung dieses Stromzeigers ist identisch mit der des durch ihn hervorgerufenen Flussdichtevektors  $\underline{B}$ .

Ist der Stator symmetrisch aufgebaut und sind die drei Ströme sinusförmig und jeweils  $120^\circ$  versetzt, ergibt sich ein Stromzeiger konstanter Länge und mit der gleichen Frequenz wie die der einzelnen Ströme.

Die Statorwicklungen können wie in Abbildung 2.4 gezeigt sowohl im Stern als auch im Dreieck verschaltet sein. In beiden Fällen ergibt sich ein rotierendes Feld. Unterschiedlich ist aber die in der Wicklung umgesetzte Leistung, vergleiche Abschnitt 4.5. Die umgesetzte Leistung ist bei im Dreieck verschalteten Statorwicklungen größer.

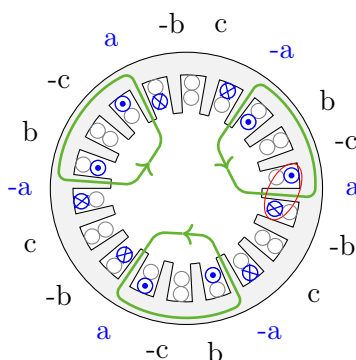
## 2.6 Einfluss der Polpaarzahl

Wenn eine Periode der drei sinusförmigen Ströme gemäß Gleichung 2.3 auf die Drehstromwicklung mit sechs Zähnen wie in Abbildung 2.3 aufgeschaltet wird, dreht sich der resultierende Stromzeiger  $\underline{i}$  nach (2.4) einmal um die Mittelachse der Maschine. Zeigte er vorher in Richtung des Strangs  $a$  tut er dieses auch nachher. Die Frequenz der Ströme  $\omega_i$  ist identisch mit der Umlauffrequenz des Stromzeigers  $\omega_S$  und der mechanischen Drehfrequenz  $\omega_{\text{mech}}$  des Motors.



**Abbildung 2.4:** Stern- und dreiecksförmige Verschaltung der Statorwicklung

Man kann Statoren auch mit dem Vielfachen von 6 Zähnen aufbauen. Die Vielfachheit ist die Polpaarzahl  $p$ . Man spricht von einer  $p$ -polpaarigen Wicklung. Die Reihenfolge der Pole bleibt gleich, wie in Abbildung 2.5 für die Polpaarzahl  $p = 3$  gezeigt.



**Abbildung 2.5:** Statorblech und Wicklungen bei einem dreipolpaarigen Stator; rot: die zu einem Zahn gehörige Wicklung; blau: die stromführenden Wicklungen, wenn lediglich Strang a bestromt wird; grün: der prinzipielle Verlauf der aus Strang a resultierenden Feldlinien

Wird an den Strang  $a$ , die blauen Wicklungen von Abbildung 2.5, ein Gleichstrom angeschlossen, dann ergeben sich aufgrund der Polpaarzahl von  $p = 3$  jeweils drei Nordpole und drei Südpole. Eine Periode der sinusförmigen Ströme führt zu einer Drehung von  $\frac{2\pi}{p}$  des Stromzeigers.

Weit verbreitet sind Maschinen mit einem, zwei, drei, vier oder fünf Polpaaren. Die Anzahl der Polpaare wird durch die Polpaarzahl  $p$  angegeben. Hierdurch wird das Ständereisen magnetisch gut ausgenutzt, und die Drehzahlen sind mechanisch gut beherrschbar bzw. benötigen nur noch eine geringe Getriebeübersetzung. Im Bereich der Direktantriebstechnik kann die Polpaarzahl auch deutlich höher liegen ( $p > 20$ ).

Für die Anwendung der Maschine sind letztendlich die mechanischen Ausgangsgrößen wie Rotorlage und Drehzahl von Bedeutung. Diese Größen sind die auf die Maschinenwelle bezogene *mechanische Größen* und werden bei Verwechslungsgefahr als solche bezeichnet. Insbesondere bei

der Drehzahl  $n$  ist immer die mechanische Drehzahl gemeint. Auch bei der Rotorlage  $\varepsilon$  handelt es sich als mechanische Ausgangsgröße um eine mechanische Größe.

Sie sind zu unterscheiden von den *elektrischen Größen*, die sich immer auf die Verhältnisse innerhalb einer Polteilung beziehen. Bei der Betrachtung von Vorgängen in der Maschine spielen die Speisefrequenz (Statorfrequenz)  $\omega_S$ , die Frequenz in den Rotorwicklungen  $\omega_R$  und die auf die Polteilung bezogene Lageinformation  $\varepsilon_{RS}$  eine Rolle. Die Zusammenhänge ergeben sich aus

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\text{elek}} = \varepsilon_{RS} &= p \cdot \varepsilon_{\text{mech}} \\ \omega_S &= p \cdot \omega_{\text{mech}}\end{aligned}$$

Die „mechanische Frequenz“  $\omega_{\text{mech}}$  spielt bei schwingungstechnischen oder regelungstechnischen Untersuchungen eine Rolle. Die Verwendung einer „elektrischen Drehzahl“  $n_{RS}$  oder  $n_{\text{elek}}$  ist dagegen völlig unüblich.

Beispiel:

Ist eine einpolpaarige Maschine an ein Drehstromnetz mit  $f_{\text{Netz}} = 50 \text{ Hz}$  angeschlossen, beträgt die Drehzahl des Spannungszeigers, des umlaufenden Feldes bzw. die Drehzahl eines synchron zum Feld mitdrehenden Rotors (der Synchrondrehzahl)

$$n = n_{\text{mech}} = 60 \frac{\text{s}}{\text{min}} \cdot f_{\text{Netz}} = 60 \frac{\text{s}}{\text{min}} \cdot 50 \text{ Hz} = 3000 \frac{\text{U}}{\text{min}}. \quad (2.5)$$

Bei einem dreipolpaarigen Stator beträgt die Synchrondrehzahl dagegen

$$n = n_{\text{mech}} = \frac{n_{RS}}{p} = 1000 \frac{\text{U}}{\text{min}} \quad (2.6)$$

## 2.7 Aufbau und Funktionsweise der Asynchronmaschine

Die Asynchronmaschine besticht durch ihren einfachen und kostengünstigen Aufbau. Sie kann direkt am Netz betrieben werden und braucht daher keine Steuerelektronik. Sie ist daher in der Größenordnung oberhalb von 1 kW der am meisten verbreitete Motortyp.

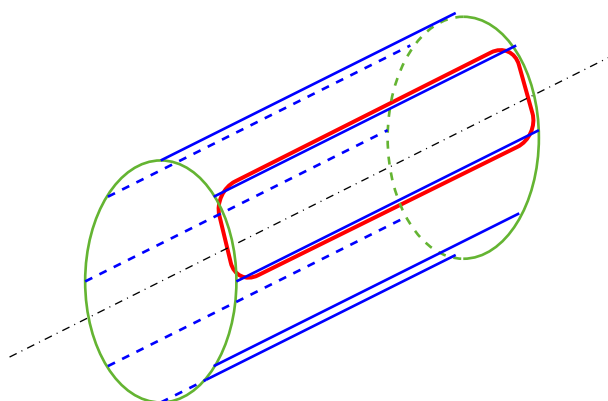
### 2.7.1 Rotoraufbau und Funktionsweise

Der Rotor besteht aus Stäben, die parallel zur Rotorachse entlang des Rotorumfanges verteilt sind. Die Enden sind durch einen Ring kurzgeschlossen<sup>3</sup>. Durch diesen Aufbau ergeben sich aus jeweils zwei benachbarten Stäben und den dazwischen liegenden Ringsegmenten „Maschen“, wie in Abbildung 2.6 in rot gekennzeichnet. Diese Anordnung wird auch als *Käfig*<sup>4</sup> bezeichnet. Durch die Drehstromwicklung des Stators wird ein Ständerfeld erzeugt, das diesen Käfig durchsetzt. Dieser Käfig ist in die Rotorbleche „eingebettet“. Diese Rotorbleche stabilisieren den mechanischen Aufbau. Außerdem wird der magnetische Widerstand des magnetischen Kreises (bestehend aus Ständereisen, Rotor und dem dazwischenliegenden Luftspalt) verringert, siehe auch Abschnitt 2.2.

Die Maschen des Käfigs werden vom Statorfeld durchsetzt. Wenn sich nun Rotor und Statorfeld mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten drehen, dann ändert sich aus Sicht der einzelnen Maschen das sie jeweils durchsetzende Statorfeld. Aus Sicht des Rotors besitzt dieses Feld die Frequenz  $\omega_R$ .

<sup>3</sup>Kurzschlussläufer ist eine alternative Bezeichnung für eine Asynchronmaschine

<sup>4</sup>Käfigläufer ist eine alternative Bezeichnung für eine Asynchronmaschine



**Abbildung 2.6:** Prinzipieller Aufbau des elektrisch leitenden Teils des Rotors einer Asynchronmaschine: Die in das Rotoreisen eingelassenen Stäbe (schwarz), die Ringe an den Stirnseiten (grün), in rot eine „Masche“

Dieses sich ändernde Magnetfeld induziert nach Gleichung 1.5 eine Spannung, die zu einem Stromfluss in der Masche und damit zu einem Feld durch die Masche führt. Der Strom in der Masche bzw. das durch diesen induzierte Feld besitzt aus Sicht des Rotors die Frequenz  $\omega_R$ . Dieses Feld besitzt eine zum Statorfeld orthogonale Komponente, was nach der einführenden Überlegung im Abschnitt 2.1 zu einer Drehmomentbildung führt.

Der Zusammenhang von Rotorgeschwindigkeit und den Drehfrequenzen von Rotor- und Statorfeldfrequenz lautet

$$\omega_R = \omega_S - \omega_{RS} \quad (2.7)$$

Diese Frequenz,  $\omega_R$ , wird als Schlupffrequenz bezeichnet, da sie die Abweichung der Rotorfrequenz  $\omega_{RS}$  von der Umlauffrequenz des Statorfelds  $\omega_S$  angibt. Sie wird meist auf die Statorfrequenz bezogen und dann als Schlupf  $s$  bezeichnet:

$$s = \frac{\omega_R}{\omega_S} = \frac{\omega_S - \omega_{RS}}{\omega_S} \quad (2.8)$$

Dreht der Rotor schneller als das Statorfeld ( $\omega_{RS} > \omega_S$ ), arbeitet die Maschine generatorisch, ansonsten motorisch. Sind beide gleich schnell ( $\omega_{RS} = \omega_S$ ), wird die Asynchronmaschine synchron betrieben, und Schlupf und das erzeugte Drehmoment sind gleich Null. Die Rotorwicklungen (die Maschen) liegen den Statorwicklungen gegenüber und beide sind über den magnetischen Kreis miteinander gekoppelt. Dieser Betriebsfall entspricht dem eines Transformators.

Die Rotorgeschwindigkeit liegt im motorischen Fall größenordnungsmäßig bei 1,2 % bis 10 % unterhalb der Umlaufgeschwindigkeit des Statorfelds, also bei einem Schlupf von  $s = 0,012..0,1$ , wobei ein niedriger Schlupf im Bemessungspunkt auf einen höheren Wirkungsgrad hindeutet.

Die Bemessungsleistung gibt die mechanisch zur Verfügung stehende Leistung an. Die elektrisch benötigte Leistung ist also im motorischen Betrieb um den Faktor  $1/\eta$  größer.

Da ein Motor prinzipiell induktiv arbeitet, muss ferner der Blindleistungsbedarf des Motors gedeckt werden. Der Anteil an Blindleistung wird über den Wirkfaktor

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (2.9)$$

angegeben.



Der Bedarf an elektrischer (Schein-)Leistung lässt sich durch

$$S_{\text{elektrisch}} = \frac{P_N}{\eta \cos \varphi} \quad (2.10)$$

abschätzen.

Prinzipiell ist es möglich, Asynchronmaschinen so zu bauen, dass die Rotorwicklungen nicht im Rotor kurzgeschlossen werden. Die Wicklungen werden dann über Schleifringe zum Klemmkasten geführt. Hierdurch kann der Rotorstrom und damit das Rotorfeld beeinflusst werden, und hierüber der Schlupf gestellt werden. Diese Maschinen werden als doppelt gespeiste Asynchronmaschinen bezeichnet. Zum Einsatz kommen sie beispielsweise bei Windkraftanlagen als Generator. So können die Statorwicklungen an das Stromnetz gekoppelt und gleichzeitig die Rotorgeschwindigkeit an den für die aerodynamische Wirkung optimalen Betriebspunkt gekoppelt werden.

### 2.7.2 Anschluss und Klemmkasten

Angeschlossen werden Asynchronmaschinen in der Regel über einen am Gehäuse montierten Klemmkasten, siehe Abbildung 2.7. Lediglich Maschinen im kleineren Leistungsbereich (Größenordnung  $< 1 \text{ kW}$ ) besitzen teilweise aus Platz- und Kostengründen einen Kabelschwanz. Um



**Abbildung 2.7:** Klemmkasten einer Asynchronmaschine; deutlich zu erkennen die Kontaktbrücke für die Klemmen  $U_2$ ,  $V_2$  und  $W_2$

eine Maschine sowohl im Stern als auch im Dreieck anschließen zu können, sind meist beide Wicklungsenden herausgeführt. Der erste Strang ist dann mit  $U_1$  und  $U_2$ , der zweite Strang mit  $V_1$  und  $V_2$ , der dritte überraschenderweise mit  $W_1$  und  $W_2$  bezeichnet. Manchmal gibt es Metallbrücken, um den Motor im Klemmkasten fest auf Stern- oder Dreieckschaltung verdrahten zu können.

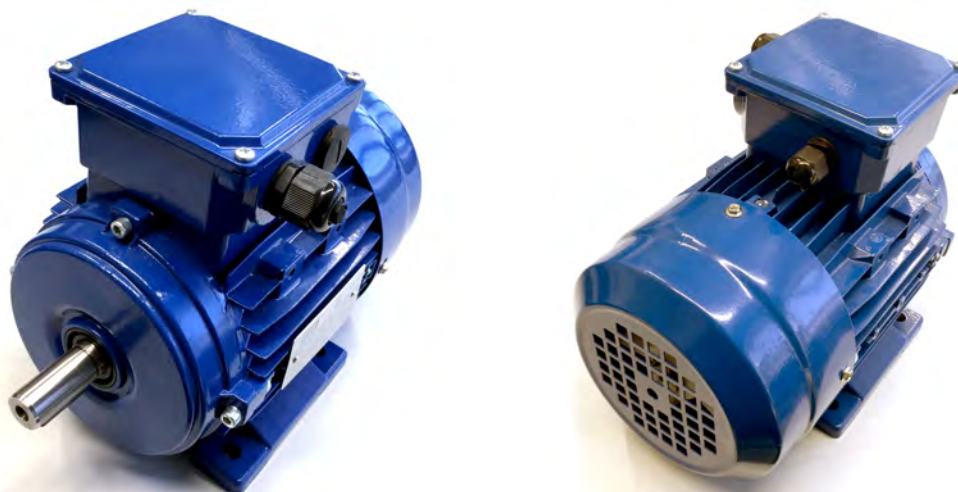
### 2.7.3 Gehäuse und Kühlung

Der weltweite Einsatz und Bedarf an Asynchronmotoren ist enorm. Daher ist es wirtschaftlich sinnvoll, Vorzugstypen bezüglich Gehäuseform, Achshöhe, Drehzahl, Leistung und weiterer Parameter, sogenannte Normmotoren, festzulegen. Hierdurch kann eine gewisse Austauschbarkeit

und Vergleichbarkeit realisieren werden.

Auch wenn der Wirkungsgrad von elektrischen Maschinen im Vergleich z.B. zu Verbrennungsmaschinen recht hoch ist, besteht trotzdem das Problem, die Verluste, die in Form von Wärme entstehen, abzuführen.

Das Gehäuse besteht meist aus Eisengrauguss, in die das Statorpaket eingepresst wurde. Häufig sind auf der Oberfläche Kühlrippen zu finden. Außerdem wird der Motor über ein auf der „Rückseite“, dem B-seitigen Wellenende, montiertes Lüfterrad zwangsbelüftet.



**Abbildung 2.8:** Asynchronmaschine für 0,37 kW, Länge ca. 30 cm; das rückseitige Lüfterrad befindet sich unter der Haube, die den Luftstrom auf die Kühlrippen lenkt.

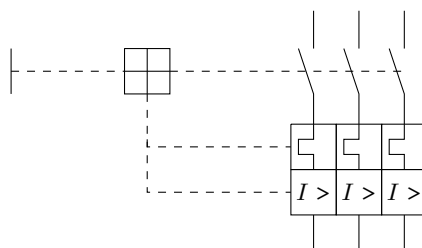
Elektrische Maschinen sind robust und dürfen kurzzeitig überlastet werden, wenn ihnen danach eine entsprechende „Regenerationszeit“ zugestanden wird. Die umgesetzte Leistung ergibt sich nach  $P = m\omega$ . Meist ist die angelegte Spannung und damit die Drehzahl konstant, lediglich das Lastmoment ändert sich. Wird nun das Lastmoment über das Bemessungsmoment erhöht, führt dies zu einem höheren Strombedarf und damit auch zu erhöhten Kupferverlusten.

Diese zusätzliche, nicht bemessene Wärmemenge kann nicht im vollen Umfang abgegeben werden, was kurzfristig kein Problem darstellt. Mittel- oder langfristig wird sich die Maschine aber auf unzulässig hohe Werte erwärmen und dadurch zerstört werden. Es gibt eine Reihe von typischen Lastprofilen, S1 - S10, die in Normen (z.B. EN 60034-1) festgelegt sind, und im Anhang in der Tabelle B.2 oder in der entsprechenden Literatur (z.B. [EMB05]) zu finden sind.

Ferner kann auch die Temperatur durch die in die Statorwicklungen mit eingewickelten Sensoren überwacht werden. Entweder es wird ein Temperatursensor im Stator oder drei Sensoren im Stator (ein Sensor pro Wicklungsstrang, in Reihe geschaltet) verbaut. Als Sensoren werden Kaltleiter (PTC-Widerstände) verwendet, die schaltend betrieben werden. Alternativ kommen die teureren, zur Wicklungstemperatur weitgehend linearen Temperatursensoren (KTY oder PT 100) zum Einsatz.

Motorschutzschalter trennen einen Motor vom Netz, wenn der weitere Betrieb am Netz den

Motor zerstören würde. Der Schalter reagiert entweder auf PTC-Widerstände im Motor, oder es erfolgt eine Strommessung im Motorschutzschalter, die bei einer dauerhaften Überschreitung des am Motorschutzschalter eingestellten Motorbemessungsstroms in einer der Phasen zum Abschalten führt.



**Abbildung 2.9:** Darstellung eines Motorschutzschalters im Schaltplan mit thermischer (obere Sensorreihe) und magnetischer (untere Sensorreihe, „ $I > I_{\max}$ “) Überstromauslösung sowie manuelle Auslösung (links)

Auf dem Typenschild sind die wichtigsten Daten der Maschine zusammengefasst. Hierzu gehören neben Hersteller und Herstellerbezeichnung des Motors auch die Bemessungsgrößen für Spannung (sowohl für Stern- als auch für Dreieckschaltung), Leistung, Drehzahl, Wirkfaktor und Strom sowie die Effizienzklasse, die Isolationsklasse und die Schutzklasse (siehe Anhang B.3).

#### 2.7.4 Leistungsdaten der Asynchronmaschine

Bei den Leistungsdaten, die sich auf dem Typenschild oder in den entsprechenden Datenblättern oder Katalogen finden, handelt es sich um die sogenannten Bemessungsdaten, also um die Daten, für die die Maschine ausgelegt, „bemessen“, ist. Die angegebene Leistung ist die Abgabeleistung für den motorischen Betrieb, also die Leistung, die mechanisch von der Motorwelle abgegeben wird, wenn die Bemessungsspannung anliegt, und der Bemessungsstrom fließt. Bei der Bemessungsspannung handelt es sich meist um 400 V.

Das bei uns übliche Niederspannungsnetz besitzt eine Nennspannung von 400 V. Aufgrund der typischen Toleranz von  $\pm 10\%$  liegt die Spannung zwischen 360 V und 440 V. Die Wärmeentwicklung wird vorwiegend durch den Strom durch die Wicklungswiderstände bestimmt,  $P_{\text{Verlust}} = R \cdot I^2$ . Die Leistung ist also vorwiegend durch den Strom und damit durch das Drehmoment bestimmt. Für die Bemessungsleistung  $P_N$  wäre bei reduzierter Spannung ( $U < U_N$ ) ein höherer Strom ( $I > I_N$ ) erforderlich, der aber aufgrund der dann erhöhten Verluste nicht möglich ist. Liegt die Netzspannung unterhalb der Bemessungsspannung des Motors steht daher nicht die Bemessungsleistung zur Verfügung.

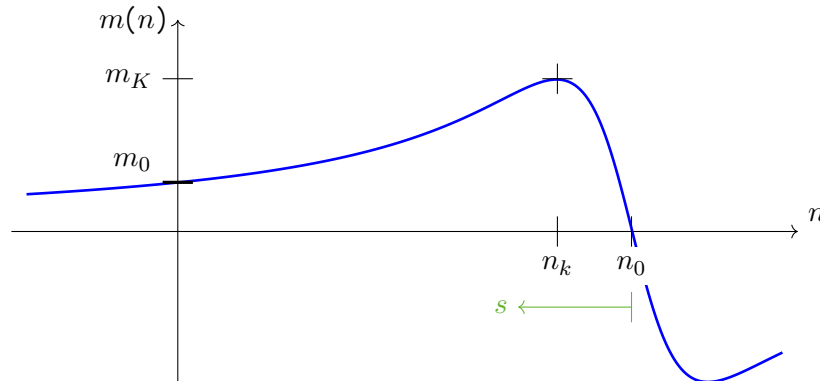
Die Leistungsdaten gelten i.d.R. bis Aufstellhöhen von 1000 m über NN und im Temperaturbereich von  $-15^\circ\text{C}$  bis  $40^\circ\text{C}$ . Oberhalb dieser Werte kann nicht mehr zuverlässig die entstehende Abwärme abgeführt werden, so dass der Motor nicht mehr voll belastet werden darf.

## 2.8 Betrieb der Asynchronmaschine am Netz

Asynchronmaschinen werden häufig direkt am Stromnetz betrieben. Dieses ist eine einfache und kostengünstige Lösung, wenn die Maschine lediglich in einem Arbeitspunkt möglichst nah am Bemessungspunkt betrieben wird.

### 2.8.1 Stationärer Betrieb der Asynchronmaschine am starren Netz

Für das Verhältnis von Drehgeschwindigkeit und Drehmoment existiert bei der Asynchronmaschine ein typisches Verhältnis, das in Abbildung 2.10 angegeben ist.



**Abbildung 2.10:** Prinzipieller Verlauf der Drehmomentkennlinie als Funktion der Drehzahl

Im Stillstand erzeugt die Maschine ein Drehmoment  $m_0$ . Mit zunehmender Drehzahl steigt das Drehmoment bis zu einem als **Kippmoment**  $m_k$  bezeichneten Wert. Danach fällt das Drehmoment, bis der Rotor die Drehzahl des Statorfelds erreicht. Dies ist die Leerlaufdrehzahl  $n_0$ , hier wird kein Drehmoment mehr erzeugt. Wird die Drehzahl über diese Leerlaufdrehzahl hinaus erhöht (z.B. durch ein extern angelegtes Drehmoment), geht der Antrieb in den generatorischen Betrieb über.

Dieser Zusammenhang kann formelmäßig durch die *Kloss'sche Formel*<sup>5</sup> approximiert werden:

$$m(s) = m_k \frac{2}{\frac{s}{s_k} - \frac{s_k}{s}} \quad (2.11)$$

Hierbei ist das Drehmoment nicht als Funktion der Drehzahl, sondern als Funktion des Schlupfs  $s$  angegeben. Der Schlupf beschreibt nach  $s = \frac{n_S - n_m}{n_S} = 1 - \frac{n}{n_S}$  den Zusammenhang der Drehzahl der Achse  $n_{\text{mech}}$  und der Drehzahl des Statorfelds  $n_S$ . Beide Drehzahlen sind von der Polpaarzahl abhängig, diese Abhängigkeit kürzt sich aber heraus und wird hier daher nicht weiter berücksichtigt. Die Darstellung des Drehmoments als Funktion des Schlupfs ist in Abbildung 2.11 angegeben. Letztendlich ist diese Darstellung bereits in Abbildung 2.10 enthalten, wenn man die grün eingezeichnete Abszisse wählt.

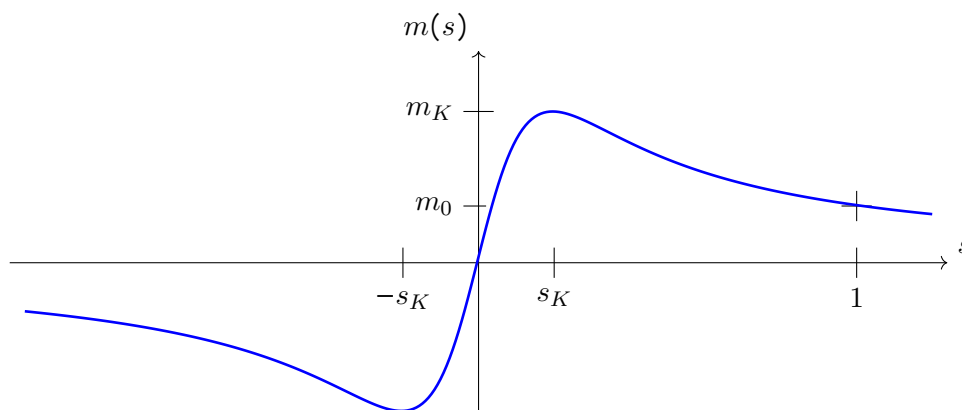
Was bedeutet nun das bestimmte Drehmoment für unsere Maschine? Wie bereits im Abschnitt 1.1.3 für die Gleichstrommaschine gezeigt, arbeitet unser Motor zunächst gegen das Lastmoment  $m_L$  an, das aus Reibung oder aus dem an die Maschine angekuppelten Prozess stammen kann. Die Differenz wirkt sich gemäß

$$m_M - m_L = J \frac{d\omega}{dt} \quad (2.12)$$

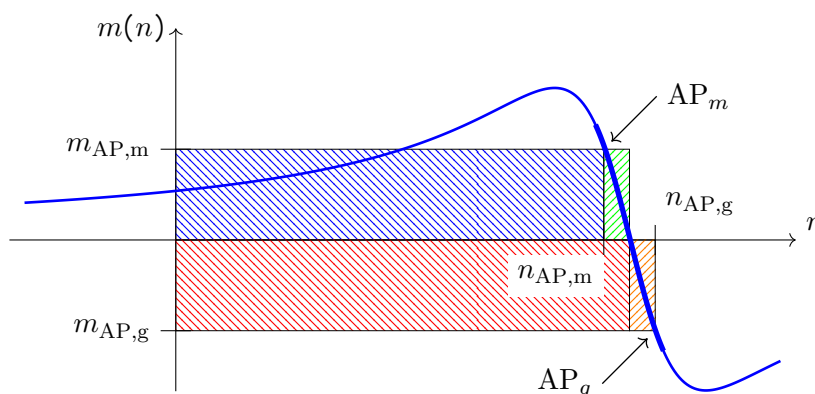
auf die Drehzahl aus, bis ein Gleichgewicht zwischen Antriebs- und Lastmoment hergestellt ist, und die Drehzahl konstant bleibt.

Aus der in Abbildung 2.12 angegebenen Kennlinie kann man die mechanisch umgesetzte Leistung und die Verlustleistung im aktuellen Arbeitspunkt ablesen:

<sup>5</sup>nach Max Kloss, 1873 - 1961



**Abbildung 2.11:** Prinzipieller Verlauf der Drehmomentkennlinie als Funktion des Schlupfs. Der Arbeitsbereich liegt zwischen  $-s_K$  und 0 im generatorischen und zwischen 0 und  $s_K$  im motorischen Betrieb



**Abbildung 2.12:** Umgesetzte Leistung im motorischen Betrieb (Arbeitspunkten  $AP_m$ , mechanische abgegebene Leistung (blau) und elektrische Verluste (grün)) und im generatorischer Betrieb (Arbeitspunkt  $AP_g$ , elektrisch abgegebene Leistung (rot) und elektrische Verluste (orange))

Hieraus folgt, dass der zu wählende Arbeitspunkt möglichst dicht bei der Synchron- bzw. Leerlaufdrehzahl  $n_0$ , also im annähernd linearen Bereich der Kennlinie liegt. Hier sind die elektrischen Verluste (Kupfer- und Ummagnetisierungsverluste) am geringsten. Dieser typische Bereich ist in Abbildung 2.12 durch eine größere Strichstärke der Drehmomentkennlinie gekennzeichnet.

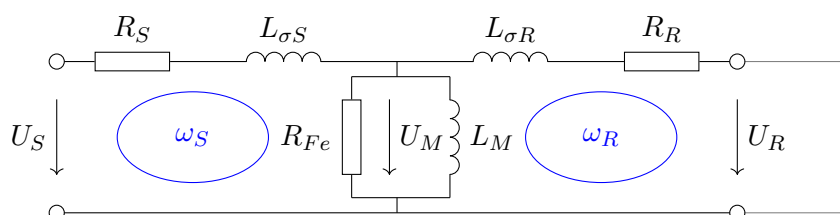
Hieraus ergibt sich die Frage, wie dieser typische Arbeitsbereich erreicht werden kann. Eine aus dem Stillstand anlaufende Maschine darf zu Beginn nicht zu stark belastet werden, damit die Maschine über die Kippdrehzahl hinaus beschleunigen kann.

Andererseits darf die Maschine im Arbeitspunkt nur mit Lastmomenten unterhalb des Kippmoments betrieben werden, da ansonsten die Maschine „abkippt“, also wieder in den Arbeitsbereich unterhalb der Kippdrehzahl  $n_k$  rutscht.

### 2.8.2 Ersatzschaltbild der Asynchronmaschine für den stationären Betrieb

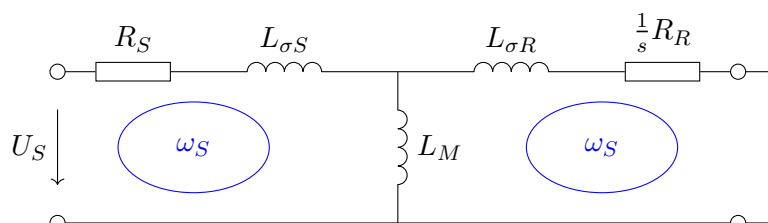
Die Statorwicklungen werden mit einer Spannung mit der Kreisfrequenz  $\omega_S$  gespeist. Hierdurch wird ein umlaufendes Statorfeld, eine Statorwelle, hervorgerufen, die sich mit der Kreisfrequenz  $\frac{\omega_S}{p}$  dreht.

Der Rotor dreht sich mit der Kreisfrequenz  $\omega_{RS}$ . Ein auf der Rotorwelle stehender Beobachter sieht das Feld des Rotors mit der Kreisfrequenz  $\omega_R$  rotieren. Diese Frequenz  $\omega_R$  wird als Rotorfrequenz bezeichnet. Sie ist nicht die Frequenz des Rotors, sondern beschreibt die Statorwelle aus Sicht des drehenden Rotors! Damit lässt sich ein Ersatzschaltbild für die Asynchronmaschine angeben, das in Abbildung 2.13 angegeben ist. Da die Eisenverluste bei einer belasteten Asyn-



**Abbildung 2.13:** Einsträngiges Ersatzschaltbild einer Asynchronmaschine; in grau der ange-deutete Kurzschlussläufer; in blau die in der jeweiligen Masche geltende Kreisfrequenz

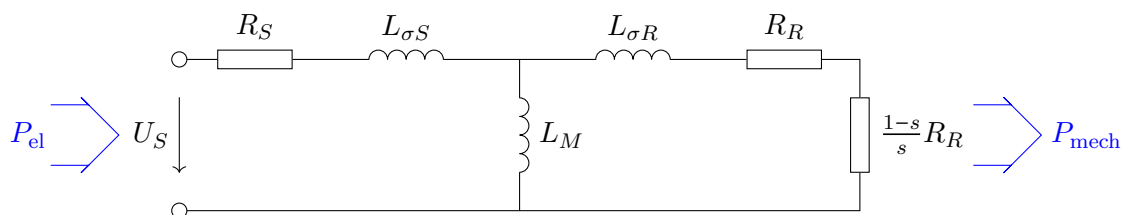
chronmaschine im Vergleich zu den Kupferverlusten verhältnismäßig klein sind, werden sie im Folgenden vernachlässigt. Außerdem ist die Sekundärspannung  $U_R = 0$ , da die Rotorwicklung kurzgeschlossen ist. Die rotorseitigen Größen lassen sich auf die Statorfrequenz umrechnen. Dies geschieht in gleicher Art und Weise wie in Abschnitt 3.4.1 bei der Umrechnung zwischen primär- und sekundärseitigen Größen bei Transformatoren. Damit ergibt sich das Ersatzschaltbild zu der in Abbildung 2.14 angegebenen Form mit einer einheitlichen Frequenz  $\omega_S$  im ganzen Modell.



**Abbildung 2.14:** Einsträngiges Ersatzschaltbild einer Asynchronmaschine, mit kurzgeschlosse-nem Rotor, die Rotorseite wurde auf die Statorseite transformiert; die Eisenverluste wurden hier vernachlässigt.

Wird der rotorseitige Widerstand entsprechend  $\frac{1}{s}R_R = R_R + \frac{1-s}{s}R_R$  wie in Abbildung 2.15 aufgeteilt, lassen sich die ohm'schen Verluste wie folgt interpretieren: Die elektrischen Verluste werden an den Widerständen  $R_S$  und  $R_R$  umgesetzt, die mechanische Leistungsabgabe erfolgt am Widerstand  $\frac{1-s}{s}R_R$ . In den Induktivitäten  $L$  wird die Energie in magnetischen Feldern zwi-schengespeichert.

Anhand des Ersatzschaltbildes aus Abbildung 2.15 kann man außerdem eine Ortskurve, den Stromfluss in der komplexen Ebene mit dem Spannungspfeil auf der realen Achse, angeben. Die-se Ortskurve ist kreisförmig und kann anhand von drei Versuchen (Leerlauf ( $s = 0$ ), Stillstand



**Abbildung 2.15:** Ersatzschaltbild einer Asynchronmaschine (Kurzschlussläufer)

( $s = 1$ ) und einer sehr schnell drehenden Maschine ( $s \gg 1$ ) bestimmt werden. Sie wird als Heylandkreis<sup>6</sup> (für  $R_S = 0$ ) oder als Ossannakreis<sup>7</sup> (für  $R_S \neq 0$ ) bezeichnet. Anhand dieser Kreise kann das Verhältnis von Schlupf, Leistung und Drehmoment graphisch bestimmt werden.

### 2.8.3 Einschaltverhalten von Asynchronmaschinen beim Betrieb am starren Netz

Ein prinzipielles Problem beim Betrieb einer Asynchronmaschine am Netz ist das **Anlaufverhalten**: Beim Einschalten muss die Maschine erst anlaufen, also eine Drehzahl nahe der Bemessungsdrehzahl erreichen. Solange diese Betriebsdrehzahl noch nicht erreicht ist, ist die induzierte Gegenspannung geringer. Damit fällt die (um die noch geringe Gegenspannung reduzierte) Netzspannung am Innenwiderstand der Statorwicklung  $R_S$  und der Streuinduktivität  $L_{\sigma S}$  ab. Als Folge fließt ein recht hoher Strom, der sowohl die Maschine beschädigen als auch durch Netzurückwirkungen das Versorgungsnetz stören kann.

Es gibt eine Reihe von Möglichkeiten, diese hohen Anlaufströme zu reduzieren:

#### Direktes Zuschalten an das starre Netz

Beim direkten Zuschalten einer Drehstrommaschine an das starre Stromnetz fließen entsprechend hohe Einschaltströme (Stoßströme). Diese stören das Netz, daher ist das Zuschalten von leistungsstarken Maschinen<sup>8</sup> durch die elektrischen Energieversorgungsunternehmen (EVU) begrenzt.

Neben der thermischen Belastung wird die Mechanik des Motors durch die kurzfristig auftretenden elektromechanischen Kräfte beansprucht. Ferner sind teilweise die Isolationsschichten der Wicklungen nicht auf häufiges Zuschalten an das starre Netz ausgelegt, so dass durch häufiges Anlassen die Lebensdauer deutlich reduziert wird.

#### Sanftanlauf über NTC

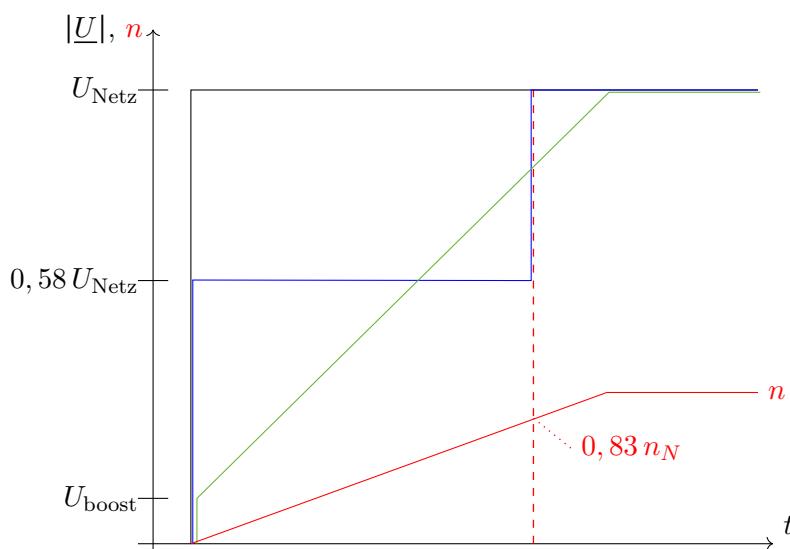
Die Motorphasen werden über einen in Reihe geschalteten NTC<sup>9</sup>-Widerstand angeschlossen: Beim Einschalten ist der NTC-Widerstand noch kalt (Raumtemperatur) und der Widerstand entsprechend hoch. Durch diesen Widerstand wird der Stromfluss begrenzt. Läuft der Motor eine Weile, erwärmt sich der NTC und der Widerstandswert sinkt. Dadurch sinkt der Spannungsabfall am NTC und die Klemmspannung am Motor steigt.

<sup>6</sup>nach Alexander Heinrich Heyland, von ihm angegeben im Jahr 1894

<sup>7</sup>nach Johann Ossanna, von ihm angegeben im Jahr 1899

<sup>8</sup>Das Zuschalten ist ab einer Wellenleistung von 4 kW meist nicht mehr zulässig

<sup>9</sup>NTC: negativer Temperaturkoeffizient, ein Heißleiter, der Widerstandswert sinkt bei Erwärmung



**Abbildung 2.16:** Klemmspannung der Statorwicklungen bei verschiedenen Anlaufverhalten: direktes Zuschalten an das starre Netz (schwarz), mittels Stern-Dreieck-Umschaltung (blau), über  $U/f$ -Kennlinie oder mittels Softstarter (grün) sowie die Drehzahl (rot) und die hieraus abgeleitete Umschaltgrenze (rot gestrichelt) für die Stern-Dreieck-Umschaltung

Diese Methode kommt ohne weitere Elektronik aus. Sie kommt aber bei neuen Anlagen nur noch selten zum Einsatz, unter anderem da der Wiederanlauf bei heißem NTC nicht wirkungsvoll unterstützt wird.

### Elektronische Sanftanlaufgeräte

Elektronische Sanftanlaufgeräte bestehen im Grunde aus Phasenanschnittsteuerungen in den einzelnen Phasen. Die Klemmspannung, die eigentlich sinusförmig verläuft, wird zu Beginn einer Halbwelle für eine Weile zu Null gesetzt, die „Phase wird angeschnitten“. Dadurch wird, über eine Halbwelle gemittelt, die Klemmspannung reduziert. Auch der Strom, der ja eine Reaktion auf die Spannung darstellt, wird so reduziert.

Die Spannung wird dabei, ausgehend von einer Boostspannung  $U_{\text{boost}}$ , siehe Abbildung 2.16), kontinuierlich bis zum vollständigen Einschalten zeitgesteuert erhöht. Um Verluste zu minimieren kann nach dem Anlauf die Phasenanschnittsteuerung durch einen zusätzlichen Schalter überbrückt werden.

### Stern-Dreieck-Umschaltung

Bei der Sternschaltung ist der Widerstand zwischen zwei Phasen größer als bei der Dreieckschaltung. Wird also der gleiche Motor im Stern betrieben, kann nicht die volle Leistung umgesetzt werden. Dafür ist er unempfindlicher gegenüber der Eingangsspannung bei niedrigen Drehzahlen. Bei der Dreieckschaltung dagegen ist der Widerstand geringer, dafür kann beim Bemessungsstrom die Bemessungsleistung umgesetzt werden.

Die Idee ist, den Antrieb bei niedrigen Drehzahlen im Stern, bei höheren Drehzahlen dagegen in Dreieck zu beschalten. Die Umschaltung erfolgt meist zeitgesteuert. Die Zeit wird hierbei so gewählt, dass die Drehzahl beim Umschalten bereits 70 % bis 85 % der Bemessungsdrehzahl



erreicht hat, da eine zu hohe „Nach-“beschleunigung ebenfalls hohe Ströme bedingt.

### Alternative zum Betrieb am starren Netz

Alle Methoden haben auch immer eine Leistungs- bzw. Drehmomentreduzierung beim Anlauf. Aufgrund des reduzierten Spannungszeigers steht ein geringeres Antriebsmoment als das Stillstandsmoment  $m_0$  (siehe Abbildungen 2.10 und 2.11) zur Verfügung. Sie sind daher gut für Aufgaben mit geringem Lastmoment bei niedriger Drehzahl geeignet, wie dieses für Antriebe von Lüftern, Pumpen, Förderbändern oder Werkzeugmaschinen typisch ist.

Wird bereits beim Einschalten das volle Drehmoment gefordert, verbleibt der geregelte Betrieb über einen Frequenzumrichter oder einen Servoregler. Hierdurch kann im Betrieb Frequenz und Amplitude des Ständerspannungszeigers geändert werden. Wird die Statorfrequenz geändert, dann wird auch die Drehzahlachse der Drehmomentkennlinie (Abbildung 2.10) gedehnt oder gestaucht. Die Maschine kann also auch bei anderen Drehzahlen als der Bemessungsdrehzahl für eine Nennfrequenz für 50 Hz mit einem Minimum an Verlusten betrieben werden.

Im Zusammenspiel mit Frequenzumrichtern kann also sowohl der Anlauf bei einem hohen Lastmoment erreicht als auch der Betrieb in einem beliebigen Arbeitspunkt mit einem Minimum an Verlusten betrieben werden. Außerdem können Asynchronmaschinen vergleichbar mit Synchronmaschinen als Servoantrieb verwendet werden, siehe Abschnitt 2.11. Sie steht dort allerdings nicht in unmittelbarer Konkurrenz zur Synchronmaschine. Asynchronmaschinen kommen im oberen Leistungsbereich von Servoantrieben zum Einsatz, insbesondere wenn die Anforderung an die Dynamik nicht allzu hoch ist und aus regelungstechnischer Sicht<sup>10</sup> das größere Massenträgheitsmoment des Rotors  $J_{\text{Rotor}}$  von Vorteil ist.

#### 2.8.4 Drehrichtungsumkehr von Asynchronmotoren beim Betrieb am starren Netz

Wird eine Maschine phasenrichtig ans Stromnetz angeschlossen ( $L_1$  an  $U$ ,  $L_2$  an  $V$  und  $L_3$  an  $W$ ), dreht der Motor in positive Richtung, d.h. beim Blick von vorne auf die Antriebswelle gegen den Uhrzeigersinn.

Um den Motor rückwärts, also in negative Richtung, laufen zu lassen, ist es erforderlich, den Stromzeiger in entgegengesetzte Richtung rotieren zu lassen. Dies kann durch die Vertauschung zweier Anschlüsse erreicht werden. Wird die Phasenfolge zyklisch verschoben, ändert sich nicht die Drehrichtung, sondern es ergibt sich lediglich eine Phasenverschiebung.

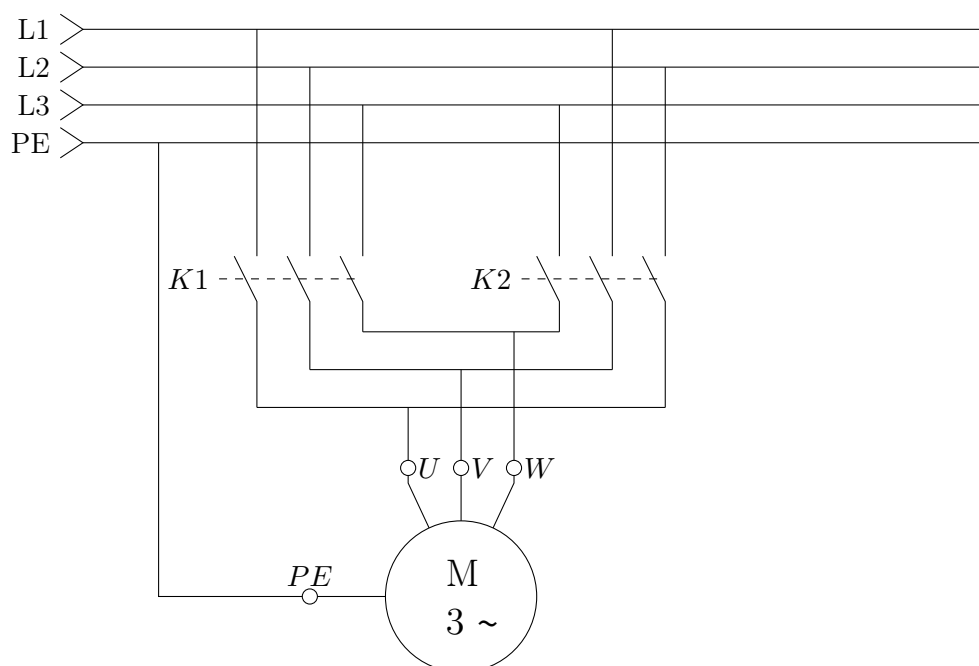
Die Umschaltung kann durch zwei Schütze erfolgen, die den Motor zuerst von Netz trennen und dann mit geänderter Phasenfolge wieder zuschalten. Wichtig ist, dass beide Schalter gegeneinander verriegelt sind, also dass kein Kurzschluss entstehen kann, weil gerade beide Schalter eingeschaltet sind. Der Schaltplan ist in Abbildung 2.17 angegeben.

Elektronische Schalter (meist Thyristoren) schalten gut unter Last, bedingen aber (geringe) Verluste. Elektromechanische Schalter (Schütze) verschleifen beim Schalten unter Last, besitzen aber einen guten Wirkungsgrad. Daher bietet es sich an, jeweils einen elektromechanischen Schalter und einen elektronischen Schalter so zu kombinieren, dass das Schalten (verschleißarm) durch einen elektronischen Schalter vorgenommen wird und danach der Stromfluss (verlustarm) durch den elektromechanischen Schalter erfolgt.

Es gibt gerade für „kleinere“ Ströme fertige Geräte wie in Abbildung 2.18, die eine Drehrichtungsumkehr realisieren.

---

<sup>10</sup>Anwendungen mit einem hohen Massenträgheitsmoment  $J_{\text{Last}}$



**Abbildung 2.17:** Wendeschützschtaltung für die Drehrichtungsumkehr am Drehstrommotor, Ansteuerung der Schalter K1: Linkslauf (L1-U, L2-V, L3-W), Ansteuerung der Schalter K2: Rechtslauf (L1-V, L2-U, L3-W)



**Abbildung 2.18:** Gerät zum direkten Schalten (Zuschalten und Trennen vom Netz) von Asynchronmotoren mit Drehrichtungswahl bzw. Drehrichtungsumkehr und Motorschutzfunktion zur Montage auf einer Hutschiene [Pho20]

### 2.8.5 Gesteuerter Betrieb der Asynchronmaschine

Mit Hilfe eines Frequenzumrichters kann eine Asynchronmaschine gesteuert betrieben werden. Der Frequenzumrichter stellt im Regelungstakt (im kHz-Bereich) einen beliebigen Statorspannungszeiger. Dadurch kann ein in Amplitude und Frequenz variabler Drehstrom erzeugt werden. Die Kennlinie aus Abbildung 2.10 wird dadurch bei kleineren Frequenzen gestaucht und bei grö-

keren Frequenzen gedehnt.

Mit einem variablen Spannungszeiger wird es so möglich, die Asynchronmaschinen mit niedrigem Schlupf bei beliebiger Drehzahlen zu betreiben. Durch einen Frequenzumrichter ist es daher möglich, trotz unterschiedlicher Arbeitspunkte die Maschine mit möglichst geringen Verlusten zu betreiben.

Im gesteuerten Betrieb  $U/f$ -Betrieb werden Amplitude und Frequenz des Spannungszeigers so geändert, dass das Verhältnis  $U/f$  prinzipiell konstant bleibt. Zur Kompensation von Verlusten wird der Spannungszeiger zusätzlich um eine *Boost*-Spannung verlängert. Dieser Betrieb ist zum Anlaufen lassen von Asynchronmaschinen gut geeignet. Über eine Rampe wird zeitgesteuert sowohl die Drehfrequenz als auch die Zeigerlänge erhöht, so dass das Anlaufverhalten dem des Sanftanlaufgeräts ähnelt. Im Kapitel 5.10.1 wird auf den Aufbau und den Leistungsumfang von Frequenzumrichtern weiterführend eingegangen.

## 2.9 Aufbau und Funktionsweise der Synchronmaschine

Bei Synchronmaschinen dreht sich der Rotor synchron zum Ständerfeld mit. Aufgrund der in weiten Bereichen linearen Verhältnisse lässt sie sich gut regeln. Verluste entstehen fast ausschließlich als Reibverluste in den Lagern, als Kupferverluste und als Ummagnetisierungsverluste. Daher besitzt sie im Vergleich zur Asynchronmaschine einen sehr hohen Wirkungsgrad und eine hohe Leistungsdichte. Hieraus ergeben sich die typischen Einsatzbereiche von Synchronmaschinen als Servoantrieb und als Synchrongenerator.

Die Maschine ähnelt einer Gleichstrommaschine, bei der Stator und Rotor vertauscht wurden. Die gute Regelbarkeit des Gleichstrommotors ergibt sich aus einem nahezu linearen Zusammenhang von Strom und Drehmoment. Dieser Zusammenhang gilt daher auch bei der Synchronmaschine. Der wesentliche Unterschied von Gleichstrommaschine und Synchronmaschine ist, dass der mechanisch arbeitende Kommutator bei der Gleichstrommaschine durch einen elektronisch arbeitenden Kommutator im Wechselrichter, der im Abschnitt 5.8 behandelt wird, ersetzt wird. Der Arbeitsbereich, in Abbildung 2.21 links<sup>11</sup>, ist daher mit dem Arbeitsbereich der Gleichstrommaschine aus Abbildung 1.10 vergleichbar. Das Drehmoment wird durch den maximal zulässigen Strom begrenzt, wobei das Stillstandsmoment  $m_0$  aufgrund des fehlenden Wärmeeintrags durch Reibung in den Lagern leicht gegenüber dem Bemessungsdrehmoment  $m_N$  erhöht ist. Die maximale Drehzahl ist durch die zulässige bzw. die verfügbare Spannung begrenzt.

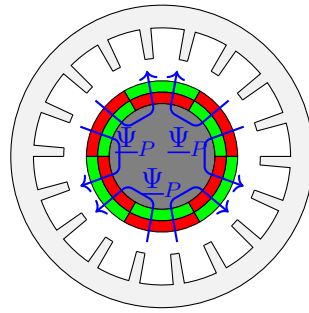
Das Rotorfeld der Synchronmaschine wird durch einen oder mehrere Magnete gebildet. Bei größeren Maschinen sind dieses meist Elektromagnete. Diese Magnete werden durch das Statorfeld angestoßen oder angezogen, vergleiche Abbildung 2.1. Der Rotor wird durch das Ständerfeld „mitgenommen“.

Im sogenannten „Federmodell“ kann man sich das Polrad und das Statorfeld über eine Feder verbunden vorstellen. Zwischen diesen beiden Richtungen liegt der Lastwinkel  $\vartheta$ .

Liegen das Stator- und das Rotorfeld parallel zueinander, wird kein Drehmoment übertragen. Für den Winkel gilt  $\vartheta = 0$ , die Feder ist entspannt.

Stehen das Stator- und das Rotorfeld orthogonal zueinander, wird das maximale Drehmoment übertragen. Für den Winkel gilt  $\vartheta = \frac{\pi}{2}$  oder  $\vartheta = -\frac{\pi}{2}$ , die Feder ist maximal gespannt.

<sup>11</sup>Die Abhängigkeit des Spannungsabfalls am Statorwiderstand ist meist sehr klein und wurde daher hier vernachlässigt.



**Abbildung 2.19:** Prinzipieller Aufbau einer dreipolpaarigen permanentenerregten Synchronmaschine (PSM) mit Vollpolverhalten. Die Magneten sind entlang des Rotorumfangs aufgeklebt und haben einen Rückschluss über das Rotorjoch. Es gibt bei drei Polpaaren und sechs Zähnen pro Polpaar, damit insgesamt 18 Zähne entlang des Umfangs.

Gilt  $\vartheta < 0$ , dann arbeitet die Maschine motorisch, im Fall  $\vartheta > 0$  generatorisch. Der Zusammenhang von Winkel und Drehmoment ist auch in Abbildung 2.21 (rechts) skizziert.

Im motorischen Betrieb liegt der Winkel also zwischen 0 und  $-\frac{\pi}{2}$ . Wird das Lastmoment erhöht, verschiebt sich der Arbeitspunkt in Abbildung 2.21 (rechts) in Richtung  $-\frac{\pi}{2}$ . Dadurch erhöht sich das Antriebsmoment der Maschine, und zwar so lang, bis Antriebs- und Lastmoment sich gegenseitig aufheben. Sinkt die Last, verschiebt sich der Arbeitspunkt in Richtung  $\vartheta = 0$  und das Antriebsmoment wird kleiner.

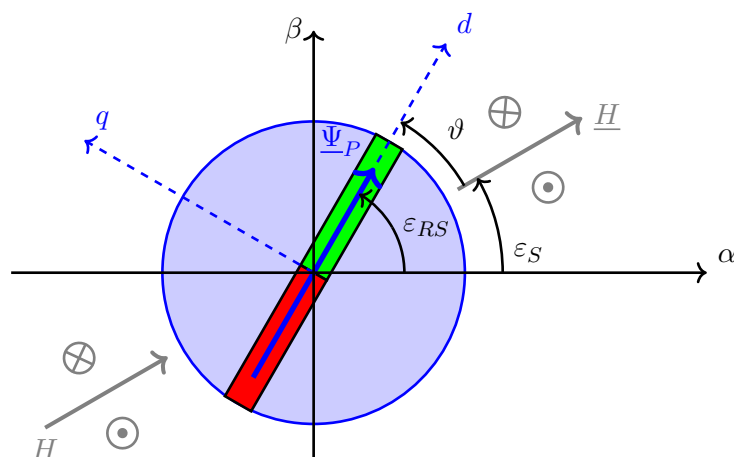
Es handelt sich um ein stabiles System bzw. um eine Selbstregulation, die so lange funktioniert, wie das Lastmoment kleiner als das maximal mögliche Antriebsmoment  $m_{\max}$  ist. Wird das Lastmoment aber über das maximale Maschinenmoment  $m_{\max}$  hinaus erhöht ergibt sich ein Lastwinkel unterhalb von  $-\frac{\pi}{2}$  bzw. oberhalb  $\frac{\pi}{2}$ . Das erzeugte Gegenmoment sinkt und die Synchronmaschine gerät außer Tritt. Dann erzeugt das Maschinendrehmoment nur noch ein Zittern mit der Statorfrequenz  $\omega_S$  um die Drehzahl herum, die durch die Last vorgegeben wird. Im Federmodell entspricht dies einer gebrochenen Feder.

Es gibt also zwei Möglichkeiten für den Betrieb einer Synchronmaschine. Das resultierende Drehmoment ergibt sich aus der Rotorflussverkettung  $\underline{\Psi}_P$  und dem orthogonal hierzu stehenden Magnetfeld  $\underline{B}$ . Das Drehmoment kann nun auf zwei Arten variiert werden:

- Durch Verändern des Lastwinkels  $\vartheta$  bei konstanter Zeigerlänge  $|\underline{I}_S|$  reduziert sich die drehmomentbildende Komponente des Stromzeigers.
- Durch Verändern der Länge des Stromzeigers, der orthogonal zur Rotorflussverkettung geregelt wird. Hierfür ist eine aktive Regelung erforderlich.

Daraus folgen die beiden typischen Betriebsfälle der Synchronmaschine, die in Abbildung 2.21 (rechts) markiert sind:

- als selbstregulierender Synchrongenerator in Großkraftwerken am starren Stromnetz
- als geregelter Antrieb für hochdynamische Anwendungen



**Abbildung 2.20:** Koordinaten und Winkel bei der permanenten Synchronmaschine, in blau der Rotor mit dem auf diesen festliegenden Koordinatensystem  $(d,q)$ , der gegenüber dem Statorkoordinatensystem  $(\alpha,\beta)$  um  $\varepsilon_{RS}$  gedreht ist, in grau zwei Statorwicklungen, die durch den Statorstromzeiger  $\underline{I}_S$  das Statorfeld  $\underline{H}$  erzeugen, das gegenüber dem Statorkoordinatensystem um  $\varepsilon_S$  gedreht ist. Der Lastwinkel  $\vartheta$  weist vom Ständerfeld zum Rotorfeld und ist wie hier im generatorischen Betrieb positiv.

## 2.10 Betrieb von Synchronmaschinen am starren Stromnetz

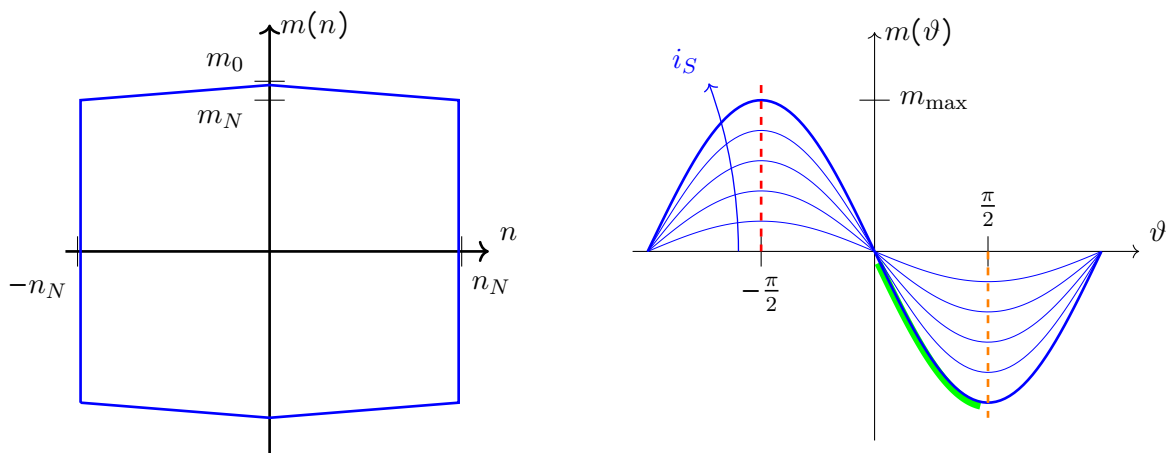
Als **Fremderregte Synchronmaschine** (SM) wird die Maschine auch aufgrund ihres guten Wirkungsgrads als Synchrongenerator in der Energiewirtschaft eingesetzt. Der Leistungsbereich reicht bis in den GW-Bereich. Diese Maschinen sind meist starr an das Drehstromnetz gekoppelt. Damit ist auch die Drehzahl des Synchrongenerators prinzipbedingt an die Drehzahl des Stromnetzes gekoppelt.

Aufwändig ist das Zuschalten eines Synchrongenerators an ein starres Stromnetz. Wird die Maschine einfach nur zugeschaltet, bleibt sie zitternd stehen, da sie nicht schnell genug auf die Netzfrequenz beschleunigen kann. Abhilfe schafft beispielsweise ein angekuppelter Hilfsmotor, der die Maschine im Leerlauf auf die Synchrohdrehzahl  $n_0$  beschleunigt und erst dann die laufende Maschine angekuppelt wird. Dieses ist eine recht aufwändige Technik, die daher lediglich bei „großen“ Synchrongeneratoren in Kraftwerken zum Einsatz kommt.

## 2.11 Geregelter Betrieb von Synchronmaschinen

Als **Permanentenerregte Synchronmaschine** (PSM) ist die Synchronmaschine aufgrund ihrer guten Regelbarkeit die typische Lösung für dynamische Antriebsregelungen in der Automatisierungstechnik. Die meisten Anwendungen liegen im Bereich deutlich unter 100 kW, als Traktionsantrieb für Elektro kraftfahrzeuge aber auch höher.

Permanentenerregte Synchronmaschinen können sehr dynamisch geregelt werden, ihre Hauptanwendung ist die Bewegung mit sehr hohen Anforderungen an die Dynamik oder die Genauigkeit, wie beispielsweise für Werkzeugmaschinen. Die Regelung der Synchronmaschine übernimmt der Servoregler, der eine externe Sollwertvorgabe an der Rotorachse umsetzt.



**Abbildung 2.21:** links: Arbeitsbereich der Synchronmaschine. Er wird vorwiegend durch den zulässigen Strom ( $I_S \sim m$ ) und die verfügbare Spannung ( $U_S \sim n$ ) begrenzt. rechts: Drehmoment-Lastwinkel-Kennlinie der Synchronmaschine. Im geregelten Fall wird der Winkel  $\vartheta$  auf  $\frac{\pi}{2}$  geregelt und die Zeigerlänge von  $I_S$  variiert, wodurch die Kurve wie eingezeichnet verstärkt wird. Der jeweilige Arbeitspunkt liegt dann auf der roten (motorisch) oder orangefarbenen (generatorisch) Linie, wobei ein negativer Strom in Richtung  $\frac{\pi}{2}$  einem positiven Strom in Richtung  $\frac{\pi}{2}$  entspricht. Im gesteuerten Fall bleibt die Zeigerlänge konstant bei  $I_{S,N}$  und der Arbeitspunkt liegt bei Generatoren im grünen Bereich.

Der Rotor ist im Verhältnis zur Asynchronmaschine verhältnismäßig leicht, so dass das Massenträgheitsmoment  $J_{\text{Rotor}}$  gering und damit die erreichbare Beschleunigung  $\alpha$  hoch ist. Andererseits wird durch ein geringeres Massenträgheitsmoment des Rotors die hochdynamische Regelung des Antriebs aber auch schwieriger (vgl. Abschnitt 2.12).

### 2.11.1 Aufbau des Servoreglers

Ein Servoregler besteht aus zwei Teilen, einem *Steuerteil* und einem *Leistungsteil*. Das **Leistungsteil** wird im Rahmen der Stromrichter im Abschnitt 5.10.2 behandelt. Als Schnittstelle zwischen diesen wird meist die Ansteuerung der Ventile gewählt. Beide Teile werden aus EMV-Gründen getrennt aufgebaut, teilweise auch auf unterschiedlichen Platinen.

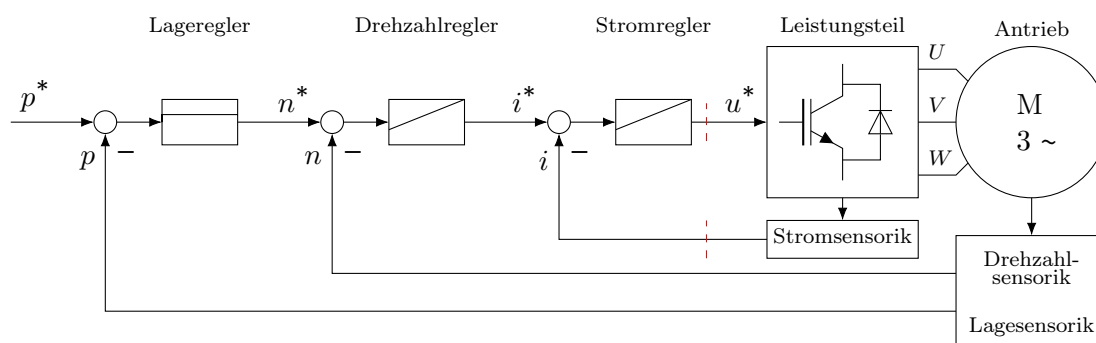
Das **Steuerteil** bildet die *Intelligenz* des Reglers. Hier werden die Sollwerte (typisch Lage, Drehzahl oder Drehmoment) für den Antrieb in ein entsprechendes Bewegungsprofil umgesetzt, und der Motor entsprechend dieses Profils geregelt. Bei Bedarf können die Sollwerte über ein geeignetes Bussystem (heutzutage meist ethernetbasiert) im Regelungsstakt (typisch: 2 kHz bis 20 kHz) vorgegeben werden. Hinzu kommen weitere mehr oder weniger frei programmierbare digitale und analoge Ein- und Ausgänge zur Auswertung von Schalten, zur Ansteuerung oder für Sicherheitsfunktionen.

### 2.11.2 Regelungsstrategie für Synchronmaschinen

Der Stromzeiger wird durch den Servoregler im Regelungsstakt orthogonal zum Magnetfeld des Rotors gestellt. Der Betriebspunkt liegt also immer auf der roten bzw. orangefarbenen Linie in Abbildung 2.21 (rechts).

Hierfür ist ein Lagesensor (Geber) erforderlich, der dem Servoregler die aktuelle Lage des Polrads mitteilt. Mit dieser Rotorlage, dem Winkel  $\varepsilon_{RS}$ , werden Messwerte und Sollwerte zwischen den Bezugssystemen „Stator“ und „Rotor“ umgerechnet. Dies geschieht im Regelungstakt. Aus praktischen Gründen wird mit zwei verschiedenen Koordinatensystemen gearbeitet, von denen eines am Stator, eines am Rotorfeld orientiert ist. Man spricht daher auch von einer **Feldorientierten Regelung**. Erst durch diese nichtlineare Koordinatentransformation wird das Verhältnis von Strom und Drehmoment linear.

Der Servoregler erhält die Sollwerte für den Motor von einer übergeordneten Steuerung. Dies können die Zielposition, die Solldrehzahl oder das Solldrehmoment sein. Der Servoregler berechnet daraufhin das Lage- und Drehzahlprofil. Die Sollwerte können aber auch laufend, im Regelungstakt, neu vorgegeben werden. Damit ist es auch möglich, dass Achsen bestimmte Lage-, Drehzahl- oder Drehmomentprofile abfahren oder sich in Relation zu anderen Achsen bewegen. In jedem Regelungstakt werden also die aktuellen Sollwerte aufgenommen, die Istwerte werden ausgelesen und die Werte werden gegebenenfalls zwischen den Koordinatensystemen umgerechnet. Unter Berücksichtigung von Begrenzungen und Sicherheitsfunktionen werden aus diesen Werten die Sollwerte der jeweils unterlagerten Regelkreise berechnet. Diese kaskadierte Regelung ist in Abbildung 2.22 in vereinfachter Form skizziert.



**Abbildung 2.22:** Wirkungsplandarstellung einer kaskadierten Struktur einer Motorregelung, von außen nach innen: Lage, Drehzahl, Stromregelkreis; an den roten Linien erfolgt die Umrechnung zwischen Stator- und Rotorbezugssystem

Letztendlich werden die Spannungssollwerte als pulswidenmoduliertes Signal an den leistungselektronischen Aufbau des Servoreglers übergeben, der dann im Abschnitt beschrieben wird. Die für eine derartige Regelung erforderlichen Stromsensoren sind fest im Gerät verbaut. Für weiteren Sensoren steht i.d.R. ein weitgefächertes Portofolio an Schnittstellen zur Verfügung.

### 2.11.3 Aufbau der Synchronmaschinen für Servoanwendungen

Das Gehäuse von permanenten Synchronmaschinen ist meist ein Aluminium-Strangpressprofil, in das die Ständerbleche mit den Statorwicklungen eingepresst werden. Die Montage des Motors erfolgt über das Lagerschild an der Vorderseite, dem „A-seitigen“ Lagerschild.

Auf der Rückseite des Motors, dem „B-seitigen“ Wellenende, ist der Lagegeber montiert, manchmal auch eine Haltebremse<sup>12</sup>. Beides ist fest eingehaust und von außen nicht zugänglich.

<sup>12</sup>Diese Bremsen sind nur zum Festhalten einer stillstehenden Achse und nicht zum Abbremsen geeignet.



**Abbildung 2.23:** Synchronmaschine für 27 Nm und 3000 U/min, Länge ca. 40 cm, der rückseitige Deckel wurde abgenommen, damit der Geber sichtbar ist.

Der elektrische Anschluss erfolgt meist über zwei Anschlüsse, einen für den Anschluss der Drehstromwicklungen (Klemmkasten oder ein steckbarer Kontakt mit den drei Phasen, Schutzleiteranschluss und ggf. noch der Sensorleitung der Temperatursensoren) und einen weiteren, meist steckbare Kupplung für den Drehgeberanschluss.

Die Kühlung erfolgt sowohl über den maschinenseitigen Flansch und über Konvektion, daher sind diese Maschinen meist dunkel lackiert.

## 2.12 Direktantriebe

Direktantriebe sind Antriebe, die **direkt** an die Last gekoppelt werden. Eine kraftübertragende Mechanik wie Getriebe, Riemen, Wellen, Linearachsen mit Zahnriemen- oder Kugelgewindetrieb, Ketten oder Seile entfällt dadurch. Dadurch entfallen insbesondere die Reibung und die Lose in den Getrieben.

Meist werden Direktantriebe als lagegeregelt Positionierantriebe verwendet, die sehr dynamische Bewegungen realisieren sollen. Hierfür ist neben einem hohen Drehmoment bzw. einer hohen Kraft eine Systemsteifigkeit der Anlage erforderlich.

Bei Motoren mit Getrieben sind Motor und Last nicht ideal verbunden, da selbst eine einfache Achse „federt“, also nur eine begrenzte Verwindungssteifigkeit (Torsionssteifigkeit) besitzt. Je geringer diese Steifigkeit ist, desto schwieriger wird die Regelung.

Für das Verhältnis der Massenträgheitsmomente von Motorwelle und Last<sup>13</sup> (das Massenträgheitsverhältnis  $k = J_{\text{Last}}/J_{\text{Motor}}$ ) gibt es empirische Richtwerte.

- Für hochdynamische und hochgenaue Anwendungen sollte das Verhältnis im Bereich  $k \approx 1$  gelten.
- Für hochdynamische und genaue Anwendungen, wie z.B. in Werkzeugmaschinen, sollte das Massenträgheitsverhältnis im Bereich  $k < 3$  liegen.

<sup>13</sup>Das Massenträgheitsmoment einer Last muss über das Getriebe umgerechnet werden, wodurch zwar das (umgerechnet) Massenträgheitsmoment kleiner wird, dafür die Ungenauigkeit durch Lose aber zunimmt.



- Für Anwendungen mit einer begrenzten Anforderung an Dynamik und Genauigkeit, wie sie in Produktionsmaschinen oder Handlingsystemen auftauchen, sollte das Verhältnis gemäß  $k < 10$  begrenzt sein.

Bei **Direktantrieben** darf aufgrund der sehr steifen Lastanbindung der Grenzwert auf Werte in der Größenordnung von  $k = 50$  für dynamische Anwendungen erhöht werden. Anders ausgedrückt, durch Direktantriebe **ist eine deutlich höhere Dynamik** möglich.

Meist kommen Synchronmaschinen, gelegentlich auch Synchronreluktanzmaschinen, zum Einsatz. Diese Maschinen sind im Vergleich zur Asynchronmaschine für viel höhere Dynamik geeignet.

**Torqueantriebe** sind rotierende Drehstrommotoren mit einer hohen Polpaarzahl. Diese liegt meist in der Größenordnung von  $p = 10$  bis  $p = 100$ .

Synchronmaschinen für dynamische Antriebsregelungen sind für die typischen Statorfrequenzen in der Größenordnung von  $f_S = 100 \text{ Hz}..300 \text{ Hz}$  bemessen. Die Polpaarzahl beträgt  $p = 3$ ,  $p = 4$  oder  $p = 5$ . Damit ergeben sich dann Bemessungsdrehzahlen von  $n_N = 3000 \text{ U/min}..6000 \text{ U/min}$ . Drehzahl und Drehmoment sind dabei mechanisch gut beherrschbar und eine effiziente Auslegung des magnetischen Kreises ist möglich.

Bei hoher Polpaarzahl  $p$  und Statorfrequenzen wiederum im Bereich von  $f_S = 100 \text{ Hz}..300 \text{ Hz}$  ergeben sich nun deutlich kleinere Bemessungsdrehzahlen  $n_N$ . Im Gegenzug steht ein hohes Drehmoment  $m_N$  zur Verfügung, da jedes Polpaar stromabhängig einen Beitrag zum erzeugten Drehmoment liefert. Hierdurch ist es möglich, bei vergleichbaren Anschlussdaten (Strom und Spannung) bei hochpolpaarigen Motoren eine vergleichbare Leistung, aber mit deutlich höherem Drehmoment als bei Motoren mit niedriger Polpaarzahl zu erreichen.

Torquemotoren sind viel kürzer als gewöhnliche Synchronmaschinen, besitzen aber einen viel größeren Durchmesser. Anstelle einer Welle rotiert die ganze Stirnseite. Auf dieser kann dann direkt die Last montiert werden.

Als Zahlenbeispiel werden zwei Motoren für 330 V und 3 A betrachtet.

- Der konventioneller Motor ist für 3,5 Nm ausgelegt, das Lagerschild misst 10 cm x 10 cm und der Motor ist 17 cm lang.
- Als Torquemotor ist er für 40 Nm ausgelegt. Das runde Lagerschild misst 20 cm Durchmesser und der Motor ist 12 cm hoch. Es sind aber auch deutlich flachere Motoren möglich.

Typische Anwendungen sind Rundtischanwendungen, Aufzüge, Industrieroboter oder Radnabenantriebe in der Elektromobilität.

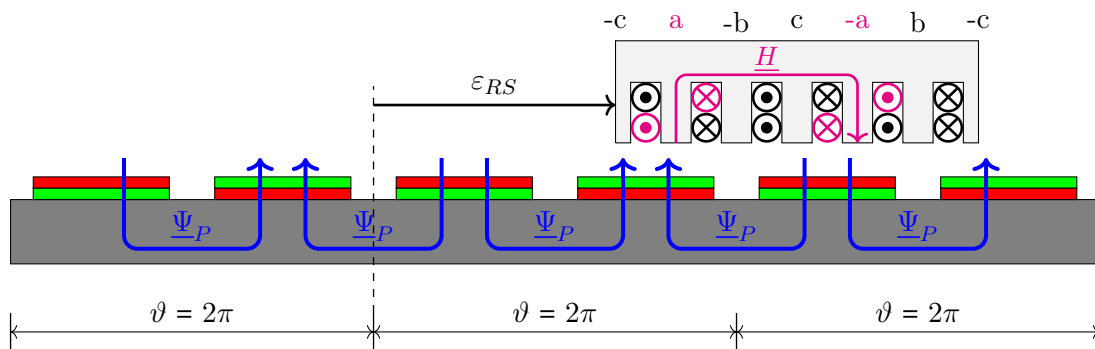
**Linearantriebe** sind Motoren, die direkt eine Linearbewegung realisieren. Es gibt sie in einer Vielzahl von Bauarten. Die Funktionsweise ist die einer Synchronmaschine oder die einer Asynchronmaschine. Sie arbeiten nach dem Lorentz- oder dem Reluktanzprinzip. Sie werden mit Drehstromwicklungen im Primärteil<sup>14</sup> oder im Sekundärteil aufgebaut.

Die Funktionsweise kann man sich gut erklären, wenn man sich einen Synchronmotor wie in Abbildung 2.19 radial bis zum Mittelpunkt aufgeschnitten, und dann auseinandergeklappt vorstellt. Eines der beiden Teile - Stator oder Rotor - wird dann verlängert.

---

<sup>14</sup>Um Begriffe wie Stator, Rotor oder Läufer zu vermeiden, wird zwischen Primärteil (feststehend) und Sekundärteil (das bewegte Teil) unterschieden

Bei industriellen Anwendungen wird häufig ein Kurzstator-Linearmotor eingesetzt, der in Abbildung 2.24 skizziert ist. Das feststehende Primärteil bildet das Ständerjoch. Auf ihm sind die einzelnen Magnete aufgeklebt. Diese Bahn wird ggf. noch mechanisch verstärkt oder eingehaust.



**Abbildung 2.24:** Prinzipieller Aufbau eines Kurzstator-Linearmotors. Die Drehstromwicklung des Sekundärteils kann sich auch über mehrere Polteilungen erstrecken.

Das Primärteil wird außerdem in Segmente unterteilt, die dann als „Magnetplatten“ bezeichnet werden. Diese haben eine für den Anwender gut handhabbare Größe und können über den vollständigen Verfahrensweg einfach aneinandergesetzt werden. Die Länge der einzelnen Segmente beträgt immer ein Vielfaches der Polbreite  $\vartheta$ . Die Polbreite liegt im cm-Bereich.

Das Sekundärteil enthält die Drehstromwicklungen. Auch hier sind im Bereich einer Polbreite  $\vartheta$  die Wicklungen der drei Stränge angeordnet. Da die Wicklung wie bei einer mehrpolpaarigen Maschine mehrfach angeordnet werden kann, kann auch die Länge des Sekundärteils ein Vielfaches der Polbreite  $\vartheta$  betragen. Durch diesen Aufbau liegen die Spulen immer gegenüber von Magneten, die Streuinduktivität  $L_{\sigma}$  ist dadurch entsprechend klein.

Teilweise wird das Sekundärteil ohne „Ständereisen“ aufgebaut. Dadurch kann das Gewicht des Sekundärteils reduziert und eine höhere Dynamik erreicht werden.

Hinzu kommt die Linearführung sowie in den meisten Fällen eine Maßverkörperung, die am Primärteil angebracht ist, und durch einen am Sekundärteil befestigten Sensor magnetisch oder mit Licht abgetastet wird. Abhängig von der Auflösung des Lagegebers kann eine sehr hohe Positioniergenauigkeit im  $\mu\text{m}$ -Bereich erreicht werden.

Nachteilig ist, dass das bewegte Sekundärteil an den Servoregler angeschlossen werden muss. Das Leistungskabel zwischen den Drehstromwicklungen und dem Servoregler und das Geberkabel (Sensorkabel) werden hierzu über eine Schleppkette geführt. Diese begrenzt den Verfahrensweg, der je nach Anwendung, von wenigen Zentimetern bis zu einigen Metern reicht.

### 2.13 Antriebsauslegung und Überlastverhalten

Eine große Gefahr für Antriebe stellt deren unzulässige Erwärmung dar. Bei Elektromotoren können die Motorwicklungen kurzschließen, da der Lack auf den Wicklungsdrähten nur begrenzt temperaturstabil ist. Ferner eliminiert eine Temperatur bereits deutlich unterhalb der Curie-Temperatur, Größenordnung  $\vartheta = 170^{\circ}\text{C} \dots 220^{\circ}\text{C}$ , irreversibel die magnetische Wirkung des Permanentmagneten.

Im Betrieb stellt sich nach einer Weile meist eine Betriebstemperatur ein, die von der Last, der Umgebungstemperatur sowie von eventuell vorhandenen Kühlmitteln (Kühlflüssigkeit) abhängt. Eine Oberflächentemperatur von um die  $60\text{ °C} \dots 70\text{ °C}$  stellt keine Seltenheit dar. Bei einer entsprechenden thermischen Auslegung (siehe B.5) sind auch höhere Temperaturen möglich.

Elektromotoren sind eigentlich recht robuste Maschinen, die zeitweise auch überlastet werden dürfen. Die Frage ist eigentlich nur, wie groß und wie lange die Überlastung anhält, und wie sich die Überlastung langfristig auf die Lebensdauer der Maschine auswirkt. Bei Asynchronmaschinen ist ein 1,5-facher Nennstrom über 2 Minuten eine typische Größenordnung, die den typischen Beschleunigungsfall abdeckt.

Leistungselektronische Komponenten reagieren sehr sensibel auf Überschreitungen der Grenzwerte. Das Überschreiten der Grenzen für Spannung, Strom oder Leistung ist meist nur in engen Grenzen für (im Vergleich zum Motor) kurze Zeiträume möglich. Das Überlastverhalten ist umfassend dokumentiert, beispielsweise in der Stärke der Überlast bezogen auf die Bemessungsgröße zusammen mit dem hierfür gültigen Zeitraum (z.B.  $300\% i_N$  für  $0,2\text{ s}$ ).

### 2.13.1 Auslegung von am Netz betriebenen Drehstrommaschinen

Bei der großen Mehrheit der weltweit eingesetzten Drehstromantriebe handelt es sich um direkt am Drehstromnetz betriebene Asynchronmaschinen. Die Projektierung erfolgt anhand der mechanischen Kenngrößen Drehzahl  $n_N$  und Leistung  $P_N$ . In den meisten Fällen wird die Drehzahl durch ein Getriebe angepasst. Die Anforderungen der Mechanik (Drehzahl, Leistung) wird auf die Motorseite umgerechnet und dort der passende Motor ausgewählt. Die meisten namhaften Hersteller bieten hierzu entsprechende Programme an.

Aufgrund der recht hohen thermischen Zeitkonstanten des Motors ist eine Überlast für den Beschleunigungsfall meist problemlos möglich. Bei sehr großen und langsam anlaufenden Lasten oder bei häufigen Beschleunigungsfällen muss die höhere Belastung während des Beschleunigungsvorgangs berücksichtigt werden.

Auch das Versorgungsnetz muss geschützt werden. Durch den gleichzeitigen Anlauf mehrerer Motoren kann es zu Spannungseinbrüchen kommen, die durch das Nacheinander-Zuschalten der Motoren minimiert werden können.

### 2.13.2 Auslegung von frequenzumrichtergespeisten Motoren

Werden bei einem Antrieb „lediglich“ verschiedene Drehzahlen gefordert, wird der Asynchronmotor über einen Frequenzumrichter gespeist.

Die Auslegung von Frequenzumrichter und Asynchronmaschinen erfolgt analog zu am Netz betriebenen Antrieben anhand der Umrichterleistung  $P_{N,FU}$ , der Motorleistung  $P_{N,Motor}$  und der Drehzahl  $n_N$  im Nennbetrieb.

Bei einer Reihe von Anwendungen ist es vom Prozess her problemlos möglich, dass der Antrieb zeitweise mit reduzierter Drehzahl läuft. Zahlreiche Beispiele lassen sich im Bereich der Pumpen und Verdichter finden, die abhängig von bestimmten Prozessgrößen mit reduzierter Drehzahl laufen dürfen. Hierdurch lässt sich teilweise im erheblichen Maße Energie sparen, die Amortisierungszeit des Frequenzumrichters kann hierbei bereits bei einem halben Jahr liegen.

### 2.13.3 Auslegung von Servosystemen

Sollen aufwändigere Bewegungsprofile realisiert werden, wird dagegen auf einen Servoregler zurückgegriffen, der eine Regelung entsprechend Abbildung 2.22 realisiert. Im Nennbereich verhal-

ten sich Statorstrom, Drehmoment und Beschleunigungsverhalten<sup>15</sup> weitgehend linear zueinander ( $i_S \sim m \sim \alpha$ ), so dass die Auslegung abgesehen von der Motordrehzahl  $n_N$  anhand des Gerätestroms des Servoreglers  $i_{N, \text{Servo}}$  und des Motordrehmoments  $m_N$  erfolgt.

Mit zunehmender Anforderung an die Dynamik steigt auch das benötigte Spitzendrehmoments  $m_{\text{max}}$ . Die Leistungselektronik reagiert auf eine Überlast meist sensibler als der Motor. Auch hier erfolgt die Auslegung rechnergestützt anhand des Beschleunigungsprofils, bzw. das genaue Beschleunigungsprofil wird anhand der möglichen Überlastfähigkeit festgelegt.

## 2.14 Motor- und Anlagenschutz

Die vorwiegenden Fehler bei elektrischen Antrieben resultieren aus Überlastfällen, also wenn die gewünschte Drehzahl nicht erreicht wird oder der Motor gar nicht anläuft. Ursache kann eine mechanische Störungen oder eine fehlerhafte Projektierung sein. Weitere mögliche Fehler sind Dimensionierungsfehler oder Installationsfehler, die bei der Simulation oder spätestens bei der Inbetriebnahme der Anlage auffallen sollten. Bezüglich der Sicherheit von Maschinen mit elektrischer Ausrüstung ist in vielen Fällen die EN 60204-1 maßgeblich.

### Verhalten bei am Netz betriebenen Asynchronmaschinen

Wird eine am Netz betriebene Asynchronmaschine aufgrund einer Störung zu stark belastet, sinkt die Drehzahl, bis sie irgendwann „abkippt“ und stehen bleibt.

Auch hier ist gegebenenfalls eine Überwachung erforderlich, um den Motor, meist aber um die Anlage bzw. den Prozess zu schützen. Aus Kostengründen sind hier oft weder Temperatursensoren noch Drehzahlsensoren verbaut, noch steht eine Auswerteeinheit für die Sensoren zur Verfügung.

Durch die zu langsam drehende oder blockierte Welle sinkt die Gegenspannung,  $U_M$  in Abbildung 2.13, und als Folge stellt sich ein höherer Strom ein, der den Motor thermisch überlasten wird. Bei eigenbelüfteten Motoren sorgt auch der am B-seitigen Wellenende montierte Lüfter nicht mehr für die notwendige Kühlung.

Zur Erkennung von Überlastfällen können entsprechende Geräte (siehe Abbildung 2.25) zum Motorschutz verwendet werden, die am erhöhten Motorstrom eine potentielle Störung erkennen. Diese unterscheiden auch, ob es sich um eine „reguläre“ Überlast beim Motoranlauf oder um eine Störung handelt. Im letzteren Fall wird eine entsprechende Fehlerreaktion eingeleitet.

### Verhalten bei geregelten Systemen

Geregelte Antriebe sind höherpreisig, so dass die Motoren über Temperatursensoren und die Servoregler über eine entsprechende Auswerteeinheit zum Schutz vor Überhitzung verfügen. Es gibt eine Reihe von Überwachungsmöglichkeiten, die primär dem Schutz des Antriebs (Motor, Regler, Lagegeber) dienen. Hierzu gehören

- Auswertung von in den Stator eingewickelten Temperatursensoren, eingesetzt werden schaltende Sensoren wie PT100-Widerstandsthermometer, oder die etwas teureren Temperatursensoren mit nahezu linearer Temperaturkennlinie wie der KTY84.
- Auswertung der Kühlkörpertemperatur oder Kühlflüssigkeitstemperatur im Servoregler oder im Motor

---

<sup>15</sup> natürlich bei konstantem Lastmoment



**Abbildung 2.25:** Hutschienengerät zur Über- oder Unterlasterkennung sowie weiteren Motormanagementfunktionen wie Leistungsmessung, Auswerten von Endschaltern, Ansteuerung von Schützen für das Ein- oder Abschalten des Antriebs oder Ansteuerung für die Stern-Dreieck-Umschaltung für bis zu 16 A für netzbetriebene Asynchronmotoren [Pho20]

Bei entsprechender Beschleunigung ist die Strombelastung dann teilweise so hoch, dass aufgrund der thermischen Zeitkonstanten die Statorwicklung oder der Servoregler bereits durch Übertemperatur geschädigt ist, bevor eine Messung eine Temperaturänderung anzeigt. Möglichkeiten zum Schutz von Motor und Servoregler sind dann:

- Messung und Bewertung des Statorstroms, der Strom-Zeit-Fläche ( $\int |i - i_N| dt < \text{Grenzwert}$ ) und/oder der quadratischen Strom-Zeit-Fläche ( $\int (i - i_N)^2 dt < \text{Grenzwert}$ )
- Berechnung der Temperatur und der Temperaturänderung im Inneren des Motors und der Halbleiter anhand eines geeigneten (berechneten) Modells. Dieses Modell greift auf die Daten der Strom-, Lage- und Drehzahlgeber zurück.

### Prozess- und Anlagenschutz

Bei gesteuerten Asynchronmaschinen kann aus der Abweichung der Motorströme auf einen Fehler im Prozess geschlossen werden. Durch entsprechende Geräte (vergleiche Abbildung 2.25) können die Ströme (oder die Strom-Zeitflächen) auf eine Über- und Unterschreitung bestimmter Grenzwerte hin überwacht werden. Mit der Überwachung der Motorströme kann auch eine Unterlasterkennung erfolgen, die zwar für den Motor ungefährlich ist, aber auf Probleme bei einem angekuppelten Prozess hinweist.

Bei geregelten Antrieben kann ein Teil des Maschinen- und Anlagenschutzes über die Überwachung des Schleppfehlers erfolgen. Eine Abweichung der Solldrehzahl von der aktuellen Drehzahl oder der Sollposition von der Istposition kann im Servoregler überwacht werden, der dann gegebenenfalls eine entsprechende Fehlerreaktion auslöst. Sowohl die Fehlergrenze als auch die Fehlerreaktion sind prozessabhängig zu definieren. Die Fehlerreaktion kann vom Abbremsen des Antriebs bis zur Warnmeldung an die übergeordnete Steuerung alles beinhalten.

Es empfiehlt sich, die Grenzen nicht enger als wirklich notwendig zu wählen, da die Anlage sich abhängig von Temperatur und Klimazone, Alterung und Verschleiß oder sonstigen Randbedingungen später anders verhalten wird als bei der ersten Inbetriebnahme.

Von elektrischen Antrieben kann eine erhebliche Gefahr ausgehen, sei es durch offensichtliche Aufgaben wie Stanzen oder Pressen oder durch nicht vorhersehbare schnelle Bewegungen. Moderne Antriebe verfügen mehr oder weniger ausgeprägt über Elemente der „Integrierten Funktionalen Sicherheit“ und können dadurch Teil des Maschinensicherheitskonzepts gemäß der EN 62061 bzw. ISO 13849 sein.

Dazu gehören neben dem „sicheren Abschalten“ des Antriebs auch Elemente wie „sichere Bewegungsführung“ oder auch „sichere Kommunikation“.

Sicherheitsrelevante Komponenten wie Steuerungen, Klemmen und Anschlüsse sind häufig gelb markiert, so verfügt beispielsweise das Gerät aus Abbildung 2.18 eine sichere Drehmomentabschaltung (STO).

# Kapitel 3

## Der Transformator

Die Grundidee des Transformators ist denkbar einfach. An eine Spule  $L_1$  wird eine Wechselspannung  $U_1$  angelegt. Diese speichert die elektrische Energie  $E_{E,1}$  als magnetische Energie  $E_B$  in einem magnetischen Feld, einem  $B$ -Feld. Die Spule teilt sich das magnetische Feld mit einer zweiten Spule  $L_2$ .

Diese zweite Spule  $L_2$  ist ebenso wie die erste Spule in der Lage, elektrische Energie  $E_E$  und magnetische Energie  $E_B$  hin und her zu wandeln. Während die erste Spule versucht, elektrische Energie im Magnetfeld zu speichern, arbeitet die zweite Spule bereits daran, dieses Feld wieder in elektrische Energie zurückzuwandeln ... oder eben auch umgekehrt.

Der entscheidende Vorteil des Transformators liegt in der Möglichkeit, Strom und Spannung jeweils anzupassen, solange der Energieerhaltungssatz nicht verletzt wird:

$$E_{E,1} = E_{E,2} + E_{dB/dt} + E_{\vartheta} \quad (3.1)$$

In Gleichung 3.1 taucht neben der elektrischen Energie in Primär- und Sekundärseite auch noch die Änderung der magnetischen Energie  $E_{dB/dt}$  sowie die Abwärme  $E_{\vartheta}$  auf.

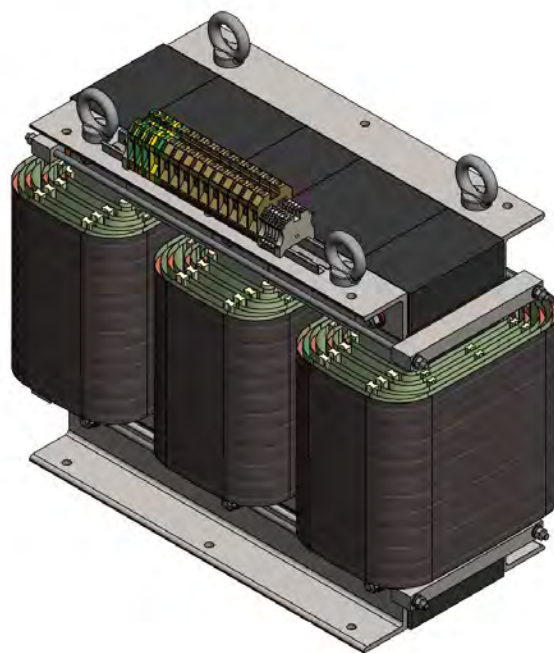
Der Transformator erfüllt in der Technik drei wesentliche Aufgaben.

- **Energieübertragung:** Durch Transformatoren erfolgt eine Spannungsanpassung zur Energieübertragung, z.B. zwischen Übertragungsnetzen und Versorgungsnetzen oder als Element von Schaltnetzteilen.
- **Signalübertragung** Als Messwandler werden Transformatoren zur Anpassung der zu messenden Spannung in einen passenden Spannungsbereich verwendet, wobei das Spannungssignal seine Charakteristik bezüglich Amplitude und Frequenz behält.
- **Die Galvanische Trennung:** Es gibt zwischen Primär- und Sekundärseite kein gemeinsames Bezugspotential. Dies ist beispielsweise aus Gründen der Sicherheit (z.B. medizinische Geräte oder Spielzeug), in der Messtechnik (unterschiedliche Bezugspotentiale an den verschiedenen Messstellen) oder zur Vermeidung von elektromagnetischen Störungen (Datenübertragung, Brummschleifen, ...) erforderlich.

### 3.1 Grundlagen

Um einen stromdurchflossenen Leiter baut sich ein Magnetfeld auf. Die Richtung des Feldes ergibt sich nach der *Rechte-Faust-Regel*<sup>1</sup>. Ist der Leiter in Form einer Schleife um einen Eisenkern

<sup>1</sup>Weist der Strom in Richtung des Daumens der rechten Hand, dann folgen die Feldlinien den gekrümmten Fingern



**Abbildung 3.1:** Dreiphasiger Transformator für 3 x 480 V und 99 A (80 kVA) [Sch20]

gelegt, dann ergibt sich im Eisenkern ein Magnetfeld, das den Kern an den Enden verlässt. Wenn wir von magnetischen Feldern sprechen, so verwenden wir meist den Begriff *magnetische Flussdichte*, umgangssprachlich *Magnetfeld* oder *B-Feld* (vergl. Abschnitt 2.2).

Diese magnetische Flussdichte  $B$  bzw.  $\underline{B}$  gibt an, wie stark bzw. wie stark und mit welcher Orientierung das Feld in einem bestimmten Punkt ist. Will man hingegen wissen, wie stark das Feld in einem bestimmten Bereich ist, muss über diese Fläche - hier über den Querschnitt des Eisenkerns - integriert werden. Das Ergebnis nennen wir den **magnetischen Fluss**  $\Phi$ .

$$\Phi = \int_A \underline{B} \, d\underline{A} \quad (3.2)$$

Bei mehrlagigen Flächen, also wenn es sich um  $n$  Schlaufen handelt, verstärkt dies das Magnetfeld um das  $n$ -fache. Man spricht dann vom **verketteten magnetischen Fluss**  $\Psi$ . Eine Änderung des magnetischen Flusses hat entsprechend dem Induktionsgesetz eine induzierte Spannung zur Folge, die entsprechend der *Lenz'schen Regel* der Ursache entgegen gerichtet ist.

$$u_{\text{ind}}(t) = -n \frac{d\Phi}{dt} \quad (3.3)$$

## 3.2 Der ideale Transformator

Der Grundgedanke des idealen Transformators ist, dass der gleiche Fluss zwei Spulen durchsetzt. Eine sinusförmige Spannungsänderung an einer ersten Spule,  $u_1(t)$ , hat einen sinusförmigen magnetischen Fluss  $\Phi_1(t)$  zur Folge. Dieser sinusförmige Fluss induziert in der zweiten Spule eine sinusförmige Spannung  $u_2(t)$ .



Gehen wir von dem magnetischen Fluss

$$\Phi = \hat{\Phi} \sin(\omega t) \quad (3.4)$$

und seiner Ableitung

$$\frac{d\Phi}{dt} = \omega \hat{\Phi} \cos(\omega t) \quad (3.5)$$

aus.

Da der Fluss in beiden Spulen identisch ist, gilt für die Primärseite

$$u_{ind_1}(t) = -\frac{d\Psi_1}{dt} = -n_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (3.6)$$

und für die Sekundärseite:

$$u_{ind_2}(t) = -\frac{d\Psi_2}{dt} = -n_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (3.7)$$

Der Fluss bzw. die Flussänderung ist bei beiden Spulen identisch, da beide über einen gemeinsamen Kern gekoppelt sind. Damit kann man beide Gleichungen zusammenfassen:

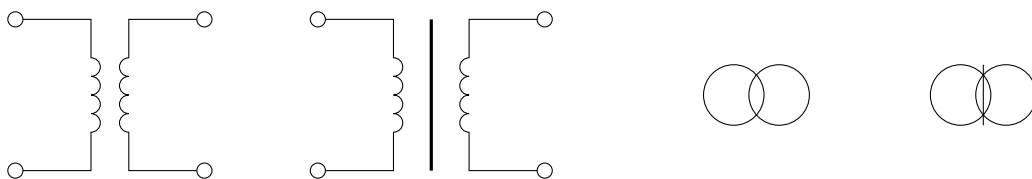
$$\frac{u_1(t)}{n_1} = -\frac{d\Phi}{dt} = \frac{u_2(t)}{n_2} \quad (3.8)$$

Bei der Darstellung mit Effektivwerten lautet diese Formel

$$\frac{U_1}{n_1} = \frac{U_2}{n_2} \quad (3.9)$$

Dieses Verhalten kennen wir vom Getriebe oder auch vom Hebel, wobei das Übersetzungsverhältnis hier mit einem „ $\ddot{u}$ “ anstelle mit einem „ $i$ “ gekennzeichnet wird.

$$\ddot{u} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{U_1}{U_2} \quad (3.10)$$



**Abbildung 3.2:** Darstellung eines Transformators im Schaltplan, v.l.n.r.: Transformator (allgemein), Transformator mit Eisenkern, Transformator (allgemein, Darstellung typisch in der Energietechnik), Trenntransformator

Über eine Periode gemittelt wird im Magnetkern keine Energie gespeichert, damit gilt die Leistungsbilanz

$$P_1 = U_1 I_1 = U_2 I_2 = P_2 \quad (3.11)$$

Mit  $U_2 = \frac{n_2}{n_1} U_1$  gilt damit für den Strom

$$\frac{1}{\ddot{u}} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (3.12)$$

Bei einem Transformator kann man zwischen Primär- und Sekundärwicklung unterscheiden, wobei die Primärseite die Seite ist, in der bevorzugt die Energie in den Transformator hineinfließt und die Sekundärseite die, aus der der Strom aus dem Transformator wieder herausfließt.

Neben der Orientierung an der Energieflussrichtung ist gerade in der Energietechnik der Begriff Oberspannungswicklung bzw. Oberspannung (OS, höhere Spannung) und Unterspannungswicklung (US) für die niedrigere Spannung verbreitet.

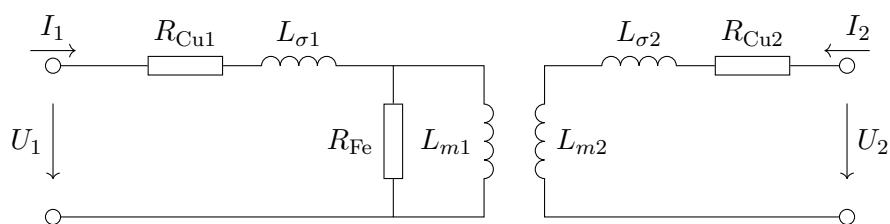
### 3.3 Der reale Transformator

Leider entstehen auch beim Transformator Verluste. Es handelt sich dabei im Wesentlichen um

- Kupferverluste: Die Transformatorwicklungen bestehen aus Kupfer oder Aluminium, die daher einen ohm'schen Widerstand darstellen. Sie steigen quadratisch mit dem die Spulen durchfließenden Strom  $I$  an.
- Das Magnetisieren des Ständereisens, also die Neuordnung der weiss'schen Bezirke, erfolgt entlang einer Hysteresekurve, die den nichtlinearen Zusammenhang von magnetischer Feldstärke  $H$  und magnetischer Flussdichte  $B$  widerspiegelt. Das Durchlaufen der Kurve ist verlustbehaftet. Da die Kurve in einer Periode vollständig durchlaufen wird, sind die Hystereseverluste in etwa proportional zur Frequenz der angelegten Spannung  $f$ .
- Durch den magnetischen Fluss wird im Kern ein Stromfluss erzeugt. Dieser Stromfluss erwärmt das Ständereisen, man spricht von Wirbelstromverlusten. Sie können durch den Aufbau des Ständereisens aus dünnen gegeneinander isolierten Blechen minimiert werden. Die Wirbelstromverluste steigen proportional mit dem Quadrat der Frequenz  $f$ .

#### 3.3.1 Modellbildung und Ersatzschaltbild

Ein verbreitetes Modell des Transformators ist das so genannte *T-Ersatzschaltbild*, welches in Abbildung 3.3 angegeben ist.



**Abbildung 3.3:** T-Ersatzschaltbild für einen Transformator

Die im Ersatzschaltbild verwendeten einzelnen Elemente lassen sich direkt als eine physikalische Eigenschaft interpretieren.

- Die ohm'schen Verluste (Kupferverluste) der Primärspule,  $R_{Cu,1}$
- Die ohm'schen Verluste (Kupferverluste) der Sekundärspule,  $R_{Cu,2}$

- Eisenverluste, also die Verluste durch das Ummagnetisieren und die hierbei auftretenden Hystereseverluste sowie den Wirbelstromverlusten des Eisenkerns, modelliert durch den Widerstand  $R_{Fe}$
- Der induktive Anteil der Primärwicklung, dessen Fluss nicht die Sekundärspule durchsetzt, Streuinduktivität,  $L_1 = L_{\sigma,1}$
- Der induktive Anteil der Sekundärwicklung, dessen Fluss nicht die Primärspule durchsetzt, Streuinduktivität,  $L_2 = L_{\sigma,2}$
- Die Hauptinduktivitäten  $L_{m1}$  und  $L_{m2}$ , teilweise auch als  $L_h$  oder  $M$  bezeichnet (m bzw. M steht für *main* oder *mutual* (eng. : *gegenseitig*))

Bei einer feineren Modellierung können auch kapazitive Effekte (z.B. aufgrund von nebeneinander liegenden Windungen) berücksichtigt werden.

Beide Hauptinduktivitäten  $L_{m1}$  und  $L_{m2}$  werden vom gleichen magnetischen Fluss  $\Phi = \Phi_1 = \Phi_2$  durchsetzt. Über den Energieerhaltungssatz (der ideale Transformator, bestehend aus  $L_{m1}$  und  $L_{m2}$ , arbeitet verlustfrei!) sowie den Zusammenhang von Strom und Spannung an einer Induktivität  $u = L \frac{di}{dt}$  lässt sich das Verhältnis der Hauptinduktivitäten zu

$$\frac{L_{m1}}{L_{m2}} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \quad (3.13)$$

herleiten.

### 3.3.2 Vereinfachtes Ersatzschaltbild des Transformators zur Leistungsübertragung

Die Kupferverluste nehmen quadratisch mit den Strömen zu ( $P_{Cu} = R_{Cu}I^2$ ) und dominieren die Gesamtverluste des Transformators. Die Eisenverluste (Eisenverluste) sind weitgehend unabhängig von der übertragenen Leistung und dürfen angesichts der dominierenden Kupferverluste vernachlässigt werden.

Damit ergibt sich das in Abbildung 3.4 gezeigte vereinfachte Ersatzschaltbild für große Leistungen.

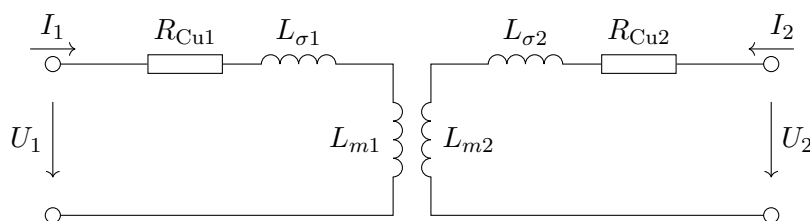


Abbildung 3.4: vereinfachtes T-Ersatzschaltbild für hohe Leistungen

### 3.3.3 Vereinfachtes Ersatzschaltbild für den Transformator als Messwandler

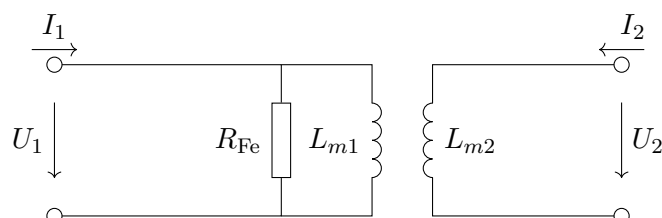
Um Ströme oder hohe Spannungen sicher messen zu können, werden diese durch einen Transformator auf ein ungefährliches bzw. gut handhabbares Spannungsniveau herabtransformiert. Ein

Transformator für diese Aufgaben heißt Messwandler. Er stellt ferner eine galvanische Trennung zwischen der Leistungsseite und der Messseite dar. Es ist wünschenswert, dass der Messwandler das Messsignal möglichst genau (linear) bezüglich Amplitude und Frequenz abbildet.

Wird ein Transformator als Messwandler eingesetzt, dann ist die sekundärseitige Last (ein Messgerät oder Analog-Digital-Umsetzer) meist hochohmig und der Energietransport zwischen Primär- und Sekundärseite beziehungsweise der Stromfluss  $I_1$  und  $I_2$  vergleichsweise gering. Der Transformator wird quasi im Leerlauf betrieben. Die Ströme  $I_1$  und  $I_2$ , und damit auch die Kupferverluste  $P_{Cu} = R_{Cu,1}I_1^2 + R_{Cu,2}I_2^2$  sind daher recht gering. Daher dürfen die Längswiderstände  $R_{Cu}$  in der Modellierung entfallen.

Aufgrund der geringen Ströme darf auch auf die Modellierung der Streuinduktivitäten  $L_\sigma$  verzichtet werden.

Hysteres- und Wirbelstromverluste entstehen vorwiegend durch das *Umklappen* der weiss'schen Bezirke und sind weitgehend unabhängig von der übertragenen Leistung. Sie dürfen hier daher nicht entfallen. Damit ergibt sich das in Abbildung 3.5 gezeigte vereinfachte Ersatzschaltbild, das für Messwandler, Transformatoren im Leerlauf oder ganz allgemein bei der Übertragung geringer Leistungen verwendet werden darf.



**Abbildung 3.5:** T-Ersatzschaltbild für einen Transformator kleiner Leistung (z.B. Messwandler)

### 3.4 Der Transformator in elektrischen Netzwerken

Das Berechnen von elektrischen Netzwerken mit Transformatoren ist erstmal schwierig, da die Spannungen und Ströme sich zwischen Primär- und Sekundärseite unterscheiden. Ein direktes Arbeiten mit den Maschen- und Knoten- und Maschengleichungen ist zunächst nicht möglich. Auch können keine Zeigerdiagramme für Schaltungen mit Transformator erstellt werden, da keine gemeinsame Bezugsgröße besteht.

Durch das Umrechnen - Transformieren - von Größen zwischen der Primär- und der Sekundärseite kann der Transformator aus den Schaltungen eliminiert werden. Dadurch vereinfacht sich die systematische Analyse derartiger Netzwerke. Das im Folgenden skizzierte Vorgehen gilt für lineare Bauelemente.

#### 3.4.1 Umrechnung zwischen Primär- und Sekundärseite

Die Umrechnung von Spannungen und Strömen von einer Seite des Transformators sind in den Gleichungen 3.14 und 3.15 gegeben. Die transformierten Größen werden jeweils durch ein Apostroph gekennzeichnet. Sie entsprechen den Grundgleichungen für Ströme (Gln. 3.12) und Span-

nungen (Gln. 3.10) des idealen Transformators.

$$U_2' = \ddot{u} U_2 \quad (3.14)$$

$$I_2' = \frac{1}{\ddot{u}} I_2 \quad (3.15)$$

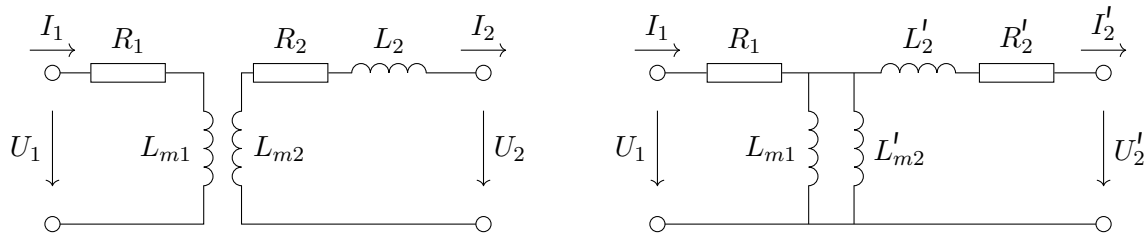
Anhand einer Leistungsbetrachtung  $P_2 = U_2 I_2 = P_2' = U_2' I_2'$  lässt sich die Transformationsgleichung für die Umrechnung der Widerstände auf die Primärseite bestimmen:

$$R_2' = \ddot{u}^2 R_2 \quad (3.16)$$

oder im allgemeinen (komplexen) Fall

$$Z_2' = \ddot{u}^2 Z_2 \quad (3.17)$$

Wird dann abschließend eine sekundärseitige Lösung benötigt, ist diese entsprechend der Gleichung (3.14) und (3.15) zurückzutransformieren.



**Abbildung 3.6:** Netzwerk mit Transformator (links) und dasselbe Netzwerk mit auf die Primärseite umgerechneten sekundärseitigen Größen

Alternativ kann die Transformation auch von der Primär- auf die Sekundärseite erfolgen:

$$U_1' = \frac{U_1}{\ddot{u}}$$

$$I_1' = \ddot{u} I_1$$

sowie

$$R' = \frac{R}{\ddot{u}^2} \quad \text{bzw.} \quad Z' = \frac{Z}{\ddot{u}^2} \quad (3.18)$$

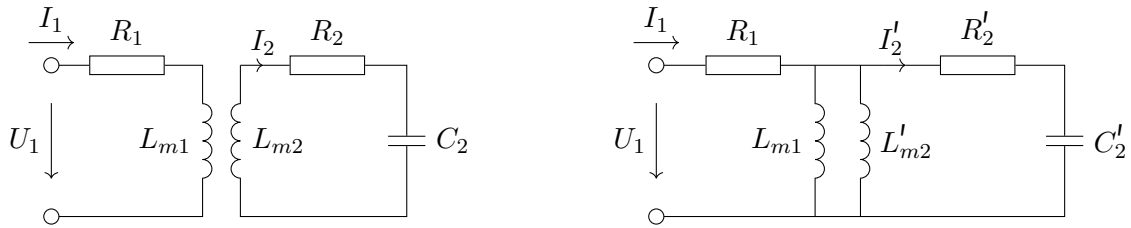
Welche Transformation, die auf die Primärseite oder die auf die Sekundärseite, sich letztendlich als geschickter erweist, hängt von der jeweiligen Aufgabenstellung ab. Die Ergebnisse sind natürlich identisch.

Es ist üblich, die beiden parallel liegenden Induktivitäten („Querinduktivitäten“) zusammenzufassen. Da sie nach Gleichung (3.13) in einem festen Verhältnis zueinander stehen,

$$L_{m2}' = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 L_{m2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 L_{m1},$$

ergibt die Parallelschaltung:

$$L_m = M = L_{m1} \parallel L_{m2}' = \frac{L_{m1} L_{m2}'}{L_{m1} + L_{m2}'} = \frac{L_{m1}}{2} \quad (3.19)$$



**Abbildung 3.7:** Beispielhaftes Netzwerk mit Transformator (links) und dasselbe Netzwerk mit auf die Primärseite umgerechneten sekundärseitigen Größen

**Beispiel:**

Anhand des folgenden Beispiels soll das Vorgehen bei der Bestimmung des Stroms  $I_2$  demonstriert werden.

Betrachtet wird die „große“ Masche über  $U_1$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  und  $C_2$ . Die Umrechnung der einzelnen Bauelemente erfolgt entsprechend der Gleichung (3.17):

$$\begin{aligned} R_2' &= \ddot{u}^2 R_2 \\ \frac{1}{j\omega C_2'} &= \ddot{u}^2 \frac{1}{j\omega C_2} \end{aligned}$$

Für den Strom ergibt sich dadurch

$$I_2' = \frac{U_1}{Z_\Sigma} = \frac{U_1}{R_1 + R_2' + \frac{1}{j\omega C_2'}}$$

oder mit der Rücktransformation aus Gleichung (3.15):

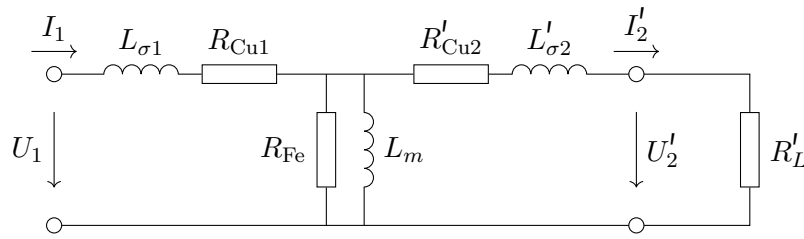
$$I_2 = \frac{I_2'}{\ddot{u}} = \frac{U_1}{\ddot{u} Z_\Sigma} = \frac{U_1}{\ddot{u} \left( R_1 + R_2' + \frac{1}{j\omega C_2'} \right)}$$

**3.4.2 Das T-Ersatzschaltbild bei transformierten Größen**

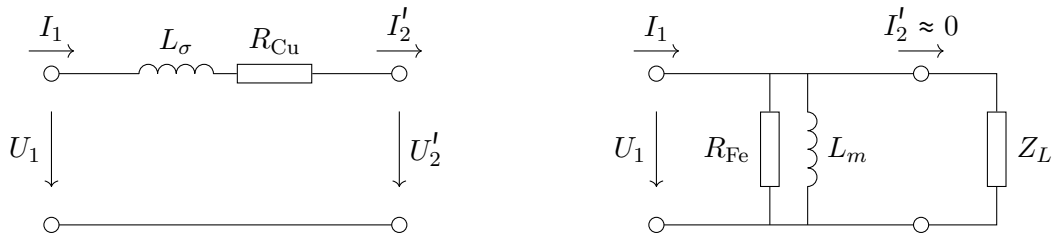
Durch die Umrechnung der sekundärseitigen Größen vereinfacht sich das Ersatzschaltbild aus Abbildung 3.3 zu der in Abbildung 3.8 dargestellten Form. Für die in den Abschnitten 3.3.2 und 3.3.3 behandelten vereinfachten Ersatzschaltbilder ergibt sich als weitere Vereinfachung, dass die Längsimpedanzen ( $R_{Cu} = R_{Cu1} + R_{Cu2}$ ,  $L_\sigma = L_{\sigma1} + L_{\sigma2}$ ) zusammengefasst werden dürfen, oder im Fall des Messwandlers mit hochohmiger Lastimpedanz  $Z_L = R_L + jX_L$ , dass die Schaltung sich auf die Parallelschaltung der Querimpedanzen  $R_{Fe}$  und  $j\omega L_m$  und der Last  $Z_L$  reduziert.

**3.4.3 Zeigerdiagramme für Schaltungen mit Transformator**

Da durch die Transformation ein Ersatzschaltbild ohne Transformator angegeben werden kann, ergibt sich die Möglichkeit, entsprechende Aufgaben über das Zeichnen eines Zeigerdiagramms zu lösen. Hierzu gehen wir wieder von T-Ersatzschaltbild mit der Lastimpedanz  $Z_L = ||Z|| e^{j\varphi}$  entsprechend Abbildung 3.10 aus. Wir betrachten die „große“ Masche über die Klemmspannungen



**Abbildung 3.8:** T-Ersatzschaltbild für einen Transformator mit auf die Primärseite transformierter sekundärseitige Größen



**Abbildung 3.9:** Vereinfachte T-Ersatzschaltbilder für hohe (links) und niedrige Leistungen (rechts)

$U_1$  und  $U_2$  sowie die Längsimpedanz  $R_{Cu1} + j\omega L_{\sigma1} + R'_{Cu2} + j\omega L'_{\sigma2}$ . Zur Vereinfachung gehen wir im Folgenden vom Strom  $I'_2$  aus. Formal müsste man dem Ergebnis den Strom der kleinen „Masche“ von der Eingangsspannung  $U_1$  bis zum Querzweig ( $R_{Fe} \parallel L_m$ ) überlagern. Die Auswirkung auf das Ergebnis ist aber gering. Die Vernachlässigung entspricht dem vereinfachten Ersatzschaltbild für größere Leistungen. Die Wicklungswiderstände  $R_{Cu1}$  und  $R'_{Cu2}$  und die Streuinduktivitäten  $L_{\sigma1}$  und  $L'_{\sigma2}$  werden jeweils zusammengefasst. Das resultierende Zeigerdiagramm zeigt Abbildung 3.11 für eine rein ohm'sche Last  $\underline{Z}_L = R_L$  und Abbildung 3.12 für eine induktive Last  $\underline{Z}_L = j\omega L_L$ .

Das in diesen Abbildungen gekennzeichnete *Kapp'sche Dreieck*<sup>2</sup> gibt die Spannungsverhältnisse im Transformator wieder und ist in seiner Größe vom Betrag der Lastimpedanz  $\underline{Z}_L$ , bezüglich seiner Orientierung von der Phase der Lastimpedanz  $\varphi_L$  abhängig. Hierdurch lassen sich Spannungsänderungen an Transformatoren bei Laständerungen gut visualisieren.

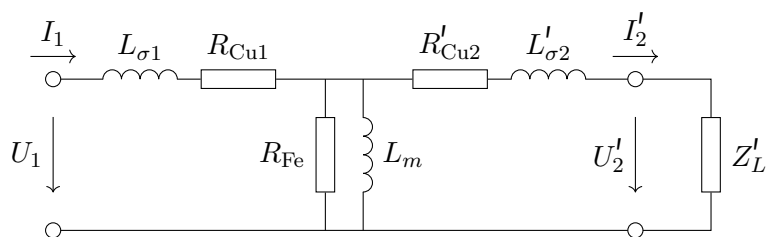
Im Fall einer konstanten Eingangsspannung  $U_1$  und einer kapazitiven Last kann die Ausgangsspannung  $U'_2$  größer als die Eingangsspannung werden. Bei einer im Leerlauf betriebenen Freilandleitung können so an deren Enden zerstörerisch hohe Ausgangsspannungen entstehen. Dieser Fall wird daher von Energieversorgern vermieden bzw. ist on ihnen gefürchtet.

### 3.5 Aufbau eines Transformators

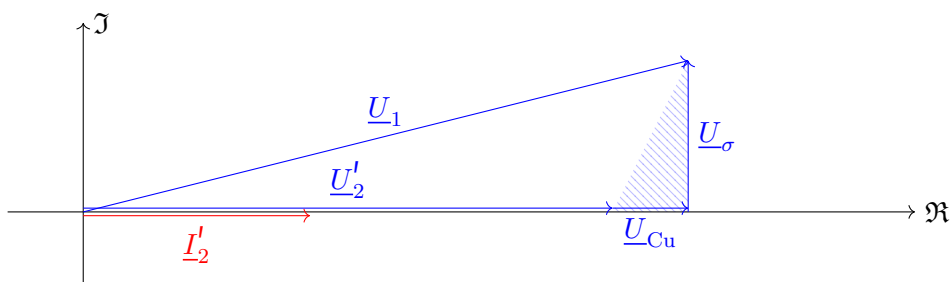
Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die Wicklungen auf dem Eisenkern anzuordnen. Der einfachste Aufbau, der sich auch gut fertigen lässt, ist der Kerntransformator, siehe Abbildung 3.13 (links).

Einen guten Wirkungsgrad besitzen Ringkerntransformatoren mit Ringkernen (aufgewickeltes

<sup>2</sup>nach Gisbert Johann Eduard Kapp, 1852 -1922



**Abbildung 3.10:** T-Ersatzschaltbild eines Transformators mit auf die Primärseite transformierten sekundärseitigen Größen und Last  $\underline{Z}'_L$



**Abbildung 3.11:** Zeigerdiagramm eines Transformators bei ohm'scher Last, schraffiert das Kapp'sche Dreieck

Dynamoblech), die jedoch sehr aufwändig in der Fertigung sind.

Bei Manteltransformatoren befinden sich beide Wicklungen auf dem Mittelschenkel, nebeneinander wie in Abbildung 3.13 (rechts) oder übereinander, also eine Wicklung ist um die andere Wicklung herumgewickelt. Manteltransformatoren besitzen meist eine bessere Flussausnutzung als Kerntransformatoren und damit einen besseren Wirkungsgrad.

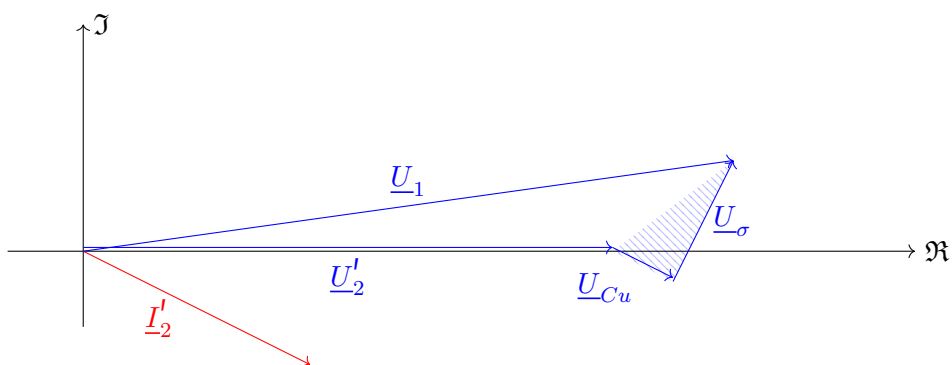
### 3.5.1 Eisenkern

Ein sich änderndes magnetisches Feld induziert in einem Leiter einen Stromfluss. Wenn der den magnetischen Fluss führende magnetische Leiter auch ein elektrischer Leiter ist, bildet sich im magnetischen Leiter ein kreisförmiger Strom aus. Folglich werden die Ströme *Kreisströme* oder *Wirbelströme* genannt. Diese Kreisströme finden in der Technik in verschiedenen Bereichen Anwendung (Wirbelstrombremse, Induktionskochfeld, ...). Im Bereich der elektrischen Maschinen sorgen sie allerdings vorwiegend für Verluste.

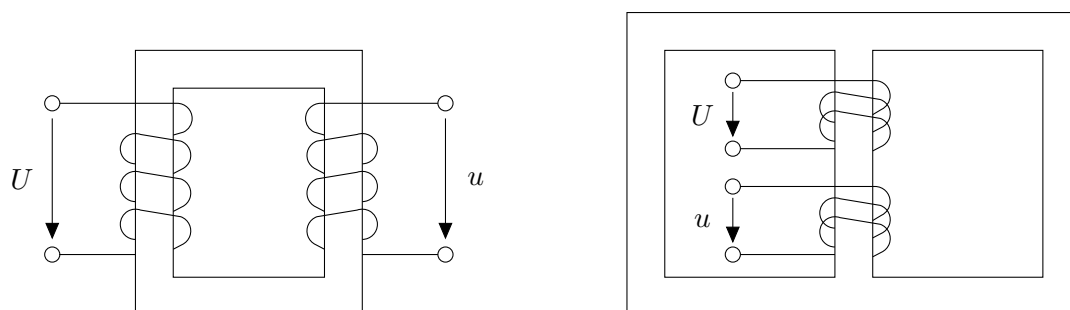
Abhilfe schafft, den Kern aus dünnen, übereinander liegenden und untereinander isolierten Eisenblechen aufzubauen, wobei die Richtung des magnetischen Flusses in der Blechebene liegt. Die Kreisströme können dann aufgrund der Isolierung nicht mehr problemlos um den magnetischen Fluss kreisen und reduzieren den Stromfluss im Eisen auf ein Minimum.

Bei den Blechen handelt es sich um kaltgewalztes Blech mit einer Stärke von 0,5 mm oder weniger, das an seiner Oberfläche chemisch isoliert worden ist und als „Elektroblech“ oder „Dynamoblech“ bezeichnet wird.





**Abbildung 3.12:** Zeigerdiagramm eines Transformators bei induktiver Last, schraffiert das Kapp'sche Dreieck



**Abbildung 3.13:** Prinzipieller Aufbau eines Kerntransformators (links) und eines Manteltransformators (rechts)

### 3.5.2 Frequenzabhängigkeit

Bei sinusförmiger Speisung gilt

$$u_{ind}(t) = -\frac{d\Psi}{dt} = -\omega n \Phi \cos(\omega t) \tag{3.20}$$

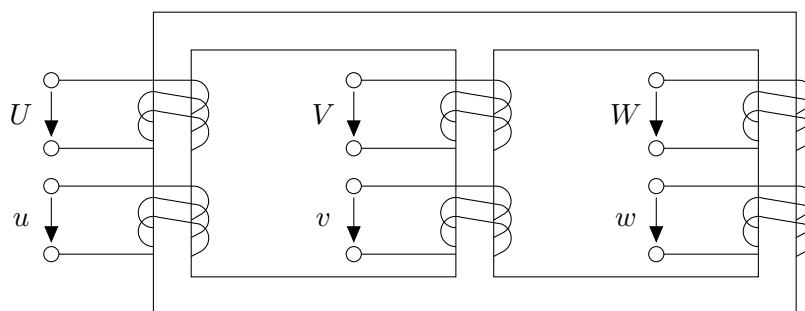
Daraus folgt, dass bei höheren Frequenzen weniger Windungen für den gleichen Fluss bei gleicher Spannung reichen. Wird der Transformator bei höheren Frequenzen betrieben, ergibt sich also bei gleicher Leistung eine kompaktere (kleinere) Bauform. Anschaulich lässt sich das dadurch erklären, dass im magnetischen Feld (bzw. im Ständereisen) weniger Energie zwischengespeichert werden muss, da die Periodendauer kürzer wird.

## 3.6 Der dreiphasige Transformator

Der Dreiphasentransformator (oder auch Drehstromtransformator) arbeitet wie der einphasige Transformator, nutzt aber das Ständereisen besser aus.

Die Arbeitsweise ist die gleiche wie bei drei Kerntransformatoren, deren unbewickelte Schenkel zusammengefasst sind. Ist das Netz symmetrisch, entfällt die Magnetisierung dieses gemeinsamen Schenkels, und damit darf dieser Schenkel selber entfallen, siehe Abbildung 3.14.

Vergleichbar dem dreiphasigen Netz kann hierdurch der Materialaufwand reduziert werden.

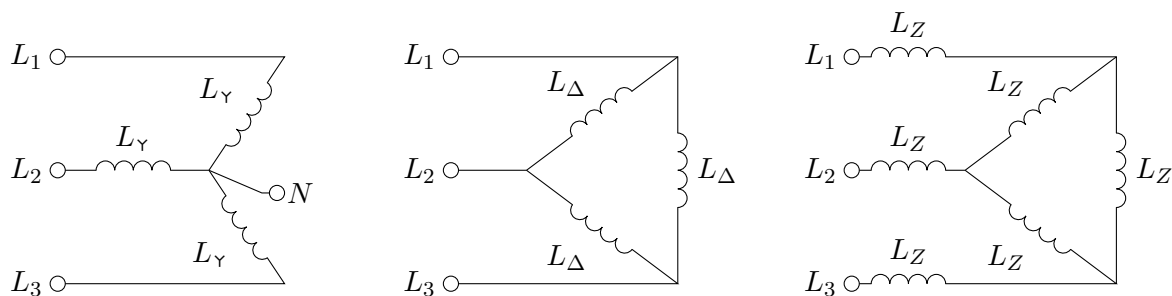


**Abbildung 3.14:** Prinzipieller Aufbau eines dreiphasigen Transformators; Majuskeln für die Primär-, Minuskeln für die Sekundärseite

Der Transport von Transformatoren mit Leistungen oberhalb von 850 MW ist in Europa aufgrund von Abmessung und Gewicht schwierig bis unmöglich, so dass für Kraftwerke dann wieder auf drei einzelne Transformatoren, also für jede Phase einer, zurückgegriffen werden muss.

### 3.7 Schaltgruppen und Klemmbezeichnungen

Das Verhältnis von Ein- und Ausgangsspannung beim einphasigen Transformator ergibt sich über das Verhältnis der Windungszahlen,  $\ddot{u}$ . Beim dreiphasigen Transformator besteht zusätzlich die Möglichkeit, die Wicklungen auf der Primär- bzw. der Sekundärseite im Stern, im Dreieck, oder im „Zick-Zack“<sup>3</sup> zu verschalten, siehe Abbildung 3.15. Hierdurch ergibt sich nicht nur die Möglichkeit zu einer weiteren Spannungsanpassung, sondern auch eine Phasendrehung zwischen Primär- und Sekundärseite ist möglich.



**Abbildung 3.15:** Sternschaltung mit Anschluss für den Neutralleiter, Dreieckschaltung und Zick-Zack-Schaltung

- Man spricht von Schaltgruppen, die immer nach dem Prinzip „Schaltung der Spannungs- oberseite“, „Schaltung der Spannungsunterseite“ und „Kennzahl“ bezeichnet werden. Die Kennzahl gibt die Phasenschiebung in 30-Schritten an.
- Ferner wird die Spannungsobersseite mit Majuskeln, die Spannungsunterseite mit Minuskeln beschriftet.

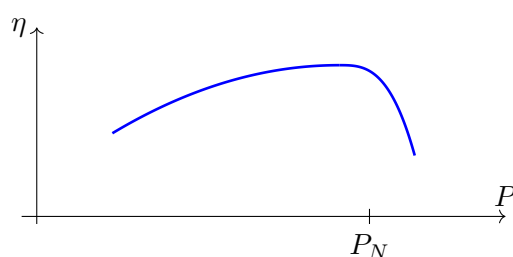
<sup>3</sup>Die Wicklung ist geteilt, die Hälfte der (halben) Wicklung ist im Stern, die andere Hälfte im Dreieck verschaltet

- Eine vorgestellte 1 weist auf die Primär-, die vorgestellte 2 auf die Sekundärseite hin.
- Eine nachgestellte 1 oder 2 weist auf den Eingangs- und Ausgangsdraht der Wicklung hin.

Eine Schaltgruppe „Dy5“ bedeutet also Dreieckschaltung auf der Primärseite, Sternschaltung auf der Sekundärseite und eine Phasendrehung von  $150^\circ$ . Die Klemmbezeichnung „1V2“ kennzeichnet auf der Oberspannungsseite den zweiten Anschluss der „V“-Wicklung.

### 3.8 Typische Wirkungsgrade

Der Wirkungsgrad  $\eta$  von Transformatoren bezieht sich auf die Bemessungswerte. Der prinzipielle Verlauf ist in Abbildung 3.16 dargestellt.



**Abbildung 3.16:** Prinzipieller Verlauf der Wirkungsgradkennlinie

Ab einer bestimmten Baugröße gehören Transformatoren zu den effizientesten elektrischen Maschinen. Um einen Transformator mit hohem Wirkungsgrad (Größenordnung  $\eta > 0,95$ ) für Frequenzen von 50 Hz oder 60 Hz herzustellen, ist ein hoher technischer und vor allem monetärer Aufwand erforderlich, der sich erst für hohe Leistungen lohnt. Einige typische Werte, die aber in beide Richtungen abweichen können, sind der Tabelle 3.1 zu entnehmen.

Bemessungsleistung	Typischer Wirkungsgrad
< 0,1 W	$\eta < 0,5$
20 W	$\eta \sim 0,6$
100 W	$\eta \sim 0,85$
10 kW	$\eta \sim 0,97$
100 kW	$\eta \sim 0,975$
2 MW	$\eta \sim 0,985$
1 GW	$\eta \sim 0,9975$

**Tabelle 3.1:** Typische Richtwerte für die Wirkungsgrade von Transformatoren

Den optimalen Wirkungsgrad  $\eta$  besitzen Transformatoren in der Regel in dem Arbeitspunkt, in dem die Kupferverluste  $P_{Cu}$  und Eisenverluste  $P_{Fe}$  in etwa gleich groß sind.

Die Leistungsbezeichnung bezieht sich - wenn nicht anders angegeben - auf die Sekundärseite.

### 3.9 Anmerkungen

- Transformatoren gibt es in vielen Leistungsgrößen. Das Volumen reicht von wenigen Kubikmillimetern bis zur Begrenzung durch das Lichtraumprofil bei Bahntransporten.
- **Galvanische Trennung:** Bei einem Transformator sind Primär- und Sekundärseite galvanisch getrennt, d.h., die Kopplung zwischen Primär- und Sekundärseite ist rein magnetisch.
- **Spartransformator:** Bei einem Spartransformator stellt die Sekundärwicklung einen Teil der Primärwicklung dar. Eine galvanische Trennung liegt dann natürlich nicht vor. Der Vorteil ist eine deutliche Materialersparnis. Da auch im Leerlauf an einer Klemme der Sekundärwicklung eine Spannung gegen Erde anliegt, wird der Spartransformator nicht da eingesetzt, wo Menschen mit ihm in Berührung kommen könnten.

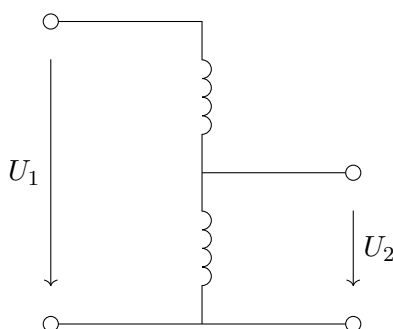


Abbildung 3.17: Prinzipieller Aufbau eines Spartransformators

- **Messwandler:** Zum Messen von hohen Spannungen oder Strömen wird ein Transformator unter dem Begriff *Messwandler* eingesetzt.
- Ein **Schaltnetzteil** besteht aus den Baugruppen Gleichrichter, Wechselrichter, einem auf hohe Frequenzen ( $f \gg 50 \text{ Hz}$ ) ausgelegten Transformator und einem weiteren Gleichrichter. Der Vorteil gegenüber einem einzelnen Transformator (ausgelegt für  $f = 50 \text{ Hz}$ ) ist eine deutliche Materialersparnis, ein deutlich verbesserter Wirkungsgrad und geringere Leerlaufverluste.
- Im **Laborjargon** wird der Transformator gelegentlich als *Trafo* bezeichnet.

## Kapitel 4

# Energietransport durch das Wechselspannungsnetz

Durch den Transport von elektrischer Energie wird eine räumliche Trennung von „Energieerzeugung“ und „Energieverbrauch“ möglich. Der elektrische Energietransport ermöglichte in Europa eine flächendeckende Elektrifizierung und zählt als Beitrag zur zweiten industriellen Revolution.

Eine flächendeckende elektrische Energieversorgung soll die Versorgungssicherheit sowie die Anlagen- und Personensicherheit gewähren, und das möglichst bei geringen Energieverlusten während des Transports sowie möglichst geringen Installations- und Unterhaltskosten.

### 4.1 Spannungsebenen in elektrischen Netzen

Der Transport elektrischer Energie ist verlustbehaftet. Bei gegebenem Leitungswiderstand  $R_L$  betragen die Verluste pro Leiter  $P_{\text{Verluste}} = U_L I_L = R_L I_L^2$ . Um die Verluste zu minimieren wird eine möglichst hohe Spannung  $U_{\text{Last}}$  gewählt, damit bei einer konstanten Last  $P_{\text{Last}} = U_{\text{Last}} I_{\text{Last}}$  der Strom  $I_L$  klein bleibt.

Daher werden für den Energietransport über größere Entfernungen möglichst hohe Spannungen gewählt, um die Verluste zu minimieren. Der Verbraucher wird dagegen mit einer eher niedrigen Spannung versorgt, um hier das Gefährdungspotential möglichst klein und den Installations- und Isolationsaufwand gering zu halten.

Als **Niederspannung** werden Spannungen bis 1000 V Wechselspannungen<sup>1</sup> bezeichnet. Das Niederspannungsnetz ist das 230 V / 400 V - Netz, das europaweit den Endverbrauchern zur Verfügung gestellt wird. Die Niederspannungsrichtlinie garantiert ein hohes Schutzniveau für die Sicherheit von Menschen, Haus- und Nutztieren sowie Gütern. Ein weiteres Ziel ist ein freier Warenverkehr der „elektrischen Betriebsmittel“ im europäischen Binnenmarkt.

Zur Hochspannung gehören Wechselspannungen oberhalb von 1000 V.

In der elektrischen Energietechnik wird der Begriff „Hochspannung“ noch weiter verfeinert.

- Das Mittelspannungsnetz reicht von über 1 kV bis 60 kV, typische Spannungsebenen sind

---

<sup>1</sup>Für Gleichspannung gelten andere Werte

10 kV, 20 kV oder 30 kV. Es dient der Grobverteilung im ländlichen Raum sowie dem Anschluss von Ortschaften oder Stadtteilen. Größere Verbraucher wie Industrieanlagen oder Krankenhäuser oder auch größere Solarparks sind teilweise direkt an das Mittelspannungsnetz angeschlossen.

- Das Hochspannungsnetz umfasst die beiden Spannungsebenen 60 kV und 110 kV. Es dient dem Ferntransport von elektrischer Energie. „Kleinere“ Kraftwerke und einige Großverbraucher, wie beispielsweise die energieintensive Aluminiumindustrie, sind direkt am Hochspannungsnetz angeschlossen.
- Das Höchstspannungsnetz (220 kV oder 380 kV) dient dem Ferntransport. Es wird durch klassische Großkraftwerke (mit Kohle, Gas, Öl, Uran oder Wasserkraft als Energieträger) oder sehr große Windparks gespeist.

## 4.2 Ein- und dreiphasige Netze

Wenn wir von Wechselspannung reden, dann denken wir zunächst an die heimische 230 V - Versorgung. Einer der beiden Anschlüsse wird als Phase  $L^2$ , einer als Neutralleiter  $N$  bezeichnet. Unsere Spannung erhalten wir dadurch, dass wir das Potential der Phase  $L$  auf das des Neutralleiters  $N$  beziehen.

Anders ausgedrückt, das Potential des Neutralleiters  $N$  können wir uns beliebig zeitlich veränderlich vorstellen, das Potential der Phase „pendelt“ sinusförmig um diesen Verlauf herum. Wenn wir uns den zeitlichen Verlauf aber beliebig auswählen dürfen, dann spricht auch nichts gegen einen konstanten Verlauf des Neutralleiters  $N$ , der in eigentlich sämtlichen Darstellungen auftaucht.

Die Spannung  $u(t)$ , also die Potentialdifferenz von Phase und Neutralleiter, ist im Niederspannungsnetz, dem „öffentlichen Stromnetz“, meist weitgehend sinusförmig. Bei Inselnetzen kann der Sinus aber beliebig verzerrt sein oder auch zur Rechteck- oder Dreiecksform entarten.

## 4.3 Spannungen im dreiphasigen Wechselspannungsnetz

Das dreiphasige Wechselstromnetz wird gelegentlich als Kraftstrom, Baustrom, Drehstrom oder Starkstrom bezeichnet. Hierbei handelt es sich um drei Wechselspannungen, die im Idealfall die gleiche Amplitude besitzen und jeweils  $120^\circ$  bzw.  $\frac{2}{3}\pi$  phasenverschoben sind, siehe Abbildung 4.1. Bei einem symmetrischen Netz - also identische Amplituden der Spannungsquellen, identischer Lastwiderstände  $R_{V1} = R_{V2} = R_{V3}$  und einer Phasenverschiebung von jeweils  $120^\circ$  - heben sich die Ströme in den Quellen bzw. in der Last so auf, dass kein Strom durch den Neutralleiter  $N$  fließt:

$$\begin{aligned} i_N(t) &= i_1 + i_2 + i_3 \\ &= \frac{\hat{u}_1}{R} \sin \omega t + \frac{\hat{u}_2}{R} \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{\hat{u}_3}{R} \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right) \\ &= 0 \end{aligned}$$

Natürlich wird sich in den seltensten Fällen ein symmetrisches Netz ergeben, aber es ist zumindest das Ziel einer vernünftigen Dimensionierung. Zumindest in Mitteleuropa wird daher im Mittel- und Hochspannungsnetz (ab 1 kV bzw. ab 50 kV) auf den Neutralleiter verzichtet. Die Spannungsverläufe im dreiphasigen Netz sind in Abbildung 4.2 angegeben.

<sup>2</sup> $L$  englisch: *line conductor*

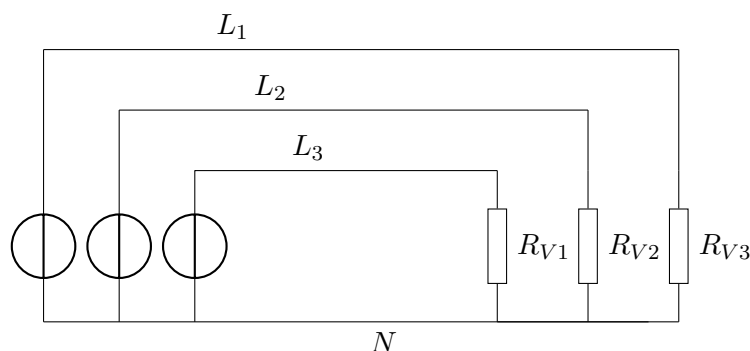


Abbildung 4.1: Aufbau eines dreiphasigen Netzes mit Leitungsbezeichnung

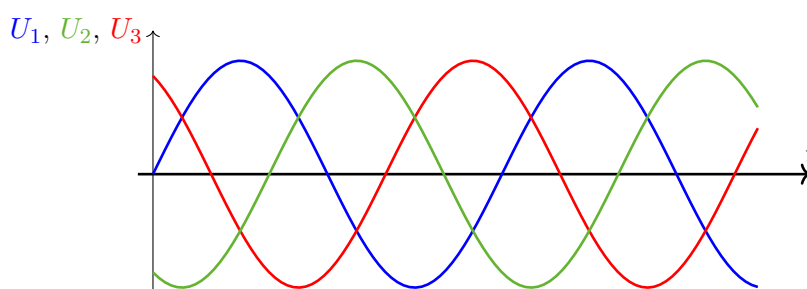


Abbildung 4.2: Spannungsverläufe in einem dreiphasigen symmetrischen sinusförmigen Netz

Diese drei Spannungen beziehen sich auf einen gemeinsamen Neutralleiter  $N$ , der hier lediglich als Bezugsgröße (also  $0\text{ V}$ ) dient. Hiermit lässt sich auch der Begriff Neutralleiter erklären, da dieser *neutral* in der Mitte liegt und keinen Strom führt. Ferner ist für die drei Phasen der Begriff Außenleiter üblich.

Betrachten wir nun die Geometrie im Spannungsdreieck, also in Abbildung 4.3: Der Abstand von der Phase  $L_2$  zum Mittelpunkt  $N$  beträgt  $U_2$ . Der Winkel zwischen  $U_2$  und  $U_{L_2,L_3}$  misst aufgrund der Symmetrie im gleichseitigen Dreieck  $30^\circ = \frac{\pi}{6}$ , so dass die Kantenlänge

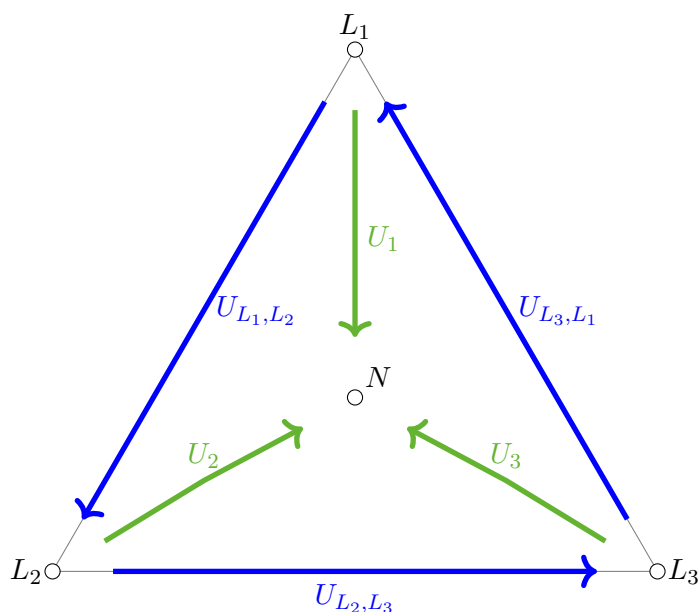
$$U_{L_2,L_3} = 2 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) \cdot U_2 = 2 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot U_2 = \sqrt{3} \cdot U_2 \quad (4.1)$$

beträgt. Bei einer Spannung von  $U_2 = 230\text{ V}$  ergibt sich also eine Außenleiterspannung von  $U_{L_2,L_3} = \sqrt{3} \cdot 230\text{ V} \approx 400\text{ V}$ . Unser einphasiges heimisches  $230\text{ V}$ -Netz ist also *ein Teil* des  $400\text{ V}$ -Drehstromnetzes bzw. kann aus diesem *generiert* werden.

Verbleibt die Frage nach dem Begriff „Drehstrom“: In der Anfangszeit wurden - wie auch heute häufig noch - die drei Ständerwicklungen um einen drehenden Rotor herum angeordnet.

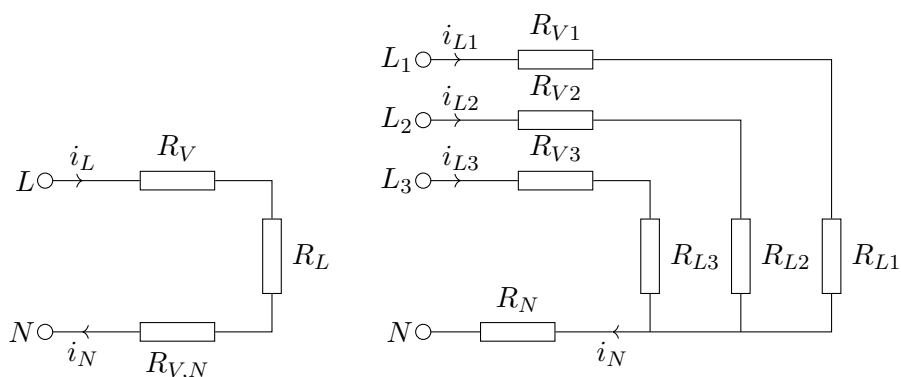
#### 4.4 Vor- und Nachteile des dreiphasigen Wechselstroms

Aus welchem Grund beschäftigen wir uns eigentlich mit Drehstrom? Zuerst sieht man Nachteile, da statt zwei Leitern drei bzw. vier Stromleiter benötigt werden. Neben den Materialkosten für die Leiter kommen ein entsprechender Isolationsaufwand, ein erhöhter Verdrahtungsaufwand sowie ein erhöhter Aufwand bei der Verlegung der Leiter hinzu.



**Abbildung 4.3:** Klemmspannungen im dreiphasigen Netz

Der Vorteil liegt in den geringeren Verlusten beim Energietransport, siehe auch Abbildung 4.4: Bei einem einphasigen Stromkreis muss der Strom  $I_L$  zuerst durch den Leitungswiderstand  $R_V$ , den Verbraucher  $R_L$  und dann nochmals durch den (Rück-)Leitungswiderstand fließen. Die Verluste betragen  $P_V = 2 R_V I_L^2$  und die im Lastwiderstand umgesetzte Leistung beträgt  $P_L = R_L I_L^2$ .



**Abbildung 4.4:** Betrachtung der Leitungsverluste: Verbraucher am einphasigen (links) und am dreiphasigen Netz (rechts)

Der Wirkungsgrad bei einphasiger Übertragung liegt dann bei

$$\eta_1 = \frac{P_L}{P_L + P_V} = \frac{R_L}{R_L + 2R_V} \quad (4.2)$$

Im Falle eines symmetrischen Netzes sind die Widerstände des Verbrauchers im Sternpunkt



angeschlossen. Dieser liegt auf Neutralleiterniveau. So muss der Strom effektiv nur durch Leitungswiderstand und Verbraucher fließen. Die Verluste liegen also bei  $P_V = 3 R_V I_L^2$ , die im Lastwiderstand umgesetzte Leistung beträgt  $P_L = 3 R_L I_L^2$ .

Damit berechnet sich der Wirkungsgrad bei dreiphasiger Übertragung zu

$$\eta_3 = \frac{P_L}{P_L + P_V} = \frac{3 R_L}{3 R_L + 3 R_V} = \frac{R_L}{R_L + R_V} > \eta_1 \quad (4.3)$$

und ist damit höher als beim einphasigen Netz.

Das Ergebnis kann man auch umgekehrt betrachten. Wieviel Energie kann ich mit wieviel Leitern übertragen, wenn ich jeden einzelnen Leiter mit einem maximalen Strom beaufschlagen darf.

- Ein typischer Steckdosenanschluss ist für 16 A ausgelegt, die maximal übertragene Leistung beträgt  $P = 230 \text{ V} \times 16 \text{ A} = 3,68 \text{ kW}$  und es sind zwei<sup>3</sup> Leiter erforderlich.
- Bei einem Drehstromanschluss  $3 \times 16 \text{ A}$  wird mit doppelt soviel (vier<sup>4</sup>) Leitern die dreifache Leistung 11 kW übertragen.

Ferner darf bei symmetrischen Verbrauchern der Neutralleiter entfallen. Oberhalb der Niederspannung - ab 1000 V - werden Netze in Europa als Dreileitersystem, also ohne Neutralleiter, ausgeführt.

#### 4.4.1 Historische Anmerkung

Die weltweit erste Anwendung von Drehstrom zur Energieübertragung wurde 1891 von Lauffen nach Frankfurt am Main anlässlich der in Frankfurt stattfindenden „Internationale Elektrotechnische Ausstellung“ realisiert. Hier wurde über eine dreiphasige Leitung eine Leistung von  $P = 173 \text{ kW}$  bei einer Spannung von  $U = 15 \text{ kV}$  über eine Entfernung von  $l = 176 \text{ km}$  bei einem Wirkungsgrad von  $\eta = 0,75$  übertragen.

Diese Demonstration war ein wichtiger Beitrag zu der Diskussion, ob eine Drehstromübertragung der Wechsel- oder Gleichspannungsübertragung vorzuziehen sei.

#### 4.4.2 Sonstige mehrphasige Netze

Ernsthafte Bedeutung besitzen nur das ein- und das dreiphasige Netz aufgrund des einfachen Aufbaus oder der geringen Verluste beim Energietransport. Für ein zweiphasiges Netz (zwei um  $90^\circ$  versetzte Phasen und Neutralleiter) werden ebenfalls drei Leiter benötigt, da der Neutralleiter erforderlich ist. Ein vierphasiges Netz (vier um jeweils  $90^\circ$  versetzte Phasen) kann aus zwei verschiedenen Zweiphasensystemen gespeist werden. Die Generierung ist mit einem entsprechend gewickelten Synchrongenerator kein Problem.

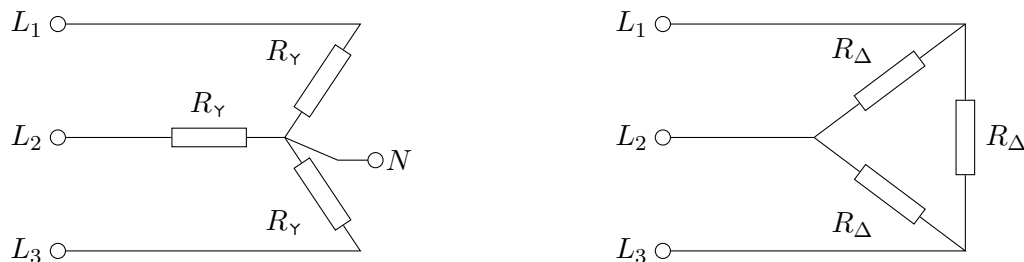
Das in Mittel- und Nordamerika bei kleinen Abnehmern (Privathaushalte, kleine Unternehmen) verbreitete System ist ein doppelt ausgeführtes einphasiges Wechselstromsystem, also zwei 120 V Spannungen, die  $180^\circ$  phasenverschoben sind. Sie können über einen einphasigen Transformator direkt aus dem (aus Gründen geringerer Installationskosten) einphasig ausgeführten Mittelspannungsnetz (z.B. 10 kV) gespeist werden. Hierdurch kann für energieintensive Verbraucher (z.B. Klimaanlage) über die beiden in Reihe liegenden Spannungen insgesamt 240 V bereitgestellt werden.

<sup>3</sup>Phase und Neutralleiter, zuzüglich Schutzleiter

<sup>4</sup>drei Phasen und Neutralleiter, zuzüglich Schutzleiter

### 4.5 Lasten im dreiphasigen Netz

Bei größeren Lasten kann es sinnvoll sein, den Strom (bei gegebener Spannung, im Niederspannungsnetz meist 400 V) dadurch zu begrenzen, dass der Verbraucher über drei Phasen angeschlossen wird. Hierfür gibt es, neben der Kombination aus Beiden, zwei grundlegende Möglichkeiten, die Sternschaltung und die Dreieckschaltung. Beide sind in Abbildung 4.5 dargestellt.



**Abbildung 4.5:** Sternschaltung (links) mit Anschluss für den Neutralleiter und Dreieckschaltung (rechts)

Bei der **Sternschaltung**, symbolisiert durch ein „Y“, ein „Y“ oder „y“ als Index, beziehen sich - symmetrische Belastung vorausgesetzt - die drei Phasen auf den Neutralleiter. Die hier umgesetzte Leistung ist also:

$$\begin{aligned}
 P_Y &= 3 U_{L_1,N} I_1 \\
 &= 3 U_1^2 / R_Y
 \end{aligned}$$

Die Schaltung bietet ferner die Möglichkeit, direkt auf den Sternpunkt *N* zuzugreifen.

Bei einer **Dreieckschaltung**, gekennzeichnet durch ein Dreieck „Δ“, ein „D“ oder „d“ als Index, wird bei gleichem Widerstand *R* die Leistung

$$P_\Delta = 3 U_{L_1-L_2} I_{1,2} \tag{4.4}$$

$$= 3 U_{L_1-L_2}^2 / R_\Delta \tag{4.5}$$

$$\tag{4.6}$$

umgesetzt. Wie in Abbildung 4.3 gezeigt, besteht zwischen den beiden Spannungen das Verhältnis  $\sqrt{3} U_{L_1-N} = U_{L_1-L_2}$ . Bei gleichen Widerständen wird also bei der Dreieckschaltung das Dreifache an Leistung umgesetzt, bzw. für den gleichen Leistungsumsatz muss  $R_\Delta = 3 R_Y$  gewählt werden.

### 4.6 Übersicht über Netze zur Versorgung mit elektrischer Energie

Die Versorgung mit elektrischer Energie wird in (West-)Europa über ein hierarchisch organisiertes Netz mit verschiedenen Spannungsebenen realisiert.

Zum Ferntransport und zur Grobverteilung der elektrischen Energie dienen die **Übertragungsnetze**, die Hoch- und Höchstspannungsnetze. Sie sind aus Gründen der Ausfallsicherheit ring- oder wabenförmig aufgebaut.

Sie werden durch (Groß-)Kraftwerke versorgt und speisen ihre Leistung in die Verteilnetze.

**Versorgungsnetze** werden auch als **Verteilnetze** bezeichnet und dienen der Versorgung<sup>5</sup> von Verbrauchern. Die Energieverteilung erfolgt mit Mittel- und Niederspannung. Das Niederspannungsnetz ist aus Kostengründen meist strahlförmig und besitzt daher einen geringeren Ausfallschutz.

Die Spannungsebenen sind (durch Transformatoren) verbunden, man spricht daher von einem **Verbundnetz**.

Bei **Inselnetzen** handelt es sich um kleine und räumlich begrenzte Netze, die nicht mit einem Verbundnetz verbunden sind. Inselnetze treten neben den namensgebenden Inseln beispielsweise bei abgeschiedenen Bauernhöfen/Almen oder auch in militärischen Bereichen auf.

Bei mobilen abgeschlossenen Netzen spricht man von einem **Bordnetz**, z.B. bei Satelliten, Flugzeugen, Schiffen oder Kraftfahrzeugen.

Bei **Bahnstrom** handelt es sich um einen einphasigen Wechselstrom mit einer Frequenz von  $f = 16,7 \text{ Hz}$ <sup>6</sup>.

Die **Hochspannungsgleichstromübertragung** (HGÜ) dient vorwiegend der Pufferung von Inselnetzen über das Verbundnetz sowie der Energieübertragung über weite Strecken. Der erforderliche technische Mehraufwand wird hier durch einen hohen Wirkungsgrad wettgemacht.

**Seekabel** wirken aufgrund der dicht beieinander liegenden Leitungen wie ein Kondensator. Da die Kapazität  $C$  mit der Länge zunimmt und der Widerstand  $\frac{1}{j\omega C}$  mit zunehmender Kapazität immer kleiner wird, sind sie über größere Entfernungen zur Wechselstromübertragung schlecht geeignet. Daher erfolgt bei längeren Entfernungen die Energieübertragung mit Gleichstrom.

## 4.7 Aufbau von Versorgungsnetzen

Elektrischer Strom ist eine stetige Gefahrenquelle. Etwa 2/3 der tödlichen Arbeitsunfälle durch elektrischen Strom trifft elektrische Laien.

Die größte Gefährdung für den Menschen geht vom Niederspannungsnetz aus, allein schon aufgrund der räumlichen Ausdehnung des Niederspannungsnetzes. Daher wurden in den letzten hundert Jahren eine Reihe von Schutzmechanismen entwickelt, die einen Großteil der Gefährdungsquellen eliminieren können und damit einen Schutz für Personen, Nutztiere und Sachwerte realisieren. Entsprechend diesem Grundsatz sollen elektrische Netze so aufgebaut bzw. gesichert werden, dass im Falle eines Fehlers der Strom bezüglich seiner Zeitdauer oder seiner Stärke auf ein ungefährliches Maß begrenzt wird.

Diese Schutzeinrichtungen werden neben den typischen Netzformen im Folgenden erläutert.

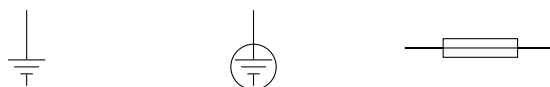


Abbildung 4.6: Schaltungsplansymbole aus dem Bereich Schutzeinrichtung, v.l.n.r. Erdung, Schutzleiteranschluss (PE), Sicherung

### 4.7.1 Schutzeinrichtungen

#### Sicherung

Eine Sicherung ist eine Überstromschutzeinrichtung (OCP, Over Current Protection), die einen Stromkreis unterbricht, wenn ein Strom oberhalb des Grenzwertes über eine gewisse Zeitspanne fließt. Hierdurch werden sowohl die Leitungen als auch Geräte vor einer übermäßigen Erwärmung geschützt. Sicherungen werden nach ihrer Stromgrenze und ihrer Ansprechgeschwindigkeit (träge bis fein) unterteilt. Je nach Einsatz kommen Schmelzsicherungen oder Sicherungsautomaten zum Einsatz. Das Schaltzeichen ist in Abbildung 4.6 angegeben.

#### Schutzleiter

Der Schutzleiter, auch *PE-Leiter*<sup>7</sup> genannt, ist eine Schutzeinrichtung im Niederspannungsnetz. Im Fehlerfall, wenn eine Phase mit einem Gehäuse o.Ä. verbunden ist, soll der Strom über den Schutzleiter abfließen und nicht den Weg durch den menschlichen Körper nehmen. Folglich wird der Schutzleiter an die Metallteile des Verbrauchers (Gehäuse, Lampenschirm, Halterungen ... ), die der Nutzer anfassen könnte, angeschlossen.

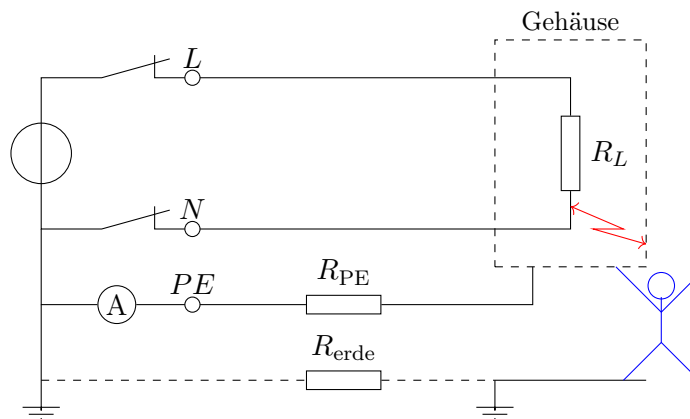


Abbildung 4.7: Prinzip des PE-Leiters: Im Fehlerfall (rot) fließt der Strom im Wesentlichen durch den niederohmigen PE-Leiter und nicht durch den Menschen; gestrichelt die Verbindung über die Erdung

Der Schutzleiter ist durch eine grün-gelb gestreifte Isolierung gekennzeichnet, bzw. ein grün-gelb gekennzeichnete Draht darf ausschließlich als Schutzleiter verwendet werden.

<sup>5</sup>Trotz der Namen werden diese Netze mittlerweile auch zum „Einsammeln“ von Energie aus dezentraler Energiegewinnung (wie z.B. über Solarzellen auf dem Dach) genutzt bzw. ertüchtigt.

<sup>6</sup>früher  $f = 16 \frac{2}{3}$  Hz

<sup>7</sup>PE steht für *protective earth*

### Detektion eines Fehlerstroms

Im Normalfall fließt der Strom nur zwischen den Phasen  $L_1$  bis  $L_3$  bzw. zwischen der Phase  $L$  und dem Neutralleiter  $N$ . Im Fehlerfall fließt ein Teil des Stroms über den Schutzleiter  $PE$ , wie in Abbildung 4.7 gezeigt.

Ein durch den Schutzleiter  $PE$  fließender Strom kann natürlich über ein im  $PE$ -Leiter verschaltetes Strommessgerät bestimmt werden. Dieser Strom durch den  $PE$ -Leiter wird Fehlerstrom genannt.

Praktischer ist es jedoch, die Summe der Ströme durch die Leiter  $L_1$  bis  $L_3$  und  $N$  zu messen. Die Summe dieser Ströme beträgt im fehlerfreien Zustand Null, eine Abweichung wird durch einen Summenstromwandler gemessen. Sämtliche Leiter (außer dem  $PE$ -Leiter natürlich) werden in die gleiche Richtung durch einen weichmagnetischen Kern geführt. Jeder der Ströme bedingt einen Anteil des im Magnetring entstehenden Magnetfelds. Im störungsfreien Fall kompensieren sich die Anteile. Sollte eine Störung - ein Fehlerstrom - vorliegen, bildet sich ein magnetischer Fluss  $\Phi$  aus. Dieser Fluss ist abhängig von der Stärke des Fehlerstroms bzw. der Stärke des Summenstroms der Leiter. Der Fluss kann durch eine Sensorspule detektiert werden.

Das Symbol im Schaltplan ist ein um die zu überwachenden Leiter geschlungenes Oval. Dieses symbolisiert den Ferritkern, durch den die Leiter geführt werden.

Prinzipiell ist der Fehlerstrom bei einem Stromfluss in den Phasen  $L$  und Nulleiter  $N$  nie Null, da jede Leitung eine zumindest kleine Kapazität zur Erdung besitzt. Ferner ergibt sich eine Stromdifferenz, falls sich im Verbraucher ein Energiespeicher befindet oder die Last induktiven oder kapazitiven Charakter besitzt. So bilden beispielsweise Waschmaschinen mit Frequenzumrichter, die in Altbauten mit nicht zeitgemäßer Installation betrieben werden, eine typische Fehlerquelle. Es wird daher nur überwacht, dass der Fehlerstrom unter einer gewissen zulässigen Grenze bleibt.

### Fehlerstrom-Schutzschalter

Der Fehlerstrom-Schutzschalter (RCD, Residual Current Device) detektiert einen Fehlerstrom und trennt im Fehlerfall allpolig (die Phase oder die Phasen sowie den Neutralleiter, nicht den Schutzleiter) den Verbraucher vom Netz. Der Fehlerstrom-Schutzschalter spricht an, sobald der Fehlerstrom eine bestimmte Grenze überschreitet. In Deutschland ist im Haushalt für Steckdosen oder in Badezimmern eine Grenze von 30 mA üblich.

Im Sprachgebrauch ist ferner die Bezeichnung *FI-Schalter* üblich, wobei F für Fehler und I für den Strom steht.

### Differenzstrom-Überwachung

Durch ein Differenzstrom-Überwachungsgerät (RCM, Residual Current Monitor) wird der Differenzstrom überwacht. Es ist von der Funktionsweise her mit einem Fehlerstrom-Schutzschalter (RCD) vergleichbar, allerdings schaltet ein RCM die Leistung nicht ab, sondern gibt lediglich eine „Meldung“ über einen fließenden Fehlerstrom aus. Die Fehlerreaktion kann dann abhängig vom Prozess festgelegt werden und von Warnungen bis zur teilweisen oder vollständigen Abschaltung des Prozesses reichen.

Differenzstrom-Überwachungen werden da eingesetzt, wo der Folgeschaden einer sofortigen Abschaltung an der Detektionsstelle einen größeren Schaden bedingt.



**Abbildung 4.8:** RCM für den industriellen Einsatz (links) und Isolationsüberwachung für IT-Netze (rechts) [Ben16],

#### 4.7.2 Das TN-Netz

Ein TN-Netz (aus dem französischen *Terre Neutre*) zeichnet sich durch eine Erdung und „Nullung“ des Sternpunkts auf der Unterspannungsseite am Ortsnetztransformator aus. Dies ist in Abbildung 4.9 links zu erkennen.

Diese Netze gibt es in verschiedenen Ausprägungen, im Wesentlichen unterscheiden sie sich in der Art, wie der *PE*-Leiter geführt wird.

- Wird vom Sternpunkt des Ortsnetztransformators der *N* und der *PE*-Leiter konsequent bis zum Endverbraucher in einem Leiter geführt, spricht man von einem „PEN“-Leiter. Das System wird dann TN-C-System (*Terre Neutre Combiné*) genannt. Wird in diesem Netz eine Phase unterbrochen, verschiebt sich der Nullpunkt, und am Schutzleiter (*PE*) liegt eine gefährliche Spannung an. Auch aus diesem Grund ist diese Art von Netzen in Deutschland nur noch in Altanlagen zu finden.

Auch ist ein PEN-Leiter EMV-mäßig ungünstig, da in einem PEN-Leiter Streuströme<sup>8</sup> „vagabundieren“ können.

- Werden Neutralleiter *N* und Schutzleiter *PE* bereits am Ortsnetztransformator aufgetrennt, spricht man von einem TN-S-System (*Terre Neutre Séparé*). Diese insgesamt sehr sichere Installationsart findet man vorwiegend in Industrieanlagen, die mit einem eigenen Transformator direkt aus dem Mittelspannungsnetz versorgt werden.
- Werden Neutralleiter *N* und Schutzleiter *PE* beim Ortsnetztransformator zu einem PEN-Leiter zusammengefasst (TN-C) und erst am Verbraucher (z.B. Hausanschluss) aufgetrennt (TN-S), erhält man ein TN-C-S-System (*Terre Neutre Combiné Séparé*), wie es in Mitteleuropa Standard und bei Neuanlagen Vorschrift ist.

#### 4.7.3 Das TT-Netz

Beim TT-Netz (*Terre Terre*) verzichtet man auf einen expliziten Schutzleiter. Es wird stattdessen eine gemeinsame Erdverbindung genutzt. Vorteil ist neben dem geringeren Installationsaufwand,

<sup>8</sup>Kopplungen zwischen den Phasen und dem Neutralleiter, z.B. durch hochfrequente Anlagen mit Schirmung, kapazitive und induktive Verbraucher

dass kaum Strom über Schutzleiter fließt, da die Erde ja einen gewissen Widerstand aufweist. Allerdings fließt dieser Strom bevorzugt durch metallene Verbindungen im Erdreich wie Datennetze oder Wasserleitungen, was wiederum zu EMV-Störungen oder elektrochemischen Korrosionsschäden führen kann.

Fehlerstromschutzeinrichtungen sind hier ebenfalls verbreitet. Das Auslöseverhalten im Fehlerfall ist vom aktuellen Erdwiderstand abhängig.

Diese Netze sind in Süd- und Westeuropa typisch.

#### 4.7.4 Das IT-Netz

Das IT-Netz (*Isolé Terre*) ist ein Niederspannungsnetz, das generatorseitig nicht geerdet ist. Der Vorteil ist, dass das Berühren eines einzelnen Leiters gefahrlos möglich ist, da ein Stromfluss erst dann stattfinden kann, wenn der Stromkreis an einer weiteren Stelle berührt wird.

Das Netz ist *einfehlersicher*, da ein einzelner Fehler - typischerweise ein Erdschluss - die Funktionsweise des Netzes nicht beeinträchtigt.

Anwendung erfährt das IT-Netz daher in Bereichen, bei denen trotz eines Fehlers die Funktionalität sichergestellt werden soll. Beispiele findet man im Bereich der Wehrtechnik, bei Fahrzeugen wie Zügen oder Schiffen, bei mobilen Arbeitsmaschinen oder in Krankenhäusern. Im letzteren existiert das IT-Netz parallel zum TN-Netz. Die Steckdosen unterscheiden sich dann bezüglich der Steckerform, oder sie sind farblich markiert.

Liegt bereits ein Fehler vor, ist das Netz beim Auftreten eines weiteren Fehlers nicht mehr sicher. Daher wird bei IT-Netzen die Isolation des Netzes gegenüber der Erde mithilfe eines Isolationswächters dauerhaft überwacht, siehe auch Abbildung 4.8.

IT-Netze sind meist (räumlich) sehr begrenzt. Dadurch wird die Wahrscheinlichkeit, dass ein weiterer Fehler auftritt, minimiert. Ferner kann die Fehlersuche effektiv durchgeführt werden.

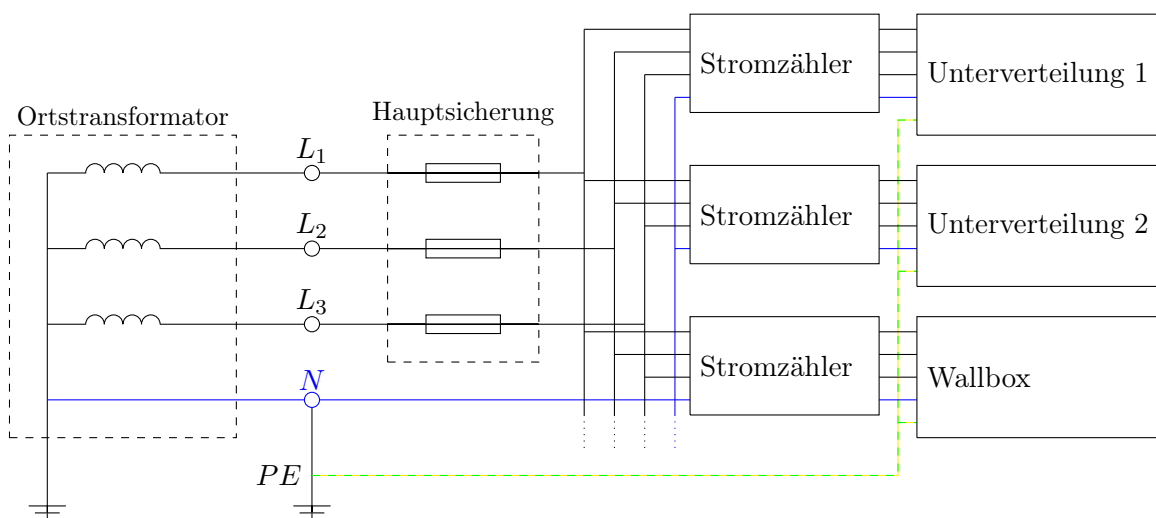
#### 4.7.5 Typischer Hausanschluss in einem TN-Netz

Ein in Deutschland typischer Hausanschluss ist in Abbildung 4.9 skizziert.

Das örtliche Niederspannungsnetz entsteht an einem Ortsnetztransformator, bei dem die Versorgungsspannung aus dem Mittelspannungsnetz auf die Nennspannung von  $U_N = 400\text{ V}$  heruntertransformiert wird. Das Netz wird mit vier Leitern, drei Phasen  $L_1$  bis  $L_3$  und dem Neutralleiter  $N$ , an die Häuser geführt. Die einzelnen Häuser werden parallelgeschaltet. Praktischerweise liegen diese Stränge (vier Adern) im städtischen Gebiet unter dem Bürgersteig. Von diesem Strang führen dann Stichleitungen bis zu den einzelnen Häusern. Der Übergabepunkt liegt meist im Keller.

Dort wird der  $PE$  „aufgelegt“, also an den Neutralleiter  $N$  angeschlossen. Hier befinden sich ferner die Hauptsicherungen, die in jede Phase  $L$ , jedoch nicht in den Neutralleiter  $N$  und den Schutzleiter  $PE$  gehören. Diese fünf Adern werden ggf. zu Unterverteilungen (Wohnungen, Etagen, Nebengebäude, Automobilladesystemen ...) weiterverteilt. Spätestens dort befinden sich dann die Stromzähler.

In den Unterverteilungen befinden sich die Sicherungseinrichtungen, heutzutage meist RCD (FI-Schalter) und Sicherungsautomaten. Größere Verbraucher (Herd, Durchlauferhitzer) werden dreiphasig angeschlossen, da die Strombelastung der Adern meist auf 16 A begrenzt ist. Teilweise werden RCD und OVP in einem Gerät angeboten.



**Abbildung 4.9:** Typischer Hausanschluss in einem TN-System: Am Hausanschlusskasten (symbolisiert durch die Klemmen) wird der PE aufgelegt. Neutralleiter und PE werden nicht durch Sicherungen abgesichert. Die Fehler- und Überstromabsicherung erfolgen in den Unterverteilungen.

#### 4.7.6 Bedeutung des Stromnetzes und dessen Anschluss für den Maschinenbau

Die typischen elektrischen Verbraucher in Maschinen und Anlagen sind elektrische Antriebe sowie die Informationstechnik (Messen, Steuern, Regeln), das Erwärmen (Kunststoff, Schweißen, ...) und die Beleuchtung. Besondere Achtsamkeit ist gefordert, wenn Anlagen oder Komponenten nicht ein rein ohm'sches Verhalten besitzen oder geschaltet betrieben werden.

Außerdem sind schaltende Verbraucher aufgrund ihrer Netzzrückwirkung problematisch. Zur Reduzierung der Netzzrückwirkung besitzen derartige Verbraucher eine Filterstufe, die das Versorgungsnetz und den Verbraucher jeweils vor Strom- und Spannungsspitzen schützen. Hierzu gehören Drosseln, die die Ströme glätten sollen, und Kondensatoren, die die Spannung glätten sollen. So besitzen Frequenzumrichter neben Netzdrosseln zwischen Neutralleiter und Phasen geschaltete „X-Kondensatoren“ und zwischen Phasen und Gehäuse geschaltete „Y-Kondensatoren“.

Die Zuschaltung eines Verbrauchers erfolgt schlagartig. Dieses Einschalten stellt einen Sprung der Spannung dar. Die ideale Sprungfunktion enthält alle Frequenzen, so dass der Verbraucher beim Einschalten mit Spannungen aller Frequenzen beaufschlagt wird. Damit wirkt eine Kapazität im Eingangsbereich ( $X_C = 1/\omega C$  mit  $\omega$  groß) wie ein Kurzschluss, so dass ohne Gegenmaßnahmen ein sehr hoher Impulsstrom entstehen kann.

Ein geschalteter Strom durch eine Induktivität führt nach  $u = L di/dt$  zu Spannungsspitzen.

Als Folge können Ableitströme auftreten, die über den Schutzleiter zur Quelle bzw. zum Sternpunkt fließen. Diese Ströme können Motorkugellager beeinträchtigen, zur Gefahr für den Menschen werden oder die Fehlerstromabschaltung fälschlicherweise auslösen.

Ferner kann der Betrieb an IT-Netzen untersagt sein, da eine kapazitive Kopplung einen Erdschluss darstellt. Sind die Ableitströme hochfrequent oder geschaltet, können Signalleitungen durch sie beeinflusst werden. Teilweise ist in IT-Netzen die Verwendung von Netzfiltern unter-



sagt, so dass diese gegebenenfalls aus den (Serien-)Geräten bzw. Komponenten wieder ausgebaut werden müssen.

Zwei wichtige, eigentlich selbstverständliche Grundregeln:

- Überprüfen Sie bereits im Rahmen der Komponentenauswahl, ob die entsprechenden Komponente im Stromnetz des Kunden betrieben werden darf!
- Probleme im EMV-Konzept, die während der Inbetriebnahme auftreten, und Maßnahmen zu deren Eliminierung sind zu dokumentieren. Greifen Sie hierzu im Zweifel auch auf Experten der eigenen Elektrokonstruktion oder die der Zulieferer oder Kunden zurück.

## 4.8 Aufbau von Übertragungsnetzen

In der Energiewirtschaft wird zwischen Primärenergie (fossile Energieträger wie Kohle und Gas, Uran, mittlerweile und je nach Diskussion auch Wasserkraft, Wind und Sonne) und Sekundärenergie (Elektrizität) unterschieden. Es wird im Allgemeinen als wirtschaftlicher angesehen, die Primärenergie in die Nähe des Verbrauchers zu transportieren und dort in Sekundärenergie zu wandeln.



**Abbildung 4.10:** links ein Hochspannungsmast mit Zweierbündeln einer 220 kV - Leitung, erkennbar an jeweils 2 in Reihe liegenden Isolatoren, rechts zwei 110 kV-Leitungen

Um Spitzen im Strombedarf besser abfedern zu können, sind die einzelnen regionalen Netze verbunden. Dadurch müssen weniger Leistungsreserven vorgehalten werden und das Stromnetz wird insgesamt stabiler und zuverlässiger. So sind Stromausfälle in Mitteleuropa mittlerweile sehr selten und wenn, dann sind sie in der Regel sowohl räumlich als auch zeitlich begrenzt.

Typischerweise wird bei der Stromversorgung mit verschiedenen Spannungsebenen gearbeitet.

Diese Spannungsebenen und damit auch die Teilnetze sind durch Transformatoren in den Umspannwerken verbunden, man spricht daher auch von einem **Verbundnetz**. Alle Teilnetze in diesem Verbundnetz laufen synchron mit der gleichen Frequenz, d.h., die Nulldurchgänge treten im ganzen Verbundnetz zum gleichen Zeitpunkt auf.

Der Bedarf an Elektrizität in bestimmten Regionen wird im Vorfeld abgeschätzt („simuliert“), und Großverbraucher müssen ihren Bedarf anmelden. Anhand der Ergebnisse wird festgelegt, welche Leitung wann und wie benötigt und belastet wird. Außerdem muss verhindert werden, dass Ströme im Kreis fließen.

#### 4.8.1 Grundlagen der Energieübertragung

Leider ist der Energietransport mit Verlusten verbunden. Daher wird bei der Fernübertragung ein möglichst hohes Spannungsniveau angestrebt.

Der Großteil der Energie wird dreiphasig über Freilandleitungen übertragen. Außerdem gibt es noch Erdleitungen, Hochspannungsgleichspannungsübertragungen (HGÜ), Traversen mit Supraleitern ... , die hier aber nicht weiter behandelt werden.

Üblich sind in Europa Spannungen von 110 kV, 220 kV und 380 kV, im Mittelasien zusätzlich noch 720 kV und 1150 kV. Die Handhabung dieser hoher Spannungen ist recht aufwändig (Isolation!) und muss vor der Weiterleitung an die Verbraucher auf niedrigere Niveaus abgesenkt werden.

Die Leiter bestehen meist aus einem Drahtseil als Tragseil, das mit Aluminiumleitern „umflochten“ ist. Eine typische Größenordnung für den Nennstrom ist 300 A, wobei zur wirtschaftlichen Übertragung meist eine Strombelastung von  $1 \text{ A/mm}^2$  nicht überschritten wird. Im Winter darf aufgrund der witterungsbedingten besseren Kühlung die Strombelastung erhöht werden. Um höhere Leistungen übertragen zu können, werden teilweise auch Zweierbündel<sup>9</sup>, im 380 kV-Netz auch Dreier- oder Viererbündel (oder gegebenenfalls auch mehr) verwendet.

Bei den angegebenen Spannungen handelt es sich jeweils um die Außenleiterspannung.

Damit lässt sich die übertragene Leistung abschätzen: Bei einer 380 kV-Leitung, dreiphasig mit Viererbündel lässt sich insgesamt eine Nennleistung von

$$P_N = \sqrt{3} \cdot 380 \text{ kV} \cdot 4 \cdot 300 \text{ A} \approx 790 \text{ MW} \quad (4.7)$$

übertragen. Die Maximalwerte können deutlich höher liegen, z.B. bei einer Querschnittsfläche von  $40 \text{ mm}^2$  bei 2 kA je Leiter.

Die drei Außenleiter werden an den Strommasten auch räumlich im Dreieck geführt.

Der Abstand zwischen den Leitern wird so gewählt, dass die Spannung nicht reicht, die Luft zu ionisieren um ein Überschlag (Blitz) zu verhindern.

Nicht verhindern lässt sich die kapazitive Wirkung zwischen den Leitern und der Erde (dem Boden). Diese soll aber bitte symmetrisch sein, daher wird die Reihenfolge, welcher Leiter oben oder unten ist) in bestimmten Abständen gewechselt.

An der Spitze von Strommasten wird ein weiteres einzelnes Kabel geführt. Es ist auf beiden Seiten

---

<sup>9</sup>zwei Leiter mit Abstandhaltern, die parallel gespannt werden

geerdet und fungiert als Blitzableiter, wodurch auch das offensichtliche Fehlen von Isolatoren geklärt wäre. In diesem Erdungsleiter wird auch häufig noch ein Lichtwellenleiter geführt, über den die netzinterne Kommunikation abgewickelt werden kann. Überschüssige Datenübertragungskapazitäten werden (gegen Entgelt) Telekommunikationsunternehmen zur Verfügung gestellt.

#### 4.8.2 „Qualität“ des Stromnetzes

Wird mehr Energie in das Stromnetz eingespeist als entnommen, steigt die Netzfrequenz, im umgekehrten Fall sinkt sie. Dies liegt an den Generatoren, die einen Großteil unseres Stromnetzes speisen.

Wird das Stromnetz belastet, sinkt die Drehzahl bzw. die Drehfrequenz der am Netz (motorisch und generatorisch) betriebenen Maschinen und damit auch die Netzfrequenz. Wird ein Antrieb belastet, läuft er eben langsamer.

Das Einhalten der Netzfrequenz mit einer möglichst geringen Toleranz ist damit auch ein Qualitätsmerkmal für das Netz. In Mitteleuropa liegt die Abweichung meist unter 0,2 Hz.

#### 4.8.3 Maßnahmen zur Stabilisierung des Stromnetzes

Das Stromnetz als solches ist erstmal nicht in der Lage, Energie zu speichern. Lediglich an das Netz gekoppelten Motoren bzw. Generatoren speichern durch die rotierenden Rotoren kinetische Energie. Die Netzlast, die Summe der Verbraucher, wird daher im Vorfeld geschätzt (simuliert) und dann die entsprechende Kraftwerksleistung gestellt. Ist die Abweichung gering, wird versucht, sie durch Regelleistung (Betrieb der Kraftwerke in einem nicht optimalen Arbeitspunkt) auszugleichen.

Wird die Abweichung zwischen eingespeister und entnommener Energie größer, werden in verschiedenen Schritten größere Verbraucher abgeschaltet bzw. vom Netz getrennt. Man spricht vom „Lastabwurf“.

Reicht dieses immer noch nicht, werden Gebiete bzw. Regionen vom Netz getrennt und die darin befindlichen Kraftwerke abgeschaltet.

Allerdings kann dadurch das Netz weiter destabilisiert werden.

#### 4.8.4 Verluste im Verbundnetz

Die typischen Quellen für Energieverluste im Stromnetz sind

- Leitungsverluste, also Verluste aufgrund des (vorwiegend ohm'schen) Widerstand der Leitungen
- Energiewandelverluste, z.B. durch den Wirkungsgrad der Transformatoren (siehe auch Tabelle 3.1)
- Regelverluste, also Verluste, die bei der Bemühung entstehen, das Stromnetz stabil bzw. auf 50 Hz zu halten, siehe Abschnitte 4.8.2 bis 4.8.3, z.B. durch den Betrieb einer Turbine<sup>10</sup> in einem energetisch suboptimalen Arbeitspunkt.

<sup>10</sup> Auch, wenn die Verluste physikalisch im Kraftwerk auftreten, so werden sie doch ursächlich den Netzverlusten zugeordnet

### Abschätzung der Leitungsverluste

Wie groß sind die Verluste bei dem Transport 550 MW (dies entspricht der halben Bemessungsleistung eines modernen Kraftwerks (Datteln 4)) über eine 380 kV Freilandleitung auf eine Länge von 100 km?



**Abbildung 4.11:** Hochspannungsmast mit Viererbündeln einer 380 kV - Leitung, erkennbar an jeweils 3 in Reihe liegenden Isolatoren

Der Strom je Außenleiter beträgt nach  $P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$  etwa  $I = 835$  A. Wir gehen von Viererbündeln mit einem Leiterquerschnitt von jeweils  $A = 250 \text{ mm}^2$  aus. Der Werkstoff ist Aluminium mit  $\varrho \approx 0,027 \frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}}$ .

Mit

$$P_{\text{Verlust}} = U I = R I^2 \quad (4.8)$$

und einem Widerstand von

$$R = \varrho_{\text{Al}} \cdot \frac{l}{4 \cdot A} \approx 0,027 \frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}} \cdot \frac{100 \text{ km}}{4 \cdot 250 \text{ mm}^2} = 2,7 \Omega \quad (4.9)$$

je Leitungsbündel ergibt sich ein Gesamtverlust von

$$P_{550 \text{ MW}} = 3 \cdot 2,7 \Omega \cdot (835 \text{ A})^2 \approx 5,6 \text{ MW} \quad (4.10)$$

pro Abschnitt von 100 km.

Zur Verdeutlichung der Größenordnung, dieser Verlust entspricht der Bemessungsleistung einer größeren Onshore-Windkraftanlage (Stand 2020).

Der Wirkungsgrad der Übertragung ergibt sich mit

$$\eta = \frac{P - P_{\text{Verluste}}}{P} \quad (4.11)$$

zu  $\eta_{550\text{MW}} \approx 0,99$ . Die Verluste steigen quadratisch mit zunehmender übertragener Leistung.

#### 4.8.5 Fehlerzustände im Verbundnetz

Denkbare oder typische Fehler im Verbundnetz sind neben Quellen im konstruktiven Aufbau des Netzes (Stabilität der Masten oder der Leitung, Vereisung der Leitungen ...) elektrische Überlastungen von Leitern oder ungewünschte Kurzschlüsse mit oder ohne Erdschluss.

Die häufigste Fehlerquelle im Verbundnetz ist ein Erdschluss eines Leiters, z.B. durch Riss einer Freilandleitung der als Folge eines Unwetters auftritt. Es handelt sich um keinen Kurzschluss im eigentlichen Sinne, da der Sternpunkt nicht direkt geerdet ist. Daher wird der Stromfluss lediglich über die Kapazität zwischen Leiter und Masse geschlossen. Die im Bereich des Erdschlusses hohen Spannungen bedingen hohe Schrittspannungen (eine Spannung zwischen den beiden Füßen), die dem Menschen gefährlich werden können.

Um eine gute Versorgungssicherheit und Netzsicherheit zu gewährleisten, sind die Hoch- und Höchstspannungsnetze meist ring- oder wabenförmig organisiert, wohingegen bei den Verteilnetzen aufgrund der geringen Bedeutung für das Gesamtnetz und aus wirtschaftlichen Gründen meist auf eine einfache strahlenförmige Netztopologie zurückgegriffen wird.

## Kapitel 5

# Stromrichtertechnik

Stromrichter werden dazu eingesetzt, Gleich- oder Wechselspannungen in andere Gleich- oder Wechselspannungen zu überführen. Die Grundidee ist, Ventile schaltend zu betreiben. So ist im leitenden Zustand der Spannungsabfall  $U$  am Ventil und im sperrenden Zustand der Strom  $I$  durch das Ventil jeweils klein. Es entstehen nur sehr geringe Verluste  $P = U I$ , und der Wirkungsgrad  $\eta$  ist dementsprechend hoch.

Die Ausgangsspannung lässt sich dabei bezüglich der Amplitude, der Frequenz und der Form (z.B. sinusförmig) beeinflussen. Man spricht allgemein von Umformern oder Umsetzern. Sollte das Signal prinzipiell gleich bleiben (z.B. von Gleichspannung zu einer anderen Gleichspannung), ist auch der Begriff *Wandler* üblich.

Man unterscheidet die Stromrichtertechniken nach Art der Energieumformung. In Tabelle 5.1 sind diese systematisiert dargestellt, wobei sich *Eingangsspannung* und *Ausgangsspannung* auf die vorwiegende Richtung des Energieflusses bezieht.

Früher wurde die Umformung z.B. durch gekoppelte elektrische Maschinen (Verwendung der Maschinen als Motor oder Generator, Verwendung von Gleichstrom und Drehstrommaschinen) realisiert. Typische Eigenschaften von Stromrichterschaltungen sind

- Wartungsarmut
- geringer Verschleiß
- verhältnismäßig geringe Baugröße
- ein meist sehr guter Wirkungsgrad
- hohe Empfindlichkeit gegenüber Überstrom (thermische Überlastung)
- hohe Empfindlichkeit gegenüber Überspannung (durch Zerstörung der i.d.R. dünnen Isolationsschicht)

Die ersten Schritte in der Leistungselektronik wurden bereits 1902 mit dem Bau eines Quecksilberdampfgleichrichters realisiert. Steuerbare Halbleiterventile waren ab 1957 zur Marktreife entwickelt. Seit den 1960er Jahren stehen beispielsweise regelbare Frequenzumrichter zur Verfügung, seit den 1980er Jahren gibt es in zunehmenden Maße und seit den 1990er Jahren fast ausnahmslos digital arbeitende Frequenzumrichter.

Die meisten Stromrichter arbeiten spannungseinprägend, so dass nur ein mittelbarer Einfluss auf den Strom und damit auf die Leistung besteht. Außerdem besteht die bereits erwähnte Empfindlichkeit gegenüber Überstrom. Daher wird der Strom meistens geregelt, und die Spannung fungiert hierbei als Stellglied. Typisch ist eine Stromregelung durch eine Kaskade.

Ausgangsgröße	Wechselspannung (AC)	Gleichspannung (DC)
Eingangsgröße		
Wechselspannung (AC)	<p>Wechselstromsteller: formt Wechselstrom mit konstanter Frequenz, Einsatz z.B. für Lampen (Dimmer) oder Universalmotoren (Haushaltsgeräte)</p> <p>Umrichter: Amplituden- und Frequenzänderung, z.B. für Direktumrichter</p>	<p>Gleichrichter: ungesteuerter Gleichrichter als erste Stufe eines Schaltnetzteils, für DC-Motoren oder Galvanische Bäder</p> <p>gesteuerter Gleichrichter für eine frei gewählte Gleichspannung, z.B. für eine HGÜ</p>
Gleichspannung (DC)	<p>Wechselrichter: formt variablen Wechsel- oder Drehstrom für Drehstrommotoren oder für Notstromversorgungen, wird meist gespeist aus Akkumulatoren oder über einen Gleichrichter</p>	<p>Gleichstromsteller: <i>DC-DC-Wandler</i>, Gleichstrommotoren oder zur Spannungsanpassung in Gleichstromnetzen wie z.B. zwischen 5 V und <math>\pm 15</math> V (Digitalschaltungen), 24 V (SPS) oder 48 V (Telekommunikation)</p>

**Tabelle 5.1:** Übersicht über die typischen Stromrichtertechniken

Stromrichterschaltungen bestehen aus der Leistungselektronik und - sollte die Schaltung auch steuerbare Elemente unterhalten - einer Ansteuerelektronik zur Ansteuerung dieser.

Kommt die Schaltung ohne Ansteuerelektronik aus, so spricht man von einer **netzgeführten**<sup>1</sup> Schaltung, ist sie erforderlich wird sie als **selbstgeführt**<sup>2</sup> bezeichnet.

Bei kleinen Leistungen liegen beide Teile dicht nebeneinander und sind beispielsweise auf der gleichen Platine untergebracht. Bei größeren Leistungen sind beide Teile getrennt oder sorgfältig gegeneinander abgeschirmt<sup>3</sup>. Man spricht auch vom **Leistungsteil** bzw. vom **Steuerteil**.

## 5.1 Typische Bauelemente von Stromrichterschaltungen

### 5.1.1 Die Diode

Die Diode ist ein ungesteuertes Ventil. Sobald die Spannung an der Anode über der der Kathode liegt, sinkt ihr Widerstand auf einen sehr niedrigen Wert.

In der Leistungselektronik werden gerne Schottky-Dioden verwendet. Diese sind bis mehrere Kilovolt verfügbar und verursachen lediglich geringe Verluste.

Dioden schalten sehr schnell und besitzen eine Schwellspannung, also der Spannung, ab der sie leitend werden, zwischen 0,1 V und 0,8 V. Im Folgenden wird die Diode als ideale Diode betrachtet. Das Schaltbild ist in Abbildung 5.1 angegeben.

<sup>1</sup>Die Ausgangsspannung hängt maßgeblich von der Eingangsspannung, dem Netz, ab

<sup>2</sup>Die Ausgangsspannung wird maßgeblich durch den Algorithmus, der durch die Ansteuerelektronik realisiert ist, bestimmt.

<sup>3</sup>aus EMV-Gründen: Die geschalteten Ströme stören die Recheneinrichtung, die auf  $\mu$ Controllern realisiert sind

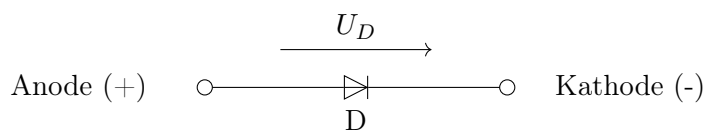


Abbildung 5.1: Schaltzeichen der Diode

### 5.1.2 Steuerbare Ventile

Es gibt verschiedene Arten von steuerbaren Ventilen, z.B. Transistoren, Feldeffekttransistoren (FET), Bipolartransistoren (IGBT), Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistoren (MOSFET) oder Thyristoren.

Ventile, die über einen Strom gesteuert werden, sind beispielsweise bipolare Transistoren. Die drei Anschlüsse haben folgende Bezeichnungen bzw. Aufgaben:

- **Emitter, E**: Hier fließt der zu steuernde Strom hinein.
- **Basis, B**: Fließt von hier aus ein Strom zum Kollektor, dann schaltet das Ventil auf der Strecke Emitter - Kollektor auf leitend.
- **Kollektor, C**: Hier fließen die Ströme vom Emitter und von der Basis wieder hinaus.

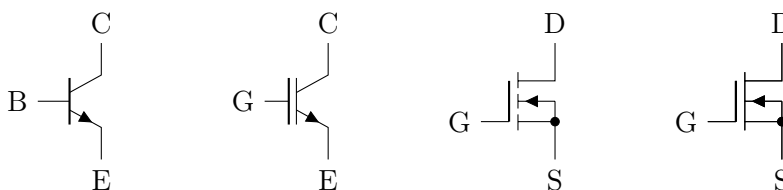


Abbildung 5.2: Schaltzeichen von steuerbaren Ventilen, von links nach rechts: Bipolartransistor (stromgesteuert), IGBT (spannungsgesteuert), Feldeffekttransistor (MOS-FET, spannungsgesteuert, selbstsperrend), und Feldeffekttransistor (MOS-FET, spannungsgesteuert, selbstleitend)

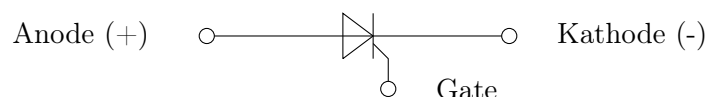
Zu den spannungsgesteuerten Ventilen gehören die Feldeffekttransistoren. Die drei Anschlüsse haben folgende Bezeichnungen bzw. Aufgaben:

- **Gate, G** (englisch für *Gatter*): Die Steuerspannung liegt zwischen Gate und Source an, hierdurch wird der Widerstand zwischen Source und Drain gestellt.
- **Source, S** (englisch für *Quelle*): Hier fließt der zu steuernde Strom hinein.
- **Drain, D** (englisch für *Senke*): Hier fließt der zu steuernde Strom, der beim Emitter hinein fließt, wieder hinaus.

Die in der Leistungselektronik heute weit verbreiteten Bipolartransistoren mit isolierter Gate-Elektrode, engl. *insulated-gate bipolar transistor* (IGBT) sind eine Kombination aus Feldeffekttransistor und bipolarem Transistor. IGBTs arbeiten spannungsgesteuert, besitzt also ein *Gate*, auf der *Kollektor-Emitter*-Strecke herrscht aber der geringe Widerstand eines bipolaren Transistors.



Im Hochleistungsbereich ist der Thyristor verbreitet. Dieses schon seit den 1950er Jahren bekannte Bauteil wird heute noch für hohe Ströme (10 kA-Bereich) und/oder für hohe Spannungen ((10 kV-Bereich) verwendet. Der Thyristor wird auch als steuerbare Diode bezeichnet, was man auch am Schaltbild, Abbildung 5.3 erkennt. Im unbestromten Zustand sperrt der Thyristor in beide Richtungen. Durch eine Ansteuerung über einen hinreichend hohen Strom, einen Zündimpuls  $z$ , wird ein Stromfluss von Anode zur Kathode möglich.



**Abbildung 5.3:** Schaltzeichen eines Thyristors

Im Folgenden beschränken wir uns darauf, dass die Ventile *irgendwie* als Schalter funktionieren, die über die Basis bzw. das Gate leitend geschaltet werden.

Die Ventile werden in der Leistungselektronik durchweg schaltend betrieben, also entweder *leitend* oder *sperrend*. Eine analoge Ansteuerung ist hier zumindest anormal. Als Ansteuerung wird hier als Signal  $z$  verwendet, auch wenn es sich um keinen Thyristor handelt.

### 5.1.3 Die Induktivität

Mathematisch wird das Verhalten von Strom  $i_L(t)$  und Spannung  $u_L(t)$  an einer Induktivität  $L$  durch die Gleichung

$$u_L(t) = L \frac{di_L}{dt} \quad (5.1)$$

beschrieben. Im Falle einer konstanten Spannung bedeutet dies eine konstante Änderung des Stroms, also ein rampenförmiger Anstieg oder Abfall des Stromverlaufs. In Integralschreibweise ergibt diese Gleichung für den Strom durch die Induktivität

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \int_{t_0}^t u_L(t) dt + i_0 \quad (5.2)$$

Die „Integrationskonstante“  $i_0$  ist wichtig, da die Spannung  $u_L$  den Strom lediglich ändert. Das Ein- und Ausschalten der Spannung stellt die größtmögliche Änderung dar. Wird über diesen Spannungssprung integriert, ergibt sich eine rampenförmige Änderung des Stroms  $i_L(t)$ . Der Strom an einer Induktivität springt nicht.

### 5.1.4 Die Kapazität

Kondensatoren in leistungselektronischen Schaltungen übernehmen häufig die Aufgabe eines Filters. Die Kapazität fungiert hierbei als Energiespeicher, und der Energiegehalt ist abhängig von der anliegenden Spannung. Aus der Gleichung

$$i_C(t) = C \frac{du}{dt} \quad (5.3)$$

geht hervor, dass der in ihn hinein- oder herausfließende Strom  $i_C$  proportional zur Spannungsänderung  $\Delta u_C$  ist. An der integralen Form

$$u_C(t) = \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i_C(t) dt + u_0 \quad (5.4)$$

erkennt man wiederum an der Integrationskonstante, dass der in die Kapazität hinein- oder herausfließende Strom die Spannung an der Kapazität lediglich ändert.

Sollte der Strom pulsen, so ergibt sich eine Spannung mit geringer Welligkeit; die Welligkeit verringert sich mit steigender Kapazität  $C$ .

### 5.1.5 Der Transformator

Transformatoren für kleine Leistungen, die mit einer Frequenz von 50 Hz arbeiten, besitzen typischerweise keinen guten Wirkungsgrad  $\eta$ . Sie kommen in leistungselektronischen Schaltungen daher bevorzugt zur Spannungsanpassung bei höheren Frequenzen, im kHz-Bereich, zum Einsatz. In diesem Bereich lassen Sie sich mit gutem Wirkungsgrad, kleinem Bauraum und geringem Materialaufwand konstruieren bzw. bauen.

## 5.2 Schaltfrequenz, schnelle und langsame Vorgänge

Häufig arbeiten Stromrichter mit einer festen Frequenz, der Schaltfrequenz  $f_S$ .

Dies bedeutet, dass in einer Schaltperiode  $T_S$  die Schalterstellung bzw. die Ventilstellung zweimal geändert wird, es wird einmal ein- und einmal ausgeschaltet. Die Einschaltzeit  $T_{\text{ein}}$ , während der das Ventil leitet und die Ausschaltzeit  $T_{\text{aus}}$ , während das Ventil sperrt, ergeben zusammen die Schaltperiode  $T_S = T_{\text{ein}} + T_{\text{aus}}$ . Der Kehrwert ist die Schaltfrequenz  $f_S = \frac{1}{T_S}$ . Typische Schaltfrequenzen für Frequenzumrichter liegen im Bereich von  $f_S = 1 \text{ kHz}$  bis  $f_S = 16 \text{ kHz}$ , je nach Anwendung aber auch deutlich darüber oder darunter.

Man spricht von **schnellen Vorgängen**, wenn das Schaltverhalten als solches betrachtet wird, also Strom und Spannung beim Ein- bzw. Ausschalten.

Bei **langsamen Vorgängen** wird die Veränderung von Mittelwerten über eine größere Anzahl von Abtastperioden  $T_S$  betrachtet.

Hier werden die **mittelschnellen Vorgänge** betrachtet, also das Verhalten über wenige, Größenordnung 1 bis 5 Schaltperioden, sowie die langsamen Vorgänge.

## 5.3 Gleichrichter

*Netzgeführte Gleichrichter* sind Gleichrichter, bei denen sich die Ausgangsspannung aus der Eingangsspannung (dem Netz) und durch die Topologie (den schaltungstechnischen Aufbau) des Gleichrichters ergibt.

Alternativ gibt es *steuerbare* Gleichrichterschaltungen, bei denen die Ausgangsspannung durch eine entsprechende Ansteuerung der Ventile eingestellt werden kann. Diese werden hier nicht behandelt.

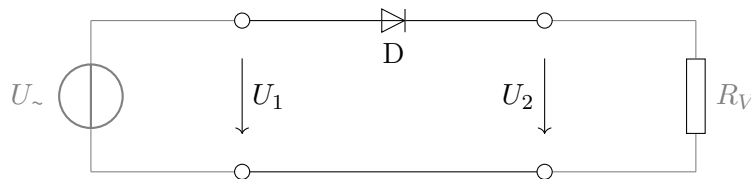
Es gibt zahlreiche Gleichrichterschaltungen, „Topologien“, die meist nach einem Schlüssel benannt werden. Der erste Buchstabe kennzeichnet die Schaltungsart (B für Brückenschaltung, E für Einwegschaltung und M für die Mittelpunktschaltung) und einer darauf folgenden Zahl für die Pulszahl, die die „Gleichstromblöcke“ innerhalb einer Periode angibt.

Im Folgenden gehen wir von einem ohm'schen Verbraucher  $R_V$  aus, so dass Strom und Spannung am Verbraucher proportional zueinander sind.

### Gleichrichter bei einphasigen Netzen (Einweggleichrichter, E1)

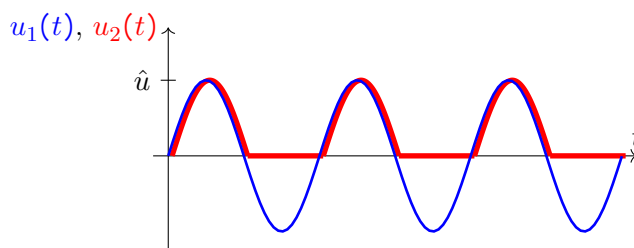
Ein einfacher aus lediglich einer Diode bestehender Gleichrichter ist in Abbildung 5.4 gegeben. Liegt die Spannung an der Anode über der an der Kathode, schaltet die Diode auf *leitend* und

ein Stromfluss Richtung Verbraucher  $R_V$  ist möglich.



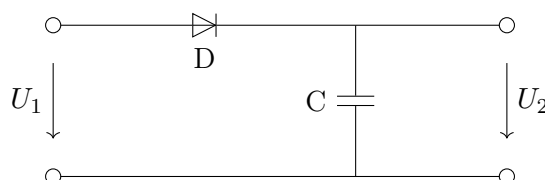
**Abbildung 5.4:** Einfacher einphasiger Gleichrichter, bestehend lediglich aus einer Diode „D“, Spannungsquelle und Last in grau

Eine Eingangsspannung  $u_1(t)$  (in Abbildung 5.5 blau) wird hierdurch gleichgerichtet, so dass sich eine Ausgangsspannung  $u_2(t)$  (rot eingezeichnet) ergibt.



**Abbildung 5.5:** Ausgangsspannung ( $u_2(t)$ , rot) bei einem mit sinusförmiger Spannung gespeisten ( $u_1(t)$ , blau) einphasigen E1-Gleichrichter

Diese Ausgangsspannung  $u_2(t)$  bzw. der hieraus resultierende Strom ist pulsierend bzw. „lückend“<sup>4</sup>. Zur Glättung der Spannung bietet sich eine zum Verbraucher parallel geschaltete Kapazität an, wie in Abbildung 5.6 gezeigt.

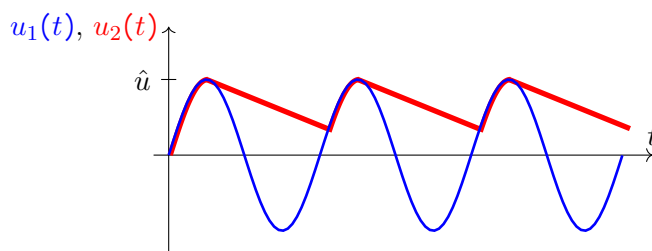


**Abbildung 5.6:** Einfacher einphasiger Gleichrichter, mit Glättungskondensator

Hierdurch wird die Ausgangsspannung  $u_2(t)$  mit steigender Eingangsspannung  $u_1(t)$  geladen und bleibt dann auf diesem Spannungsniveau  $\hat{u}$ , bis die Eingangsspannung  $u_1(t)$  wieder sinkt, und die Kapazität  $C$  nicht mehr geladen, sondern über die Last entladen wird.

Die Entladefunktion ist eine  $e^{-t/\tau}$ -Funktion, die in Abbildung 5.6 linearisiert dargestellt ist. Die Zeitkonstante wird nach  $\tau = R_V \cdot C$  durch die Kapazität  $C$  und die Last (den Entladewiderstand)  $R_V$  beeinflusst .

<sup>4</sup>lückend: teilweise Null

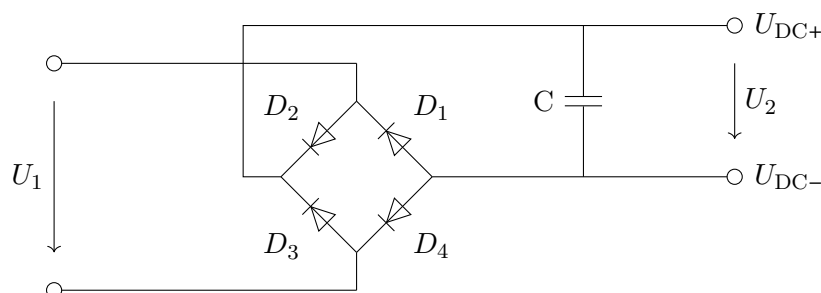


**Abbildung 5.7:** Ausgangsspannung (rot) bei einem einphasigen E1-Gleichrichter mit Ausgangsfilter (Glättungskondensator) bei sinusförmiger Eingangsspannung (blau)

### Brückengleichrichter bei einphasigen Netzen (2-Puls-Brückengleichrichterschaltung, B2)

Beim E1-Gleichrichter sinkt die Ausgangsspannung prinzipbedingt während der Hälfte der Zeit auf Null. Durch einen Glättungskondensator  $C$  kann dieses gepuffert werden. Gerade bei einem kleinen Lastwiderstand wird aber eine sehr große Kapazität benötigt.

Dieses Problem kann durch einen Brückengleichrichter, in Abbildung 5.8 dargestellt, behoben werden. Liegt das Potential der Phase über der des Neutralleiters, fließt der Strom über die



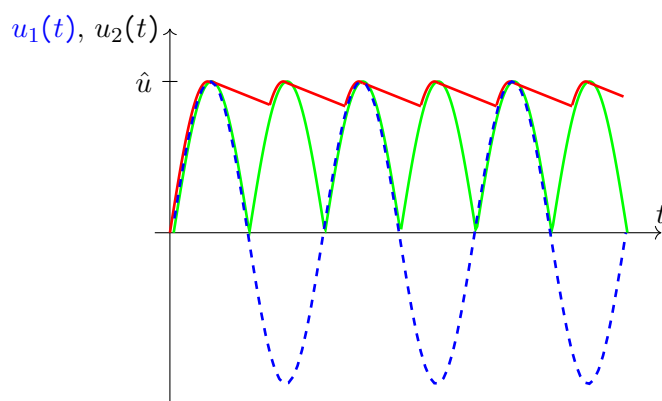
**Abbildung 5.8:** Typische Darstellung eines B2-Brückengleichrichters mit Glättungskondensator

Diode  $D_2$  in die Last hinein. Der Weg über die Diode  $D_1$  ist ihm versperrt, da hier die Diode in Sperrrichtung liegt. Den *Rückweg* nimmt der Strom über die Diode  $D_4$  zurück Richtung Nullleiter. Den Weg über die Diode  $D_1$  würde er nicht nehmen, da er so *ohne Zwang* zu einem höheren Potential fließen würde.

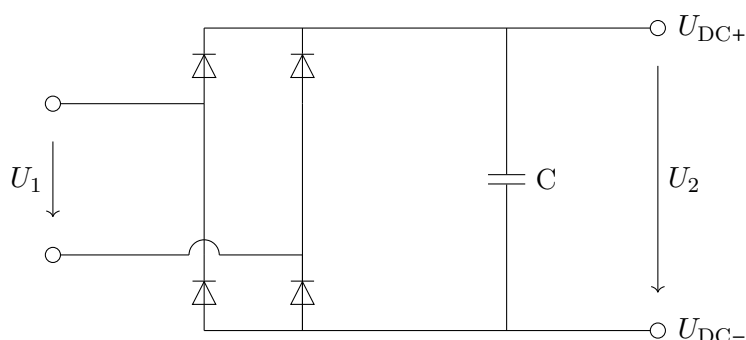
Dadurch sieht die Ausgangsspannung aus, als ob man die untere Hälfte der Sinusbögen nach oben geklappt hätte, siehe Abbildung 5.9.

Auch hier kann durch einen zum Ausgang parallel geschalteten Kondensator die Ausgangsspannung geglättet werden.

Der in Abbildung 5.10 gezeigte Gleichrichter ist identisch mit dem B2-Gleichrichter aus 5.8, lediglich umgezeichnet. Hier lässt sich die Wirkungsweise des Gleichrichters noch wie folgt erklären: Die Zuleitung ( $L$  oder  $N$ ), die das jeweils höhere Potential darstellt, ermöglicht einen Stromfluss zu  $U_{DC+}$ . Die andere Halbbrücke ermöglicht den Rückfluss von  $U_{DC-}$  zum niedrigeren Potential, also  $N$  oder  $L$ .



**Abbildung 5.9:** Ausgangsspannung bei einem B2-Brückengleichrichter ohne (grün) und mit (rot) Ausgangsfilter bei sinusförmiger Eingangsspannung (blau gestrichelt)



**Abbildung 5.10:** Alternative Darstellung eines B2-Brückengleichrichters mit Glättungskondensator

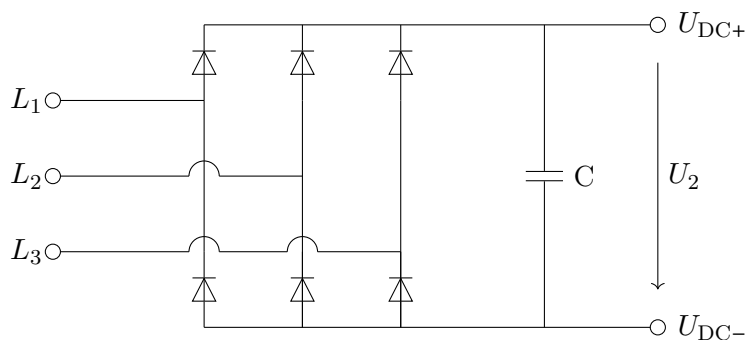
### B6 - Brückengleichrichter bei dreiphasigen Netzen

Die typische Lösung für das Gleichrichten von dreiphasigen Netzen ist der B6-Brückengleichrichter, der in Abbildung 5.11 gezeigt wird.

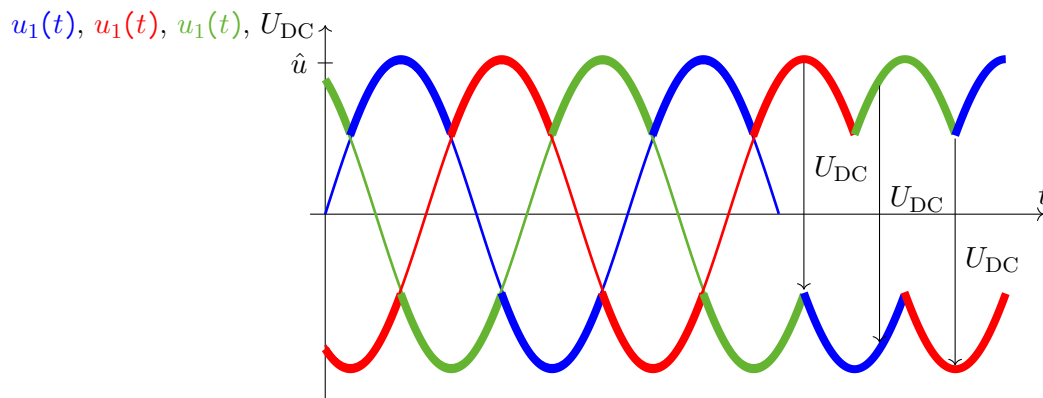
Das Funktionsprinzip des dreiphasigen Gleichrichters ist im Prinzip das Gleiche wie beim B2-Brückengleichrichter aus Abbildung 5.10 für einphasige Netze. Jeweils zwei in Reihe liegende Dioden stellen eine Halbbrücke dar. Über jede der Halbbrücken wird sichergestellt, dass, wenn die zugehörige Phase gerade das höchste Potential darstellt, ein Strom über diese Phase in den Verbraucher fließen kann. Über eine andere Halbbrücke erfolgt der „Rückfluss“ zu der Phase, die gerade das niedrigste Potential darstellt.

Die Phase mit dem jeweils höchsten Potential bildet das Potential  $U_{DC+}$ , die mit dem niedrigsten Potential  $U_{DC-}$ . Dazwischen liegt die Spannung  $U_{DC} = U_{DC+} - U_{DC-}$ .

Abbildung 5.12 zeigt die Spannung der drei Phasen und als dicke Linie das maximale bzw. minimale Potential. Die Ausgangsspannung des Gleichrichters ( $U_2$  bzw.  $U_{DC}$ ) ist die Potentialdifferenz, die hier in der rechten Hälfte in Form von Spannungspfeilen eingezeichnet ist.



**Abbildung 5.11:** B6-Brückengleichrichter für ein dreiphasiges Netz aus drei Halbbrücken und einem Glättungskondensator



**Abbildung 5.12:** Dreiphasiges symmetrisches sinusförmiges Netz (links: blau, rot, grün), Maximal- und Minimalwert (fett), rechts Spannungspfeile für die gleichgerichtete Spannung  $U_{DC}(t)$  (schwarz) bei einer B6-Brücke

## 5.4 Tiefsetzsteller

Es besteht immer wieder die Aufgabe, eine höhere Gleichspannung in eine niedrigere zu wandeln. So kann in Elektroautos das 12 V-Bordnetz aus dem Traktionsnetz von mehreren hundert Volt gespeist werden. Über Adapter wiederum lässt sich eine 5 V-USB-Spannung aus dem 12 V-Bordnetz generieren.

Eine Lösung zur Spannungsanpassung kann der Spannungsteiler sein, der allerdings - wenn er halbwegs spannungsstabilisierend arbeitet - einen schlechten Wirkungsgrad besitzt. Eine zeitgemäße Alternative ist der Tiefsetzsteller, der zwar im Aufbau deutlich aufwändiger ist, aber dafür einen verhältnismäßig guten Wirkungsgrad (typisch  $\eta > 0,95$ ) hat. Im englischen Sprachraum werden sie als *buck converter* oder *DC/DC-Converter* bezeichnet.

Der prinzipielle Aufbau eines Tiefsetzstellers ist in Abbildung 5.13 gegeben. Der Vorteil bei leistungselektronischen Schaltungen ist, dass sie verhältnismäßig leicht analysiert werden können. Wie bereits erwähnt, werden leistungselektronische Schaltungen *schaltend* betrieben. Der Schalter  $S$  ist also entweder nach oben oder nach unten geschaltet. Daher bietet es sich an, die Schaltung für beide Fälle, Schalter  $S$  oben und Schalter  $S$  unten, getrennt zu analysieren.

Die beiden möglichen Schaltungen für die Schalterstellung „ein“ und „aus“ sehen wir in Abbildung

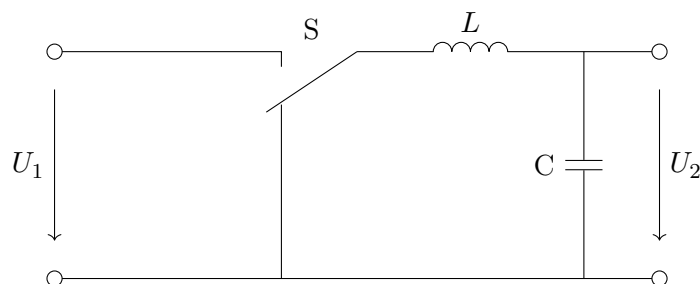


Abbildung 5.13: Prinzipieller Aufbau eines Tiefsetzstellers

Bezeichnung	Formelbuchstabe	Beziehung bzw. Beschreibung
Schalter „ein“ bzw. „oben“	$T_e, T_{\text{ein}}$	Einschaltzeit
Schalter „aus“ bzw. „unten“	$T_a, T_{\text{aus}}$	Ausschaltzeit
Schaltperiode	$T_S$	$T_S = T_e + T_a$
Schaltfrequenz	$f_S$	$f_S = 1/T_S$
Tastverhältnis	$D$	$D = T_e/T_S$

Tabelle 5.2: Typische in der Leistungselektronik verwendete Abkürzungen bzw. Formelbuchstaben

5.14, links für den Fall eines eingeschalteten, rechts für den ausgeschalteten Schalter.

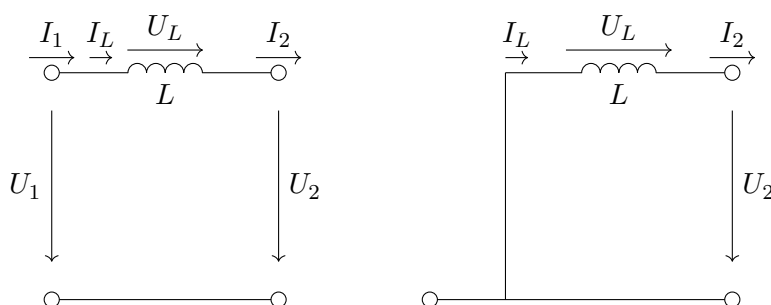


Abbildung 5.14: Schaltung des Tiefsetzstellers für den Zeitabschnitt  $T_{\text{ein}}$  (links) und  $T_{\text{aus}}$  (rechts)

Der in Abbildung 5.13 noch enthaltene Glättungskondensator am Ausgang fehlt hier. Wir nehmen im Gegenzug an, dass die Ausgangsspannung  $U_2$  innerhalb einer Schaltperiode halbwegs  $T_S$  konstant bleibt. Nach

$$i_C = C \frac{du_C}{dt} \Leftrightarrow \frac{du_C}{dt} = \frac{i_C}{C}$$

ist die Spannungsänderung  $U_2 = U_C$  klein, wenn die Kapazität  $C$  in Bezug auf den Ausgangsstrom  $i_C = i_2$  hinreichend groß ist.

### Einschaltphase

Die Schalterstellung „oben“ wird zunächst willkürlich als „ein“ gewählt. Der Grund für diese Festlegung wird ersichtlich, wenn der ideale Schalter  $S$  durch ein reales Bauteil ersetzt wird (siehe am Ende dieses Abschnitts, z.B: Abbildung 5.19).

Beginnen wir mit der linken Schaltung. Wir können sofort die Maschengleichung aufstellen,

$$U_1 = U_L + U_2$$

und für den Spannungsabfall an der Induktivität  $L$  gilt

$$U_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (5.5)$$

Für den Stromfluss am Ausgang ergibt sich mit  $i_1 = i_L = i_2$  damit

$$U_1 - U_2 = U_L = L \frac{di_L}{dt} \Leftrightarrow di_2 = \frac{U_1 - U_2}{L} dt \quad (5.6)$$

Die beiden Spannungen  $U_1$  und  $U_2$  werden für die Analyse als konstant betrachtet. Da es sich um einen Tiefsetzsteller handelt, nehmen wir ferner  $U_2 < U_1$  an. Damit folgt in der Einschaltphase ein konstanter Stromanstieg  $\frac{di}{dt}$ .

### Ausschaltphase

Hier erkennen wir sofort, dass die Eingangsspannung  $U_1$  nicht an der Schaltung angeschlossen ist und somit für die Schaltung keine Rolle spielt. Die Masche lautet

$$U_L = -U_2$$

Für den Strom gilt wieder die Knotenregel

$$I_2 = I_L$$

Mithilfe der Differentialgleichung für die Induktivität (5.5) können wir dann den Stromfluss durch die Induktivität bzw. den Ausgang zu

$$di_2 = di_L = \frac{U_L}{L} dt = \frac{-U_2}{L} dt \quad \text{bzw.} \quad \frac{di_L}{dt} = -\frac{U_2}{L} \quad (5.7)$$

festlegen. Der Strom wird also kleiner.

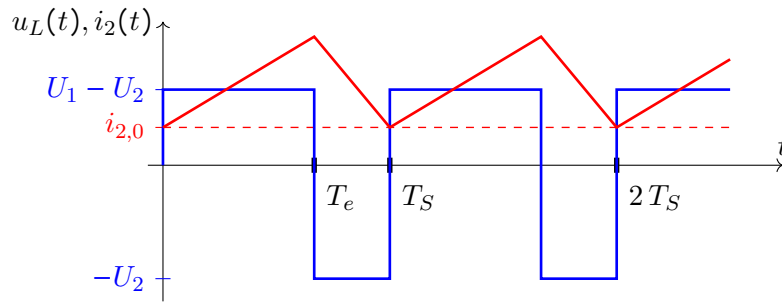
### Betrachtung der ganzen Schaltperiode

Anhand von Gleichung 5.5 wird klar, dass der Stromfluss durch eine Induktivität bei einem Sprung der angelegten Spannung stetig bleibt. Dies bedeutet bei leistungselektronischen Schaltungen, bei denen ja typischerweise die Spannung geschaltet wird, dass der Strom „nicht springt“. Folglich können wir den Stromverlauf während der Einschaltphase und während der Ausschaltphase „aneinanderstückeln“. Da die Spannung an der Induktivität  $L$  während der Einschaltphase positiv, der Ausschaltphase negativ ist, ergibt sich für den Stromverlauf eine charakteristische Zick-Zack-Linie.

In Abbildung 5.15 sehen wir den Verlauf der Spannung  $U_L$  und Strom  $i_L$  an der Induktivität  $L$ . Die Stromsteilheit ergibt sich aus Ein- und Ausgangsspannung sowie der Induktivität, entsprechend Gleichung 5.7. Der Stromanstieg entspricht dem Produkt von Stromsteilheit  $di_L/dt$  und Ein- bzw. Ausschaltdauer  $T_{\text{ein}}$  bzw.  $T_{\text{aus}}$ . Hier halten sich Stromanstieg und Stromabfall die Waage. Der Strom bleibt also jeweils über eine Periode gemittelt konstant, wir sprechen hier vom stationären Fall.

Typischerweise wird das Tastverhältnis  $D$  über eine Steuerung so geändert, dass bei festgelegter Schaltfrequenz  $T_S$  und veränderlicher Eingangsspannung  $U_1$  eine gewünschte Ausgangsspannung





**Abbildung 5.15:** Strom- (rot) und Spannungsverlauf (blau) beim Tiefsetzsteller, hier mit  $U_2 = \frac{2}{3}U_1$  und  $D = \frac{2}{3}$ , stationäres Verhalten

$U_2$  sich einstellt. Beispiele sind Spannungsversorgungen aus der Unterhaltungselektronik, die ohne Modifikation an 110 V oder 230 V angeschlossen werden können.

Wie sieht jetzt eigentlich der Zusammenhang von Ein- und Ausgangsspannung, Ein- und Ausschaltdauer im stationären Fall aus? Wir betrachten den Stromverlauf über eine Periode

$$0 = \Delta i_{\text{ein}} + \Delta i_{\text{aus}} = \frac{U_{L,\text{ein}}}{L} T_{\text{ein}} + \frac{U_{L,\text{aus}}}{L} T_{\text{aus}}$$

Die Induktivität lässt sich herauskürzen, und für die Spannung  $U_L$  an der Induktivität setzen wir entsprechend der Abbildung 5.14 mit der Maschengleichung in der Einschaltphase  $U_{L,\text{ein}} = U_1 - U_2$  und in der Ausschaltphase  $U_{L,\text{aus}} = -U_2$  ein.

$$\begin{aligned} 0 &= (U_1 - U_2) T_{\text{ein}} - U_2 T_{\text{aus}} \\ &= (U_1 - U_2) T_{\text{ein}} - U_2 (T_S - T_{\text{ein}}) \\ &= U_1 T_{\text{ein}} - U_2 T_S \end{aligned}$$

Damit kann das Verhältnis von Ein- und Ausgangsspannung einfach über das Tastverhältnis  $D$ ,

$$D = \frac{U_2}{U_1} \quad (5.8)$$

angeben werden. Bemerkenswert an dieser Erkenntnis sind zwei Punkte:

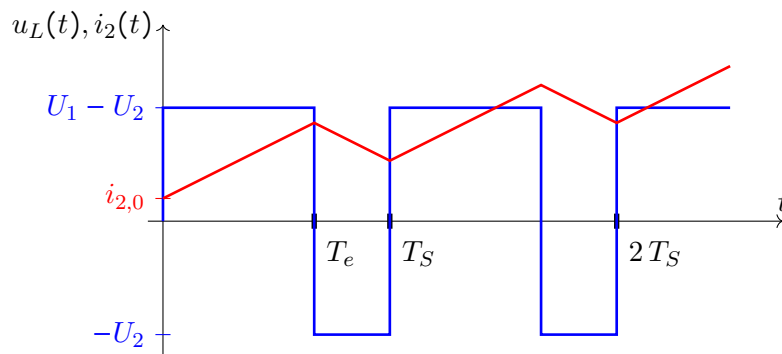
- Die Ausgangsspannung ist unabhängig von Schaltfrequenz  $f_S$  und Induktivität  $L$ .
- Die Ausgangsspannung ist unabhängig vom Ausgangsstrom  $I_2$ .

Ferner soll noch auf die beiden folgenden Auffälligkeiten für den stationären Fall, Abbildung 5.15, hingewiesen werden:

- Die Differenz zwischen  $U_{L,\text{max}}$  und  $U_{L,\text{min}}$  entspricht der Eingangsspannung  $U_1$ .
- Die Spannungs-Zeit-Fläche während der Einschaltphase und der Ausschaltphase ist identisch, also  $T_{\text{ein}} \cdot (U_1 - U_2) = T_{\text{aus}} \cdot U_2$ .

Wenn das Verhältnis  $U_2 = D \cdot U_1$  z.B. aufgrund einer geänderten Eingangsspannung oder eines geänderten Tastverhältnisses  $D$  nicht mehr stimmt, führt dies zu einem im Mittel sich verändernden Ausgangsstrom, wie exemplarisch in Abbildung 5.16 angegeben.

Die Stromsteilheit  $\frac{di_L}{dt}$  ergibt sich lediglich aus den aktuellen Spannungsverhältnissen. Als Folge ist der Strom am Ende einer Periode nicht mehr mit dem Strom zu Beginn der Periode identisch. Der Strom ändert sich also mittelfristig.

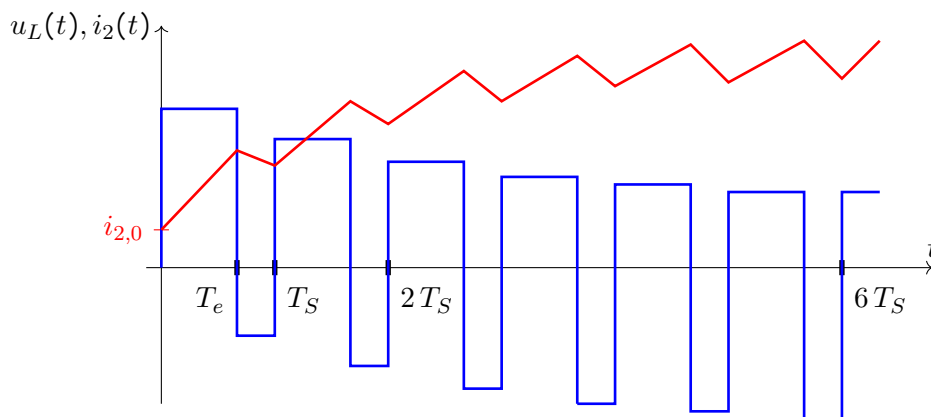


**Abbildung 5.16:** Strom- (rot) und Spannungsverlauf (blau) beim Tiefsetzsteller, hier mit  $U_2 = \frac{1}{2}U_1$  und  $D = \frac{2}{3}$ , dynamischer Fall

**Betrachtung mehrerer Schaltperioden**

Der Strom ändert sich aufgrund eines geänderten Tastverhältnisses. Ist als Last lediglich ein ohm'scher Widerstand  $R_V$  vorhanden, ist das Verhältnis von Ausgangsstrom  $i_2$  und Ausgangsspannung  $u_2$  allerdings durch den Lastwiderstand vorgegeben.

Dieses Dilemma lässt sich wie folgt lösen: Ausgangspunkt ist der stationäre Zustand. Wird nun das Tastverhältnis  $D$  geändert, bleibt innerhalb einer Periode die Stromsteilheit identisch, der Mittelwert des Stroms ändert sich allerdings, wie in Abbildung 5.17 gezeigt.

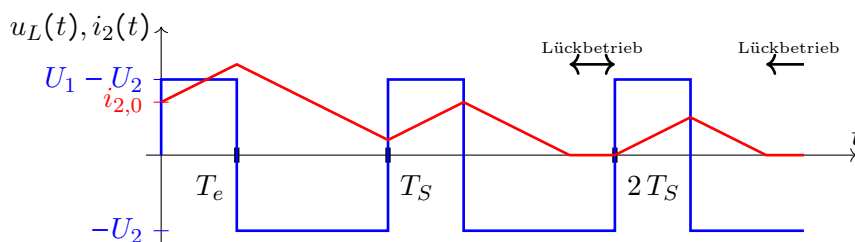


**Abbildung 5.17:** Strom- (rot) und Spannungsverlauf (blau) beim Tiefsetzsteller als Reaktion auf ein zum Zeitpunkt  $t = 0$  auf  $D = \frac{2}{3}$  geändertes Tastverhältnis

In dieser Übergangsphase gilt lediglich das ohm'sche Gesetz für die Ausgangsspannung, durch ein eventuell vorhandenen Glättungskondensator gefiltert.

Kann durch eine vergrößerte Ausschaltzeit der Strom eigentlich auch negativ werden? In der Ausschaltphase wird die in der Induktivität gespeicherte Energie vom magnetischen Feld in elektrische Energie, einem Stromfluss im Verbraucher, umgesetzt. Wenn der Energiespeicher, die Induktivität, leer ist, kann hierdurch auch kein Stromfluss generiert werden. Es gibt dann Phasen, in denen kein Strom fließt, wie in Abbildung 5.18 zu sehen.

Bleibt die Frage zu klären, ob aus der Last ein Strom in den Tiefsetzsteller fließen kann, wodurch  $i_2 < 0$  werden würde. Nach unserem bisherigen Verständnis des Tiefsetzstellers wäre dies möglich.

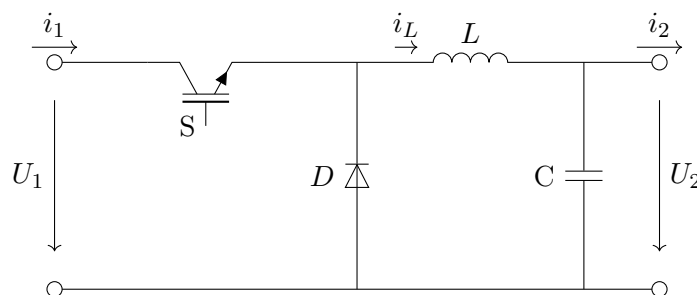


**Abbildung 5.18:** Strom- (rot) und Spannungsverlauf (blau) beim Tiefsetzsteller, hier bei steigender Ausgangsspannung  $U_2$  und  $D = \frac{2}{3}$ , dynamischer Fall

Allerdings befindet sich im realen Aufbau eines Tiefsetzstellers eine Diode, die diesen Stromfluss unterbindet.

### Realer Aufbau eines Tiefsetzstellers

Abhilfe schafft die in Abbildung 5.19 gezeigte Kombination aus IGBT und Diode. Wenn der



**Abbildung 5.19:** Aufbau eines Tiefsetzstellers aus realen Bauteilen

IGBT leitet, muss der Strom ( $i_1$ ) von der Quelle durch die Induktivität ( $i_L$ ) in die Last ( $i_2$ ) fließen. Dies entspricht der Einschaltphase in Abbildung 5.14. Die Diode verhindert, dass der Strom direkt von der Quelle zum niedrigeren Potential fließt, also nur durch den Schalter und die Diode.

Hierdurch lässt sich der Begriff *eingeschaltet* endlich erklären, da der IGBT bei entsprechender Ansteuerung leitend, also eingeschaltet wird.

Wird der IGBT dagegen sperrend geschaltet, so fließt von der Quelle kein Strom in den Tiefsetzsteller. Der Strom kann wie in der rechten Darstellung in Abbildung 5.14 nur noch durch die Induktivität  $L$  den Verbraucher und die Diode  $D$  im Uhrzeigersinn im Kreis fließen.

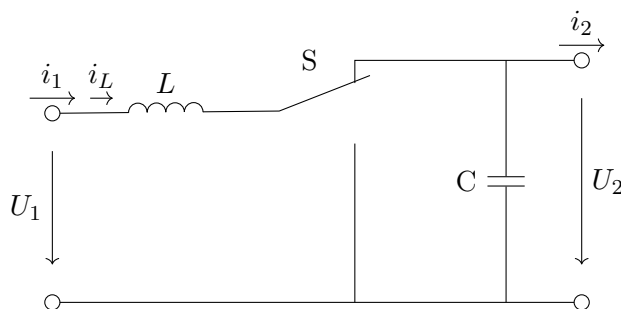
Der Tiefsetzsteller ist eine der grundlegenden Schaltungen der Leistungselektronik. Er kommt als einzelne Baugruppe zum Einsatz, viel häufiger jedoch in Kombination mit weiteren Baugruppen. Es gibt ihn als einzelnen Chip, für größere Leistung wird er jedoch diskret, d.h. aus einzelnen Bauteilen aufgebaut. Grund hierfür sind die Volumina von Kondensator und Induktivität sowie die Verluste am Schalter, die weggekühlt werden müssen. Der Leistungsbereich reicht vom mW bis in den zweistelligen MW-Bereich.

## 5.5 Hochsetzsteller

Der Hochsetzsteller (englisch *boost converter*) ist eine weitere elementare Schaltung der Leistungselektronik. Er setzt eine niedrige Gleichspannung in eine höhere um.

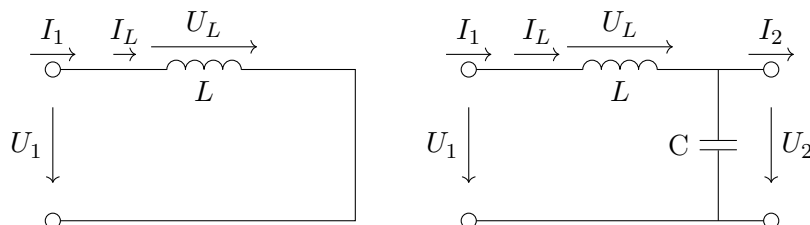
### Prinzipieller Aufbau

Der prinzipielle Aufbau ist in Abbildung 5.20 gegeben:



**Abbildung 5.20:** Prinzipieller Aufbau eines Hochsetzstellers, der Schalter in der unteren Stellung wird als „ein“ bezeichnet

Im Unterschied zum Tiefsetzsteller ist hier der Ausgangskondensator unentbehrlich, er dient nicht nur zur Glättung der Ausgangsspannung sondern hält die Ausgangsspannung  $U_2$  auf diesem Niveau, auch wenn kein Strom  $i_2$  in die Last fließt. Wenn wir die Funktionsweise dieser Schaltung analysieren wollen, hilft uns wieder die separate Betrachtung der beiden Schaltzustände. Diese sind in Abbildung 5.21 gegeben.



**Abbildung 5.21:** Schaltung eines Hochsetzstellers im Zustand *ein* (links) und *aus* (rechts)

Auch wenn die Ausgangskapazität zur Stabilisierung der Ausgangsspannung erforderlich ist, zählen wir den Ausgangsstrom  $i_2$  vor der Kapazität. Hierdurch wird die Analyse deutlich vereinfacht. Die Spannung  $U_2$  betrachten wir wiederum als konstant. Da es sich um einen Hochsetzsteller handelt, betrachten wir die Ausgangsspannung auch größer als die Eingangsspannung, also  $U_2 > U_1$ .

### Analyse für den stationären Betrieb

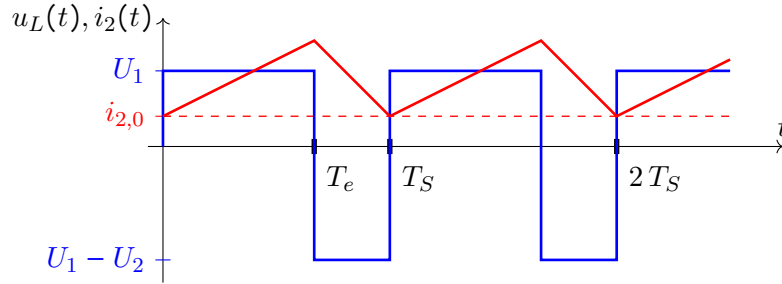
Betrachten wir zunächst die Einschaltphase, in Abbildung 5.21 links. Die Masche ist denkbar einfach:  $U_L = U_1$ . An der Induktivität  $L$  liegt die Eingangsspannung  $U_1$  an, so dass wir gemäß der Gleichung 5.5 einen steigenden Stromfluss  $i_1(t) = i_L(t)$  erwarten können:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}U_1 \quad (5.9)$$

In der Ausschaltphase können wir die Masche mit  $U_1 = U_L + U_2$  aufstellen, damit ergibt sich die Stromänderung zu

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} (U_1 - U_2) \quad (5.10)$$

Mit der zuvor getätigten Annahme, dass die Ausgangsspannung  $U_2$  höher als die Eingangsspannung  $U_1$  ist, ist hier der Stromabfall negativ.



**Abbildung 5.22:** Strom- (rot) und Spannungsverlauf (blau) beim Tiefsetzsteller, hier mit  $U_2 = 3U_1$  und  $D = \frac{2}{3}$ , stationäres Verhalten

Im stationären Zustand bleibt der Stromfluss  $i_2(t)$  im Mittel konstant, also  $i_2(t) = i_2(t + T_S)$ , siehe Abbildung 5.22.

Wie sieht beim Hochsetzsteller der Zusammenhang von Eingangsspannung  $U_1$ , Ausgangsspannung  $U_2$  Einschalt- und Ausschaltzeiten ( $T_{\text{ein}}$  und  $T_{\text{aus}}$ ) im stationären Fall aus? Stromanstieg und Stromabfall entsprechend der Gleichungen (5.9 und 5.10) heben sich auf, daraus folgt:

$$\begin{aligned} \frac{1}{L} U_1 T_{\text{ein}} + \frac{1}{L} (U_1 - U_2) T_{\text{aus}} &= 0 \\ U_1 T_{\text{ein}} + (U_1 - U_2) (T_S - T_{\text{ein}}) &= 0 \\ U_1 T_{\text{ein}} - (U_1 - U_2) T_{\text{ein}} &= -(U_1 - U_2) T_S \\ U_2 T_{\text{ein}} &= (U_2 - U_1) T_S \end{aligned}$$

Mit der Elimination der Zeiten durch das Tastverhältnis  $D = T_{\text{ein}}/T_S$  ergibt sich

$$D = \frac{U_2 - U_1}{U_2} \quad (5.11)$$

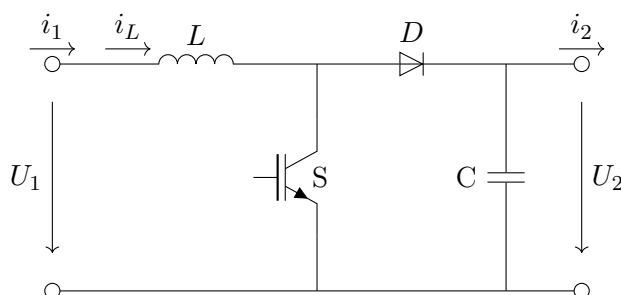
beziehungsweise für die Ausgangsspannung

$$U_2 = \frac{U_1}{1 - D} \quad (5.12)$$

Alternativ können wir auch festhalten, dass im stationären Zustand die Spannungs-Zeit-Flächen identisch sind:  $U_1 T_{\text{ein}} = (U_2 - U_1) T_{\text{aus}}$ .

### Realer Aufbau des Hochsetzstellers

Vergleichbar dem Aufbau des Tiefsetzstellers wird wegen eines fehlenden Angebots auf die Verwendung idealer Bauelemente verzichtet. In Abbildung 5.23 ist ein Hochsetzsteller aus realen Bauelementen gegeben.



**Abbildung 5.23:** Schaltungstechnische Realisierung eines Hochsetzstellers

Die Diode  $D$  verhindert eine Entladung der Kapazität  $C$  über den Hochsetzsteller.

Die Funktionalität - in Prosa zusammengefasst - soll hier nochmal wie folgt beschrieben werden: Wenn der Schalter  $S$  leitet, wird ein Stromfluss  $i_L$  durch die Induktivität  $L$  ermöglicht. Dieser Stromfluss wird mit zunehmender Einschaltdauer  $T_{\text{ein}}$  immer größer. Wenn der Schalter  $S$  dann sperrt, muss der Strom  $i_L$  irgendwie weiterfließen, da er ja nicht springt. Die einzige Möglichkeit ist ein Stromfluss durch die Diode  $D$  in den Kondensator, auch wenn dieser auf eine höhere Spannung  $U_2$  aufgeladen ist. Dabei nimmt der Stromfluss  $i_L$  zwar ab, aber irgendwann wird der Schalter  $S$  wieder eingeschaltet und der Stromfluss  $i_2$  erhöht sich wieder.

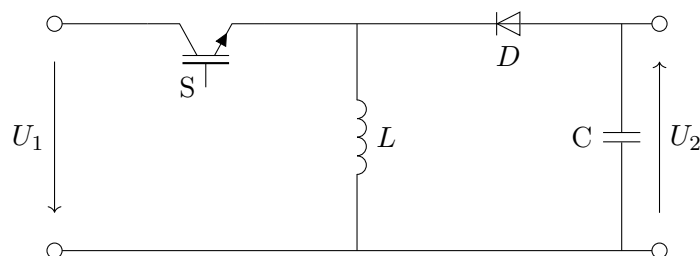
Typische Anwendungsbeispiele sind:

- Die Spannungsanhebung der Ausgangsspannung von Solarzellen bzw. Solarmodulen zur Einspeisung ins Versorgungsnetz
- In der Common-Rail-Technik werden zur sicheren Ansteuerung der Motorventile Spannungen von 70 V bei Magnetventilen bzw. 140 V bei Piezoventilen benötigt, die aus dem Bordnetz von 12 V erzeugt werden
- Der Betrieb von 230 V-Geräten aus dem 12 V-Bordnetz von Wohnmobilen, Wohnwagen oder PKWs

## 5.6 Inverswandler

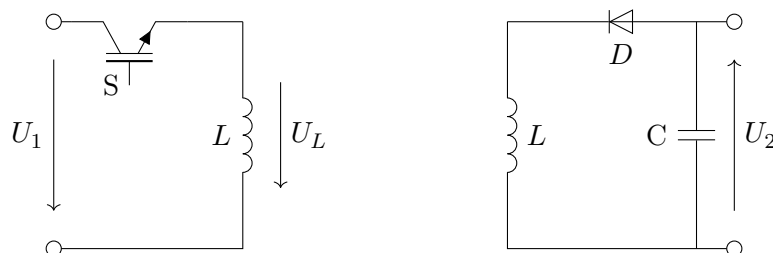
Der Inverswandler wird auch als Hoch-/Tiefsetzsteller oder im englischen Sprachraum als *Buck-Boost Converter* bezeichnet.

Als dritte Grundschaltung sollen er und der Sperrwandler hier analysiert werden. Der Aufbau eines Inverswandlers ist in 5.24 gegeben.



**Abbildung 5.24:** Aufbau eines Inverswandlers

Zur Analyse der Schaltung betrachten wir wieder die beiden diskreten Schaltzustände, die in Abbildung 5.25 gegeben sind:



**Abbildung 5.25:** Inverswandler in den diskreten Schaltzuständen, Einschaltphase (links) und Ausschaltphase (rechts)

Links ist der Fall des geschlossenen Schalters gezeigt, also während der Einschaltphase  $T_{\text{ein}}$ . Der Stromfluss  $i_L$  erhöht sich entsprechend Gleichung 5.5 mit einer Stromsteilheit  $di/dt$  proportional zur Eingangsspannung  $U_1$ . In der Ausschaltphase (rechts) fließt der Strom  $i_2$  weiter und lädt die Kapazität  $C$  am Ausgang auf. Achten Sie hier bitte auf die gedrehte Polarität („Plus ist unten“) am Ausgang.

Aus den Spannungs-Zeit-Flächen kann leicht das Verhältnis von Ein- und Ausgangsspannung im eingeschwungenen Zustand berechnet werden: Aus

$$U_1 T_{\text{ein}} = U_2 T_{\text{aus}} \quad (5.13)$$

folgt

$$D = \frac{U_2}{U_1 + U_2} U_2 \quad (5.14)$$

bzw.

$$U_2 = \frac{D}{1 - D} U_1 \quad (5.15)$$

Auch bei dieser Schaltung kann es zum Lücken des Stromes  $i_2$  kommen, was durch eine entsprechende Wahl des Tastverhältnisses  $D$  bzw. durch eine entsprechend großzügige Wahl der Kapazität  $C$  vermieden werden kann. Wie auch Tiefsetzsteller und Hochsetzsteller wird der Hoch-Tiefsetzsteller meist geregelt betrieben, d.h. das Tastverhältnis  $D$  wird anhand der (gemessenen) Ausgangsspannung  $U_2$  kontinuierlich und automatisiert angepasst.

Typisch ist die Verwendung im Leistungsbereich weniger Watt, z.B. die Spannungsanpassung von 5 V an der USB-Schnittstelle und 12 V an der seriellen Schnittstelle.

Soll zusätzlich eine galvanische Trennung zwischen Primär- und Sekundärseite realisiert werden, wird die Schaltung mit einem Transformator anstelle einer Spule aufgebaut. Die Schaltung heißt dann Sperrwandler (englisch *flyback converter*) und ist in Abbildung 5.26 angegeben. Der Unterschied zum Inverswandler ist hierbei, dass der Strom des Primärstromkreises von dem des Sekundärstromkreises strikt getrennt ist. Der Energietransport erfolgt kontinuierlich. Ebenso erfolgt die Energieänderung kontinuierlich, ebenso ändert sich auch die Summe der Ströme  $i_{L1}$  und  $i_{L2}$  kontinuierlich, wohingegen die einzelnen Ströme „springen“ dürfen.

Anstelle eines Transformators werden in realen Aufbauten magnetisch gekoppelte Spulen<sup>5</sup> eingesetzt. Im Unterschied zum Transformator ist der Kern bei magnetisch gekoppelten Spulen nicht

<sup>5</sup>Ein alternativer Name für magnetisch gekoppelte Spulen ist Speichertransformator

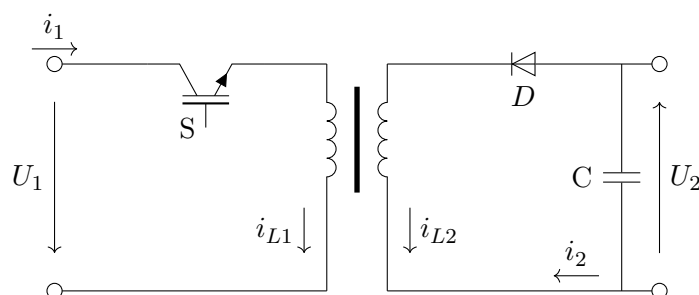


Abbildung 5.26: Aufbau eines Sperrwandlers

durchgehend, sondern unterbrochen. Dadurch entsteht ein Luftspalt<sup>6</sup>, in dem sich ein magnetisches Feld aufbaut. In diesem magnetischen Feld wird die Energie bei geschlossenem Schalter  $S$  zwischengespeichert und bei geöffnetem Schalter auf der Sekundärseite entnommen.

Der Wirkungsgrad ist verhältnismäßig niedrig (Größenordnung:  $\eta = 0,8$ ). Wird keine Leistung übertragen kann die Schaltfrequenz  $f_S$  reduziert werden, wodurch die Verluste im Leerlauf sehr klein werden.

Der Sperrwandler wird bevorzugt für kleine Leistungen eingesetzt, z.B. für Netzteile im 10 W-Bereich. Eine zeitgemäße Anwendung ist das Schaltnetzteil zur Versorgung der Steuerelektronik eines Infrarotempfängers von Fernsehern, das sich den Großteil seines Daseins im Standby befindet. So betragen bei einem 47"-Fernseher (2018), Energieeffizienzklasse A+ die Verluste im Standby unter 0,15 W).

## 5.7 Zwei- und Vier-Quadrantensteller

Die bisherig betrachteten Schaltungen - Tiefsetzsteller, Hochsetzsteller und Invers- bzw. Sperrwandler, haben eine große Gemeinsamkeit: Ein Energietransport ist ausschließlich von der Primärseite in Richtung der Sekundärseite möglich.

Eine derartige Möglichkeit ist im Bereich der Antriebstechnik aber unerlässlich: Wie sonst könnte man einen Motor geregelt verzögern?

Ein derartiges Verhalten kann erreicht werden, wenn man den Tiefsetzsteller und den Hochsetzsteller derart kombiniert, dass jeweils die höhere Spannung auf der Versorger-, die niedrigere Spannung auf der Lastseite zu finden ist, siehe Abbildung 5.27.

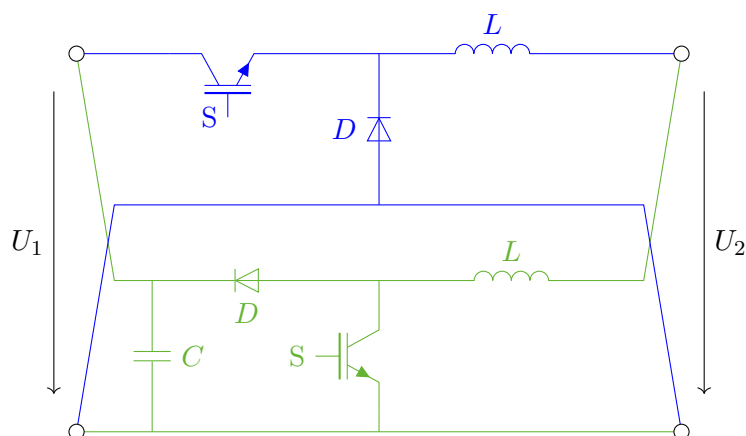
Durch den **Tiefsetzsteller** (blau) ist ein Leistungsfluss von links nach rechts möglich. Die höhere Spannung stellt  $U_1$  dar, die auf die niedrigere Spannung  $U_2$  heruntergesetzt wird.

Der **Hochsetzsteller** (grün) ist hier im Vergleich zu Abbildung 5.23 von rechts nach links gezeichnet. Durch ihn wird ein Leistungsfluss von der Sekundärseite (rechts) in die Primärseite (links) möglich. Dabei wird die niedrigere Spannung  $U_2$  auf die höhere Spannung  $U_1$  hochgesetzt. Diese Darstellung gilt es nun zu vereinfachen.

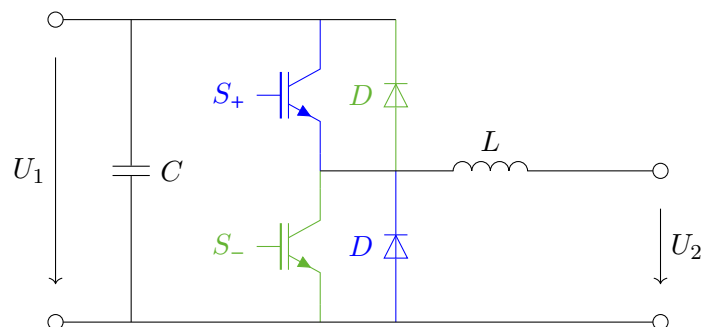
Die Kapazität  $C$  wird direkt vor die Eingangsspannung  $U_1$  verschoben. Für den Tiefsetzsteller fungiert sie „lediglich“ als Filter, für die Funktion des Hochsetzens ist sie dagegen von elementarer Bedeutung.

<sup>6</sup>Entweder mit einem Luftspalt oder durch einen Aufbau aus Eisenpulver mit sehr vielen kleinen Luftspalten





**Abbildung 5.27:** Kombination aus Tiefsetzsteller (blau) und Hochsetzsteller (grün) zum Zwei-quadrantenumrichter



**Abbildung 5.28:** Halbbrücke bzw. Zweiquadrantengleichrichter

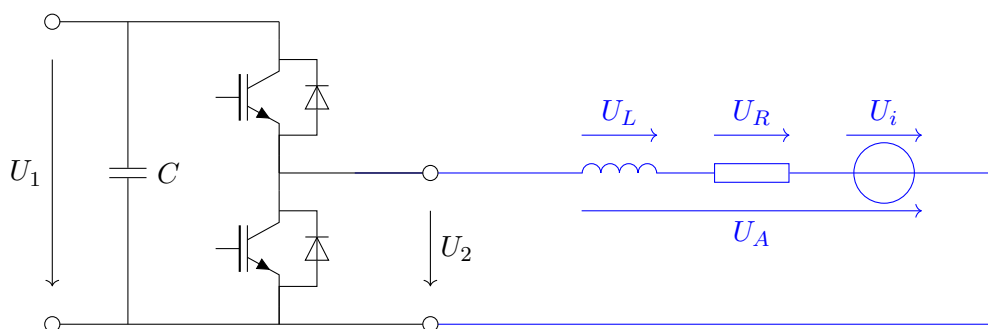
Außerdem werden die beiden Knoten, die jeweils zwischen den Dioden  $D$ , den Schaltern  $S$  und den Induktivitäten  $L$  zusammengefasst. Auch die beiden Induktivitäten können durch eine Gemeinsame ersetzt werden. Der Strom  $i_L$  fließt entweder durch den Hochsetzsteller, ist also negativ, oder der Strom ist positiv und fließt durch den Tiefsetzsteller.

Diese Kombination aus Hoch- und Tiefsetzsteller wird auch als Halbbrücke bezeichnet.

Ein IGBT ist i.d.R. für den Stromfluss in Pfeilrichtung ausgelegt. Ein Stromfluss in die entgegengesetzte Richtung kann beim Schalten kurzfristig zu Spannungsspitzen führen, die den IGBT zerstören können. Dies wird durch die parallel geschaltete Diode verhindert. Daher werden die Dioden teilweise auch als Freilaufdiode bezeichnet.

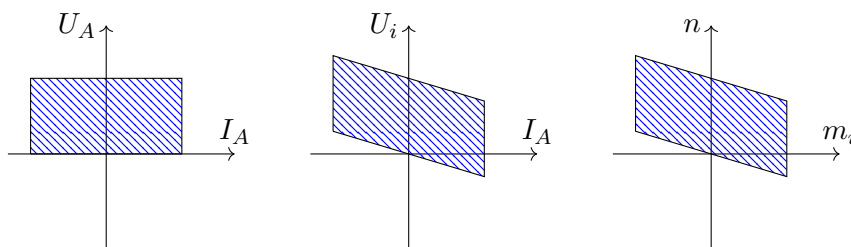
Bei Elektroantrieben handelt es sich, wenn man von wenigen Spezialfällen absieht, um induktive Lasten. Diese liegen dann mit der „gemeinsamen“ Induktivität  $L$  in Reihe. Wenn aber die Last sowieso induktives Verhalten besitzt, darf auf die vorgeschaltete Induktivität auch verzichtet werden, siehe auch Abbildung 5.29. Durch die nun geringere Gesamtinduktivität  $L$  ist eine größere Dynamik bezüglich des Stroms,  $\frac{di}{dt} = \frac{U_2}{L}$ , möglich.

Über die Ansteuerung mittels Halbbrücke kann beispielsweise ein Gleichstrommotor mit veränderlicher Drehzahl (genauer: mit veränderlicher Eingangsspannung) betrieben werden. Mittels



**Abbildung 5.29:** Schaltplan einer Gleichstrommaschine (blau), betrieben an einer Halbbrücke für den Zwei-Quadrantenbetrieb

der Halbbrücke wird eine positive Ankerspannung  $U_A$  vorgegeben und damit auch die positive Drehrichtung des Motors. Der Ankerstrom darf sowohl positiv als auch negativ sein.



**Abbildung 5.30:** Grundstellbereich bei einer Gleichstrommaschine im 2-Quadrantenbetrieb: Links der Stellbereich für (Anker-)Strom und (Anker-)Spannung, mittig der sich hieraus ergebende Stellbereich für (Anker-)Strom und innere Spannung, rechts der hieraus resultierende Arbeitsbereich: Drehzahl gegenüber innerem Maschinenmoment.

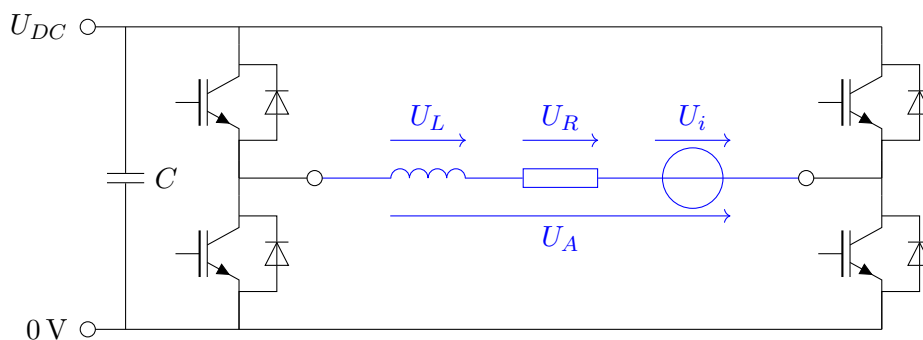
Damit ist dann sowohl ein motorischer als auch ein generatorischer Betrieb möglich. Bemerkenswert ist ferner der Betrieb mit positivem Maschinenmoment und negativer Drehzahl: Hier nimmt die Maschine sowohl mechanische ( $P_{\text{mech}} = m_i \cdot \omega$ ) als auch elektrische Leistung ( $P_{\text{elek}} = U_A \cdot I_A$ ) auf und gibt beides als Wärme ( $P_{\text{Verlust}} = R_i \cdot I_A^2$ ) ab. Der Motor arbeitet als Bremse.

Wünschenswert wäre ein Betrieb, der Links- und Rechtslauf ermöglichen würde, also eine optionale Versorgung mit positiver oder negativer Spannung: Beide Anschlüsse der Gleichstrommaschine werden hierfür über eine Halbbrücke betrieben, siehe Abbildung 5.31. Jede Halbbrücke kann eine Spannung zwischen 0 V und der Versorgungsspannung  $U_{DC}$  stellen, die Differenz der Ausgangsspannungen liegt nun zwischen  $-U_{DC}$  und  $U_{DC}$ . Dies Schaltung wird auch Brückenschaltung genannt.

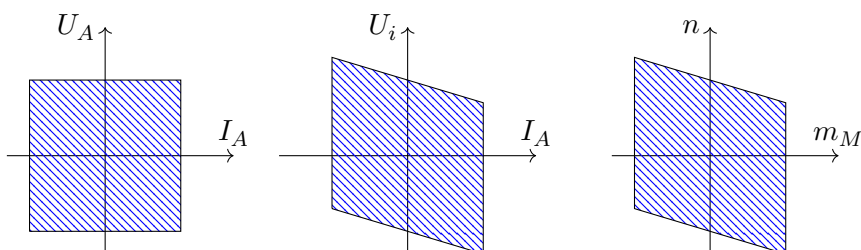
Als Beispiel mit Zahlen: Steht eine Versorgungsspannung von 10 V zur Verfügung, kann über die erste Halbbrücke eine Spannung von 8 V, über die zweite Halbbrücke von 2 V bereitgestellt werden. Der Motor wird nun mit  $U_A = 8 \text{ V} - 2 \text{ V} = 6 \text{ V}$  betrieben. Stellt die erste Halbbrücke nun aber 2 V und die zweite 8 V liegen nun  $2 \text{ V} - 8 \text{ V} = -6 \text{ V}$  an.

Der hierdurch mögliche Betriebsbereich der Gleichstrommaschine ist in Abbildung 5.32 dargestellt.

Typisch ist, die beiden Schalter einer Halbbrücke mit der gleichen Schaltfrequenz  $f_S$  gegensinnig zu takten, also wenn Schalter  $S_+$  sperrt, leitet der Schalter  $S_-$  oder umgekehrt. Hierdurch wird



**Abbildung 5.31:** Schaltplan einer Gleichstrommaschine (blau), betrieben an zwei Halbbrücken für den Vier-Quadrantenbetrieb



**Abbildung 5.32:** Grundstellbereich bei einer Gleichstrommaschine im 4-Quadrantenbetrieb: links der Stellbereich für (Anker-)Strom, begrenzt durch den maximal zulässigen Strom und die maximal zur Verfügung stehende (Anker-)Spannung, mittig der sich hieraus ergebende Stellbereich für Ankerstrom und innere Spannung, rechts der hieraus folgende Arbeitsbereich von Drehzahl gegenüber dem Maschinenmoment

sichergestellt, dass bei der Stromumkehr (Wechsel zwischen dem 1. und dem 2. Quadranten<sup>7</sup>) der Stromfluss stetig bleibt. Für die beiden Tastverhältnisse  $D_+$  und  $D_-$  gilt damit

$$D_+ + D_- = 1 \tag{5.16}$$

Außerdem wird dadurch sichergestellt, dass nicht beide Schalter  $S_+$  und  $S_-$  gleichzeitig leiten, was einem Kurzschluss entspricht.

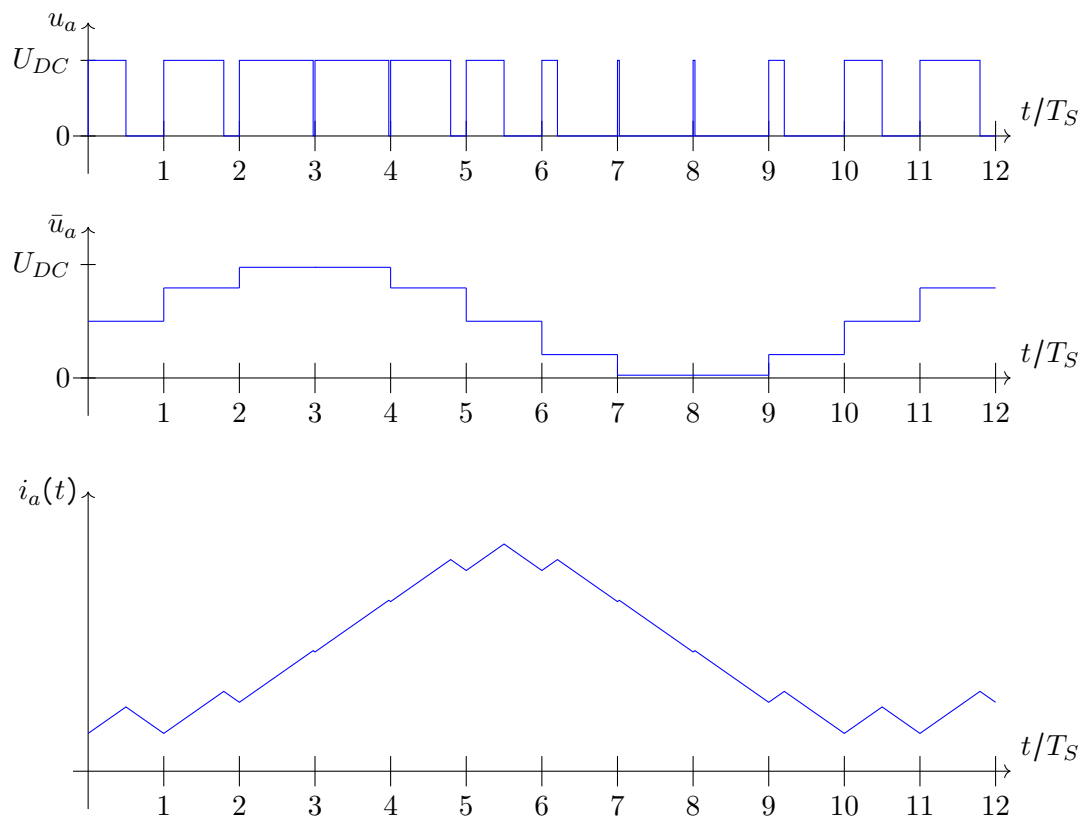
## 5.8 Pulswechselrichter

Als nächstes soll die Frage geklärt werden, wie aus einer Gleichspannung eine Wechselspannung generiert werden kann.

Mit einer Halbbrücke sind wir in der Lage, eine beliebige Spannung zwischen Null und der Versorgungsspannung  $U_{DC}$  zu stellen. Die Stellgröße hierfür ist das Tastverhältnis  $D$ . Wird das Tastverhältnis  $D$  nun verändert, ändert sich auch die Ausgangsspannung. Ändert sich das Tastverhältnis sinusförmig, ändert sich auch die Ausgangsspannung sinusförmig, zumindest wenn die Änderung des Tastverhältnisses langsam gegenüber dem gewünschten Signal erfolgt. Entsprechend dem Shannon'schem Abtasttheorem werden zur Synthese einer Sinusfunktion  $f(t) = \sin(2\pi f_{\sin} t)$

<sup>7</sup>1. Quadrant: Strom und Spannung sind positiv; weitere Quadranten werden in positiver Richtung gezählt

mehr als zwei Stützstellen pro Periode benötigt. Daher muss bei der Synthese einer sinusförmigen Spannung die Schaltfrequenz  $f_S$  mehr als doppelt so hoch sein wie die Frequenz des Sinus. Faktisch ist ein Abstand von mindestens Faktor 10 erstrebenswert, also  $f_S > 10 f_{\sin}$ .



**Abbildung 5.33:** Betrachtung des Strangs  $a$  eines Pulswechselrichters: oben die Ausgangsspannung des Strangs, identisch mit dem Ansteuerungssignal; mittig die über jeweils eine Periode gemittelte Ausgangsspannung, unten der hieraus resultierende Ausgangsstrom, um  $\pi/2$  gegenüber dem Spannungssignal verschoben

Durch den Einsatz von drei Halbbrücken wie in Abbildung 5.34 ist auch die Synthese eines dreiphasigen Wechselspannungsnetzes möglich.

## 5.9 Schaltnetzteil

Ein Netzteil dient zur Versorgung von Geräten, die eine Eingangsspannung im Bereich weniger Volt benötigen und über das 230 V-Stromnetz versorgt werden. Typische Beispiele sind Geräte aus der Unterhaltungselektronik, der Datenverarbeitung oder Telekommunikation.

Die Gleichspannungsversorgung kann mittels Transformator und Gleichrichter erfolgen. Diese werden als *konventionelle* Netzteile oder als *Trafonetzteile* bezeichnet. Aufgrund des Transformators sind diese Netzteile verhältnismäßig groß und schwer.

Schaltnetzteile sind Netzteile, die mit schaltenden Bauelementen arbeiten. Sie besitzen bei gleicher Leistung meist einen deutlich höheren Wirkungsgrad, ein geringeres Volumen und ein geringeres Gewicht als konventionelle Netzteile.

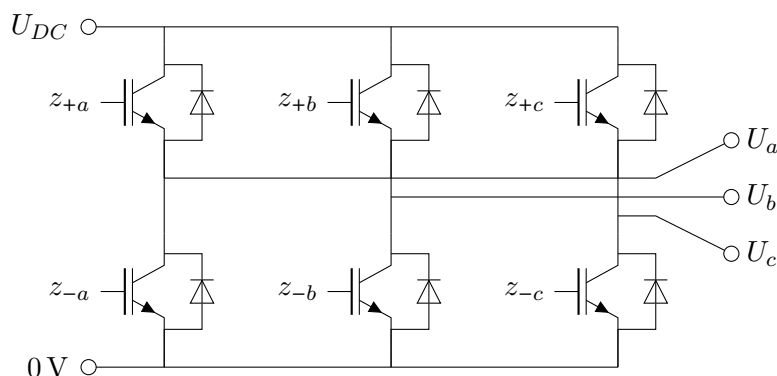


Abbildung 5.34: Schaltplan eines dreiphasigen Wechselrichters

Prinzipiell kann ein Gleichrichter mit einem dahinter liegenden Tiefsetzsteller als Netzteil fungieren. Ist das Verhältnis von Eingangsspannung zur Ausgangsspannung allerdings groß, liegt das Tastverhältnis  $D$  im Bereich von Null. Eine kleine Abweichung im Tastverhältnis bedingt dann einen verhältnismäßig großen Fehler in der Ausgangsspannung.

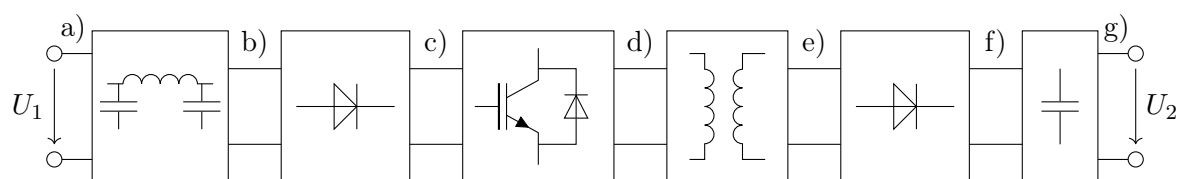
- Ein Fehler im Tastverhältnis von 1 % bedeutet bei einem Tastverhältnis von  $D = 0,5$  einen Fehler in der Ausgangsspannung von  $\frac{0,5}{0,51}$ .
- Bei einem Tastverhältnis von  $D = 0,01$  führt ein Fehler von 1 % zu einer Abweichung von  $\frac{0,01}{0,02}$ . Soll eine Spannung von 230 V auf 5 V herabgesetzt werden, wird ein Tastverhältnis von  $D = \frac{5\text{V}}{\sqrt{2} \cdot 230\text{V}} = 0,015$  benötigt. Bei einem Fehler von 1 % ergibt sich also ein Tastverhältnis zwischen  $D = 0,005$  und  $D = 0,025$ , was zu Spannungen zwischen 1,6 V und 8 V führt.

Ferner existiert keine galvanische Trennung zwischen Primär- und Sekundärseite.

Das elektronische Schaltnetzteil umgeht diese Probleme. In einem ersten Schritt wird aus einer Gleichspannung eine hochfrequente Wechselspannung generiert. Diese wird dann transformiert und anschließend wieder gleichgerichtet. Der entscheidende Unterschied ist, dass ein Transformator für eine Frequenz von beispielsweise 125 kHz viel kleiner, viel günstiger, viel leichter und mit einem deutlich höheren Wirkungsgrad gebaut werden kann als ein Transformator für die Netzfrequenz von 50 Hz.

Der prinzipielle Aufbau eines Schaltnetzteils ist in Abbildung 5.35 angegeben. Die einzelnen Baugruppen haben dabei folgende Aufgaben:

- Das netzseitige **Eingangsfiler** schützt das Versorgungsnetz vor den Rückwirkungen des Schaltnetzteils. Da das Schaltnetzteil, wie der Name ja verrät, schaltend arbeitet, ist die Leistungsentnahme nicht kontinuierlich sondern erfolgt intervallweise. Das Filter kann als Drossel oder durch eine eigene leistungselektronische Schaltung ausgeführt werden. Bei Schaltnetzteilen ab einer bestimmten Größe [DIN 61000] ist ein Eingangsfiler vorgeschrieben.
- Als nächstes wird die (gefilterte) Netzspannung gleichgerichtet. Der **Gleichrichter** kann abhängig vom Netz aus einer einzelnen Diode oder aus zwei oder drei Halbbrücken bestehen. Zumindest bei einphasigen Netzen ist eine Ausgangskapazität erforderlich, eine Ausgangsspannung von 0 V zu vermeiden.



**Abbildung 5.35:** Prinzipieller Aufbau eines Schaltnetzteils, v.l.n.r.: optionales Filter, optionaler Gleichrichter, Wechselrichter, Transformator, Gleichrichter und Filter. Die Signale im Einzelnen: a) Eingangsspannung, b) gefilterte Eingangsspannung, c) Gleichspannung, d) hochfrequente Wechselspannung, e) hochfrequente Wechselspannung mit Amplitude im Bereich der Ausgangsspannung, f) Gleichspannung, g) geglättete Gleichspannung

- Über einen **Wechselrichter** wird eine i.d.R. niedrigere sinusförmige Spannung fester Frequenz und Amplitude gestellt. Durch Anpassung des Tastverhältnisses  $D$  kann diese Ausgangswechselspannung auch bei variabler Eingangsspannung  $U_1$  erreicht werden. Die Ausgangsfrequenz liegt im Bereich von 10 kHz bis von 300 kHz. Da der Energiefluss meist nur Richtung Verbraucher gefordert ist, kann der Wechselrichter aus einem Tiefsetzsteller aufgebaut werden.
- Über einen **Transformator** wird das Spannungsniveau auf das gewünschte Ausgangsspannungsniveau abgesenkt. Da die Speisefrequenz sehr hoch ist, kann der Transformator entsprechend klein, günstig und trotzdem mit einem hohen Wirkungsgrad  $\eta$  aufgebaut werden.
- Durch den **Gleichrichter** wird die nun hochfrequente Wechselspannung gleichgerichtet.
- Diese Gleichspannung muss nun entsprechend **gefiltert** werden, um eine möglichst konstante, nicht lückende Gleichspannung zu erhalten.

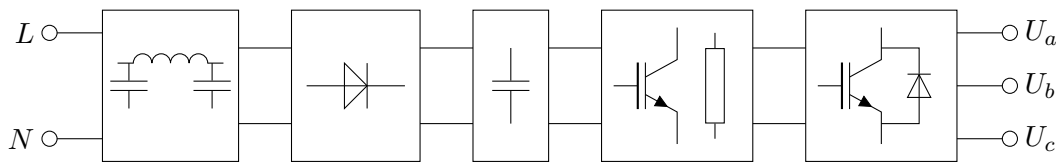
Um zu den Signalen in Abbildung 5.35 typische Zahlenwerte zu nennen: Die Eingangsspannung (a) ist eine sinusförmige Netzspannung von 110 V oder 230 V mit einer Frequenz von 50 Hz oder 60 Hz. Dieses Signal wird gefiltert (b) und gleichgerichtet (c) auf eine Gleichspannung von  $\sqrt{2} \cdot 230 \text{ V} = 320 \text{ V}$ . Durch den Tiefsetzsteller wird hieraus eine (d) Wechselspannung mit 50 V Amplitude und 125 kHz. Auf der Sekundärseite des Transformators ergibt sich eine (e) Wechselspannung mit 3,5 V Amplitude und 100 kHz. Nach der Gleichrichtung ergibt sich eine (f) Gleichspannung von  $\sqrt{2} \cdot 3,5 \text{ V} = 5 \text{ V}$ , die gefiltert wird und dann z.B. einer USB-Spannungsversorgung zur Verfügung steht.

## 5.10 Frequenzumrichter und Servoregler

Frequenzumrichter und Servoregler dienen primär dem Betrieb von Drehstromantrieben. Um den Arbeitspunkt eines Drehstrommotors zu beeinflussen, ist es erforderlich, die (dreiphasige) Spannung bezüglich Frequenz und Amplitude zu variieren. Damit ist der Betrieb der Motoren mit verschiedenen Drehzahlen bei möglichst geringen Verlusten möglich.

Dieses kann über einen Frequenzumrichter erreicht werden. Frequenzumrichter dienen der Bereitstellung sinusförmiger Spannungen variabler Amplitude und Frequenz aus einem ein- oder dreiphasigen Drehstromnetz.

Die hierfür übliche Topologie zeigt Abbildung 5.36.



**Abbildung 5.36:** Prinzipieller Aufbau eines Frequenzumrichters: v.l.n.r.: Netzfilter, Gleichrichter, Zwischenkreiskapazität, Bremschopper mit Bremswiderstand, Wechselrichter

- Die Netzspannung wird über einen Brückengleichrichter (B2- oder B6-Brücke) gleichgerichtet. Es ergibt sich bei einphasigen Netzen mit  $U_{\text{eff}} = 230 \text{ V}$  eine Zwischenkreisspannung von  $U_{\text{ZK}} = \sqrt{2} \cdot 230 \text{ V} \approx 320 \text{ V}$ . Bei dreiphasigen Netzen mit  $U_{\text{eff}} = 400 \text{ V}$  ergibt sich  $U_{\text{ZK}} = \sqrt{2} \cdot 400 \text{ V} \approx 560 \text{ V}$ .
- Diese Zwischenkreisspannung  $U_{\text{ZK}}$  wird über die Zwischenkreiskondensatoren gefiltert und kann bei Bedarf über den Bremschopper und den Bremswiderstand  $R_B$  kurzgeschlossen werden, siehe Abschnitt 5.10.4
- Über den Wechselrichter, bestehend aus drei Halbbrücken, kann nun ein dreiphasiges, bezüglich Amplitude  $\hat{u}$  und Frequenz  $f$  variables Netz gestellt werden.

Aufgrund des Gleichrichters ist kein Energietransport vom Zwischenkreis in das Versorgungsnetz möglich.

Bezüglich des leistungselektronischen Aufbaus, dem **Leistungsteil** sind Frequenzumrichter und Servoregler weitgehend vergleichbar. Beide bieten die Möglichkeit, Spannung und Frequenz zu stellen, so dass der Betrieb mit verschiedenen Drehzahlen möglich ist.

### 5.10.1 Frequenzumrichter

Zum Betrieb einer Asynchronmaschinen wird, wenn sie nicht direkt an das Netz geschaltet wird, ein Frequenzumrichter verwendet. Er stellt ein Drehfeld gewünschter Spannung und Frequenz und kann außerdem den Motor überwachen. Betriebsart ist meist der  $U/f$ -Betrieb, also das Anpassen der Länge des Spannungszeigers an die Drehfrequenz. Durch die Auswerten einfacher Drehzahl- oder Lagegeber ist außerdem der Aufbau einer Regelung möglich. Teilweise werden auch Stromsensoren, vorwiegend zur Überwachung, im Frequenzumrichter verbaut.

Zur Beschreibung der Leistungsklasse von Frequenzumrichtern wird meist die Bemessungsleistung in kW angegeben.

Höherwertige Frequenzumrichter bieten zahlreiche weitere Funktionen wie die Möglichkeit, die Sollfrequenz langsam zu erhöhen, Sensoren auszuwerten, die Maschine oder den Prozess zu überwachen, Steuerungsaufgaben zu übernehmen oder Sicherheitsfunktionen zu realisieren. Der Übergang zu Servoreglern ist fließend, auch das Marketing spielt bei der Bezeichnung eine gewisse Rolle.

### 5.10.2 Servoregler

Sowohl Frequenzumrichter als auch Servoregler sind in der Lage, die Eingangsspannung in eine bezüglich Amplitude und Frequenz variable Ausgangsspannung umzusetzen. Der Servoregler<sup>8</sup>

<sup>8</sup>Der Bezeichnungsbestandteil Servo stammt vom lateinischen Wort Servus (Sklave)



**Abbildung 5.37:** Frequenzumrichter mit Positionierfunktion für 7,3kW, Höhe ca 25 cm [KEB20]: links auf der linken Geräteseite die Leistungsklemmen (Spannungsversorgung, Motoranschluss); auf der rechten Geräteseite oben und vorne Anschlüsse für die Kommunikation (24 V und Bussysteme)

versucht dem Motor ein bestimmtes Betriebsverhalten aufzuprägen. Der Antrieb soll einer bestimmten Führungsgröße folgen. Die Spannung bzw. das Drehfeld sind also lediglich Zwischengrößen. Der Antrieb soll eigentlich eine bestimmte Zielgröße wie Drehmoment, Kraft, Geschwindigkeit, Drehzahl, Position oder Druck anfahren.

Hierzu ist neben dem Stellen des Feldes und der Messung oder Berechnung der Rotorlage auch die Auswertung von Sensoren sowie das Regeln der Prozessgrößen von Bedeutung.

Die Auswertung der Sensoren und das Berechnen der nächsten Ventilstellung erfolgt im kHz-Bereich in Echtzeit, im Takt mit der Schaltperiode der Ventile. Um diese zeitkritische Berechnung und Ansteuerung sicher realisieren zu können, geschieht dieses physikalisch im Servoregler und nicht in einer übergeordneten Steuerung. Allerdings ist in manchen Branchen der Trend zu beobachten, dass Steuerung und Servoregler immer mehr zusammenwachsen, also dass der Servoregler auch Steuerungsaufgaben übernimmt oder der Regler als Modul der Steuerung betrachtet wird.

Die Beschreibung der Leistungsklasse von Servoreglern erfolgt anhand der Nennstromstärke. Die Stromstärke ist bei Synchronmaschinen proportional zum Drehmoment, so dass mit der Stromstärke indirekt die Beschleunigungsfähigkeit des Motors angegeben wird. Diese ist für dynamische Anwendungen meist viel eher von Bedeutung als die mittlere Leistung.

Servoregler und Motor werden zusammen als *Servoantrieb* bezeichnet. In der Automatisierungstechnik sind insbesondere die einphasigen (für 230 V) und die dreiphasigen Geräte (für 400 V) von Bedeutung.





**Abbildung 5.38:** Servoregler für 400 V , links: Nennstrom 4 A, Höhe 30 cm, Luftgekühlt, in der linken Hälfte ist das Leistungsteil mit Anschlüssen für die Versorgungsspannung, Bremswiderstand und Motor, in der rechten Hälfte das Steuerteil mit Klemmen und Buchsen für Geber und Kommunikation; rechts: Nennstrom 450 A, Höhe 95 cm, Flüssigkühlung, ebenfalls rechts oben das gleiche Steuerteil mit Geber- und Kommunikationsschnittstellen [KEB20]

### 5.10.3 Auslegung von Frequenzumrichtern und Servoreglern

Das Leistungsteil eines Frequenzumrichters ist weitgehend mit dem eines Servoreglers identisch. Die wesentlichen Unterschiede sind, dass die Leistungsteile für Servoregler Stromsensoren in den Motorphasen besitzen und meist für höhere Schaltfrequenzen geeignet sind. Das Leistungsteil kann sowohl durch Überspannung als auch durch Überstrom zerstört werden: Die Halbleiter sind nur bis zu einer bestimmten Spannung spannungsfest, bereits ein geringes Überschreiten führt zur Zerstörung des jeweiligen Bauteils. Besonders sensibel sind die IGBTs und die Kondensatoren. Daher ist immer auf passende Anschlusswerte sowie einen passenden Bremswiderstand (siehe 5.10.4) zu achten.

Die größte Gefahr für einen Wechselrichter stellt der Strom dar. Ein Überstrom führt nach einer entsprechenden Weile zur Zerstörung der Ventile. Da der Strom die Reaktion auf die gestellte Spannung darstellt, ist eine schnelle Reaktion auf einen festgestellten Überstrom zumindest schwierig. Die Überlastfähigkeit wird meist für bestimmte Zeiträume angegeben, z. B: 300 % für 2 s und muss bei der Festlegung der Lastzyklen berücksichtigt werden.

Die Auslegung erfolgt in mehreren Schritten:

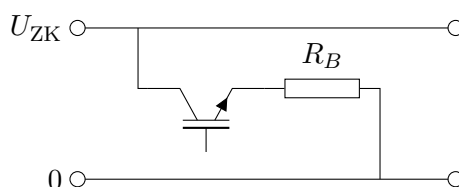
- Das mechanische Bewegungsprofil (Position, Bewegung, Kraft) wird festgelegt. Im Geschwindigkeitsprofil werden hierbei die Kanten verschliffen, um Drehmomentstöße zu vermeiden, die sowohl die Mechanik stressen als auch zu hohen impulsförmigen Strömen führen würden.
- Dieses Bewegungsprofil wird auf Rotorgrößen (Lage, Drehzahl, Drehmoment) umgerechnet.
- Dauer- und Spitzenleistung (beim Frequenzumrichter) bzw. Dauer- und Spitzendrehmoment (beim Servoregler) werden hieraus errechnet.

- An den Beträgen von Spitzen- und Durchschnittsleistung, bzw. Spitzenstrom und mittlerem Strom erfolgt die Auswahl der passenden Gerätegröße, wobei die Überlastfähigkeit der Geräte berücksichtigt wird.

#### 5.10.4 Bremswiderstand

Findet ein Energietransport von der Last in den Zwischenkreis (z.B: beim Bremsen eines angeschlossenen elektrischen Antriebs) statt, steigt die Zwischenkreisspannung  $U_{ZK}$ . Ein zu hoher Anstieg der Zwischenkreisspannung würde zu einer Zerstörung des Umrichters führen, entweder platzt der Kondensator oder einer der Halbleiter.

Als Schutzbeschaltung wird daher ein Bremswiderstand in Reihe mit einem Schalter im Zwischenkreis angeschlossen, siehe Abbildung 5.39. Dieser Schalter (ein IGBT) wird als Bremschopper, der Bremswiderstand auch als Chopperwiderstand bezeichnet. Wenn die Zwischenkreisspannung über einen bestimmten Wert steigt, schaltet der Bremschopper durch, und der Zwischenkreis ist über den Bremswiderstand  $R_B$  kurzgeschlossen.



**Abbildung 5.39:** Bremschopper und Bremswiderstand  $R_B$  als Schutzbeschaltung zur Begrenzung der Zwischenkreisspannung

Fällt die Zwischenkreisspannung daraufhin wieder, fällt der Bremschopper wieder in den sperrenden Zustand zurück.

Der Bremswiderstand muss nach den beiden folgenden Kriterien ausgelegt werden.

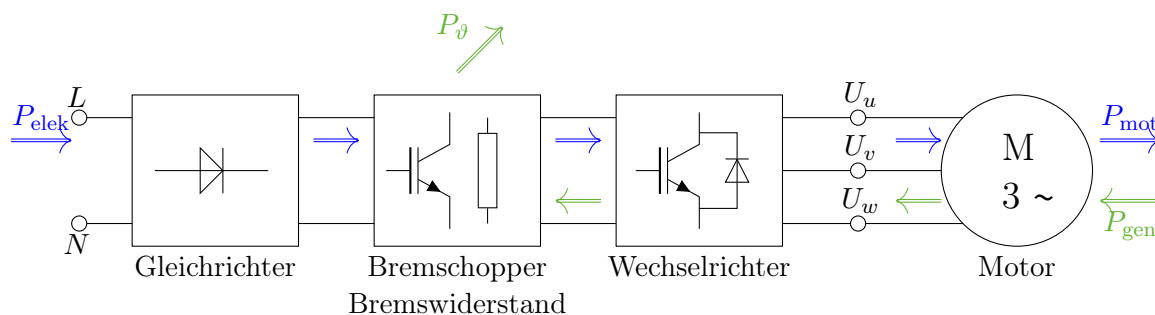
- Der Mindestwert des Bremswiderstands  $R_B$  muss so gewählt werden, dass der Stromfluss  $I_{RB}$  nicht den Bremschopper zerstört. Der Mindestwiderstandswert ist im Datenblatt des Frequenzumrichters angegeben.
- Aus der Anlage bzw. der Maschine ergibt sich die Leistung, die beim Bremsen in elektrische Energie umgesetzt wird. Diese Leistung muss im Bedarfsfall im Bremswiderstand umgesetzt werden. Es gilt

$$P_{\text{Bremsen}} = U_{ZK} I_{RB} = \frac{U_{ZK}^2}{R_B} \quad (5.17)$$

#### 5.10.5 Rückspeisefähige Frequenzumrichter

Ein Frequenzumrichter stellt aus energetischer Sicht das Bindeglied zwischen Antrieb und Stromnetz dar. Im motorischen Fall erfolgt ein Energiefluss vom Stromnetz zum Motor, im generatorischen Fall erfolgt ein Energiefluss vom generatorisch betriebenen Antrieb zum Bremswiderstand, wie in Abbildung 5.40 skizziert.

Durch den Bremswiderstand wird die vom Motor aufgenommene mechanische Energie als Wärme an die Umwelt abgegeben. Der Frequenzumrichter kann elektrische Energie lediglich in geringem Maße in der Zwischenkreiskapazität speichern. Beim Speichern der Energie steigt die

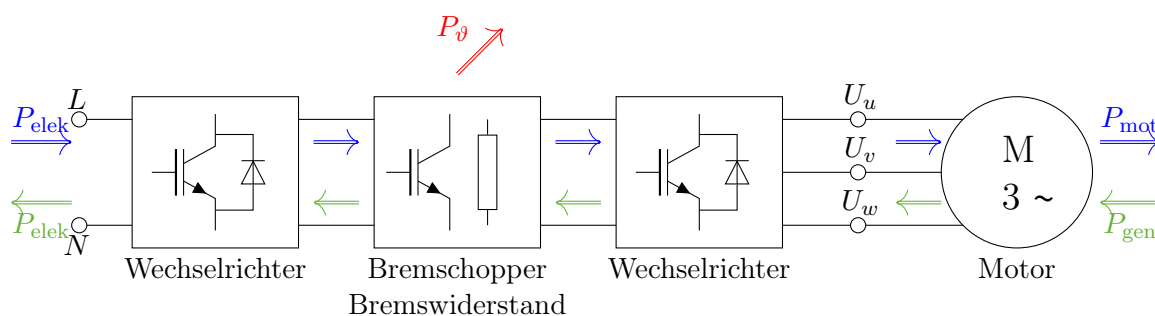


**Abbildung 5.40:** Energiefluss bei einem Frequenzumrichter im motorischen Fall ( $\Rightarrow$ ) und im generatorischen Fall ( $\Rightarrow$ )

Zwischenkreisspannung. Steigt die Zwischenkreisspannung über einen bestimmten Wert, wird der Zwischenkreis jedoch über den Bremswiderstand entladen.

Es gibt mehrere Ansätze, die in den Zwischenkreis gespeiste Energie zu nutzen.

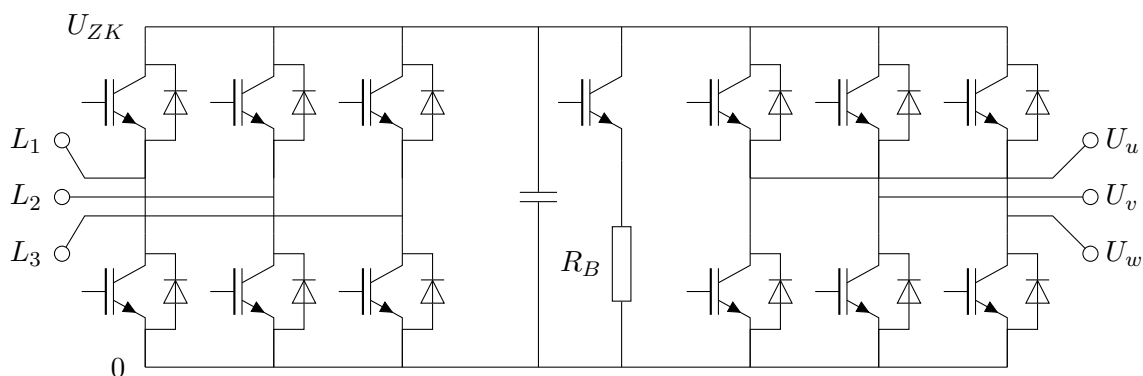
- Wenn die Energie nur kurz gespeichert werden muss, beispielsweise wenn ein Antrieb in rascher Folge ein Werkzeug anhebt und danach wieder absenkt, kann es reichen, die **Zwischenkreiskapazität** zu vergrößern.
- Wenn zwei Antriebe gegenläufige Bewegungen machen, z.B. wenn ein Antrieb ein Band durch die Maschine zieht und ein anderer Antrieb dagegenhält, um eine bestimmte Spannung im Band zu halten, arbeitet einer der Antriebe motorisch, der andere dauerhaft generatorisch. Werden die **Zwischenkreise** der beiden Antriebe **gekoppelt**<sup>9</sup> muss lediglich die Differenzleistung zugeführt werden.
- Durch eine Rückspeiseeinrichtung wird die generatorische Leistung ins Versorgungsnetz gespeist. Die Energieflüsse sind in Abbildung 5.41 skizziert.



**Abbildung 5.41:** Energiefluss bei einem rückspeisefähigen Frequenzumrichter im motorischen Fall ( $\Rightarrow$ ) und im generatorischen Fall ( $\Rightarrow$ ) sowie bei Netzausfall ( $\Rightarrow$ ).

Die Idee der Rückspeisung ist, einen Wechselrichter zum „Antreiben“ des Stromnetzes, also zur Speisung in das Stromnetz zu verwenden. Dazu besitzt der Wechselrichter, wie in Abbildung 5.42 gezeigt, eine Wechselrichterstufe sowohl auf der Netzseite als auch auf der Lastseite.

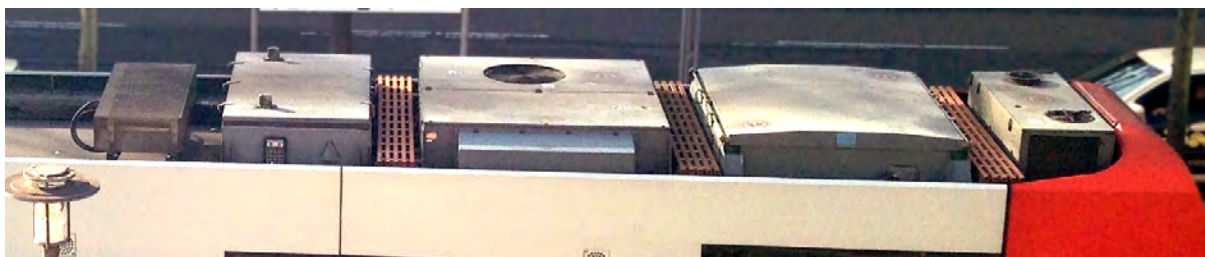
<sup>9</sup>die Antriebe müssen für eine Zwischenkreiskopplung geeignet sein



**Abbildung 5.42:** Schaltplan eines rückspeisefähigen Wechselrichters, ohne Netzdrosseln, links und rechts Wechselrichter, in der Mitte Zwischenkreiskapazität und Bremschopper mit Bremswiderstand  $R_B$

Ferner besteht durch die Rückspeisung die Möglichkeit, die Zwischenkreisspannung auf einen festen Wert zu regeln.

Die Leistung kann also zwischen Stromnetz und Antrieb hin- und hergeschoben werden. Die Zwischenkreiskapazität dient dann nur noch dem Glätten der Zwischenkreisspannung und ein Bremswiderstand erscheint unnötig, da beim Bremsen die Energie ins Versorgungsnetz gespeist wird. Was passiert aber, wenn das Stromnetz aus irgendwelchen Gründen ausfällt? Beim Bremsen kann das fehlende Netz die Energie ja nicht aufnehmen und die Zwischenkreisspannung wird auf einen *ungesunden* Wert ansteigen (was wiederum zur Zerstörung von Bauteilen führen kann). Wenn keine Energie abgeführt werden kann, fehlt auch die Möglichkeit, Bremsenergie aufzugeben und damit auch die Fähigkeit zu bremsen. Als Beispiel sei eine Straßenbahn genannt, die



**Abbildung 5.43:** Leistungselektronischer Aufbau auf dem Dach einer Straßenbahn (Baureihe K4500): Bremswiderstand (1. Aufbau von links) und Wechselrichter (4. Aufbau von links) sowie Klimaanlagen

ohne Bremswiderstand bei einem Oberleitungsschaden (d.h. Netzausfall) nicht mehr bremsen könnte. Daher ist selbst bei rückspeisefähigen Frequenzumrichtern ein Bremschopper sowie ein Bremswiderstand vorzusehen.

### 5.10.6 Netzeinspeisung

Geräte zur dezentralen elektrischen Energieerzeugung wie Solarzellen, Klein- und Mini-BHKWs oder Kleinwasserkraftwerke besitzen über einen Wechselrichter die Möglichkeit, Energie in ein

Stromversorgungsnetz zu speisen. Am Beispiel eines Solarwechselrichters soll die Netzeinspeisung erläutert werden.

- Über einen Hochsetzsteller wird die Ausgangsspannung der Solarzellen auf das Zwischenkreisspannungsniveau  $U_{ZK}$  angehoben.
- Die Zwischenkreisspannung wird auch hier über eine, wenn auch recht kleine, Kapazität gefiltert. Soll die „gewonnene“ Energie eventuell über Akkumulatoren im Haushalt zwischengespeichert werden, wird die benötigte Lade-/Entladeschaltung ebenfalls am Zwischenkreis angeschlossen.
- Der Wechselrichter, bei kleinen Leistungen einphasig, ab spätestens 10 kW dreiphasig, stellt die Verbindung von Versorgungsnetz und Gleichspannungszwischenkreis dar. Hier reicht ein einfacher Wechselrichter, wie bereits im Abschnitt 5.8 beschrieben.
- Der Ausgangsstrom des Wechselrichters pulst, d.h. er wird laufend ein- und ausgeschaltet. Das führt zu erheblichen Oberschwingungen, die möglichst nicht ins Versorgungsnetz gelangen sollen. Daher muss der Ausgangsstrom mit Hilfe einer Netzdrossel bzw. eines Netzfilters gefiltert werden. Wird der Solarwechselrichter für höhere Leistung direkt ans Mittelspannungsnetz (10 kV - 30 kV) angeschlossen, erfolgt die Spannungsanpassung über einen Transformator, der gleichzeitig als Filter wirkt.

Die Zwischenkreisspannung wird über den Wechselrichter auf oberhalb der gleichgerichteten Netzspannung (230 V bzw. 560 V) festgelegt (geregelt). Dadurch ist die Zwischenkreisspannung unabhängig von Schwankungen des Stromnetzes.

Die von den Solarmodulen abgegebene Leistung ist neben äußeren Einflussgrößen wie Beleuchtung oder Temperatur auch vom abgegebenen Strom und der Spannung abhängig. Über den Hochsetzsteller kann die Modulspannung so festgelegt werden, dass die vom Modul abgegebene Leistung maximal ist. Dieses Verfahren nennt sich *Maximum-Power-Point-Tracking*, MPPT.

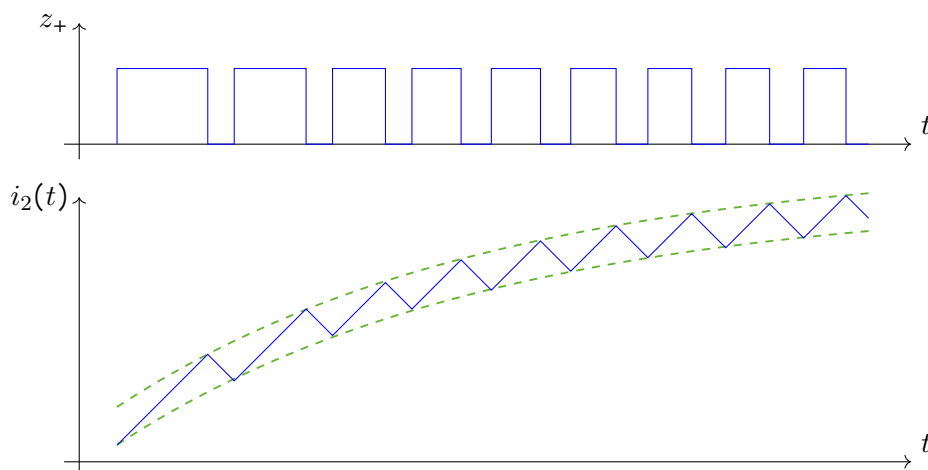
## 5.11 Weitere Stromrichterstrategien

Die hier bisher vorgestellten Topologien bzw. Strategien beschreiben eine heutzutage weit verbreitete Lösung zum Betrieb eines Drehstrommotors. Neben diesen Ansätzen gibt es eine Reihe weiterer Möglichkeiten, von denen drei weitere hier skizziert werden sollen.

### 5.11.1 Direkte Stromregelung

Bei einem Wechselrichter mit drei Halbbrücken entsprechend Abbildung 5.34 erfolgt das Stellen der Ausgangsspannung über die Ansteuerung der Ventile. Die Berechnung der Ventilstellungen erfolgt anhand einer Pulsweitenmodulation (PWM). In einem festen Zeitrahmen (der Tasterperiode  $T_S$ ) wird entsprechend dem berechneten PWM-Signal einmal ein- und einmal ausgeschaltet. Anhand der Dauer der Einschalt- und der Ausschaltphase ergibt sich die Ausgangsspannung. Diese Spannung verursacht einen Stromfluss durch die Last. Bei geregelten Systemen wird dieser Strom gemessen und aufgrund des Messergebnisses das Tastverhältnis  $D$  für die nächste Schaltperiode berechnet.

Alternativ gibt es die Möglichkeit der direkten Stromregelung. Das Ein- und Ausschalten erfolgt hierbei nicht wie bei der PWM in einem festen zeitlichen Raster, sondern ereignisgesteuert. Überschreitet bzw. unterschreitet der Strom ein entsprechend festgelegtes Toleranzband, wird die Ventilstellung geändert und der Strom ändert seine Richtung, siehe Abbildung 5.44. Dadurch

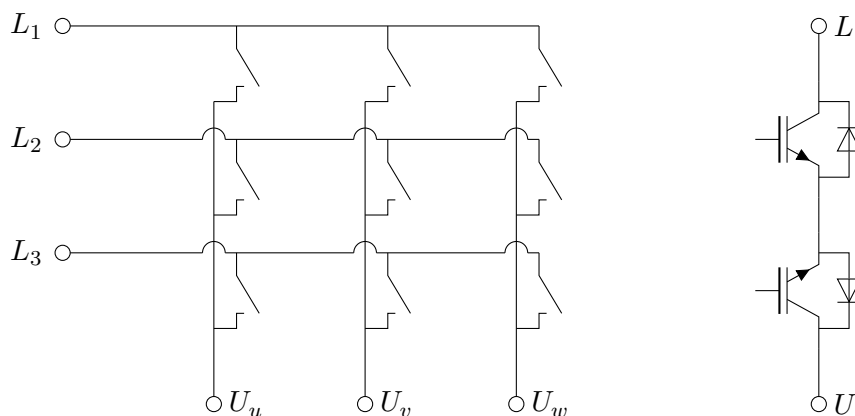


**Abbildung 5.44:** Beispielhafte direkte Stromregelung; oben die Ventilansteuerung, unten der hieraus resultierende Strom. Beim Erreichen des Sollwertbands (grün) wird die Ventilstellung geändert und der Strom ändert seine Richtung.

wird der Strom über einen Zweipunktregler direkt, also ohne Umweg über das Berechnen eines Tastverhältnisses oder des Spannungssollwertes geregelt.

### 5.11.2 Direktumrichter

Die bisher verwendete Strategie arbeitet mit den drei Funktionsblöcken Gleichrichtung - gefilterter Gleichspannungszwischenkreis - Wechselrichtung. Bei einem **Direktumrichter** bzw. **Matrixumrichter** wird auf die Gleichrichtung und den Gleichspannungszwischenkreis verzichtet und die Ausgangsspannung direkt aus den Eingangsspannungen geschaltet, siehe Abbildung 5.45.



**Abbildung 5.45:** Prinzipieller Aufbau eines Matrixumrichters (links) und die Realisierung eines Schalters durch IGBTs (rechts)

Hierdurch entfällt der Gleichspannungszwischenkreis und damit auch die Zwischenkreiskapazität, wodurch ein höhere Leistungsdichte erreicht werden kann. Die Reihenschaltung zweier Ventile bei den Schaltern ist erforderlich, um einen geregelten Strom-

fluss in beide Richtungen und damit den Betrieb bei der jeweils positiven als auch bei der negativen Halbwelle der Versorgungsspannung zu ermöglichen. Ferner ist dadurch die Rückspeisung bei Matrixumrichter prinzipiell möglich.

Nachteilig ist bei dieser Topologie der direkt geschaltete Eingangsstrom und der damit verbundene hohe Oberschwingungsanteil in der Ausgangsspannung, da hart<sup>10</sup> geschaltet wird. Daher ist zumindest eingangsseitig ein entsprechendes Oberschwingungsfilter erforderlich.

### 5.11.3 Dreipunktwechselrichter

Bei einem Dreipunktwechselrichter (englisch *Three-level-inverter* (TLI) oder auch *Neutral Point Clamped Inverter* (NPC)) handelt es sich um eine Umrichtertopologie, bei der die Ausgangsspannung  $U_2$  nicht nur auf die Gleichspannungszwischenkreisniveaus  $U_{ZK}$  oder die Bezugsgröße  $0\text{ V}$ , geschaltet wird, sondern auch auf die halbe Zwischenkreisspannung  $U_0 = U_{ZK}/2$ . Die Topologie ist in Abbildung 5.46 angegeben.

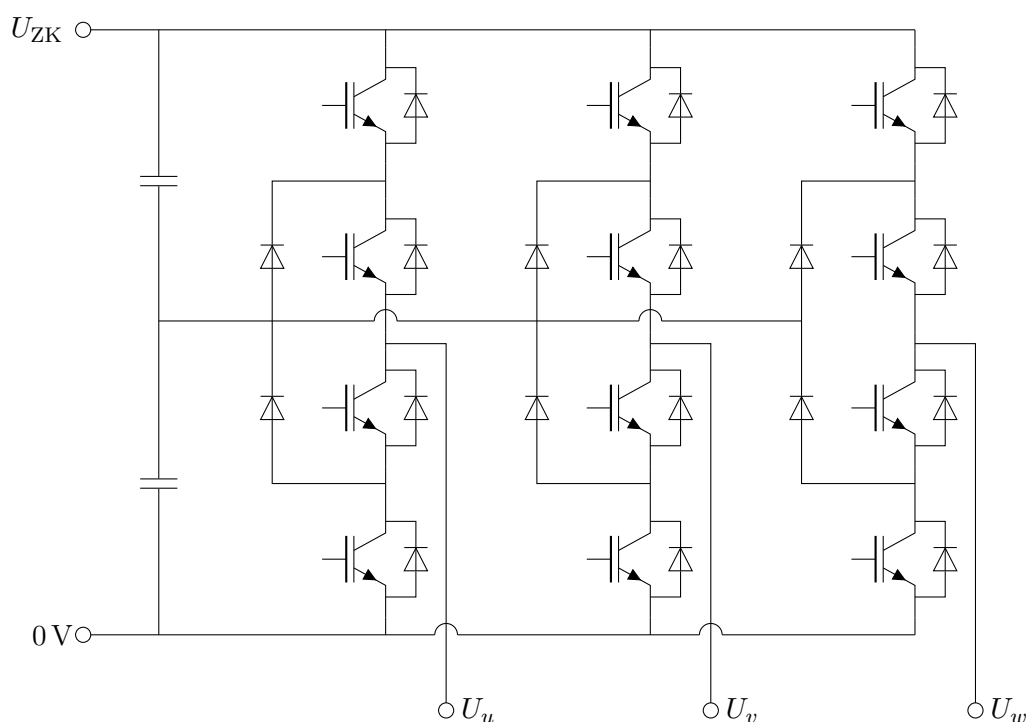


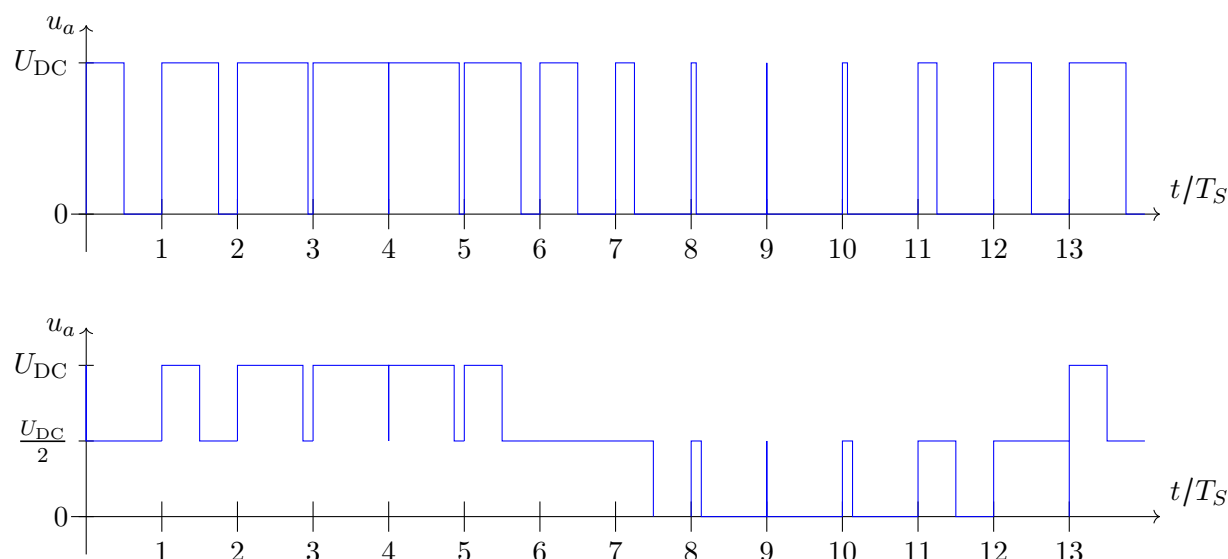
Abbildung 5.46: Schaltplan eines Dreipunktwechselrichters

Die Spannung  $U_0$  wird durch die beiden Kapazitäten  $C$  auf  $U_0 = U_{ZK}/2$  symmetriert.

- Sind in einem Strang in Abbildung 5.46 die beiden mittleren IGBTs durchgeschaltet, liegt an diesem Ausgang die Ausgangsspannung  $U_0$  an.
- Sperren die beiden oberen Schalter, liegt die Bezugsmasse ( $0\text{ V}$ ) am Ausgang an.
- Sperren die unteren IGBTs liegt die Ausgangsspannung bei  $U_{ZK}$ .

<sup>10</sup>Schalten unabhängig von gerade anliegender Spannung und vom gerade fließenden Strom wird als hartes Schalten bezeichnet

Die drei Spannungen  $U_u$ ,  $U_v$  und  $U_w$  sind an die Drehstromwicklung des Motors angeschlossen. Wenn jede dieser drei Strangspannungen jeweils drei Zustände ( $0\text{ V}$ ,  $U_0$  oder  $U_{\text{ZK}}$ ) annehmen kann, ergeben sich insgesamt  $3^3 = 27$  Schaltzustände<sup>11</sup> für den Spannungszeiger anstelle von  $2^3 = 8$  Schaltzustände<sup>12</sup> beim Zweipunktwechselrichter.



**Abbildung 5.47:** Ausgangsspannung  $u_a$  eines Zweipunktwechselrichters (oben) und eines Dreipunktwechselrichters (unten) beim Stellen einer sinusförmigen Spannung mit zwölf Schaltperioden pro Periode.

Durch diese höhere Anzahl von Schaltzuständen kann die Spannung wesentlich eleganter gestellt werden, da dann über das Tastverhältnis nicht mehr so stark moduliert werden muss. Ferner müssen die Ventile dann nur noch die halbe Spannung schalten, woraus sich zwei Möglichkeiten ergeben:

- Es werden Ventile, die für die halbe Zwischenkreisspannung ausgelegt sind, verwendet. Diese haben meist ein besseres Schaltverhalten, wodurch geringere Schaltverluste und/oder deutlich höhere Schaltfrequenzen, beispielsweise  $64\text{ kHz}$ , möglich werden. Hierdurch ist eine höhere Ausgangsfrequenz realisierbar, die dann für Hochgeschwindigkeitsanwendungen, z.B. mit  $200.000\text{ U/min}$ , genutzt werden.
- Alternativ kann auch mit einer doppelt so hohen Zwischenkreisspannung gearbeitet werden, ohne die Spannungsbelastung der einzelnen Ventile zu erhöhen. Hierdurch steht dann bei gleichem Strom die doppelte Leistung zur Verfügung.

Es gibt weitere Topologien, die gegebenenfalls mit noch weiteren Spannungsniveaus arbeiten.

<sup>11</sup>hiervon sind manche Schaltzustände redundant, es stehen also faktisch weniger Schaltzustände zur Verfügung

<sup>12</sup>zwei Schaltzustände sind redundant, faktisch bleiben nur 6 sinnvolle Zustände übrig



# Weiterführende Literatur und Quellenverzeichnis

- [Ben16] Abbildung freundlicherweise zur Verfügung gestellt von der Fa. Bender GmbH & Co. KG, Londerfer Str. 65, 35305 Grünberg
- [EMB05] Elektromotorenwerke Brienz AG: *Technische Beschreibung - Elektrische Auslegung*. www.embw.ch, S. 1.2.1 - 1.2.4, Version 10/05, 2005
- [EAT11] Heumann, W.; Kracht, T.; Petrick, B.; Riege, H.; Wiegand, R. (Hrsg.): *Das EATON-Schaltungsbuch*. Korrigierte Auflage, 2011
- [DIN 61000] DIN EN 61000-3-2:2015-03: *Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) - Teil 3-2: Grenzwerte - Grenzwerte für Oberschwingungsströme (Geräte-Eingangsstrom  $\leq 16$  A je Leiter)*. IEC 61000-3-2:2014 oder auch VDE 0838-2:2015-03
- [KEB20] Abbildung freundlicherweise zur Verfügung gestellt von der Fa. KEBA Industrial Automation Germany GmbH, Gewerbestraße 5-9, 35633 Lahnau
- [Pho20] Abbildung freundlicherweise zur Verfügung gestellt von der Fa. PHOENIX CONTACT Deutschland GmbH, Flachsmarktstraße 8, 32825 Blomberg
- [Sch20] Abbildung freundlicherweise zur Verfügung gestellt von der Fa. Schmidbauer Transformatoren und Gerätebau GmbH, Spanberg 16, 84332 Hebertsfelden

# Anhang A

## Vorsatzzeichen und Formelzeichen

### A.1 Typische Vorsatzzeichen

Wert und Symbol	Name
$10^{18} = 1 \text{ E}$	Exa
$10^{15} = 1 \text{ P}$	Peta
$10^{12} = 1 \text{ T}$	Tera
$10^9 = 1 \text{ G}$	Giga
$10^6 = 1 \text{ M}$	Mega
$10^3 = 1 \text{ k}$	kilo
$10^2 = 1 \text{ h}$	hekto
$10^1 = 1 \text{ D}$	Deka
$10^{-1} = 1 \text{ d}$	deci
$10^{-2} = 1 \text{ c}$	centi
$10^{-3} = 1 \text{ m}$	milli
$10^{-6} = 1 \mu$	mikro
$10^{-9} = 1 \text{ n}$	nano
$10^{-12} = 1 \text{ p}$	pico
$10^{-15} = 1 \text{ f}$	femto
$10^{-18} = 1 \text{ a}$	atto

Vorsatzzeichen werden ohne Lehrzeichen vor die Einheit gesetzt!

### A.2 Verwendung von Formelzeichen

Symbol	Name	Bedeutung	Einheit
$\alpha$	Alpha (Minuskel)	Winkelbeschleunigung	$1 \text{ rad/s}^2, 1^\circ/\text{s}^2$
$\delta, \delta(t)$	Delta (Minuskel)	Impuls, Deltaimpuls, Impulsfunktion	1
$\varepsilon$	Epsilon (Minuskel)	$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ : Permittivität	$1 \text{ As/Vm}$
$\varepsilon$	Epsilon (Minuskel)	Umfangskoordinate in elektrischen Maschinen	1 rad
$\eta$	Eta (Minuskel)	Wirkungsgrad	1

Symbol	Name	Bedeutung	Einheit
$\vartheta$	Theta (Minuskel)	Temperatur	1 K, 1 °C
$\vartheta$	Theta (Minuskel)	Lastwinkel	1 rad
$\Theta$	Theta (Majuskel)	Durchflutung	1 A
$\mu$	My (Minuskel)	Permeabilität: $\mu = \mu_0\mu_r$	1 Vs/Am
$\pi$	Pi (Minuskel)	Kreiszahl	1
$\varrho$	Rho (Minuskel)	spez. Widerstand	1 $\Omega$ m/m <sup>2</sup>
$\sigma$	Sigma (Minuskel)	Sprungfunktion, Einheitssprung	1
$\tau$	Tau (Minuskel)	Zeitkonstante	1 s
$\varphi$	Phi (Minuskel)	Phasenwinkel	1 rad
$\phi$	Phi (Minuskel)	elektrisches Potential	1 V
$\Phi$	Phi (Majuskel)	magnetischer Fluss (durch eine einlagige Fläche)	1 Wb = 1 Vs
$\Psi$	Psi (Majuskel)	verketteter magnetischer Fluss	1 Vs
$\underline{\Psi}_P$	Psi (Majuskel)	Zeiger der Polradflussverkettung	1 Vs
$\omega$	Omega (Minuskel)	Kreisfrequenz	1 rad/s
$\Omega$	Omega (Majuskel)	explizite Kreisfrequenz	1 rad/s

**Tabelle A.2:** Typische Verwendung griechischer Buchstaben

Symbol	Bedeutung	Einheit
$a$	Beschleunigung	1 m / s <sup>2</sup>
$B$	„Magnetfeld“, magnetische Flussdichte	1 kg / (A s <sup>2</sup> ) = 1 V s / m <sup>2</sup>
$C$	Kapazität	1 F
$D$	elektrische Flussdichte	1 A s / m <sup>2</sup>
$D$	Tastverhältnis, $T_{\text{ein}}/T_S$	1
$E$	Elektrische Feldstärke	1 V/m
$f$	Frequenz	1 Hz
$f(t), F$	Kraft (zeitabhängig, Gleichgröße)	1 N
$G$	elektrischer Leitwert, $G = 1/R$	1 S = 1/ $\Omega$
$H, H$	magnetische Feldstärke	1 A/m
$i(t)$	Strom, zeitabhängig	1 A
$\underline{I}$	Strom, Zeigerdarstellung	1 A
$j$	komplexe Einheit	1
$k$	Verhältnis von lastseitigem zum antriebsseitigen Massenträgheitsmoment	1
$J$	Massenträgheitsmoment	1 kg m <sup>2</sup>
$L$	Induktivität	1 H
$m(t), M$	Drehmoment (zeitabhängig, Gleichgröße)	1 Nm
$n$	Drehzahl	1 U/min
$p$	Polpaarzahl	1
$p(t), P$	Leistung, Wirkleistung	1 W
$q(t)$	Ladung	1 C = 1 As
$Q$	Ladung	1 C
$Q$	Blindleistung	1 Vas
$R$	ohm'scher Widerstand, Resistanz	1 $\Omega$

Symbol	Bedeutung	Einheit
$s$	Schlupf	1
$S$	Scheinleistung	1 VA
$t$	Zeit	1 s
$T$	Periodendauer	1 s
$u(t)$	Spannung, zeitabhängig	1 V
$\underline{U}$	Spannung, Zeigerdarstellung	1 V
$v$	Geschwindigkeit	1 m/s
$W$	Arbeit, Energie	1 J
$X$	Blindwiderstand, Reaktanz	1 $\Omega$
$Y, \underline{Y}$	komplexer Leitwert, Admittanz, $Y = 1/Z$	1 1/ $\Omega$
$Z, \underline{Z}$	komplexer Widerstand, Impedanz, Wechselspannungswiderstand, Scheinwiderstand	1 $\Omega$

**Tabelle A.3:** Typische Verwendung lateinischer Buchstaben

Symbol	Bedeutung
*	als hochgestellter Index Kennzeichnung eines Sollwerts
0	in der Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie ein Schnittpunkt mit einer Achse, also $m_0 = m(n = 0)$ für das Stillstandsmoment oder $n_0 = n(m = 0)$ für die Leerlaufdrehzahl
A	auf den Anker bezogene Größe
eff	Effektivwert, alternativ zum Index wird der Effektivwert auch durch Verwendung eines Großbuchstaben angezeigt
elek	„elektrische“, auf eine Polteilung bezogene Größe
E	durch den Erreger (d.h. durch den Stator) hervorgerufene Größe
$k$	Kippmoment oder Kippdrehzahl in der Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie
mech	auf die Mechanik bezogene Größe
$M$	Motorische Größe, antriebsseitig
$L$	Last, lastseitig oder Lorentz-(kraft)
$N$	Nenngröße, ( <i>nominal value</i> ), Wert für den Normalbetrieb; wird häufig mit zugehörigem Toleranzband angegeben, <b>oder auch</b> Bemessungswert, für den aus historischen Gründen neben dem „r“ der Index „N“ verwendet wird.
$r$	Bemessungsgröße, ( <i>rated value</i> ), früher auch „obere Nennspannung“: die maximale Spannung, für die ein Netz oder Betriebsmittel ausgelegt ist. In der Antriebstechnik ist das die Größe, für die die Maschine ausgelegt, „bemessen“ ist. Diese Größen wurden früher als Nenngrößen bezeichnet, daher ist alternativ der Index „N“ in Verwendung.
$R$	auf den Rotor bzw. Läufer bezogene Größe
$RS$	relativ zwischen Rotor und Stator, immer auf die Polteilung bezogen, „elektrische“ Größe
$S$	auf den Stator bezogene Größe

**Tabelle A.4:** Typische Verwendung von Indices

### A.3 Hinweise zum Satz von Formelzeichen

Die Verwendung von Formelzeichen sind in der DIN 1304 geregelt, insbesondere in den Kapiteln 3 (elektrische Energie), 7 (elektrische Maschinen) und 8 (Stromrichter).

- Formelbuchstaben werden wie Konstanten oder Funktionen kursiv gesetzt.
- Einheiten werden „stehend“, also nicht kursiv gesetzt.
- Für Formelbuchstaben empfiehlt sich die Verwendung einer Schriftart mit Serifen.
- Zwischen dem Zahlenwert und der Einheit wird ein Zwischenraum freigelassen, z. B.  $1/6$  der Breite des Buchstaben M
- Vektoren können durch Unterstreichen des Formelbuchstaben kenntlich gemacht werden.
- Matrizen können durch Unterstreichen des Formel(Groß-)buchstaben und/oder Fettsatz kenntlich gemacht werden.
- Variable Größen werden meist klein, konstante Größen groß geschrieben, z. B. beim Drehmoment  $m(t)$  und  $M = \text{konst.}$  oder auch bei  $f(t)$ ,  $t$ ,  $i(t)$ ,  $u(t)$ ,  $\omega(t)$ ; atypisch ist dies aber für Felder ( $\underline{B}$ ,  $\underline{D}$ ,  $\underline{E}$ ,  $\underline{\Psi}$  und  $\underline{\Psi}_P$ ), Leistungen ( $P$ ,  $Q$ ,  $S$ ) oder Arbeit ( $W$ ), elektrische Eigenschaften ( $R$ ,  $L$ ,  $C$ ) oder Winkel
- Effektivwerte werden durch Großbuchstaben und ggf. durch ein tiefgestelltes  $_{\text{eff}}$  gekennzeichnet.
- Größen in Zeigerdarstellung werden durch einen Großbuchstaben (da ein Effektivwert) und durch Unterstreichen (auch wenn es sich um keinen Vektor handelt) gekennzeichnet.

# Anhang B

## Weitere Tabellen

### B.1 Klemmbezeichnung bei Gleichstrommaschinen

Wicklungsname	Klemme 1	Klemme 2
Ankerwicklung	A1	A2
Wendepolwicklung	B1	B2
Kompensationswicklung	C1	C2
Reihenschlusswicklung	D1	D2
Nebenschlusswicklung	E1	E2
Ständerwicklung bei Fremderregung	F1	F2

**Tabelle B.1:** Klemmbezeichnung bei Gleichstrommaschinen

### B.2 Betriebsarten für elektrische Antriebe

Betriebsart	Beschreibung	Zusatzangabe
S1	Dauerbetrieb	
S2	Kurzzeitbetrieb	Betriebszeit in Minuten
S3	periodischer Aussetzbetrieb	relative Einschaltdauer, bezogen auf 10 Minuten
S4	Aussetzbetrieb mit Einfluss des Anlaufverhaltens	Einschaltdauer in %

**Tabelle B.2:** Auswahl von Betriebsarten für elektrische Antriebe, siehe auch [EMB05]

### B.3 Übersicht über den IP-Code

Der IP-Code wird in der Form IPxy ohne Leerzeichen angegeben, wobei x für die Schutzart gegen Berühren bzw. dem Schutz vor Eindringen von Fremdkörpern beschreibt, und y den Schutz von Wasser beschreibt.

1. Ziffer	Bedeutung: Schutz vor Fremdkörpern oder Berührung
0	Kein Schutz
1	Geschützt gegen feste Fremdkörper mit Durchmesser ab 50 mm, Geschützt gegen den Zugang mit dem Handrücken
2	Geschützt gegen feste Fremdkörper mit Durchmesser ab 12,5 mm, Geschützt gegen den Zugang mit einem Finger
3	Geschützt gegen feste Fremdkörper mit Durchmesser ab 2,5 mm, Geschützt gegen den Zugang mit einem Werkzeug
4	Geschützt gegen feste Fremdkörper mit Durchmesser ab 1,0 mm, Geschützt gegen den Zugang mit einem Draht
5	Geschützt gegen Staub in schädigender Menge, vollständiger Schutz gegen Berührung
6	Staubdicht, vollständiger Schutz gegen Berührung

**Tabelle B.3:** Optionen für die 1. Ziffer im IP-Code, entsprechend DIN EN 60529

2. Ziffer	Bedeutung: Schutz gegen Wasser
0	Kein Schutz
1	Schutz gegen Tropfwasser
2	Schutz gegen fallendes Tropfwasser, wenn das Gehäuse bis zu 15° geneigt ist
3	Schutz gegen fallendes Sprühwasser bis 60° gegen die Senkrechte
4	Schutz gegen allseitiges Spritzwasser
5	Schutz gegen Strahlwasser aus beliebigem Winkel
6	Schutz gegen starkes Strahlwasser
7	Schutz gegen zeitweiliges Untertauchen
8	Schutz gegen dauerndes Untertauchen
9	Schutz gegen Wasser bei Hochdruck-/Dampfstrahlreinigung

**Tabelle B.4:** Optionen für die 2. Ziffer im IP-Code, entsprechend DIN EN 60529

## B.4 Bezeichnungsschlüssel für Betriebsmittel in Stromlaufplänen

Kennbuchstabe	Aufgabe des Betriebsmittel	Beispiel
B	Umwandlung einer Eingangsgröße	Sensoren, Messwiderstand, Grenztaster
C	Speicherung von Energie	Kondensator, Speicher
E	Bereitstellung von Wärme	Lampen, Heizung, Heizwiderstand
F	Schutz eines Signalflusses	Sicherung
G	Energie„erzeuger“	Generatoren, Generator, Batterie, USV
K	Signale verarbeiten	Relais, Schütze, Transistor
M	mechanische Energie	Motor
P	Information, optische und akustische Meldegeräte	Kontrollleuchte, Signallampe, LED, Messgerät
Q	Schalten eines Flusses	Leistungstransistoren, Leistungsschütz, Bremschopper

Kennbuchstabe	Aufgabe des Betriebsmittel	Beispiel
R	Begrenzung	Widerstand, Diode, Drossel
S	Signalumwandlung	Befehlsgeräte, Drucktaster, Schalter, MMI
T	Energiewandlung	Transformator, Schaltnetzteil, Frequenzumrichter, Gleichrichter, Verstärker, Antenne, Messumformer, Stromwandler
U	Halten von Objekten	
V	Verarbeitung von Materialien	Filter
W	Energie leiten	
X	Verbinden von Objekten	Klemmen, Stecker

**Tabelle B.5:** Kennbuchstaben für die Bezeichnung von Betriebsmitteln in Schaltplänen

## B.5 Thermische Klassen

Die Thermische Klasse (auch Isolierstoffklasse) bezeichnet die dauerhafte Hitzebeständigkeit der Isolierung von elektrotechnischen Bauteilen bzw. Komponenten, d.h., dass sich die physikalische Eigenschaft der Isolierung nur in bestimmten Grenzen ändert. Es werden Durchschnittswerte betrachtet, die Werte dürfen kurzzeitig auch überschritten werden, ohne dass die Isolierung Schaden nimmt.

Die Alterungsprozesse in der Isolierung sind in den Klassen bereits berücksichtigt. Die Alterung ist ein chemischer Prozess (der Isolierstoff *verdampft*), der durch Übertemperaturen beschleunigt wird. Die Isolierung ist bei fehlender Überschreitung der Temperatur auf 100.000 h, etwa 12 Jahre ausgelegt. Ein dauerhaftes Überschreiten der Temperatur um 8 °C halbiert die Lebensdauer des Bauteils (Montsingersche Regel). Ein kurzfristiges Überschreiten dagegen verringert die Lebensdauer nur unmerklich.

Die für die Auslegung betrachtete Aufstellhöhe liegt zwischen 0 und 1000 m über NN.

Bei Drehstrommotoren ist die Isolierstoffklasse unter „ISO-Klasse“ auf dem Typenschild angegeben.

Thermische Klasse	$\vartheta_{amb}$	$\Delta\vartheta_{grenz}$	$\Delta\vartheta_{MF}$	Kennbuchstabe	Beispiel
105	40 °C	60 K	5 K	A	
120	40 °C	75 K	5 K	E	
130	40 °C	80 K	10 K	B	typisch für Transformatoren
155	40 °C	105 K	10 K	F	typisch für Elektromotoren
180	40 °C	125 K	15 K	H	typisch für Elektromotoren

**Tabelle B.6:** Thermische Klassen (Auswahl), siehe DIN EN 60085, IEC 85, der IEC 216 sowie der VDE 0530, Teil 1

Die Thermische Klasse berechnet sich aus der Umgebungstemperatur, also der Luft oder ggf. der



Kühlflüssigkeit ( $\vartheta_{\text{amb}}$ ), einer Erhöhung dieser aufgrund der Erhitzung der Wicklung ( $\Delta\vartheta_{\text{grenz}}$ ), sowie einem empirischen Zuschlag für eine weitere Erhöhung im heißesten Punkt der Wicklung, die messtechnisch nicht erfasst werden kann ( $\Delta\vartheta_{MF}$ ).