

3. Gleichstrommaschinen

Einsatzgebiete von Gleichstrommaschinen mit Stromrichterspeisung

Elektrisch fremderregte Gleichstrommotoren werden mit Stromrichterspeisung als drehzahlveränderbare Antriebe z. B. mit geregelter Drehzahl vielfältig eingesetzt:

- in der Industrie z. B. in Walzwerken, Prüfständen, Kranen, für Drahtziehen, Stanzen, Kunststoffspritzguss, Folien ziehen („Folienreckmaschine“), ...
- bei der elektrischen Traktion als U-Bahn-, Straßenbahn- und Vollbahnmotoren und als Antriebe in E-Autos,
- in Schiffen als Haupt- und Hilfsantriebe (z. B. U-Boot-Hauptantriebe), ...

Als drehzahlveränderbare Kleinmotoren werden sie eingesetzt

- als batteriebetriebene permanentmagneterregte Kleinmotoren in Automobilen (z. B. für Fensterheber, Sitzversteller, ...), als Tachogeneratoren, ...
- als wechselstromgespeiste elektrisch reihenschlusserregte Universalmotoren in vielen Haushaltsgeräten (z. B. Mixer, Staubsauger, ...) und in Gewerbebetrieben (z. B.: Bohrmaschinen, ...).

3.1 Funktionsweise der Gleichstrommaschine

a) Spannungsinduktion und Gleichrichtung

In Bild 3.1 ist der Aufbau einer zweipoligen elektrisch erregten Gleichstrommaschine mit dem ruhenden Stator, auch Ständer genannt (mit elektrisch erregtem magnetischen N- und S-Pol), dem rotierenden Rotor, auch Läufer oder Anker genannt (mit einer exemplarisch dargestellten Ankerspule und deren Kupferanschlussstücken, dem Kommutator) und den beiden ruhenden Kohlebürsten-Gleitkontakten dargestellt. Der **Läufer (Rotor, Anker)** muss aus geschichteten, isolierten Eisenblechen (lamellierter Eisenkern) aufgebaut sein, da er im Gleich-Magnetfeld B des Stators rotiert und daher Ummagnetisierungsverluste hat. Die Wirbelströme werden durch die Lamellierung unterbrochen und damit stark verringert. Der Läufer hat im Bild 3.1 zwei Nuten, in denen die beiden Spulenseiten der Ankerspule liegen. Er rotiert mit der Drehzahl n im zweipoligen Gleichfeld B , das durch die zwei ruhenden Hauptpole (N- und S-Pol) des Eisenstators (**Ständer, Stator**) erzeugt wird. Der Statoreisenkörper müsste wegen des Gleichfelds nicht geblecht ausgeführt sein, wird aber häufig doch lamelliert, um rasche Statorfeldänderungen bei Regelvorgängen ohne Statorwirbelströme zuzulassen.

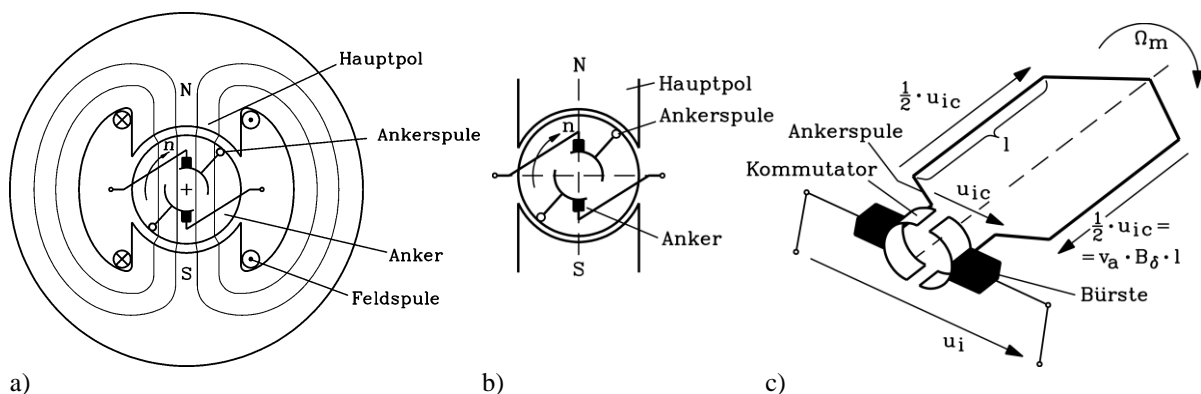


Bild 3.1: a) Prinzipdarstellung einer zweipoligen Gleichstrommaschine im axialen Schnitt mit nur einer repräsentativ dargestellten Ankerspule, b) vereinfachte Darstellung ohne die magnetischen Ständerrückschlussjoche, c) Schrägansicht der rotierenden Ankerspule ohne Läuferisenkörper, aber mit den rotierenden Kupferanschlussstücken (Kommutator) und den beiden ruhenden Plus- und Minus-Kohlebürsten-Gleitkontakten

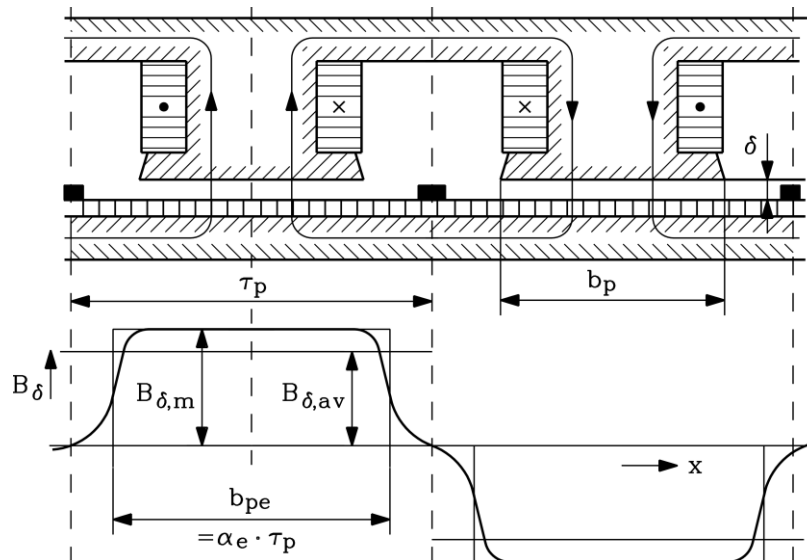


Bild 3.2: Axialer Schnitt der zweipoligen Gleichstrommaschine, lineare Abwicklung, Erzeugung des Luftspaltfelds B_δ und dessen Verlauf längs des Läuferumfangs

Im Bild 3.1 ist die Polzahl $2p = 2$, wobei p die „**Polpaarzahl**“ ist. Im **Luftspalt** mit der Weite δ (Bild 3.2) zwischen Ständer und Läufer tritt das Magnetfeld B als nahezu radial gerichtete Luftspalt-Flussdichte B_δ auf. Jeder Hauptpol mit der Polschuhbreite b_p trägt eine mit dem Feld-Gleichstrom I_f gespeiste Feld- oder Erregerspule, deren Wickelsinn von Pol zu Pol entgegengesetzt ist, so dass abwechselnd je ein N- und ein S-Pol entstehen. Mit der Windungszahl je Polspule $N_{f,Pol}$ und dem Feld- oder Erregerstrom I_f ergibt der Durchflutungssatz für eine geschlossene Kurve C (z. B. eine B -Feldlinie in Bild 3.1a) die magnetischen Feldstärken H_{Fe} im Eisen (s: Stator, r: Rotor) und im Luftspalt H_δ . Dabei hat die geschlossene Kurve C im Statorisen den Längenabschnitt $s_{Fe,s}$ und im Rotor den Längenabschnitt $s_{Fe,r}$.

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{s} = 2\Theta_f = 2N_{f,Pol}I_f = H_{Fe,s} \cdot s_{Fe,s} + H_{Fe,r} \cdot s_{Fe,r} + 2H_\delta \cdot \delta \quad (3.1)$$

Bei vereinfachender Annahme unendlich permeablen Eisen (= Vernachlässigung der Eisensättigung) $\mu_{Fe} \gg \mu_0$ ist $H_{Fe,s} \approx 0$, $H_{Fe,r} \approx 0$: $H_\delta \cdot \delta = \Theta_f$. Die unter der jeweiligen Polmitte auftretende maximale Luftspaltflussdichte ist demnach $B_\delta = \mu_0 \Theta_f / \delta = B_{\delta,m}$ (Bild 3.2). Die Luftspaltflussdichte nimmt zu den Polrändern hin wegen der dortigen Luftspaltvergrößerung ab und ist in der Mitte der Lücke zwischen den Polen Null, wo das Magnetfeld seine Polarität wechselt („**neutrale Zone**“). Die längs der Läuferumfangskoordinate x dargestellte Normalkomponente der Luftspaltflussdichte $B_\delta(x)$ mit dem Maximalwert $B_{\delta,m}$ hat je Pol (mit der **Polteilung** τ_p als Distanz zwischen zwei neutralen Zonen) den Mittelwert $B_{\delta,av}$. Dieser Mittelwert ist um den Faktor α_e („**ideelle**“ **Polbedeckung** $\alpha_e \approx 0.7$) kleiner als der Maximalwert: $B_{\delta,av} = \alpha_e \cdot B_{\delta,m}$. Mit der axialen Eisenlänge l erhalten wir den magnetischen Fluss pro Pol Φ .

$$\Phi = \int_{A_{Pol}} \vec{B} \cdot d\vec{A} = \int_{A_{Pol}} B_\delta \cdot dA = l \int_0^{\tau_p} B_\delta(x) \cdot dx = \alpha_e B_{\delta,m} \tau_p l \quad (3.2)$$

Die Radialkomponente $B_\delta(x)$ ist senkrecht auf die tangential gerichtete Umfangsgeschwindigkeit der Ankerspulenseiten v_a gerichtet. Die in die rotierende Ankerspule von Bild 3.1 durch Bewegungsinduktion je Spulenseite (Spulenseitenlänge l) induzierte Bewegungsfeldstärke $\vec{E}_b(x) = \vec{v}_a \times \vec{B}_\delta(x)$ ist wegen der Rechte-Hand-Regel in Richtung der Spulenseite orientiert und längs der Spulenseite konstant. Die bewegungsinduzierte Spannung je Spulenseite ist daher

$$u_{i,c}(x)/2 = \int_0^l \vec{E}_b(x) \cdot d\vec{s} = E_b(x) \cdot l = v_a \cdot B_\delta(x) \cdot l \quad . \quad (3.2a)$$

Da die Luftspaltweite δ im Vergleich zu Ständerinnen- und Läuferaußendurchmesser d_{si} , d_{ra} sehr klein ist ($d_{si} = 2\delta + d_{ra} \approx d_{ra}$), sind diese beiden nahezu gleich groß: $d_{si} \approx d_{ra}$. Daher ist die Geschwindigkeit der Spulenseiten als Umfangsgeschwindigkeit an der Läuferoberfläche $v_a = d_{ra} \cdot \pi \cdot n$ in guter Näherung

$$v_a \cong d_{si} \cdot \pi \cdot n \quad . \quad (3.2b)$$

Die induzierte Spannung in der Spule $u_{i,c}(x) = (u_{i,c}/2) + (u_{i,c}/2) = 2v_a \cdot B_\delta(x) \cdot l$ ist eine Wechselspannung (Bild 3.3) mit der Frequenz

$$f_a = n \cdot p = 1/T \quad , \quad (3.3)$$

da die Spulenseiten abwechselnd unter dem N- und S-Pol vorbei bewegt werden, also der Ort x der Spulen am Umfang gemäß $x = v_a t$ mit der Zeit zunimmt. Der zeitliche Verlauf der induzierten Spulenwechselspannung $u_{i,c}(t)$ über t ist wegen (3.2a) zum räumlichen Verlauf von $B_\delta(x)$ über x proportional: $u_{i,c}(x) = u_{i,c}(v_a t) = u_{i,c}(t) = 2v_a \cdot B_\delta(x) \cdot l$ (Bild 3.3). Ihr Scheitelwert ist wegen Bild 3.2 $\hat{U}_{i,c} = 2 \cdot v_a \cdot B_{\delta,m} \cdot l$, und ihr Mittelwert je Halbperiode $u_{i,c,av} = 2 \cdot v_a \cdot B_{\delta,av} \cdot l$. Die Ankerspule ist mit ihren beiden Enden an je ein Kupfersegment (Kommutatorlamelle) mit dazwischen liegender Isolierung (i. A. aus Glimmer) angeschlossen. Dieses Kupfer-Glimmer-Gebilde heißt **Kommutator**, auf dem je eine im Stator fixierte Plus- und Minus-**Kohlebürste** gleiten. Diese ruhenden Bürsten greifen stets die induzierte Spannung in einer Polaritätsrichtung ab, da sie ihre Lage relativ zu den Statorpolen nicht ändern (Bild 3.1 c). Sie richten daher die induzierte Spannung auf mechanische Weise gleich.

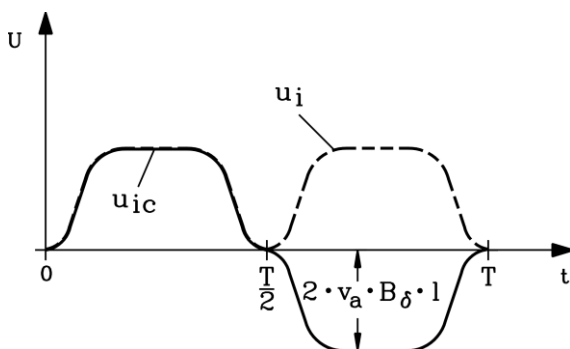


Bild 3.3: Spulenwechselspannung $u_{i,c}(t)$ und ihre Gleichrichtung mit dem Kommutator $u_i(t)$

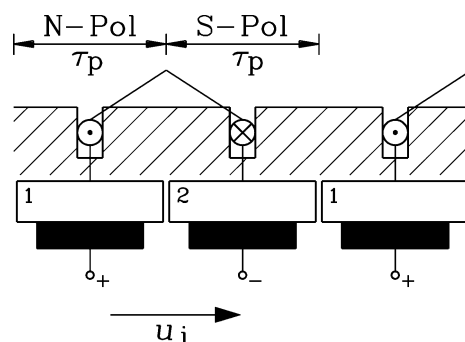


Bild 3.4: Abgewinkelte Darstellung von Läufer und Ankerspule von Bild 3.1 mit den Kommutatorlamellen 1 und 2

Die zu $u_{i,c}(t)$ gehörige gleichgerichtete induzierte Spannung $u_i(t)$ tritt zwischen der Plus- und Minus-Bürste auf (Bild 3.4). Hat die Ankerspule N_c Windungen, so erhöht sich die induzierte Spannung um N_c . Der zeitliche Mittelwert dieser gleichgerichteten Spannung ist $u_{i,av}$ (3.4), während der reale Verlauf zwischen Null und dem Maximalwert $u_{i,m}$ (3.5) schwankt.

$$u_{i,av} = N_c \cdot 2 \cdot v_a \cdot B_{\delta,av} \cdot l = N_c \cdot 2 \cdot v_a \cdot \alpha_e B_{\delta,m} \cdot l \quad (3.4)$$

$$u_{i,m} = N_c \cdot 2 \cdot v_a \cdot B_{\delta,m} \cdot l \quad (3.5)$$

b) Glättung der gleichgerichteten Spannung

Die eine Ankerspule in Bild 3.4 belegt mit beiden Spulenseiten die Nuten in derselben Höhe (derselben „Schicht“) als **Einschichtwicklung**. Das zugehörige elektrische **Ersatzschaltbild** zeigt Bild 3.5a, wo über die Kohlebürsten ein äußerer Belastungswiderstand R angeschlossen ist, so dass u_i den Ankerstrom i_a treiben kann. Dies ist der einfachste Fall eines elektrisch fremderregten Gleichstromgenerators, dessen Läufer von z. B. einer Turbine mechanisch mit der Drehzahl n angetrieben wird, aus einer Gleichstromfremdquelle I_f elektrisch erregt wird und im Belastungswiderstand R die zugeführte mechanische Leistung als elektrische Verlustleistung in Wärme umsetzt. Der gleichgerichtete äußere Ankerstrom i_a fließt in der Spule als Spulenwechselstrom i_s mit der Amplitude I_s im Erzeuger-Zählpeilsystem gegen die Richtung von u_i (Bild 3.5a, Bild 3.6a) und bildet mit dem Luftspaltfeld B eine *Lorentz-Kraft* F , die gegen die Ankerumfangsgeschwindigkeit v gerichtet ist, also bremsend wirkt. Würde statt dem äußeren Widerstand R eine äußere Gleichspannungsquelle $U > u_i$ angeschlossen werden, so kehrt sich die Ankerstromrichtung i_a um. Der Strom fließt in Richtung von u_i (Bild 3.6b) und bildet eine *Lorentz-Kraft* mit dem Luftspaltfeld, die in Richtung der Ankerumfangsgeschwindigkeit wirkt, den Läufer also antreibt, was dem Motorbetrieb entspricht. Damit ist die Gleichstrommaschine prinzipiell funktionsfähig, die mit doppelter Ankerfrequenz stark welligen Größen „Gleichspannung“ und „Gleichstrom“ aber technisch „unschön“. Deshalb wird der Anker mit mehr Spulen ausgestattet, um geglättete Gleichgrößen zu erzeugen. Zunächst kann bei zwei Ankernten eine zweite Ankerspule parallel zur ersten als **Zweischichtwicklung** (Ober- und Unterschicht in der Nut) eingelegt werden.

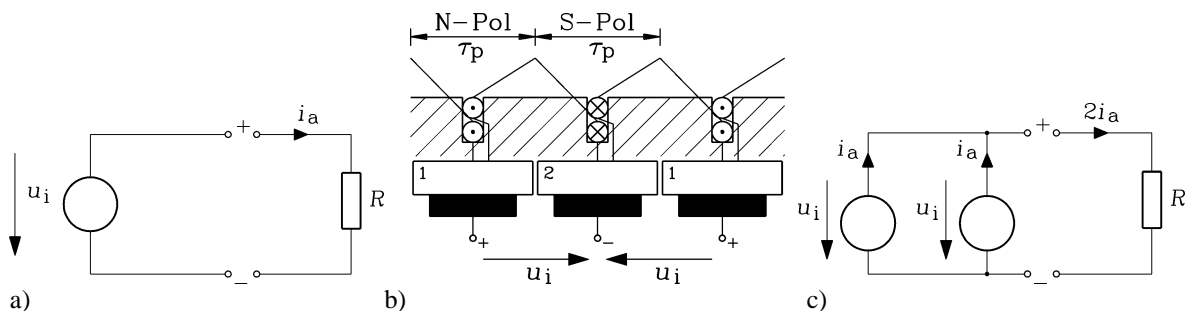


Bild 3.5: a) Elektrisches Ersatzschaltbild der Ankerspule von Bild 3.4 mit einem äußeren Belastungswiderstand R , positive äußere Stromrichtung bzgl. R im Verbraucher-Zählpeilsystem, bzgl. u_i im Erzeuger-Zählpeilsystem, b) Wie Bild 3.4b, jedoch zwei statt einer Ankerspule in den beiden Nuten als Zweischichtwicklung, c) zugehöriges Ersatzschaltbild

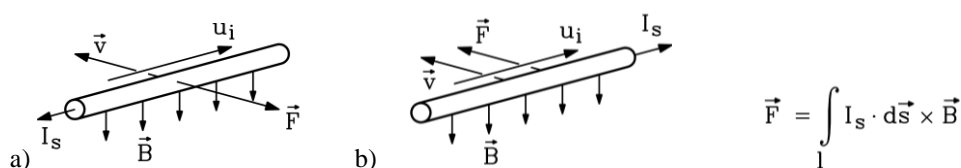


Bild 3.6: Lorentz-Kraft F auf eine Ankerspulenleiter im a) Generatorbetrieb, b) Motorbetrieb

In diese wird dieselbe Spannung induziert. Wegen der Parallelschaltung ist die Gesamtspannung an den Bürsten dieselbe wie bei einer Ankerspule, aber der äußere Ankerstrom ist doppelt so groß. An der welligen Kurvenform $u_i(t)$ Bild 3.3 hat sich noch nichts geändert. In Bild 3.8a ist diese Kurvenform für einen idealisiert rechteckförmigen Luftspaltfeldverlauf Bild 3.2, wo das Feld im Bereich des ideellen Polbogens $\alpha_e \tau_p$ den Maximalwert $B_{\delta,m}$ hat und dazwischen („Pollücke“) Null ist, idealisiert dargestellt. Wird jedoch die Anzahl der Nuten auf vier verdoppelt, können vier Spulen eingelegt werden, wovon je zwei (Spule 1 und 2 bzw. Spule 3 und 4) gemäß Bild 3.7a in Serie und mit den jeweils anderen beiden parallel geschaltet sind. Spulen 2 und 4 erhalten die induzierte Spannung gegenüber 1 und 3 um eine Viertel Periode $T/4$ zeitversetzt induziert, da sie um eine halbe Polteilung am Umfang versetzt angeordnet sind. Die Spannungssumme von Spule 1 und 2 bzw. 3 und 4 hat gemäß Bild 3.8b eine Welligkeit mit der Periode $T/4$ (allgemein T_c) und die Welligkeitsamplitude ist zwar absolut gleich groß, aber relativ (bezogen auf den Spannungsmittelwert) nur halb so groß.

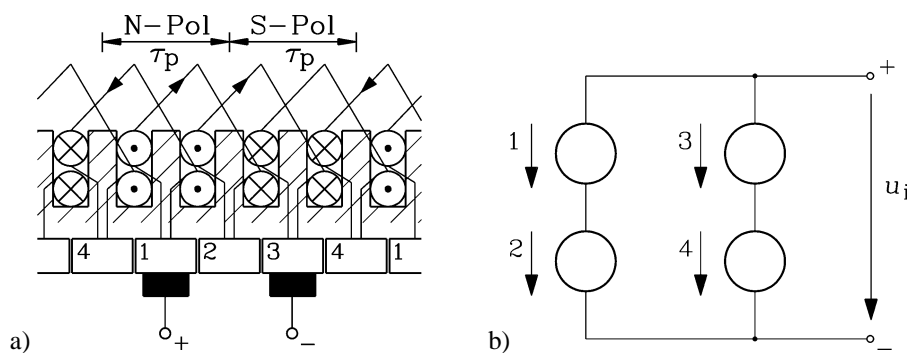


Bild 3.7: a) Vier Ankerspulen als Zweischichtwicklung in abgewickelter Darstellung, b) zugehöriges Ersatzschaltbild

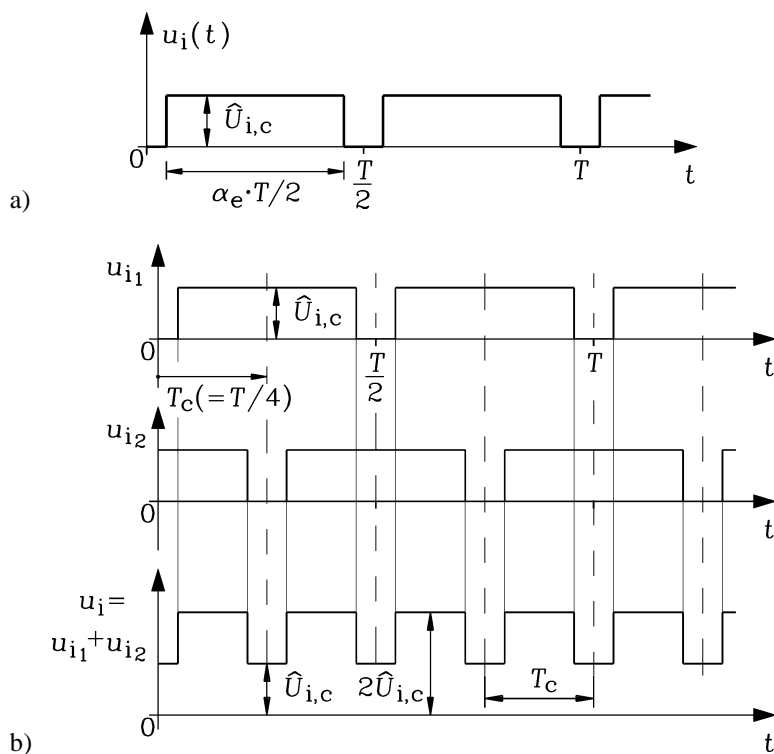


Bild 3.8: Idealisierter Verlauf der welligen gleichgerichteten Spannung u_i zwischen Plus- und Minus-Kohlebürste a) bei einer Ankerspule (vgl. den realen Verlauf Bild 3.3) als Einschichtwicklung bzw. zwei Ankerspulen als Zweischichtwicklung, b) bei vier Ankerspulen als Zweischichtwicklung (siehe Bild 3.7)

Werden gemäß Bild 3.9a mehr als zwei Ankerspulen in Serie geschaltet (z. B. je Pol $K/(2p) = 6$) und an den Spulenden mit weiteren Kupfergleitstücken („Kommutator-Lamellen“), die den Kommutator bilden, versehen, so verringert sich die Welligkeit entsprechend. Es werden dann K Ankernuten und K Kommutatorlamellen benötigt. In den Spulen wird die in Bild 3.3 dargestellte Spannung nacheinander induziert, da die Spulen räumlich nacheinander (also zeitlich versetzt) das Luftspaltfeld durchlaufen. Die Serienschaltung dieser Spannungen glättet den Verlauf der an den Kohlebürsten abgegriffenen Gleichspannung (Bild 3.9b).

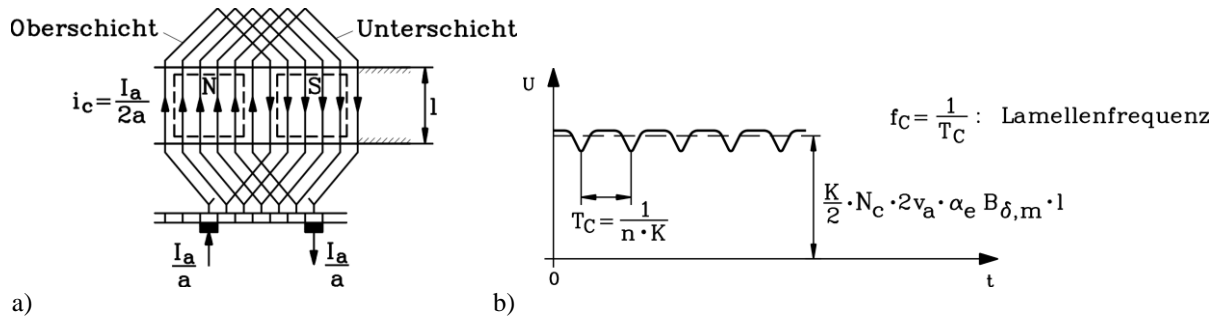


Bild 3.9: a) Abgewickelte Zweiseicht-Ankerwicklung mit Serienschaltung von sechs Ankerspulen pro Pol; Blick von oben auf Hauptpole (gestrichelt) und Kommutator, b) Glättung der gleichgerichteten Spannung u_i einer zweipoligen Gleichstrommaschine ($2p = 2$) durch Serienschaltung von $K/(2p) = K/2 = 4$ Ankerspulen. Die Restwelligkeit ist noch ziemlich groß, während sie bei realen Maschinen mit typisch 30 Spulen in Serie entsprechend sehr viel kleiner ist.

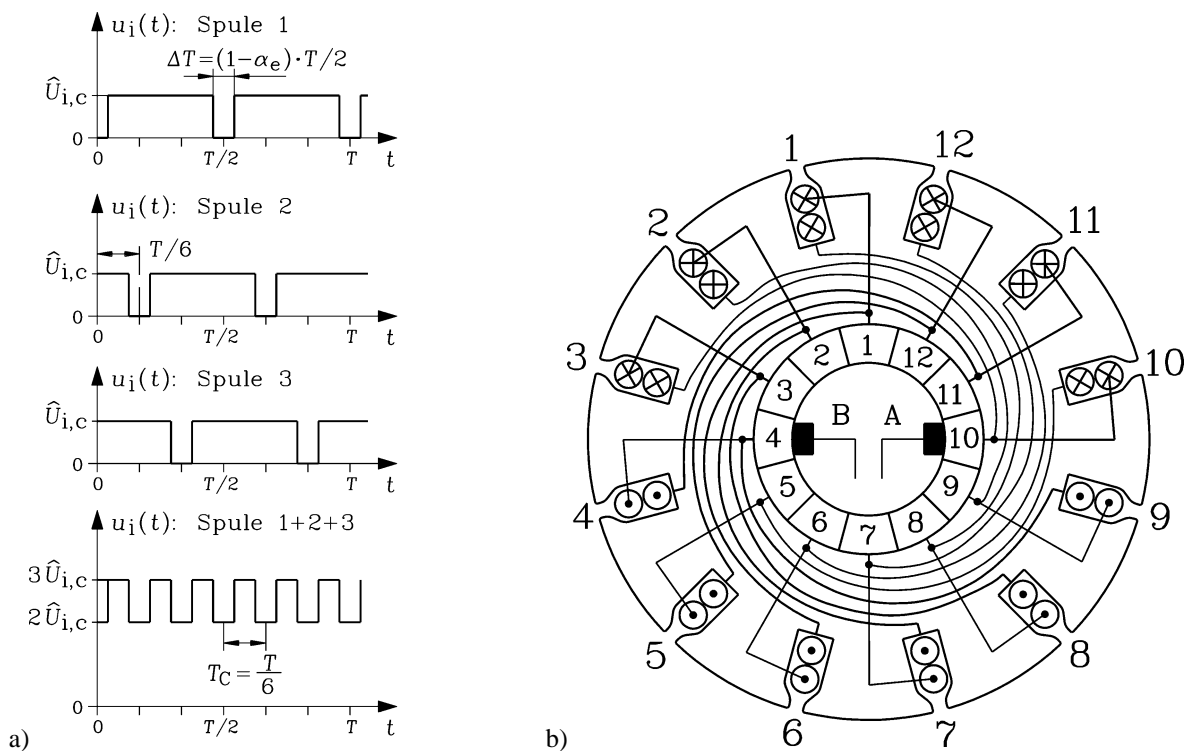


Bild 3.10: a) Schematische Darstellung der welligen Ankerspannung bei drei Ankerspulen in Serie pro Pol, b) Vollständiges Zweiseicht-Wicklungsschema einer zweipoligen Schleifenwicklung mit $K = 12$ Ankerspulen

Zwischen der **Plus- und Minusbürste** liegen in Bild 3.10a $K/(2p) = 3$ Ankerspulen in Serie pro Pol. Die Welligkeit hat Allgemein die Periode $T_c = 1/(n \cdot K)$ mit $f_c = 1/T_c$ als Lamellenfrequenz. Es werden K Kommutatorlamellen und $Q_r = K$ Ankernuten (Bild 3.10a bei $2p = 2$: $Q_r = K = 6$) benötigt. In Bild 3.9a mit $K/(2p) = 6$ Ankerspulen in Serie lassen sich auf Grund der Zweiseichtwicklung weitere sechs Spulen durch Fortsetzung des Schemas

einfügen, so dass der vollständige Ankerwicklungszug wie in Bild 3.7 als **Schleifenwicklung** in sich geschlossen ist.

Fazit:

Bei $2p = 2$ und daher $K/(2p) = K/2$ Spulen in Serie je Pol sind im Rotor K Spulen in $Q_r = K$ Nuten vorhanden, die mit je zweimal $K/2$ Spulen parallel an der Plus- und Minusbürste anliegen. Der Mittelwert der nunmehr nahezu ideal glatten Spannung zwischen den beiden Bürsten ist (3.6).

$$U_i = \frac{K}{2} \cdot u_{i,c,av} = \frac{K}{2} \cdot N_c \cdot 2v_a \cdot \alpha_e B_{\delta,m} \cdot l \quad (3.6)$$

Mit dem **magnetischen Fluss pro Pol** (3.2) wird (3.6) in (3.7) umgeformt.

$$2p = 2: U_i = \frac{K}{2} \cdot N_c \cdot \frac{2v_a}{\tau_p} \cdot \Phi \quad (3.7)$$

Beispiel 3.1-1:

Induzierte Spannung in einem Kleinmotor, $n = 10\,000/\text{min}$:

Statorinnendurchmesser $d_{si} = 7$ cm, Polzahl $2p = 2$, Rotorlänge $l = 7$ cm, Luftspalt-Flussdichte-Maximum $B_{\delta,m} = 0.75$ T, Windungszahl je Ankerspule $N_c = 20$, $K = 12$:

Polteilung $\tau_p = 7\pi/2 = 11$ cm, $v_a = 0.07 \cdot \pi \cdot 10000/60 = \underline{36.65\text{m/s}} = 131.9\text{km/h}$,

Fluss pro Pol: $\Phi = \alpha_e \cdot \tau_p \cdot l \cdot B_{\delta,m} = 0.7 \cdot 0.11 \cdot 0.07 \cdot 0.75 = \underline{0.004}$ Wb

$U_i = (K/2) \cdot N_c \cdot (2v_a / \tau_p) \cdot \Phi = (12/2) \cdot 20 \cdot (2 \cdot 36.65 / 0.11) \cdot 0.004 = \underline{\underline{323.3}}$ V

Beispiel 3.1-2:

Vollständiges Zweischicht-Wicklungsschema eines $2p = 2$ -poligen Kleinmotorankers mit $K = 12$ Kommutatorsegmenten und 12 Spulen in $Q_r = 12$ Nuten:

In Bild 3.10b liegen zwischen der Plus- und Minusbürste A und B die Spulen so, dass gerade Spule 4 und 10 kontaktiert wird. Das Wicklungsschema kann nachverfolgt werden, indem man den Spulen folgt. Beginnend bei der 1. Spule: Deren eine Spulenseite liegt in Nut 1, Oberschicht (OS) und geht über die (nicht dargestellte Stirnverbindung, siehe Bild 3.9a) zur zweiten Spulenseite in Nut 7, Unterschicht (US) und dann zum Kommutatorsegment 2. Hier beginnt (in Serie geschaltet) die 2. Spule, die in Nut 2, OS und Nut 8, US, liegt und an Kommutatorsegment 3 endet. Die weitere Serienschaltung ist: 3. Spule: 3 OS – 9 US, 4. Spule: 4 OS – 10 US, 5. Spule: 5 OS – 11 US, 6. Spule: 6 OS – 12 US, 7. Spule: 7 OS – 1 US, 8. Spule: 8 OS – 2 US, 9. Spule: 9 OS – 3 US, 10. Spule: 10 OS – 4 US, 11. Spule: 11 OS – 5 US, 12. Spule: 12 OS – 6 US. Diese Spule endet an Kommutatorsegment 1, wo wieder die 1. Spule beginnt: 1 OS – 7 US usw. Es ergibt sich ein in sich geschlossener Schleifenwicklungszug, der durch die Kontaktierung der Bürsten A und B in zwei parallele Zweige geteilt wird, die jede für sich die induzierte Spannung (3.6) aufweist.

3.2 Ankerwicklung

Gemäß Bild 3.10b wird die Ankerwicklung als Zweischichtwicklung ausgeführt, so dass in jeder Ankernut zwei Spulenseiten von zwei unterschiedlichen Spulen gemeinsam übereinander liegen. Die untere Spulenseite bildet die „**Unterschicht**“, die obere die „**Oberschicht**“ (Bild 3.12a). Die Darstellung Bild 3.10b ist unhandlich und wird daher in abgewickelter Form Bild 3.11a verwendet. Meist werden mehrere Spulen (z. B. $u = 3$)

nebeneinander in eine Nut gelegt (Bild 3.12b), so dass je Nut $2u$ Spulenseiten mit je N_c Windungen liegen. Es sind insgesamt K Spulen im Anker vorhanden, die an K Kupferlamellen des Kommutators angeschlossen sind. Die zwei Gruppen zu je $K/2$ Spulen in Serie bei zweipoligen Maschinen bilden zwei parallele elektrische Pfade mit der jeweils gleichen induzierten Spannung U_i . Die **Anzahl der parallelen Ankerzweige** $2a = 2$ ist somit gleich groß wie die Anzahl der Pole $2p = 2$. Bei mehr als 2 Polen wird das Wicklungsschema einfach fortgesetzt (Bild 3.11b für $2p$ Pole), bis sich der Wicklungszug wieder schließt. Wegen der Polfolge N-S-N-S... wird auch die induzierte Spannung je Pol $+U_i, -U_i, +U_i, -U_i, \dots$ über zusätzliche Plus- und Minus-Kohlebürsten im Abstand von je einer Polteilung parallel geschaltet. In Bild 3.11b wären dies bei $2p = 6$ für eine sechspolige Anordnung drei Plus- und die drei Minusbürsten, die elektrisch jeweils verbunden sind, so dass nach außen hin am Klemmenbrett der Maschine insgesamt ein Plus- und ein Minusanschluss für die Ankerwicklung entsteht, welche $2a = 2p = 6$ parallele Wicklungszweige aufweist. Zwischen zwei benachbarten Bürsten liegen $K/(2a) = K/(2p)$ Ankerspulen in Serie. Eine ausgeführte 6-polige Schleifen-Zweischichtwicklung in abgewickelter Darstellung zeigt Bild 3.13.

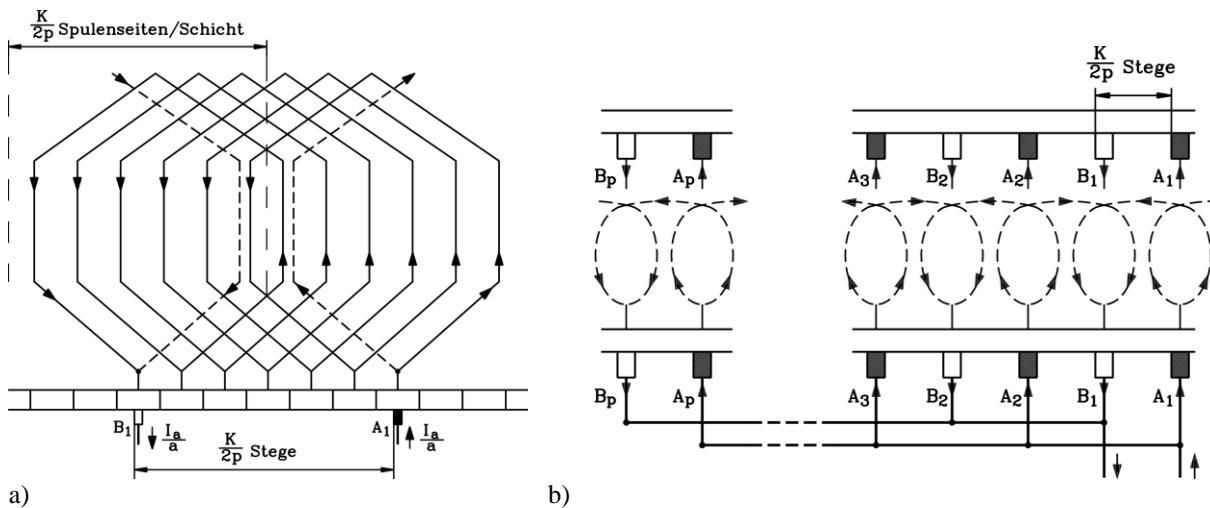


Bild 3.11: a) Zweischicht-Wicklungsschema für zwei Pole einer Schleifenwicklung mit $K/(2p) = 12$ Ankerspulen in abgewickelter Darstellung. Es sind nur 6 der 12 Spulen dargestellt (links: Oberschichtspulenseiten, rechts: Unterschichtspulenseiten), b) Fortsetzung des Wicklungsschemas a) für $2p > 2$

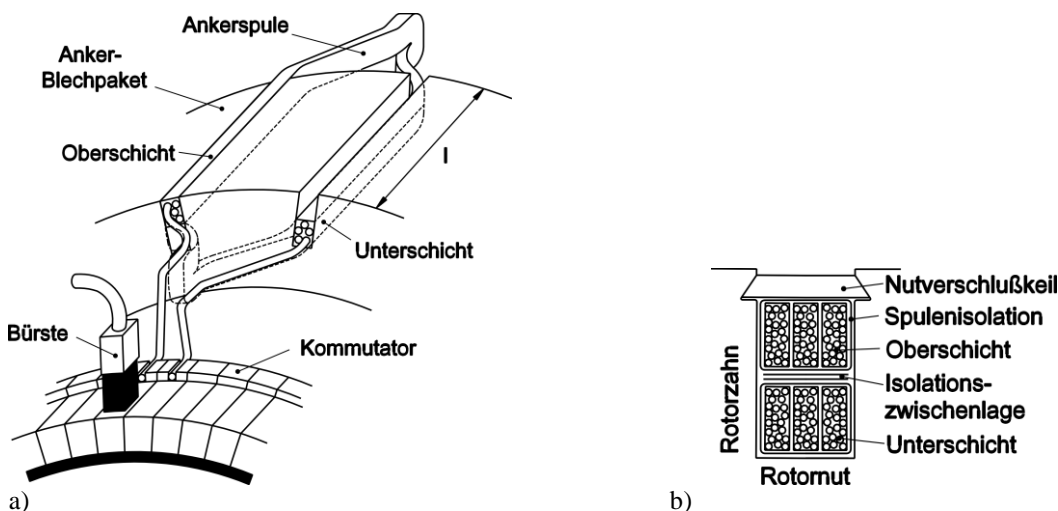


Bild 3.12: Ankerspulen in Läuferfalten der Gleichstrommaschine
 a) Anschlüsse einer mehrwichtigen Ankerspule ($N_c > 1$) an benachbarten Kommutatorlamellen
 b) Querschnitt durch eine Anker- (Rotor-)nut (Rotornut): 2 Schichten, $u = 3$ Spulen/Schicht, $N_c = 23$ Windungen je Spule, somit $2 \times 3 \times 23$ Leiter/Nut

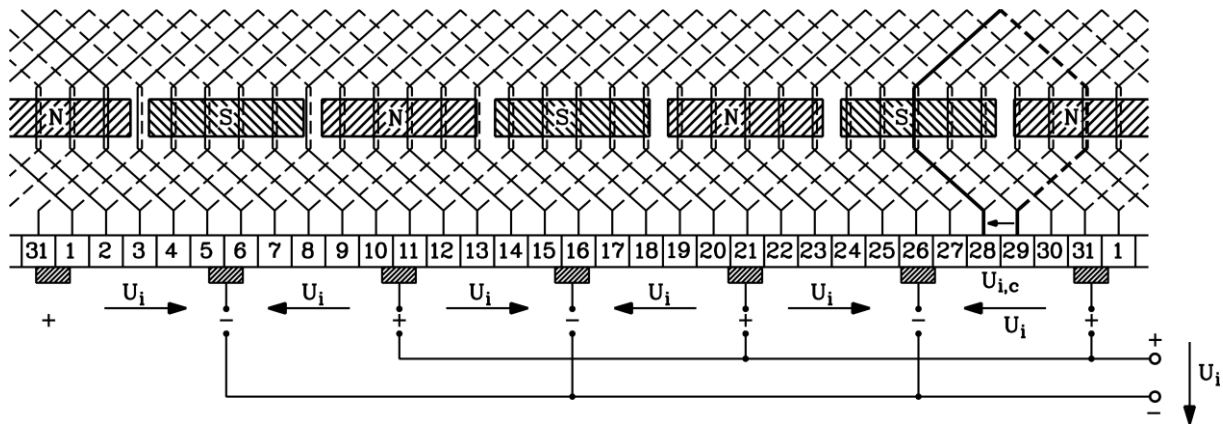


Bild 3.13: Schleifenwicklung einer 6-poligen Gleichstrommaschine (abgewinkelte Darstellung, volle Linien: Oberschicht, gestrichelt: Unterschicht), 6 parallele Zweige $2a = 6$: je 3 Bürsten parallel

Beispiel 3.2-1:

Kenngrößen einer Ankerwicklung:

Windungszahl je Ankerspule $N_c = 5$, Anzahl der Spulenseiten je Läufernut und Schicht: $u = 3$

Anzahl der Läufernuten: $Q = 30$, Polzahl = Anzahl der parallelen Ankerzweige: $2p = 2a = 4$:

- Anzahl der Kommutatorlamellen und Ankerspulen: $K = Q \cdot u = 30 \cdot 3 = 90$
- Anzahl der Spulenseiten je Nut: $2 \cdot u = 2 \cdot 3 = 6$
- Anzahl der Leiter am Läuferumfang: $z = 2 \cdot N_c \cdot K = 2 \cdot 5 \cdot 90 = 900$

Aus (3.7) folgt mit $K/(2a)$ Ankerspulen in Serie zwischen zwei benachbarten Bürsten die **induzierte Gleichspannung (3.8)**.

$$U_i = \frac{K}{2a} \cdot N_c \cdot \frac{2v_a}{\tau_p} \cdot \Phi = \frac{K}{2a} \cdot N_c \cdot (2 \cdot 2pn) \cdot \Phi = 2KN_c \cdot \frac{p}{a} \cdot n\Phi = z \cdot \frac{p}{a} \cdot n \cdot \Phi \quad (3.8)$$

Wird die mechanische Drehzahl n durch die mechanische Kreisfrequenz $\Omega_m = 2\pi n$ ersetzt, so folgt mit der **Maschinenkonstante k** (3.10) die **Merkformel (3.9)**.

$$U_i = k \cdot \Omega_m \cdot \Phi \quad (3.9)$$

$$\text{Maschinenkonstante } k = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{z \cdot p}{a} \quad (3.10)$$

Beispiel 3.2-2:

Vierpolige Gleichstrommaschine, Daten von Bsp. 3.2-1:

$$n = 4500/\text{min}, \Phi = 0.008 \text{ Wb}, z = 900, p = a = 2: U_i = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{900 \cdot 2}{2} \cdot (2\pi \frac{4500}{60}) \cdot 0.008 = \underline{\underline{540 \text{ V}}}$$

3.3 Ankerstrom und elektromagnetisches Drehmoment

Aus Bild 3.7b folgt mit (3.9) das **Ersatzschaltbild** Bild 3.14a der Ankerwicklung als Gleichspannungsquelle mit dem Innenwiderstand als *ohm'schen* Widerstand der Ankerwicklung R_a , wobei die Plus- und Minus-Klemme die Bürsten der Gleichstrommaschine sind. Im Generatorbetrieb fließt daher außen ein **Ankergleichstrom I_a** , wenn diese Wicklung mit einem OHM'schen Widerstand R belastet wird. In der Ankerwicklung selbst teilt sich dieser Ankerstrom auf die $2a$ parallelen Zweige auf $I_c = I_a/(2a)$ und ist – wie die induzierte

Spulenspannung – ein **Wechselstrom** $i_c(t)$, der je parallelem Ankerzweig zwischen den Werten $+I_a/(2a)$ und $-I_a/(2a)$ mit der Frequenz f_a pulsiert (Bild 3.15a). Erst durch die Gleichrichtung über den Kommutator wird daraus der außen wirksame Ankerstrom I_a .

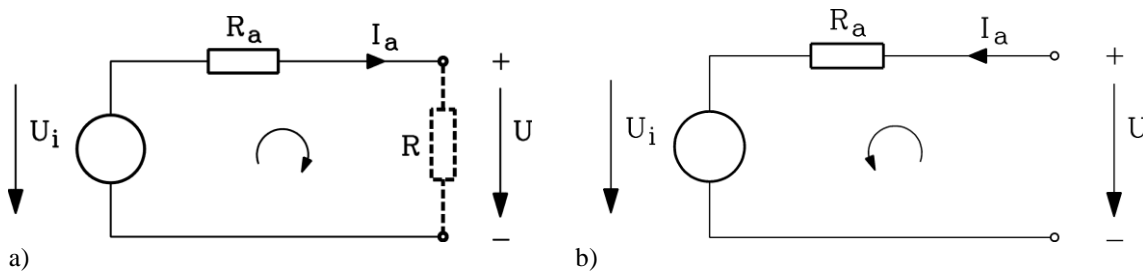


Bild 3.14: Ersatzschaltbild der Gleichstromankerwicklung im a) Generator- und b) Motorbetrieb. Bild a: Erzeuger-Zählpfeilsystem für die Ankerwicklung, Verbraucherzählpfeilsystem für den Belastungswiderstand R, Bild b: Verbraucherzählpfeilsystem für die Ankerwicklung.

Beispiel 3.3-1:

Vierpolige Ankerwicklung:

Ankerstrom $I_a = 50A$, $2p = 2a = 4$: Je Spule fließt i_c mit der Amplitude $I_a/(2a) = 50/4 = 12.5A$. Je Bürste (2 Plus-, 2 Minusbürsten) fließt der Bürstenstrom $I_a/a = 50/2 = 25A$.

Während der Zeit T_{com} schließt die Bürste jede Spule kurz, wenn die Bürste zwei benachbarte Kommutatorsegmente überdeckt (z. B. Bild 3.13: Segmente 5 und 6, 10 und 11, 15 und 16, 20 und 21, 26 und 27, 31 und 1). Während dieser Zeit liegen die beiden Seiten der Ankerspule in der „neutralen“ Zone zwischen den Polen (in Bild 3.13 z. B. die Spule, die an Segmente 5 und 6 angeschlossen ist), so dass keine Spannung in die Spule induziert wird. In dieser Zeit muss der Ankerspulenstrom $i_c(t)$ seine Polarität in der betreffenden Spule gemäß Bild 3.15a wechseln (z. B. von positiver zur negativen Stromrichtung), weil diese Spule aus der einen Serien-Gruppe von $K/(2p)$ Spulen (z. B. unter einem N-Pol, Bild 3.13) heraus“wandert“ und durch die Rotordrehung in die nächste Serien-Gruppe von $K/(2p)$ Spulen (unter einem S-Pol) hinein“wandert“.

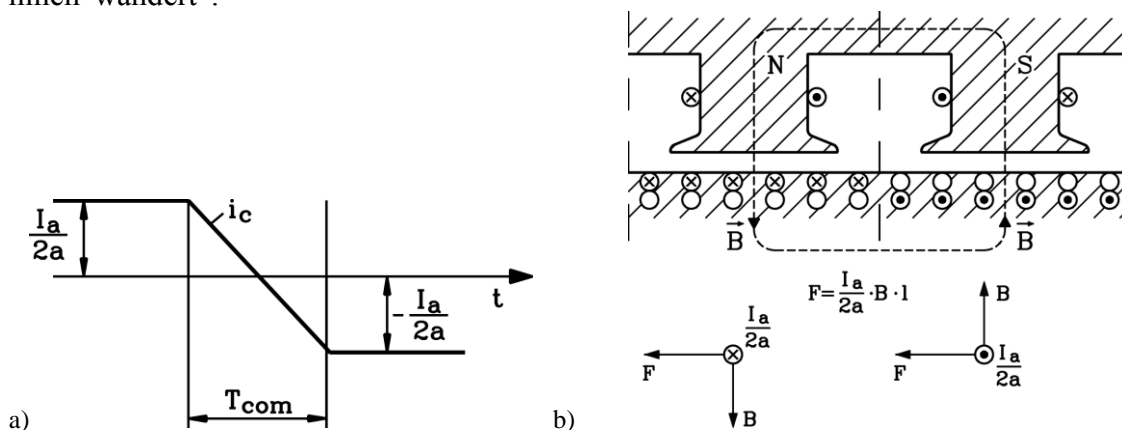


Bild 3.15: Ankerstrom I_a : a) Der Ankerspulenstrom i_c ist ein Wechselstrom. b) Kraftbildung auf die stromdurchflossenen Ankerleiter im Ständermagnetfeld B

Bild 3-15b zeigt, dass auf diese Weise unter dem N-Pol (positives Luftspaltfeld) alle Spulenseiten den Spulenstrom in positiver und unter dem S-Pol (negatives Luftspaltfeld) in negativer Richtung führen. Die **LORENTZ-Kraft** F je Ankerleiter wirkt mit der Rechten-Hand-Regel gemäß Bild 3.15b in Umfangsrichtung. Ihre mittlere Größe erhalten wir mit dem räumlich mittleren Magnetfeld $B_{\delta av}$ gemäß (3.11).

$$F = \frac{I_a}{2a} \cdot B_{\delta,av} \cdot l = \frac{I_a}{2a} \cdot \alpha_e B_{\delta,m} \cdot l \quad (3.11)$$

Sie ist unter den N-Polen und S-Polen wegen $F \sim I_a \cdot B_{\delta,av} = (-I_a) \cdot (-B_{\delta,av})$ stets in dieselbe Umfangsrichtung orientiert (Bild 3.15b), so dass die Summenkraft am Umfang durch die Wirkung aller z Leiter zustande kommt. Mit dem Hebelarm des halben Läuferdurchmessers ($d_{ra}/2 \cong d_{si}/2$) ergibt sich **das elektromagnetische Drehmoment M_e als Merkmformel** (3.12).

$$M_e = z \cdot F \cdot \frac{d_{si}}{2} = z \cdot \frac{I_a}{2a} \cdot \alpha_e B_{\delta,m} \cdot l \cdot \frac{d_{si}}{2} = z \cdot \frac{I_a}{2a} \cdot \alpha_e B_{\delta,m} \cdot l \cdot \frac{2p\tau_p}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{zp}{a} \cdot I_a \cdot \alpha_e B_{\delta,m} \tau_p l$$

$$\boxed{M_e = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{zp}{a} \cdot I_a \cdot \Phi = k \cdot I_a \cdot \Phi} \quad (3.12)$$

Das vom Ankerstrom erregte Läufer-Magnetfeld darf nicht mit dem Ständer-Hauptfeld verwechselt werden; es trägt nichts zur Drehmomentbildung bei. Es wird durch die Induktivitäten L_c der Ankerwicklungsspulen beschrieben. Durch die Stromwendung (Bild 3.15a) kommt es wegen $u_R = -L_c \cdot di_c / dt = -L_c \cdot I_a / (a \cdot T_{com})$ zu einer zusätzlichen Spannung („Reaktanzspannung“, Index R) in jenen Spulen, die gerade von den Bürsten kurz geschlossen sind, da sich dort der Strom wendet. Diese Reaktanzspannung zündet zwischen der Bürste und dem sich von ihr trennendem Kommutatorsegment einen „Abschaltfunken“ („**Bürstenfeuer**“), der durch Funkenerosion Bürsten- und Kommutatoroberfläche schädigt. Bei größeren Gleichstrommaschinen ab ca. 1 kW Nennleistung werden deshalb in den Pollücken zwischen den Hauptpolen sogenannte Wendepole eingesetzt, die in die stromwendenden („kommutierenden“) Spulen eine Zusatzspannung u_W entgegen gesetzt zu u_R induzieren, so dass in Summe $u_R - u_W \approx 0$ ist und die schädlichen Schaltfunken nahezu verschwinden. Kleinere Gleichstrommaschinen z. B. mit Permanentmagneten im Ständer zur Erregung des Hauptfelds kommen aus Kostengründen ohne Wendepole aus (Näheres zu den Wendepolen und weiteren Details für große Gleichstrom-Maschinen: siehe Vorlesung „Elektrische Maschinen und Antriebe“).

3.4 Elektromechanische Energiewandlung in der Gleichstrommaschine

Die **Gleichstrommaschine im Motorbetrieb** wird an den Klemmen der Ankerwicklung mit der Gleichspannung U (z. B. aus einer Batterie) gespeist. Das Hauptfeld des Ständers wird davon unabhängig mit Permanentmagneten oder elektrisch über Erregerpole erregt. Wird der Spannungsfall an den Bürsten U_b (ca. 2V für Plus- und Minusbürste) vernachlässigt, so muss die außen anliegende Spannung U um den Ankerspannungsfall größer als U_i sein (Bild 3.14b), damit Strom in die Ankerwicklung fließt.

$$\boxed{U = U_i + I_a R_a} \quad (\text{Motorbetrieb}) \quad (3.13)$$

Die zugeführte elektrische Leistung $P_{in} = P_e$ wird zum Teil in **Stromwärmeverluste** $P_{Cu} = R_a I_a^2 (+ U_b I_a)$ umgesetzt. Es verbleibt die innere Leistung P_i , die in mechanische Leistung P_m umgesetzt wird, welche an der Welle als P_{out} (P_m abzüglich der der Läuferverluste wie z. B. Ummagnetisierungsverluste im Läuferblechpaket und Reibungswärme in den Lagern) abgegeben wird. In (3.14), (3.15) wurden alle Verluste bis auf

die Stromwärmeverluste in der Ankerwicklung vernachlässigt, so dass für den **Wirkungsgrad** im Motorbetrieb(3.16) gilt.

$$P_{in} = U \cdot I_a = (U_i + I_a R_a) \cdot I_a = U_i I_a + R_a I_a^2 = P_i + P_{Cu} \quad (3.14)$$

$$P_{out} = P_i = U_i \cdot I_a = k \Phi \Omega_m \cdot I_a = k \Phi I_a \cdot \Omega_m = M_e \cdot \Omega_m = P_m \quad (3.15)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_e - P_{Cu}}{P_e} \quad (3.16)$$

Beispiel 3.4-1:

Wirkungsgrad von Gleichstrommaschinen:

Nennleistung 10 kW-Bereich ... 10 MW: Wirkungsgrad von ca. 80% ... 97% .

3.5 Der fremderregte Gleichstrommotor und der Nebenschluss-Motor

a) Gleichstrommotor am Batterienetz

In Bild 3.16 werden die Ankerwicklung (Plus- und Minusbürste, hier gemäß Norm IEC 60034 mit Klemmen A1, A2 bezeichnet) mit der in Serie geschalteten Wendepolwicklung (Klemmen B1, B2) ebenso aus einem Gleichspannungsnetz U gespeist wie die Feldwicklung der Erregerpole (Klemmen E1, E2). Feld- und Ankerwicklung sind parallel geschaltet (**Nebenschluss-Schaltung**). Da über den **Feldsteller-Widerstand** der Feldstrom I_f unabhängig vom Ankerstrom verstellt werden kann, wirkt diese Schaltung wie die **eines fremderregten Motors**, bei dem die Spannung an der Feldwicklung aus einer getrennten Spannungsquelle stammt.

"Anlassen" des Gleichstrommotors:

Beim Anlegen der Ankerwicklung an die Spannung U bei stillstehendem Motor ($n = 0$) ist zunächst wegen (3.9) U_i noch Null. Dann fließt ein sehr hoher Ankerstrom $I_a = U/R_a$, da R_a sehr klein ist (außer bei Kleinmotoren im Watt-Bereich). Er würde die Ankerwicklung durch Überhitzung zerstören, so dass ein zusätzlicher Vorwiderstand im Ankerkreis („**Anlasser**“) erforderlich ist, um den Ankerstrom auf den Wert des Nennstroms der Maschine zu begrenzen. Dieser Ankerstrom I_a erzeugt mit dem Hauptfluss Φ das elektromagnetische Drehmoment M_e , das den Läufer (und die gekuppelte Lastmaschine) mit dem resultierenden polaren Trägheitsmoment J beschleunigt, wenn das am Läufer wirkende **Beschleunigungsmoment** $M_B > 0$ ist. M_B ist die Differenz zwischen M_e und dem Lastmoment M_s (Indizes: B : Beschleunigung, s : shaft (Welle)). Nach erfolgtem Hochlauf begrenzt die induzierte Spannung den Ankerstrom; der Anlasserwiderstand kann kurz geschlossen werden, um unnötige Verluste im Anlasserwiderstand zu vermeiden.

$$J \frac{d\Omega_m}{dt} = J \cdot 2\pi \frac{dn}{dt} = M_e - M_s = k \Phi I_a - M_s = M_B \quad (3.17)$$

Leerlaufdrehzahl:

Auf welche Drehzahl n läuft der Motor hoch? Die Drehzahl n ändert sich gemäß (3.17) nicht mehr ($dn/dt = 0$), wenn $M_B = 0$ ist, wenn also das elektromagnetische Moment gleich dem Lastmoment ist: $M_e = M_s$. Der Motor ist dann in einem **stationärem Zustand** und läuft mit konstanter Drehzahl, die wir mit (3.13) berechnen.

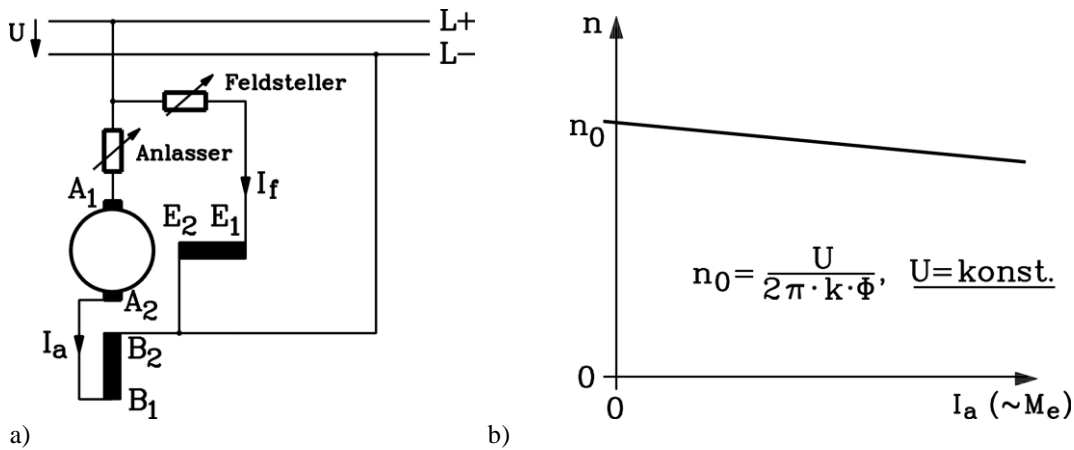


Bild 3.16: Nebenschluss-Motor: (a) Schaltung, (b) Drehzahl-Strom-Kennlinie $n(I_a)$ bzw. Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie $n(M_e)$ bei konstanter Klemmenspannung U und Erregung I_f (beim fremderregten Motor Speisung der Erregerwicklung von getrennter Spannungsquelle).

$$U = U_i + I_a R_a = k \Omega_m \Phi + \frac{M_e}{k \Phi} R_a \quad \Rightarrow \quad \boxed{\Omega_m = \frac{U}{k \Phi} - \frac{M_e \cdot R_a}{(k \Phi)^2} = 2\pi n} \quad (3.18)$$

Dies ist eine Geradengleichung mit negativer Steigung, die als $\Omega_m(M_e)$ oder $n(M_e)$ oder $n(I_a)$ dargestellt wird (Bild 3.16). Die Drehzahl ist bei konstanter Ankerspannung U maximal („**Leerlaufdrehzahl**“ n_0), wenn das Belastungsmoment $M_s = 0$ ist (Motorleerlauf).

$$\boxed{n_0 = \Omega_{m0} / (2\pi) \quad \Omega_{m0} = U / (k \Phi)} \quad (3.19)$$

Im idealen Leerlauf sind M_e und der Ankerstrom Null. In realen Maschinen ist wegen des stets vorhandenen Reibungsmoments und wegen der Ummagnetisierungsverluste im geblechten Eisenkörper des Läufers, der im Magnetfeld des Hauptflusses rotiert, stets ein kleines Bremsmoment vorhanden, so dass ein gleich großes elektromagnetisches Moment zum Antreiben auch im Leerlauf nötig ist, dem gemäß (3.12) ein kleiner Anker-**Leerlaufstrom** entspricht. Die Abnahme der Drehzahl mit steigender Belastung ergibt sich aus dem mit steigendem Ankerstrom zunehmenden OHM'schen Spannungsfall, der bei konstantem U eine Verringerung der induzierten Spannung und damit der Drehzahl erzwingt.

b) Gleichstrommotor mit Stromrichter am Drehstromnetz

Um Gleichstrommotoren am Drehstromnetz betreiben zu können, muss das Drehspannungssystem durch Gleichrichtung in eine Gleichspannung umgeformt werden. Im Folgenden wird kurz das Prinzip der Gleichrichtung erläutert (Details: siehe Teil „Stromrichtertechnik“). Siliziumbasierte Dioden für große Ströme und Spannungen werden als Leistungsdioden für eine ungesteuerte Gleichrichtung verwendet (Bild 3.17a). Die Diode leitet den Strom i bei positiver Spannung u von der Anode A zur Kathode K. Dabei tritt der kleine Spannungsfall U_{th} (threshold, Schwelle) von ca. 0.7 V auf, der im Folgenden vernachlässigt wird. Bei umgekehrter Spannungsrichtung sperrt die Diode den Stromfluss ($i = 0$, „rückwärts“ sperren) bis zur Durchbruchspannung $-U_D$, die im Folgenden unendlich groß angenommen wird (idealisierte Diode). Vier Dioden in der sogen. *H-Brücken-Schaltung* (GRAETZ-Brücke) erzeugen aus einer Wechselfspannung $u(t)$ eine gleichgerichtete, aber wellige Spannung $u_d(t)$ (Bild 3.17b, Bild 3.18). Der Spannungs-Mittelwert $U_d = (2/\pi) \cdot \hat{U}$ ist unveränderlich. Er kann verändert werden, wenn anstatt der Dioden Thyristoren (Bild 3.19) verwendet werden, die ebenfalls rückwärts sperren, aber auch vorwärts sperren, solange nicht

an dem gegenüber Dioden zusätzlichen Gate-Anschluss G gleichzeitig zur positiven Spannung u zwischen A und K eine positive Gatespannung u_G zwischen G und K angelegt wird (Bild 3.19a). Wird die positive Gatespannung um die Zeit $t_\alpha = \omega/\alpha$ später als die positive Spannung u angelegt, sperrt der Thyristor bis zu diesem Zeitpunkt.

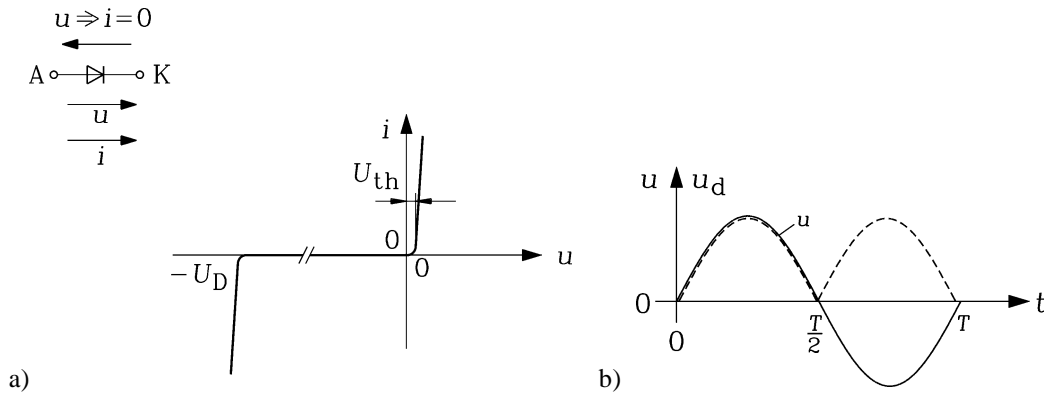


Bild 3.17: a) Schaltbild und Strom-Spannungs-Kennlinie der Diode, b) Gleichgerichtete Wechselspannung

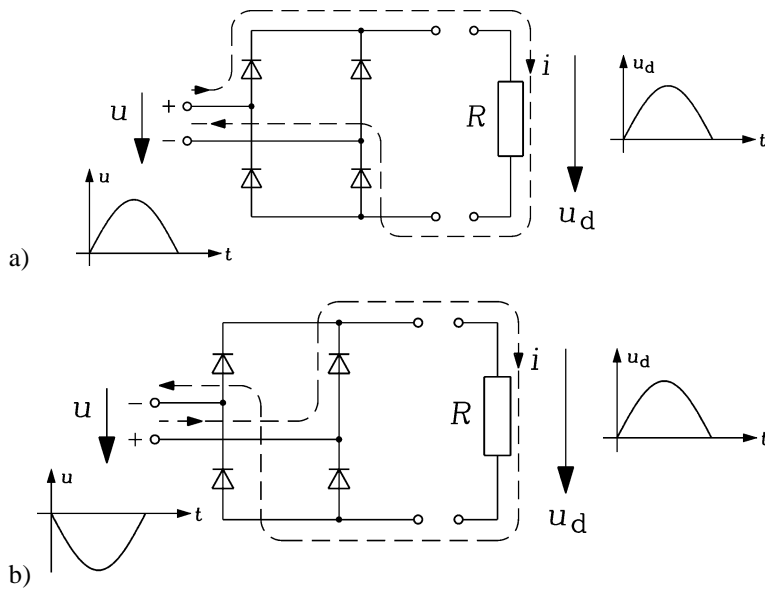


Bild 3.18: GRAETZ-Gleichrichter-Schaltung: Gleichrichtung a) der positiven und b) der negativen Wechselspannungs-Halbschwingung

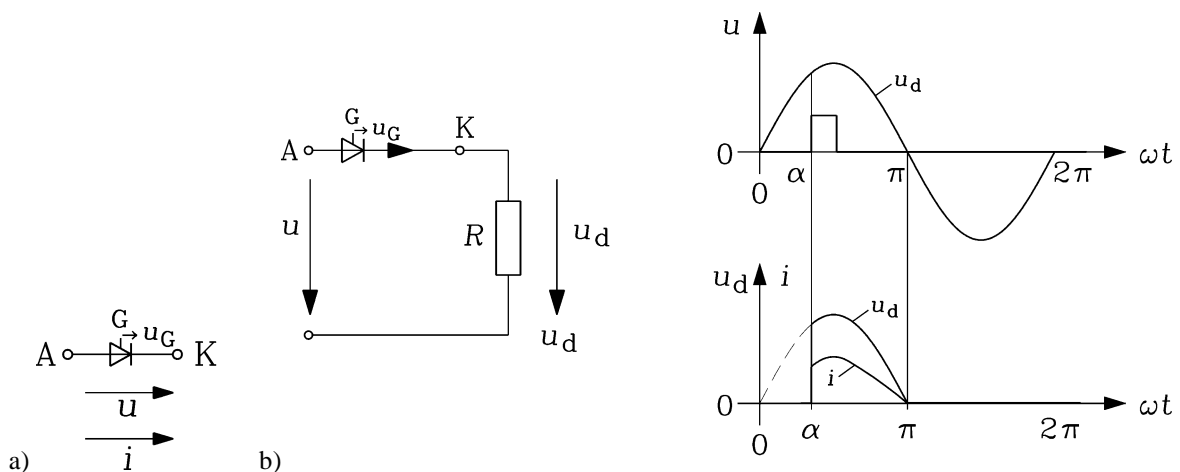


Bild 3.19: a) Schaltbild des Thyristors, b) Einfache Gleichrichterschaltung mit einem Thyristor

Der gleichgerichteten Spannung fehlt dann der beginnende Teil der „Spannungs-Zeit-Fläche“ (Bild 3.19b). Durch diese „**Anschnittsteuerung**“ erfolgt eine über den „Zündwinkel“ α gesteuerte Gleichrichtung mit einem nunmehr veränderlichen Spannungsmittelwert. Wenn der Strom i durch Null geht, hört der Thyristor auf zu leiten bis zum Auftreten eines nächsten positiven (u, u_G)-Wertepaars. Vier Thyristoren als GRAETZ-Brücke erzeugen daher aus einer Wechselspannung $u(t)$ eine gleichgerichtete, aber wellige Spannung $u_d(t)$ (Bild 3.20) mit vom Winkel α abhängigem Mittelwert. Bei $\alpha = 0$ ist der Mittelwert am größten (wie bei der ungesteuerten Diodengleichrichtung) 17b, Bild 3.18).

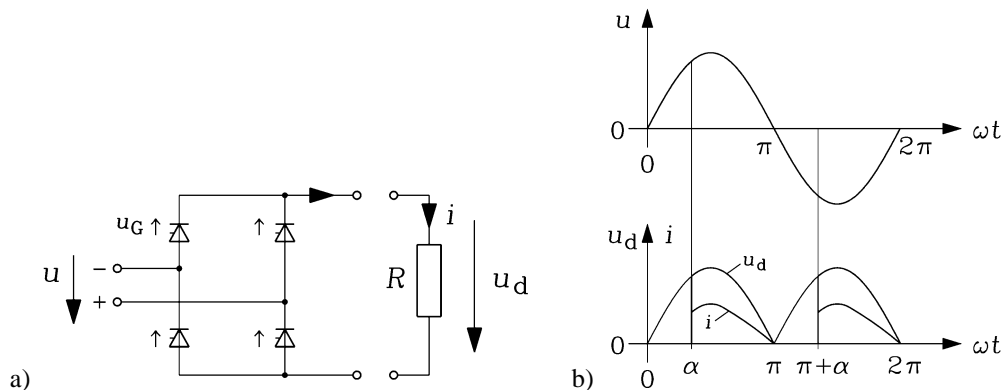


Bild 3.20: a) GRAETZ-Gleichrichter-Schaltung mit Thyristoren, b) Wechselspannung u , gleichgerichtete u_d und Laststrom i als welliger Gleichstrom im Lastwiderstand R

Wird das Schaltprinzip von Bild 3.20 auf ein Drehspannungssystem angewendet, erhalten wir anstelle der „zweipulsig“ (je Periode) welligen Gleichspannung eine je Periode „sechspulsig“ wellige Gleichspannung (Bild 3.21). Für die Speisung der Ankerwicklung von Gleichstrommaschinen verwendet man hauptsächlich diese sechspulsigen Gleichrichterschaltungen, die die drei verketteten Netzspannungen u_{UV}, u_{VW}, u_{WU} zu einer welligen Gleichspannung U_d umformen. Je Netzperiode $T = 1/f$ (f : Netzfrequenz, $\omega = 2\pi f$, $\omega T = 360^\circ$) hat diese Spannung bei Gleichrichtung mit sechs Dioden sechs Sinuskuppen. Werden statt der Dioden Thyristoren verwendet („**Thyristor-Stromrichter**“), so leiten diese erst, wenn – wie erläutert – am Gate G der **Thyristoren** eine positive Gatespannung als „Zündimpuls“ angelegt wird. Wird wie in Bild 3.20 der Zeitpunkt dieses „Zündens“ gegenüber dem natürlichen Leitbeginn der entsprechenden Diode um die Zeit t_α (Zündwinkel $\alpha = \omega t_\alpha$) verzögert, so ergibt sich der in Bild 3.21b dargestellte Spannungsverlauf, der bei $\alpha > 0$ einen niedrigeren Gleichspannungsmittelwert U_d ergibt als beim Winkel $\alpha = 0^\circ$ ($\alpha = 0^\circ$ entspricht der Diodengleichrichtung mit dem Mittelwert $U_d = (3/\pi) \cdot \hat{U}_{LL}$, u_{LL} : verkettete Wechselspannung zwischen L1-L2, L2-L3, L3-L1). Bei $\alpha = 90^\circ$ ist der Spannungsmittelwert Null, und bei $\alpha = 180^\circ$ negativ maximal.

Fazit:

Mit einer Anschnittsteuerung kann aus einem Sinusdrehstromsystem eine zwischen positivem und negativem Maximalwert veränderliche, aber "wellige" Gleichspannung erzeugt werden.

Da die Thyristoren nur in Vorwärtsrichtung von A nach K Strom leiten („**elektrisches Ventil**“), muss für Betrieb mit negativem Ankerstrom ein zweiter Thyristor-Stromrichter antiparallel zum ersten an die Klemmen der Gleichstromankerwicklung angeschlossen werden.

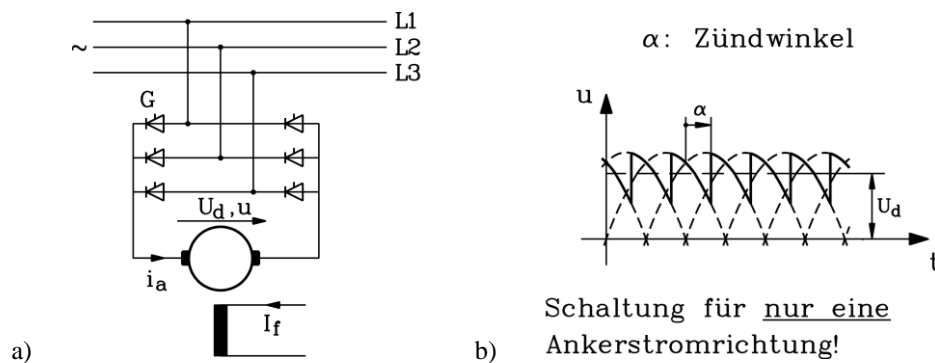


Bild 3.21: Versorgung des fremderregten Gleichstrommotors mit variabler („welliger“) Gleich-Spannung aus dem Drehstromnetz zur Veränderung der Drehzahl, a) Schaltung für sechspulsige Gleichrichtung, b) Spannungsverlauf bei sechspulsiger Gleichrichtung mit "Anschnittsteuerung"

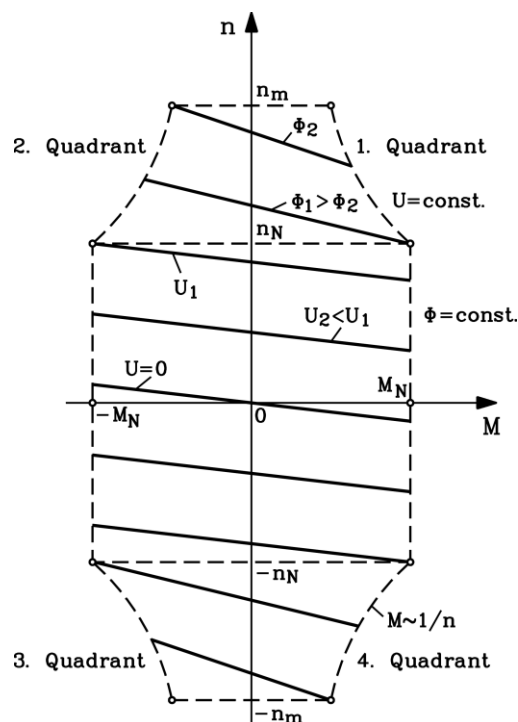


Bild 3.22: Drehzahl-Drehmoment-Kennlinien des fremderregten Gleichstrommotors für unterschiedliche Klemmenspannungen und Erregungen (M_N , n_N : Nennmoment/-drehzahl, n_m : Maximaldrehzahl)

Bereich $\Phi = \text{const.}$: Verstellen der Drehzahl über die variable Ankerspannung U .

Bereich $U = \text{const.}$: Verstellen der Drehzahl über den variablen Fluss Φ .

Durch die Ansnittsteuerung wird der Gleichstrommotor **mit veränderbarer Ankergleichspannung** U versorgt, so dass gemäß (3.18) die Drehzahl-Drehmoment-Kennlinien zueinander parallel verschoben werden (Bild 3.22, Bereich $\Phi = \text{const.}$). Damit ist es möglich, jede beliebige Drehzahl zwischen Null und der positiven oder negativen maximalen Leerlaufdrehzahl n_0^* (3.20) mit dem Gleichstrommotor zu fahren.

$$n_0^* = \frac{U_{d,\max}}{2\pi k \Phi} = \frac{U_d(\alpha = 0^\circ)}{2\pi k \Phi} = \frac{U_N}{2\pi k \Phi} \quad (3.20)$$

Die maximale gleichgerichtete Spannung ist die Nennspannung des Motors U_N . **Negative Drehzahlen** erhält man durch Anlegen einer negativen Spannung $-U_d$, was einen Zündwinkel $\alpha > 90^\circ$ erfordert. Soll die Drehzahl größer als n_0^* werden, muss gemäß (3.20) der Hauptfluss

Φ verringert werden („**Feldschwächbetrieb**“: Der Feldstrom I_f wird über den die Feldwicklung speisenden, separaten (Feld)-Stromrichter, der in Bild 3.21 nicht dargestellt ist, verkleinert). Im Bild 3.22 ist n_0^* als Nenndrehzahl n_N des Antriebs (**Antrieb = Motor + Stromrichter**) definiert. Gemäß (3.18) neigt sich im Feldschwächbetrieb die $n(M)$ -Gerade umso stärker, je kleiner der Hauptfluss Φ wird (Bild 3.22: im Bereich $U = \text{konst.}$). Die gestrichelt eingezeichneten Einhüllenden der Schar der $n(M)$ -Geraden sind die **Grenzkurven für maximalen Ankerstrom und maximale Fliehkraftbelastung**. Die maximale Drehzahl n_m ist z. B. durch die Fliehkraftbelastung der Läuferwicklung o. Ä. bedingt. Das maximale Dauer-Drehmoment M_N ergibt sich bei dem maximalen Wert des Ankerstrom I_a (z. B. der Nennstrom I_N). Im Feldschwächbereich sinkt dieses Drehmoment wegen der Rücknahme des Flusses gemäß (3.12) und schnürt den Drehzahlbereich wegen $\Phi \sim U_N/n, n > n_N$ hyperbolisch ($n \sim 1/M, n > n_N$) ein. Dabei bleibt die **maximale Leistung P der Maschine konstant**, denn mit $U_i \cong U_N, P_i \cong P_N, \eta \cong 1$ folgt:

$$\boxed{M = k \cdot \Phi \cdot I_N = k \cdot \frac{U_N}{2\pi k \cdot n} \cdot I_N = \frac{U_N I_N}{2\pi n} = \frac{P_N}{2\pi n}} \Rightarrow P = 2\pi n M = P_N = \text{konst.} \quad (3.21)$$

Der gleiche Feldschwächbereich kann auch bei negativer hoher Drehzahl gefahren werden. Es ergibt sich ein Betrieb in allen vier Quadranten der Drehzahl-Drehmoment-Ebene (**Vier-Quadranten-Betrieb**): Im 1. und 3. Quadranten von Bild 3.22 ist die Leistung positiv; die Gleichstrommaschine arbeitet als **Motor**. Im 2. und 4. Quadranten ist die Leistung negativ; die Gleichstrommaschine arbeitet als **Generator** (Bild 3.25).

Motor: $P = 2\pi n \cdot M = 2\pi(-n) \cdot (-M) > 0$;

Generator: $P = 2\pi n \cdot (-M) = 2\pi(-n) \cdot M < 0$.

Beispiel 3.5-1:

Drehzahlkennlinie eines Nebenschlussmotors:

$U = 600 \text{ V}, I_N = 80 \text{ A}, \Phi = 7.1 \text{ mWb}, k = 197.35, R_a = 0.15 \Omega$:

Leerlaufdrehzahl $n_0 = U / (2\pi \cdot k \Phi) = 600 / (2\pi \cdot 197.35 \cdot 0.0071) = 68.15 / \text{s} = \underline{\underline{4089}} / \text{min}$

Nennmoment: $M = k \Phi I_N = 197.35 \cdot 0.0071 \cdot 80 = \underline{\underline{112}} \text{ Nm}$

Nenndrehzahl: $n_N = n_0 - \frac{M_e \cdot R_a}{2\pi(k\Phi)^2} = 68.15 - \frac{112 \cdot 0.15}{2\pi \cdot (197.35 \cdot 0.0071)^2} = 66.79 / \text{s} = \underline{\underline{4007}} / \text{min}$

Zugeführte elektrische Leistung: $P_{in} = U \cdot I_N = 600 \cdot 80 = \underline{\underline{48}} \text{ kW}$

Abgegebene mechanische Leistung: $P_{out} = 2\pi \cdot n_N \cdot M_e = 2\pi \cdot 66.79 \cdot 112 = \underline{\underline{47.04}} \text{ kW}$

Verluste im Motor: $P_d = P_{in} - P_{out} = R_a I_N^2 = 0.15 \cdot 80^2 = \underline{\underline{960}} \text{ W}, \eta = 47.04 / 48 = \underline{\underline{98\%}}$

3.6 Wechselstrom-Kommutatormaschinen

Werden Anker- und Feldwicklung in Serie geschaltet, so entsteht die **Reihenschluss-** oder **Hauptschlussmaschine**. In dieser Schaltung kann die Gleichstrommaschine als **Wechselstrom-Kommutatormaschine** auch direkt am Einphasen-Wechselstromnetz betrieben werden (Bild 3.23), denn Feldstrom und Ankerstrom sind nun identisch (Strom i_a) und haben daher keine Phasenverschiebung zueinander. Sie pulsieren mit der Netzfrequenz f . Der als Wechselfluss erregte Hauptfluss Φ polt sich gleichzeitig mit dem Ankerstrom mit

Netzfrequenz um. Daher ist das Drehmoment stets positiv: $M_e = k \cdot i_a \cdot \Phi = k \cdot (-i_a) \cdot (-\Phi) > 0$, wie auch Bild 3.23 zeigt.

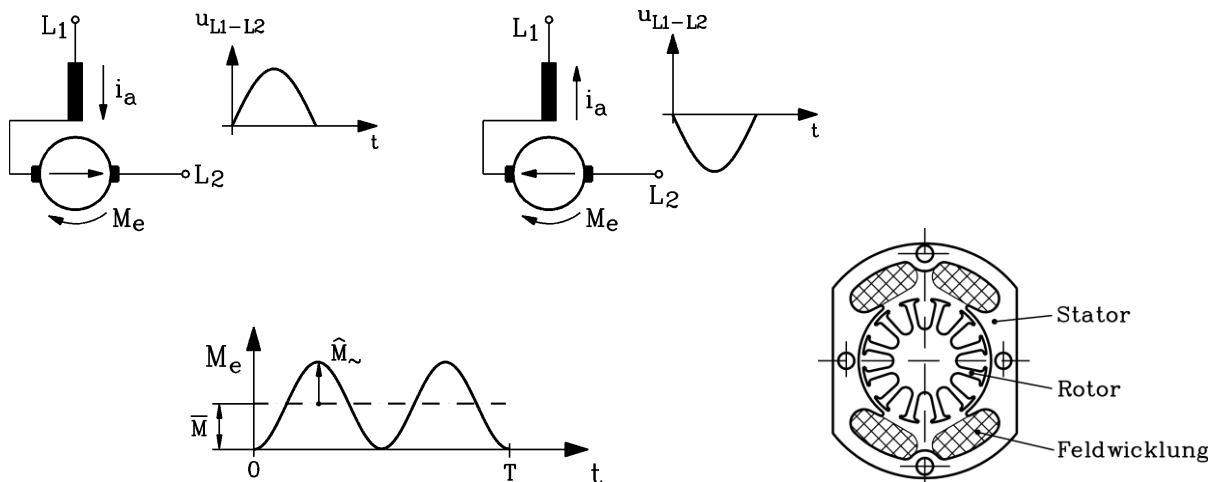


Bild 3.23: Einphasen-Reihenschlussmotor: Unabhängig von der Stromrichtung entsteht ein positives Moment, das mit doppelter Netzfrequenz pulsiert.

Bild 3.24: Blechschnitt eines Universalmotors, zweipolig, für 40 000 /min

$$M_e(t) = k \hat{\Phi} \sin(2\pi ft) \cdot \hat{I}_a \sin(2\pi ft) = \frac{k}{\sqrt{2}} \hat{\Phi} I_{a,eff} \cdot (1 - \cos(2\pi 2ft)) = \bar{M} - \hat{M}_{\sim} \cdot \cos(2\omega t) \quad (3.22)$$

Das Moment pulsiert jedoch mit doppelter Netzfrequenz (3.22), was zu einer entsprechenden Drehzahlschwankung und ggf. zu unerwünschten Schwingungsanregungen, verbunden mit erhöhtem Geräusch, führen kann. Nur das mittlere Drehmoment

$$\bar{M} = (k / \sqrt{2}) \cdot \hat{\Phi} \cdot I_{a,eff} \quad (3.23)$$

kann genutzt werden. Der Fluss Scheitelwert $\hat{\Phi}$ darf nicht höher als der Wert Φ bei Gleichstromspeisung sein, um das Eisen nicht zu hoch zu sättigen. Der Effektivwert des Wechselstroms $I_{a,eff}$ darf nicht höher als der entsprechende Gleichstromwert $I_a = I_{a,eff}$ sein, damit gleiche Verluste $P_{Cu} = R_a I_a^2 = R_a I_{a,eff}^2$ auftreten. So ist das mittlere Drehmoment um den Wert $\bar{M} / M_e = (\hat{\Phi} I_{a,eff} / \sqrt{2}) / (\Phi I_a) = 1 / \sqrt{2} = 0.71$ kleiner ist als bei reinem Gleichstrombetrieb und damit der Motor schlecht ausgenutzt. Daher wird dieser Motor vorzugsweise als kleiner **Universalmotor** (Bild 3.24, „universal“ = für Gleich- und Wechselstrombetrieb geeignet) im Haushaltsbereich eingesetzt (z. B. in Staubsaugern mit Drehzahlen bis 40 000 /min). Wegen der i. A. geringen Betriebsstundenzahl bei diesen Kleinmotoren von ca. 500 ... 1000 h während der Motorlebensdauer wird aus Kostengründen auf Wendepole verzichtet und ein entsprechendes Bürstenfeuer zugelassen.

Trotz der genannten Nachteile war der Einphasen-Reihenschlussmotor mit großer Leistung bis ca. 1980 als DER **Wechselstrom-Lokomotivantrieb** im Einsatz und ist es auf vielen E-Loks älterer Baureihen auch heute noch (z. B. DB AG: Baureihe 140). Er ist bis zu großen Leistungen bis ca. 1 MW je Motor entwickelt worden. Weil bei 50 Hz die Stromwendung durch die zusätzliche induzierte Spulenspannung infolge des Wechsel-Hauptflusses dieser Motoren elektrisch sehr problematisch ist (starke Funkenbildung, zu häufiger Bürstenwechsel!), wurde das Bahnnetz in *Deutschland, Österreich, Schweiz* und *Skandinavien* nicht für 50 Hz, sondern für die geringere Frequenz $50/3 = 16 \frac{2}{3}$ Hz ausgelegt. Dann ist diese zusätzliche induzierte Spannung nur 33%, und die Funken sind ausreichend

klein. **Moderne Bahnantriebe** werden mit den robusteren Asynchron-Kurzschlussläufer-Motoren, gespeist aus Umrichtern mit variabler Spannungsamplitude und Frequenz, ausgeführt (Kapitel 4).

Beispiel 3.6-1:

Ausgeführter Einphasen-Reihenschluss-Lokomotivmotor :

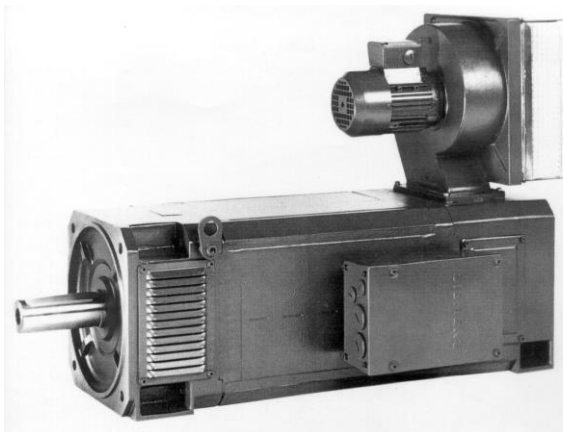
ÖBB-Lokomotive Baureihe 1042, 4 Motoren á 1000 kW bei 1000 ... 1490/min (max. Fahrgeschwindigkeit 150 km/h), *Motor*: $2p = 14$ Pole, $U_{N,\text{eff}} = 465$ V, $I_{1-h,\text{eff}} = 2400$ A (1-h: „Stundenstrom“ = jener effektive Strom, bei dem die Wicklung nach einer Stunde ihre maximal zulässige Erwärmung erreicht). Dieser Motortyp benötigt selbstverständlich Wendepole und eine Kompensationswicklung (siehe Vorlesung „Elektrische Maschinen und Antriebe“). Wegen des pulsierenden Moments ist zwischen den Treibrädern und der Motor-Getriebe-Einheit eine elastische Kupplung vorgesehen.

Beispiel 3.6-2:

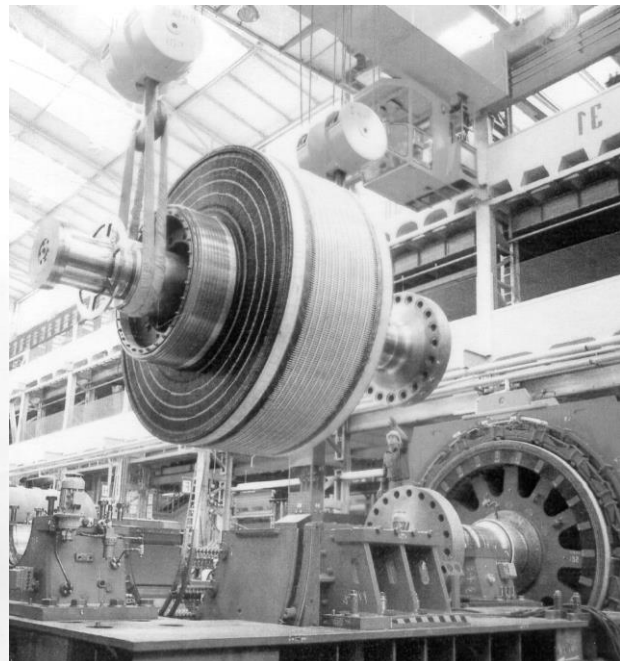
Ausgeführte Drehstrom-Asynchron-Lokomotivmotoren :

a) DB-Lokomotive Baureihe 101: 4 Fahrmotoren zu je 1.6 MW: $4 \times 1.6 = 6.4$ MW für max. Fahrgeschwindigkeit 230 km/h

b) Triebzug ICE 3: 16 Fahrmotoren zu je 500 kW: $16 \times 0.5 = 8$ MW, maximale Fahrgeschwindigkeit: 330 km/h.



a)



b)

Bild 3.25: Stromrichtergespeiste Gleichstrommotoren für drehzahlvariablen Vier-Quadranten-Betrieb:

- Vierpoliger Motor (100 kW bei 1500/min, $n_{\text{max}} = 4000$ /min), Fremdlüfter mit kleinem Asynchronmotor als Antrieb, um den GS-Motor unabhängig von dessen Drehzahl gleichmäßig zu kühlen
- Einbau des Ankers eines 18-poligen Gleichstrommotors für ein Walzwerk, Zwillingausführung (= zwei Motoren gekuppelt zur Leistungssteigerung), je Motor: Nennleistung 12.8 MW bei 90/min, $n_{\text{max}} = 150$ /min