

# **Messtechnik und Regelungssysteme**

*MTRS 3/Jg.4 - Abt. Elektronik HTBLuVA Salzburg*

SalH - Version 0.1

### 1 Aktoren und Stellanrichtungen

**Aktoren**, oft auch wegen des englischen Begriffs *actuator* als **Aktuatoren** bezeichnet, setzen die elektrischen Signale (z. B. die von einem Steuerungscomputer ausgehende Befehle) in mechanische Bewegung oder andere physikalische Größen (z. B. Druck oder Temperatur) um.

Aktoren sind wichtige Komponenten **mechatronischer Systeme** und stellen dort das **Bindeglied der Informationsverarbeitung und dem mechanischen Grundsystem** dar.

Ein Beispiel ist der **Tauchspulenaktor in Festplattenlaufwerken** (vgl. Abb. 1), der für die Positionierung der Schreib-/Leseköpfe verantwortlich ist. Die **Ansteuerung** und Überwachung erfolgt dabei von der Controller-Elektronik, die für den Antrieb erforderliche **Hilfsenergie** kommt von der Rechner-Versorgung.



Abbildung 1: Schreib-/Leseköpfe einer Festplatte

Vergleicht man mit einem Menschen, stellen Aktoren die Muskeln dar, die zur Ausführung von Bewegungen oder zum Aufbringen von Kräften erforderlich sind. Ihre Ansteuerung erfolgt durch das Gehirn (Prozessrechner) und ihre Funktionsfähigkeit erfordert eine entsprechende Durchblutung (Hilfsenergie).

In der **Robotik** wird oft auch der Begriff **Effektor** gleichbedeutend für Aktor verwendet. Effektoren dienen dem Roboter z. B. zum Ergreifen und Bearbeiten von Gegenständen und erzeugen so einen Effekt.



Abbildung 2: Roboterarm

## 1 - Aktoren und Stellanrichtungen

In der **Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik** bezeichnen Aktoren das **signalwandlerbezogene** Gegenstück zu **Sensoren** und bilden die **Stellglieder** in einem **Regelkreis** (vgl. Abb. 3). Ein Beispiel ist das Öffnen und Schließen eines Ventils.

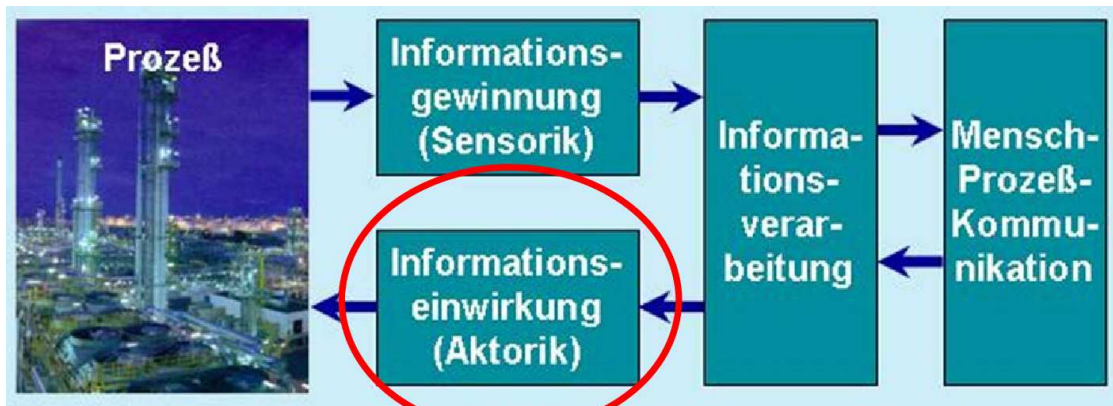


Abbildung 3: Stark vereinfachtes Schema eines Regelkreises

Technisch gesehen versteht man unter einem Aktor die Zusammenschaltung eines **Energiewandlers** mit einem **Leistungsstellglied**:

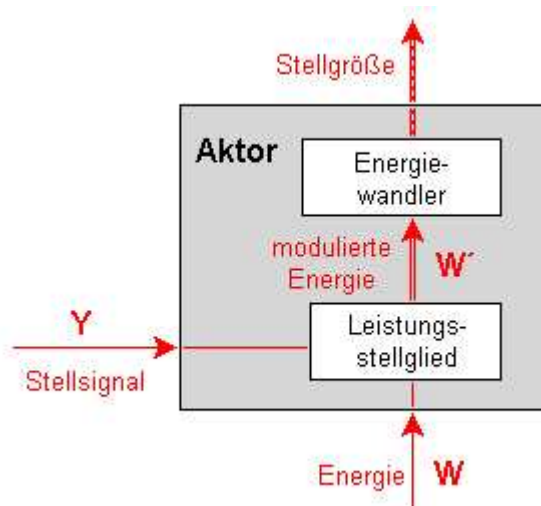


Abbildung 4: Aktor als Zusammenschaltung von Leistungsstellglied und Energiewandler

Das Leistungsstellglied verbindet die eingehende Energie (in der Regel elektrische Energie) mit dem Stellsignal. Es entsteht eine modulierte Energie, die vom Wandler in die Energieart der Stellgröße (oft mechanische Energie) transformiert wird.

Insgesamt fungiert der Aktor als Energiewandler mit **beschränktem Wirkungsgrad  $\eta$** , wobei eine gewisse Menge der **zugeführten Energie  $E_{ZU}$**  in **Verlustwärme  $Q$**  umgesetzt wird.

$$E_{ZU} = E_{AB} + Q \quad ; \quad \eta = \frac{E_{AB}}{E_{ZU}} \leq 1 \quad (1)$$

Da Leistung und Energie über die Zeit verknüpft sind, gilt der Zusammenhang (1) natürlich völlig analog auch bei Betrachtung der Leistungen:

# 1 - Aktoren und Stellanrichtungen

$$P_{ZU} = P_{AB} + P_V \quad ; \quad \eta = \frac{P_{AB}}{P_{ZU}} \leq 1 \quad (2)$$

**Beispiel 1:** In einem Antriebssystem wird ein Frequenzumrichter als Stellglied eingesetzt. Bei Nennleistung des Motors ( $1.8kW$ ) produziert der Umrichter eine Verlustleistung von  $80W$ . Wie groß ist der Leistungsbedarf der Anlage? Welchen Wirkungsgrad hat der Umrichter?

**Beispiel 2:** Im Teillastbereich verschlechtert sich der Wirkungsgrad des Umrichters aus Beispiel 1. So werden bei  $250W$  Motorleistung (*mechanisch, Wellenleistung!*) dem Umrichter noch  $300W$  elektrische Leistung zugeführt. Welchen Wirkungsgrad hat das Stellglied, wenn der Motor selbst einen Wirkungsgrad von  $90\%$  aufweist? Welche Verlustleistung entsteht am Umrichter? Welchen Gesamtwirkungsgrad besitzt die Anlage? Welche Leistung wird dem Motor zugeführt? Welche Energiemenge in  $kWh$  wird für  $15min$  Betrieb unter diesen Rahmenbedingungen aus dem Versorgungsnetz entnommen?

## 1.1 Einteilung von Aktoren

Die systematische Einteilung von Aktoren kann auf verschiedene Weise erfolgen etwa nach der Aufgabe, nach Gruppe (klassische, neue oder Mikroaktoren) oder **nach dem physikalischen Wirkprinzip**:

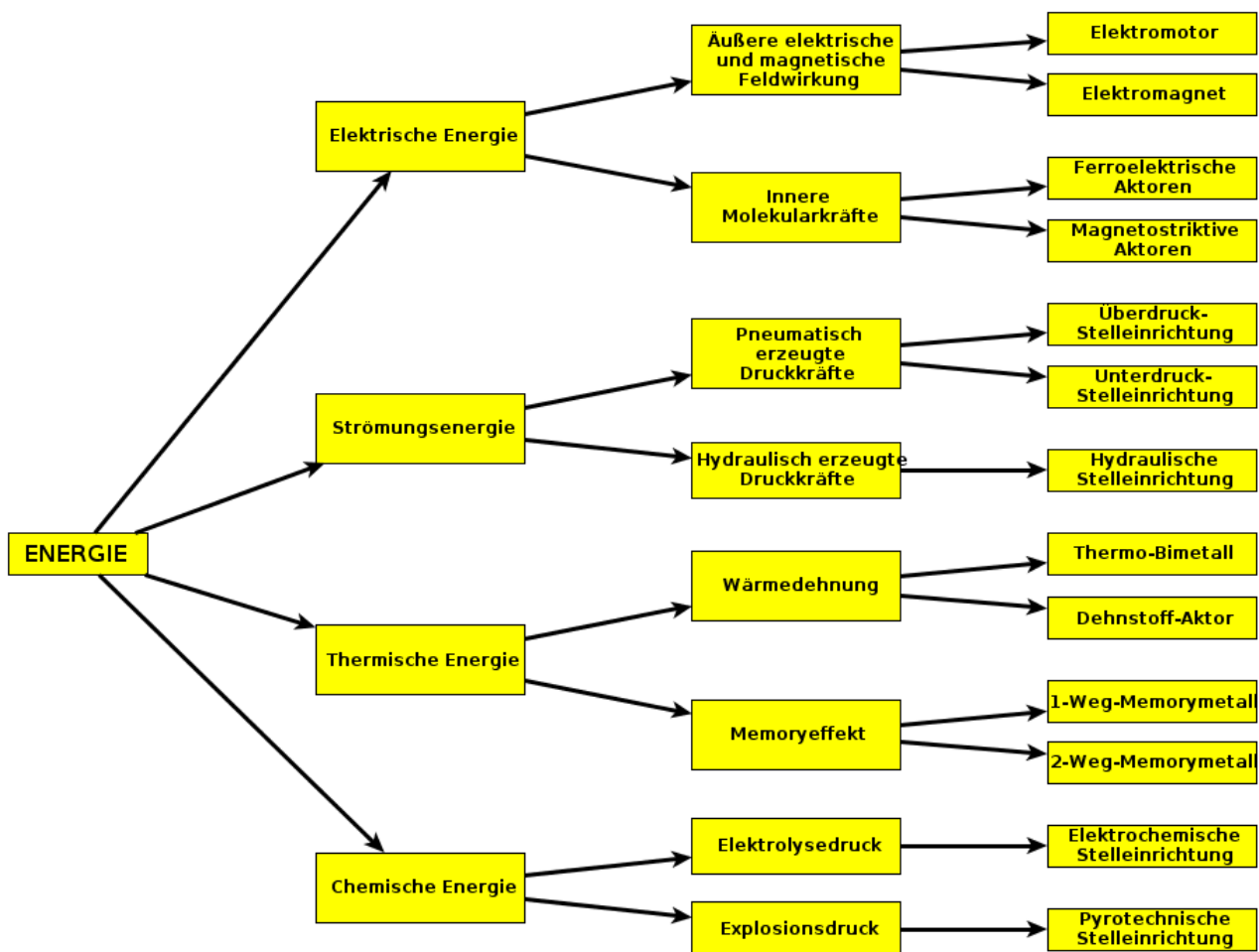


Abbildung 5: Aktoren - Einteilung nach dem physikalischen Wirkprinzip

## 1 - Aktoren und Stellanrichtungen

### 1.1.1 Elektrische Aktoren

#### 1.1.1.1 Elektromotore

##### Gleichstrommotore:

Eine Gleichstrommaschine besteht ebenfalls aus dem Ständer und dem Anker:

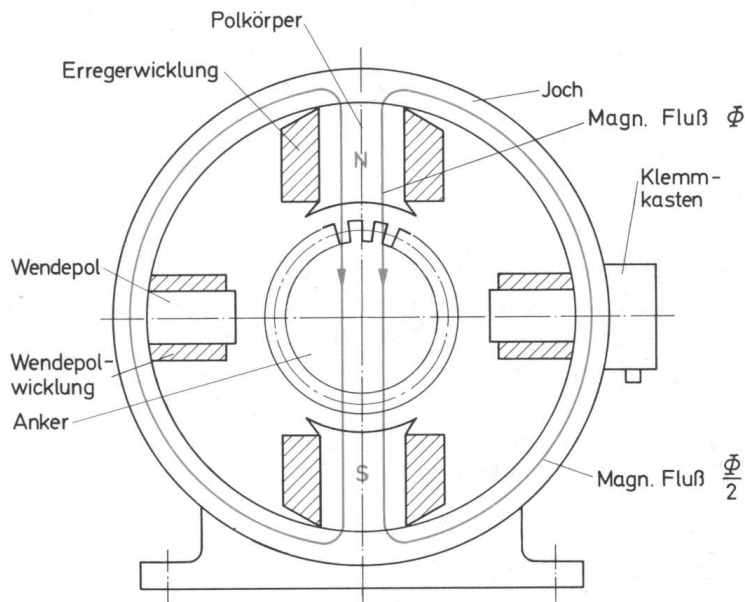


Bild 1.1a Aufbau einer zweipoligen Gleichstrommaschine

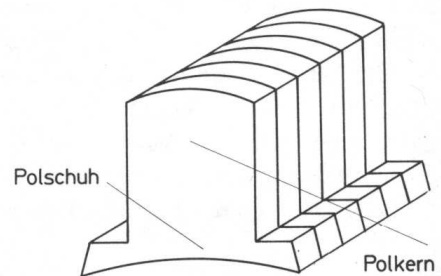


Bild 1.1b Polkörper

Abbildung 6: Aufbau einer zweipoligen Gleichstrommaschine

**Der Ständer** wirkt in Verbindung mit dem Gehäusemantel als mechanische Grundkonstruktion und trägt Bauteile wie Lagerschilde, Klemmkasten und Lüfter. Er wirkt weiters als **Elektromagnet**, der das **magnetische Gleichfeld** erzeugt. Der magnetische Kreis wird aus **geblechten Einzelteilen** aufgebaut, zur **Vermeidung von Wirbelströmen** bei raschem Stromwechsel.

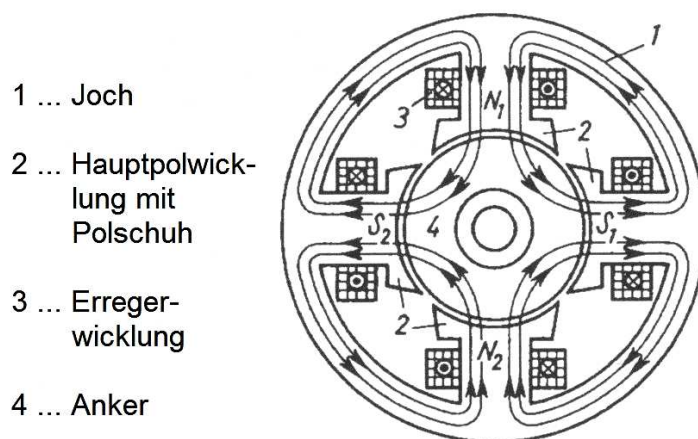


Abbildung 7: Magnetischer Kreis einer Gleichstrommaschine

Am **Joch** (1) sind **Hauptpole** (2) angebracht, deren Anzahl durch die **Polpaarzahl** angegeben wird. Die Pole haben ankerseitig den **Polschuh**, der dafür sorgt, dass jeder Hauptpol einen möglichst



## 1 - Aktoren und Steleinrichtungen

großen Umfangsteil des Ankers umfasst und damit den magnetischen Widerstand herabsetzt. Jeder Hauptpol trägt eine Magnetspule, alle Spulen werden zur **Erregerwicklung** (3) zusammengeschaltet. Hierbei wechselt immer ein Nordpol mit einem Südpol ab.



Abbildung 8: Trommelanker eines Gleichstrommotors

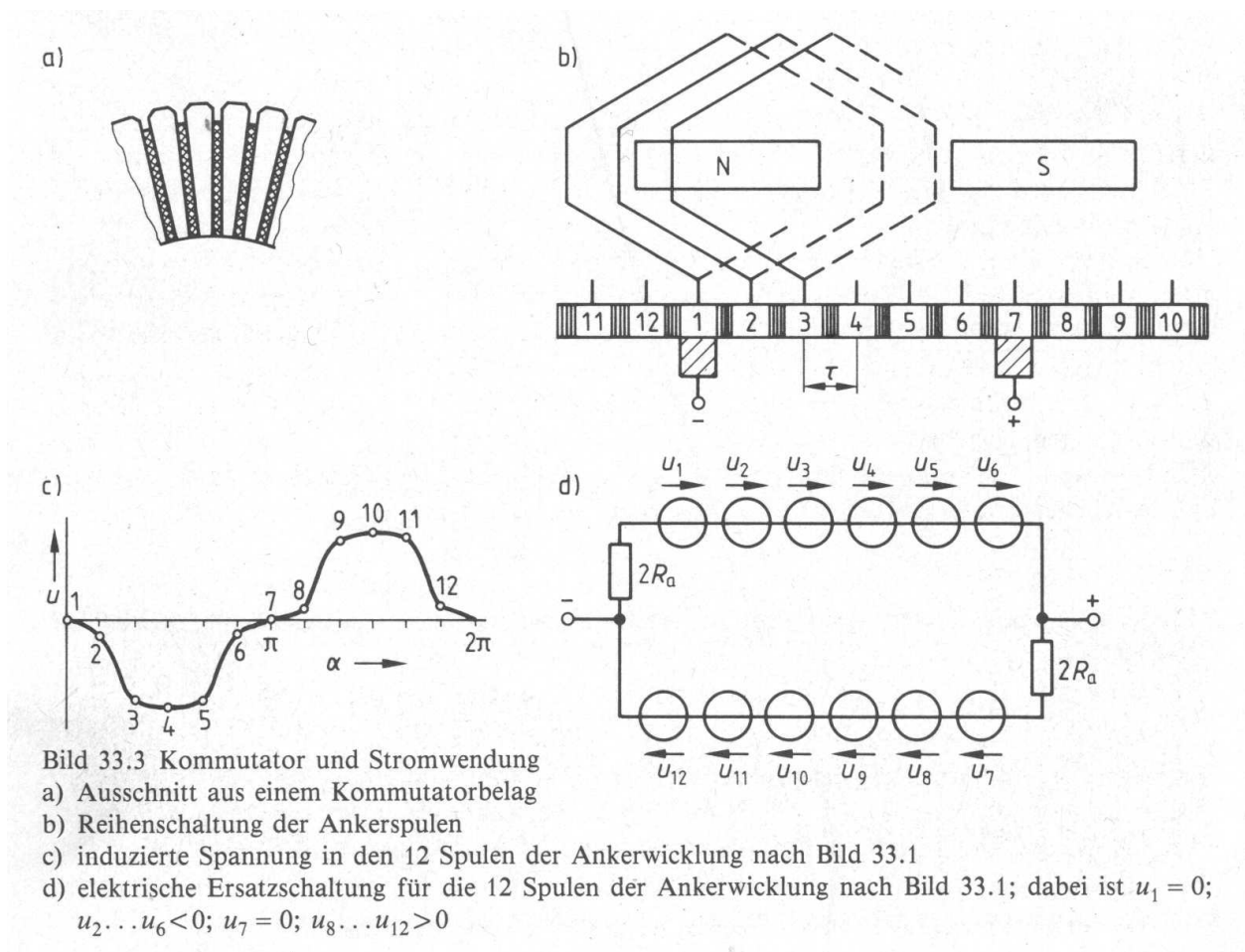


Abbildung 9: Kommutator und Stromwendung

## 1 - Aktoren und Stellanrichtungen

**Der Anker** (meistens als sg. Trommelanker ausgeführt, vgl. Abb. 8) besteht aus einer Welle mit einem geschichteten Blechpaket, sowie einer Ankerwicklung und einem **Stromwender**, dem so genannten **Kommutator**. In die Bleche sind äquidistante Längsnuten eingestanzte. In diesen Nuten liegen die Ankerspulen, die miteinander zur **Ankerwicklung** geschaltet werden. Die Enden der einzelnen Spulen sind an die **Kommutatorlamellen** angelötet. Die **Stromzuführung erfolgt über Kohlebürsten**, die auf der Kommutatoroberfläche gleiten. Der Kommutator besteht aus einzelnen, voneinander isolierten Lamellen aus Elektrolytkupfer. Diese Lamellen sind durch Gießharz oder durch eine mechanische Presskonstruktion zusammengehalten und voneinander durch Isolierplättchen getrennt.

An der Abwicklung des Kommutators (Abb. 9) kann man erkennen, dass die **einzelnen Spulen in Reihe geschaltet** sind. In jeder der Spulen wird eine bestimmte Augenblicksspannung induziert, durch die Serienschaltung greift man die **Summe aller Augenblicksspannungen** an den Bürsten ab. Hat sich der Anker um eine Nutteilung weitergedreht, so tritt wieder die gleiche Folge der Augenblickswerte der Spannungen auf, aber jetzt um eine Spule versetzt. Gleichzeitig wird aber auch der Bürstenabgriff um eine Spule versetzt vorgenommen, **damit bleibt die Summe der abgegriffenen Einzelspannungen unverändert**. Obwohl in den **Einzelspulen eine Wechselspannung induziert** wird, liegt **zwischen den Bürsten nahezu eine Gleichspannung** (Generatorbetrieb). Die Bürsten werden in der sg. **neutralen Zone**, dem **feldfreien Raum zwischen den Hauptpolen**, angeordnet. Diese Zone **verändert sich belastungsabhängig!**. Bei der **Kommutierung** werden jeweils **Spulen kurzgeschlossen**, sodass es wichtig ist, dass dies **möglichst in der neutralen Zone** erfolgt. In jener Spule, die in der neutralen Zone liegt, wird keine Spannung induziert. Die Stegspannung zwischen zwei Kommutatorlamellen darf 25–35V (je nach Maschine) nicht übersteigen, da sich sonst **Lichtbögen** (Bürstenfeuer) ausbilden. Im Extremfall führt das zu Rundfeuer zwischen beiden Bürsten und damit zum Kurzschluss. Deshalb muss auch der Bürstenabrieb zwischen den Lamellen sorgfältig entfernt werden.

Im **Stillstand** (ohne Ankerstrom) fließt nur der **Erregerstrom**, es ist daher nur das **Hauptfeld** vorhanden. Bei Bestromung des Ankers entsteht aber auch um die stromdurchflossenen Leiter des Ankers ein Feld, das sg. **Ankerquerfeld**. Seine Feldlinien stehen senkrecht auf die Feldlinien des Hauptfeldes. Es steht räumlich still, weil auch die Bürsten stillstehen. Dadurch, dass am gleichen Ort jetzt zwei verschiedene Felder gleichzeitig wirken, kommt es zu einer Überlagerung beider Felder. Das Ankerquerfeld verstärkt das Hauptfeld auf der einen Seite und schwächt es auf der anderen. Man nennt dies die **Ankerrückwirkung**:

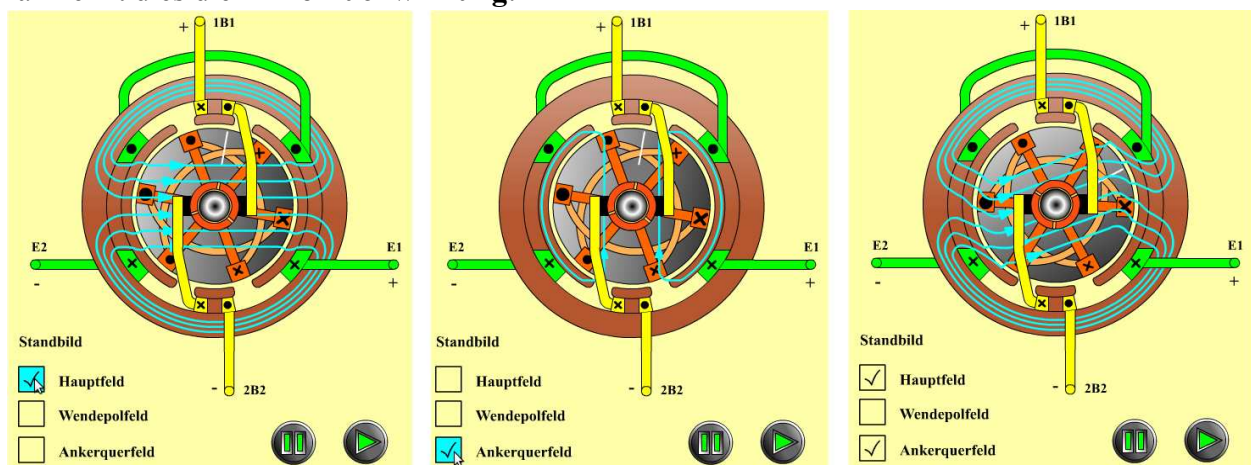


Abbildung 10: Ankerrückwirkung

Als Folge **verdrehen sich die neutrale Zone** um einen bestimmten Winkel (in Drehrichtung beim

## 1 - Aktoren und Stelleinrichtungen

Generator, gegen die Drehrichtung beim Motor). Damit würden dann die Bürsten nicht mehr in der neutralen Zone liegen und es würde sich **starkes Bürstenfeuer** entwickeln. Also muss man entweder die **Bürsten verdrehen** oder **das Ankerquerfeld kompensieren**. Die **Lage** der neutralen Zone ist allerdings **lastabhängig**, und daher kann man eine solche Verstellung nur um einen mittleren Winkel durchführen.

Günstiger - bei Maschinen höherer Leistung sogar unerlässlich - ist es zusätzliche **Wendepole** zwischen die **Hauptpole** einzubauen. Das damit erzeugte **Wendefeld** hebt im **Bereich der neutralen Zone** das **Ankerquerfeld** auf, sodass ein Verdrehen der Bürsten nicht mehr notwendig ist. Außerdem induziert es in den Ankerspulen, die sich im Bereich der neutralen Zone befinden, eine Spannung, die der selbstinduktiven Spannung infolge Stromänderung entgegengerichtet ist. Das verbessert zusätzlich die Stromwendung.

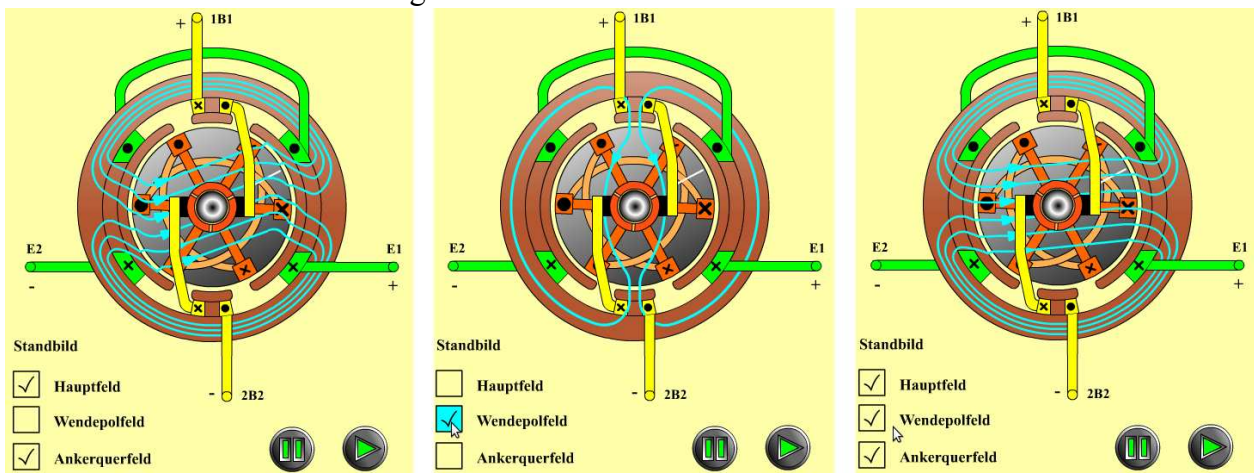


Abbildung 11: Einfluss der Wendepole auf das Gesamtfeld

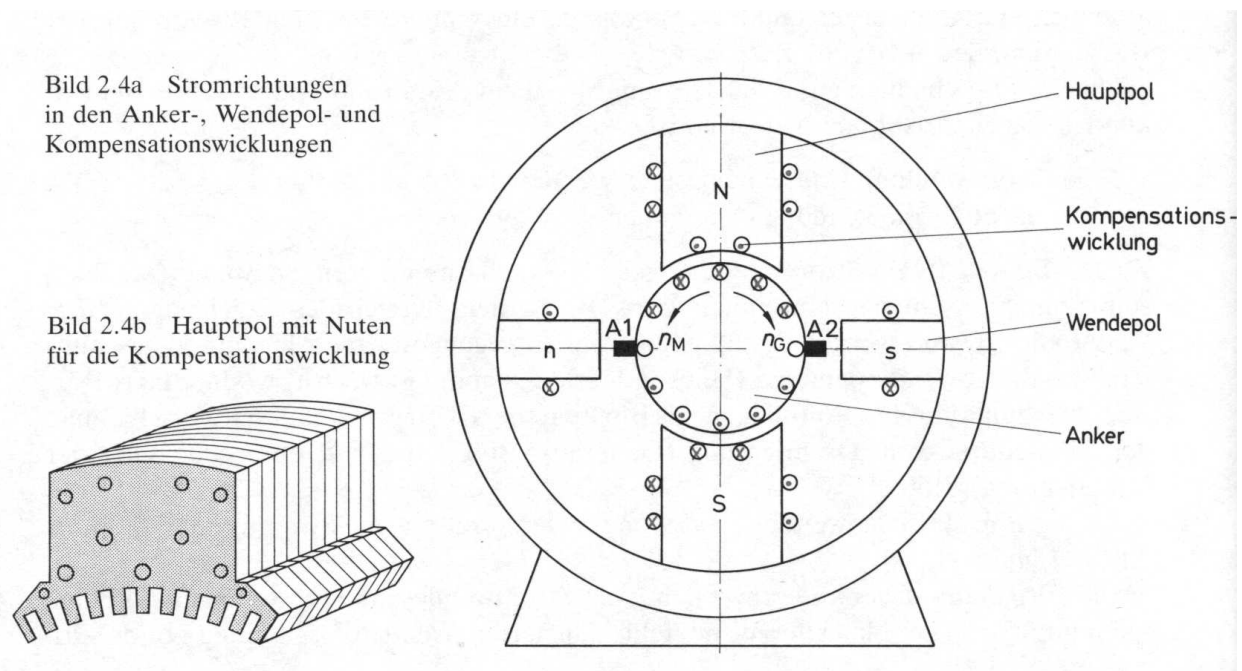


Abbildung 12: Gleichstrommotor mit Wendepolen und Kompensationswicklung



## 1 - Aktoren und Stellanrichtungen

Unter den Hauptpolen wird die Feldverzerrung zufolge des Ankerquerfeldes durch die Wendepole nicht kompensiert. Es würde daher im Lastbetrieb in Teilbereichen eine erhöhte Stegspannung auftreten. Maschinen mit hoher Leistung werden daher bei rauem Betrieb mit einer **Kompensationswicklung** ausgestattet, die **das Ankerquerfeld im Bereich der Hauptpole kompensiert**. Die Kompensationswicklung liegt in Nuten, die in die Hauptpole eingefräst sind:

**Kompensations- und Wendepolwicklung werden vom Ankerstrom durchflossen.** Steigt bei Belastung der Ankerstrom an, wird auch das Ankerquerfeld verstärkt, ebenfalls aber auch das Wendepol- und das Kompensationsfeld.

Das **Drehmoment** entsteht, weil die Windungen der Ankerwicklung im Magnetfeld des Ständers liegen. Fließt in den Stäben der Ankerwicklung Strom, so entsteht eine Kraftwirkung zwischen dem Magnetfeld der Ankerstäbe und dem des Ständers (**Lorentzkraft**).

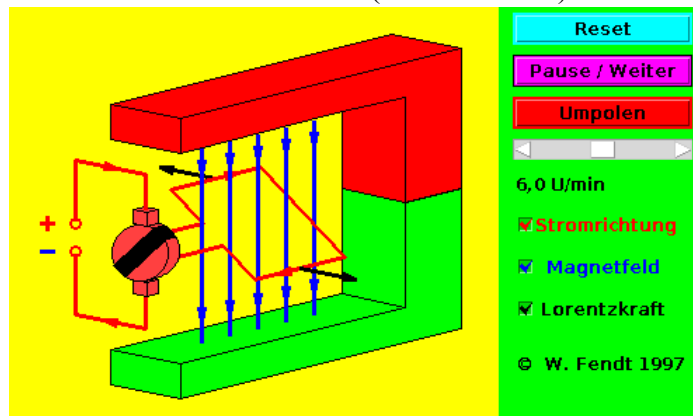


Abbildung 13: Entstehung des Drehmoments (vereinfacht)

Durch die Gleichrichtung der Kräfte (Stromwenderfunktion des Kommutators) entsteht über den Ankerradius ein Drehmoment. Dieses Drehmoment ist umso größer, je größer die Flussdichte  $B$  und der Strom in der Windung (Länge  $l$ ) sind. Im Inneren des Ankers resultiert schließlich das erzeugte Drehmoment  $M_i$  (sg. **inneres Moment**):

$$\text{Lorentzkraft: } F = B \cdot I_a \cdot l \quad (3) \quad I_a \dots \text{Ankerstrom}$$

$$\text{Drehmoment: } M_i \propto \Phi \cdot I_a \quad (4) \quad \Phi \dots \text{Statorfluss}$$

Für Motor- und Generatorbetrieb gilt gleichermaßen:

$$U_q = \frac{2 \cdot p \cdot N}{a} \cdot \Phi \cdot n = c \cdot \Phi \cdot \omega \quad (5) \quad \text{Ankerspannung}$$

$$M_i = \frac{p \cdot N}{\pi \cdot a} \cdot \Phi \cdot I_a = c \cdot \Phi \cdot I_a \quad (6) \quad \text{Inneres Moment}$$

mit

$$c = \frac{p \cdot N}{\pi \cdot a} \quad \text{und} \quad \omega = 2 \cdot \pi \cdot n \quad (7) \quad (n \dots \text{Drehzahl})$$

Durch die **Auslegung des Motors** werden die Größen

$c$  ... Maschinenkonstante

$p$  ... Polpaarzahl,

$a$  ... Zahl der parallelen Ankerzweige,

$N$  ... Gesamtzahl der Windungen der Ankerwicklung

# 1 - Aktoren und Stellanrichtungen

festgelegt. Das an der Welle **verfügbare Drehmoment** ist allerdings um die **Leerlaufverluste**  $M_v$  des Ankers kleiner als das innere Moment  $M_i$  ( $M = M_i - M_v$ ). Leistungsmäßige Betrachtung:

$P_{v0}$ ... <b>Leerlaufverluste</b>	(Lager-, Luft-, Bürstenreibung, Eisen- und Ummagnetisierungsverluste)
$P_{vL}$ ... <b>Lastabhängige Verluste</b>	(Stromwärmeverluste in allen Wicklungen, Bürstenübergang)

Bei Maschinen über  $1kW$  liegt der Wirkungsgrad zwischen 60% und 95%.

In Schaltungen mit Gleichstrommaschinen sind folgende **Anschlussbezeichnungen** für die einzelnen Bauteile üblich (genormt). Bauteile werden mit Großbuchstaben gekennzeichnet. Zusatzziffer **1** bedeutet **Anfang**, **2** bedeutet **Ende** des Bauteils. Auszug aus der Norm:

Bauteil	Bezeichnung
Ankerwicklung	$A1$ , $A2$
Wendepolwicklung	$B1$ , $B2$
Kompensationswicklung	$C1$ , $C2$
Erregerwicklung in Reihe zum Anker	$D1$ , $D2$
Erregerwicklung parallel zum Anker	$E1$ , $E2$
Erregerwicklung fremdversorgt	$F1$ , $F2$

Das **Betriebsverhalten** der Gleichstrommaschine wird neben den konstruktiven Eigenschaften wie z.B. der Maschinenkonstanten  $c$  maßgeblich durch die **Schaltungsart der Erregerwicklung** bestimmt. Die Eigenschaften von Motoren und Generatoren und insbesondere das Zusammenspiel zwischen Motoren und Arbeitsmaschinen lässt sich zweckmäßig und anschaulich in **Kennlinienfeldern** darstellen. **Die wichtigste Kennlinie ist dabei die Drehzahl-/Drehmomentkennlinie.**

**Permanenterregter Gleichstrommotor:** Bei kleineren Maschinen (Spielzeug, Stellantriebe, Gebläse und Kühler-Ventilatoren in Kraftfahrzeugen) kann der **Stator aus Permanentmagneten** (vgl. Abb. 14) bestehen. Diese Magnete sind mit der Entwicklung der Gleichstrommotoren immer leistungsfähiger geworden und gestatten heute den Bau von Motoren, die in ihrer Leistung denen mit elektrischer Erregung in Nichts nachstehen. Die **Kosten der Permanentmagnete** sind jedoch bei größeren Motoren oft höher als diejenigen einer Erregerwicklung. Permanenterregte Motoren haben **sehr hohe Einschaltströme**. Sie haben den Vorteil, dass zur Erzeugung des Magnetfeldes keine Energie benötigt wird. Das verbessert besonders bei kleiner Gesamtleistung den Wirkungsgrad. Nachteil ist der eingeschränkte Drehzahlbereich.

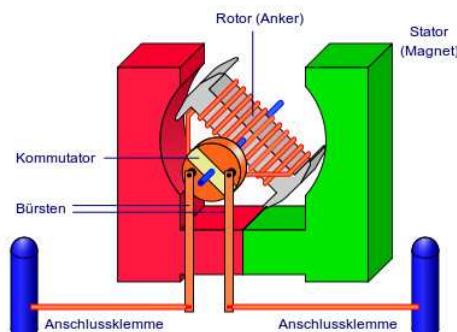


Abbildung 14: Permanenterregter Gleichstrommotor

## 1 - Aktoren und Steleinrichtungen

**Reihenschluss-Gleichstrommotor:** Die Erregerwicklung liegt **in Reihe** zum Anker.

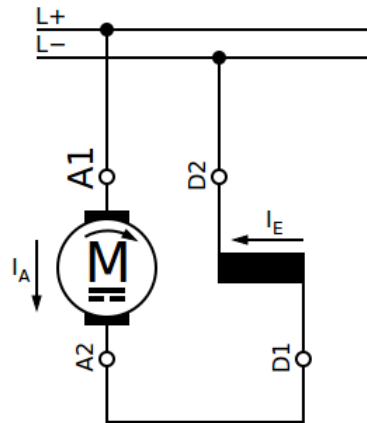


Abbildung 15: Gleichstrommotor im Reihenschluss

Der Erregerstrom ist daher gleich dem Ankerstrom, solange der magnetische Kreis nicht in Sättigung gerät gilt:

$$\Phi \propto I_a \quad (8) \quad I_a \dots \text{Ankerstrom}$$

Die Wicklung hat daher wenige Windungen mit großem Querschnitt. Für  $M_i$  erhält man daher:

$$M_i = c \cdot \Phi \cdot I_a \Rightarrow M_i \propto I_a^2 \quad (9)$$

Ab dem Sättigungspunkt wird der Momentenverlauf  $M_i = M_i(I_a)$  allmählich eine Gerade. Der Ankerstrom stellt sich entsprechend dem vom Motor verlangten Drehmoment ein. Das Drehmoment ist bei niedrigen Drehzahlen hoch, andererseits ist bei niedrigem Drehmoment die Drehzahl hoch, der **Motor kann durchgehen!** Die Drehzahl ändert sich stark bei Belastung. Plötzliche völlige Entlastung muss verhindert werden (nicht für Riementriebe)!

**Anwendung:** Straßenbahnen, Elektrokarren, Schnellbahnen, Hebezeuge, Autoanlasser

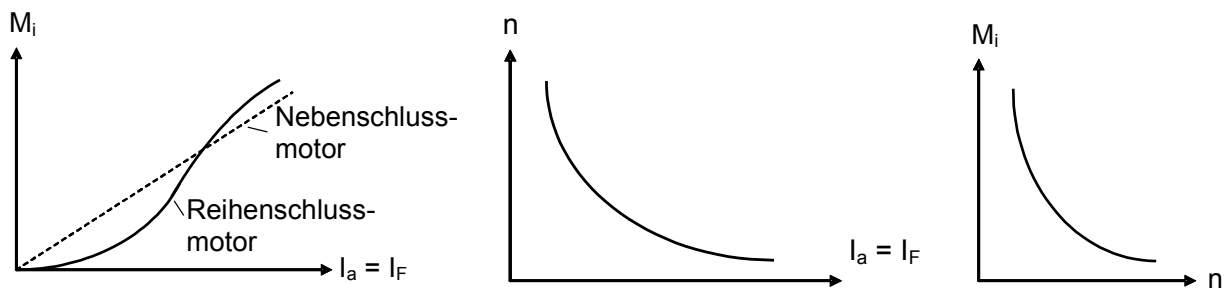


Abbildung 16: Kennlinien Reihenschlussmotor

**Nebenschluss-Gleichstrommotor:** Die Erregerwicklung liegt **parallel zum Anker**, beide Wicklungen liegen an der gleichen Versorgungsspannung. In Serie zum Anker liegt oft ein Anlasswiderstand zur Begrenzung des Ankerstromes, die Erregerwicklung liegt sofort beim Einschalten an der vollen Netzspannung und der Erregerstrom wird nur durch den ohmschen Widerstand der Erregerwicklung begrenzt, die eine hohe Windungszahl und Induktivität hat. Das **Magnetfeld** ist daher **nicht vom Belastungsstrom und der Ankerdrehzahl abhängig**. Der Motor erreicht sein höchstes Drehmoment - welches vom zulässigen Ankerstrom (und damit von der Kühlung) abhängig ist - im Anlauf.

## 1 - Aktoren und Steleinrichtungen

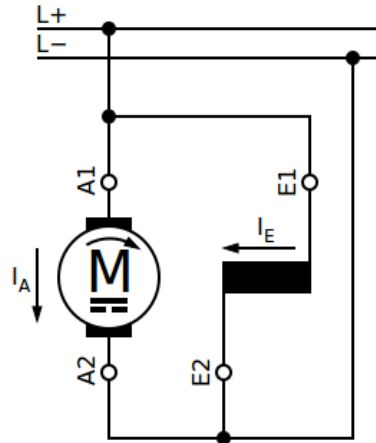


Abbildung 17: Gleichstrommotor im Nebenschluss

Der Erregerstrom und damit der Fluss  $\Phi$  sind **unabhängig vom Ankerstrom**, daher gilt:

$$M_i = c \cdot \Phi \cdot I_a \Rightarrow M_i \propto I_a \quad (10)$$

Ist der Motor mit einer Kompensationswicklung ausgestattet, so ist der Fluss  $\Phi$  **lastunabhängig**, das Moment ist proportional zum Ankerstrom. Wegen

$$U_q = c \cdot \Phi \cdot \omega \quad \text{und} \quad U_a = U_q + I_a \cdot R_a \quad (11) \quad \text{vgl. Gl. (5)}$$

wird

$$n = \frac{U_a - I_a \cdot R_a}{2 \cdot \pi \cdot c \cdot \Phi} \quad (12)$$

Mit allem Bisherigen ( $U_a = \text{const}$ ,  $\Phi = \text{const}$ .) bedeutet dies, dass die **Drehzahl nur vom Ankerstrom  $I_a$  abhängig** ist. Sie ändert sich bei Belastung kaum, man spricht von einer "harten Kennlinie" ("Nebenschlusskennlinie"). Wegen der  **$I/\Phi$  - Abhängigkeit der Drehzahl  $n$**  kann der Motor bei plötzlich ausfallender Erregung aber **durchgehen**! Bei den folgenden Kennlinien bedeuten die strichlierten Linien immer den Kurvenverlauf im Falle von nicht kompensierter Ankerrückwirkung.

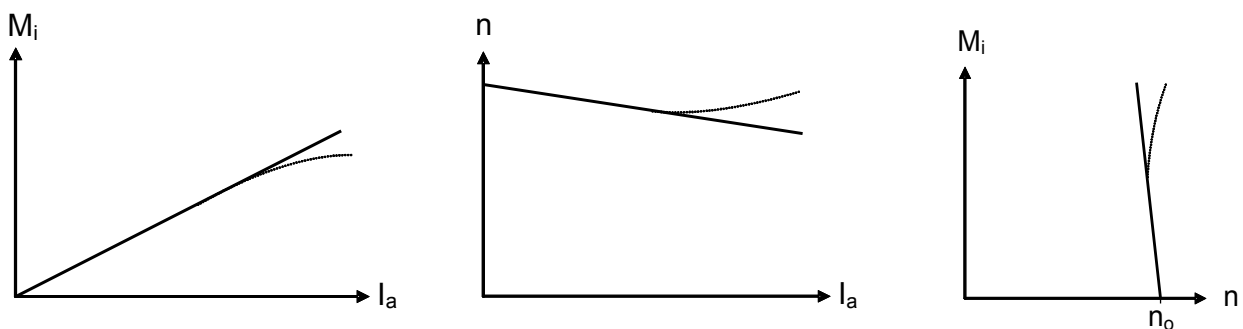


Abbildung 18: Kennlinien Nebenschlussmotor

**Anwendung:** Personenaufzüge, Werkzeugmaschinen, Transmissionen, also Aufgaben mit gleichmäßiger Drehzahl.

**Doppelschluss-Gleichstrommotor:** Auch **Verbund-** oder **Compoundmotor** genannt enthält als Erregerwicklung sowohl eine **Nebenschluss-**, als auch eine **Reihenschlusswicklung**. Im unbelaste-



## 1 - Aktoren und Steleinrichtungen

ten Zustand verhält sich der Motor wie ein Nebenschlussmotor mit konstantem Magnetfluss  $\Phi$ . Es ist daher **kein Durchgehen bei Entlastung** möglich. Der Motor erhält ein **gutes Anzugsmoment** bei **belastungsabhängiger Drehzahl**. Doppelschlussmotoren besitzen keine so steife Drehzahlkennlinie wie der normale Nebenschlussmotor und kein so hohes Drehmoment wie der Reihenschlussmotor.

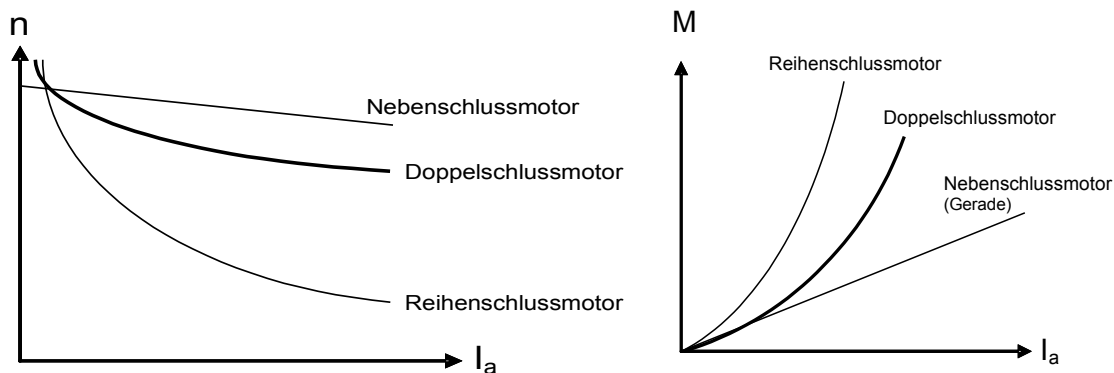


Abbildung 19: Kennlinienvergleich: Reihen-/Neben-/Doppelschlussmotor

**Anwendung:** Dort, wo Leerlauf- und Stoßbelastungen zu erwarten sind (Pressen, Stanzen, Scheren).

**Fremderregter Gleichstrommotor:** Hier werden Anker- und Erregerwicklung aus zwei unterschiedlichen und getrennt voneinander einstellbaren Quellen (Gleichstromstellern) gespeist. Durch Verringerung des Erregerstroms (**Feldschwächung**) kann die Drehzahl  $n$  über die **Nenn-drehzahl  $n_N$  hinaus steigern. Dabei kommt es gleichzeitig zu einer Reduktion des Drehmoments  $M$ . Andererseits kann bei der fremderregten Maschine die Ankerspannung  $U_A$  unabhängig vom Erregerstrom abgesenkt werden. Dadurch kommt es bei konstantem Drehmoment zu einer Leistungsabsenkung und gleichzeitiger Drehzahlreduktion. Durch die getrennte Regel- bzw. Steuerbarkeit der Anker- und Erregerwicklungen lassen sich verschiedene Kennlinienfelder durch die Art der Ansteuerung erzielen. Wegen des so erzielbaren **hohen Anlaufdrehmoments** spielten fremderregte Gleichstrommaschinen im Bereich von **hochdynamischen Antriebssystemen** (Werkzeugmaschinen, Bahnantriebe, ...) eine bedeutende Rolle. Gleichstrommaschinen werden in diesen Anwendungsbereichen zunehmend durch die Verfügbarkeit von elektronischen Frequenzumrichtern in Kombination mit Drehstrommaschinen abgelöst, welche in Kombination die gleichen Vorteile für hochdynamische Antriebe bei geringerem Wartungsaufwand bieten.**

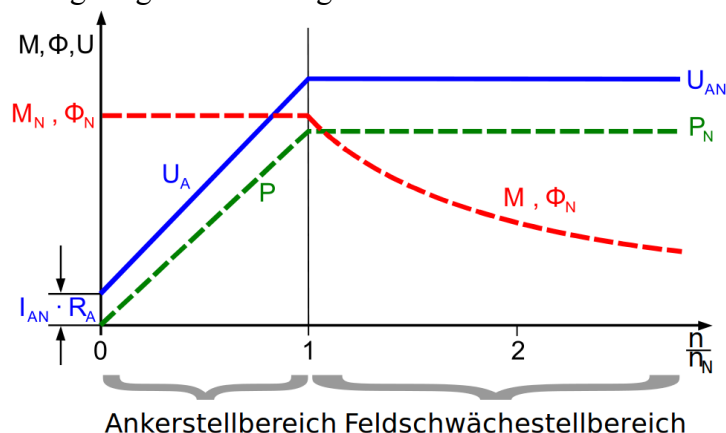


Abbildung 20: Fremderregte Nebenschlussmaschine - Kennlinien

## 1 - Aktoren und Stelleinrichtungen

**Bürstenlose Gleichstrommotore:** Basieren entgegen der Namensgebung **nicht** auf dem **Funktionsprinzip** der **Gleichstrommaschine**, sondern sind aufgebaut wie eine **Drehstrom-Synchronmaschine** mit **Erregung durch Permanentmagnete**. Andere Bezeichnungen sind *Brushless DC motor* (BLDC- oder BL-Motor) oder auch *electronically commutated motor* (EC-motor). Die (oft dreisträngige) Drehstromwicklung erzeugt zusammen mit der entsprechenden Ansteuerung ein drehendes magnetisches Feld, welches den permanent erregten Rotor mitzieht. Dadurch wird ein Regelverhalten erzielt, welches dem Verhalten einer Gleichstrommaschine weitgehend entspricht.

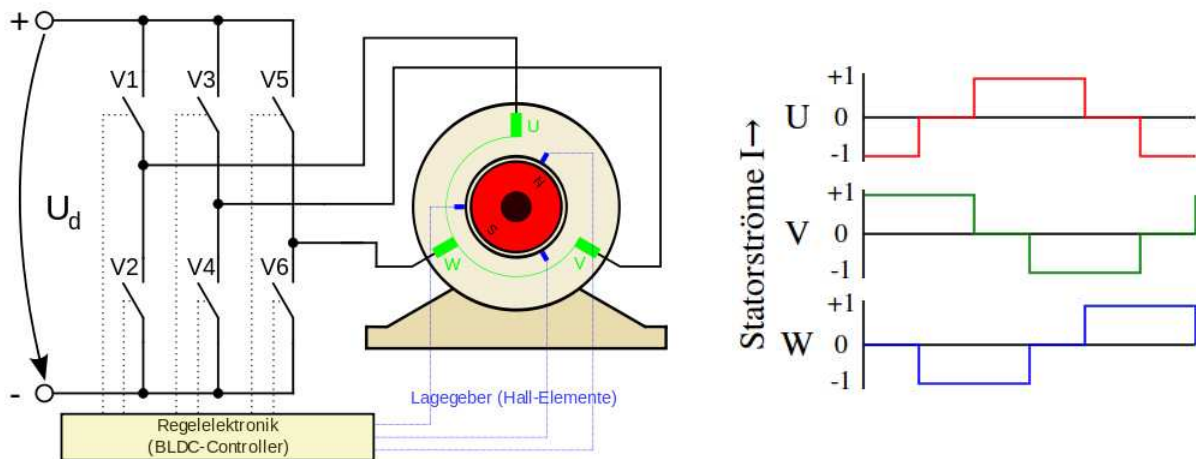


Abbildung 21: Prinzipschaltung eines EC-Motors mit sensorgesteuerter Kommutierung; V1 bis V6 sind elektronische Schalter (Leistungstristoren oder MOSFETS)

**Anwendungen:** Ventilatoren, Antriebe in Diskettenlaufwerken, Kompressoren, Videorekordern und Modellflugzeugen, Stelleinrichtungen in Form von Servomotoren, bis hin zu Antriebssystemen für Werkzeugmaschinen wie Drehmaschinen.

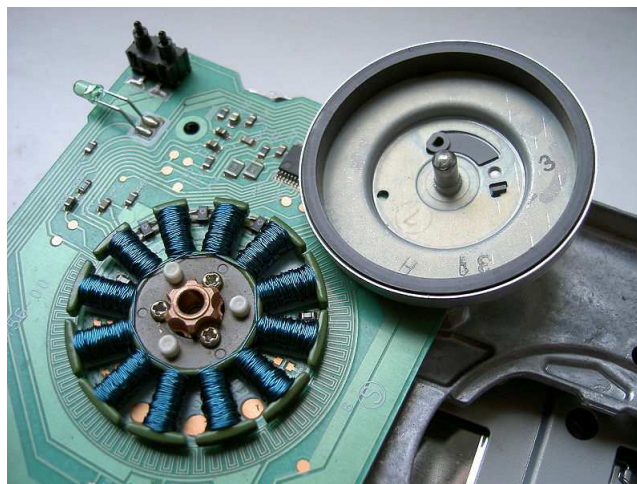


Abbildung 22: Sechsheisiger BLDC-Motor (Antrieb eines Diskettenlaufwerks). Stator innenliegend, glockenförmiger Rotor mit Permanentmagnet

## 1 - Aktoren und Stelleinrichtungen

### Wechselstrommotore

**Universalmotoren:** Sie sind vom Aufbau her **grundsätzlich Gleichstrom-Reihenschlussmotoren** und können mit Gleich- oder Wechselspannung betrieben werden. Allerdings werden sie hauptsächlich für die öffentlichen Wechselstromnetze dimensioniert. Wegen der Serienschaltung der Anker- und Erregerwicklung sind der Erregerstrom (Erregerfeld) und der Ankerstrom **gleichphasig**, das heißt, Erregerstrom und Ankerstrom ändern gleichzeitig das Vorzeichen, Kraft- und Drehrichtung bleiben. Das entstehende **Drehmoment "pulst" mit der doppelten Netzfrequenz**, was aber wegen der Ankerträgheit normalerweise nicht auffällt (außer dem typischen **Brummen bei niedrigen Drehzahlen**). Mit Rücksicht auf die Wechselstromspeisung ist der gesamte magnetische Kreis aus Dynamoblechen geschichtet (Vermeidung von Wirbelströmen).

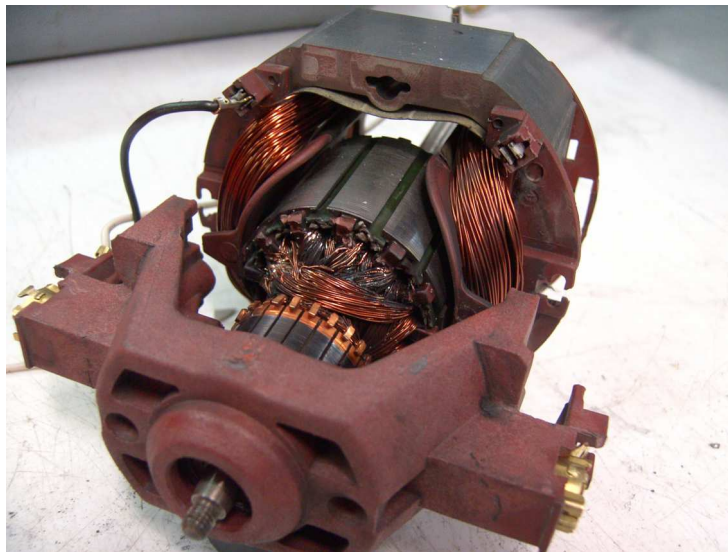


Abbildung 23: AC-Universalmotor

Wendepole und Kompensationswicklungen sind aus Kostengründen nur bei sehr großen Motoren üblich, daher zeigen sie meist ein sehr **starkes Bürstenfeuer**, was zu hochfrequenten Störspannungen und starkem Bürstenverschleiß führt. Zur Kompensation werden die **Bürsten** geringfügig gegen die Drehrichtung **aus der neutralen Zone verschoben** und die Motoranschlüsse mit mindestens einem **Kondensator** (bildet zusammen mit der Erregerwicklung ein *LC-Filter*) **entstört**. Wegen des zusätzlichen induktiven Widerstandes der Wicklungen gehen Drehzahl und Leistung beim Übergang von Gleich- auf Wechselspannung um etwa *15%* zurück. Da diese Effekte mit sinkender Frequenz kleiner werden und für den Betrieb von E-Lokomotiven früher gerne große Universalmotore eingesetzt wurden hat das Oberleitungsnetz der *ÖBB* nur eine Frequenz von *16,67Hz*!

Es können sehr hohe Drehzahlen erreicht werden (bis zu *30000/min*). Die Wirkungsweise des Motors ist die eines normalen Gleichstrom-Reihenschlussmotors. Der Motor zeigt ein **starkes Drehmoment** im Anlauf und im Betrieb. Das **Durchgehen** wird durch einen mechanischen Widerstand (Lüfterrad), auf der Motorwelle montierten Fliehkraftschalter oder eine elektrische Schutzschaltung verhindert:

Die sg. **Barkhausenschaltung** (Abb. 24) stellt eine Kombination aus Serien und Parallelwiderstand zum Anker dar. Es ergibt sich eine Abweichung von der starren Reihenschlusskennlinie, der Motor neigt nicht mehr zum Durchgehen und die Drehzahl kann in weiten Bereichen eingestellt werden. Nachteil: verschlechterter Wirkungsgrad. Alternativ kann die Drehzahleinstellung durch Anzapfungen der Erregerwicklung, Phasenanschnittsteuerung bzw. *PWM* (Frequenzumrichter) erfolgen.

## 1 - Aktoren und Steleinrichtungen

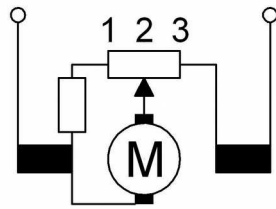


Abbildung 24: Barkhausenschaltung

Große Universalmotoren sind selten geworden, heute endet der Leistungsbereich bei ca.  $2kW$ . Die **Anwendung** liegt hauptsächlich bei Elektrowerkzeugen (Handbohrmaschinen) und Haushaltsgeräten (Staubsauger, Mixer).

**Spaltpolmotore:** Hier handelt es sich um einen **Motor mit Käfigläufer**, also um eine **Asynchronmaschine**. Der **Stator unterscheidet sich aber wesentlich vom drehstromgespeisten Asynchronmotor** da zur Erzeugung des erforderlichen Drehfelds ja nur eine Wechselspannungsphase zur Verfügung steht.

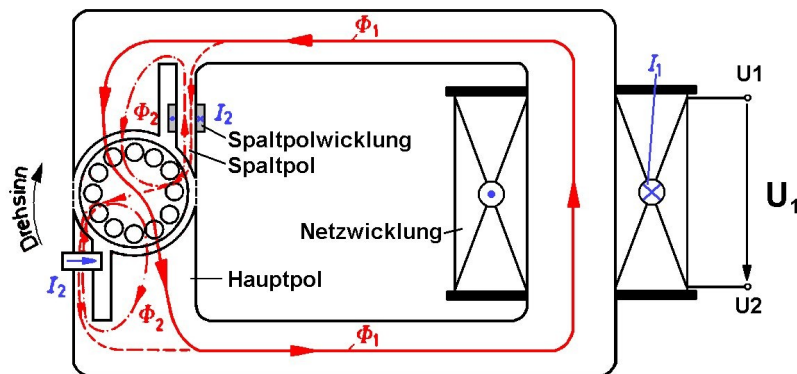


Abbildung 25: Spaltpolmotor - Aufbau, Ströme und Magnetflüsse

Der Stator besitzt ausgeprägte Pole, die durch eine **Nut** in **Haupt- und Spaltpole** geteilt sind. Die Netzwicklung (**Hauptstrang**)  $U_1-U_2$  liegt um die Polschäfte bzw. um das Ständerjoch, die **Spaltpolwicklung** (= **kurzgeschlossene Hilfswicklung**) um den Spaltpol.

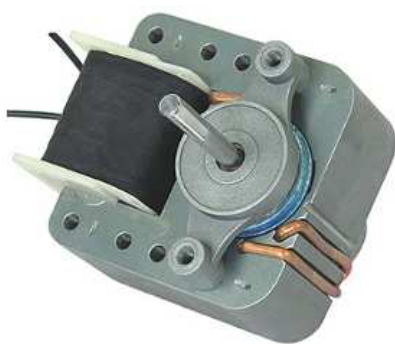


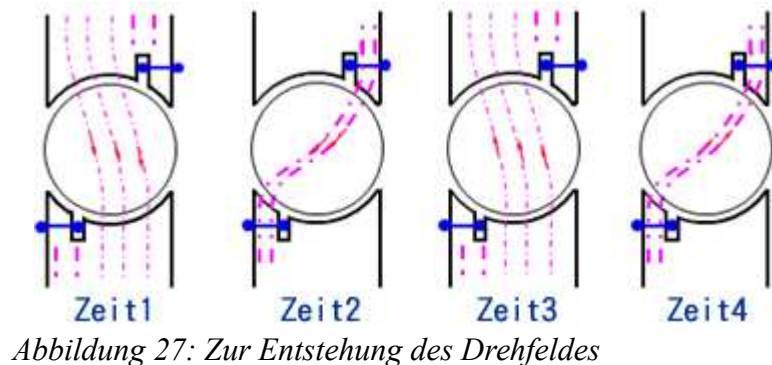
Abbildung 26: Spaltpolmotor (links) - Typische Anwendung: Querstromlüfter (rechts)

Der durch den Hauptstrang fließende Strom  $I_1$  baut den **Hauptfluss**  $\Phi_1$  auf. Er durchsetzt Haupt-



## 1 - Aktoren und Stellanrichtungen

und Spaltpole und erzeugt nach der **Lenz'schen Regel** in der Spaltpolwicklung eine Spannung, die den **90° nacheilenden Strom  $I_2$**  zum Fließen bringt. Dieser Strom erzeugt den **nacheilenden Fluss  $\Phi_2$** . Je nach Phasenlage der Erregung entsteht durch die Überlagerung der beiden Flüsse einmal im Hauptpol eine Verstärkung, im Spaltpol eine Abschwächung des Gesamtflusses oder umgekehrt. Auf diese Weise entsteht im Raum des Läufers ein **elliptisches Drehfeld**, das diesen "mitzieht" und somit antreibt.



**Vorteile:** Sehr einfach im Aufbau, billig, robust, keine Wartung bei hoher Lebensdauer, lauffähig, selbsttätiger Anlauf mit brauchbarem Anlaufmoment.

**Nachteile:** Nur für kleine Leistungen (bis etwa 300W) verwendbar, da der Wirkungsgrad mit ca. 35% schlecht ist. Drehrichtungsumkehr in Normalausführung elektrisch nicht möglich, schlechter Leistungsfaktor, geringe Leistungsdichte.

**Anwendung:** Antriebe mit Kurzzeitbetrieb (Kleingeräte, Haushaltsgeräte, Lüfter, Ventilatoren,...)

**Kondensatormotor:** Es handelt sich dabei um einen **Asynchronmotor**, der Läufer ist wie üblich als **Kurzschlusskäfig** ausgeführt. Im Blechpaket des **Stators** sind **zwei Wicklungen** angeordnet, die räumlich um 90° versetzt sind. Es handelt einerseits sich um die **Hauptwicklung** mit den Bezeichnungen  $U_1$  und  $U_2$ , welche typischerweise 2/3 der Ständernuten belegt und andererseits um die **Hilfswicklung** mit den Bezeichnungen  $Z_1$  und  $Z_2$ , die in den restlichen Nuten untergebracht ist. Um eine **Phasenverschiebung** zwischen den beiden Wicklungen und damit ein **Drehfeld** zu erreichen, muss eine **Kapazität** mit der Hilfswicklung in Reihe geschaltet werden. Bei einem Einphasenmotor mit **Betriebskondensator** bleibt die Hilfswicklung mit dem in Reihe geschalteten Betriebskondensator dauernd eingeschaltet. Für schwere Anlaufbedingungen wird ein **Anlaufkondensator** parallel zum Betriebskondensator geschaltet. Der Anlaufkondensator wird nach dem Anlauf - meist über einen Fliehkraftschalter - abgeschaltet.

Die Kapazität des Betriebskondensators  $C_B$  sollte so bemessen werden, dass sich die Hilfswicklung nicht unzulässig erwärmt - er sollte näherungsweise pro Kilowatt Motorleistung eine Blindleistung von 1kvar aufnehmen ( $\sim 20\mu F/kW$  bei 50Hz). Um das Anzugsmoment des Motors zu vergrößern, muss die Kapazität des Kondensators ebenfalls größer werden. Die Kapazitätsvergrößerung wird durch Parallelschaltung eines Anlaufkondensators  $C_A$  erreicht. Dieser muss nach dem Anlauf weggeschaltet werden, damit sich die Hilfswicklung nicht unzulässig hoch erwärmt. Eine **Drehrichtungsumkehr** kann durch einfaches **Umpolen des Hilfswicklungskreises** erreicht werden.

- 1 Die Lenz'sche Regel besagt, dass der Induzierte Strom stets so gerichtet ist, dass er seine Ursache zu hemmen versucht:  $I_2 \propto -\frac{d\Phi_1}{dt}$ . Bei sinusförmigem Strom  $I_1$  (und damit sinusförmigem Fluss  $\Phi_1$ ) ergibt sich daher ein invertierter cosinusförmiger (minus Ableitung!) Fluss  $\Phi_2$  ( $\rightarrow 90^\circ$  Nacheilung):  $\Phi_1 \propto N_1 \cdot I_1 \Rightarrow \Phi_2 \propto N_2 \cdot I_2 \propto -\frac{d\Phi_1}{dt}$

## 1 - Aktoren und Steleinrichtungen

**Vorteile:** Bei gutem Wirkungsgrad (wesentlich besser als beim Spaltpolmotor) an einer Wechselspannungsphase betreibbar, lauffähig, geringer Wartungsaufwand, Drehrichtung einfach umkehrbar.

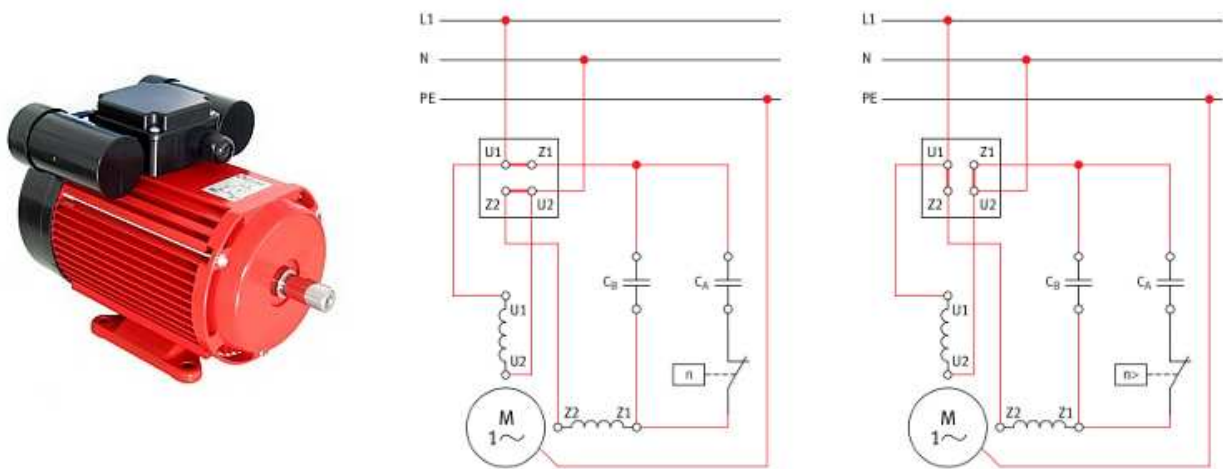


Abbildung 28: Kondensatormotor - Schaltungen für unterschiedliche Laufrichtung

**Nachteile:** Drehfeld belastungsabhängig, Kondensator kann eigentlich nur für einen bestimmten Lastfall richtig bemessen werden, Masse größer als bei entsprechendem Drehstrommotor, Kondensator(en) erforderlich (diese fallen gelegentlich aus).

**Anwendung:** Umwälzpumpen, Rasenmäher, Kühlschränke, Rohrantriebe (Rolläden, Markiesen, ...)

**Drehstrommotor am Einphasennetz:** Um einen Drehstrommotor am Einphasennetz zu betreiben, verwendet man z. B. die **Steinmetzschtaltung**. Ist der Motor für eine Strangspannung von  $230V$  ausgelegt, kann er in Dreieck an das Netz geschaltet werden. Durch den Kondensator entsteht ein elliptisches Drehfeld. Mit dem einfachen **Betriebskondensator**  $C_B$  erzielt man ein Anlaufmoment von  $10-50\%$  des Nennmomentes und etwa  $70\%$  der normalen Drehstromleistung. Zur Bemessung des Betriebskondensators rechnet man als Richtwert mit ca.  $70\mu F/kW$  Nennleistung.

Für ein höheres Anlaufmoment (bis zu  $100\%$  vom Nennmoment) schaltet man wie beim Kondensatormotor einen **Anlaufkondensator**  $C_A$  mit der dreifachen Kapazität parallel zum Betriebskondensator. Dieser Anlaufkondensator muss nach dem Hochlauf ebenfalls wieder abgeschaltet werden.

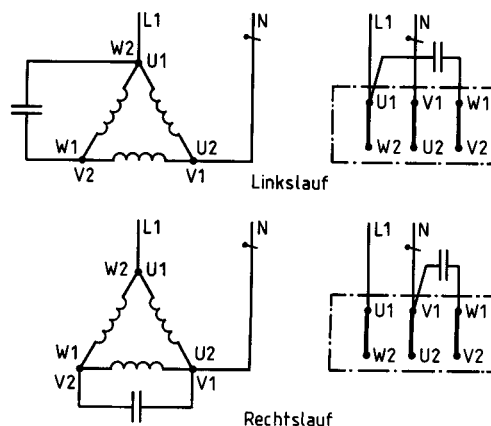


Abbildung 29: Steinmetzschtaltung

## 1 - Aktoren und Stellanrichtungen

**Anwendung:** Die Steinmetzschaltung ist als **Notlösung** für Haushalte ohne Drehstrom-Anschluss gedacht oder für Maschinen, bei denen man sich den Aufwand für die Verkabelung mit drei Außenleitern ersparen will. Sie ist (war) aus ökonomischen Gründen immer auf Motoren mit einer Leistung von weniger als  $2kW$  beschränkt. Durch den Einsatz von Drehstrom-Frequenzumrichtern kann aus einer Gleich- oder Wechselspannung den für einen Drehstrommotor benötigten 3-Phasen-Drehstrom wesentlich effektiver erzeugt werden. Damit ist es ohne Einschränkungen möglich, einen Drehstrommotor an nur einem Außenleiter zu betreiben. Drehstrommotoren in Steinmetzschaltung verwendet(e) man beispielsweise zum Antrieb von Betonmischern, älteren Waschmaschinen und an Umwälzpumpen von Heizungsanlagen. Vielfach werden dort jedoch aufgrund der Einfachheit normale Kondensatormotoren verwendet.

### 1.1.1.2 Elektromagnete

Elektromagnete sind **einfach** aufgebaute, **robuste** Antriebselemente, die in wachsendem Umfang und großen Stückzahlen im Maschinenbau, der Fahrzeugtechnik und der Automatisierungstechnik eingesetzt werden. Sie dienen insbesondere zur **Erzeugung begrenzter Stellwege** ( $0,1-100mm$ ) oder **Stellwinkel** ( $0,1-90^\circ$ ). Oft sind sie nicht als Einzelelement ausgeführt, sondern **integraler Bestandteil komplexerer Funktionskomponenten** (z. B. von Magnetventilen, Magnetkupplungen, Relais). Der einfache Aufbau ermöglicht dabei in Verbindung mit der elektrischen Hilfsenergie die Realisierung **schneller Steuerstrecken** (z.B. Einspritzsysteme). Bei kleinen Stellwegen lassen sich mit den sog. Betätigungsmagneten **hohe Zugspannungen bei einem kompakten Bauvolumen** bewerkstelligen. Diese Eigenschaften sind insbesondere bei der Stellung hydraulischer und pneumatischer Fluidströme erforderlich, wo der Magnet im Allgemeinen kontinuierliche Stellbewegungen ausführen soll. Die prinzipbedingte, **nichtlineare Magnetkraft-Kennlinie** muss dazu **linearisiert** werden, was üblicherweise durch eine geeignete geometrische Formgebung des Magnetkreises erfolgt. Die Sättigungserscheinungen der Magnetmaterialien begrenzen dabei die elektromagnetische Kraftwirkung und damit den Stellbereich des Aktors.

Grundsätzlich sind die **Hauptbestandteile** der Elektromagnete der **Anker** als bewegliches Organ, das **Joch**, das als Eisenrückschluss dient und die **Erregerspule**. Konstruktiv gibt es jedoch sehr viele verschiedene Ausführungsformen - im weitesten Sinne gehören auch Schwingspulen dazu.

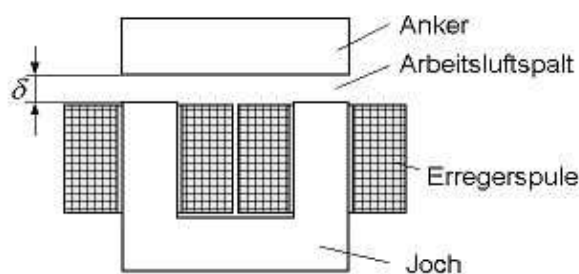


Abbildung 30: Elektromagnet - Prinzip

Die **Wirkungsweise** von Elektromagneten beruht auf der Kraftwirkung in inhomogenen magnetischen Feldern auf magnetische Grenzflächen. Elektromagnete sind **elektromagnetomechanische Energiewandler**. Sie wandeln die zugeführte elektrische Energie über die Zwischenform der magnetischen Energie in mechanische Energie um, die zur Bewegungserzeugung dient.

**Vorteile:** einfacher, kompakter und kostengünstiger Aufbau; direkte Erzeugung von Linearbewegungen bei sehr hoher Stelldynamik.

## 1 - Aktoren und Stellanrichtungen

**Nachteile:** nichtlineares Verhalten , geringe Leistungsdichte , Reibung und magnetische Hysterese , großer Ruhestrom .

### Gleichstrommagnete:

Die Erregung mit Gleichstrom führt - recht anschaulich - zu einer auf den Anker wirkenden **Reluktanzkraft**<sup>2</sup>:

$$F_R \propto \frac{I^2}{\delta} \quad (13)$$

Die Reluktanzkraft nimmt **nimmt mit der Entfernung nahezu hyperbolisch ab**, die **Kraft-Weg-Kennlinie** ist **stark nichtlinear**. Wird sofort eine große Kraft benötigt muss entweder mit einer **überhöhten Anzugsspannung** gearbeitet werden oder die **Magnetpole** von Joch und Anker **konstruktiv abgeändert** werden (z. B.: **Proportionalmagnet**).

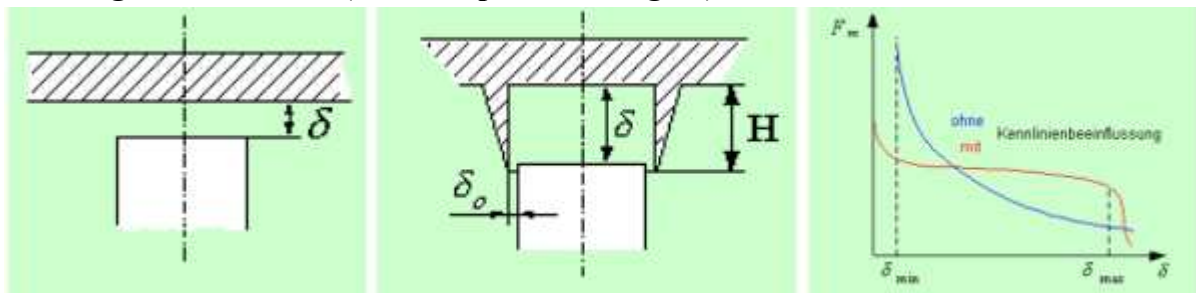


Abbildung 31: Linearisierung der Kraft-Weg-Kennlinie durch Formung der Magnetpole (mitte)

**Verlauf des Stromes** bzw. des Hubs bei einem Proportionalmagneten bei einem Spannungssprung: Nach dem Anlegen der Spannung  $U_M$  steigt der Strom  $I_M$  entsprechend

$$I_M(t) = \frac{U_M}{R_{Sp}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad \text{mit } \tau = \frac{L}{R_{Sp}} \quad (14)$$

Nachdem sich der **Anker in Bewegung** gesetzt hat, **vergrößert sich aber die Induktivität** der Spule und der **Stromanstieg fällt** zunächst ab. Nach Beendigung des Ankerhubs steigt der Spulenstrom erneut an und erreicht seinen Endwert ( $U_M/R_{Sp}$ ).

Magnetkörper und Anker von Gleichstrommagneten bestehen aus massivem Eisen, sind daher **sehr robust**. Sie können als **Hub- oder Zugmagnete**, **Schlagmagnete** oder **Drehankermagnete** ausgeführt werden. Die **Rückstellung** des Ankers wird meist durch **Schwerkraft oder durch Federn** erreicht. Bei Schlagmagneten wird die elektrische Energie direkt in kinetische Energie umgesetzt, um mechanische Impulse zum Hämmern, Nieten oder Stanzen zu erzeugen. Beim Drehankermagnet wird der drehbar gelagerte Weicheisenkern meist durch eine Biegefeder in Mittelstellung gehalten.

- Die **Reluktanzkraft** oder auch **Maxwellsche Kraft** entsteht aufgrund der Änderung des magnetischen Widerstands, der auch als Reluktanz bezeichnet wird. Sie wirkt immer so, dass sich der magnetische Widerstand verringert und die Induktivität steigt. Die Lenzsche Regel besagt sinngemäß, dass eine Kraft oder Bewegung so gerichtet ist, dass sie ihrer Ursache (hier: Stromfluss) entgegenwirkt. Folglich ist ein Magnetkreis um eine stromdurchflossene Spule bestrebt, den magnetischen Widerstand zu verringern und auch Luftspalte zu schließen: Dadurch erhöht sich die Induktivität und in der Spule wird eine Spannung induziert, die die gleiche Polarität wie die Speisespannung hat – der Strom verringert sich während des Zueinander-Bewegens der Eisenteile des Magnetkreises. Da bei einer Verkleinerung des Luftspalts die Induktivität steigt, wirkt die Reluktanzkraft in diese Richtung. Die Kraft nimmt mit der Breite des Luftspalts ab. Das Maximum der Reluktanzkraft ist erreicht, wenn der Luftspalt gegen null geht.



## 1 - Aktoren und Steleinrichtungen

Die **Magnetkräfte** liegen zwischen **10mN und 100N**, die Energien erreichen Werte im Bereich um **200J**. Kleinere Magnete besitzen **Hübe von wenigen Millimeter**, größere Magnete weisen Hübe bis zu **20cm** auf.

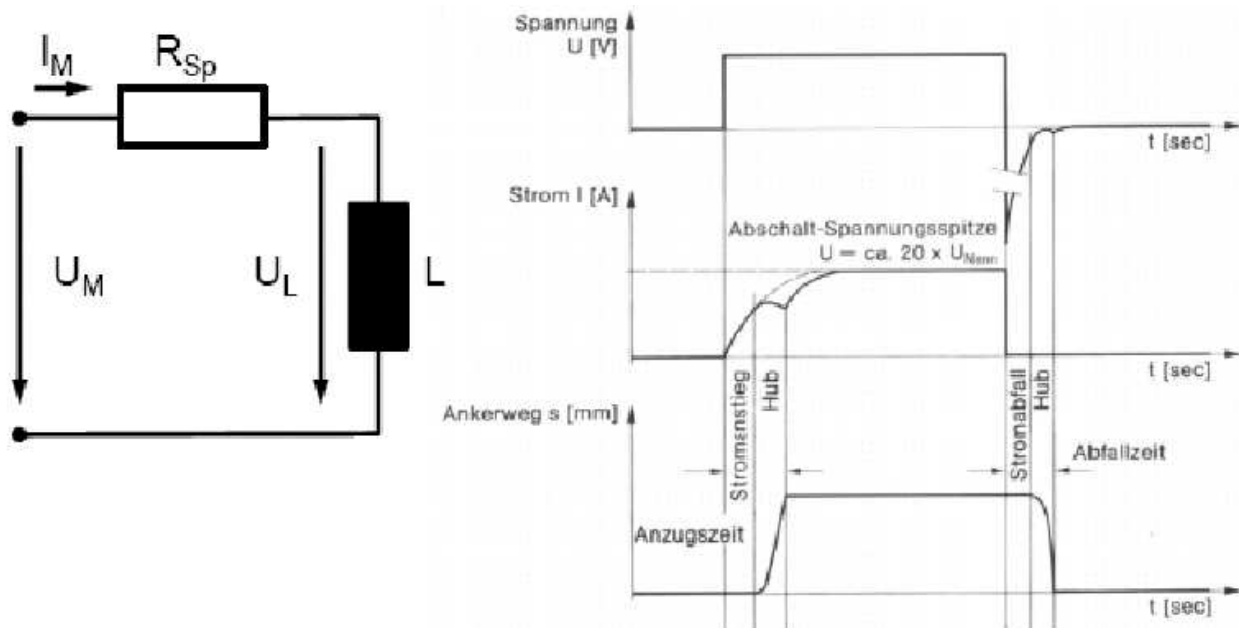


Abbildung 32: Elektromagnet - Prinzip



Abbildung 33: Hub- bzw. Zugmagnet (links, mitte) - rechts: Prinzip Drehankermagnet (Drehmagnet)

### Wechselstrommagnete:

Klassische **Hubmagnete**, deren **Erregerspulen von Wechselstrom durchflossen** werden, wodurch ein magnetischer Wechselfluss entsteht, heißen Wechselstrommagnete. Sie werden mit Vorteil dann eingesetzt, wenn ein Antriebselement benötigt wird, das **unmittelbar an das Wechselspannungs-industrienetz angeschlossen** werden soll bzw. das zur **Erzeugung von mechanischen Schwingungen** mit einer Frequenz von 50 bzw. 100Hz dienen soll.

**Wechselstromstellmagnete:** Alle **flussführenden Teile** in einem Wechselstrommagneten müssen zur Vermeidung von Wirbelströmen **geblecht** aufgebaut werden. Weiters sind Maßnahmen zur Erzeugung einer **Gleichkomponente der Magnetkraft** im angezogenen Zustand erforderlich, ansonsten würde der Magnet mit der Frequenz des Erregerstromes "flattern". Eine Möglichkeit besteht in der Anbringung **mehrerer räumlich verteilter Wicklungen**, die an den Polflächen phasenverschobene Kräfte erzeugen. Ökonomischer ist die Verwendung einer **Kurzschlusswicklung** wie beim

## 1 - Aktoren und Stelleinrichtungen

Spaltpolmotor. Alternativ werden "normale" **Gleichstrommagnete mit integriertem Gleichrichter** verwendet.



Abbildung 34: Wechselstromstellmagnet mit Kurzschlusswicklung

Die **Magnetkräfte** liegen **zwischen 1N und 150N**, bei **Drehstrommagneten** (selten) zwischen 50 und 1500N die Energien erreichen Werte im Bereich um 200J. Kleinere Magnete besitzen **Hübe von wenigen Millimeter**, größere Magnete weisen Hübe **bis zu 10cm** auf (Drehstrommagnete: 20-60mm). Nachteilig sind die durch das pulsierende Magnetfeld häufig hervorgerufenen **Brummgeräusche**.

**Schwingankermagnete (auch Schwingankermotor):** Dienen zur Erzeugung einer **linearen oder bogenförmigen Schwingbewegung**. Die Erzeugung einer Gleichkomponente der Magnetkraft ist also nicht erforderlich.

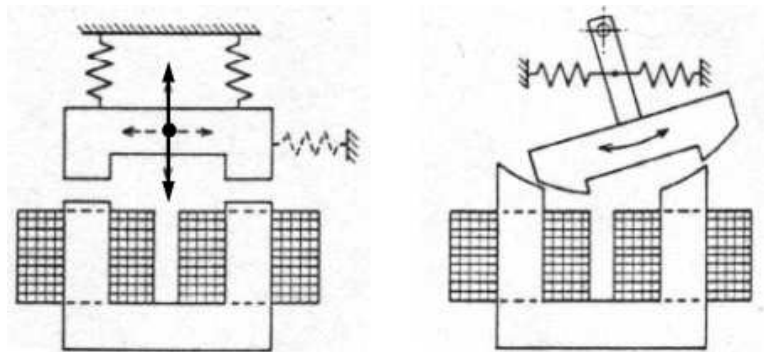


Abbildung 35: Schwingankermagnete (links: linear - rechts:rotatorisch)

Der Aufbau besteht aus einem **festen**, die Erregerspule tragenden **Eisenkern** und einem **beweglichen Anker** der durch **Federn** in seiner Ruhelage gehalten wird.

**Vorteile:** Unempfindlich gegen Überlastung (Blockierung), sehr langlebig, da die Lebensdauer nur durch die Haltbarkeit der Aufhängungselemente des Ankers und die Ermüdung der Federn begrenzt ist.

**Nachteile:** Lauter Lauf, fehlende Möglichkeit, Unwuchten auszugleichen (das gesamte Gerät vibriert).

**Anwendungen:** Läutwerke<sup>3</sup>, Schwingförderer, Membranpumpen, Rüttelsiebe, Harrschneider, Rasierapparate, Massagegeräte.

<sup>3</sup> Der bekannte Vibrationsalarm bei Mobiltelefonen wird allerdings meist durch einen Miniatur-Elektromotor mit einer Unwucht auf der Motorwelle angebrachten Masse hervorgerufen.

## 1 - Aktoren und Stelleinrichtungen

**Tauchspulen (voice-coil-motor):** Tauchspulenaktuatoren sind die technische Umsetzung des **Lorentzkraft**-Prinzips: die Kraft eines stromdurchflossenen Leiters im Permanentmagnetfeld ist proportional zur Magnetfeldstärke und zum Strom.

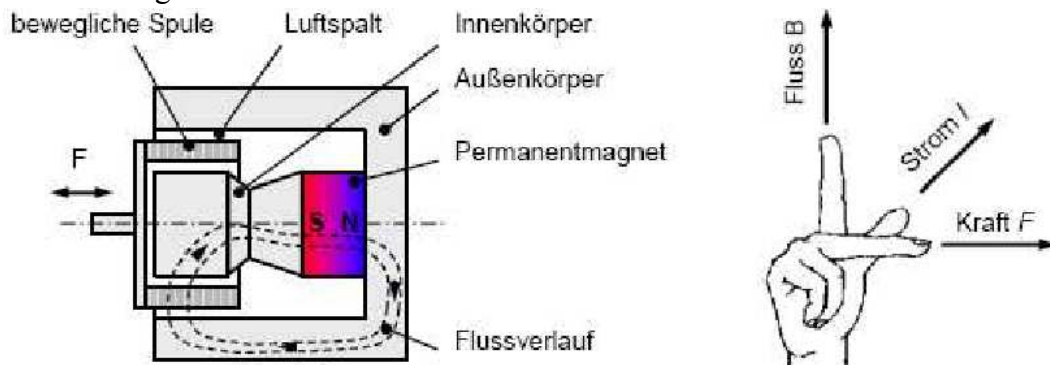


Abbildung 36: Prinzip Tauchspulenantrieb

Durch die Umkehr der Stromrichtung ändert sich auch die Krafrichtung und man kann so **bidirektionale Aktuatoren mit gleichem Verhalten in beide Arbeitsrichtungen** realisieren - sowohl **rotatorisch** wie auch **linear**. Elektrisch gesehen sind *voice-coil* Motoren (Tauchspulenmotoren) einphasige Motoren und können auch wie *DC*-Motore angesteuert werden. Die englische Bezeichnung "*voice-coil*" rührt daher, da das komplett selbe Prinzip bei elektrodynamischen **Lautsprechern** und **Mikrofonen** zum Einsatz kommt.

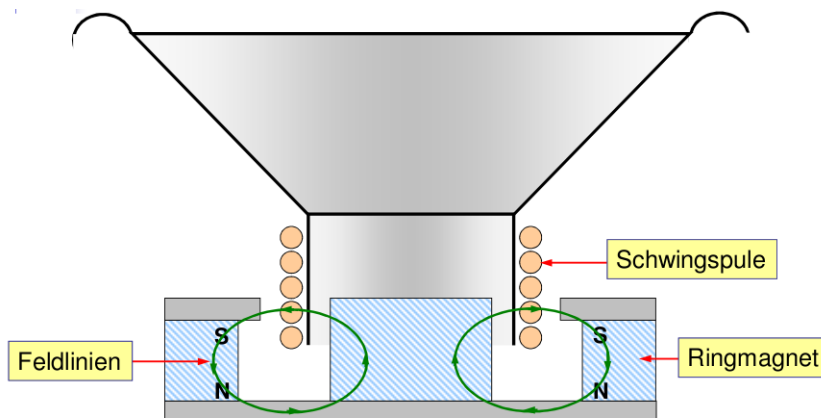


Abbildung 37: Prinzip Tauchspulensprecher

Dabei weisen sie eine besonders **kleine Hysterese** auf und sind somit optimal für Anwendungen geeignet, die eine **gut kontrollierbare Bewegung in beide Richtungen** erfordern. Auch die **Geräuschbildung** (vgl. Lautsprecher) oder **geringes Überschießen** oder eine sehr feinfühligte Kraft (**hohe Dynamik**) können Anforderungen sein, die mit *voice-coil* Motore gut erfüllt werden können. Darüberhinaus zeigen sie **keine Rastkraft** und eine **hohe Überlastfähigkeit**. Die erreichbaren **Hübe** sind allerdings eher **gering**.

**Weitere Anwendungen:** Shaker (Vibrationsprüfgeräte, Rütteltische), Mikro-Montage-Einrichtungen, Greifer, Sortierer, Dosierer, Etikettiermaschinen, ...

## 1 - Aktoren und Stellanrichtungen

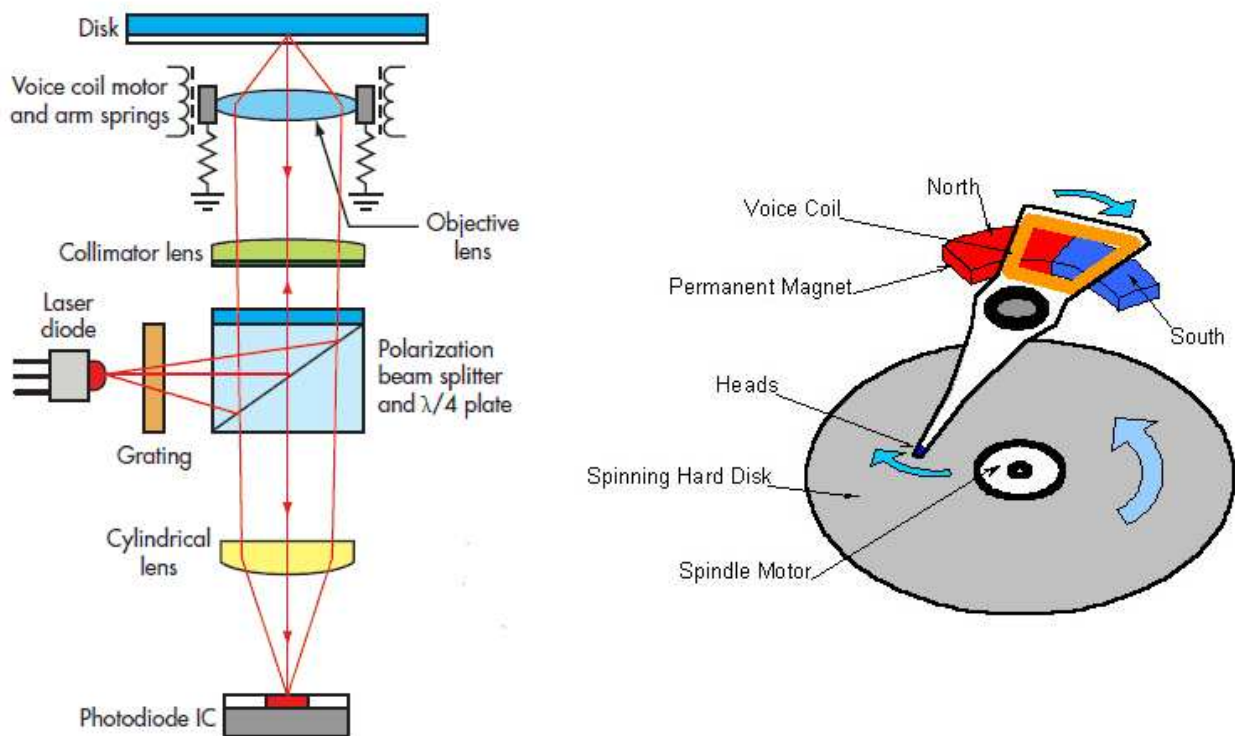


Abbildung 38: voice-coil Antriebe:

links: Laserfokussierung (translatorisch) CD

rechts: Positionierantrieb für Schreib-/Leseköpfe von Festplatten (rotatorisch)

### 1.1.1.3 Ferro- bzw. piezoelektrische Aktoren

Ferroelektrizität kommt in **Kristallen** vor, in denen die kristalline Symmetrie eine **polare Achse** zulässt. Dadurch kommt es durch die **Verschiebung verschieden geladener Ionen im Kristallgitter** zur **spontanen Polarisation**. Im Unterschied zu piezo- und pyroelektrischen Stoffen kann die elektrische Polarisation in Ferroelektrika durch das Anlegen einer Spannung umgepolt werden. **Ferroelektrische Stoffe sind immer piezoelektrisch**. Die Vorsilbe „Ferro-“ bezieht sich auf die **Analogie zum Ferromagnetismus**. Wie bei den Ferromagnetika die Magnetisierung, so verschwindet bei Ferroelektrika die Polarisation bei hohen Temperaturen (der *ferroelektrischen Curie-Temperatur*) – das Material ist dann paraelektrisch.

Wie bereits bekannt **verknüpfen** piezoelektrische Wandler **mechanische und elektrische Größen**, d. h. sie können diese ineinander umwandeln. Diese bidirektionale Wandlungsfähigkeit lässt sich unter anderem für Stellaufgaben nutzen. In Verbindung mit **elektrischen Feldern im  $kV/m$ -Bereich** lassen sich dann **Längenänderungen im  $mm$ -Bereich** erzielen. Die Stellbewegung ist dabei über die anliegende **Spannung steuerbar**. Ihre **Ausführung erfolgt in wenigen  $ms$**  mit der Möglichkeit **hohe Gegenkräfte zu überwinden**.

Die **Anwendung** piezoelektrischer Aktoren sollte unter **besonderer Berücksichtigung der thermischen und mechanischen Einsatzbedingungen** erfolgen. Die Keramikmasse ist in ihrer Grundform ein sehr dünner, brüchiger Werkstoff, der **temperatur- und alterungsabhängige Eigenschaften** aufweist. Extreme Beanspruchungen führen daher leicht zu Depolarisationserscheinungen des Materials und damit zu einer Abschwächung des piezoelektrischen Effekts. Außerdem muss beachtet werden, dass **thermisch bedingte Längenänderungen** bereits in der Größenordnung des



# 1 - Aktoren und Stelleinrichtungen

Aktorstellbereiche liegen können.

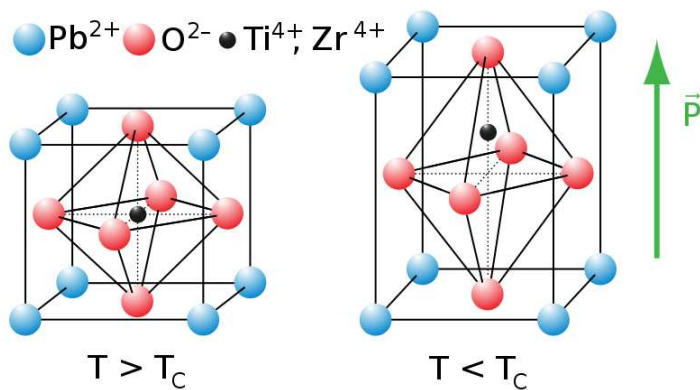


Abbildung 39: Perowskit-Elementarzelle (links) ; Kalziumtitanat-Perowskit (rechts)  
Keramiken aus Materialien der Perowskit-Kristallklasse sind die technisch wichtigsten Piezoelektrika

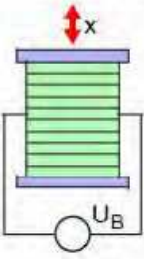
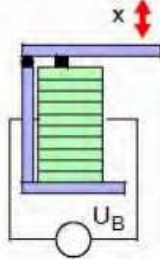
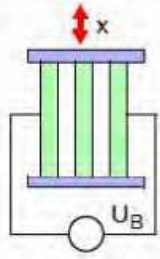
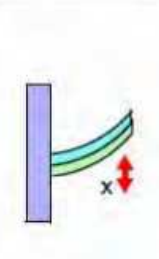
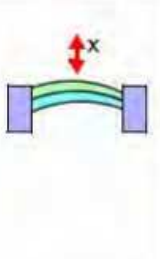
Bauform					
typ. Stellwege	20 .. 200 $\mu\text{m}$	$\leq 2 \text{ mm}$	$\leq 50 \mu\text{m}$	$\leq 1 \text{ mm}$	$\leq 500 \mu\text{m}$
typ. Stellkräfte	30.000 N	3.500 N	1.000 N	5 N	40 N
typ. Betriebsspannungen	60 .. 200 V 200 .. 500 V 500 .. 1.000 V	60 .. 200 V 200 .. 500 V 500 .. 1.000 V	60 .. 500 V	10 .. 400 V	10 .. 500 V

Abbildung 40: Bauformen von Piezo-Aktoren (grün: Piezokeramik)

**Vorteile:** Große Stellkräfte bei sehr hoher Stelldynamik, im statischen Betrieb geringe elektrische Leistungsaufnahme, gute Verfügbarkeit der Keramikmaterialien, hohe Leistungsdichte, praktisch kein Verschleiß .

**Nachteile :** Nur sehr kleine Stellbereiche, starke Erwärmung bei hohen Schaltfrequenzen, temperatur- und alterungsabhängige Materialeigenschaften, ggf. Hochspannungsnetzteil zur Ansteuerung notwendig, Hysterese .

**Anwendung:** Mechanische (Fein-)Positionierung (z. B.: Rastertunnelmikroskop), Injektoren (Die-seleinspritzventile<sup>4</sup>, Tintenstrahldrucker, ...), (Ultra-) Schallwandler, (Lautsprecher, Ultraschallzer-

4 Vorteile bieten die Piezo-Injektoren in Einspritzsystemen durch ihre kurzen Reaktionszeiten: Der Kraftstoff wird in bis zu sieben Portionen von jeweils  $1.5 \text{ mm}^3$  eingespritzt, im Gegensatz zum "Common Rail"-Verfahren, das global mit Drücken bis zu  $0.16 \text{ MPa}$  ( $1600 \text{ bar}$ ) arbeitet. Der Verbrennungsvorgang lässt sich auf diese Weise präziser steuern und es lassen sich nicht nur die Verbrauchswerte reduzieren, sondern auch mit einem Hitzestoß die Dieselruß-

## 1 - Aktoren und Stellanrichtungen

stäuber, Echolote, ...), Piezogeneratoren<sup>5</sup> (z. B.; *RFID*-Anwendungen), aktive Schwingungsdämpfung, ...

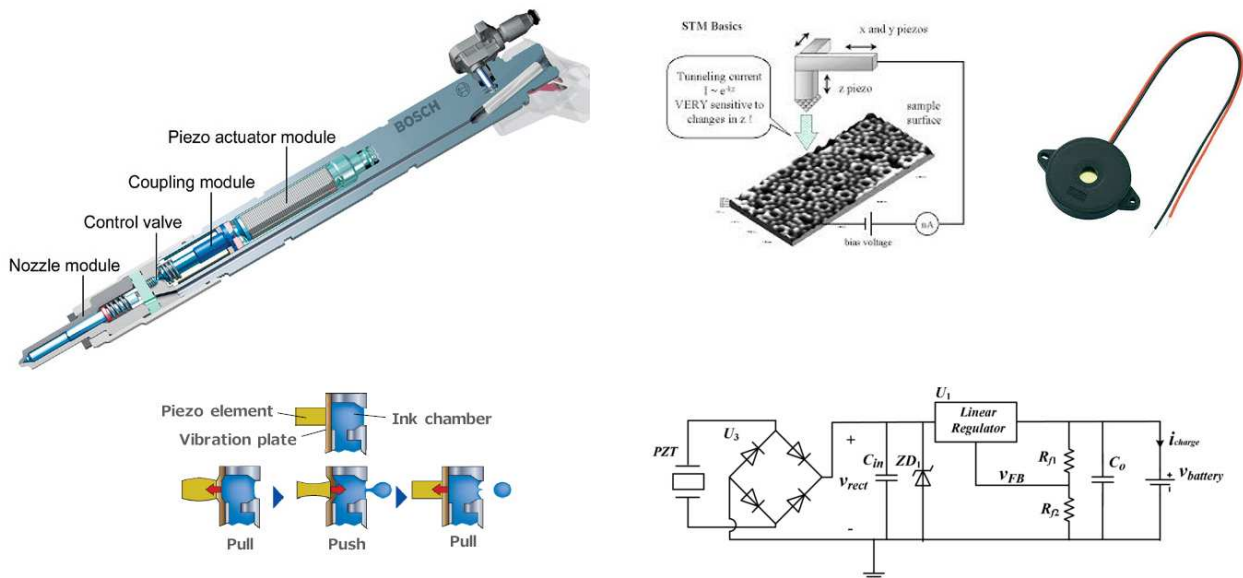


Abbildung 41: Anwendung von Piezo-Aktoren: Dieseleinspritzventil, Rastertunnelmikroskop, Piezolautsprecher ("Buzzer"), Tintenstrahldrucker, Piezogenerator (Schaltung)

### 1.1.1.4 Magnetostruktive Aktoren

Magnetostruktive Werkstoffe erfahren - analog zu Piezoelektrika im elektrischen Feld - eine elastische **Längenänderung im magnetischen Feld**. Insbesondere **ferromagnetische** Werkstoffe sind mehr oder weniger magnetostruktiv<sup>6</sup>.

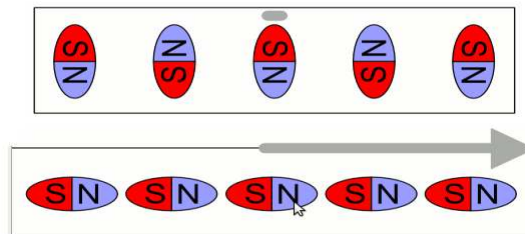


Abbildung 42: Entstehung der Magnetostruktion durch Ausrichtung der Elementarmagnete

Das kommerziell am meisten genutzte Material ist *Terfenol-D*<sup>7</sup>, aber auch andere Seltenerdmetall-Eisen-Legierungen zeigen hochmagnetostruktives Verhalten. Die erzielbaren **Auslenkungen** bezogen auf die Gesamtlänge bewegen sich im **einstelligen Promillebereich**.

**Vorteile:** Robust, praktisch verschleißfrei. Gegenüber Piezo-Aktoren haben sie den Vorteil, dass sie meist temperaturstabiler sind, noch größere Stellkräfte ermöglichen, eine geringere Dehnungshysterese zeigen und keine bewegte Elektrode benötigen. Magnetostruktive Aktoren weisen ebenfalls eine

partikel verbrennen. Meist werden als Piezokristalle Blei-Zink-Titan-Keramiken eingesetzt, die in mehr als 100 Lagen bis zu einer Länge von 30mm übereinander gestapelt werden; der Hubweg beträgt dann typisch 0.4 mm.

<sup>5</sup> Umwandlung von (mechanischer) Prozessenergie in elektrische Energie → **Energy-Harvesting**

<sup>6</sup> Für induktive Bauteile sind magnetische Werkstoffe mit möglichst **geringer** Magnetostruktion wünschenswert, insbesondere wegen der damit verbundenen, unerwünschten Schallemission ("Brummen").

<sup>7</sup> Terbium-Ferrum-Dysprosium [ $T\text{e}_x\text{Dy}_{1-x}\text{Fe}_y$ ]

## 1 - Aktoren und Stelleinrichtungen

sehr hohe Stellgenauigkeiten bei kurzen Reaktionszeiten auf. Bezogen auf die magnetische Energie beträgt der Wirkungsgrad (Kopplungsfaktor) ca. 75%.

**Nachteile:** Teure und schlecht verfügbare Werkstoffe, Leistungsaufnahme im statischen Betrieb, voluminös. Wegen der hohen erforderlichen Ströme große Verluste in der Spule und im Leistungsverstärker.

**Anwendung:** Magnetostriktive Aktoren werden eher selten verwendet und befinden sich vielfach noch im Entwicklungsstadium. Allerdings werden bereits seit Anfang der 1960er Jahre in den USA hochmagnetostriktive Werkstoffe für den Einsatz in Unterwassersonaren entwickelt. Das dort später gefundene *Terfenol-D* hat eine vielfach höhere Energiedichte als piezoelektrische Werkstoffe. Neuerdings sind innovative magnetostriktive Schallwandler für den Consumer-Bereich kommerziell erhältlich<sup>8</sup>, wodurch beliebige, flache Oberflächen zu Lautsprecher umfunktioniert werden können. Die wichtigste technische Ausführung sind aber magnetostriktive Linearaktoren, die hochpräzise Stellbewegungen über einen maximalen Stellbereich von 50-200mm verrichten und dabei Stellkräfte bis zu 20kN aufbringen. Der Felddesign benötigt allerdings eine leistungsfähige Stromsteuerung.

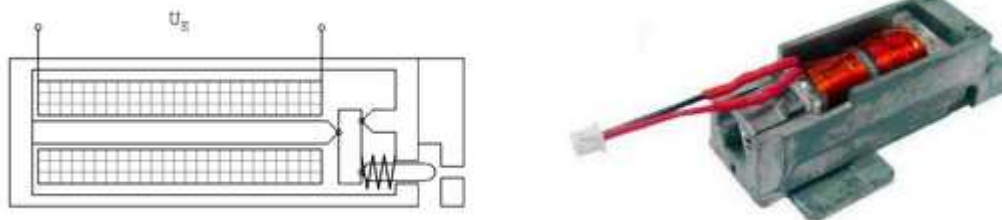


Abbildung 43: Magnetostriktives Ventil (links) bzw. Schallwandler (rechts)

### 1.1.2 Flow-Energy Aktoren

#### 1.1.2.1 Pneumatische Stelleinrichtungen

Pneumatische Stelleinrichtungen nutzen die physikalischen Eigenschaften der **Druckluft**. Die hohe **Kompressibilität** und **Energiespeicherfähigkeit**, wie auch die **geringe Viskosität** dieses Übertragungsmediums ermöglichen den Aufbau leistungsfähiger und dynamisch schneller Stellantriebe die mittlere Stellkräfte von **einigen kN** aufbringen können. Die Umformung der pneumatischen in mechanische Energie wird zum einen in **Druckluftzylindern** oder -membranen zur Erzeugung translatorischer Bewegungen, zum anderen in **Druckluftmotoren** zur Erzeugung rotatorischer Bewegungen durchgeführt. Pneumatische Stellelemente, meist per Luftdruck betätigte Zylinder für die Bewegung zwischen zwei Endlagen, gehören immer noch zu den **weit verbreitetsten Aktoren im Maschinenbau**.

**Vorteile:** Einfacher und robuster Aufbau (eine Zuleitung), hohe Arbeitsgeschwindigkeiten und große Gesamtwege, hohe Betriebssicherheit bei extremen Umgebungsbedingungen (Temperatur-, Schmutzbeständigkeit, Überlastungsfestigkeit, Explosionsschutz), Störsicherheit gegenüber elektrischen und magnetischen Feldern sowie Strahlungen, günstiges Leistungsgewicht und gutes Preis/Leistungsverhältnis.

**Nachteile:** Druckluftaufbereitung notwendig, teilweise große Abmessungen, Reibung und Kompressibilität erschweren die Regelung, beschränkte Positioniergenauigkeit.

<sup>8</sup> Fa. FeONIC - [www.feonic.com](http://www.feonic.com), Video: <https://www.youtube.com/watch?v=BMtfxp5U-4E>

## 1 - Aktoren und Stelleinrichtungen

**Anwendungen:** Druckluftmotore (z. B.: Werkzeuge), Zylinder, Membranen, pneumatische Muskel.



Abbildung 44: Druckluftlamellenmotor (rechts: Funktionsprinzip)

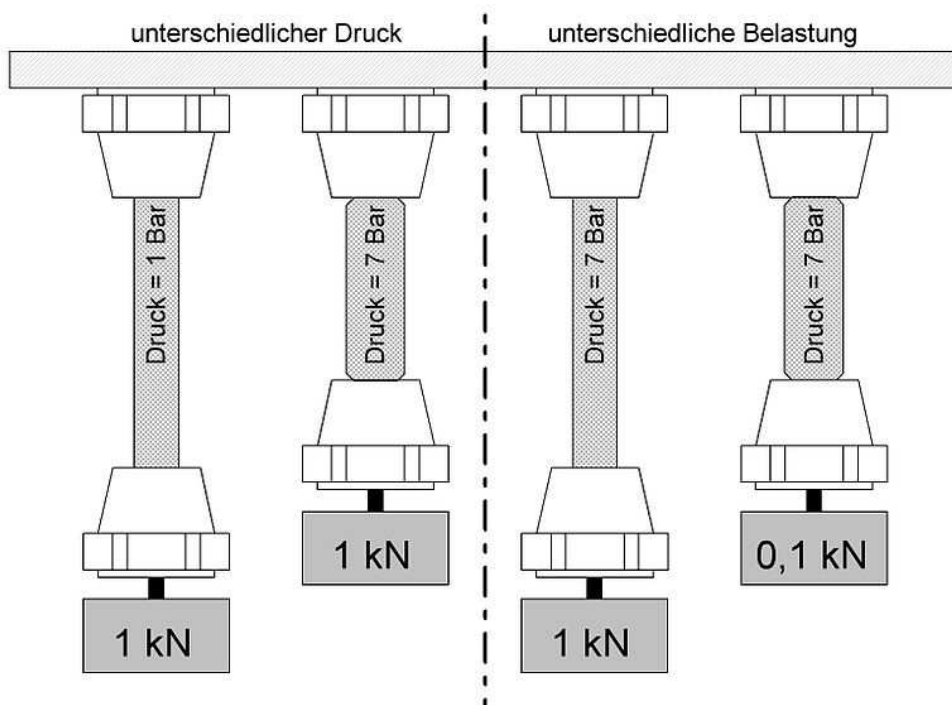


Abbildung 45: Pneumatischer Muskel



Abbildung 46: links: dreisträngiger pneumatischer Muskel (biegefähig!)  
rechts: Pneumatik-Stellzylinder



## 1 - Aktoren und Steleinrichtungen

### 1.1.2.2 Hydraulische Stellglieder

Hydraulische Steleinrichtungen werden bevorzugt dort eingesetzt, wo **hohe Kräfte** bzw. Beschleunigungen bei gleichzeitig **kleinem Bauraum** verlangt sind. Da sie trotz großer Kraftaufbringung nur geringe Eigenmassen bewegen, ist eine **dynamisch schnelle Positionierung** möglich.

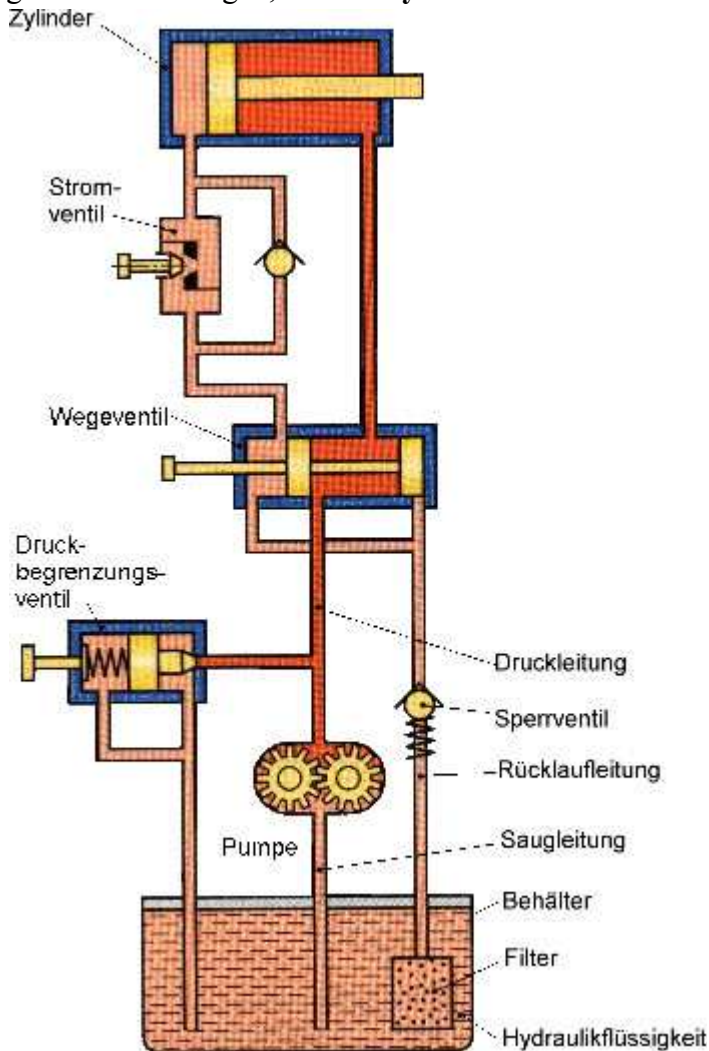


Abbildung 47: Grundsätzlicher Aufbau eines Hydrauliksystems

Im Gegensatz zur Pneumatik, kommt hier dem **Rotationsmotor** eine größere Bedeutung zu, da er **große Antriebsmomente bei kleinen Abmessungen** (Leistungsdichteverhältnis Hydraulik-/Elektromotor ca. 10-25) und geringem Massenträgheitsmoment aufweist. Es ergeben sich dadurch sehr kleine Zeitkonstanten und damit eine Möglichkeit der **hochdynamischen Drehzahlstellung**. Kleine Drehzahlen lassen sich allerdings prinzipbedingt nur mit relativ ungleichförmigen Drehbewegungen realisieren. Die Erzeugung **translatorischer Bewegungen** erfolgt in hydraulischen **Stellzylindern**. Das dynamische Verhalten hydraulischer Stellantriebe ist vor allem durch die schwache Dämpfung charakterisiert, die zudem vom Kolbenhub als auch von der Belastung abhängig ist. In Verbindung mit modernen Regelungskonzepten können dennoch servohydraulische Stellantriebe realisiert werden, die hohe Positioniergenauigkeiten bei einem guten dynamischen Verhalten aufweisen.

**Vorteile:** Gegenüber pneumatischen Systemen hohe Steifigkeit und Stoßfestigkeit, hochdynamische Rotationsmotore. Kleine Abmessungen, hohe Dynamik und Leistungsdichte, hohe Steifigkeit,



## 1 - Aktoren und Stelleinrichtungen

großes Arbeitsvermögen, Korrosionsschutz durch Hydraulikflüssigkeit, hohe Lebensdauer (Fluid selbstschmierend und kann als Kühlmedium dienen), Anfahren aus dem Stillstand bei Vollast, gleichförmige Bewegungen wegen der geringen Kompressibilität der Hydraulikflüssigkeit, hohe Stellgenauigkeit.



*Abbildung 48: Oben: Hydraulikmotor, Funktionsprinzip Radialkolbenmotor  
Unten: Hydraulikmotor als Hilfsantrieb auf einem Forstanhänger*

**Nachteile :** Vergleichsweise hohe Systemkosten, Zweileitungssystem, Ölaufbereitung notwendig (hohe Anforderung an die Filtrierung der Hydraulikflüssigkeit), Reibung und komplexe Dynamik (Schwingungsneigung durch Druckstöße) erschweren Regelung, bei gleichem Arbeitsdruck langsamer als Pneumatik.

**Anwendungen:** Baumaschinen (Bagger, Krane, Stapler, ...), Maschinen in der Land- und Forstwirtschaft (Traktoren, Kipphydraulik, Hilfsantriebe, ...), Werkzeugmaschinen (Pressen, Scheren, Abkantmaschinen, ...), Walzspaltregelung in Walzwerken, Hebebühnen, Ventilsteuerung in Verbrennungsmotoren, Lenkhilfen, Luftfahrt (z. B.: Klappen und Fahrwerk), Wehrtechnik (z. B.: servo-hydraulische Richtantriebe bei Geschützen).

### 1.1.3 Thermoaktoren

#### 1.1.3.1 Wärmeausdehnungs-Stellanrichtungen

##### Thermo-Bimetall:

Thermobimetalle sind **Schichtverbundwerkstoffe**, die aus **mindestens zwei Komponenten mit unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten** bestehen. Da sich bei Erwärmung die eine Komponente stärker ausdehnt als die andere, entsteht eine **temperaturabhängige Krümmung** des Thermobimetalls. Thermobimetalle sind seit mehr als 200 Jahren bekannt.

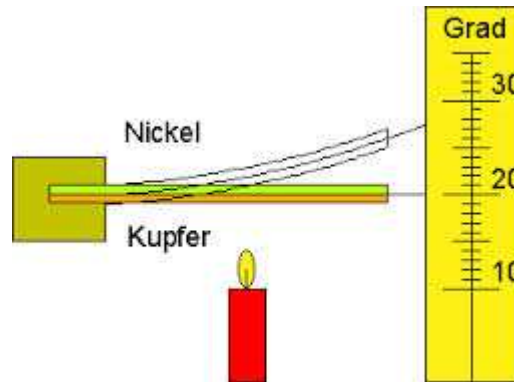


Abbildung 49: Bimetallstreifen (Prinzip)

Das wichtigste Kriterium für die Auswahl der Komponenten von Thermobimetallen ist die thermische Dehnung. Bei Thermobimetallen wird die Komponente mit der **kleineren Wärmeausdehnung** als **passive Komponente** und die Komponente mit der **größeren Wärmeausdehnung** als die **aktive Komponente** bezeichnet. Besonders hohe thermische Ausdehnungskoeffizienten zeigen z. B.: Legierungen des Mangans mit Kupfer- und Nickelzusätzen zu den Werkstoffen mit geringem Ausdehnungskoeffizienten zählt vor allem die Eisen-Nickel-Legierung mit 36% Nickel, die unter dem Namen **Invar** bekannt ist.

Als Kenngröße für die thermische Empfindlichkeit von Thermobimetallen gilt die sog. **spezifische thermische Krümmung  $k$** , welche aber temperaturabhängig ist. Der **Nennwert** der spezifischen thermischen Krümmung  $k$  gilt für den Temperaturbereich von **20-130°C**. Als **Anwendungsgrenze** wird diejenige Temperatur bezeichnet, bei der die Eigenschaften des Thermobimetalls gerade noch nicht bleibend verändert werden. Die Vielzahl möglicher Werkstoff-Kombinationen hat weltweit zu über 100 verschiedenen Thermobimetallen geführt.

**Besondere Eigenschaften** von Thermobimetallen: Einfach, preiswert, vorgebbare lineare Temperatur-Stellweg-Abhängigkeit, Linearitätsbereich bis etwa 600°C erzielbar, Anwendungsgrenze ca. 650°C, hohe Stabilität des Formänderungseffektes bis ca. 20 Millionen Zyklen.

**Anwendung:** Schaltelemente (Leitungsschutzschalter, Übertemperatursicherungen bzw. Temperaturschalter in Haushaltsgeräten), Automobilindustrie (historisch, Kühlwasserthermostat, Blinklampen, automatischer Choke), einfache Thermometer.

## 1 - Aktoren und Steleinrichtungen

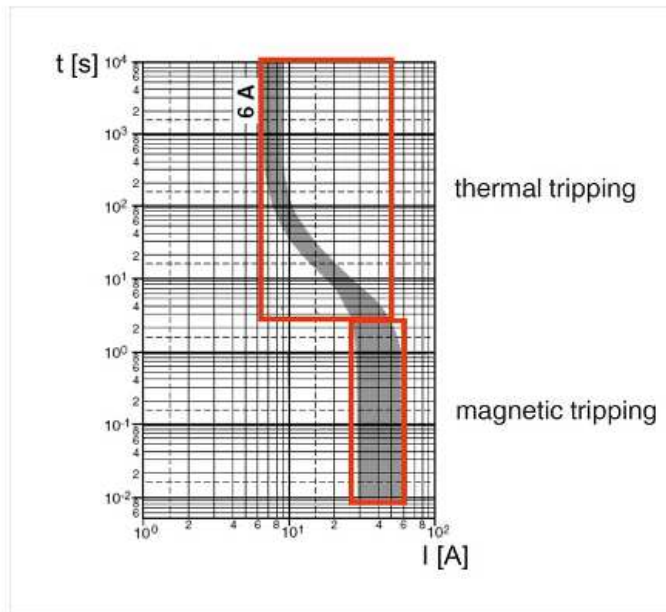
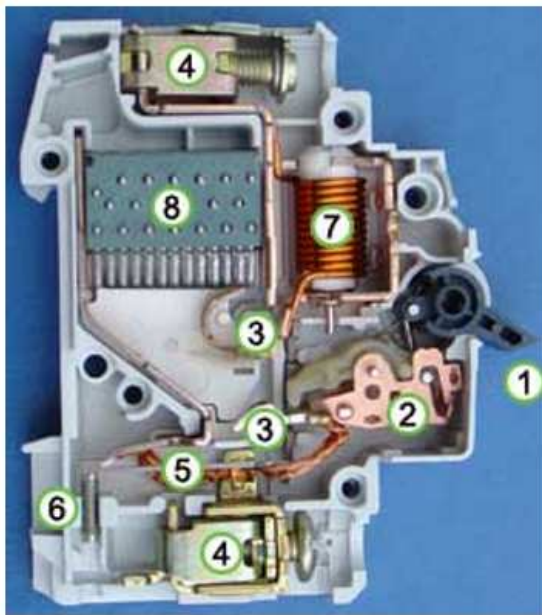


Abbildung 50: Leitungsschutzschalter inkl. Auslösekennlinie (rechts, für Nennstrom 6A).  
Bei geringer, aber dauernder Überlastung spricht der Bimetallschalter an ("thermal tripping").

**Dehnstoff-Aktoren:** Dehnstoffelemente bestehen aus einem **druckfesten Behälter**, in dem sich eine Dehnstofffüllung (z. B.: Wachs) befindet, die bei **Erwärmung** schmilzt. Die dabei entstehende **Volumenzunahme** wird auf einen Arbeitskolben übertragen und zur Arbeitsleistung genutzt. Bei Abkühlung wird die Kolbenrückführung durch eine äußere **Rückstellfeder** bewirkt.

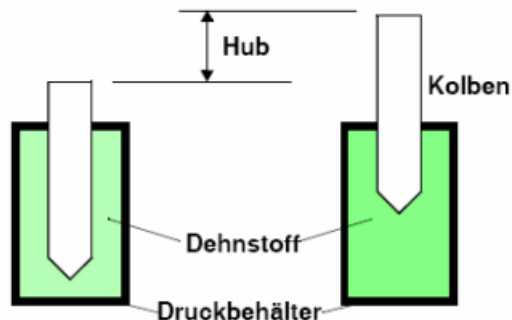


Abbildung 51: Dehnstoffelement (Prinzip)

Dehnstoffelemente für **Proportionalregelung** zeigen im Regelbereich eine **lineare Temperatur-Hub-Kennlinie** mit geringer Hysterese (einige Kelvin). Mit der Verwendung einer **Mischung** verschieden hoch schmelzender Öle oder Wachse wird über das **Schmelzintervall** ein Schaltbereich definiert. So spielen sich für Zwischentemperaturen entsprechende Zwischenstellungen des Aktuators ein, was **unerwünschtes Schwingen im Regelkreis** und damit auch mechanischen Verschleiß am Kolben vermeiden hilft. Neben dem Hub im Regelbereich ist noch ein bestimmter Überhub zulässig, wenn die Temperatur über den Regelbereich hinausgeht.

Neben der Proportionalregelung kann je nach Elementtyp und Anwendung auch eine **nichtlineare Temperatur-Hub-Kennlinie** erzeugt werden, wobei der überwiegende Teil des Hubes in einem en-

## 1 - Aktoren und Stelleinrichtungen

gen Temperaturbereich von beispielsweise  $1\text{-}2\text{K}$  **nahezu sprungartig** erfolgt. Auch bei dieser Kennlinie liegt eine Hysterese vor.

**Eigenschaften:** Die Einsatzmöglichkeiten von Dehnstoffelementen erstrecken sich über einen Temperaturbereich von etwa  $-40^{\circ}\text{C}$  bis  $+180^{\circ}\text{C}$ . Während sich Thermobimetalle auch direkt durch hindurchfließenden elektrischen Strom erwärmen lassen, können Dehnstoffelemente nur durch das Umgebungsmedium erwärmt werden. Die Arbeitsweise der Dehnstoffelemente ist naturgemäß mit einer erhöhten Trägheit verknüpft. Da der Dehnstoff im erwärmten Zustand flüssig ist, kann ein Ausfließen der Füllung infolge Undichtheit nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden.

**Anwendungsbereiche:** Heizkörper-Thermostatventile, Thermostاتمischbatterien, Verbrennungsmotoren (Regelelemente für Kühl-/Ölkreislauf), Kondensatableiter.

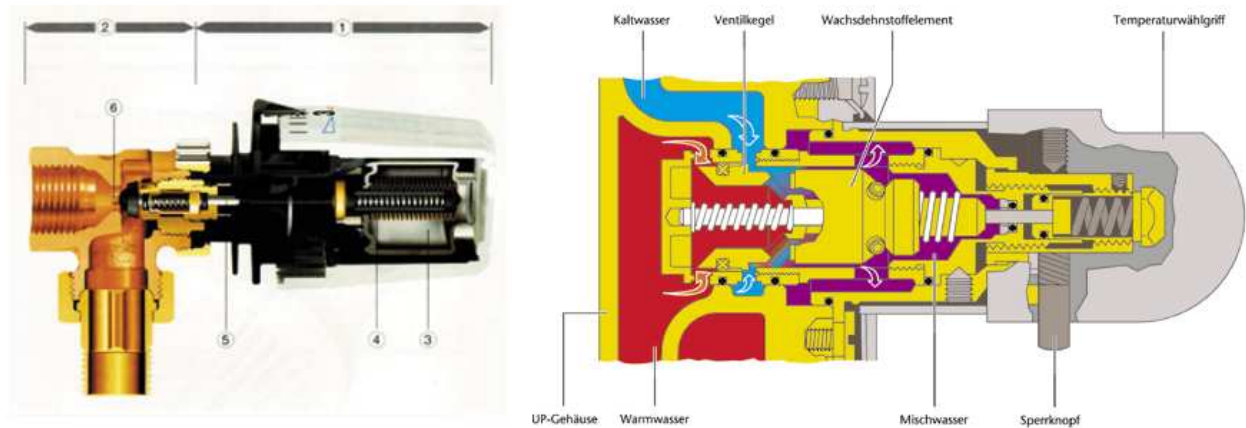


Abbildung 52: Links: Heizkörperthermostat (4 = Dehnstoffelement)  
Rechts: Thermostاتمischbatterie

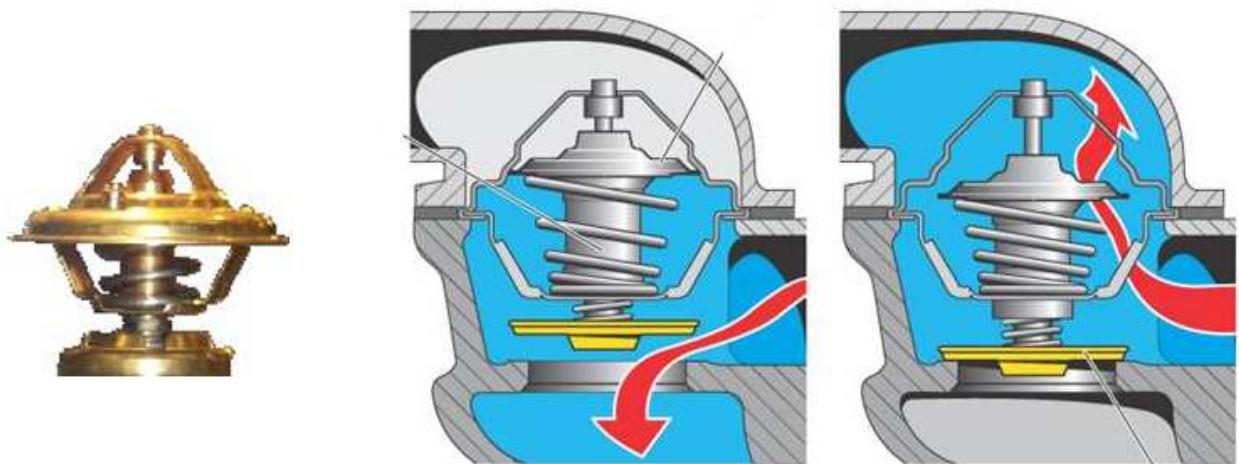


Abbildung 53: Kühlwasserthermostat (KFZ-Motor)

### 1.1.3.2 Formgedächtnis-Legierungen (Shape-Memory-Alloys, SMA)

Legierungen mit Formgedächtnis-Effekt besitzen die Fähigkeit, sich **unterhalb** eines bestimmten **kritischen Temperaturpunktes bleibend zu verformen**. Bei **Erwärmung** über diese kritische Temperatur hinaus sind sie in der Lage, sich an ihre **Ausgangsform** zu "erinnern" und diese wieder anzunehmen. Daher werden sie umgangssprachlich als "**Memory-Metalle**" bezeichnet.



## 1 - Aktoren und Stellanrichtungen

Wohl die erste der zu Beginn der 1960er Jahre gefundenen Legierungen mit Formgedächtnis war Nickel-Titan, dessen Handelsname **Nitinol** (Nickel Titanium Naval Ordnance Laboratory) auf den Arbeitgeber seines Entdeckers<sup>9</sup> hinweist. Daneben gibt es noch *NiTiCu*- (bessere Eigenschaften als *NiTi*), *CuZn*-, *CuZnAl*-, *CuAlNi*- *FeNiAl*-, *FeMnSi*- und *ZnAuCu-SMAs*. Es handelt sich dabei um Legierungen, die im **festen** Zustand in **zwei unterschiedlichen Kristallstrukturen** existieren können. Die Formwandlung basiert damit auf der **temperaturabhängigen Gitterumwandlung** zu einer dieser beiden Kristallstrukturen (*allotrope*<sup>10</sup> Umwandlung). Neuerdings gibt es auch Polymere<sup>11</sup>, die einen Formgedächtnis-Effekt zeigen.

**Einweg-Memory- Effekt:** Einmalige Formänderung beim Aufheizen eines zuvor verformten Werkstücks. Er gestattet nur eine einmalige Formänderung. Das erneute Abkühlen bewirkt keine Formänderung, nur eine Gitteränderung (Austenit zu verzwilligtem Martensit). Für den Einsatz in der Aktorik, muss das Bauelement wieder in seine „Kaltform“ zurückkehren können, dies ist z. B. mit einem Rückstell-Element in Form einer Feder möglich.

**Zweiweg-Memory-Effekt:** Das Bauelement kann im warmen und im kalten Zustand jeweils eine unterschiedliche, vorher definierte Form einnehmen. Arbeit kann aber nur beim Aufwärmen geleistet werden, d. h. beim Abkühlen dürfen keine äußeren Kräfte wirken.

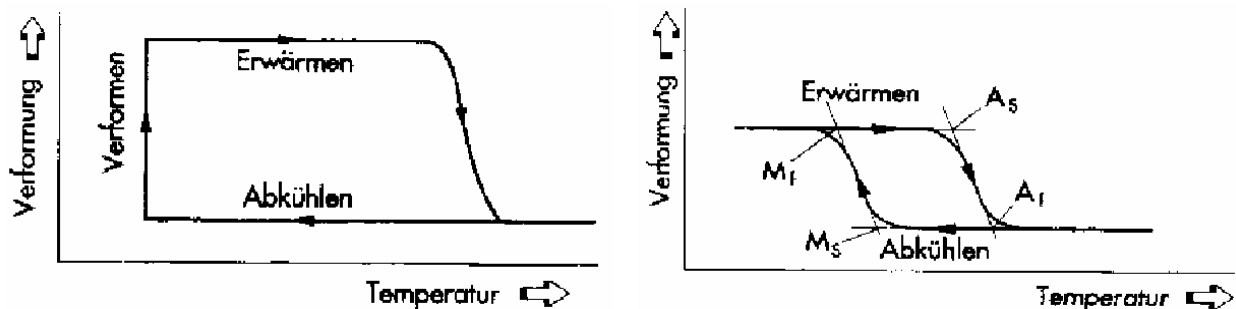


Abbildung 54: "Memory"-Effekt; Einwegeffekt (links) - Zweiwegeffekt (rechts)

**Superelastizität:** Bei Formgedächtnislegierungen kann zusätzlich zur gewöhnlichen (durch die atomaren Bindungskräfte bedingten) elastischen Verformung eine durch äußere Krafteinwirkung verursachte reversible Formänderung beobachtet werden. Diese „elastische“ Verformung kann die Elastizität konventioneller Metalle bis zum zwanzigfachen übertreffen. Das Material kehrt beim Entlasten durch seine innere Spannung wieder in seine Ursprungsform zurück. Dafür sind keine Temperaturänderungen erforderlich.

**Vorteile:** große Formänderung, beim Erwärmen sehr großes Arbeitsvermögen pro Volumeneinheit (mit Abstand die höchste Energiedichte unter den Aktor Werkstoffen überhaupt), große Kräfte realisierbar, langlebig ( $> 0.1$  Mio. Zyklen), Biege-, Druck-, Zug- und Torsionsformänderungen möglich, große Gestaltungsvielfalt.

9 William J. Buehler hatte dort die spezielle Eigenschaft dieser Legierung durch Zufall im Forschungslabor der Navy gefunden. Ein aus *Nitinol* hergestellter Draht oder Blechstreifen kann zwar verbogen – also plastisch verformt – werden, nimmt aber durch Erwärmen wieder seine ursprüngliche Form an.

10 **Graphit und Diamant** sind Allotrope des Kohlenstoffs mit unterschiedlicher Kristallstruktur und dramatisch unterschiedlichen Eigenschaften. Es handelt sich dabei um kein *SMA*, auch die Umwandlung von Graphit in Diamant ist – obwohl es ein gutes Geschäftsmodell wäre – leider nicht gerade einfach...

11 **Formgedächtnispolymere** sind Gegenstand intensiver Forschung. Ihr kommerzieller Einsatz wird wahrscheinlich zuerst in der Medizintechnik erfolgen, wo metallische Formgedächtniswerkstoffe auch schon heute eine Rolle spielen, aber auch biologische Nebenwirkungen zeigen können.



## 1 - Aktoren und Stellanrichtungen

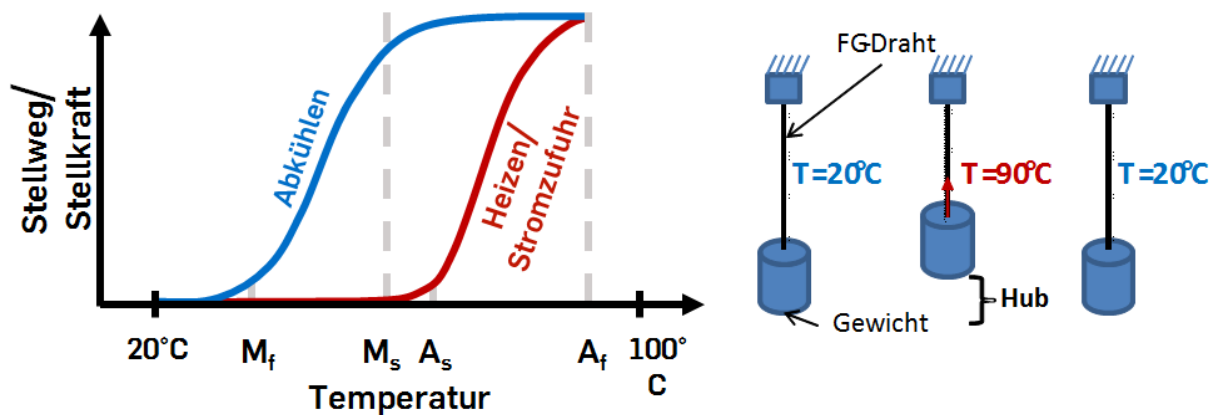


Abbildung 55: Ein Formgedächtnisdraht von 2mm Durchmesser und einem Meter Länge ist beispielsweise in der Lage ein Gewicht von über 100kg um 5cm anzuheben. Der Draht wiegt dabei lediglich 30g. Ein vergleichbarer Hubmagnet würde ca. 4kg wiegen, um diese Leistung zu erbringen.

**Nachteile:** Hoher Preis, große Hysterese, geringe Stabilität, thermischer Einsatzbereich, Kühlung und Beheizung notwendig.

**Anwendung:** Automotive (pneumatische Ventile, > 5 Mio. Aktoren/Jahr), Medizintechnik (Stents, biologisch inerte und gleichzeitig knicksichere chirurgische Instrumente, Zahnspannen, ...), Luft-/Raumfahrttechnik (adaptive Winglets, Entfaltung von Sonnensegeln), Hydraulikpumpen, Optik (flexible Brillengestelle, Autofocus in Smartphones, Bildstabilisierung), Robotik (Greifer, Fortbewegung, ...).

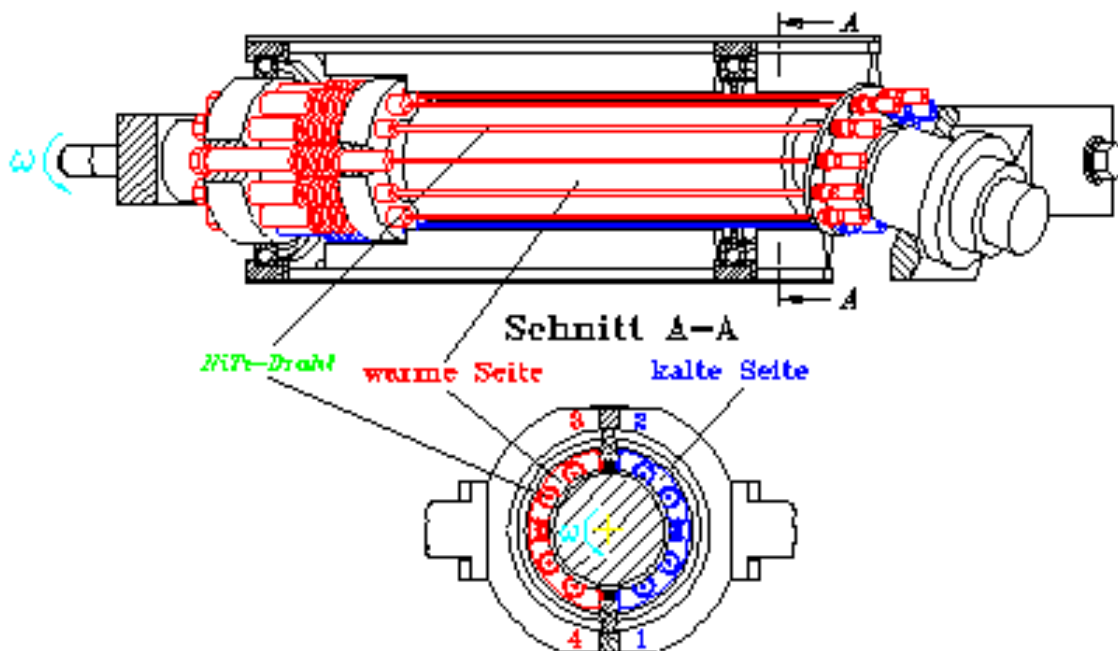


Abbildung 56: Motor aus Formgedächtnisdrähten.

### 1.1.4 Chemische Stellanrichtungen

#### 1.1.4.1 Elektrochemische und chemomechanische Aktoren

Elektrochemische Aktoren (**ECA**) nutzen z. B. den **Druckaufbau** bei der **Abgabe von Gasen** wie Wasserstoff, chemomechanische Aktoren (**CMA**) basieren auf **Volumenänderungen** bei kontinuierlich oder sprunghaft ablaufende Phasenübergängen.

##### Elektrochemische Aktoren:

Elektrochemische Reaktionen sind durch den Übergang von Elektronen bestimmt bzw. gesteuert. Diese spielen oft bei Anwendungen zum Korrosionsschutz bzw. Reinigungsprozessen von Metallen eine bedeutende Rolle. Für den Einsatz in der Aktorik ist die **Erzeugung bzw. Umsetzung von Gasen** während einer elektrochemischen Reaktion (z. B.: Elektrolyse) von Bedeutung. Der damit einhergehende **Druckaufbau** kann zur Erzeugung **mechanischer Arbeit** verwendet werden. Die Funktionsweise kann mit pneumatischen Aktoren verglichen werden, jedoch ohne aufwändiges Leitungssystem. Der **Druckabbau** kann durch einfaches **Umpolen** erfolgen, die erzeugte Gasmenge ist direkt proportional zum (steuerbaren) Strom. Man unterscheidet **drei Reaktionstypen**:

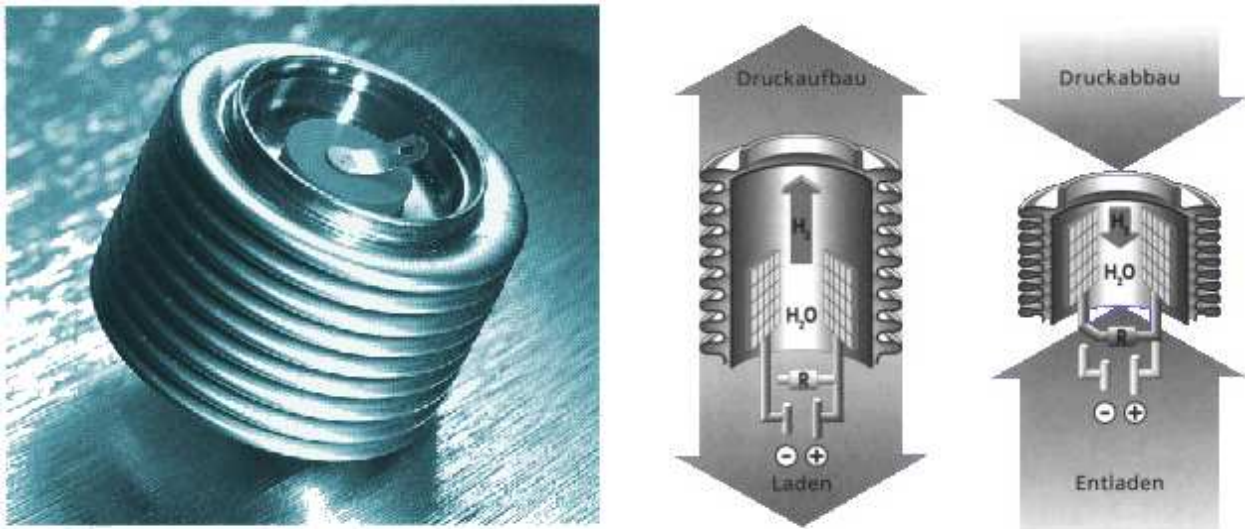
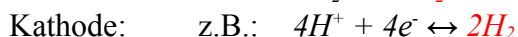
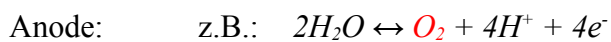


Abbildung 57: Elektrochemischer Aktuator

**Brennstoffzellenreaktion:** Gaserzeugung aus der **Elektrolyse** eines wässrigen Elektrolyten:

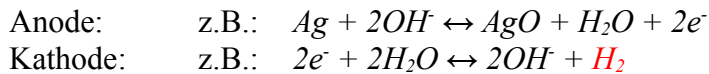


**Sauerstoffpumpenreaktion:** Es handelt sich hierbei um ein **einseitig offenes System**: Die Arbeitselektrode reduziert Luftsauerstoff, die Anode oxidiert Hydroxidionen zu Sauerstoff. Der **Sauerstofftransport** erfolgt **aus der Umgebung** über die Flüssigkeit zur Anode (in den Druckraum). Die Rückreaktion gibt den Sauerstoff wieder an die Umgebung ab.



**Festkörper-Gasreaktion:** Ähnlich Elektrolyse, jedoch wird die sekundäre Gasentwicklung durch Oxidation der Elektrode (z. B.: Silber) ersetzt:

## 1 - Aktoren und Stellanrichtungen



**Anwendung und Eigenschaften:** Wegen der vergleichsweise langsamen Reaktion ( $\sim 1\text{mm}$  Stellweg in  $10\text{s}$  sind realisierbar) vor allem für Langzeitanwendungen (Ventile für Heizungsregelung, Schmiermittelförderung, ...) interessant. In Abhängigkeit von der Baugröße des ECAs können Endkräfte von bis zu  $3\text{kN}$  erreicht werden.

### (Elektro-)chemomechanische Aktoren:

Hierbei handelt es sich um Materialien, die **chemische Energie direkt in mechanische Energie** umwandeln können. Beispiele sind gummiartige Materialien, die in verdünnter Säure anschwellen oder fasrige, vernetzte Collagene, welche in Salzlösung kontrahieren. Gelingt die **elektrische Steuerung** der chemischen Prozesse spricht man von einem **elektrochemomechanischen Aktor**:

**Polyelektrolytische Gele:** Treten mit einer sie **umgebenden Elektrolytflüssigkeit** in Wechselwirkung, wobei Ionen aus der Lösung in das Polymer hinein bzw. aus dem Polymer heraus diffundieren. Die **Diffusionsprozesse** führen zu einer **Extension bzw. Kontraktion** des Materials. Stärke und Richtung der **Diffusionsvorgänge sind durch ein elektrostatisches Feld stimulierbar**. Die Deformation des ionischen Gases kann auf zwei Arten erreicht werden: Entweder ist das Gel an die positive Elektrode gebunden und beim Anlegen einer Spannung beginnt es von dieser Seite her zu schrumpfen oder das Gel liegt zwischen zwei Elektroden. In diesem Fall verdickt es sich zur positiven Elektrode hin.

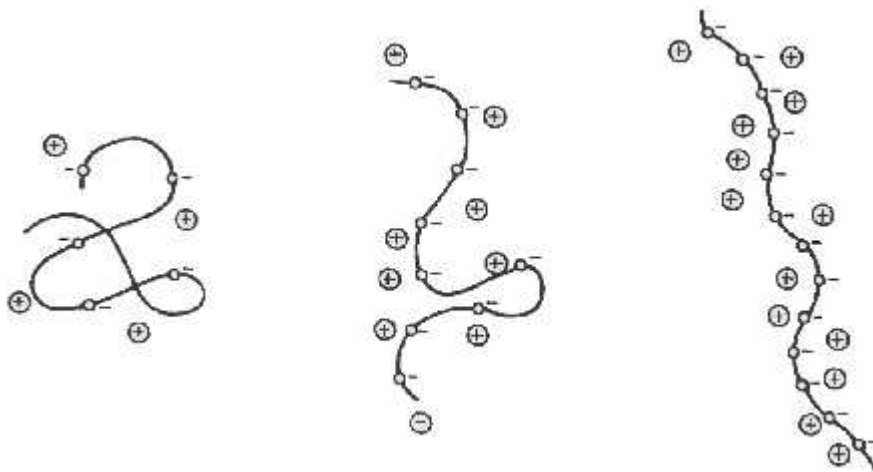


Abbildung 58: Ausdehnung eines ionisierbaren Makromoleküls in Kochsalzlösung

**Eigenschaften und Anwendungen:** Im Vergleich zu piezoelektrischen Materialien ist eine größere Längenänderung bei vergleichsweise hohen Kraftdichten auf. Nachteilig wirken sich bedingt durch langsame Diffusionsprozesse große Zeitkonstanten sowie die Notwendigkeit einer nassen (elektrolytischen) Umgebung aus. Mit der Reduzierung der geometrischen Abmessungen können diese Zeitkonstanten jedoch künftig signifikant verkleinert werden. Es können damit muskel- oder bioähnliche Aktoren realisiert werden.

**Leitfähige Polymere (Electroconductive Polymers):** Leitfähige Polymere, eine Klasse von Polymeren, die vor allem in der Sensortechnik zum Einsatz kommt, werden erst seit relativ kurzer Zeit auf ihre Eignung als Aktoren untersucht. Es hat sich dabei gezeigt, dass z. B.: Polypyrrol und Polyanilin **außerordentlich große Kräfte**, etwa das Hundertfache derer biologischer Muskeln ver-

## 1 - Aktoren und Stelleinrichtungen

gleichbaren Querschnitts, aufbringen können. Dabei erreichen leitfähige Polymere bei Anregung durch ein elektrisches Feld jedoch deutlich **geringere Verformungen** (1...10%) als **polyelektrolyte Gele**, wenn auch bedeutend größere Verformungen als piezoelektrische Wandler. Die Notwendigkeit der nassen (elektrolytischen) Umgebung entfällt, was vorteilhaft ist.

**Anwendung:** Leitfähige Polymere als Stellglieder sind noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium. Es gibt einige Demonstrationsobjekte im Bereich der Robotik (insbesondere im Bereich humanoider Roboter), und Medizintechnik / Bionik (künstliche Muskeln). Künftig sind Anwendungen in der Mikrosystemtechnik sowie Luft-/Raumfahrt denkbar.



Abbildung 59: Robotische Hand mit künstlichen Muskeln aus elektroaktivem Polymer

### 1.1.4.2 Pyrotechnische Stelleinrichtungen

Ein **pyromechanischer Aktor (PMA)** setzt in wenigen **Millisekunden chemisch gebundene Energie in Bewegungsenergie** um. Sie bestechen durch ihre **kleine Größe, geringes Gewicht** und **hohe Zuverlässigkeit**, wobei **sehr hohe Kräfte** freigesetzt werden. Während der Funktion eines solchen Kraftelements wird ein Kolben entweder nach außen geschoben bzw. eingezogen, womit Halterungen, Klappen oder auch hochgespannte Federpakete freigegeben werden können.

**Eingesetzt werden pyromechanische Aktoren überall dort, wo im Not- oder Überlastfall zuverlässig und schnell bei kleinstem Bauraum und Gewicht eine mechanische Ver- oder Entriegelung stattfinden muss.** Bereits in den *1960er* Jahren wurden solche Aktoren in der **Raumfahrt** erfolgreich verwendet. Aufgrund der gesetzlichen Anforderungen für die Sicherheit im **KFZ**-Bereich finden nun solche pyrotechnischen Auslöseelemente in **großen Stückzahlen** Anwendung in der **Automobilindustrie** (Airbags, Gurtstraffer, Entriegelungen für Überrollbügel, ...).

**Aktoren** bestehen aus einer zylindrischen Hülse (3), einem **beweglichem Kolben** (2), dem Anzünd-der (1) und einem Verschlussstück (vgl. Abb. 60). Je nach erforderlicher Leistung kann noch zusätzlicher Treibstoff hinzugegeben werden. Nach der elektrischen **Auslösung** über die **elektrischen Anschlüsse** (5) wird von der pyrotechnischen **Treibladung** (1) genügend Gas erzeugt, um den gesicherten Kolben zu lösen und unmittelbar in seine Endposition zu bewegen. Um die Kraft beim Anschlag des Kolbens zu begrenzen, ist meist auch ein Dämpfungselement (4) eingebaut. Selbstverständlich sind solche Systeme vor Feuchtigkeit und Korrosion geschützt, so dass die Funktion immer gewährleistet ist, wenn man sie braucht.



## 1 - Aktoren und Stelleinrichtungen



Abbildung 60: Pyro-mechanischer Aktor

**Kabeltrenner:** Treibladungsaktivierte Kabeltrenner, auch als "Schneidvorrichtung für Kabel mit Explosivstoff" bezeichnet, werden in den unterschiedlichsten Anwendungen eingesetzt: So kann damit ein Stahlkabel, elektrisches Kabel, eine Druckleitung oder Treibstoff-Leitung, ein Rohr oder Stab und jedes Seil mit hoher Festigkeit in **wenigen Millisekunden** getrennt werden. Die herausragenden Eigenschaften der Kabeltrenner sind ihre **kleine Größe**, das **geringe Gewicht** und die **sehr hohe Zuverlässigkeit**. Dabei übertrifft das Verhältnis von Kraft und Gewicht jede andere mechanische Trennvorrichtung. Ihre Funktion ähnelt dabei der von pyrotechnischen Aktoren. Kabeltrenner bestehen aus einem zylindrischen Stahl-Rohr, einer Schneidklinge, einem Amboss, Anzünder und Verschlussstück. In der Nähe des Amboss wird durch eine Querbohrung des Gehäuses das zu trennende Seil geführt. Nach der Zündung über einen elektrischen Impuls wird von der pyrotechnischen Treibladung genügend Gas erzeugt, um den gesicherten Kolben zu lösen und mit hoher Geschwindigkeit gegen den Amboss zu treiben. Dabei wird das durchgeführte Kabel vollständig durchtrennt.

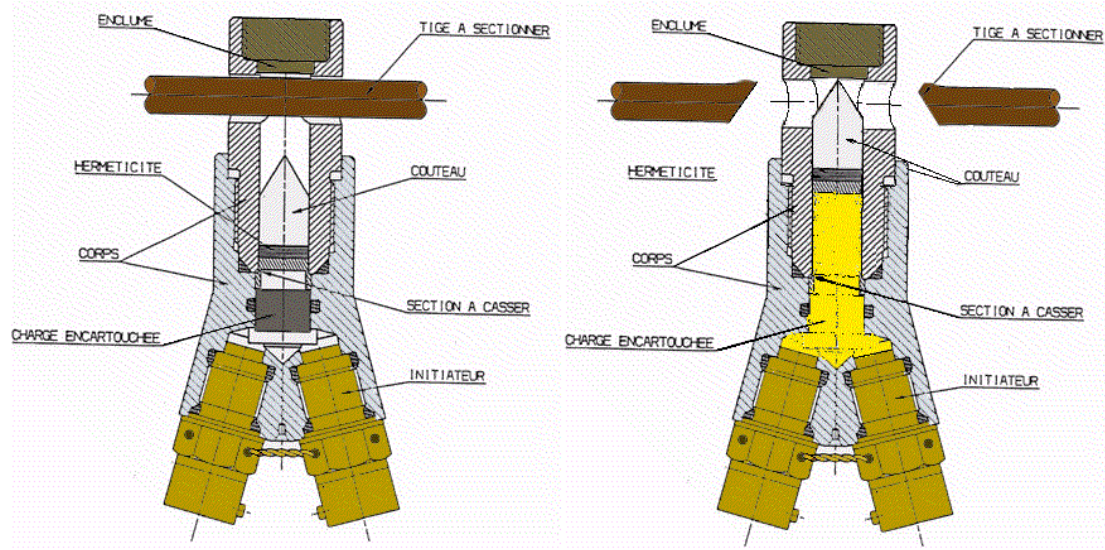


Abbildung 61: Pyrotechnischer Kabeltrenner

**Pyrotechnische Gasgeneratoren:** Werden in großen Stückzahlen zum "aufblasen" von **Airbags** eingesetzt. Wird ein programmierter Schwellenwert des Sensorsignals überschritten und entspricht dieser einem speziellen Muster, schaltet das Steuergerät Leistungstransistoren durch und ein elektri-



## 1 - Aktoren und Stellanrichtungen

scher Strom fließt durch einen dünnen **Widerstandsdraht der Anzündeinheit**. Dies löst eine thermische Kettenreaktion aus. Der schmelzende Widerstandsdraht zündet über seine Hitze die **Anzündmasse und die Anzündverstärkerladung**. Die hier entstehende Energie wird auf die Anzündmischung übertragen. Die aus der Reaktion entstehenden heißen Gase und Partikel entzünden nun die in der Brennkammer befindlichen **Treibstofftabletten**, welche unter einem Druck von **200 - 300bar** schnell abbrennen (ca. **20mm/s**). Innerhalb von **30ms** ist der Treibstoff vollständig abgebrannt und erzeugt dabei das Füllgas und Schlacke. Moderne Treibstoffe haben inzwischen eine Gasausbeute von **60-99 %**.

Etwa ab dem Jahr **2000** wurde vermehrt an dem Problem gearbeitet, die Wucht des sich entfaltenden Airbags, insbesondere für Personen, die sich zu nahe am Airbag-System befinden, zu verringern (z. B. ein Beifahrer, der sich nach vorne beugt und sich somit "*out of position*" befindet). Hierzu wurden **zweistufige Gasgeneratoren** entwickelt, welche zunächst mit der ersten pyrotechnischen Stufe den Bag entfalten und erst dann vollständig mit der zweiten Stufe über ein zusätzliches Zündsignal vom Steuergerät auffüllen. Der Bag entfaltet sich dadurch wesentlich sanfter aus seinem Modul und überträgt weniger Energie auf die ungünstig positionierte Person.

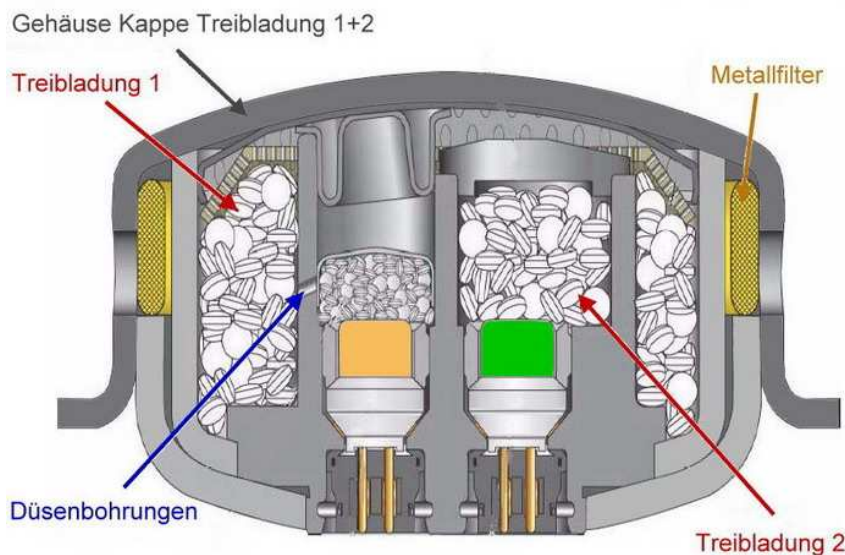


Abbildung 62: Pyrotechnischer, zweistufiger Gasgenerator (Lenkradairbag)

### 1.2 Leistungselektronische Stellglieder (Stromrichter)

Ein Stromrichter ist ein Gerät, das in der Lage ist, **elektrische Energie** einer bestimmten Stromart in elektrische Energie einer anderen Stromart **umzuformen**.

Neben anderen Stellgliedern wie Widerständen, Gleichstromgeneratoren usw. nehmen in der modernen Aktorik (insbesondere in der Antriebstechnik) leistungselektronische Stellglieder eine Vorrangstellung ein, die u.a. durch einen **hohen Wirkungsgrad**, **große Verstärkung**, **völlige Kontaktfreiheit**, **praktisch verzögerungsfreie Arbeitsweise**, **geringen Wartungsaufwand** und **geringen Raumbedarf** begründet ist. Stromrichter werden heute mit **nichtsteuerbaren und steuerbaren Leistungshalbleiter-Bauelementen** (Dioden, Transistoren, Thyristoren) realisiert.

## 1 - Aktoren und Stellanrichtungen

### 1.2.1 Grundfunktionen der Stromrichter

Elektrische Energie zur Speisung größerer Antriebe ist heute fast nur noch als Wechselstrom oder Drehstrom verfügbar. Die Antriebe benötigen die Energie jedoch in angepasster Form:

- **Gleichstromantriebe mit variabler Drehzahl** als Gleichstromenergie mit variabler Spannung - positiver und negativer Polarität - und
- **Drehstromantriebe mit variabler Drehzahl** als Wechselstrom/Drehstromenergie mit variabler Frequenz und Spannung.

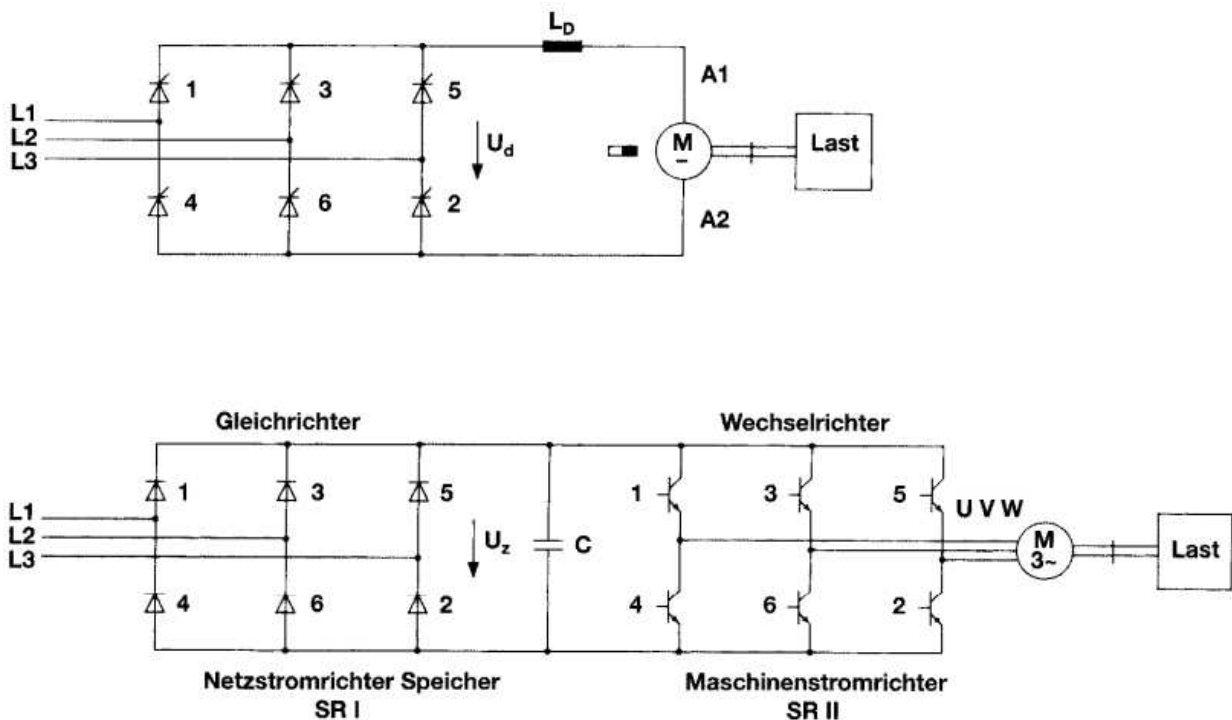


Abbildung 63: Drehzahlvariabler Gleichstromantrieb und Drehstromantrieb mit Stromrichterspeisung

Die Aufgabe der zwischen Netz und elektrischer Maschine geschalteten Stellglieder ist die **Umwandlung** der angebotenen elektrischen Energie in die gewünschte Energieform und die **Steuerung des Energieaustauschs** zwischen Netz und Maschine - unter Umständen in beiden Richtungen (**Rückspeisung - Rekuperation**).

Die Stellglieder mit Halbleiterschaltern, die hierfür eingesetzt werden, heißen Stromrichter. Die in der Antriebstechnik wichtigen Funktionen sind:

- **Gleichrichten** mit der **Umwandlung von Wechselstrom/Drehstrom in Gleichstrom** mit der Energieflussrichtung zum Gleichstromsystem
- **Wechselrichten** mit der **Umwandlung von Gleichstrom in Wechselstrom/Drehstrom** mit der Energieflussrichtung zum Wechselstrom/Drehstromsystem
- **Wechselstrom-Umrichten** mit der **Umwandlung von Wechselstrom/Drehstrom** einer gegebenen Spannung, Frequenz und Strangzahl in **Wechselstrom/Drehstrom** einer anderen Spannung, Frequenz und/oder Strangzahl.

Bei **Gleichstromantrieben** wird hauptsächlich die Betriebsart **Gleichrichten** eingesetzt. Bei

## 1 - Aktoren und Stellanrichtungen

**Bremsvorgängen mit Energierückspeisung** wird im **Wechselrichterbetrieb** gearbeitet, (vgl. Abb. 64a). Bei **Drehstromantrieben** wird die Betriebsart **Wechselstromumrichter** eingesetzt, die für beide Energierichtungen gleichermaßen gilt (vgl. Abb. 64b).

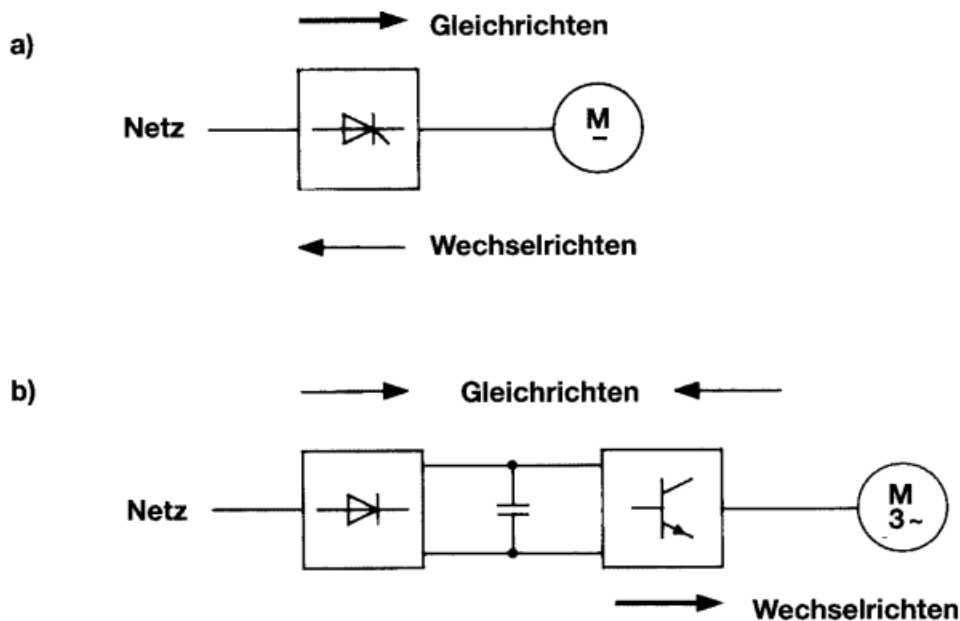


Abbildung 64: Möglichkeiten der Energieumformung mit Stromrichtern

### 1.2.2 Arbeitsweise der Stromrichter

Die Umformung der elektrischen Energie in den Stellgliedern soll möglichst mit Verfahren erfolgen, die prinzipbedingte **Verluste vermeiden**. Ohne Verluste ist eine Energieumwandlung praktisch nur über **ideale Schalter** möglich. Ein solcher idealer Schalter hat die Eigenschaften:

- **Schalter offen** (Aus, Sperren): es fließt **kein Strom**; es kann eine fast **beliebige Spannung** am geöffneten Kontakt anliegen .
- **Schalter geschlossen** (Ein, leitend): es fließt ein **lastbestimmter Strom**; es tritt **kein Spannungsfall am Schalter** auf.
- **Schalterbetätigung durch Steuerbefehle** Ein/Aus .
- **Kein Schalterverschleiß**.
- Möglichst **hohe Schaltfrequenz**.

**Halbleiterbauteile** kommen den genannten Anforderungen ziemlich nahe. Sie haben aber im Gegensatz zum idealen Schalter **Verluste und Grenzwerte**, die nicht überschritten werden dürfen. Verluste entstehen beim Halbleiterschalter als

- 1 **Sperrverluste** beim Anliegen einer Sperrspannung.
- 2 **Durchlassverluste** beim Stromfluss .
- 3 **Schaltverluste** wegen der endlichen Schaltzeit, d.h. beim Übergang vom stationären Schaltzustand „Aus“ in den Zustand „Ein“ und umgekehrt.

Beim Betrieb des Halbleiterschalters sind folgende **Grenzwerte** zu beachten :

- Die Höhe der **Sperrspannung**.

## 1 - Aktoren und Stellanrichtungen

- Die Höhe des **Schaltstromes**.
- Die Höhe der **Schaltfrequenz**.
- Die **Betriebstemperatur**.

### 1.2.3 Leistungselektronische Bauelemente

Als **elektronische Schalter oder Ventile** werden in den verschiedenen Stromrichterarten

- **Dioden**.
- **Transistoren** in verschiedener Ausführung.
- **Thyristoren** in verschiedener Ausführung.

in diversen Schaltungen eingesetzt. Da die Energieumwandlung verschleißfrei und meist mit hohen Frequenzen erfolgen soll, scheiden mechanische Schalter aus. Im folgenden soll die Wirkungsweise der Halbleiterschalter kurz beschrieben werden.

#### 1.2.3.1 Dioden

Die **einfachsten** Halbleiterschalter (Ventile) sind Dioden. Dioden haben zwei Anschlüsse: Die **Anode (A)** und **Kathode (K)**. Liegt eine **positive Spannung zwischen Anode und Kathode**, so ist das **Ventil leitend**. Die Diode ist in **Durchlassrichtung** gepolt; der fließende **Strom wird von der Last bestimmt**. Bei **umgekehrter Polarität** der Spannung  $U_{AK}$  **sperrt** die Diode. Die anliegende **Spannung „steuert“ das Verhalten** des Bauteils; das **Bauteil selbst ist nicht steuerbar**. Werden mit Dioden Stromrichter aufgebaut spricht man von „**ungesteuerten**“ Stromrichtern. Die Ventil- Eigenschaften der Dioden nutzt man aus, um damit in verschiedenen Schaltungsvarianten aus Wechsel- oder Drehspannung eine Gleichspannung zu erzeugen. Die **Höhe der Ausgangsgleichspannung** dieser Schaltungen **hängt fest mit der angelegten Eingangsspannung zusammen**.

#### 1.2.3.2 Thyristoren

Thyristoren gibt es in mehreren **verschiedenen Ausführungen** :

- **Netz-Thyristoren**: sind vorrangig auf Durchlass- und Sperreigenschaften optimiert und haben Freiwerdezeiten von mehr als  $100\mu s$ . Damit sind sie für Anwendungen bei Netzfrequenz geeignet.
- **Frequenz- Thyristoren**: Thyristor mit Freiwerdezeit zwischen  $8-100\mu s$  für den Einsatz in Wechselrichtern. Sie besitzen spezielle Gatestrukturen, die einen schnellen Anstieg des Laststromes erlauben.
- **GTO-Thyristoren**: Können an der Steuerelektrode nicht nur gezündet, sondern auch durch einen negativen Impuls wieder gelöscht werden.
- **Triacs (Zweirichtungs-Thyristortriode)**: Vom Prinzip her eine Antiparallelschaltung von zwei Thyristoren.

#### Arbeitsweise des Thyristors:

Der Thyristor hat **drei Anschlüsse** - die **Anode (A)**, die **Kathode (K)** und die Steuerelektrode, das **Gate (G)**. Wie die Diode erlaubt auch der Thyristor nur einen Stromfluss in **Durchlassrichtung** von der **Anode zur Kathode**. Während die Diode bei positiver Spannung  $U_{AK}$  sofort leitet, sperrt der Thyristor eine solche Spannung in Vorwärtsrichtung bis er über einen **Steuerstromimpuls (Zündimpuls)** am Steueranschluss (Gate) angesteuert wird. Einmal eingeschaltet (angesteuert, gezündet, leitend) leitet er dann den Strom  $I$  bis der **Haltestrom** unterschritten wird; bei Betrieb am Wechsel-

# 1 - Aktoren und Steleinrichtungen

stromnetz ist das kurz vor dem Nulldurchgang des Stromes.

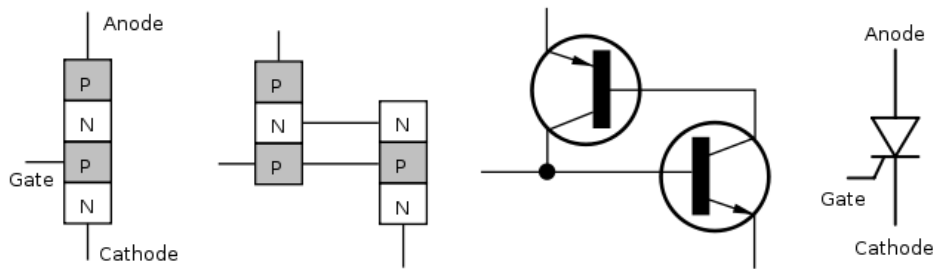


Abbildung 65: Thyristor - steuerbares Halbleiterventil

Werden mit Thyristoren Stromrichter aufgebaut, lässt sich die **Ausgangsspannung steuern**. Durch den Steuerimpuls kann man die Eingangsspannung sofort oder verzögert auf den Ausgang schalten. Der **Steuerwinkel  $\alpha$**  ("Phasenanschnitt") bestimmt die **Höhe der Ausgangsspannung (Mittelwert!)**; man spricht von **gesteuerten Stromrichtern**.

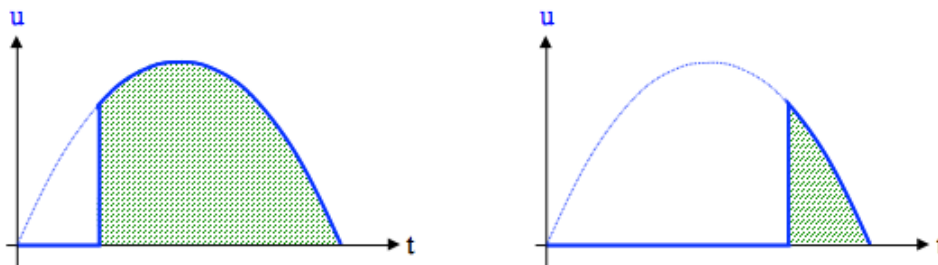


Abbildung 66: Phasenanschnittsteuerung - je nach Steuerwinkel ändert sich der Mittelwert der durch den Thyristor geschalteten Spannung.

Im Gegensatz zu Netz-Thyristoren lassen sich **GTO-Thyristoren** über einen **negativen Steuerstrom** am Gate **abschalten** ("löschen"). Dadurch entfallen die aufwendigen Löschschaltungen, die man für diesen Fall beim normalen Thyristor einsetzen muss. **GTO-Thyristoren** werden in Wechselrichterschaltungen bei **Frequenzumrichtern großer Leistung** (ab ca. **600kVA**) eingesetzt. Im Bereich kleiner Leistungen wurden sie von den Leistungstransistoren fast vollständig verdrängt.

**Triacs** sind prinzipiell nichts anderes als zwei integrierte antiparallele Thyristoren in einem Gehäuse. Sie werden über einen gemeinsamen Steueranschluss (Gate) angesteuert und verhalten sich wie zwei Thyristoren. Sie werden bei Wechsel/Drehstromstellerschaltungen **kleiner Leistung** eingesetzt („Dimmer-Schaltung“).

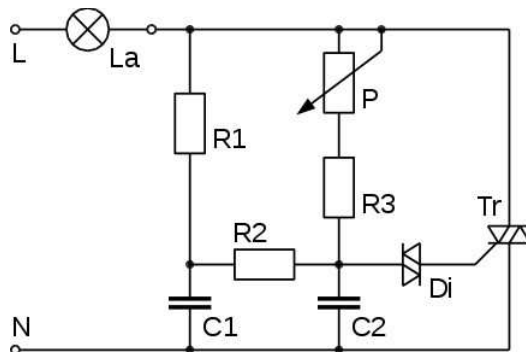


Abbildung 67: Dimmerschaltung (Phasenanschnittsteuerung) mit Triac (vereinfacht)



## 1 - Aktoren und Stelleinrichtungen

### 1.2.3.3 Transistoren

Transistoren werden in mehreren Ausführungen verwendet:

- **bipolare** (Leistungs-)Transistoren (**BJTs**)
- **unipolare** Transistoren (Feldeffekttransistoren, **FETs**, in dieser Anwendung fast ausschließlich **MOSFETs**) und
- den **Mischtyp** Insulated Gate Bipolar-Transistoren (**IGBTs**).

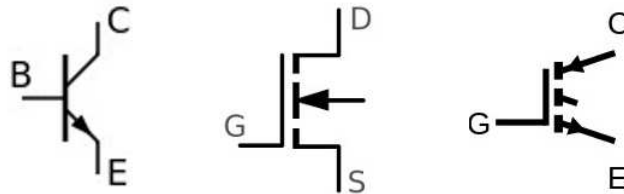


Abbildung 68: BJT - MOSFET - IGBT

Im Gegensatz zum Thyristor kann der Stromfluss beim Transistor durch die Steuerung **am Steueranschluss direkt ein- und ausgeschaltet** werden. Transistoren benötigen aber **während der Leitphase** (Ein-Zustand) **dauernd eine Ansteuerung** über die Steuerelektrode. Während bei den bipolaren Transistoren der relativ **hohe Steuerstrom  $I_B$**  an der Basis stört, ist es bei den **MOSFETs** der relativ **hohe Durchlasswiderstand  $R_{DSon}$** .

**Anmerkung:** Seit einigen Jahren profitieren **MOSFETs** von riesigen Investitionen in die Technologie sowie in das Werbe-Budget. Gleichzeitig wurden bipolare Bausteine etwas ins Abseits gedrängt – und zwar in einer Art und Weise, dass viele jüngere Entwickler Bipolar-Bausteine als veraltete Produkte ansehen. Mittlerweile haben Weiterentwicklungen im Bereich der Bipolar-Technologie dazu geführt, dass Bipolare nun wieder zu direkten Rivalen der **MOSFETs** geworden sind und diese in vielen Anwendungen sogar übertreffen. Es ist daher wichtig, die Kenndaten der Bauelemente sowie die Vorteile jeder einzelnen Technologie genau zu studieren, um die beste Systemleistung zu erzielen.

Bei **IGBTs** werden diese Nachteile scheinbar vermieden. Er vereint - theoretisch - gerade die positiven Eigenschaften des Bipolartransistors - den **geringen Durchlasswiderstand** - mit dem **geringen Steueraufwand** des **MOSFETs**. Leider entstehen technologiebedingt wesentlich höhere **Schaltverluste** als bei Leistungs-MOSFETs (z. B.: **Stromschweif** beim Abschalten, vgl. Abb. 69, rechts). Wie in der Abbildung 69 links zu sehen ist, birgt die Vierschicht-Halbleiteranordnung die Gefahr eines **parasitären Thyristors**, der aus dem **pnp**-Transistor und einem parasitären **nnp**-Transistor gebildet wird. Ähnlich wie bei CMOS-Schaltungen kann es bei IGBTs daher zum sogenannten **Latch-Up-Effekt** kommen, d. h., der Thyristor zündet, und es fließt ein Strom, der nicht über das Gate gesteuert werden kann.

Über die Kollektor-Emitter-Strecke eines **IGBT** fällt wie beim Bipolartransistor mindestens die **Schleusenspannung** ab. Bei Nennstrom sind das typischerweise je nach Sperrspannung **1,7-3V**. Das macht sie **für Niederspannungsanwendungen uninteressant**. Die **Durchlassverluste bei hohen Strömen** sind aber **um einiges kleiner** gegenüber **vergleichbaren Feldeffekttransistoren** mit hohen Sperrspannungen. Die markantesten Vorteile von **IGBTs** sind die **hohen Spannungs- und Stromgrenzen** (derzeit **6,5kV / 3,6kA** - ohne derating). Die durch die Schaltverluste begrenzte **maximale Frequenz** beträgt ca. **200kHz**.

## 1 - Aktoren und Steleinrichtungen

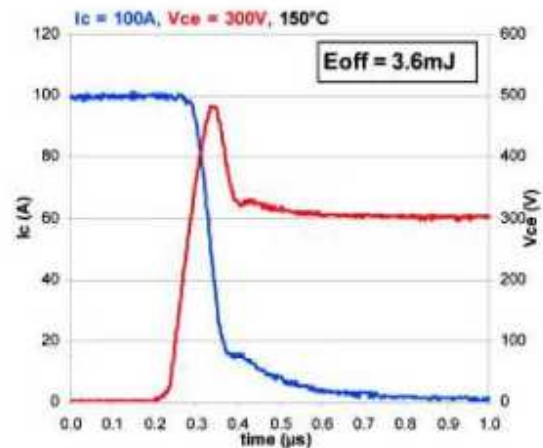
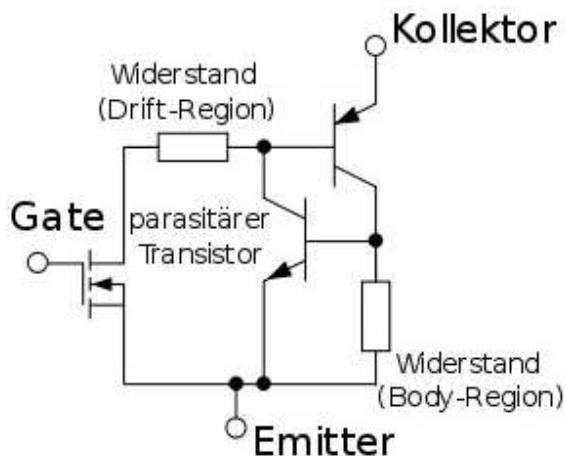


Abbildung 69: Ersatzschaltbild IGBT (links) - Schaltverluste (Stromschweif - rechts)

**Anwendung:** IGBTs werden daher vermehrt im Hochleistungsbereich eingesetzt. In der Antriebstechnik (z. B.: Lokomotivbau) ersetzen sie in Pulswechselrichtern für Drehstrommaschinen inzwischen weitgehend die vorher gebräuchlichen Schaltungen mit GTOs.

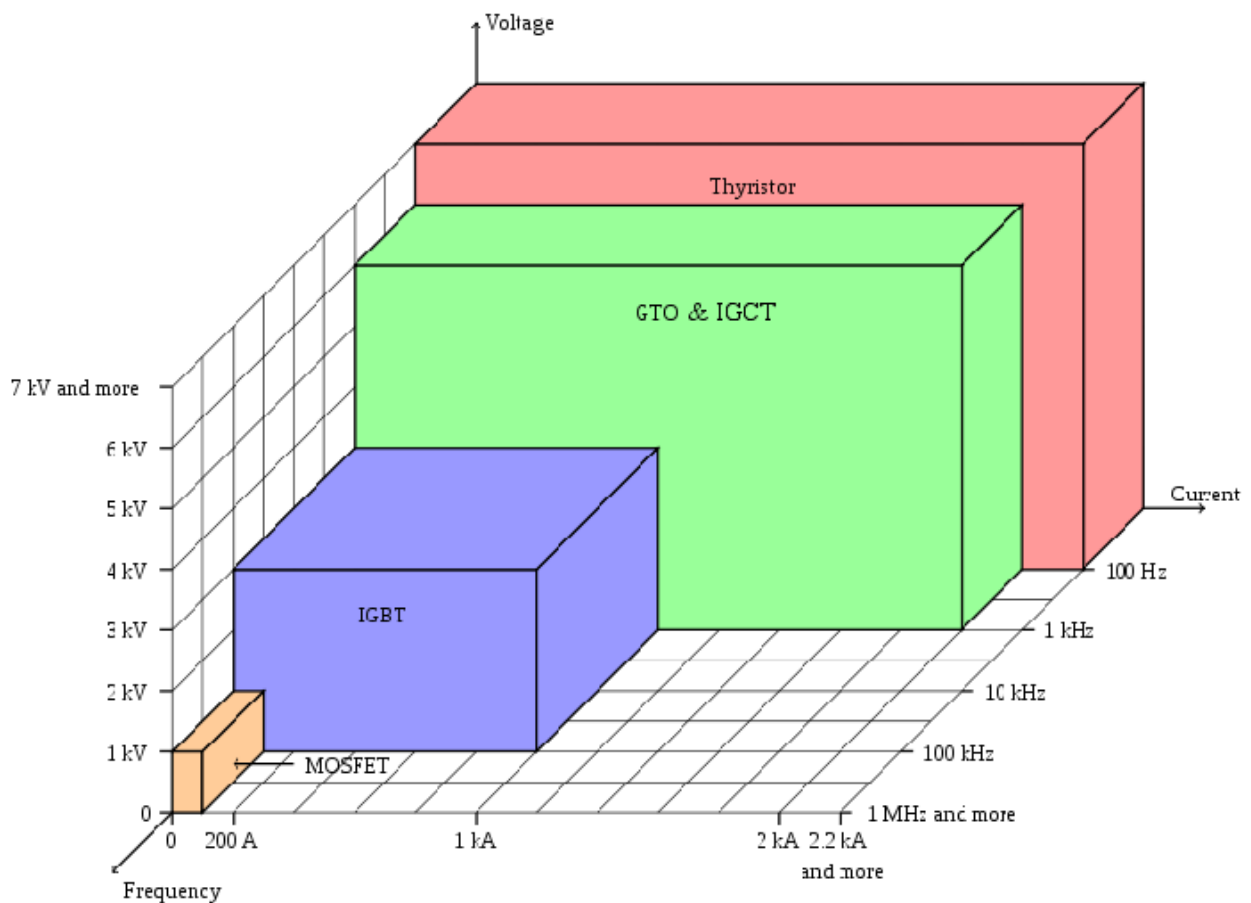


Abbildung 70: Effektives Schaltvermögen unterschiedlicher Halbleiterschalter (inkl. derating)  
Stand: 2012. Die Grenzen verschieben sich laufend zu höheren Werten hin!

## 1.2.4 Gleichstromsteller

Ein **Halbleiterschalter für Gleichstromkreise** lässt sich nicht nur zum Ein- und Ausschalten zu beliebigen Schaltzeitpunkten einsetzen. Wenn man ihn **periodisch** im Takt einer bestimmten **Schaltfrequenz** einschaltet und ausschaltet, so lässt sich auf diese Weise die **Leistungsaufnahme einer Last** aus einer Gleichspannungsquelle **steuern bzw. "stellen"**. Einen solchen Stromrichter nennt man Gleichstromsteller.

Beim Gleichstromsteller werden **abschaltbare Stromrichterventile** verwendet; je nach Größe der zu steuernden Leistung sind dies **MOSFETs, IGBTs oder GTOs**. Die **Grundsaltung** des Gleichstromstellers ist der **Tiefsetzsteller mit passiver Last**. Die folgenden Gleichungen gelten für idealen Schalter und ideale Diode:

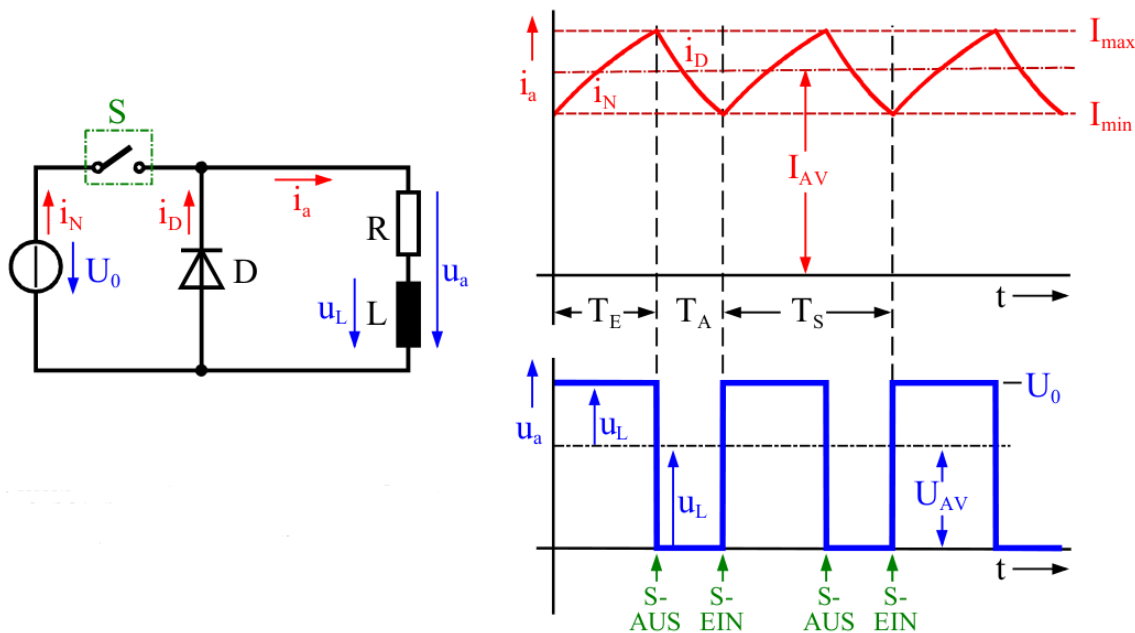


Abbildung 71: Tiefsetzsteller mit passiver Last inkl. zeitliche Verläufe von  $u_a$  und  $i_a$

Der Ausgangsstrom muss für  $S$  offen bzw. geschlossen separat betrachtet werden:

$$i_a(t) = \begin{cases} \frac{U_0}{R} \cdot \left( \frac{e^{-T_A/\tau} - 1}{1 - e^{-T_S/\tau}} \cdot e^{-t/\tau} + 1 \right) & \text{Schalter geschlossen} \\ \frac{U_0}{R} \cdot \frac{1 - e^{-T_E/\tau}}{1 - e^{-T_S/\tau}} \cdot e^{-\frac{t-T_E}{\tau}} & \text{Schalter offen} \end{cases} \quad (15)$$

Für die **Mittelwerte** für Ausgangsspannung  $U_{AV}$  und Ausgangsstrom  $I_{AV}$  ergeben sich

$$U_{AV} = \frac{T_E}{T_S} \cdot U_0 \quad ; \quad I_{AV} = \frac{U_{AV}}{R} = \frac{T_E}{T_S} \cdot \frac{U_0}{R} \quad (16)$$

Der Ausgangsstrom schwankt um diesen Mittelwert um den Betrag

$$\Delta I = I_{max} - I_{min} = \frac{U_0}{R} \cdot \frac{(1 - e^{-T_A/\tau}) \cdot (1 - e^{-T_E/\tau})}{1 - e^{-T_S/\tau}} \quad (17)$$

## 1 - Aktoren und Steleinrichtungen

Je höher die Schaltfrequenz  $f_s$  und die Speicherinduktivität  $L$  und je größer der Lastwiderstand  $R$  also je kleiner das Verhältnis  $T_s/\tau$  ist, desto genauer lässt sich der Verlauf des Ausgangsstromes durch eine **Dreieckform** annähern.

### 1.2.4.1 Steuerverfahren

Das **Verhältnis**  $T_E/T_s$  kann als **Steuergröße** verwendet werden. Unterschieden wird zwischen der **Pulsbreitensteuerung**, bei der  $T_s$  konstant ist und  $T_E$  verändert wird, und der **Pulsfrequenzsteuerung**, bei der  $T_E$  oder  $T_A$  konstant ist und  $T_s$  verändert wird. Bei beiden Steuerverfahren werden die Umschaltzeitpunkte des Gleichstromstellers vorgegeben und die Betriebsgrößen, wie die Schwankungsbreite des Stromes  $i_a$  stellen sich ein.

Gleichstromsteller können auch dadurch gesteuert werden, dass der Strom  $i_a$  gemessen wird und daraus die Umschaltzeitpunkte abgeleitet werden. Es liegt eine **Zweipunktregelung des Stromes** vor, wenn der Gleichstromsteller geöffnet wird sobald  $i_a$  den Wert  $I_{max}$  und er geschlossen wird, wenn  $i_a$  den Wert  $I_{min}$  erreicht. Mit diesem Steuerverfahren wird die Stromschwankungsbreite  $\Delta I$  vorgegeben.

Die **Pulsbreitensteuerung** soll - wegen ihrer Bedeutung - etwas näher betrachtet werden. Hier ändert sich die Stromschwankungsbreite  $\Delta I$  mit der Aussteuerung; bei einer **mittleren Aussteuerung** erreicht sie ihren **größten Wert**.

Bei  $T_E/T_s = 0,5$  beträgt die **maximale Stromschwankungsbreite**  $\Delta I_{max}$ :

$$\Delta I_{max} = \frac{U_0}{R} \cdot \frac{1 - e^{-T_s/2\tau}}{1 + e^{-T_s/2\tau}} \quad (18)$$

Bei vielen praktischen Anwendungen kann die **Last** als **Gegenspannung mit einer idealen Induk-**

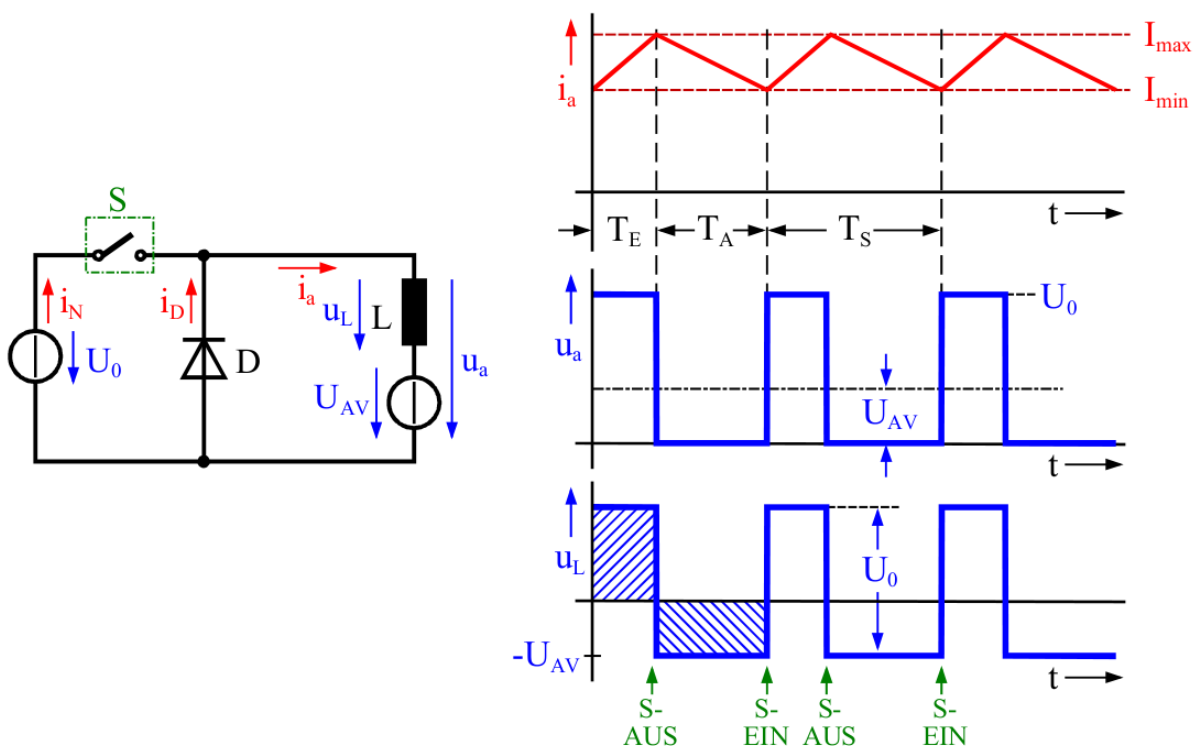


Abbildung 72: Tiefsetzsteller mit Gegenspannung inkl. zeitliche Verläufe von  $u_a$ ,  $u_L$  und  $i_a$

## 1 - Aktoren und Steleinrichtungen

**tivität** angenommen werden (z. B.: Gleichstrommotor). Man kann Schaltungen als Tiefsetz- oder Hochsetzsteller mit Gegenspannung realisieren. Durch diesen Trick ist der Mittelwert der Ausgangsspannung - und damit das Tastverhältnis festgelegt und die Mathematik vereinfacht sich. Für den Ausgangsstrom  $i_a$  findet man:

$$i_A(t) = \begin{cases} I_{\min} + \frac{U_0 - U_{AV}}{L} \cdot t & \text{Schalter geschlossen} \\ I_{\max} - \frac{U_{AV}}{L} \cdot (t - T_E) & \text{Schalter offen} \end{cases} \quad (19)$$

$$I_{AV} = \frac{1}{2} \cdot (I_{\max} + I_{\min}) \quad \text{Mittelwert des Stromes}$$

$$\Delta I = I_{\max} - I_{\min} = \frac{U_0 - U_{AV}}{L} \cdot T_E \quad \text{Stromschwankungsbreite}$$

Für die obige Betrachtungen wird eine konstante Spannung  $U_0$ , ein idealer Schalter  $S$  und eine ideale Diode vorausgesetzt. Bei ungünstigen Tast- bzw. Lastverhältnissen (kleiner Ausgangsstrom) kann es allerdings passieren, dass die in der **Spule gespeicherte Energie nicht mehr ausreicht**, die Zeit während das Stromventil offen (nicht leitend) ist zu überbrücken. Der **Ausgangsstrom sinkt dann zwischenzeitlich auf 0**! Man spricht vom **diskontinuierlichen bzw. lückenden Betrieb**. Obige Beziehungen (19) gelten dann nicht mehr! Die **Grenze für den Lückbetrieb** wird erreicht, wenn  $I_{\min}=0$ .

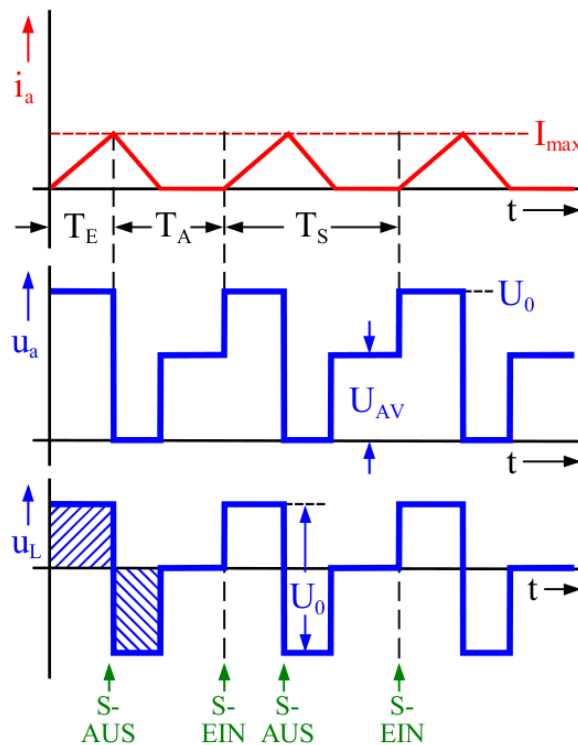


Abbildung 73: Lückbetrieb



## 1 - Aktoren und Steleinrichtungen

### Vierquadrantenbetrieb:

Mit Gleichstromstellern lassen sich auch Schaltungen zur **Drehrichtungsumkehr und/oder Energierichtungsumkehr** realisieren. Dieses ist der Mehrquadrantenbetrieb mit dem Gleichstromsteller. Voraussetzung für die Nutzbremmung ist, dass die Einspeisung in der Lage ist, die Energie auch aufzunehmen. Gleichstromsteller für Vierquadrantenbetrieb (Treiben und Bremsen der Gleichstrommaschine in beiden Drehrichtungen) können als **Brückenschaltungen** aufgebaut werden.

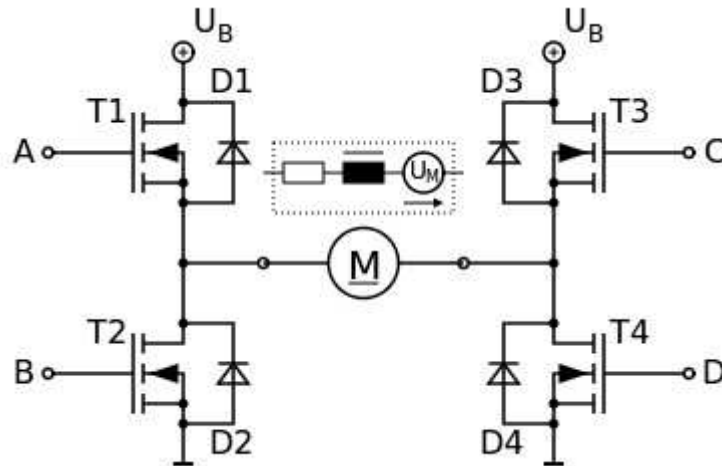


Abbildung 74: Vierquadrantensteller (MOSFETs als Ventile)

Das Grundgerüst eines Vierquadrantenstellers besteht aus **zweimal zwei in Reihe geschalteten Stromventilen** (*BJTs, MOSFETs, IGBTs, GTOs, ...*) mit **jeweils einer Freilaufdiode** in Sperrpolung. In der Mitte zwischen den beiden Hälften liegt der zu steuernde Verbraucher (z. B.: DC-Motor). Dessen Ersatzschaltbild besteht aus der Induktivität der Motorwicklung in Reihe mit deren ohmschen Verlusten und der Spannungsquelle  $U_M$ , die aufgrund der Läuferdrehung induziert wird.

Bei **statischer Ansteuerung** - also ohne *PWM* - kann die Schaltung die **Drehrichtung** des Motors, nicht aber die Drehzahl steuern. (z. B.:  $T_1, T_4$  ein  $\rightarrow$  Vorwärtslauf ;  $T_2, T_3$  ein  $\rightarrow$  Rückwärtslauf).

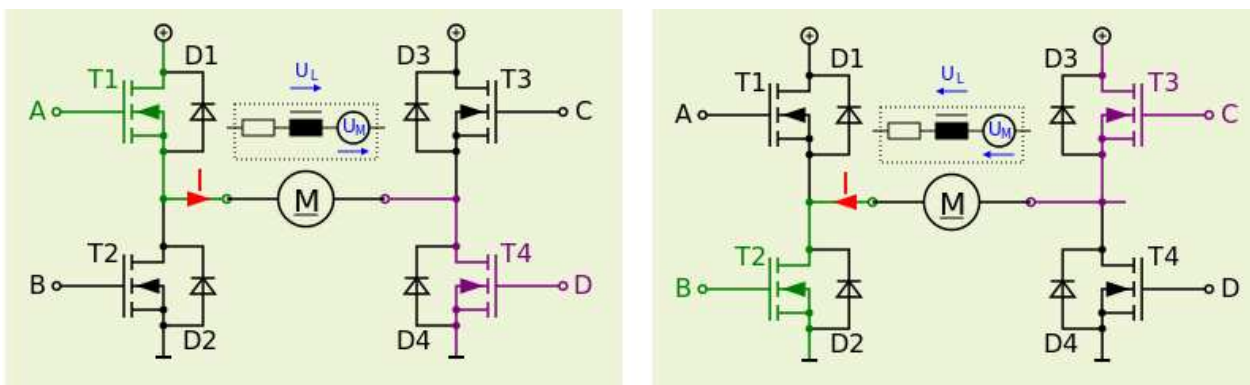


Abbildung 75: Vierquadrantensteller: Drehrichtungsumkehr (statische Ansteuerung ohne PWM)

**Gibt der Motor mechanische Leistung ab, ist das Produkt aus  $U_M$  und  $I$  positiv.** Im umgekehrten Falle arbeitet der Motor als Generator und nimmt mechanische Leistung auf. Das vom Motor abgegebene Drehmoment ist näherungsweise proportional zum fließenden Strom. Dies ist auf beiden Seiten von Abb. 75 der Fall! Trägt man  $U_M$  und  $I$  (bzw.  $M$ ) in ein Koordinatensystem ein so er-

## 1 - Aktoren und Stellanrichtungen

hält man vier Quadranten:

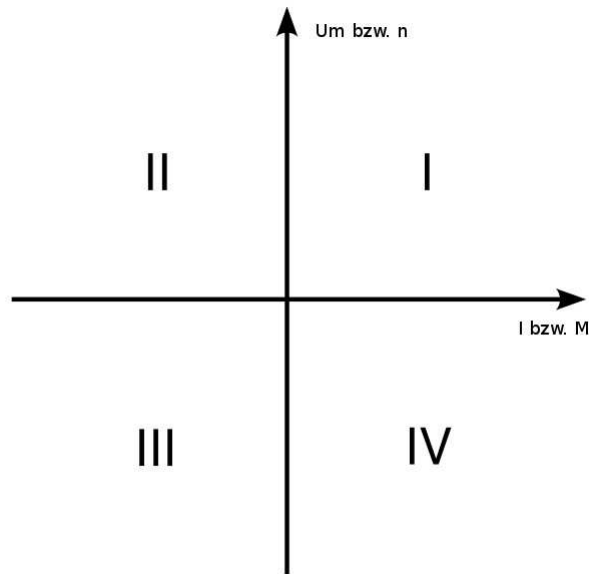


Abbildung 76: Vierquadrantenkennfeld  
(Betriebsfelder des Vierquadrantenstellers)

Die Zustände in Abb. 75 befinden sich demnach im *I.* (links) bzw. *III.* Quadranten (rechts).

Der Vierquadrantensteller erzeugt bei passender Ansteuerung (**PWM**) aus der Gleichspannung eine Wechselspannung variabler Frequenz und Amplitude, dadurch wird eine **Drehzahlsteuerung** möglich. Im *I.* Quadranten wird  $T_1$  alternierend,  $T_4$  dauernd eingeschaltet. Ist  $T_1$  gerade **ausgeschaltet** (vgl. Abb. 77, rechts) polt sich  $U_L$  um, die **Wicklung wird entmagnetisiert**, der Strom fließt in gleicher Richtung über die Freilaufdiode von  $T_2$ . Bei genauerer Betrachtung handelt es sich um nichts anderes als einen **Tiefsetzsteller** (s. o.).

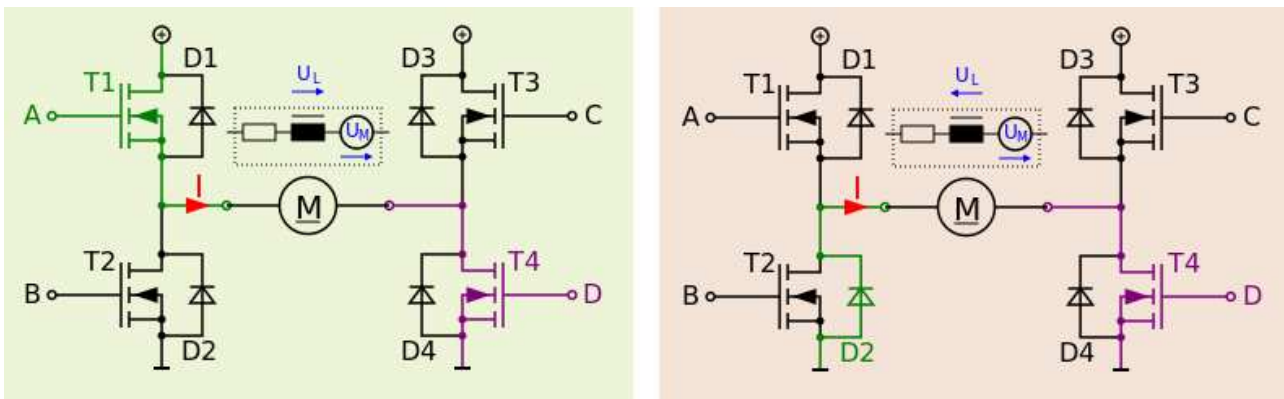


Abbildung 77: Betriebsquadrant I  $\rightarrow$  Motor vorwärtslauf (PWM-Ansteuerung)

Im **II. Betriebsquadranten** ändert sich die Situation dahingehend, dass das **Moment** und damit der **Strom negativ** werden, obwohl der Motor sich immer noch im **Vorwärtslauf** ( $U_M$  positiv!) befindet. Dies bedeutet **Generatorbetrieb**. Bei richtiger Ansteuerung kann eine **Rückspeisung ins Gleichspannungsnetz** erfolgen. Diese Konfiguration von  $L$ ,  $U_M$ , das mit PWM beaufschlagter Stromventil und die Freilaufdiode nennt man einen **Hochsetzsteller** ( $U_0 < U_M$ ).

## 1 - Aktoren und Steleinrichtungen

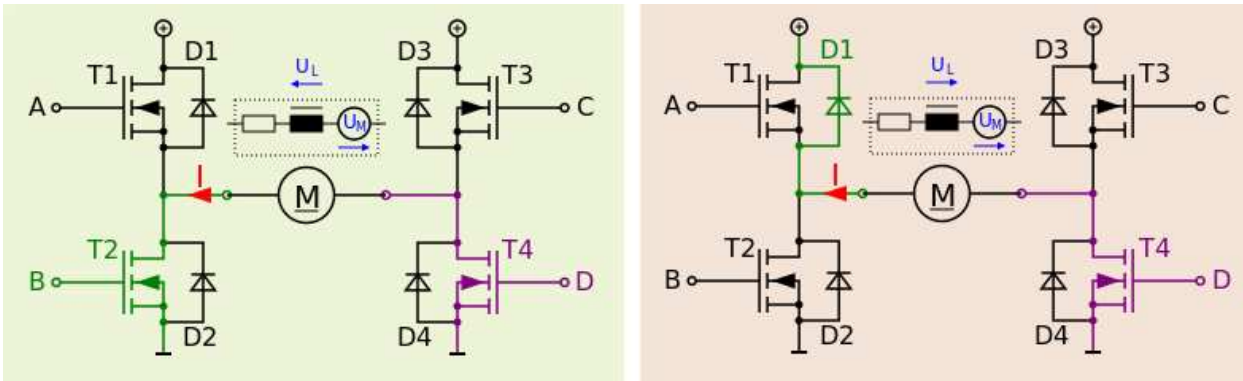


Abbildung 78: Betriebsquadrant II → Generator vorwärtslauf (PWM-Ansteuerung)

Für die restlichen Betriebsquadranten, **III (Motor, rückwärtslauf)**, bzw. **IV (Generator, rückwärtslauf)** sind die entsprechenden analogen Situationen in Abb. 79 und 80 dargestellt.

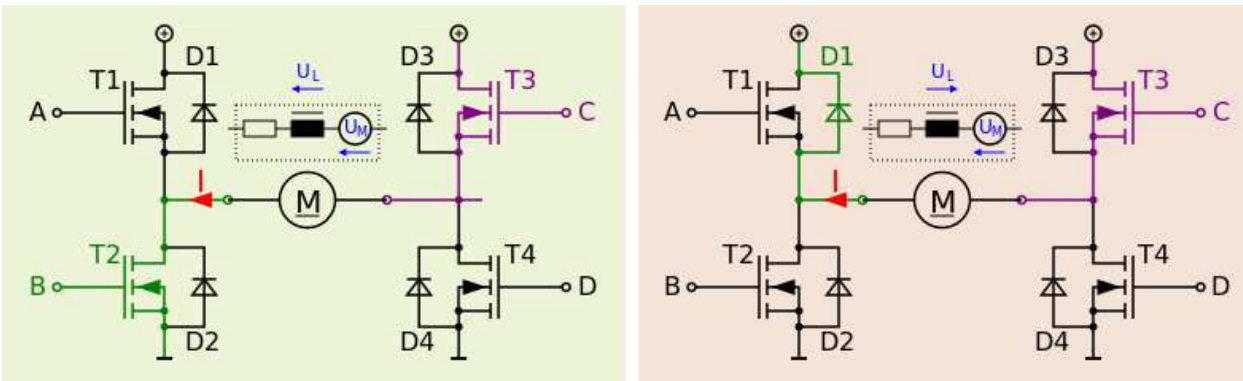


Abbildung 79: Betriebsquadrant III → Motor rückwärtslauf (PWM-Ansteuerung)

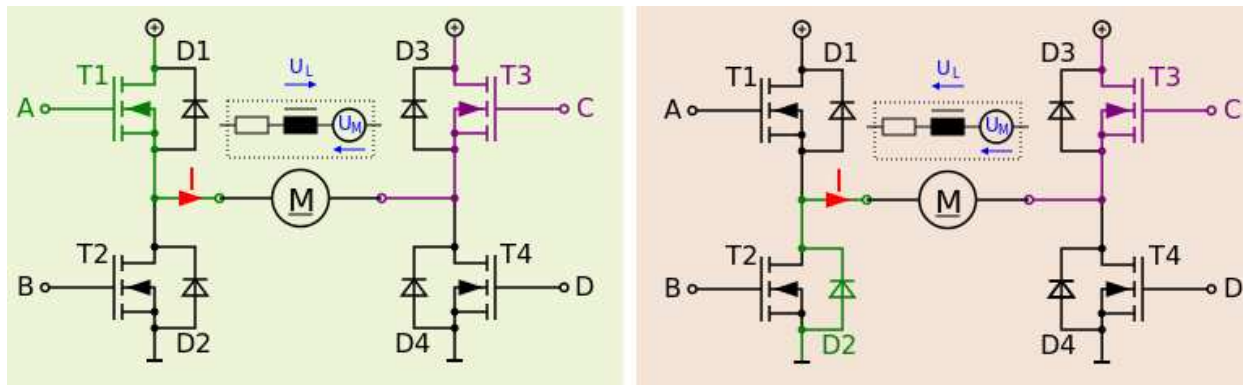


Abbildung 80: Betriebsquadrant IV → Generator rückwärtslauf (PWM-Ansteuerung)

### Stellglieder für Drehstromantriebe :

Für die **verlustarme Steuerung von Drehstromantrieben** benötigt man eine **Drehstromquelle mit veränderlicher Spannung und Frequenz**. Mit der Stromrichtertechnik besteht heute die Möglichkeit, diese Forderung durch statische **Frequenzumrichter** zu erfüllen. Dabei gibt es **zwei Grundtypen**:

- Den **Direktumrichter** und
- Den **Zwischenkreisumrichter**

## 1 - Aktoren und Steleinrichtungen

Auf den Direktumrichter soll hier nicht weiter eingegangen werden, da seine Bedeutung und Verbreitung im Vergleich zum Zwischenkreisumrichter nur gering ist.

### Zwischenkreis-Umrichter :

Alle Zwischenkreis-Umrichter arbeiten entsprechend Abb. 81 nach dem gleichen Grundprinzip. Ein externer Steuer- und Regelkreis (nicht dargestellt) steuert die übrigen Komponenten (Leistungskomponenten) so, dass die Ausgangsspannung und die variable Ausgangsfrequenz zusammenpassen.

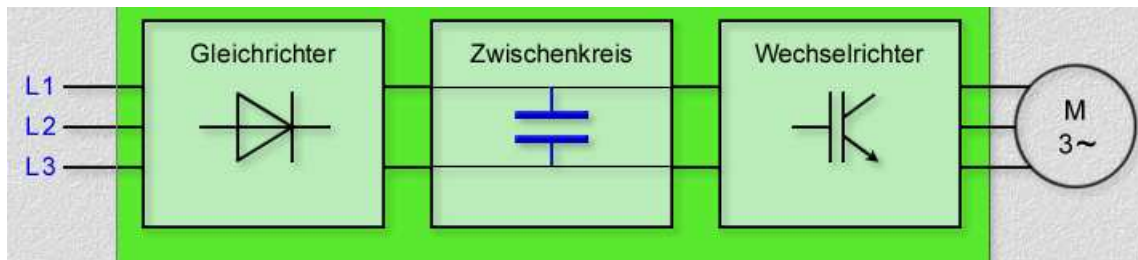


Abbildung 81: Grundprinzip Zwischenkreisumrichter

Dabei ist die **Art der primären Energiequelle** (in Abb. 81 ein Drehstromanschluss) zunächst völlig **unerheblich** - sie muss lediglich die benötigte Energie liefern. Durch den Zwischenkreis kann auch mit Einphasenwechselstrom oder Gleichspannung gearbeitet werden - lediglich der Gleichrichter ist eventuell entsprechend anzupassen. Zwischenkreisumrichter lassen sich wiederum in zwei Gruppen einteilen:

- **Stromzwischenkreis-Umrichter** und
- **Spannungszwischenkreis-Umrichter**

Der Stromzwischenkreis-Umrichter ist gekennzeichnet durch eine große Drosselspule im Zwischenkreis (Glättung der Zwischenkreis-Stroms) und soll hier nicht weiter behandelt werden. **Die häufiger verwendete Umrichtervariante ist der Spannungszwischenkreis-Umrichter mit Pulsweitenmodulation.**

Die Wechselrichter bestehen heute im unteren Leistungsbereich aus *MOSFETs* bei mittleren Leistungen aus *IGBTs* und bei hohen Leistungen aus *GTOs*. Für eine einphasige Last ergibt sich die bereits bekannte **Vierquadranten-H-Brückenkonfiguration**:

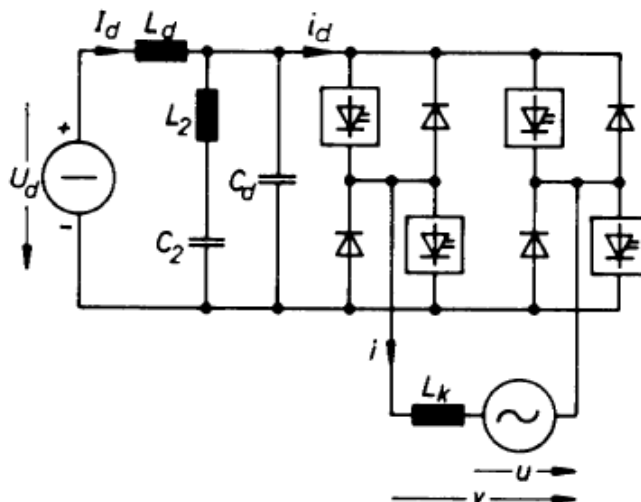


Abbildung 82: Einphasenwechselrichter

## 1 - Aktoren und Steleinrichtungen

Bei ohmscher Last führen nur die abschaltbaren Stromrichterventile den Strom. Tritt auf der Lastseite Blindleistung auf, so sind auch die Dioden (Rücklaufzweige) periodisch an der Stromführung beteiligt. Bei Umkehr der Energierichtung übernehmen die Dioden die Stromführung.

Die **Ausgangsspannung** soll aber nun eine **Wechselspannung** mit einer bestimmten Frequenz (typisch  $0 - 200\text{Hz}$ ) und Amplitude sein. Daher werden die **Stromrichterzweige in jeder Periode** der gewünschten Ausgangsspannung **mehrfach gezündet und gelöscht**. Dadurch entsteht am **Ausgang** ein **PWM-Rechtecksignal** (typisch  $4 - 16\text{kHz}$ ). Das **Tastverhältnis** wird im Rhythmus der gewünschten **Sinus-Frequenz moduliert**. Der Wechselrichter selbst kann aber nur drei Spannungszustände realisieren, nämlich  $+U_d$ ,  $0$  und  $-U_d$ . Es treten an der Maschine außer der Grundschiwingung natürlich noch Oberschwingungen auf. Durch die Tiefpasswirkung der Motorwicklung ist aber der **Maschinenstrom nahezu sinusförmig** !

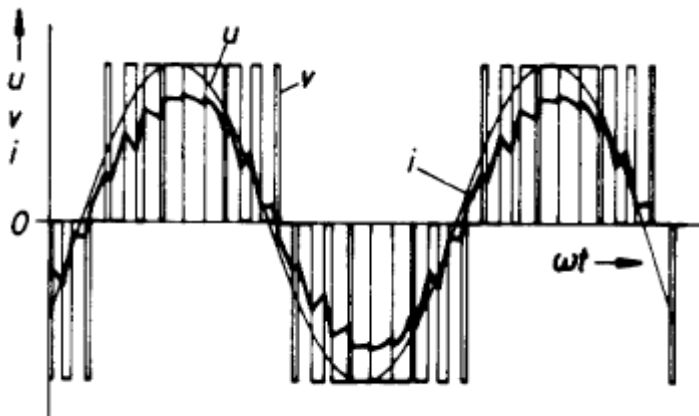


Abbildung 83: Spannungsverlauf Einphasenwechselrichter

Je höher die *PWM*-Frequenz gewählt wird, um so besser gleicht sich der Laststrom  $i$  der Grundschiwingung an und die Oberschwingungsverluste in der Last gehen zurück.

Für den **Drehstrombetrieb** verwendet man **drei Vollbrücken** mit  **$120^\circ$  versetzter Ansteuerung** (bezogen auf die gewünschte Ausgangsfrequenz).

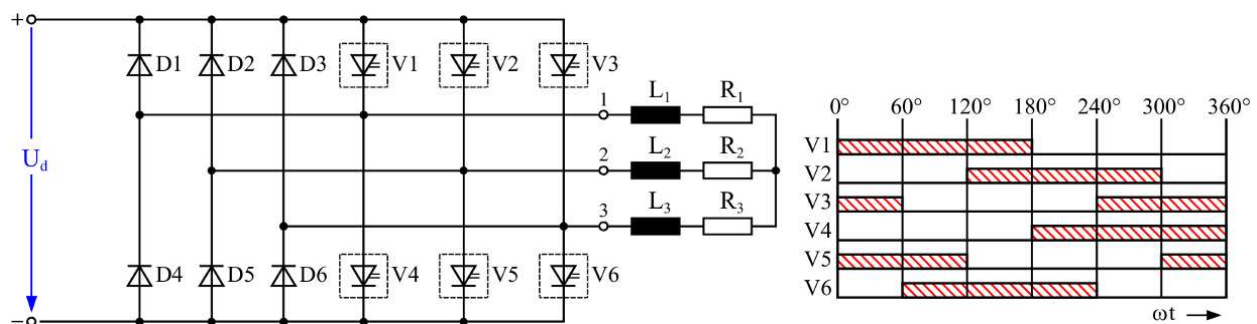


Abbildung 84: Drehstromwechselrichter (links) - Zündzyklus der Ventile V1 - V6 (rechts)

Der Zwischenkreis lässt sich außerdem als **Gleichspannungs-Sammelschiene** ausbilden, an die mehrere, voneinander unabhängige Wechselrichter angeschlossen sein können.

In der **Grundschiwingung** ist beim Frequenzumrichter **nur Motorbetrieb** möglich, wobei durch Vertauschen der Phasenfolge bei der Ansteuerung der abschaltbaren Stromrichterventile des Pulswechselrichters eine **Drehrichtungsumkehr** entsteht. Für den **Bremsbetrieb** wird meistens ein ohm-



## 1 - Aktoren und Stellanrichtungen

scher **Widerstand über einen Widerstandsschalter (Brems-Chopper)** im Zwischenkreis vorgesehen. Mit einigem **Zusatzaufwand** ist auch **Energierückspeisung ins Netz bei Bremsbetrieb** möglich. Hierzu sind zwei antiparallele netzgeführte Stromrichter erforderlich (ggf. mit Anpasstransformator).

**Sinusgeführte PWM-Steuerung:** Dem Verfahren liegt eine **Referenzsinuskurve** mit der Frequenz  $f_2$  zugrunde aus der die Lastspannung abgeleitet wird. Durch **Vergleich einer höherfrequenten Dreiecksspannung** mit dieser Referenzsinuskurve durch einen **Komparator ("Modulation")** ergibt sich eine pulsbreitenmodulierte Rechteckspannung, die zur Ansteuerung der Brücke genutzt werden kann. Der Mittelwert dieser Spannung entspricht der Sinusform.

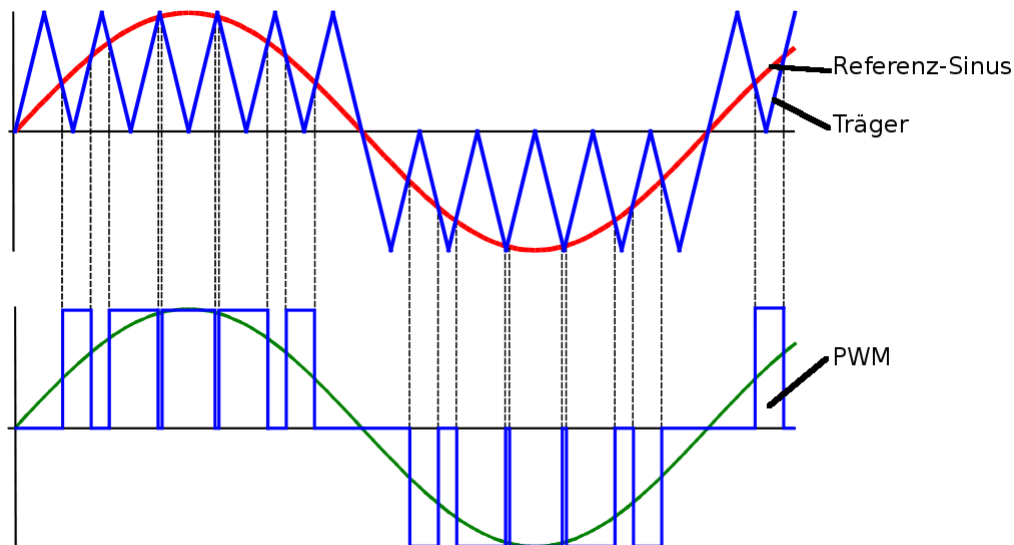


Abbildung 85: Sinus-kommutierte PWM

Die sinusgeführte PWM stellt ein **"open-loop"-Verfahren** dar, d.h. die Lastspannung wird unabhängig vom Laststrom generiert, damit ist das **Prinzip nicht kurzschlussfest**. Der Referenzsinus und die Dreiecksspannung werden vom steuernden System ( $\mu C$ ) so gewählt, dass sie in einem **festen Frequenzverhältnis** stehen. Daraus resultieren **definierte Oberschwingungsverhältnisse** (Frequenzanteile des Rechtecksignals in der Lastspannung). Da die Last (nur Wechselstrommotoren sind geeignet) ohmsch-induktives Verhalten hat, zeigt der Laststromverlauf sinusförmiges Verhalten mit einer dreieckförmigen Überlagerung. Das sinusbewertete Pulsmuster wird bei Steuerungen in Analogtechnik kontinuierlich erzeugt; bei digital arbeitenden Umformertechnologien wird jedoch häufig auf in Datenspeichern abgelegte Muster zurückgegriffen, was den Zeitbedarf reduziert.

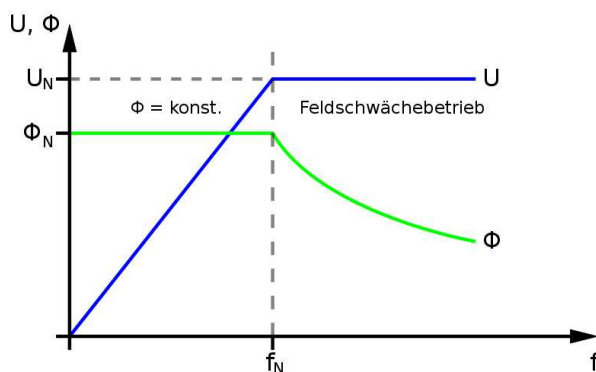


Abbildung 86: U/f-Steuerung

## 1 - Aktoren und Steleinrichtungen

Prinzipiell sind **Amplitude und Frequenz der Motorspannung unabhängig voneinander wählbar**. In industriellen Frequenzumrichtern wird jedoch ab der **Nennbetriebspunkt = 50Hz** des Motors auf die **maximale Amplitude** angesteuert. **Unterhalb von 50Hz wird die Amplitude prinzipiell mit der Frequenz linear reduziert**. Dies ist durch das induktive Verhalten des Motors unter Konstanthaltung des Drehmoments erklärbar. Da der Strom im Motor für die Entstehung des Drehmoments verantwortlich ist und dieses konstant gehalten werden soll, muss bei Frequenzreduktion wegen

$$I = \frac{U}{\omega \cdot L} \quad (20)$$

auch die Spannung reduziert werden.

**Hysteresebandmethode** : Wird der **Laststrom als Referenzkurve** vorgegeben und der Istwert durch Ein- und Ausschalten in einem **Toleranzband** gehalten, so spricht man von der Hystereseband-, Toleranzband- oder der **Zweipunktreglermethode**. Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass der Laststrom immer innerhalb gewünschter Grenzen liegt und **kein zu hoher Kurzschlussstrom** auftreten kann ("**closed loop**"-Prinzip). Nachteilig ist, dass die Oberschwingungsverhältnisse undefiniert sind.

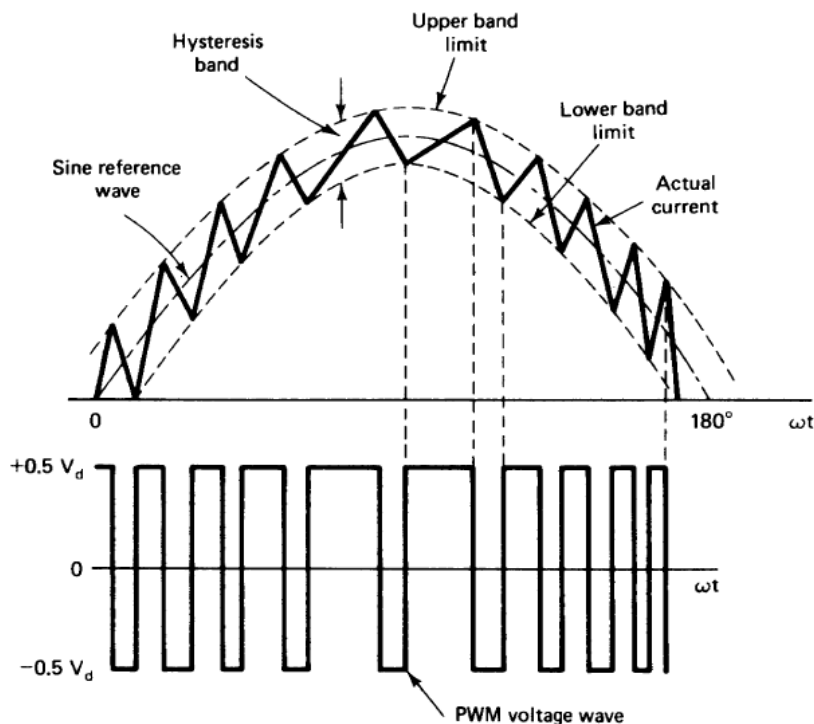


Abbildung 87: Hysteresebandmethode

*PWM*-Frequenzumrichter haben folgende **Vorteile**:

- Gleichmäßiger Motorenlauf bei niedrigen Drehzahlen
- Brems-Chopper möglich
- Gut geeignet für den Parallelbetrieb von Motoren
- Guter Systemwirkungsgrad
- Teilweise kurzschlussicher

## 1 - Aktoren und Stellanrichtungen

**Nachteilig** sind eventuell auftretende Motorgeräusche (verursacht durch die Spannungskurvenform) sowie *EMV*-Probleme, die insbesondere bei unsachgemäßer Verdrahtung die zulässigen Grenzwerte massiv überschreiten können.

### EMV-Problematik:

Frequenzumrichter arbeiten mit **steilen Schaltflanken**, um die Verlustleistung zu minimieren und einen hohen Wirkungsgrad zu erzielen. Bei **IGBT-Frequenzumrichtern für 400V Netzbetrieb** (560V Zwischenkreisspannung) **schalten die IGBTs innerhalb von rund 200ns um**. Das führt zu einer **Spannungssteilheit an den Motorleitungen von circa 3kV/μs**. Deshalb sind die **Motorleitungen stets geschirmt** und möglichst **kapazitätsarm** auszuführen. Wenn eine Motorleitung ungeeignet angeschlossen ist, z. B. Anschluss eines möglichen Leitungsschirms als verdrehtes Leitungsende ("Pigtail") oder gar keine Auflage der Abschirmung, dann können über das Motorkabel (wirkt dann als Antenne) erhebliche Leistungen in Form von **Störstrahlung** emittiert werden. Ein geeigneter Anschluss der Motorleitung (z. B.: die **großflächige Auflage der Leitungsabschirmung**) ist essenziell für ein gutes *EMV*-Verhalten des Frequenzumrichters. Günstiges *EMV*-Verhalten ist durch eine geeignete **Filterung im Umrichter** zu erreichen, indem der Filter auf kurzem Weg dem Störstrom einen Pfad zum Zwischenkreis bietet, **vorzugsweise in der Nähe der Störquellen**, den IGBTs. Dabei ist darauf zu achten, dass die Filterelemente nicht zu einer zu starken **Verschleifung der Schaltflanken** führen, da langsame Schaltzeiten schnell zur **Überhitzung** der Schaltelemente führen können.

**Netzurückwirkungen** treten insbesondere dann auf, wenn der Zwischenkreis aus einem **ungesteuerten Gleichrichter** versorgt wird. Das führt zu **impulsartigen Ladeströmen** (geringer Stromflusswinkel), die das Netz stark belasten. Durch **Vorschalten von Netzdrosseln** lassen sich die Netzurückwirkungen mildern. Der Anschluss von Frequenzumrichtern direkt an das Netz führt zu einer starken Belastung von Netz und Zwischenkreis durch einen erhöhten Effektivstrom und reduziert unter Umständen die Lebensdauer des Frequenzumrichters. Eine weitere Variante ist die **Vorschaltung einer aktiven PFC<sup>12</sup>-Stufe** zur Ladung des Zwischenkreiskondensators, die auch **rückspeisefähig** sein kann. Das erlaubt einen fast netzurückwirkungsfreien Betrieb ohne Drehmoment-Schwankungen.

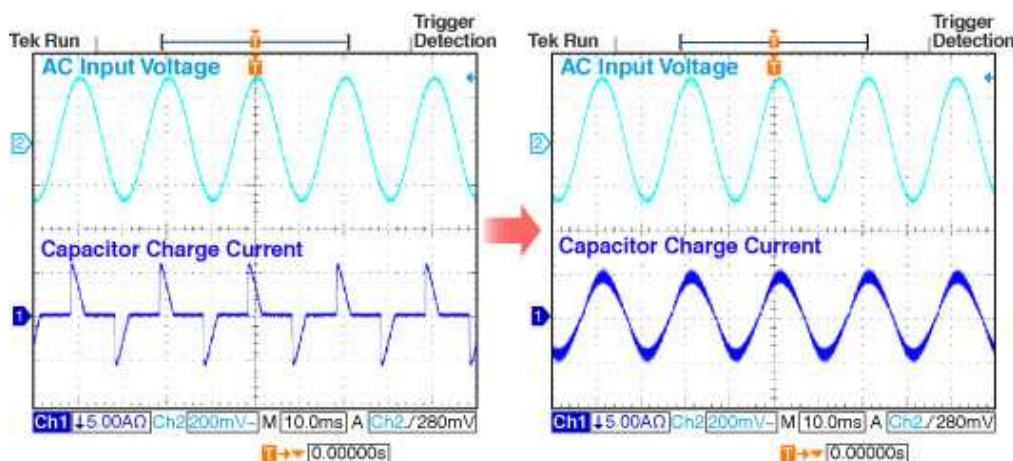


Abbildung 88: Strom aus dem Netz mit (rechts) und ohne (links) PFC