

### 3. Gleichstrommaschine

#### Geschichtliche Entwicklung

Auf Grund der geschichtlichen Entwicklung der Starkstromtechnik, die mit der Energie von galvanischen Elementen ihren Anfang nahm, entstand als erster elektromechanischer Energiewandler die Gleichstrommaschine. Bereits **1832** baute der Franzose Hippolyte Pixii den ersten Generator für zweiwelligen Gleichstrom. Die weitere Entwicklung ist u. a. mit den Namen Antonio Pacinotti, der **1860** einen Motor mit Ringwicklung und vielteiligem Stromwender fertigte, und Friedrich von Hefner-Altenneck, der **1872** den Trommelanker erfand, verknüpft. Einen wesentlichen Beitrag leistete im Jahre **1866** Werner von Siemens mit der Entdeckung des dynamoelektrischen Prinzips. Durch die damit gegebene Möglichkeit der Selbsterregung von Generatoren war eine Voraussetzung für den Großmaschinenbau geschaffen.



Historische Gleichstrommaschine von Zénobe Gramme (um 1880)

Mit der Einführung des Drehstroms etwa ab **1890** verlor die Gleichstrommaschine ihre beherrschende Stellung an die Synchronmaschinen und Asynchronmaschinen. Begünstigt durch ihre sehr gute Regelbarkeit, mit galvanisch und magnetisch getrennten Kreisen für Ankerwicklung und Erregerwicklung, sowie den einfachen Aufbau gesteuerter Stromrichter (Gleichrichter) mit hoher Regelgenauigkeit und hoher Antriebsdynamik hat die Gleichstrommaschine bislang einen begrenzten Marktanteil behauptet.



Neuzeitlicher Gleichstrommotor

#### Leistungsbereich

Der Fertigungsbereich reicht von Kleinstmotoren mit Leistungen von unter einem Watt für die Feinwerktechnik bis zu den Großmaschinen. Dauermagneterregte Motoren bis ca. 100 W werden in großer Stückzahl in der Kfz-Elektrik als Scheibenwischer-, Gebläse- und Stellmotoren eingesetzt. Im Bereich der Servoantriebe bis zu Leistungen von einigen kW gibt es auch eine Reihe spezieller Bauformen wie Scheibenläufer- und Glockenankermotoren. Auf dem Gebiet der Industrieantriebe sind vor allem der Einsatz in Werkzeugmaschinen, Förderanlagen, Walzstraßen und als Fahrmotor in Nahverkehrsbahnen zu erwähnen. Im Kleinstleistungsbereich, wie beispielsweise bei Modellbahnen, ist vor allem der permanent erregte Gleichstrommotor des einfachen Aufbaues wegen üblich. In ihrer Hochzeit bis in die 70er Jahre wurden Motoren mit Leistungen von über 10 MW gebaut.

Der Gleichstromgenerator hat dagegen seit der Erfindung der gesteuerten Stromrichter keine Bedeutung mehr.

### 3.1 Aufbau und prinzipielle Wirkungsweise

Eine elektrische Maschine besteht allgemein aus:

**Stator** (Ständer)    feststehender Teil

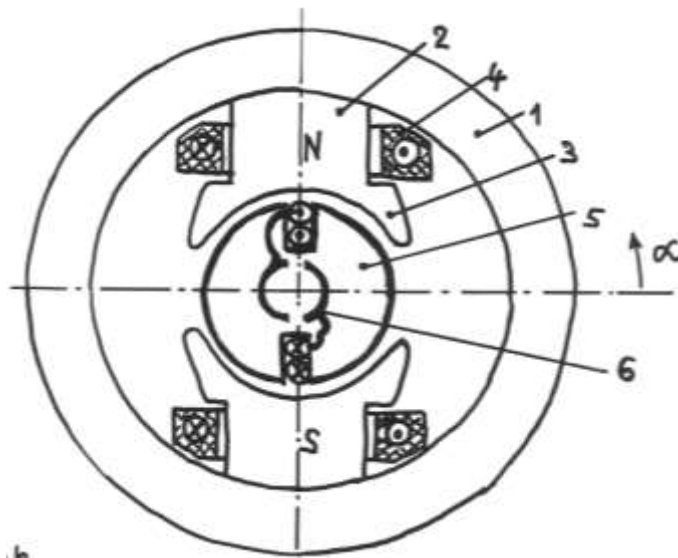
**Rotor** (Läufer)    bewegter Teil

Als Anker wird der induzierte Teil der Maschine bezeichnet; dies ist meist der Rotor. Der Aufbau der Maschine geht aus der vereinfachten Darstellung gemäß Bild 3.1 hervor.



Schnittmodell eines Gleichstrommotors

**Bild 3.1:** Der Aufbau der Maschine



- |   |                         |
|---|-------------------------|
| 1 | Joch                    |
| 2 | Polkern                 |
| 3 | Polschuh                |
| 4 | Feldwicklung            |
| 5 | Anker                   |
| 6 | Lamelle des Kommutators |

Der **Stator** besteht aus einem Joch und den Hauptpolen. Der Hauptpol aus Polkern und Polschuhen. An den Hauptpolen ist die Erregerwicklung befestigt.

Bei **großen Maschinen** ist der Jochring massiv, die Hauptpole bestehen aus aufeinander geschichteten Dynamoblechen, die voneinander meist isoliert sind (Reduzierung von Wirbelstromverluste). Die Hauptpole werden am massiven Jochring angeschraubt.

Bei **kleinen Maschinen** werden Pole und Joch gemeinsam (aus einem Stück) hergestellt. Sie bestehen aus gestanztem, isolierten Dynamoblech gemäß DIN 46400.

Der **Rotor** entspricht dem **Anker**, ist also der induzierte Teil. Er wird aus isoliertem Dynamoblech hergestellt. In den Ankernuten sind die Ankerwicklungen isoliert eingebettet.

Der **Kommutator** (mechanischer Stromwender) besteht aus voneinander isolierten Hartkupfersegmenten, den Lamellen. Im Bild 3.1 sind 2 Lamellen symbolisch dargestellt. Die Lamellen sind mit den Ankerwicklungen verbunden und sind voneinander isoliert. Die Lamellen bilden einen Ringkörper, der mit dem Rotor fest verbunden ist und mit dessen Drehzahl umläuft.



Rotor (Anker) mit Kommutator

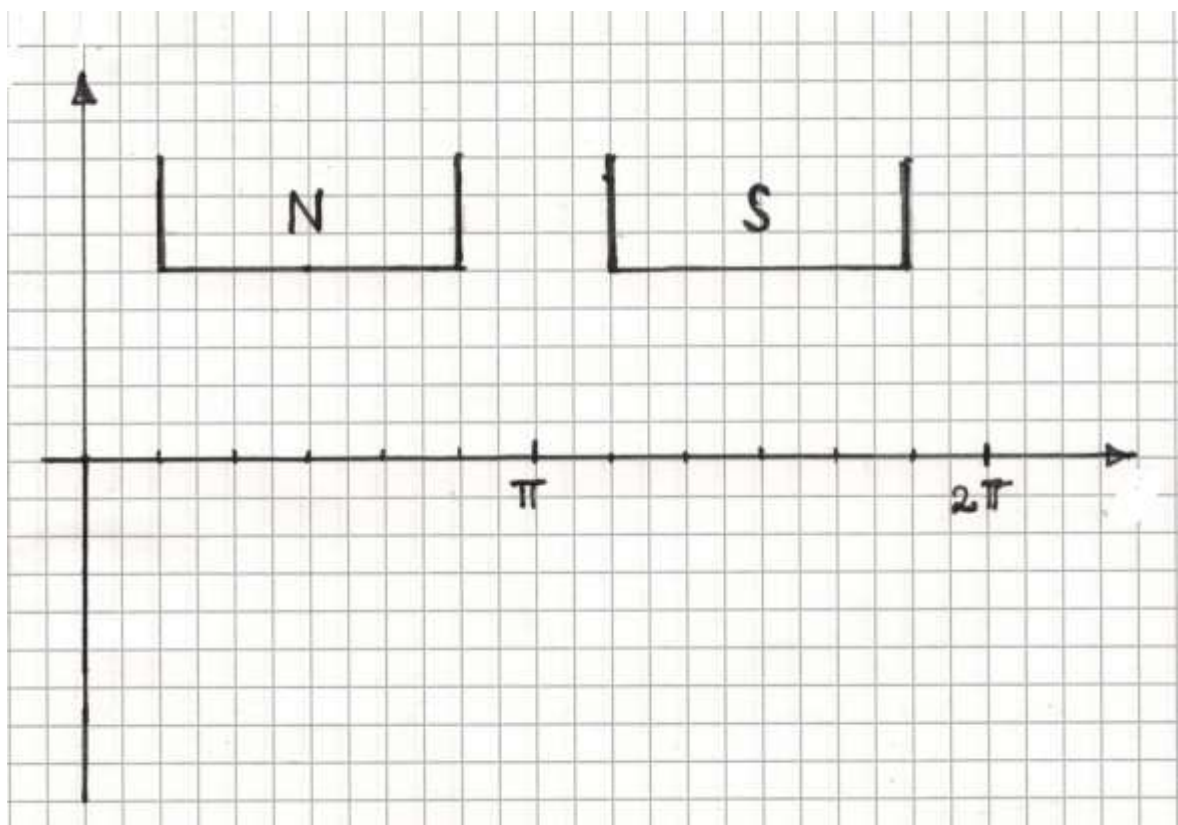
## Die Luftspaltinduktion

An die Feldwicklung wird eine Gleichspannung angelegt, die einen Gleichstrom, den **Erregerstrom** zur Folge hat. Es entstehen magnetische Feldlinien, die sich über Jochring, Pole und Anker schließen.

Die magnetischen Feldlinien im Luftspalt verlaufen in radialer Richtung, d.h. die Feldlinien stehen wegen der konstruktiven Ausführung des Polschuhs über dem größten Teil des Umfangs senkrecht zur Ankeroberfläche und damit senkrecht auf der Ankerwicklung. Der Grund hierfür liegt darin, dass die magnetische Leitfähigkeit des Eisens sehr viel größer ist als die magnetische Leitfähigkeit der Luft. Deshalb verlassen die Feldlinien die Polschuhe in senkrechter Richtung und treffen senkrecht auf den Anker auf.

Stellt man sich den Anker in linearer Richtung abgewickelt vor, so lässt sich die Luftspaltinduktion einer zweipoligen Maschine wie folgt darstellen:

**Bild 3.2:** Die Luftspaltinduktion in abgewickelter, linearer Darstellung



Bedingt durch die konstruktive Ausführung des Polschuhs ist die Luftspaltinduktion über einem großen Teil des Polbogens nahezu konstant.

Bei  $\alpha = 0$  und  $\alpha = \pi$  wechselt die Polarität des Feldes, d. h. im oberen Polschuh (Nordpol) treten Feldlinien in den Anker ein, im unteren Polschuh treten Feldlinien aus dem Anker aus (Südpol).

## Die induzierte Ankerspannung im Generatorbetrieb

An der Welle der Gleichstrommaschine soll ein äußeres Drehmoment (z. B. eine Turbine) angreifen und den Rotor nach links bewegen.

Die Erregerwicklung liegt an einer Gleichspannung, man spricht dann von einer **fremderregten Gleichstrommaschine**. Es ergibt sich dann eine Luftspaltinduktion gemäß der vorherigen Betrachtung.

### Schritt 1: Bewegter Leiter im Magnetfeld

Da sich die Ankerwicklung im zeitlich konstanten Magnetfeld bewegt und zwischen der Bewegungsrichtung  $v$ , der räumlichen Anordnung der Wicklungen und der magnetischen Induktion  $B_L$  rechtwinklige Verhältnisse vorliegen, gilt für die Spannung zwischen den dargestellten Lamellen

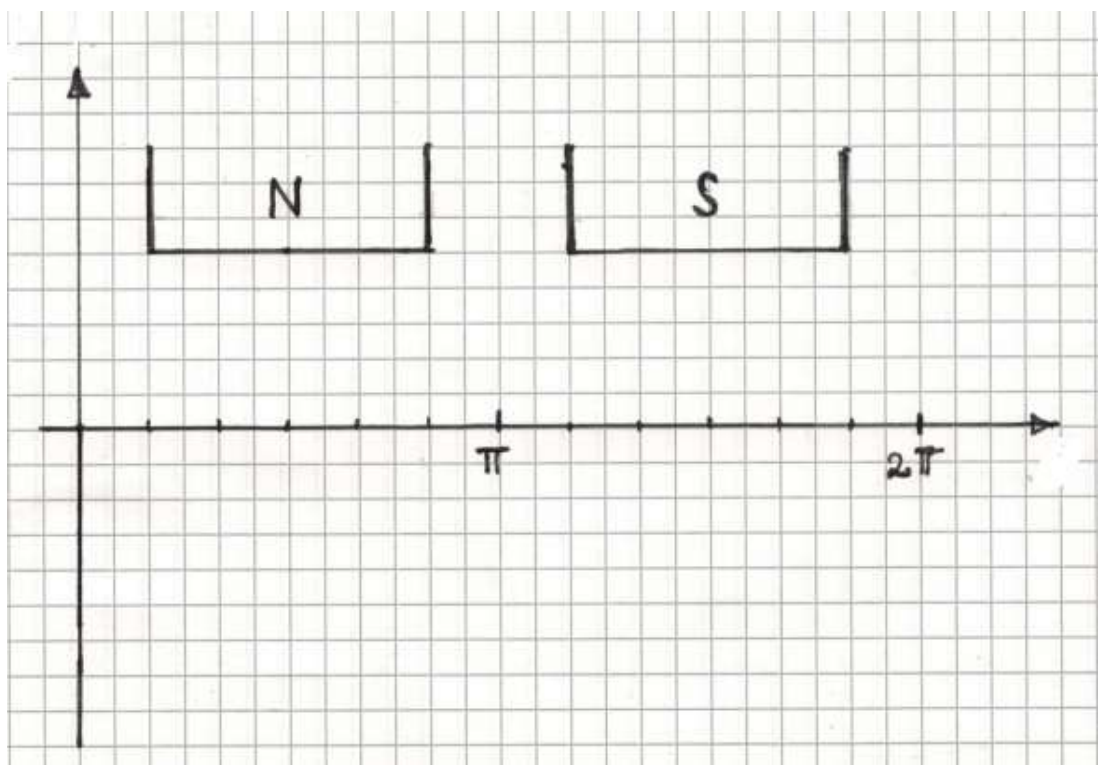


**$e$**  induzierte Spannung der Rotation,  **$e$**  ist eine ältere Bezeichnung, abgeleitet von der **EMK**. Diese Bezeichnung soll aus didaktischen Gründen verwendet werden.

Der Faktor 4 ergibt sich aus der Windungszahl  $N = 2$  der Ankerspule und der Länge **2** / einer Windung.

Die Darstellung der Spannung für eine Leiterschleife zeigt, dass es sich bei der induzierten Spannung um eine Wechselspannung handeln muss, da die Luftspaltinduktion  $B_L$  ebenfalls eine Wechselgröße ist und  **$e_L$**  bei rechtwinkligen Verhältnissen und bei  **$v = \text{konst.}$**  mit  **$B_L$**  proportional zusammenhängt.

**Bild 3.3:** Gleichrichtung der Spulenspannung durch Kommutierungseinrichtung



Bei Belastung der Lamellenspannung mit einem ohmschen Widerstand würde sich also die Stromrichtung ebenfalls ändern, je nachdem unter welchem Pol sich der Leiter bewegt.

Bei der Gleichstrommaschine werden Wechselspannung und Wechselstrom in Gleichgrößen umgeformt. Hierfür wird eine sogenannte Kommutierungseinrichtung benötigt. Mit dieser Kommutierungseinrichtung erreicht man eine Art „mechanische“ Umformung einer Wechselspannung in eine Gleichspannung oder umgekehrt.

**Die Kommutierungseinrichtung** besteht aus einem umlaufenden Kommutator und zwei ruhenden Bürsten, die zunächst im Beispiel willkürlich in der Polmitte dargestellt sind. Die Bürsten liegen schleifend auf den Lamellen. Als Auswirkung der Kommutierungseinrichtung ergibt sich die gleichgerichtete induzierte Ankerspannung  $e_A$ .

Erläuterung der Spannungsinduktion anhand der **UVW-Regel**.

## Schritt 2: Rückwirkung des stromdurchflossenen Leiters im Magnetfeld

Wird die Spannung  $e_A$  belastet (durch äußeren Widerstand) liegt ein stromdurchflossener Leiter im Magnetfeld vor. Wie schon besprochen ergibt sich hieraus eine elektrodynamische Kraft. Bei orthogonalen Verhältnissen des Beispiels:



Nach der UVW-Regel wirkt diese Kraft beim oberen Leiter nach rechts. Die Maschine erzeugt dadurch im Uhrzeigersinn ein **inneres Drehmoment  $M_M$** , das dem angelegten **Lastmoment  $M_L$**  der Turbine entgegenwirkt.

Bei Betrieb mit einem stationärem Arbeitspunkt muss gelten  **$M_M = M_L$**  damit sich  $n = \text{konst.}$  einstellt. Wird dem Generator mehr Strom entnommen wird  **$M_M$**  größer, d. h. auch das Lastmoment  **$M_L$**  muss über die Turbine erhöht werden, damit  $n = \text{konst.}$  bleiben kann.

## Die Drehmomentenbildung bei Motorbetrieb

Bei Motorbetrieb soll wie im Bild 3.1 dargestellt eine **Gleichspannung**  $u_A$  angelegt werden. Die Stromrichtung durch die Leiter bleibt hierbei unverändert. Der Gleichstrom des Eingangs wird über die Kommutierungseinrichtung in Wechselstrom der Wicklungen gewandelt. In den Wicklungen rotierender Maschinen können prinzipiell nur Wechselgrößen vorhanden sein.

### **Schritt 1: Stromdurchflossener Leiter im Magnetfeld**

Wie bekannt erzeugt ein stromdurchflossener Leiter im Magnetfeld eine elektrodynamische Kraft, im Beispiel:

$$F = B i (4 l)$$

Der Motor erzeugt ein inneres Drehmoment und dreht den Anker im Uhrzeigersinn, d.h. die Welle des Motors ist rechtsdrehend.

Da das Motormoment  $M_M$  und die Drehzahl gleiche Richtung aufweisen sprechen wir von

**motorischem Betrieb der Maschine**

### **Schritt 2: Rückwirkung des bewegten Leiters im Magnetfeld**

Es ergibt sich natürlich wieder die Rückwirkung eines bewegten Leiters im Magnetfeld, der, wie schon behandelt, eine Spannung  $e_A$  induziert. Bei orthogonalen Verhältnissen erhalten wir für die Spannung

$$e_A = B (4 l) v$$

Die Richtung der induzierten Spannung erhalten wir wieder durch Anwendung der UVM-Regel und sehen, dass die induzierte Spannung  $e_A$  der angelegten Spannung  $u_A$  entgegenwirkt. Bei Berücksichtigung von Verlusten durch einen Ankerwiderstand  $R_A$  kann man folgendes Ersatzschaltbild erhalten:



## Die Ausführung der Ankerwicklung

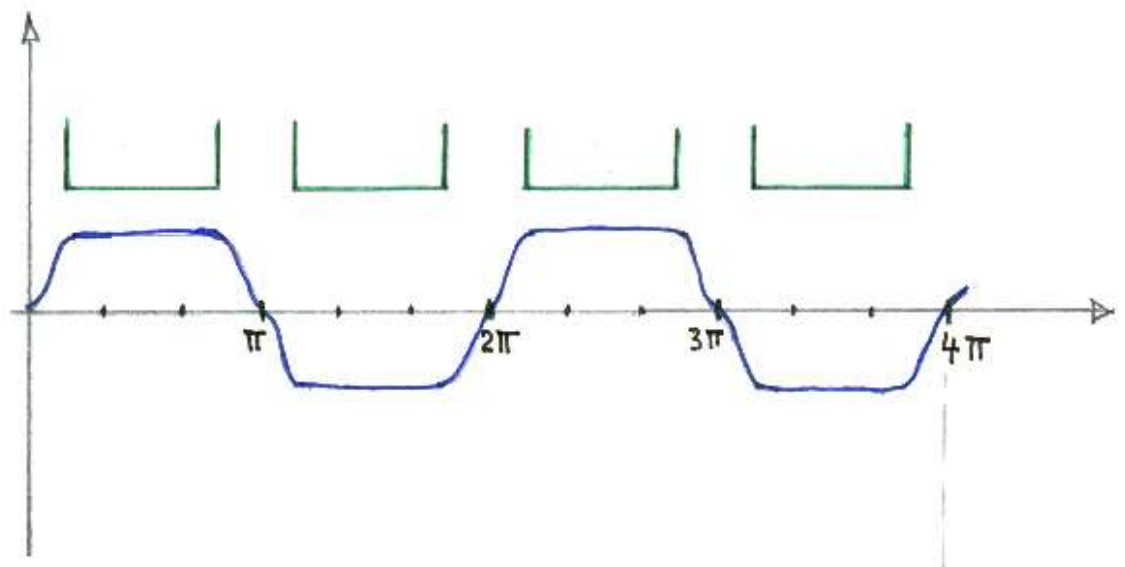
Im Gegensatz zu Bild 3.1 besteht die Ankerwicklung nicht nur aus 1 Leiterschleife, sondern es sind viele Ankerleiter gleichmäßig am Umfang des Ankers in Ankernuten eingebracht. Damit wird eine bessere Ausnutzung der Maschine erreicht.

**Im Bild 3.5 oben** ist eine zweipolige Maschine mit der Polpaarzahl  $p = 1$  dargestellt. Unter dem „Nordpol“ und unter dem „Südpol“ ist jeweils die gleiche Stromrichtung vorhanden. Beim Übergang vom „Nordpol“ zum „Südpol“ wird die Stromrichtung in den Ankerleitern durch eine Kommutierungseinrichtung mit 2 Bürsten geändert. Die Räumliche Polteilung beträgt  $180^\circ$ . Gemäß Bild 3.2 entspricht diesem „räumlichen“ Winkel ein „elektrischer“ Winkel von ebenfalls  $180^\circ$ . Bei  $p = 1$  gilt demnach:

$$\alpha_{el} = \alpha_r$$

**Im Bild 3.5 unten** ist eine vierpolige Maschine mit der Polpaarzahl  $p = 2$  dargestellt. Am Umfang des Ankers wechseln sich „Nord- und Südpol“ doppelt so oft, also viermal ab. Zum Gleichrichten benötigt die Kommutierungseinrichtung nun 4 Bürsten.

**Bild 3.4:** Die Luftspaltinduktion der 4-poligen Maschine in abgewickelter Darstellung

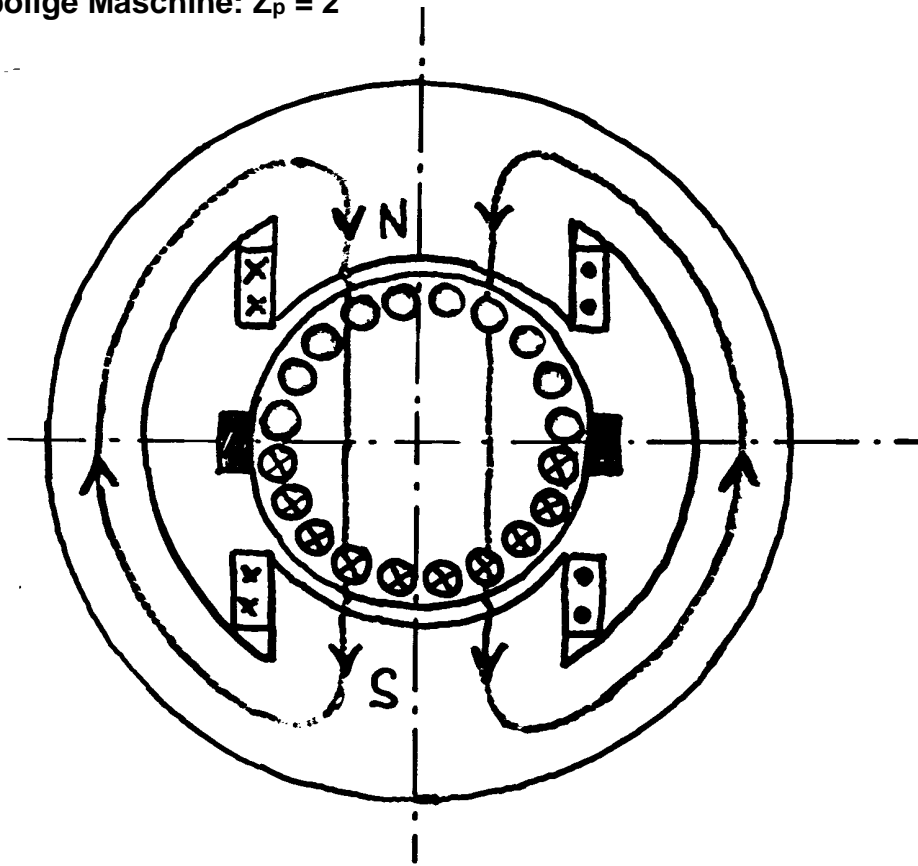


Zwischen dem elektrischen Winkel der Luftspaltinduktion und dem räumlichen Winkel des Ankerumfangs gilt in allgemeiner Form:

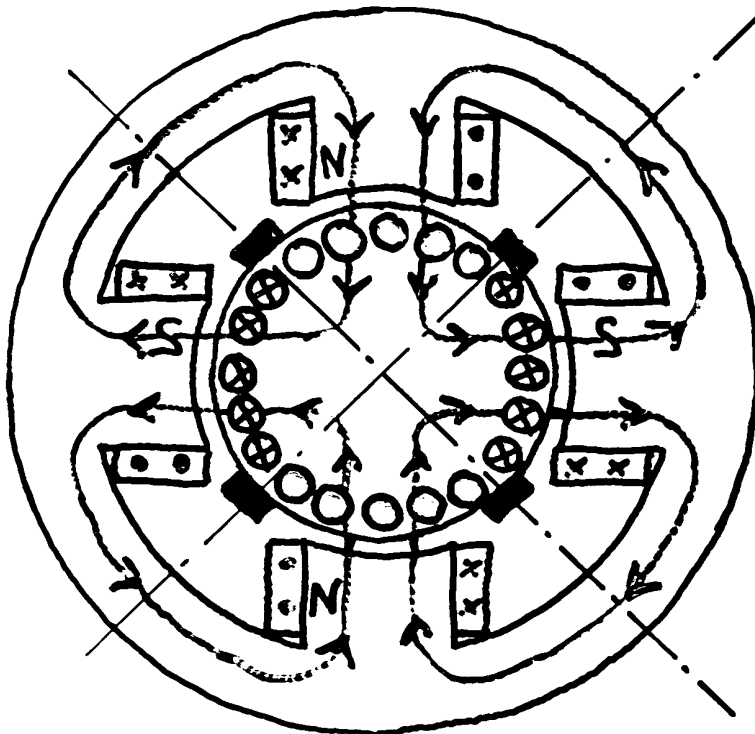
$$\alpha_{el} = p \cdot \alpha_r$$

Bild 3.5: Ausführung der Ankerwicklung

Zweipolige Maschine:  $Z_p = 2$



Vierpolige Maschine:  $Z_p = 4$





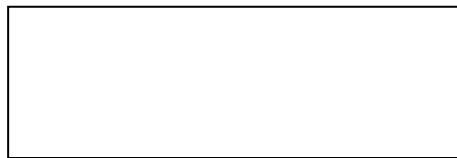
## Schleifenwicklung

Wie im Bild 3.6 dargestellt führt an jede Kommutatorlamelle der Anfang einer Spule und das Ende einer anderen Spule. Zwischen 2 benachbarten Lamellen befindet sich eine Spule.

- k:** Spulenzahl = Lamellenzahl
- N:** Windungszahl einer Spule
- $N_G$ :** Gesamtwindungszahl des Ankers  $N_G = k N$
- p:** Polpaarzahl
- $Z_p$ :** Polzahl

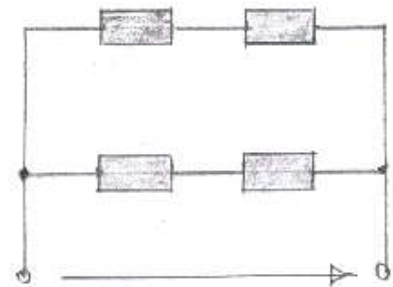
Bei der Zweischichtwicklung liegen in einer Ankernut 2 Spulenseiten von 2 verschiedenen Spulen. Im Beispiel alle linken Spulenseiten in der Oberschicht, alle rechten Spulenseiten in der Unterschicht.

Für die induzierte Spannung zwischen den Bürsten ergibt sich:

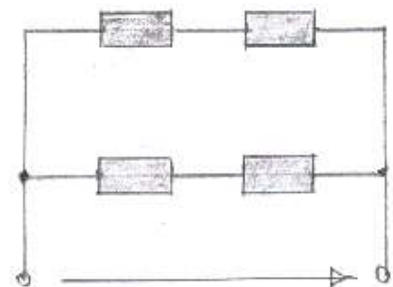


Die induzierte Spannung zwischen den Bürsten ergibt sich aus der Addition der einzelnen Spulenspannungen. Zwischen 2 Bürsten befinden sich bei  $p = 1$ , d.h. bei  $Z_p = 2$  zwei parallele Zweige.

Ersatzschaltbild bei Generatorbetrieb  
mit  $p = 1$ ,  $Z_p = 2$ :



Ersatzschaltbild bei Motorbetrieb  
mit  $p = 1$ ,  $Z_p = 2$ :



Ersatzschaltbild für vierpolige Maschinen  
mit  $p = 2$ ,  $Z_p = 4$ :

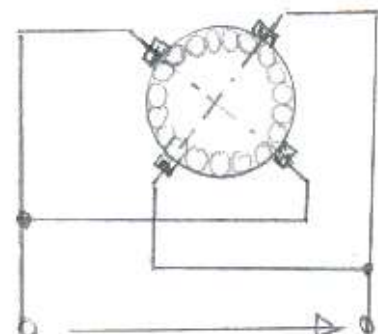
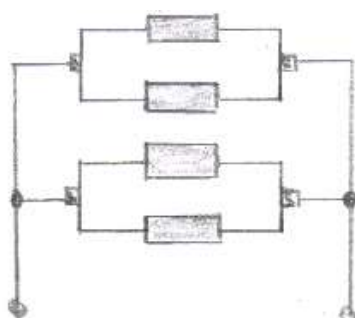
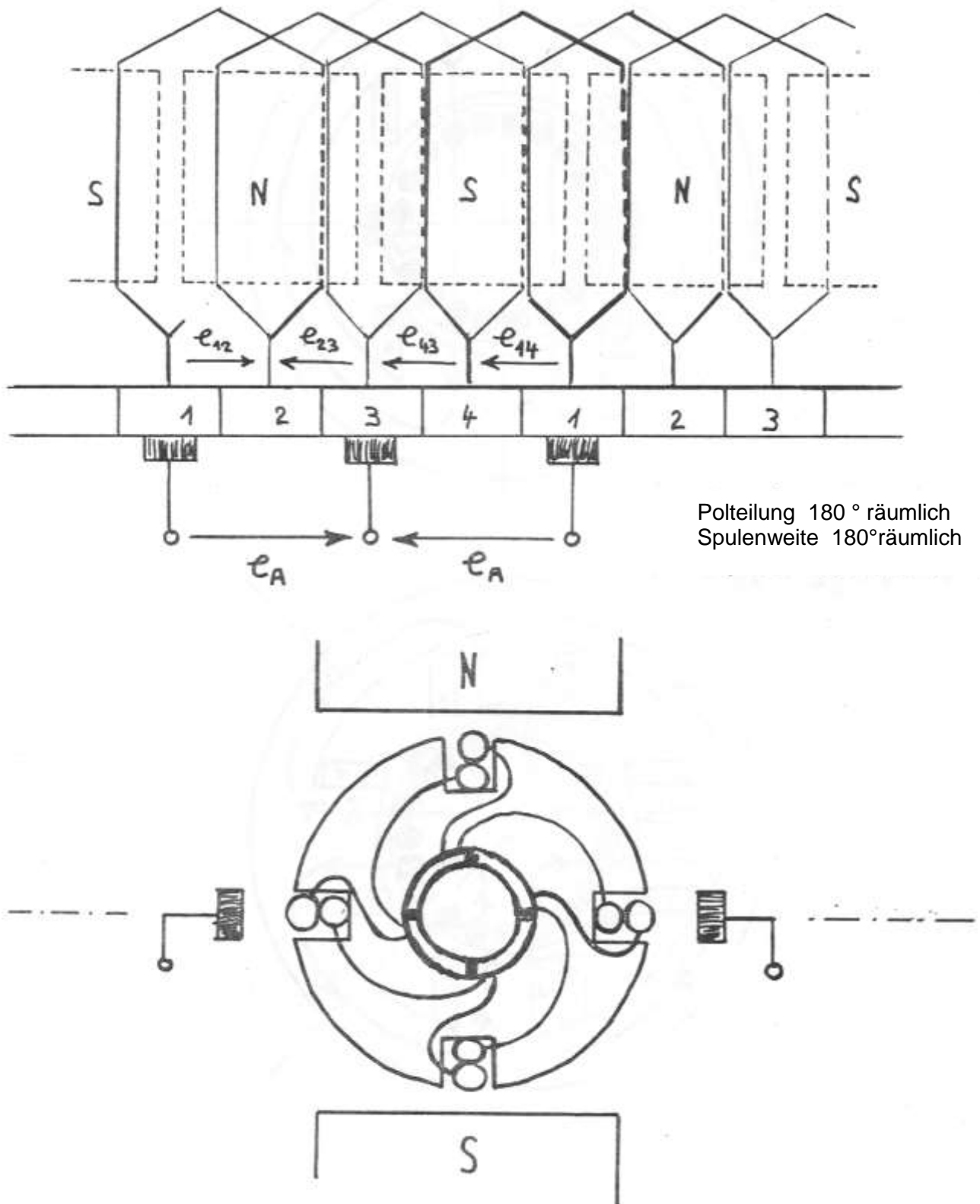
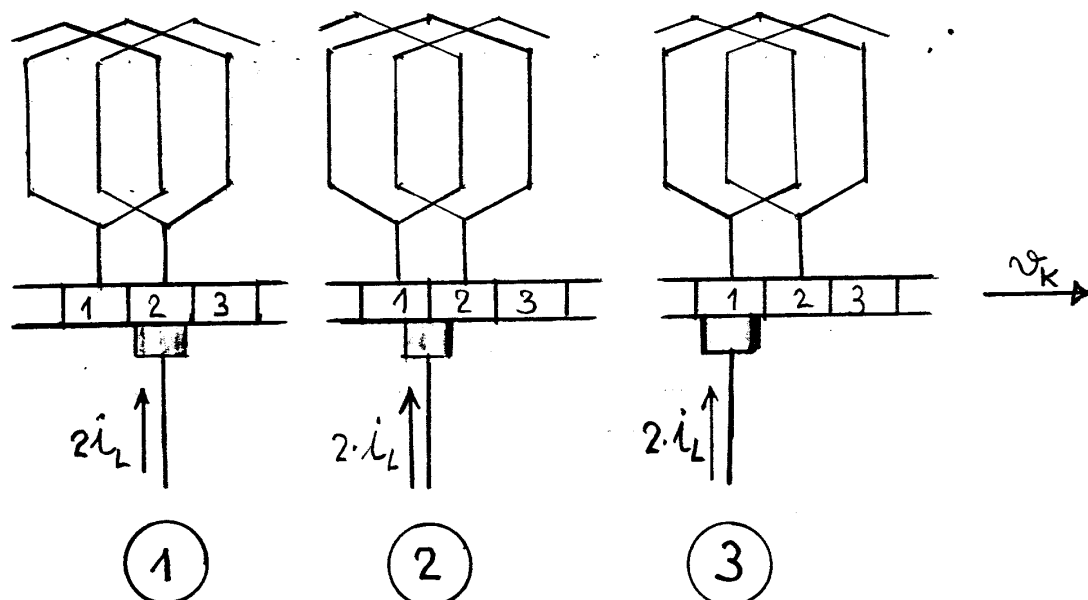


Bild 3.6: Beispiel Schleifenwicklung mit  $k=4$ ,  $p=1$ ,  $z_p=2$ ,  $N=1$



## Vereinfachte Betrachtung des Kommutierungsvorganges

Die Bürsten sind fest mit dem Stator verbunden und befinden sich in der geometrisch neutralen Zone. Die Lamellen bewegen sich mit der Geschwindigkeit  $\mathbf{V_K}$  nach rechts. Zwischen 2 Lamellen befindet sich eine Spule.



- zu 1** Die Bürste liegt voll auf **Lamelle 2**. Der zufließende Strom beträgt  $2 \cdot i_L$ . Am Knotenpunkt der 1. Spule (blau dargestellt) und 2. Spule (rot dargestellt) teilt sich der Strom im **2 parallele Zweige** auf.
- zu 2** Die Lamellen haben sich nach rechts fortbewegt. Die feststehende Bürste schließt über die Lamellen 1 und 2 die 1. Spule (blaue Spule) kurz. In der Spule fließt ein **Kurzschlussstrom**  $i_K$ . Die 2. Spule (rote Spule) und 3. Spule (grüne Spule) behalten den Stromfluss  $i_L$  bei, da dieser vom gesamten Lastkreis her eingepreßt sein soll. Während Lamelle 1 und 2 von der Bürste überdeckt werden, ist die 1. Spule (blaue Spule) **kurzgeschlossen**. In dieser Zeit muss sich der Strom in der 1. Spule (blaue Spule) von  $+ i_L$  nach  $- i_L$  wenden. Man spricht von **Stromwendung**.
- zu 3** Die Bürste liegt nun voll auf **Lamelle 1**. Die Stromwendung in der 1. Spule (blauen Spule) ist vollzogen. Im Knotenpunkt der 1. Spule (blaue Spule) mit der 3. Spule (grüne Spule) liegt nun die Stromaufteilung der parallelen Zweige.

## Berechnung des Kommutierungsvorganges als Widerstands-kommutierung

Vereinfachende Annahmen:

- Induktivitäten im Kommutierungskreis werden vernachlässigt. Damit wird in der kurzgeschlossenen Spule keinerlei Spannung induziert. Der Stromverlauf wird nur von den vorhandenen ohmschen Widerständen zwischen Bürsten und Lamellen bestimmt.
- Bürstenbreite = Lamellenbreite. (in Wirklichkeit ist Bürstenbreite > Lamellenbreite)

Zeitbereich:

$$0 \leq t \leq T_K$$

(1)  $T_K$  Kommutierungszeit

Da Kommutierung während der Zeit abläuft in der Lamellen 1 und 2 kurzgeschlossen sind gilt:

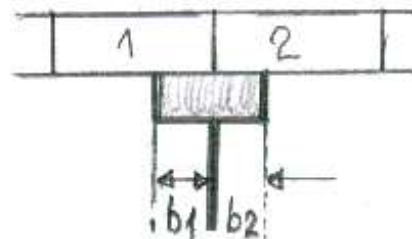
$$v_K = b_B / T_K$$

$v_K$  Geschwindigkeit Lamellen

$$b_B = v_K \cdot T_K$$

(2)  $b_B$  Bürstenbreite

Darstellung Bürstenbreiten:



Breite mit der die Bürste auf Lamelle 1 bzw. Lamelle 2 aufliegt:

$$b_1 = v_K \cdot t$$

(3)

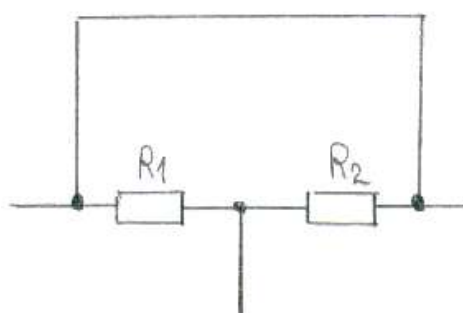
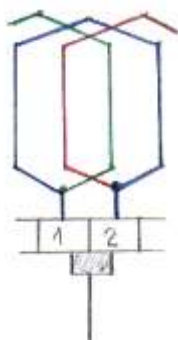
$b_1$  Bürstenbreite auf Lamelle 1

$$b_2 = v_K \cdot (T_K - t)$$

(4)

$b_2$  Bürstenbreite auf Lamelle 2

Ist  $R$  der ohmsche Übergangswiderstand der ganzen Bürste so gilt:



Spannungsverlauf in der kurzgeschlossenen Spule:

Kurzschlussstrom während der Kommutierung bei reiner Widerstandskommutierung:

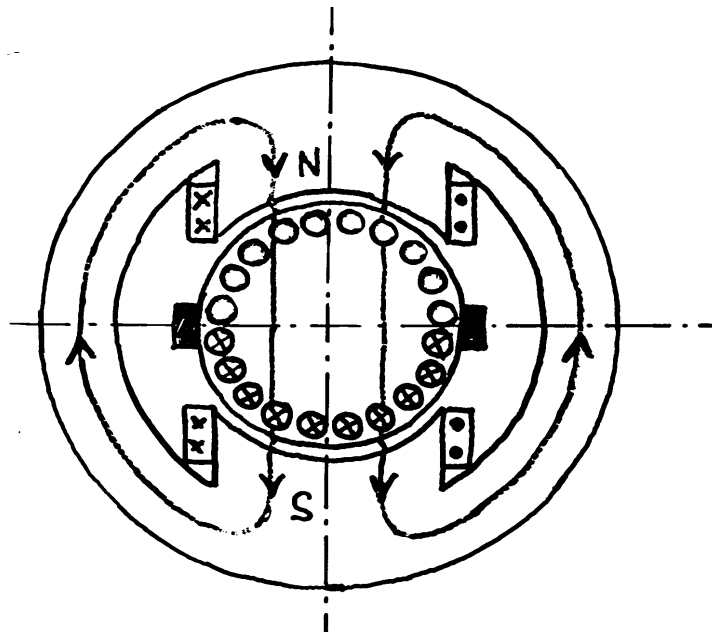
Für den Kommutierungsvorgang sind folgende Dinge wichtig:

- Nach  $t = T_K$  reißt der Kontakt zwischen der Bürste und der Lamelle ab. Es ist günstig wenn dann  $i_2 = 0$  wie dies bei der geradlinigen Stromwendung der Fall ist.
- Für die Belastung der Bürsten ist die auftretende Stromdichte eine maßgebliche Größe. Bei der geradlinigen Stromwendung ist die Stromdichte bei der auflaufenden Bürstenkante (Lamelle 1) und bei der ablaufenden Bürstenkante (Lamelle 2) gleich groß. Ein Maß für die Stromdichten sind die Winkel  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$ . Bei der geradlinigen Stromwendung sind beide Winkel gleich groß:  $\alpha_1 = \alpha_2$

## Die Ankerrückwirkung

Bei Belastung der Maschine tritt außer dem Erregerfeld noch ein zweites magnetisches Feld auf:  $\Rightarrow$  **das Ankerquerfeld**

Bild 3.7: Ankerrückwirkung



Bei Stromfluss in der Maschine erzeugen die stromdurchflossenen Leiter ein zusätzliches magnetisches Feld. Unter den Polen heben sich die Feldlinien auf, in den Polnischen tritt ein Maximum der Feldlinien auf.

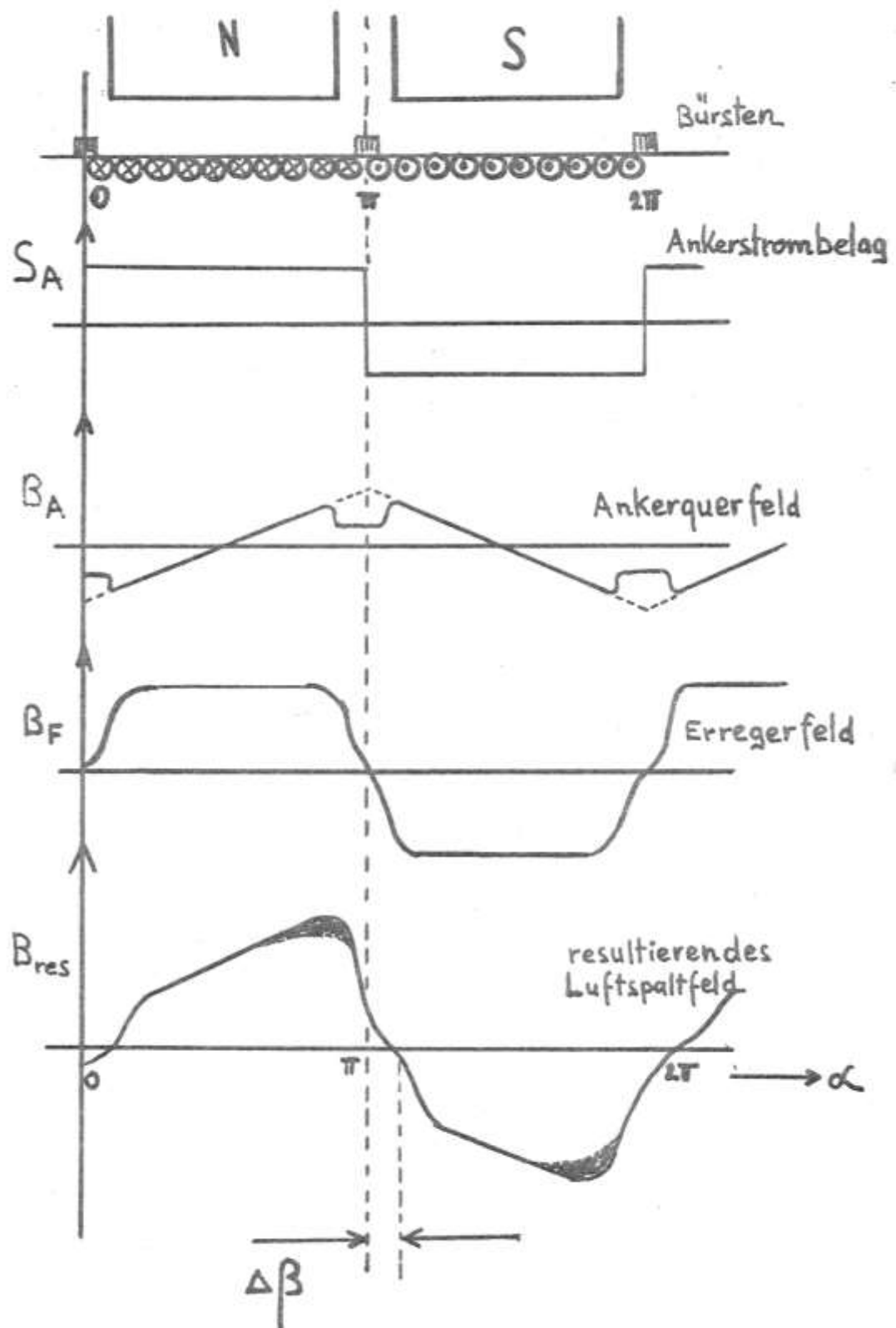
Die Durchflutungsachse dieses Feldes steht senkrecht auf der Achse des Erregerfeldes. Das Ankerquerfeld ist nur bei Stromfluss vorhanden, ist also **stromabhängig**.

Die Bürsten sind in der geometrisch neutralen Zone zwischen den Polen angebracht. Bei unbelasteter Maschine, d. h. es ist kein Ankerquerfeld vorhanden, ist in der geometrisch neutralen Zone ein Nulldurchgang des Erregerfeldes  $\mathbf{B}_F = 0$  gegeben.

Da in der geometrisch neutralen Zone auch der Kommutierungsvorgang in der von den Bürsten kurzgeschlossenen Spulen abläuft, würde in der kurzgeschlossenen Spule durch das Erregerfeld  $\mathbf{B}_F = 0$  damit theoretisch keine Spannung induziert.

Der Ankerstrombelag  $\mathbf{S}_A$  wird in A je cm Ankerumfang angegeben. Bei am Umfang der Maschine gleichmäßig verteilter Wicklung kann man von einem konstanten Ankerstrombelag ausgehen.

Bild 3.8: Darstellung der Ankerrückwirkung in abgewickelter Darstellung  
 $p = 1, Z_P = 2$





## Auswirkungen der Ankerrückwirkung

1. Die resultierende Induktion wird durch Sättigungserscheinungen im Eisen geschwächt (siehe schraffierte Fläche).

Als Folge fällt bei Generatorbetrieb die induzierte Spannung ab, bei Motorbetrieb entsteht bei starker Belastung eine Feldschwächung. Dies könnte zu einer Instabilität bezüglich der Drehzahl führen.

2. Es tritt ein stromabhängiges Maximum auf. Dies führt zu einer Induktionsspitze unter den Polhälften. Als Folge wird an dieser Stelle zwischen 2 Lamellen eine Lamellenspannung  $e_{Lmax}$  induziert, die größer als  $e_{Lmittel}$  ist. Eine obere Lamellen-spannung von  $e_{Lmax} = 35 - 40 \text{ V}$  darf nicht überschritten werden. Dieser Wert ist durch das Isolationsvermögen des Kommutators bestimmt. Beim Übersteigen dieser Spannung schlägt die Isolation durch. Es besteht als Kettenreaktion eine Rund-feuergefahr an den Lamellen. Der Kommutator würde dadurch zerstört.  $\Rightarrow e_{Lmax}$  begrenzt die Überlastfähigkeit der Maschine.
3. Die elektrisch neutrale Zone wird lastabhängig durch das Ankerquerfeld in der Phase (Phasenverschiebung von  $B_{res}$ ) verschoben. Bei Generatorbetrieb in Drehrichtung, bei Motorbetrieb gegen die Drehrichtung. Dadurch würde in den kurzgeschlossenen Spulen während der Kommutierung eine Spannung induziert, die die Kommutierung verzögert. Als Folge würde eine sogenannte **Unterkommutierung** entstehen. Dadurch wird die ablaufende Bürstenkante mit einem starken  $di/dt$  belastet. Es besteht dann wieder die Gefahr, dass die Lamellen bei großer Belastung durch Bürstenfeuer zerstört werden.

## Gegenmaßnahmen (siehe Bild 3.9)

### ➤ Kompensationswicklung

In den Polschuhen wird eine Wicklung untergebracht, die gegensinnig zur Stromrichtung in der Ankerwicklung vom Ankerstrom  $i_A$  durchflossen wird. Im Bereich der Hauptpole wird dadurch, örtlich begrenzt, der Einfluss des Ankerquerfeldes aufgehoben. Das Feld der Kompensationswicklung ist dem Ankerquerfeld entgegengerichtet.

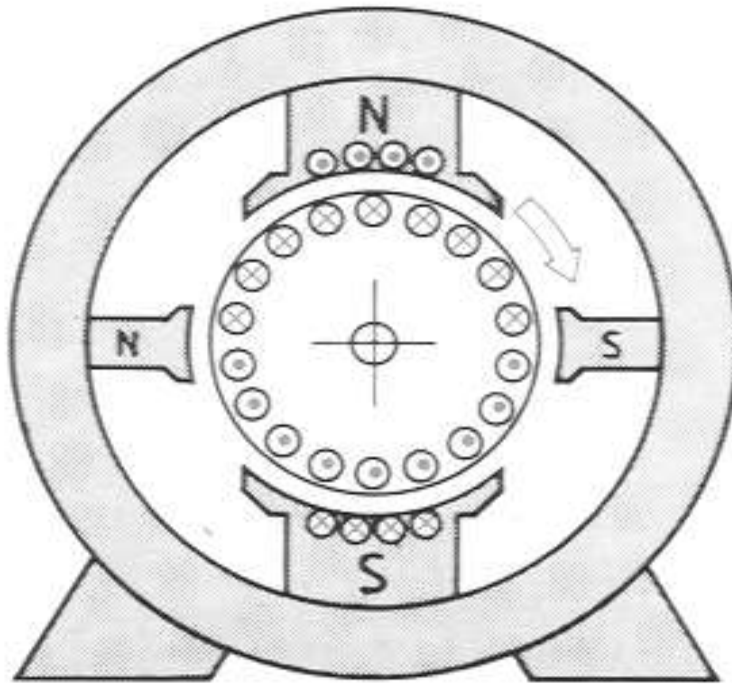
$\Rightarrow$  die Störeinflüsse gemäß 1. und 2. werden beseitigt bzw. begrenzt.

### ➤ Wendepolwicklung

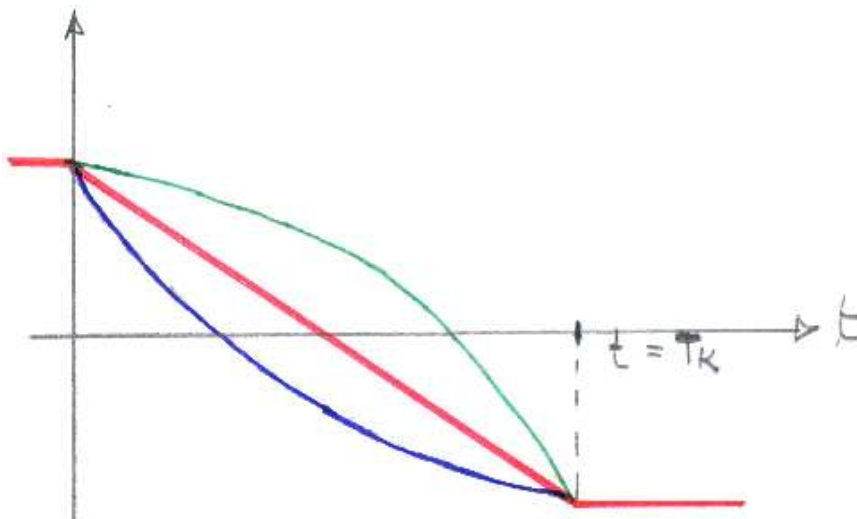
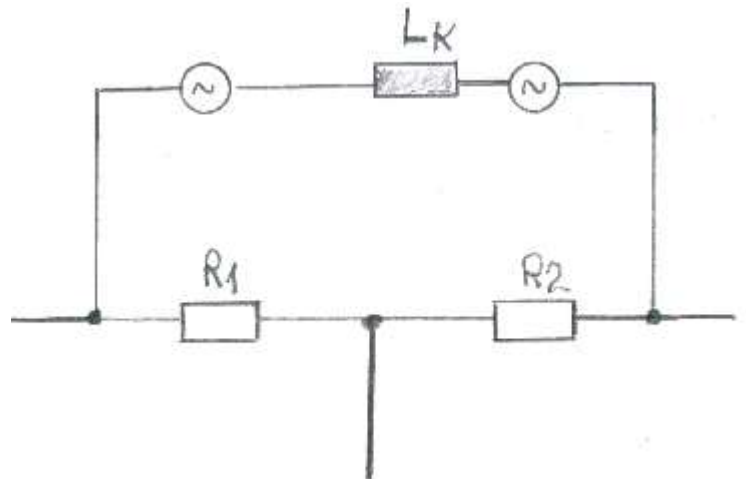
Wendepole befinden sich im Bereich der geometrisch neutralen Zone in den Polücken. Die Wendepolwicklung wird vom Ankerstrom gegensinnig zur Ankerwicklung durchflossen. Es entsteht ein zusätzliches Wendepolfeld, das dem Ankerquerfeld im Bereich der neutralen Zone entgegengerichtet ist. Über die Wendepole wird ein Gegenfeld so eingestellt, dass die resultierende Luftspaltinduktion  $B_{res}$  wieder in die geometrisch neutrale Zone rückt. In der Praxis wird eine leichte **Überkommutierung** eingestellt, das heißt die auflaufende Bürstenkante wird etwas stärker belastet. Die Einstellung des Wendepolfeldes erfolgt über den einstellbaren Luftspalt der Wendepole. Der Luftspalt wird im Prüffeld so eingestellt, dass möglichst kein Bürstenfeuer im Nennbereich der Maschine sichtbar wird.

$\Rightarrow$  die Störeinflüsse gemäß 3. werden beseitigt bzw. begrenzt.

Bild 3.9: Kompensationswicklung und Wendepolwicklung



Einfluss der Wendepolwicklung auf die Kommutierung:

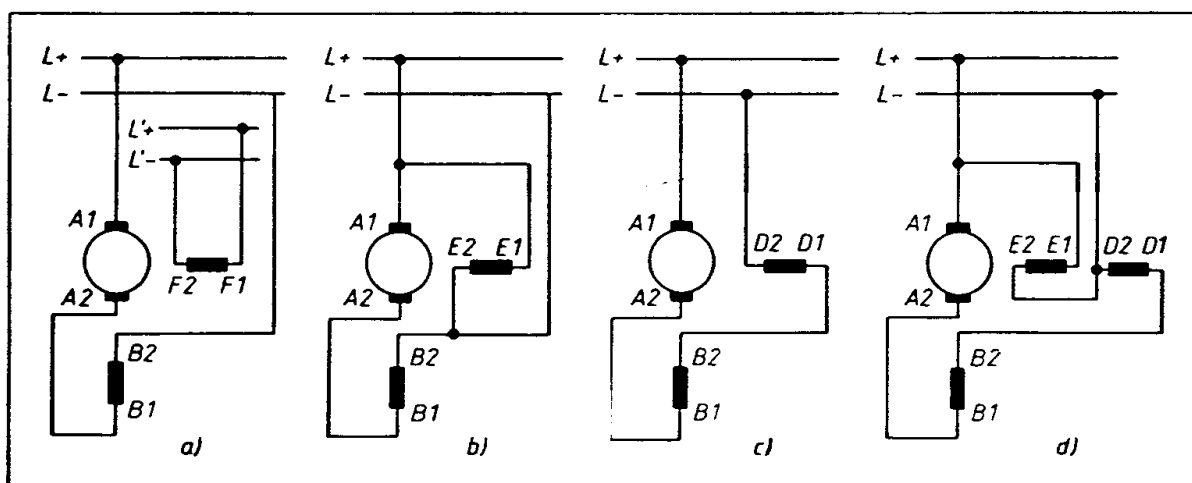


## Schaltung der Erregerwicklung

Das Betriebsverhalten einer Gleichstrommaschine hängt von der Schaltung der Erregerwicklung ab. Nach den im Bild 3.10 dargestellten Schaltungsarten kann man die Gleichstrommaschinen wie folgt einteilen:

- fremderregte Gleichstrommaschine **(a)**
- Nebenschlussmaschine **(b)**
- Reihenschlussmaschine **(c)**
- Doppelschlussmaschine oder Kompoundmaschine **(d)**

Bild 3.10: Schaltungsarten der Erregerwicklung



Welche Art von Maschine vorliegt, kann man an den Klemmenbezeichnungen der Maschine erkennen.

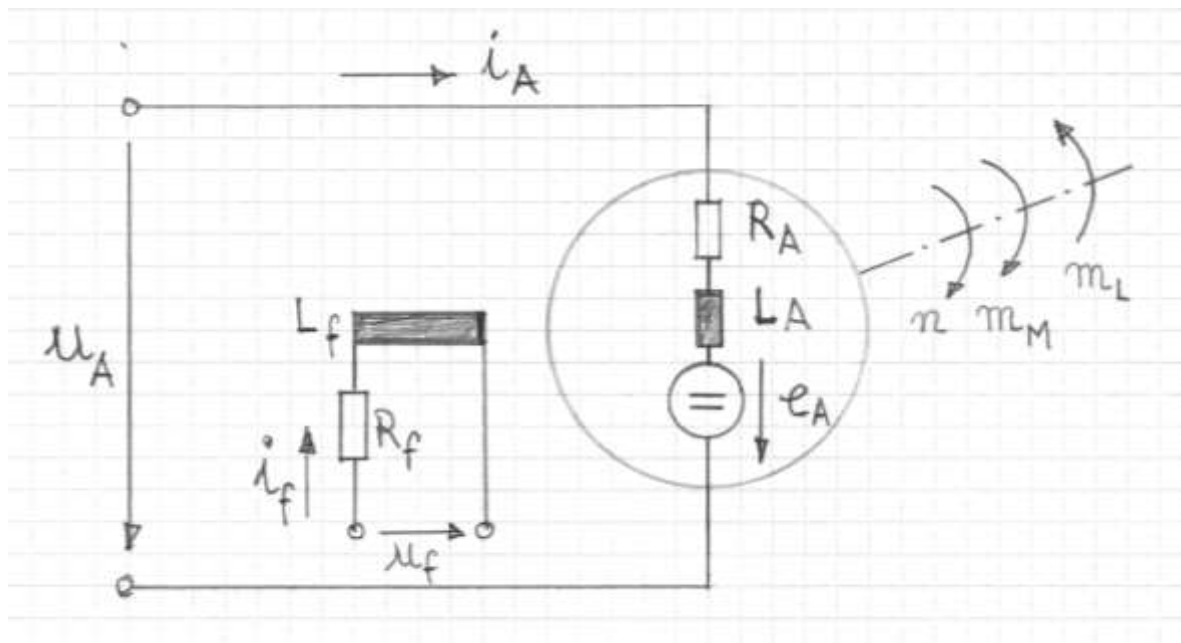
Jeder Wicklungsanschluss wird mit einem Buchstaben und einer Ziffer bezeichnet. Hierbei kennzeichnet die Ziffer 1 immer die Seite mit positivem Potential.

Ankerwicklung	A1 - A2
Wendepolwicklung	B1 - B2
Kompensationswicklung	C1 - C2
Reihenschlusswicklung	D1 - D2
Nebenschlusswicklung	E1 - E2
Fremderregte Wicklung	F1 - F2

Die Kompensationswicklung ist im Bild 3.10 nicht dargestellt. Die gewählte Lage der Wendepolwicklung soll veranschaulichen, dass der Fluss der Wendepole dem Ankerquersfeld entgegenwirkt.

## 3.2 Mathematische Beschreibung der fremderregten Gleichstrommaschine

### Prinzipschaltplan



Vernachlässigt man die Ankerrückwirkung so wird:

$$\phi \sim \psi_f$$

$\phi$  magnetischer Fluss [Vs] durch einen Pol

$\psi_f$  magnetischer Spulenfluss [Vs] des Erregerkreises

### Gleichungssystem der fremderregten Gleichstrommaschine

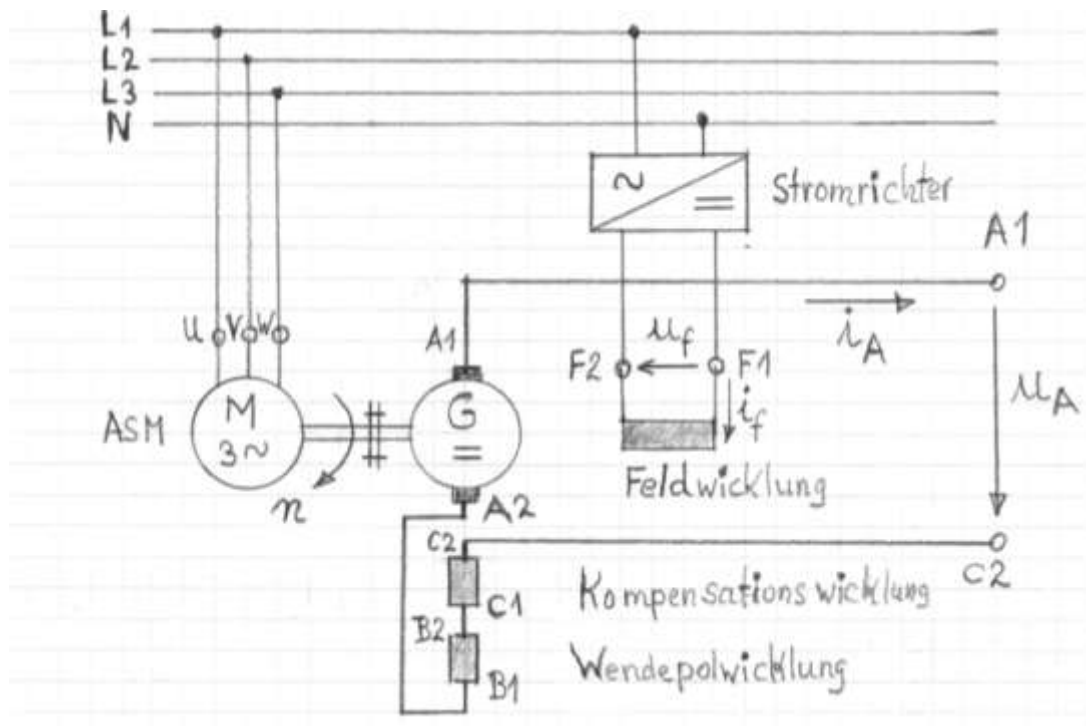
Erregerkreis:

Ankerkreis:

Bewegungsgleichung:

### 3.3 Generatorbetrieb der fremderregten Gleichstrommaschine

#### Schaltplan

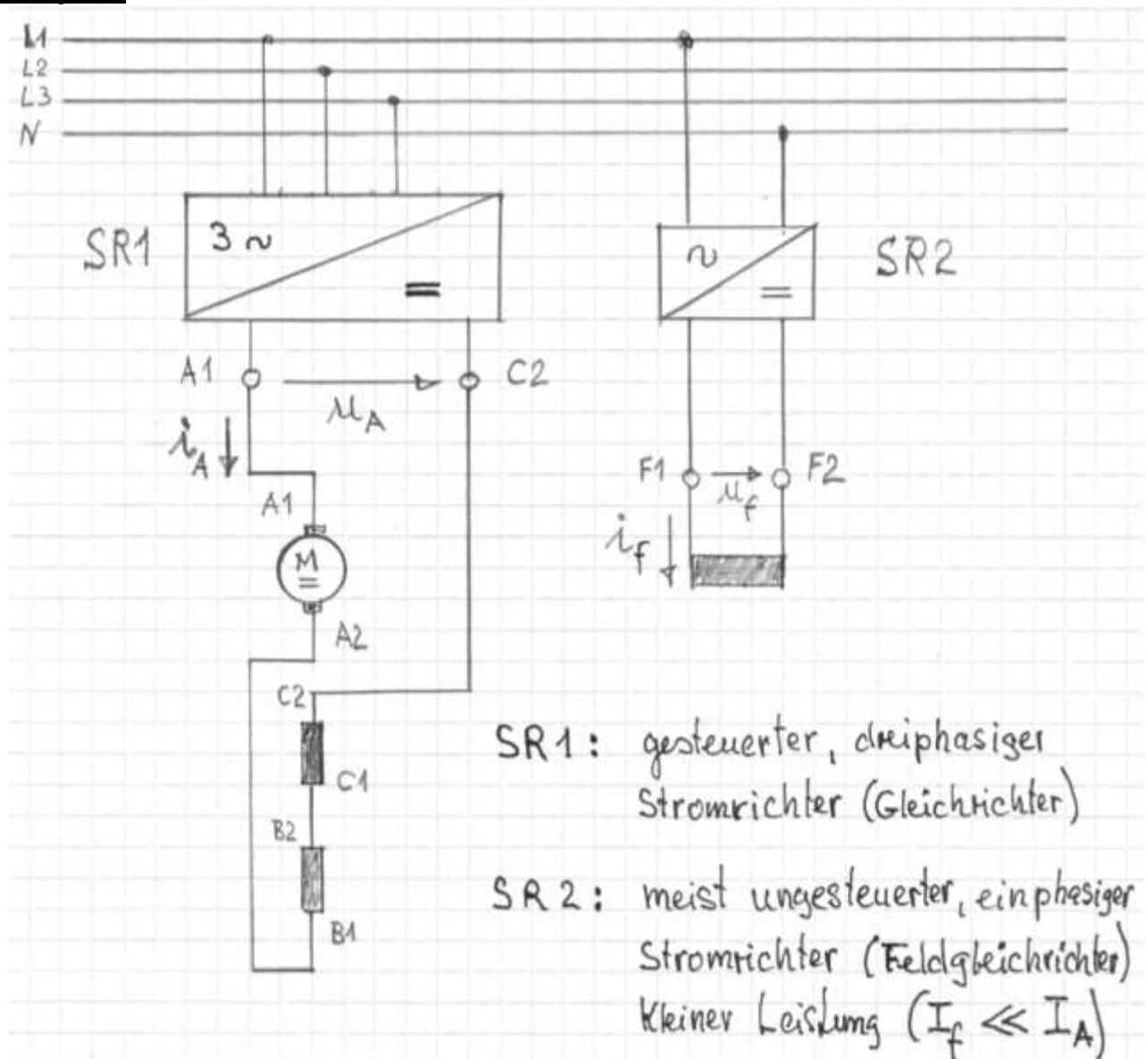


#### Ersatzschaltbild

#### Spannungskennlinie

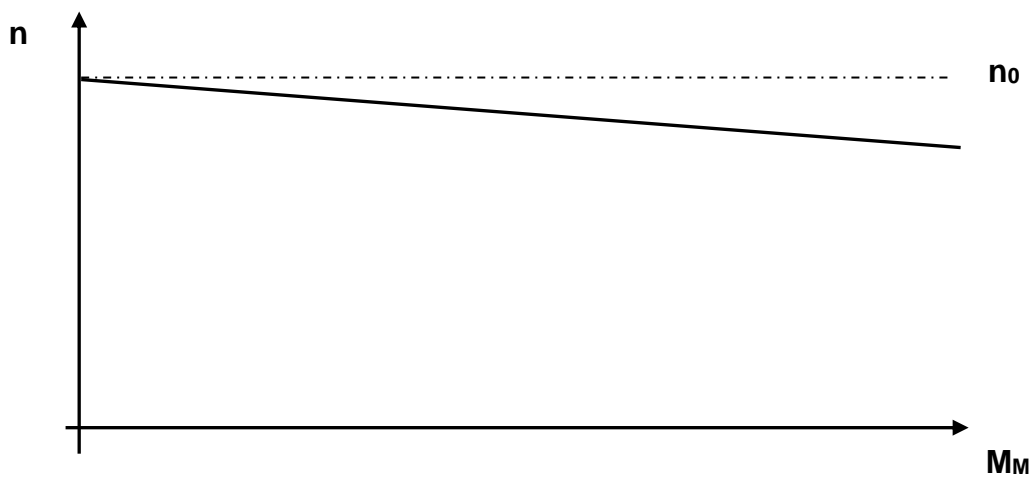
### 3.4 Drehzahlsteuerung des fremderregten Gleichstrommotors

#### Schaltplan

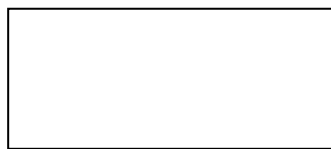


#### Ersatzschaltbild

## Die Drehzahl-Drehmomentenkennlinie



**Leerlaufdrehzahl:** Für  $M_M = 0$  ergibt sich



**Belastung:**

Bei Belastung und  $\psi_f = \psi_{fN}$  fällt Drehzahl (relativ gering) ab, bei Nennmoment  $M_{MN}$  sind dies einige % der Leerlaufdrehzahl.

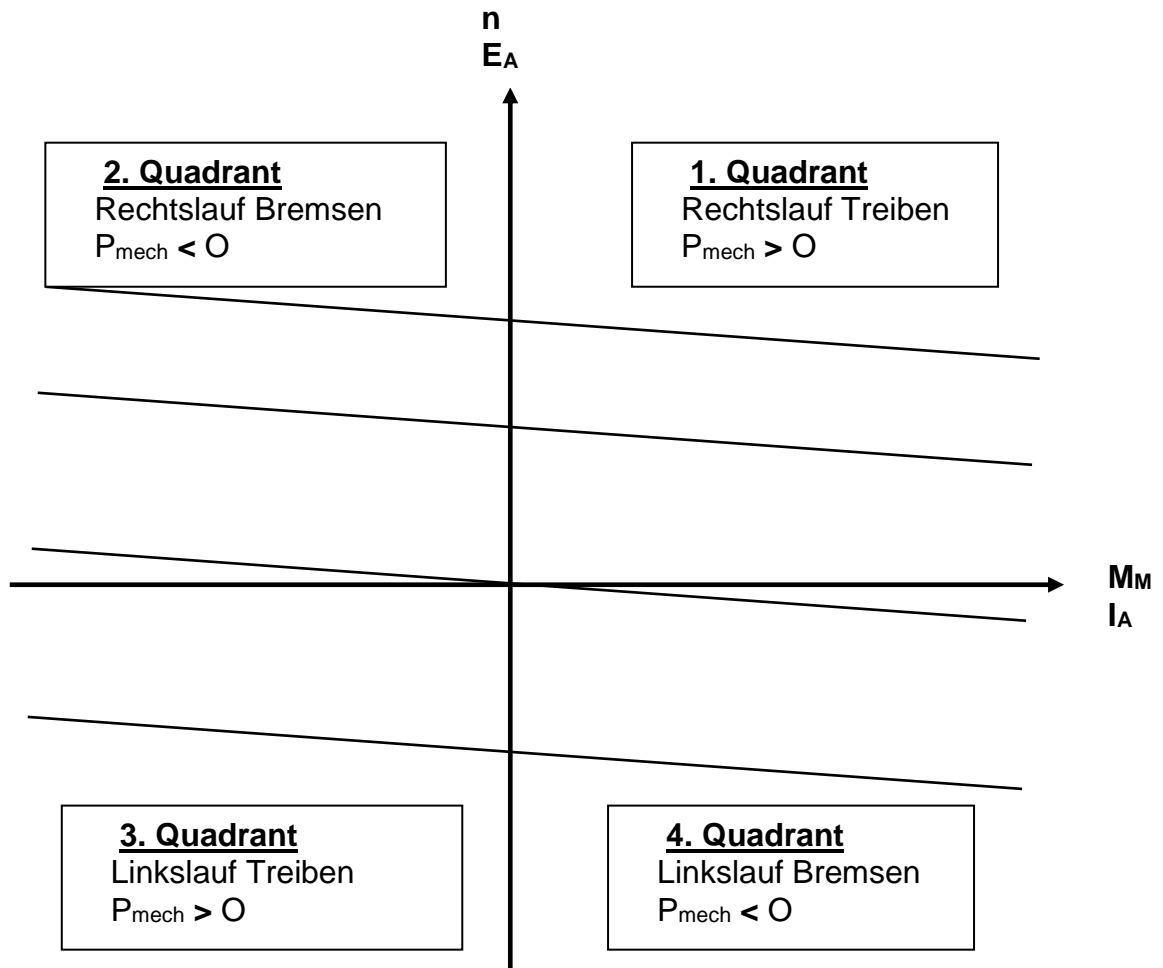
→ **Nebenschlussverhalten der Kennlinie**

Für  $\psi_f = \text{konst.}$

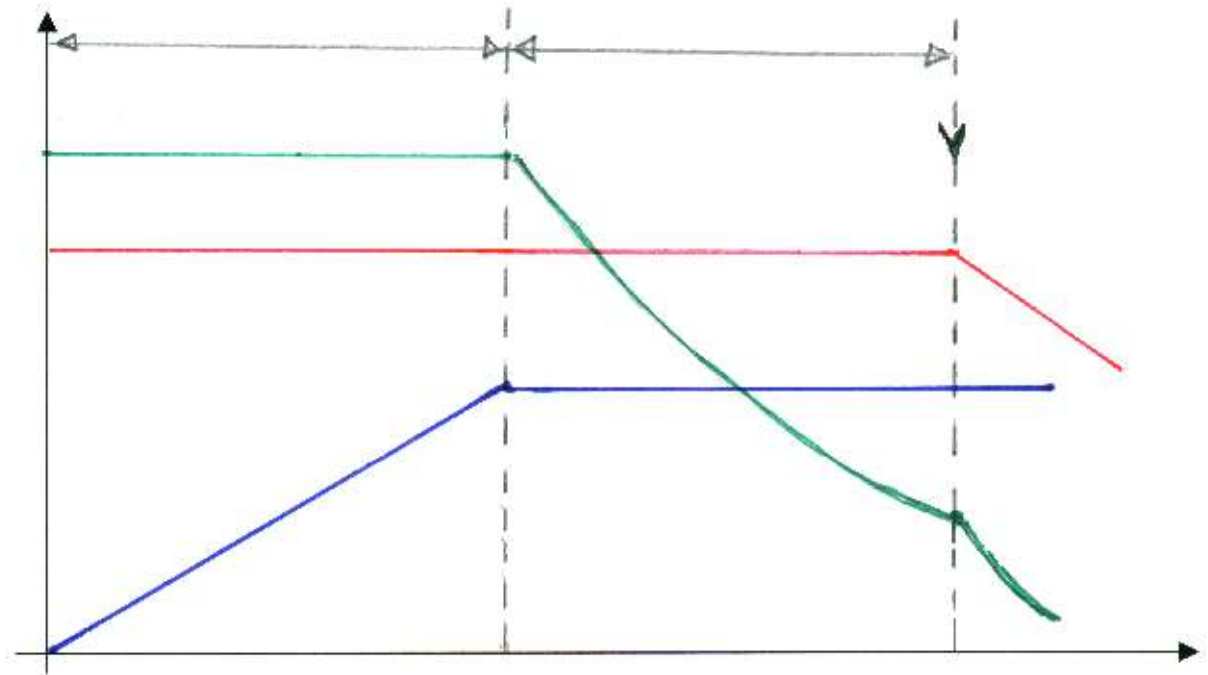




**Vierquadrantenbetrieb:** Ist nur möglich wenn das Stellglied, d.h. das **Stromrichtergerät**,  $U_A$  und  $I_A$  in beiden Polaritäten ermöglicht.



## Die Drehzahlsteuerung



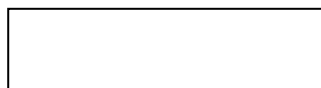
**Grundstellbereich:**

$$0 \leq n \leq n_N$$

$$\psi_f = \psi_{fN} = \text{konst.}$$

Die Drehzahl wird über die Ankerspannung gesteuert:  $0 \leq U_A \leq U_{AN}$

für  $M_M = \text{konst.}$ :



Mechanische Leistung:

$M_M = \text{konst.}$  und  $n$  steigt:  
 $P_{\text{mech}}$  steigt mit  $n$  linear an

$$P_{\text{mech}} = 2\pi n M_M$$

**Feldschwächebereich:**

$$U_A = U_{AN} = \text{konst.}$$

### Kommutierungsknick:

Der Ankerstrom  $I_A = \text{konst.}$  ist nicht mehr möglich.  **$I_A$  muss reduziert werden**, da sonst Kommutierungsschwierigkeiten (wegen hoher Drehzahl) der Maschine entstehen. Die mechanische Leistung  $P_{\text{mech}}$  fällt damit ebenfalls ab.

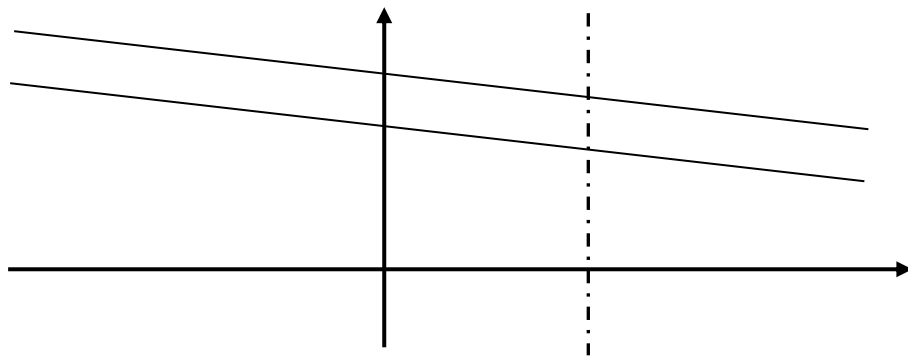
### Motordaten einer Gleichstrommaschine:

$U_{AN} = 460 \text{ V}$	$n_N = 2550 \text{ min}^{-1}$
$I_{AN} = 32 \text{ A}$	$P_N = 13 \text{ kW}$
$R_A = 1,02 \Omega$	$M_N = 49 \text{ Nm}$
$L_A = 8,6 \text{ mH}$	

### Abbremsen und Beschleunigen über die Ankerspannung: $M_L = \text{konst.}$

$$\psi_f = \psi_f = \text{konst.}$$

Beim Abbremsen oder Beschleunigen des Gleichstrommotors besteht die Gefahr dass sehr hohe, nicht mehr zulässige Ankerströme entstehen. Eine **Strombegrenzungs-Regelung** muss dafür sorgen, dass der Wert des Ankerstromes  **$+I_{A\text{max}}$**  bzw.  **$-I_{A\text{max}}$**  nicht übersteigt. Ein Betrieb des Gleichstrommotors ohne Strombegrenzungs-Regelung ist praktisch nicht möglich.



#### **Abbremsen:**

Ausgangspunkt ist **AP<sub>1</sub>**. Die Drehzahl soll nun abgesenkt werden. Es wird hierfür  $U_A$  nach  **$U_A = U_{A2}$**  verkleinert.

**Im ersten Augenblick** bleibt die Drehzahl  **$n$**  und damit  **$E_A$**  konstant, der Strom kehrt sich um, da  **$E_A > U_{A2}$** . Der Motor wird abgebremst.

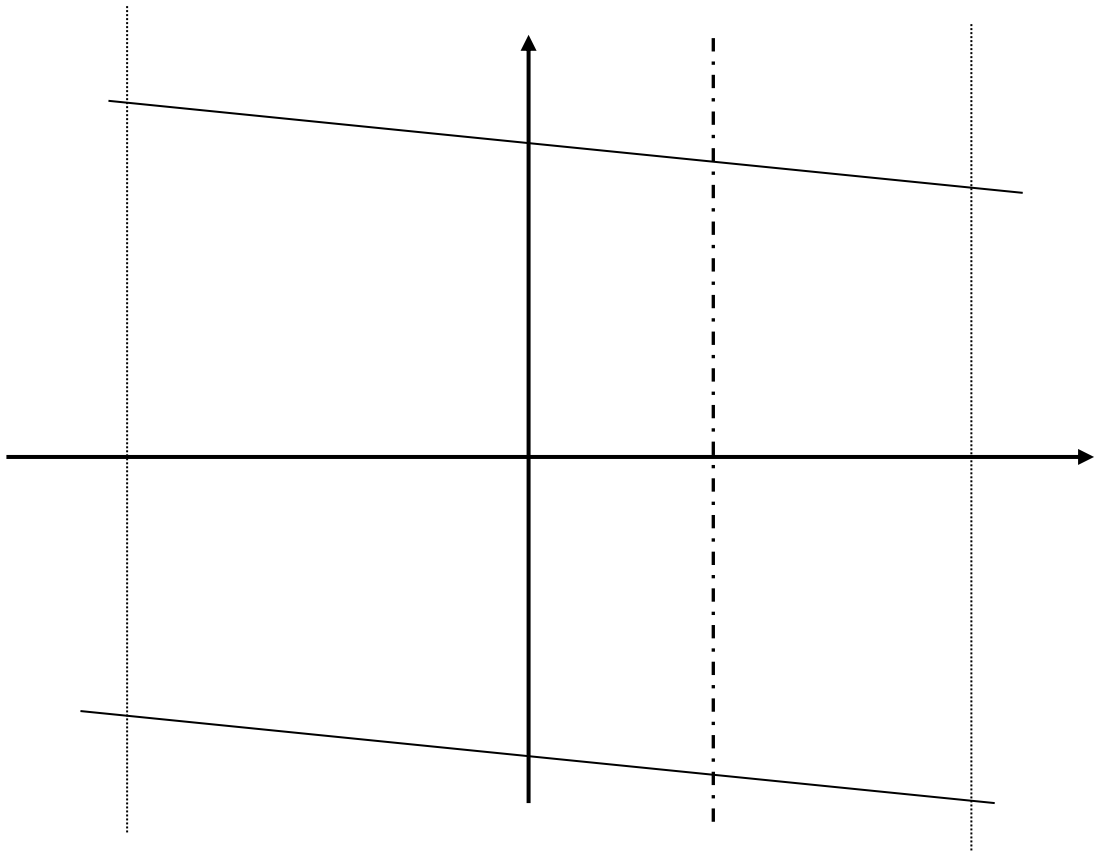
#### **Beschleunigen:**

Ausgangspunkt ist **AP<sub>2</sub>**.  $U_A$  wird wieder nach  **$U_A = U_{A1}$**  erhöht. **Im ersten Augenblick** bleibt die Drehzahl  **$n$**  und damit  **$E_A$**  konstant, der Strom erhöht sich, da  **$U_{A1} > E_A$** , darf aber den Maximalwert  **$I_{A\text{max}}$**  nicht übersteigen. Der Motor wird beschleunigt.

## Umkehr der Drehzahl, Steuerung über Ankerspannung

$M_L = \text{konst.}$

$\psi_f = \psi_{fN} = \text{konst.}$

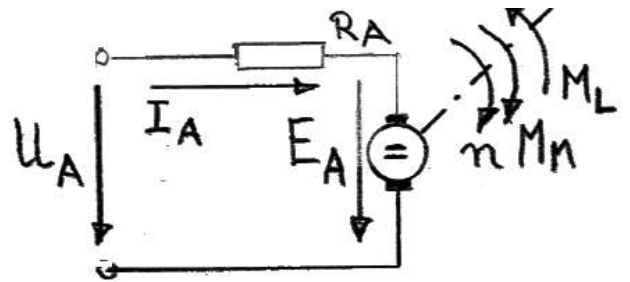


### Anlauf des Motors bei $U_A = \text{konst.}$ und $\psi_f = \text{konst.}$

Wird  $U_A$  auf die stillstehende Maschine geschaltet ist zunächst

$$n = 0 \quad \text{und damit} \\ E_A = 0$$

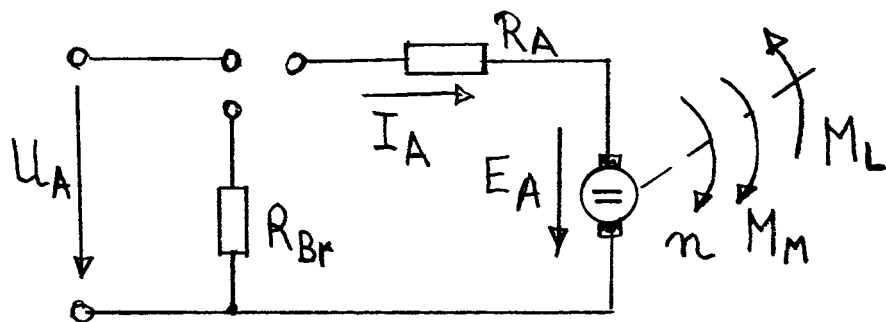
hieraus der Anlaufstrom:



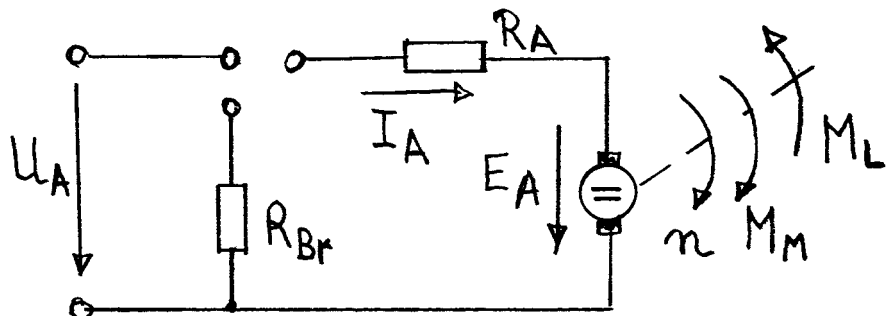
Der Anlaufstrom des Motors würde sehr hoch. Die Strombegrenzungsregelung spricht an und verkleinert  $U_A$  so weit bis sich der Strombegrenzungswert  $+ I_{A\text{max}}$  einstellt.

### Widerstandsbremsen mit $\psi_f = \text{konst.}$

Normalbetrieb mit  $I_A > 0$  und damit  $M_M > 0$ :



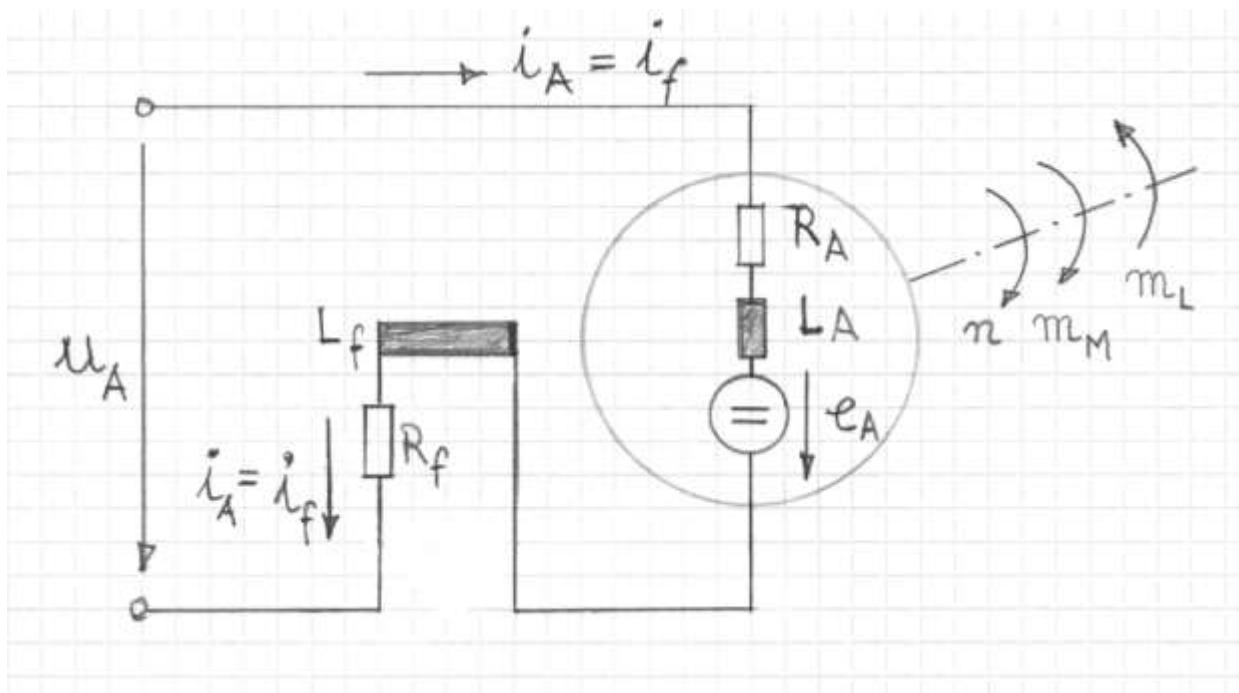
Bremsbetrieb mit  $I_A < 0$  und damit  $M_M < 0$ :



Der Motor wird in der Drehzahl stark abgebremst. Die freiwerdende Bewegungsenergie des Motors wird im Bremswiderstand in Wärme umgesetzt. Keine Energierücklieferung ins Netz.

### 3.5 Der Gleichstrom-Reihenschlussmotor

#### Prinzipschaltplan



Die Anker- und Erregerwicklungen sind in Reihe geschaltet.

damit wird:  $i_A = i_f$

mit:  $\psi_f = L_f i_f$

mit:  $m_M = c_2 i_A \psi_f$

wird:  $m_M = c_2 L_f i_A^2$

Allgemeine Gleichung des Reihenschlussmotors:

Beim Reihenschlussmotor ist  $L_f$  gegenüber dem  $L_f$  des fremderregten Gleichstrommotors vergleichsweise klein, da die Erregerwicklung vom Ankerstrom durchflossen wird.

Die magnetische Durchflutung der Erregerwicklung ist allgemein:  $\Theta = N i_f$

Fremderregte Gleichstrommaschine:  $N$  groß  $i_f$  klein

Reihenschlussmaschine:  $N$  klein  $i_f$  groß

## Die Drehzahl-Drehmomentenkennlinie

mit:  $e_A = c_1 n \psi_f = c_1 L_f n i_A$  wird:

für stationäre Betriebspunkte gilt:

## Merkmale des Gleichstrom-Reihenschlussmotors

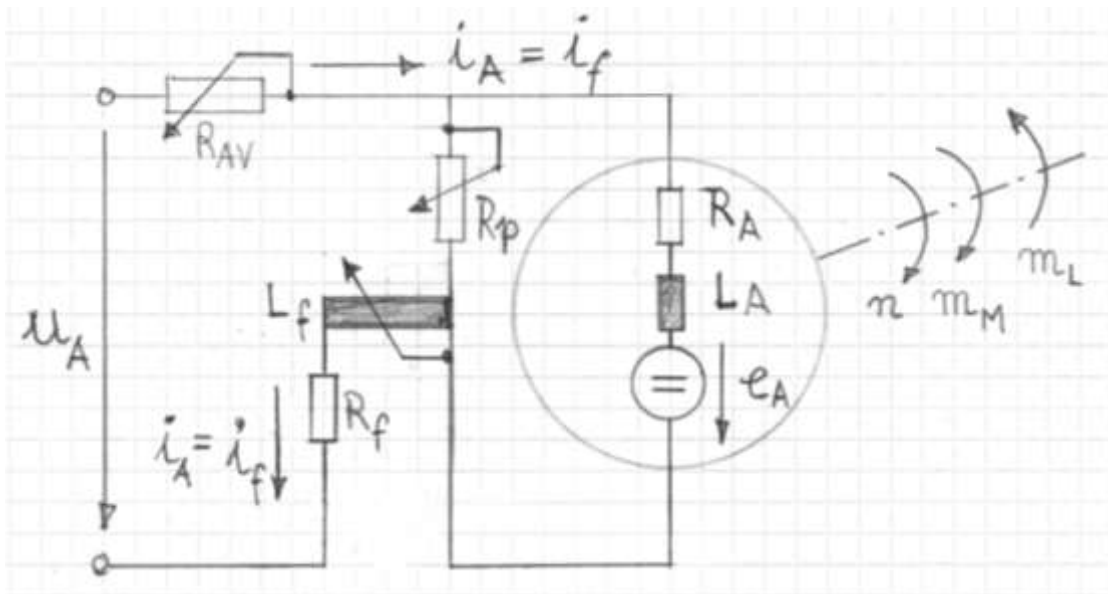
- Bei steigender Belastung fällt die Drehzahl stark ab.
- Bei entlasteter Maschine ( $M_M = 0$ ) geht die Drehzahl ins Unendliche, d. h. der Motor darf nicht im Leerlauf betrieben werden.
- Das Anzugsmoment ( $n = 0$ ) des Motors ist sehr hoch. Bei stillstehender Maschine mit  $n = 0$  und damit  $E_A = 0$  wird (Betrachtung stationärer Betrieb) der Anlaufstrom zu:

Der Anlaufstrom wird sehr hoch und muss wieder durch eine Regelung begrenzt werden. Es ergibt sich ein sehr hohes Anlaufmoment da:

- Die Umkehr des Drehmomentes (Bremsbetrieb) ist kontinuierlich nicht möglich, da bei  $M_M = 0$  ja der Drehzahlpunkt  $n = \infty$  durchlaufen werden müsste. Die Umschaltung des Drehmomentes wird nur durch Umschaltmaßnahmen möglich.



## Drehzahlsteuerung des Gleichstrom-Reihenschlussmotors



- Steuerung über Ankerspannung  $U_A$  (wichtigste Möglichkeit)

- Steuerung über Ankervorwiderstand  $R_{AV}$ 
  - verlustbehaftet
- Umschalten der Erregerwicklung
  - Änderung von  $L_f$ , damit Änderung von  $\psi_f$
- Parallelschalten eines Widerstandes  $R_P$ 
  - es wird  $I_A \neq I_f$ , damit Änderung von  $\psi_f$

## **Bremsen des Gleichstrom-Reihenschlussmotors**

Ein kontinuierliches Umsteuern in den Bremsbetrieb ist nicht möglich. Die Drehzahl-Drehmomentenkennlinie ist im Quadrant Rechtslauf/Bremsen gar nicht vorhanden.

es ist allgemein:



es gibt zwei Möglichkeiten das Motormoment  $M_M$  in der Polarität zu drehen:

- Umschalten der Erregerwicklung:
  
- Umschalten der Ankerwicklung:

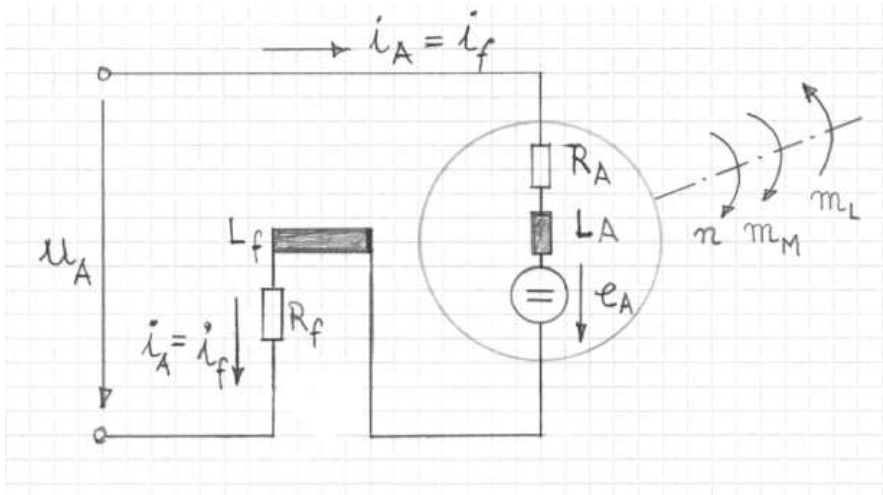
Um Überspannungen zu vermeiden muss das Umschalten im stromlosen Zustand erfolgen. Der Strom muss vorher über Freilaufdioden auf Null gebracht werden und klingt hierbei nach einer e-funktion ab.

**Beispiel Widerstandsbremsen:**

### 3.6 Der Wechselstrom-Reihenschlussmotor

Anstatt mit Gleichspannung wird der Motor mit einer Wechselspannung der Kreisfrequenz  $\omega$  gespeist.

$$u_A = \hat{u} \sin \omega t$$



Annahme:

wegen  $\psi_f = L_f i_f$   
und  $i_A = i_f$   
wird dann:

Berechnung des Motormomentes des Wechselstrom-Reihenschlussmotors:

## Nachteile des Wechselstrom-Reihenschlussmotors

- 1) Bei der Stromwendung wird in der jeweils kurzgeschlossenen Spule des Motors durch das zeitlich veränderliche Erregerfeld eine Spannung induziert. Es entsteht die Gefahr des Bürstenfeuers.
- 2) Das pulsierende Motormoment kann sich störend auswirken.
- 3) Bei steigender Netzfrequenz entsteht zwischen  $i_A$  und  $\Psi_f$  eine Phasenverschiebung, die durch Wirbelstromeffekte verursacht wird. Diese Phasenverschiebung wird mit steigendem  $\omega$  größer. Aus dem mittleren Drehmoment wird dann:

- 4) Mit steigendem  $\omega$  steigen die Eisenverluste stark an

$P_{Fe} = P_H + P_W$

$P_H$     Hystereseverluste  
 $P_W$     Wirbelstromverluste

$P_H = k_H f B^2$

$k$         Materialkonstante  
 $B$         magnetische Induktion

$P_W = k_W f^2 B^2$

## Anwendungen des Wechselstrom-Reihenschlussmotors

### 1) Bahnmotor

Das Bahnnetz wurde mit **16 <sup>2/3</sup> Hz** aufgebaut. Bei dieser Frequenz sind die genannten frequenzabhängigen Nachteile des Wechselstrom-Reihenschlussmotors noch nicht so gravierend.

Moderne Antriebe für Vollbahnen oder Nahverkehrsfahrzeuge basieren heute auf umrichter gespeisten Drehstrommotoren. Die Drehzahlsteuerung der Fahrmotoren erfolgt mit selbstgeführten Zwischenkreisumrichtern über die Frequenz des Drehstromsystems.

### 2) Universalmotoren

Dies sind Motoren kleiner Leistung (bis ca. 2.500 W) und haben in Elektrowerkzeugen und Haushaltsgeräten weite Verbreitung gefunden. Drehzahlbereich: bis 20 000 min<sup>-1</sup>. Sie werden stets zweipolig gebaut und haben, aus Kostengründen, weder Kompensationswicklung noch Wendepolwicklung. Da sie meist nur eine Drehrichtung aufweisen, werden die Bürsten, entgegen der Drehrichtung, aus der geometrisch neutralen Zone verschoben. Bezüglich der Drehzahlsteuerung bestehen die gleichen Möglichkeiten wie beim Gleichstrom-Reihenschlussmotor.

**Beispiele:**    Küchenmaschinen  
                  Kaffeemühlen  
                  Handmixer  
                  Staubsauger  
                  Waschmaschinen

                  Schlagbohrmaschinen  
                  Kreissägen  
                  Stichsägen  
                  Pumpen

### 3.7 Permanentmagnet-Motoren (PM-DC-Motoren)

Statt der Erregerwicklung können bei Gleichstrommotoren **Permanentmagnete** verwendet werden. Diese Permanentmagneterregte Gleichstrommotoren bezeichnet man häufig kurz Permanentmagnet-Motoren. Diese Motoren haben im unteren Leistungsbereich (im Gegensatz zu größeren Motoren) **wegen ihrer geringen Kosten** (direkter Anschluß an Gleichspannung möglich) , ihres hohen Wirkungsgrades und ihrer vielfältigen Gestaltungsmöglichkeiten große Bedeutung.

Der **Universalmotor** und der **PM-DC-Motor** sind manchmal alternative Antriebe für Geräte , die am 230-V-Wechselspannungsnetz betrieben werden sollen. Hierbei benötigt der PM-DC-Motor zum Betrieb an Wechselspannung einen Gleichrichter. Bei gleichen Kosten besitzen beide Motorarten etwa das gleiche auf das Volumen bezogene Drehmoment. Bei Geräten mit **nur einer Drehzahl**, die bei Belastung nur wenig absinken soll, werden eher **PM-DC-Motoren** eingesetzt. Für Geräte mit **großem Drehzahlbereich** und hohem Startmoment eher **Universalmotoren**.

Im Gegensatz zu größeren Gleichstrommotoren werden kleine PM-DC-Motoren immer noch in großer Stückzahl in der Steuer- und Regelungstechnik eingesetzt.

#### Vielfältige Einsatzgebiete für PM-DC-Motoren:

- **Hilfsantriebe im Kraftfahrzeug:**  
Scheibenwischer, Heizungsgebläse, Kühlerventilatoren, Benzin- und Scheibenwaschpumpen, Schiebedächer, Fensterheber, Sitzverstellung, ABS, Türverriegelung usw.
- **Haushalt- und Hobbygeräte:**  
Föhne, Grillspieße, Grasscheren, Zahnbürsten, Dosenöffner, Massagegeräte, Modelleisenbahnen usw.
- **Haustechnik:**  
Heizung, Lüftung, Rollläden, Türschließenanlagen usw.
- **Werkstatt:**  
kabellose Handwerkzeugmaschinen, Prüfstände, Handhabungsgeräte Roboter, Schweißzangen usw.
- **Büromaschinen:**  
Drucker, Kopiergeräte, Frankiermaschinen, Plotter usw.
- **Foto-, Videotechnik:**  
Foto- und Videokameras, Video- und Kassettenrekorder, Projektoren, Schneidegeräte usw.
- **Medizin-, Dental- und Labortechnik:**  
Röntgengeräte, Analyse- und Dialysegeräte, Zentrifugen, Schüttel- und Rührgeräte, Blutdruckmeßgeräte usw.
- **Ticket- und Geldautomaten, Golfwagen, Verpackungsmaschinen, Rohrpostanlagen, Druckmaschinen, Etikettiermaschinen usw.**

## Spezielle Ausführungsformen des PM-DC-Motors

### a) Gleichstrom - Stellmotoren ( Gleichstrom - Servomotoren)

Die zunehmende Automatisierung von Arbeitsvorgängen hat die Entwicklung spezieller Stellmotoren bewirkt.

#### **Beispiele für Anwendungen:**

- Numerisch gesteuerte Werkzeugmaschinen:  
Die Werkzeuge müssen in genau bestimmte Positionen verfahren werden, z. B. beim Bohren von Blechen.
- Koordinatenschreiber (X-Y-Schreiber):  
Schreibstift muss in zwei Achsen genau positioniert werden.
- Optische Zielgeräte und Waffensysteme:  
Positionierung der Bordkanone eines Panzers in voller Fahrt.
- Verstellen von Potentiometer in der Antriebstechnik:  
Genaue Vorgabe eines Sollwertes über Motorpotentiometer.
- Verstellantriebe für Großantennen:  
Antenne muss auf bestimmte Position ausgerichtet werden.
- Kopiermaschinen, Drucker, Sortiermaschinen usw.

#### **Anforderungen an die Stellmotoren:**

Hohe Regelgenauigkeit und hohe Regeldynamik bei relativ kleiner Antriebsleistung (einige 100 W bis einige kW), oft im Kurzzeitbetrieb.

- kleines Massenträgheitsmoment des Läufers.
- kleine elektrische Zeitkonstante des Ankerkreises, d. h.  $L_A$  so klein wie möglich.
- hohe kurzzeitige Überlastbarkeit
- winkelunabhängiges, belastungsunabhängiges Drehmoment

#### **Es habe sich vor allem zwei Motortypen gebildet:**

①

##### **Schlanke, langgestreckte Läuferform**

- damit wird ein kleines Massenträgheitsmoment  $J_M$  erreicht ( bei einem Vollzylinder ist  $J \approx R^4$  ), damit wird eine schnelle zeitliche Änderung der Drehzahl gemäß Bewegungsgleichung möglich
- Ankerwicklung ist auf nutenlosem Läufer aufgeklebt:

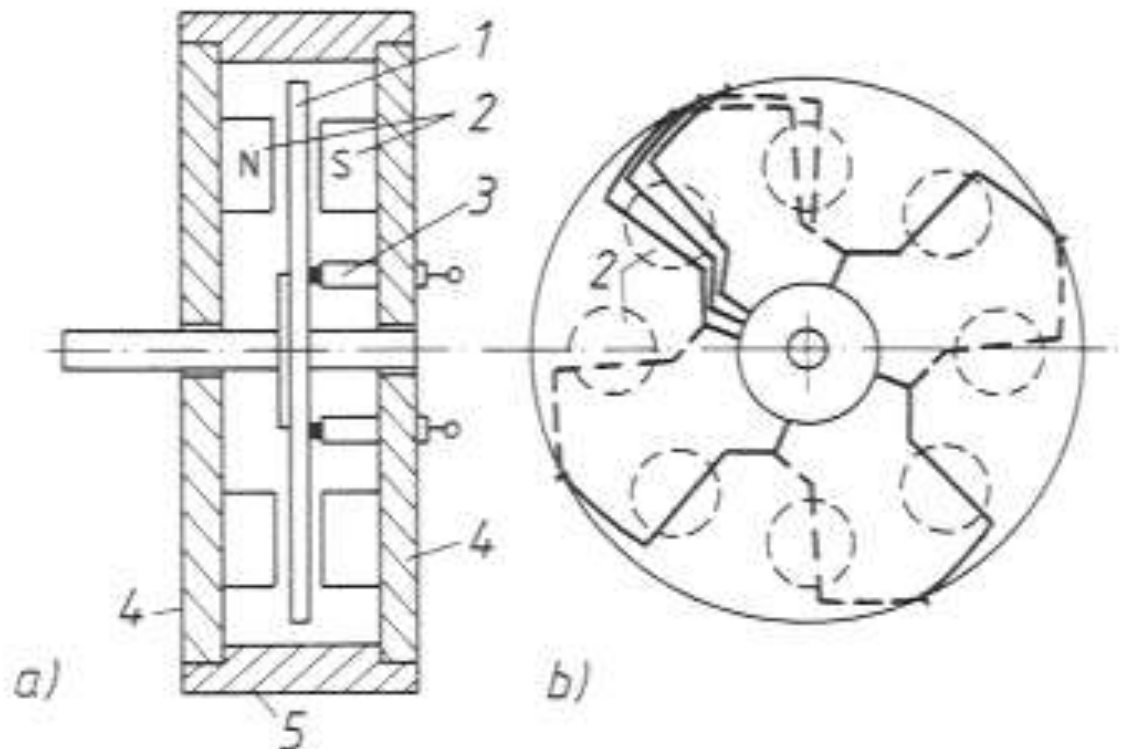
Wegen fehlender Nut ist das Drehmoment vom Winkel des Motors unabhängig, es bestehen keine magnetischen Vorzugslagen.

Weil die Streuinduktivität sehr gering ist wird die Ankerinduktivität  $L_A$  klein. Damit wird schnelle Stromänderung von  $i_A$  möglich.

2

## Scheibenläufermotoren ( bis ca. 10 kW)

Der Scheibenläufermotor hat eine sehr flache Bauweise. Die Läuferscheibe, der Anker, ist eine Kunststoffscheibe (**also kein Eisen**), auf die beidseitig in der Technik der gedruckten Schaltung **Kupfer-Leiterbahnen** aufgebracht werden. Es wird derart eine Wellenwicklung realisiert. Die Stromzuführung erfolgt über Kohlebürsten, die direkt auf den Enden der blanken Kupferleiter der Scheibe aufliegen, so dass ein getrennter Stromwender entfällt. **Das Erregerfeld** wird durch Dauermagnete (8 bis 10 Polpaare) erzeugt, die beidseitig der Ankerscheibe auf zwei weichmagnetischen Flanschen sitzen. Es schließt sich über die gegenüberliegenden Pole und die Flansche, während das Gehäuse aus Al-Guss kein Feld führt.



a) Magnetsystem mit Scheibenanker

- 1 Ankerscheibe
- 2 Dauermagnete
- 3 Kohlebürsten
- 4 Weicheisenrückschluss
- 5 nichtmagnetische Gehäuse

b) Ankerscheibe mit Wellenwicklung

### Vorteile des Scheibenläufermotors:

- der eisenlose Läufer hat ein sehr kleines Trägheitsmoment
- da keine Nuten vorhanden sind, entfällt der Zahnungseffekt und dadurch ist Rundlauf bis zu kleinsten Drehzahlen möglich
- die geringen Ankerinduktivität ergibt Zeitkonstanten unter 0,1 ms und ermöglicht den schnellen Aufbau von des Ankerstromes (Impulsströme) und damit dem Drehmoment des Motors
- die große Kühloberfläche der Ankerscheibe bringt eine gute Abgabe der Verlustwärme durch den Ankerstrom
- die sehr geringe Ankerstreuinduktivität ermöglicht eine gute Stromwendung auch bei hohen Kurzzeitüberlastungen
- großer Drehzahlstellbereich von bis zu  $5000 \text{ min}^{-1}$



## **b) Torque-Motoren**

Torque-Motoren sind Stellmotoren für kleine und kleinste Drehzahl und hohes Drehmoment auch im Stillstand.

Drehzahlstellbereich:

<b>&lt; 1 Umdrehung/Tag ----- 25 min<sup>-1</sup></b>
---

Sie haben eine geringe Baulänge mit großem Durchmesser. Der große Durchmesser ermöglicht hohes Drehmoment.

### **Anwendungen:**

- stabilisierte Plattformen
- automatische Einstellung von Antennen und optischen Geräten bei Sternwarten
- bei der Optik von Periskopen (Sehrohre) von U-Booten

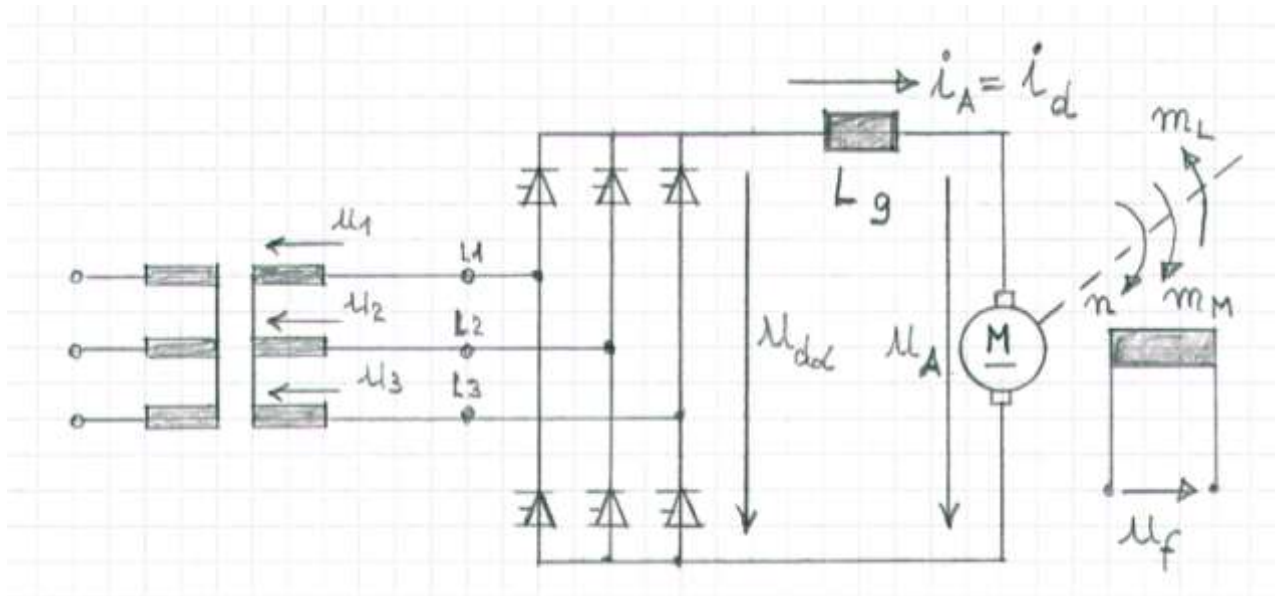
## **c) Gleichstrom-Kleinstmotoren**

Die Nutzleistung beträgt nur einige Watt, die Nennspannung ist  $\leq 24 \text{ V}$ .

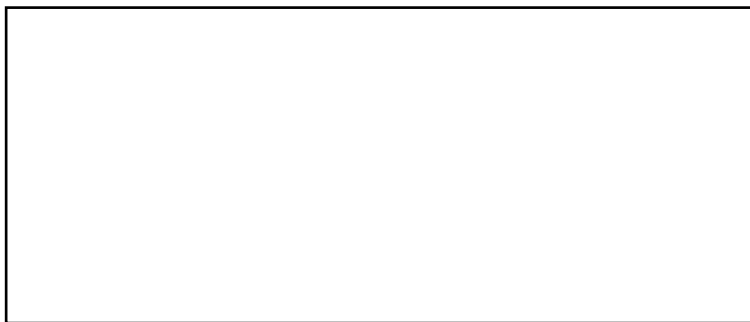
Sie sind ebenfalls mit Permanentmagneten ausgerüstet. Sie finden Anwendung in transportablen Geräten wie bei der Foto- und Videotechnik.

### 3.8 Stromrichter gespeiste Gleichstrommaschinen

#### Prinzipschaltplan:



- mit  $L_g$  kann eine Glättungsdrossel eingefügt werden.
- Effektivwert der Phasenspannungen:  $U_1 = U_2 = U_3 = U_{ph}$ .
- die Erregerwicklung wird bei  $\Psi_f = \Psi_{fN} = \text{konst.}$  über einen ungesteuerten Netzgleichrichter gespeist (Pulszahl  $p = 2$  oder  $p = 6$ ). Die Spannungsanpassung erfolgt eventuell über einen Trafo. Der Erregerstrom ist bei der fremderregten Gleichstrommaschine relativ klein.
- bei der bisherigen Annahme  $i_A = I_A = \text{konst.}$  liegt natürlich kontinuierlicher Stromfluß vor, d.h. es kann kein Stromlücken auftreten. Für den Gleichspannungskreis gilt dann:



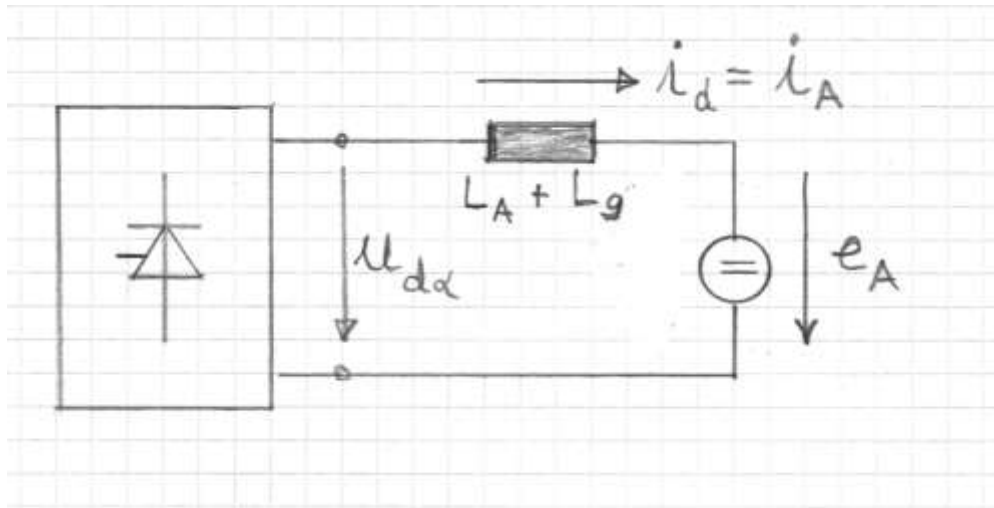
- Mit dem dargestellten **Einfachstromrichter** kann die Spannung  $U_{d\alpha}$  über den Steuerwinkel mit positiver oder negativer Polarität eingestellt werden. Der Strom  $I_{d\alpha}$  kann aber wegen der Ventile nur positiv sein. Daher können mit diesem Antrieb nur **2 Quadranten** realisiert werden. Beispiel: Aufzug mit durchziehender Last

## Verlauf des Laststromes bei kontinuierlicher Stromführung:

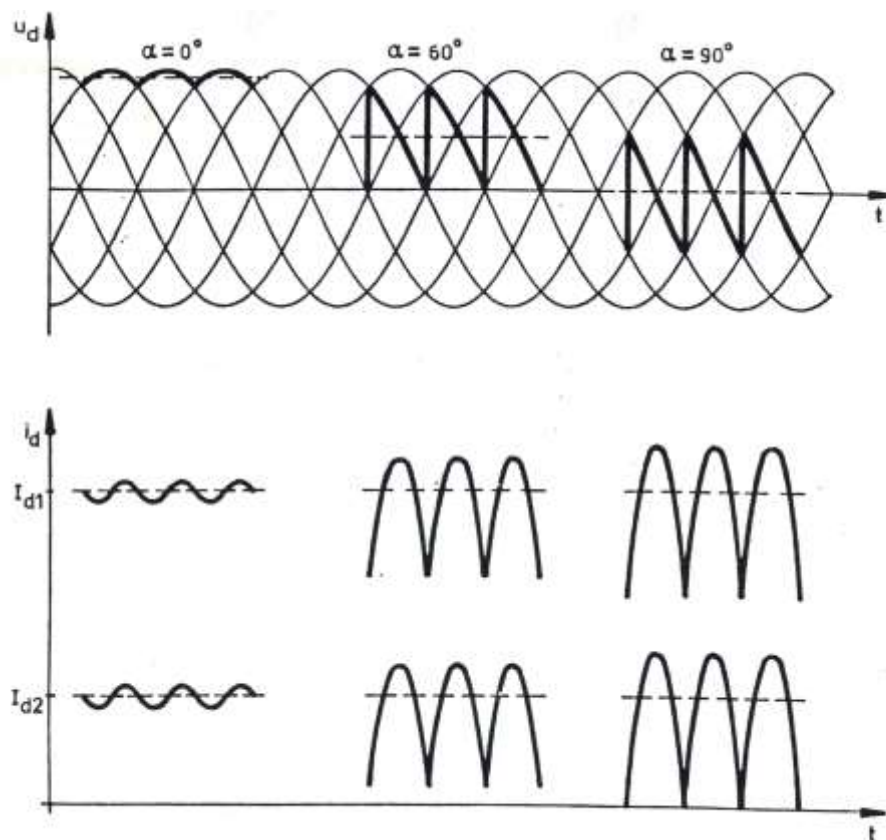
Von der Vorstellung, dass der Laststrom konstant ist wird nun abgerückt.  
 $i_d \neq \text{konst.}$ , aber kein Stromlücken.

### Ersatzschaltbild:

$R_A = 0$ ,  $\Psi_f = \Psi_{fN} = \text{konst.}$

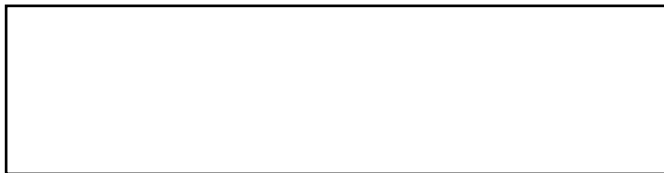


### Zeitlicher Verlauf des Laststromes:



### Zum Oberschwingungsgehalt des Stromes folgende Bemerkungen:

- der Oberschwingungsgehalt hängt vom **Steuerwinkel**  $\alpha$  ab. Bei  $\alpha = 90^\circ$  entsteht, verursacht vom Oberschwingungsgehalt der Gleichspannung  $U_d$ , der **maximale**, bei  $\alpha = 0^\circ$  der **minimale Oberschwingungsgehalt** des Stromes.
- der Oberschwingungsgehalt hängt von der **Pulszahl**  $p$  der Gleichspannung ab. Bei  $p = 6$  ergeben sich schon relativ günstige Verhältnisse.
- Die Amplituden der Stromüberschwingungen hängen von den beiden Induktivitäten  $L_A + L_g$  ab. Durch Vergrößerung der Glättungsinduktivität  $L_g$  lassen sich die Amplituden der Stromüberschwingungen verkleinern. Allerdings wird mit steigendem  $L_g$  die Dynamik des Antriebes verschlechtert.
- da  $i_A$  proportional zu  $m_M$  ist, wirkt sich der Oberschwingungsgehalt des Stromes auch auf das Drehmoment der Maschine aus. Es erfolgt aber von den Oberschwingungen kein Beitrag zum mittlerem Drehmoment (Nutzmoment)  $M_M$ .
- der Oberschwingungsgehalt ist unabhängig vom Mittelwert  $I_d = I_A$  des Laststromes.  $I_d = I_A = f(M_L)$ , d.h. die Belastung bestimmt bei stationärem Betrieb ( $n = \text{konst.}$ ) den Stromwert der Maschine.
- Vereinfacht Definition der Stromwelligkeit:

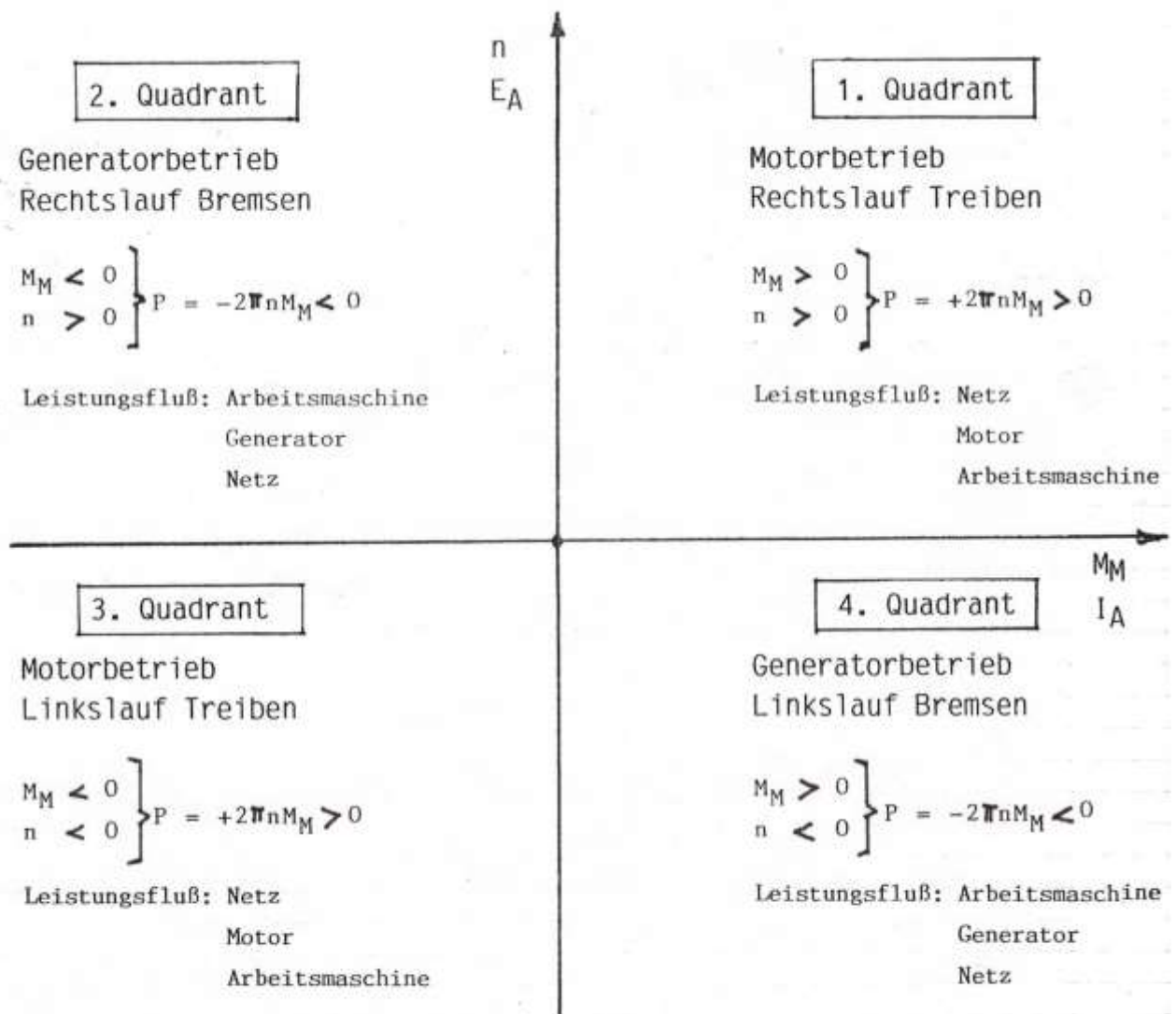


**Bemerkung:** wenn das Massenträgheitsmoment  $J_{\text{ges}}$  groß ist, wirken sich die Stromüberschwingungen, d.h. die Momenten-Oberschwingungen nur sehr gering als Drehzahl-Oberschwingungen aus.

### Stromlückgrenze:

Erreicht der Augenblickswert  $i_d = i_A$  den Wert 0, hat der Strom die Lückgrenze erreicht. Ein weiteres Absenken der Belastung des Motors, d.h. ein weiteres Absenken des Strommittelwertes  $I_d = I_A$  führt zum **Lückbetrieb** des Stromes. Beim Lückbetrieb müssen die Verhältnisse neu betrachtet werden. Es liegt kein kontinuierlicher Stromfluss mehr vor.

## Die 4 Quadranten der fremderregten Gleichstrommaschine ( $\psi_f = \text{Konst.}$ )



Eine Änderung der Stromrichtung im Motorkreis ist nur durch Umschalten des Ankerkreises **oder** durch einen gegenparallel geschalteten Stromrichter möglich.

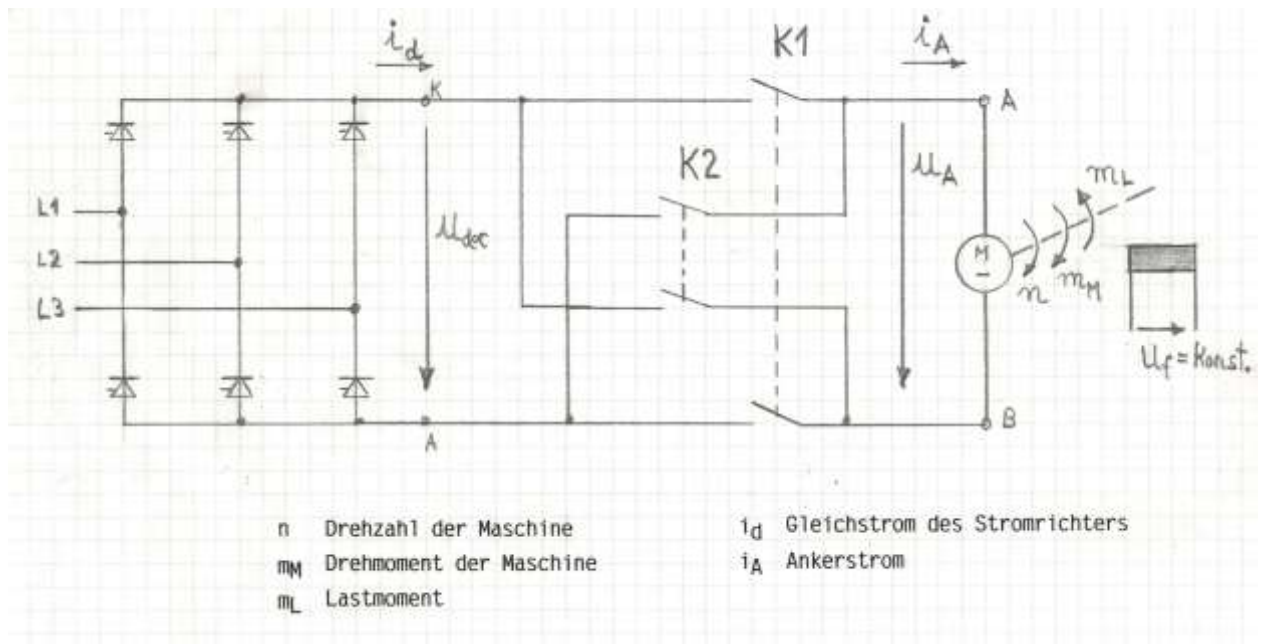
## Umschaltung des Ankerkreises bei Momentenumkehr

( $\Psi_f = \Psi_{fN} = \text{konst.}$ )

Bei  $n = \text{konst.}$  erfolgt ein Lastmomentenwechsel von:  $m_L = +M_{L1}$   
nach:  $m_L = -M_{L1}$

Damit ist ein Umschalten des Stromes notwendig von:  $i_A = +I_{A1}$   
nach:  $i_A = -I_{A1}$

Da  $n = \text{konst.}$  bleibt auch  $E_A = \text{konst.}$  Setzt man  $R_A = 0$  bleibt auch die Ankerspannung  $U_A = \text{konst.}$

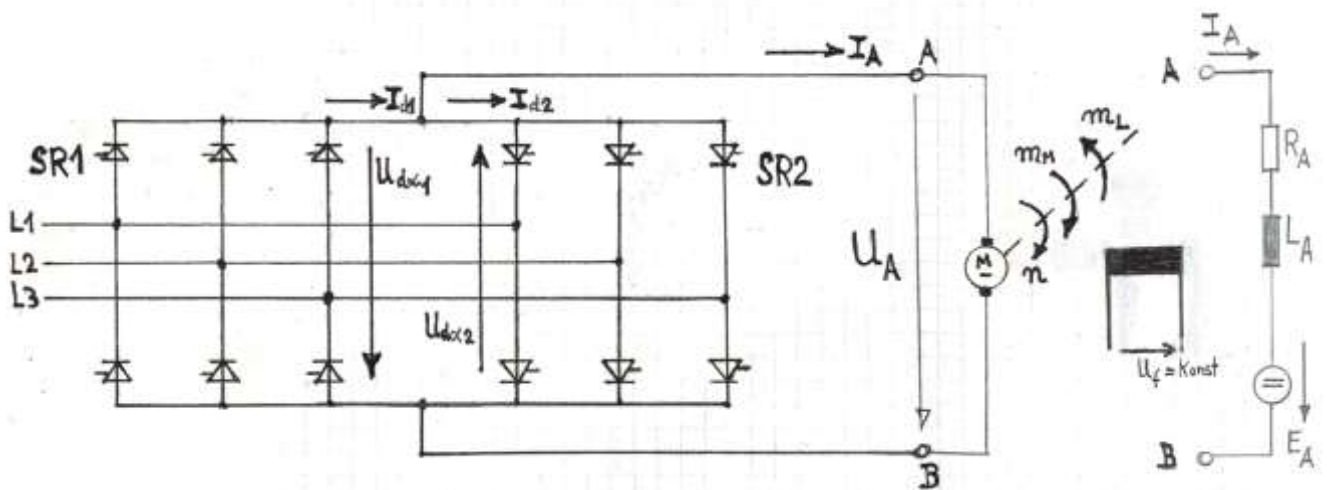


Das Umschalten erfolgt im stromlosen Zustand.

- Vorteil:**
- man vermeidet Kurzschlussströme
  - es treten keine induktiven Überspannungen auf
  - es können kleinere Schaltgeräte verwendet werden
- Nachteil:**
- beim Umschalten tritt eine stromlose und damit momentenfreie Pausenzeit auf. Umschaltzeit:  $t_p \approx 100 \text{ ms}$
  - für das Umschalten wird eine besondere elektronische Steuerung "Umschaltlogik" bzw. "Kommandostufe" benötigt.

## Kreisstromfreie, gegenparallele Drehstrombrückenschaltung

( $\Psi_f = \Psi_{fN} = \text{konst.}$ )



Zwei Einfachstromrichter **SR1** und **SR2** sind gegenparallel geschaltet. Es wird jeweils ein Stromrichter über Zündimpulse angesteuert, während der andere Stromrichter gesperrt ist. Anstatt der Umschaltung des Ankerkreises über Schaltgeräte werden die Stromrichter elektronisch (und damit schneller) umgeschaltet. Die stromlose und damit momentenfreie Pause kann dadurch wesentlich reduziert werden.



Das Umschalten erfolgt wieder über eine elektronische Steuerung ("Umschaltlogik", "Kommandostufe"), die ähnlich wie bei der Ankerkreisumschaltung funktioniert.

SR1 wird angesteuert, SR2 ist gesperrt:

$$I_A = + I_{d1}$$

$$U_A = + U_{d\alpha 1}$$

Betrieb im 1. und 4. Quadranten möglich

SR2 wird angesteuert, SR1 ist gesperrt:

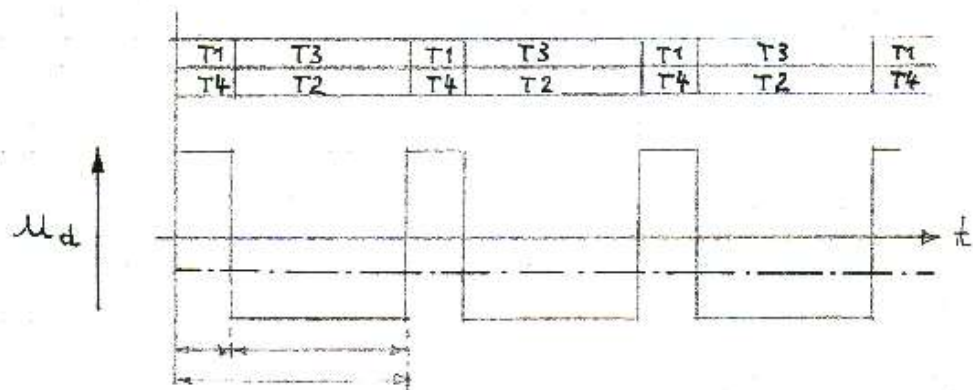
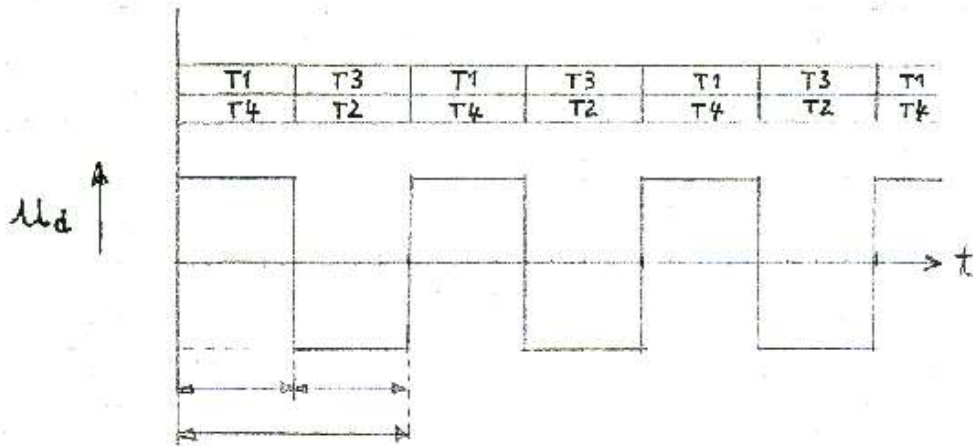
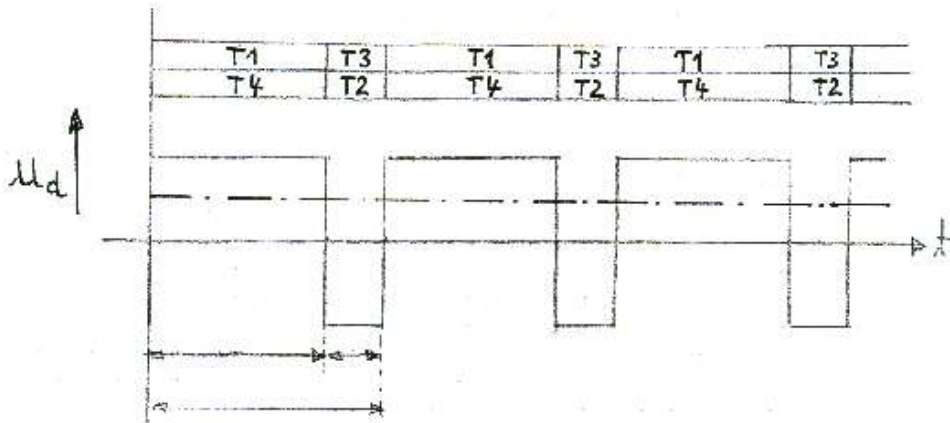
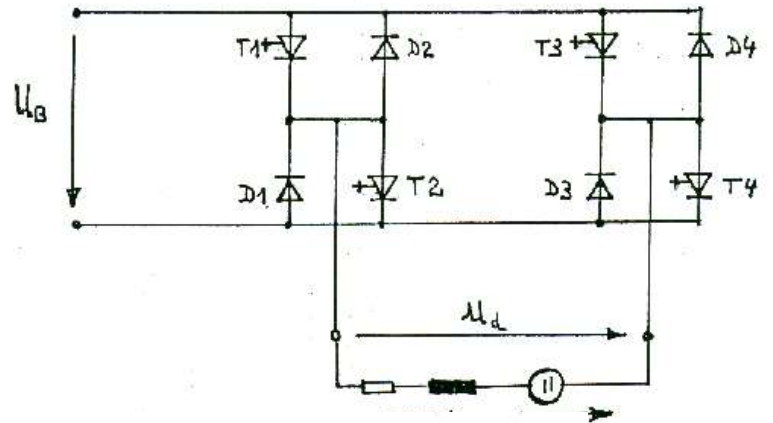
$$I_A = - I_{d2}$$

$$U_A = - U_{d\alpha 2}$$

Betrieb im 2. und 3. Quadranten möglich

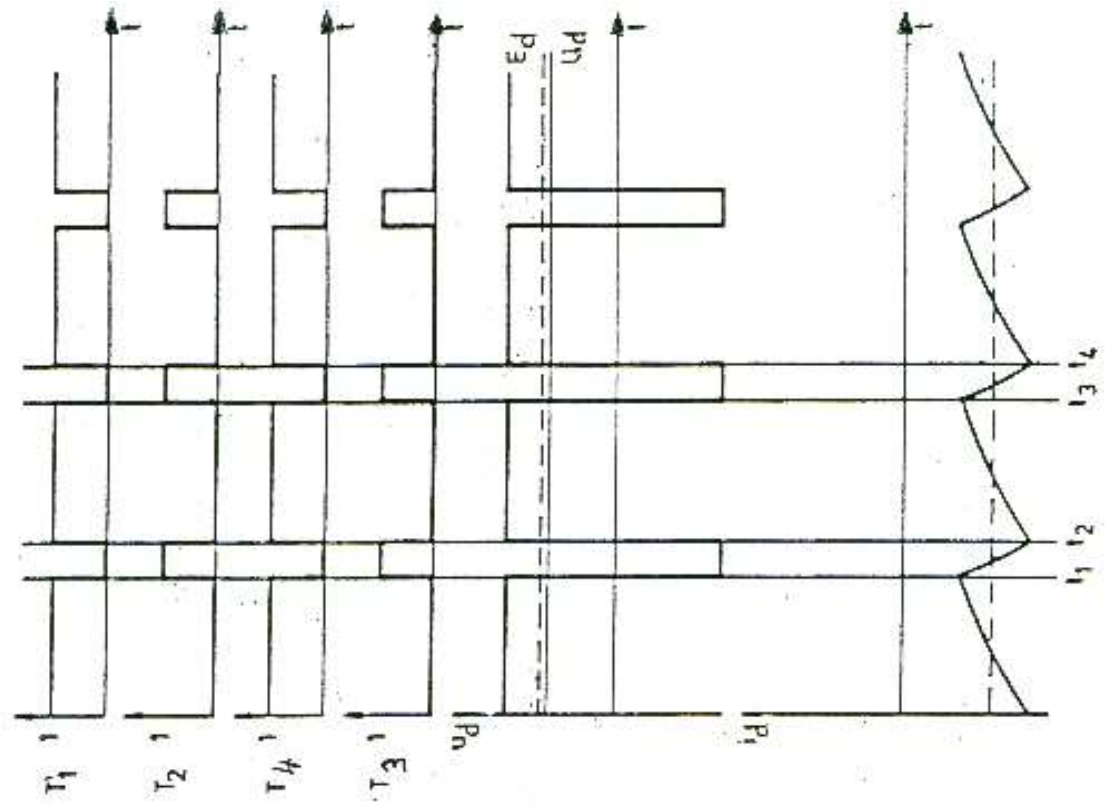
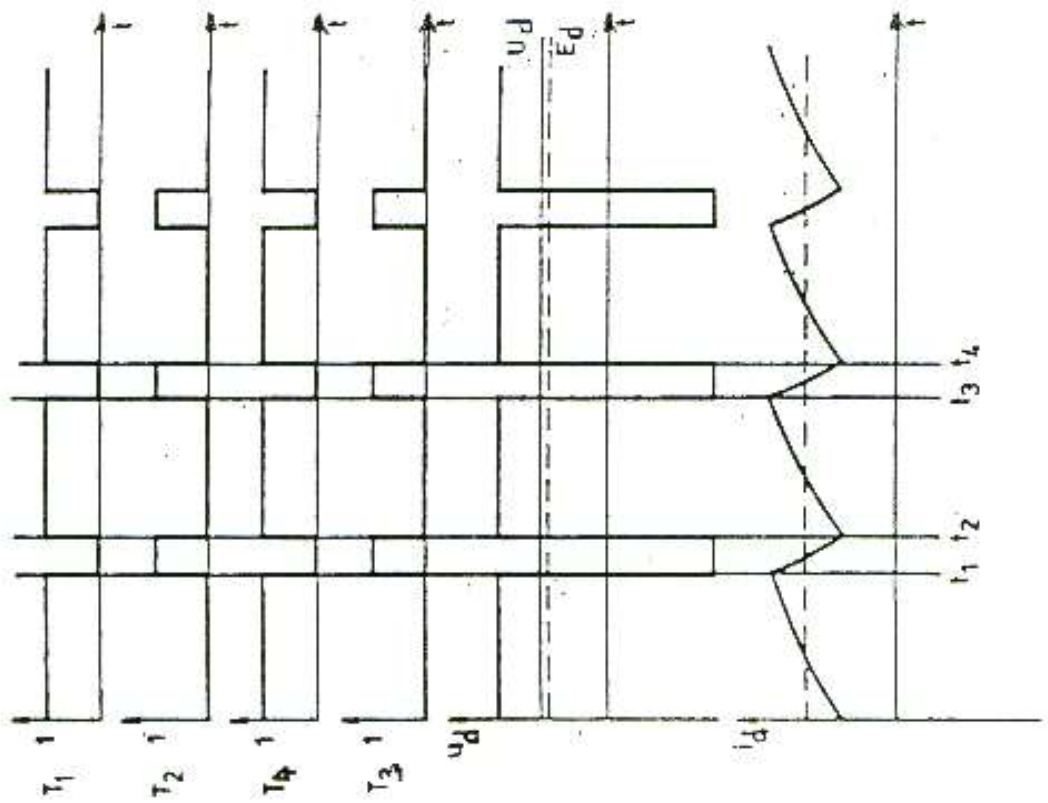
# Gleichstromsteller für Vierquadrantenbetrieb

Steuerverfahren :

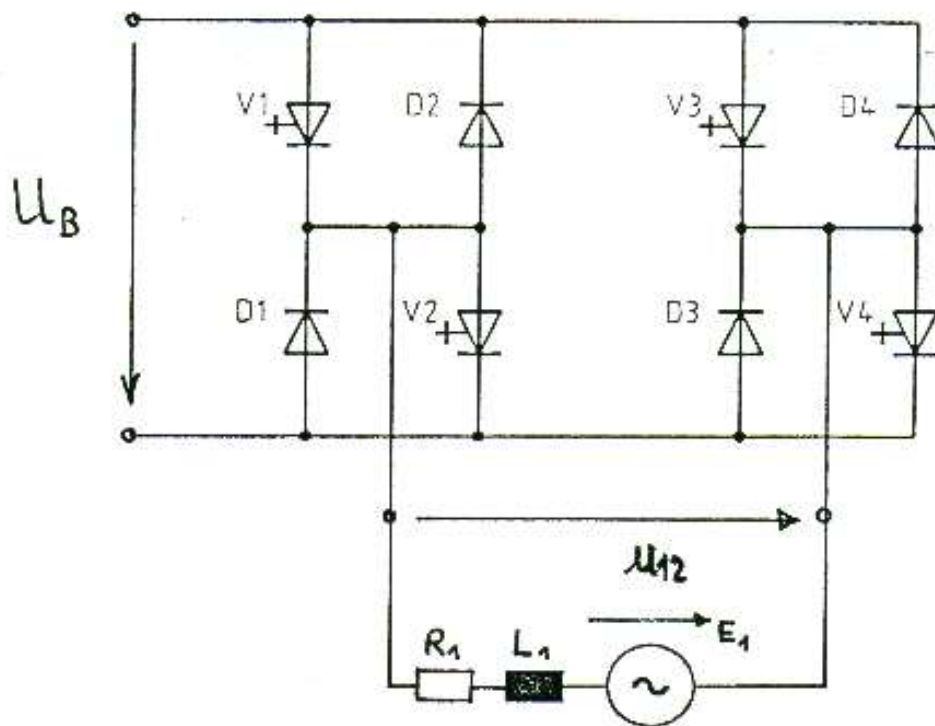




# Vierquadrantenbetrieb:



## Gleichstromsteller als einphasiger Spannungswechselrichter



Der Gleichstromsteller wird so angesteuert, dass am Ausgang eine blockförmige Wechselspannung mit einstellbarer Frequenz entsteht.

Als Last ist eine Wechselspannungsmaschine dargestellt. Der Strom in der Maschine bildet sich entsprechend der Reaktanz und der induzierten Gegenspannung der Maschine aus. Spannung und Strom weisen Oberschwingungen auf. Der Strom eilt, bei induktivem Charakter der Last, der Spannung nach.

