

Elektrische Energietechnik

Grundlagen:

Aufgaben der elektrischen Energietechnik: (Wandlung, Umformung, Transport)

- Primärenergie umwandeln
- Energie übertragen, verteilen, umformen und in andere Formen umwandeln

Anforderungen: Zuverlässigkeit, Funktionstüchtigkeit, Sicherheit, Umweltver., Wirtschaftl.

Grundeinheiten & Größenverhältnisse:

1t SKE = 8140 kWh	1kWh=3600kJ=860kcal
1t OE = 1,43t SKE	1kJ=0,278Wh
1 m ³ Erdgas = 9000kcal = 10kWh	1Ws=1J=1Nm

Eckdaten:

Primärenergieverbrauch in Deutschland: 500 Mio. t SKE pro Jahr

Max Last im öffentl. Stromversorgungsnetz in D (Jahreshöchstlast): P=80GW

Begriffe:

Energie	Fähigkeit eines Systems äußere Wirkung hervorzubringen; kann nicht verbraucht werden.
Energieträger	Stoffe der Energie aus denen direkt oder durch Umwandlung Nutzenergie gewonnen werden kann; aufbrauchende (fossile), sich erneuernde (regenerative) Energieträger
Energiequellen	Derzeit und in absehbarer Zukunft wirtschaftlich nutzbares Energieangebot aus andauernden, in der Natur auftretenden Energieumwandlungsprozessen (regenerative Energien)
Primärenergie	Energieinhalt von noch nicht umgewandelten Energieträgern und regenerativen Energiequellen (Rohenergie) (zB.: pot., kin., chem., phys., therm., strahlungs Energie.)
Sekundärenergie	Energieinhalt von Energieträgern, die von Primärenergieträgern umgewandelt wurden
Endenergie	Sekundärenergie und direkt verwendbare Primärenergie (Gebrauchsenergie)
Nutzenergie	Endenergie abzüglich der beim Verbraucher auftretenden Verluste.
Energieverluste	Der aus einem System austretende, nicht im Sinne des Prozesses genutzte Teil der zugeführten Energie Verhältnis: Primär:End:Nutz = 3:2:1 (Umwandlungsverluste)
Wirkungsgrad	Quotient aus der nutzbaren abgegebenen und der zugeführten Leistung
Nutzungsgrad	Quotient aus der in einem bestimmten Zeitraum nutzbar abgegebenen und der gesamt zugeführten Energie. (Einschl. Pausen, Anfahrzeiten,...)
Ausnutzungsdauer	Quotient aus der in einem bestimmten Zeitraum nutzbar abgegebenen Energie und der mit der Dauer des Betrachtungszeitraumes multiplizierten Bemessungsleistung einer Anlage

Energiebedarf	Erwarteter Energieaufwand zur Erfüllung eines bestimmten Zwecks unter Einsatz einer bestimmten Technologie
Energieverbrauch	Für die Deckung des Energiebedarfs verbrauchte Menge an Energie in der jeweils eingesetzten Form
Ressourcen	Menge an Energierohstoffen deren Vorhandensein bekannt, vermutet oder geschätzt wird.
Reserven	Anteil der Ressourcen, deren Vorhandensein bekannt ist und zum aktuellen Zeitpunkt nutzbringend gewonnen werden kann.
Reichweite	Kenngroße für Energiereserven; gilt unter der Annahme, dass Reserven mit derzeitiger Förderleistung abgebaut werden.
Elektrizitätsversorgungssystem	Gesamtheit der Einrichtung zur Erzeugung, Übertragung, Verteilung elektrischer Energie
Netz	Gesamtheit der Leitungen und Stationen
Station	Einrichtung, die Schaltanlagen, Transformatoren, Umrichter,... enthält
Elek. Anlage	Gesamtheit der elektrischen Betriebsmittel an einem bestimmten Ort
Betriebsmittel	Alle zum Zwecke der Erzeugung, Umwandlung, Speicherung, Übertragung,... benutzten Gegenstände

Eigenschaften elektrischer Energie:

- Einfach in andere Energieformen umwandelbar, saubere Energie am Ort der Anwendung
- Leitungsgebunden, direkte Speicherung in nennenswerten Mengen unmöglich

Arten von Elektroenergiesystemen:

Gleichstromsysteme	Mess- & Steuerzwecke, Notstromversorgung, Elektrische Bahnen, HGÜ
Wechselstromsysteme	Haushalte, DB
Drehstromsysteme	<i>Vorteile:</i> Materialeinsparung und Verluste bei symm. Betrieb, Stern- oder Dreieckschaltung der Verbraucher, Für beschränkte Zeit auch mit Ausfall eines Leiters möglich. Symmetrisch → Kein Rückleiter nötig! <i>Nachteile:</i> Versorgung von langen Strecken über Kabel nicht möglich (max. 20km), Übertragung über extreme Entfernungen (>1500km) schwierig, keine Kopplung von Netzen unterschiedlicher Nennfrequenz

Übertragung & Verteilung:

Entfernung der Übertragung in km = Übertragungsspannung in kV

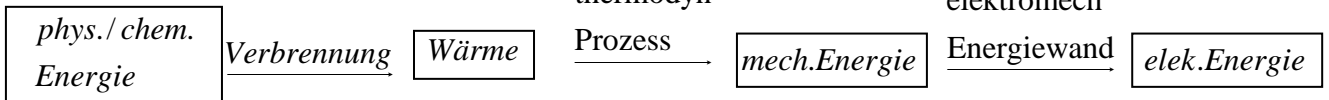
Verbundnetz (Höchstspannung): 380/220 kV [UCTE]

Verteilnetz (Hochspannung): 110 kV

Verteilnetz (Mittelspannung): 6/10/20 kV

Ortsnetz (Niederspannung): 0,4 - 1kV

Erzeugung elektrischer Energie:



Entsprechend den verwendeten Brennstoffen unterscheidet man konventionelle Kraftwerke und Kernkraftwerke. Thermische Kraftwerke unterscheidet man auch hinsichtlich des Mediums zum Antrieb der Turbinen.

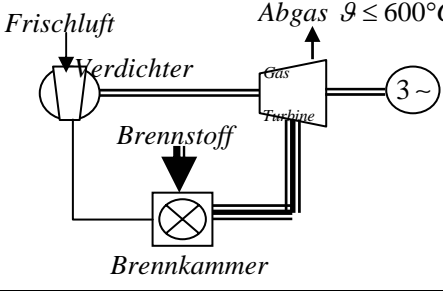
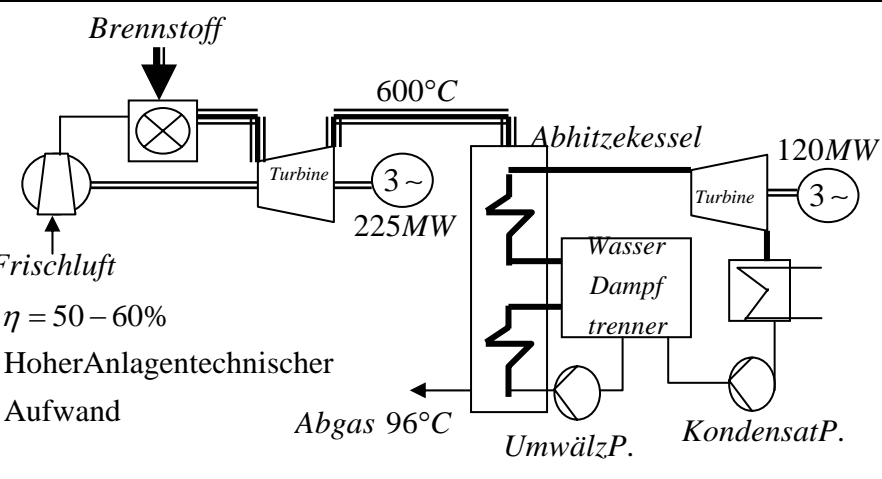
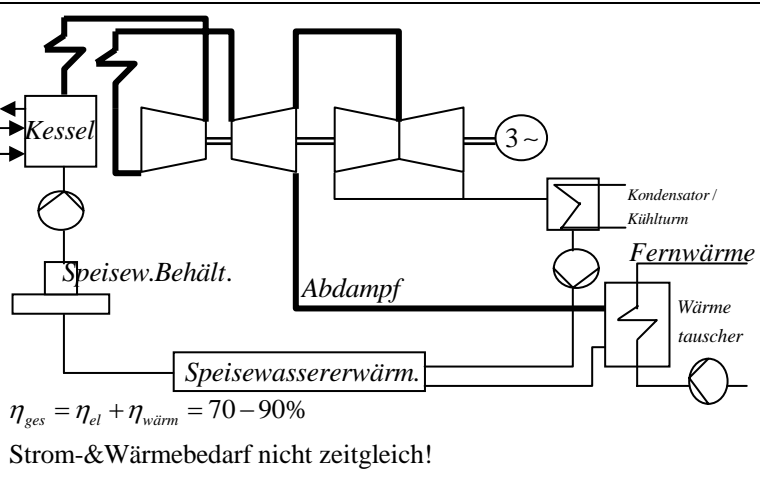
Wirkungsgrad thermischer Kraftwerke:

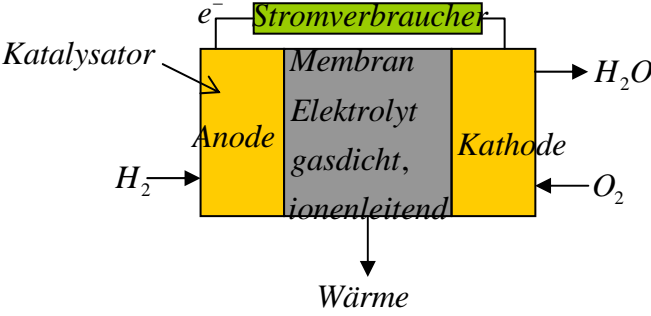
$$\eta = \frac{\text{an das Netz abgegeb. elek. Energie}}{\text{aufgewandte Primärenergie}}$$

Da hier auch der Eigenbedarf der Kraftwerke mitberücksichtigt wird, spricht man auch vom Gesamtwirkungsgrad. Der Wirkungsgrad thermodynamischer Prozesse ist um so besser, je höher Temperatur und Druck sind.

Kraftwerkstypen:

<p>DampfturbinenKW (Kohle, Uran)</p>	<p><i>Frischdampf</i> : 16 – 25 MPa, 530 – 570 °C <i>Wirkungsgrad</i> : $\eta = 30 - 43\%$ <i>Kondensatordampf</i> : 0,004 MPa, 29 °C</p> <p>Speisewasser → Speisew.P. → Speisew.behält. → Kessel → Überhitzer → Dampf → Turbine → Generator → $P_{el, \text{Eigenbedarf}}$ / $P_{el, \text{Netto}}$</p> <p>Kondensator → Kühlturm → Kondensatpumpe → Speisew.P.</p>
<p>Kernkraftwerk (Druckwasserreaktor)</p>	<p><i>Kontrollbereich</i></p> <p>Reaktor (16 MPa, 320 °C) → Umwälzpumpe → Dampferz. (6 MPa, 280 °C) → Turbine → Generator → $\eta = ca. 30\%$</p> <p>Speisew.P. → Kondensator / Kühlturm</p> <p>leichtes Wasser als Moderator/Kühl. niedrige Brennstoffkosten keine CO₂ Emissionen Endlagerung? Hohe Investition</p>
<p>Kernkraftwerk (Siedewasserreaktor)</p>	<p><i>Kontrollbereich</i></p> <p>Reaktor (7 MPa, 280 °C) → Speisew.P. → Turbine → Generator → <i>Größerer Kontrollbereich!</i></p> <p>Kondensator / Kühlturm</p>

<p>GasturbinenKW</p>	 <p>$\eta = 30\%$ kurze Anlaufzeit niedrige Investitionen hohe Brennstoffkosten</p>
<p>Gas- & Dampf KW (GuDKW)</p>	 <p>$\eta = 50 - 60\%$ Hoher Anlagentechnischer Aufwand</p>
<p>Kraftwerke mit Kraftwärmekopplung</p>	 <p>$\eta_{ges} = \eta_{el} + \eta_{wärm} = 70 - 90\%$ Strom- & Wärmebedarf nicht zeitgleich!</p>
<p>LaufwasserKW</p>	<p>Wasserangebot wird ohne Zwischenspeicherung genutzt. Werden ständig im Grundlastbetrieb gefahren. Errichtung in Flussläufen. Stromproduktion ist vom Wasserangebot abhängig. $\eta = 75 - 92\%$</p>
<p>(Punmp)SpeicherKW</p>	<p>Höherer Speichersee hat natürlichen Zufluss ($\eta = 75 - 95\%$) oder er wird als künstlicher Speichersee, der in Schwachlastzeiten gefüllt wird, betrieben ($\eta = 75 - 82\%$).</p> <p><u>Turbinentypen bei Wasserkraftwerken:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Kaplan (Propeller) turbine: $h < 60m$ Über Leitapparat aus jalousieartigen Lamellen strömt Wasser auf die beweglichen Schaufeln des Laufrades. Regulierung durch anpassen der Laufradschaufeln und des Leitapparats. • Francisturbine: $60 < h < 300m$ Wasser strömt über Leitapparat radial auf das Laufrad. Regulierung durch verstellen der Leitschaufeln • Pelton (Freistrah) turbine: $h > 300m$ Wasser schießt über Düsen tangential auf Laufrad. Regulierung mit Düsennadeln

GezeitenKW	Geeignete Lage sehr schwer zu finden, da mindestens 10m Gezeitenunterscheid auftreten muss. Ausbeute nur sehr gering über kurze Zeit. Turbinen wie bei Laufwasserkraftwerk.
Windkraftanlagen	Stromproduktion vom Windangebot abhängig. Ansicht nur Offshore Winfarmen rentabel. Anlagen können erst ab bestimmter Windstärke genutzt werden. Bei zu starkem Wind müssen Anlagen aus Sicherheitsgründen abgeschaltet werden.
Solarthermische Anlagen	Strahlungsenergie des Lichtes wird in Wärme umgewandelt. Sonnenlicht wird mit Hohlspiegeln aufgefangen und fokussiert. Flüssiges Salz wird dabei auf 575°C erwärmt und in einen Speichertank geleitet. Aus der Flüssigkeit wird über einen Wärmetauscher Dampf erzeugt und damit über einen Dampfturbinenprozess elektrische Energie gewonnen.
Photovoltaik Anlagen	Direkte elektrische Nutzung der Solarenergie. Sehr hohe Investitionen. $\eta = 8 - 18\%$. Bei zu hoher Spannung bricht der Strom zusammen. → Maximales Produkt aus Spannung und Strom für max. Wirkungsgrad halten. Direktes Betreiben von Batterien und Gleichstromlasten. Über Wechselrichter auch Einspeisung in Niederspannungsnetz möglich oder Betreiben von Wechselstromlasten.
Brennstoffzellen	Mit einer Brennstoffzelle kann chemische Energie ohne Umweg über eine Wärmekraftmaschine in elektr. Energie und Wärme umgewandelt werden. Dabei kommen verschiedenste Brennstoffzellen zum Einsatz, deren Wirkungsgrad mit zunehmender Betriebstemperatur steigt. Die am besten verwendbare Zelle ist eine PEFC (Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzelle). Brennstoffzellen eignen sich für die Realisierung einer dezentralen Energieversorgung, Ersatz für Verbrennungsmotoren und Akkus in portablen Geräten. Aufgrund der geringen erzielten Spannung (0,7V) werden mehrere in Reihe geschaltet. Vorteile: hoher Wirkungsgrad bei Voll- & Teillast, gute Regelbarkeit, gute Leistungsanpassung durch modularen Aufbau, geringe Schadstoff und Lärmemission. 

Lastganglinien:

Lastganglinien beschreiben den zeitlichen Bedarf an elektr. Energie (zB.: benötigte Leistung über den Tag); sie ergeben sich aus dem unterschiedlichen Verhalten verschiedener Verbrauchergruppen für unterschiedliche Regionen und Zeiträume. Zusätzlich werden sie von Klima und besonderen Ereignissen beeinflusst.

Aus den Ganglinien können die Dauerlinien konstruiert werden, die angeben wie lange wieviel Leistung benötigt wird. Aus der Dauerlinie werden die charakteristischen Kenngrößen ermittelt.

T_n : Nennbetriebsdauer (Betrachtungszeitraum)

T_a : Ausnutzungsdauer

T_m : Benutzungsdauer

P_n : Nennleistung (Dauerhaft bereitgestellte Leistung)

$$W = \int_0^{T_n} P(t) dt = P_{mittel} \cdot T_n = P_n \cdot T_a = P_{max} \cdot T_m$$

P_{max} : Höchstlast

P_{mittel} : mittlere Last

W : Übertragene Energie

Kraftwerkeinsatz:

GrundleistungskW	Niedrige Arbeitskosten, hohe Festkosten, hohe Ausnutzungsdauer (Laufwasser, Braunkohle, Kernkraft)
MittelleistungskW	Mittlere Arbeitskosten, häufig wechselnde Leistung, tägliches An- & Abfahren (Steinkohle)
SpitzenleistungskW	Hohe Arbeitskosten, niedrige Lesitungskosten, geringe Ausnutzungsdauer, pro Tag mehrmals An- & Abfahren, kurze Anfahrzeiten, hohe Leistungsänderungsgeschwindigkeit (Speicher, Pumpspeicher, reine Gasturbinen)

Das Drehstromsystem:

Wechselstromsystem:

$$u(t) = \hat{u} \cdot \cos(\omega t + \varphi_u) = U\sqrt{2} \cos(\omega t + \varphi_u)$$

$$i(t) = \hat{i} \cdot \cos(\omega t + \varphi_i) = I\sqrt{2} \cos(\omega t + \varphi_i)$$

$$\underline{U} = U \cdot e^{j\varphi_u}$$

$$\underline{U}(t) = U \cdot e^{j\varphi_u} \cdot e^{j\omega t}$$

$$\underline{U}(t) = \underline{U} \cdot e^{j\omega t}$$

$$\underline{\hat{U}}(t) = \sqrt{2} \cdot \underline{U} \cdot e^{j\omega t}$$

Effektivwerte:

$$U = \hat{u} / \sqrt{2}$$

$$I = \hat{i} / \sqrt{2}$$

Phasenverschiebungswinkel: $\varphi = \varphi_{ui} = \varphi_u - \varphi_i$

φ_u, φ_i wird im 2. Quadranten vom Beginn des Kosinus bis zur Nulllinie gemessen.

Komplexe Darstellung:

Komplexer Augenblickswert:

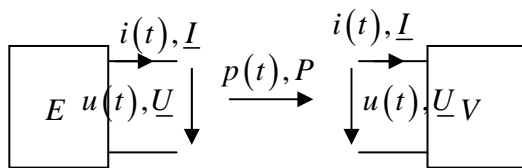
$$\underline{u} = \sqrt{2} U e^{j(\omega t + \varphi_u)} = \sqrt{2} \underline{U} e^{j\omega t}$$

$$\underline{\hat{u}} = \hat{u} e^{j\varphi_u} \quad \underline{U} = U e^{j\varphi_u}$$

Physikalischer Augenblickswert: $u(t) = \text{Re}\{\underline{u}(t)\} = \frac{1}{2}(\underline{u}(t) + \underline{u}^*(t)) = \hat{u} \cos(\omega t + \varphi_u)$

Momentanleistung: $p(t) = u(t) \cdot i(t)$

Erzeuger- & Verbraucherzählpeilsystem:



Wirkleistung P : (arithmetischer Mittelwert der Augenblicksleistung über Periodendauer)

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt$$

Scheinleistung S : $S = U \cdot I$

Augenblickswert der Leistung: $p(t) = \hat{u} \cos(\omega t + \varphi_u) \cdot \hat{i} \cos(\omega t + \varphi_i) = UI \cos \varphi + UI \cos(2\omega t + \varphi_u + \varphi_i)$

$$P = UI \cos \varphi = S \cos \varphi$$

$$p(t) = P + S \cdot \cos(2\omega t + \varphi_u + \varphi_i)$$

Wirkfaktor: $\cos \varphi = P/S$

Blindfaktor: $\sin \varphi = Q/S$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = UI \sin \varphi = S \sin \varphi$$

Leistungsfaktor: $\lambda = |P|/S = |\cos \varphi|$

Komplexe Scheinleistung: $\underline{S} = \underline{U} \cdot \underline{I}^* = U e^{j\varphi_u} I e^{-j\varphi_i} = S e^{j\varphi} = P + jQ$

$$|\underline{S}| = S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Widerstände in der komplexen Ebene:

Ohmscher Widerstand	$u(t) = R \cdot i(t)$	$\hat{u} = R \cdot \hat{i}$
Spule	$u(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt}$	$\hat{u} = j\omega L \hat{i}$
Kondensator	$i(t) = C \cdot \frac{du(t)}{dt}$	$\hat{u} = \frac{\hat{i}}{j\omega C}$

Z : Impedanz	Y : Admittanz
φ_z : Impedanzwinkel	
R : Resistanz	G : Leitwert
X : Reaktanz	B : Suszeptanz
$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	$Y = \sqrt{G^2 + B^2}$
$\varphi_z = \begin{cases} \arctan \frac{X}{R}, R > 0 \\ \pi + \arctan \frac{X}{R}, R < 0 \end{cases}$	

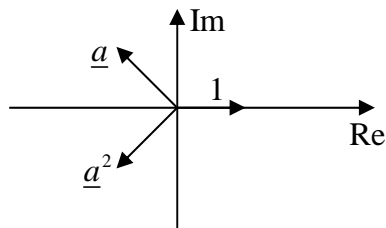
Drehstromsystem:

$$u_1(t) = \hat{u}_1 \cdot \cos(\varpi t) = \sqrt{2}U \cos(\varpi t)$$

$$u_2(t) = \hat{u}_2 \cdot \cos\left(\varpi t - \frac{2}{3}\pi\right)$$

$$u_3(t) = \hat{u}_3 \cdot \cos\left(\varpi t - \frac{4}{3}\pi\right)$$

Darstellung des Drehstromsystems in Zeigerdarstellung:



$$\underline{a}^0 = 1$$

$$\underline{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}}$$

$$\underline{a}^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}}$$

$$\underline{a}^3 = 1 \quad \underline{a}^* = \underline{a}^2 \quad 1 + \underline{a} + \underline{a}^2 = 0 \quad \underline{a}^2 \cdot \underline{a}^2 = \underline{a}$$

Bei symmetrischen Drehstromsystemen sind alle Zeiger gleich lang und jeweils um 120° phasenverschoben.

Begriffe für Stromsysteme:

Leiter	Teil zum Fortleiten des elektr. Stroms
Außenleiter	Leiter, der im Normalbetrieb unter Spannung steht und zur Übertragung elektrischer Energie beitragen kann, aber kein Neutral- oder Mittelleiter ist.
Neutralleiter	Leiter, der mit wenigstens einem Neutralpunkt verbunden und dafür vorgesehen ist, elektrische Energie zu übertragen, wenn die Summe der Aussenleiterströme nicht null ist.
Schutzleiter	Leiter, der für Zwecke der elektrischen Sicherheit vorgesehen ist
Schutzerdungsleiter	Schutzleiter, vorgesehen für Schutzerdung
PEN-Leiter	Leiter, der zugleich die Funktion des Schutzerdungsleiters und Neutralleiters erfüllt
Außenleiterspannungen	Aussenleiterspannung kennzeichnet die Spannung zwischen je zwei Aussenleitern
Spannung Aussenleiter-Erde	Spannung zwischen einem Aussenleiter und Bezugserde
Aussenleiterstrom	Strom in einem Aussenleiter des Drehstromsystems
Bezugserde	Teil der Erde, der als elektrisch leitfähig angesehen wird, außerhalb des Einflussbereichs von Erdungsanlagen liegt und dessen elektrisches Potential vereinbarungsgemäß als null angenommen wird.
Strang	Strang bezeichnet den Zweig, der bei der Dreieckschaltung zwischen je zwei Aussenleitern oder bei der Sternschaltung jeweils zwischen Außenleiter und dem Stern N liegt.
Strangspannung	Spannung zwischen den Anschlusspunkten eines Stranges
Strangstrom	Strom in einem Strang
Dreileitersystem	Dreileitersystem besteht aus drei Aussenleitern
Vierleitersystem	Vierleitersystem besteht aus drei Aussenleitern und einem Neutralleiter
Mittelpunkt/Sternpunkt	Ausgangspunkt der drei gleichberechtigten Stränge
Symmetrisches Drehstromsystem	Die drei Stern- oder Aussenleiterspannungen bilden ein symmetrisches Drehstromsystem, wenn die Beträge gleich sind und die Phasenverschiebung jeweils 120° beträgt.
Symmetr. Belastung	Alle drei Stränge sind mit gleichen Leiterströmen belastet

Aussenleiterspannung: $\underline{U}_{12} = \underline{U}_1 - \underline{U}_2$ $|\underline{U}_{12}| = |\underline{U}_{23}| = |\underline{U}_{31}| = U_n$ Nennspannung

Leiter-Erd-Spannung: U

ACHTUNG:

Netzennspannung U_n , Bemessungsspannung U_r ,

$$U_n = 2 \cdot U \cdot \cos 30^\circ = \sqrt{3} \cdot U$$

höchste Spannung U_m sind immer Aussenleiterspannungen

Bei symmetrischem Betrieb fließt kein Strom im Neutralleiter und es kann somit auf den Neutralleiter verzichtet werden.

Leistung im symmetrischen Dreileitersystem:

Für die komplexe Leistung bei einphasiger Betrachtung gilt $\underline{S} = \underline{U} \cdot \underline{I}^*$. Somit gilt für die Leistung über alle drei Leiter: $\underline{S} = \underline{U}_1 \underline{I}_1^* + \underline{U}_2 \underline{I}_2^* + \underline{U}_3 \underline{I}_3^*$

→ Bei symmetrischem Verbraucher: $\underline{S} = 3 \cdot \underline{U}_1 \underline{I}_1^*$

$$\text{Scheinleistung: } S = 3 \cdot U \cdot I = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I$$

→ Wirkleistung: $P = 3 \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I \cdot \cos \varphi$

$$\text{Blindleistung: } Q = 3 \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I \cdot \sin \varphi$$

Für die komplexe Wechselleistung bei einphasiger Betrachtung gilt $\tilde{S} = \underline{U} \cdot \underline{I}$. Somit gilt für die Wechselleistung aller drei Leiter: $\tilde{S} = \underline{U}_1 \underline{I}_1 + \underline{U}_2 \underline{I}_2 + \underline{U}_3 \underline{I}_3$ Und für den symmetrischen Verbraucher folgt: $\tilde{S} = 0$ (Es werden nur konst. Leistungen übertragen) $P_{\sim}(t) = \text{Re}\{\tilde{S} \cdot e^{j2\omega t}\}$

Stern- / Dreieckschaltung im symmetrischen Drehstromsystem:

Sternschaltung	<p>An den gemeinsamen Sternpunkt N kann ein für alle Stränge gemeinsamer Rückleiter angeschlossen werden. Für den Fall eines symmetrisch aufgebauten Verbrauchers in Sternschaltung ist die Summe der Ströme gleich Null und der Rückleiter kann entfallen.</p> <p>Die Strangspannungen sind bei der Sternschaltung gleich der Leiter-Erde-Spannung und die Ströme I in den Aussenleitern sind gleich den Strangströmen des Verbrauchers. $I = \frac{U}{Z}$</p> <p>Da der im Neutralleiter fließende Strom I_N bei symmetrischer Belastung gleich Null ist, können Spannungs- & Stromverläufe in den drei Aussenleitern entkoppelt voneinander betrachtet werden. → einphasiges Ersatzschaltbild! (Achtung: In allen ESBs immer nur Leiter-Erde-Spannungen und Aussenleiterströme verwenden!!!)</p>
Dreieckschaltung	<p>Bei der Dreieckschaltung sind die Strangspannungen U_Δ gleich den Aussenleiterspannungen und die Aussenleiterströme I setzen sich aus der Summe der Strangströme I_Δ zusammen. $I_\Delta = \frac{U_\Delta}{Z}$ $I = \sqrt{3} \cdot I_\Delta$</p> <p>→ Aussenleiterströme um $\sqrt{3}$ größer als Strangströme!!!</p>
Äquivalenz von Stern- und	<p>Für symmetrische Verbraucher sind Stern- & Dreieckschaltung äquivalent, d.h. sie lassen sich ineinander umrechnen. Dbei müssen beide</p>

Dreieckschalt.	Schaltungen die gleiche Leistung (Leiterströme) aufnehmen. Für die Umrechnung kann lediglich die Impedanz verändert werden. → Die Impedanz der Dreieckschaltung muss in der Sternschaltung auf $\frac{1}{3}$ reduziert werden. Somit kann dann auch wieder ein einphasiges Ersatzschaltbild verwendet werden mit den Größen $\underline{U}, \underline{I}, \underline{Z}/3$
----------------	---

Betriebsmittel mit Kopplung der Leiter untereinander und zur Erde (Übertragungsleitungen):

Für symmetrisch aufgebaute Betriebsmittel, die symmetrisch stationär belastet werden gilt:

$$\begin{pmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \\ \underline{U}_3 \end{pmatrix} = (\underline{A} - \underline{B}) \begin{pmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \\ \underline{I}_3 \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} \underline{A}: \text{Eigenimpedanz} \\ \underline{B}: \text{Koppelimpedanz} \end{array} \quad \text{Betriebsimpedanz } \underline{Z}_b = \underline{A} - \underline{B}$$

Leistungsmessung:

Leistungsmessung im einphasigen Wechselstromkreis:

Bei Wechselgrößen wird ein elektrodynamisches Messwerk zur Leistungsmessung eingesetzt. Da das träge Messwerk dem Augenblickswert der Messgröße nicht folgen kann, wird sich daher ein mittlerer Ausschlag $\bar{\alpha}$ einstellen. Das Messinstrument zeigt damit die Wirkleistung an.

$$\bar{\alpha} = k \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi = k \cdot P$$

Durch die Verwendung eines Phasendrehers können mit einem elektrodynamischen Messinstrument auch Blindleistungen gemessen werden. Dabei erfolgt die Phasendrehung um $-\pi/2$ üblicherweise im Spannungspfad. Damit folgt für den Ausschlag

$$\bar{\alpha} = k \cdot U \cdot I \cdot \cos \left(\varphi - \frac{\pi}{2} \right) = k \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi = k \cdot Q$$

Leistungsmessung im Drehstromkreis:

Im Fall eines unsymmetrischen Verbrauchers muss die Bilanz des Leistungstransports für jeden Leiter getrennt erstellt werden $P = P_1 + P_2 + P_3$ $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$. Um die Wirkleistung in einem Vierleitersystem zu bestimmen gilt: $P = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 + U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 + U_3 \cdot I_3 \cdot \cos \varphi_3$. Wegen fehlender Symmetrie ist für jeden Aussenleiter ein eigener Leistungsmesser erforderlich und die gemessenen Wirkleistungen der drei Leiter sind entsprechend zu addieren. Ebenso kann die Blindleistung und Scheinleistung berechnet werden. Die Scheinleistung als Drehstromleistung ist für unsymmetrische Verbraucher nicht definiert.

Bei symmetrischer „Speisung“ gilt:

$$\begin{aligned} P &= P_1 + P_2 + P_3 \\ S_v &= U \cdot I_v \\ Q &= \sum_{v=1}^3 Q_v = \sum_{v=1}^3 \sqrt{S_v^2 - P_v^2} \\ \cos \varphi_v &= \frac{P_v}{S_v} \end{aligned}$$

Bei symmetrischen Verbrauchern in einem symmetrisch gespeisten Drehstromsystem ergibt sich folgende Vereinfachung:

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$$

$$P = 3\alpha$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$

$$\cos \varphi = P/S$$

Hier genügt die Erfassung der Wirkleistung und der Blindleistung in je einer Zuleitung zum Verbraucher. Im Dreileitersystem ist ein künstlicher Sternpunkt notwendig.

Elektrische Maschinen:

Grundlagen elektrischer Maschinen:

Magnetische Feldstärke: \vec{H}

Magnetische Induktion: $\vec{B} = \mu \cdot \vec{H}$ ($\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$: Permeabilität) ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$)

Für ferromagnetische Stoffe ist die relative Permeabilität μ_r nicht konstant. In den Magnetisierungskurven macht sich dies durch die sog. Sättigung bemerkbar.

Quellenfreiheit der Induktion: $\text{div} \vec{B} = \oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$ (\rightarrow Feldlinien der mag. Induktion sind immer in sich geschlossen)

Magnetischer Fluss: $\Phi = \iint_A \vec{B} d\vec{A} = 0$

Durchflutungsgesetz: $\Theta = \oint_C \vec{H} d\vec{s} = \iint_A \vec{j} d\vec{A}$ Wenn die Fläche A von w Leitern, die alle den gleichen Strom i führen durchsetzt wird gilt: $\Theta = i \cdot w$

Induktionsgesetz: $\oint \vec{E} d\vec{s} = -\frac{d}{dt} \iint_A \vec{B} d\vec{A} = -\frac{d\Phi}{dt}$

$\oint \vec{E} d\vec{s}$: Umlaufspannung

$-\frac{d\Phi}{dt}$: magnetischer Schwund

Spulenfluss Ψ : Da Spulen in der Praxis mit mehreren Windungen ausgeführt werden, setzt sich der Spulenfluss (verketteter Fluss) aus der Summe der Flüsse in den einzelnen

Windungen zusammen: $\Psi = \sum_{v=1}^n \Phi_v$

Tritt durch jede Windung der gleiche Fluss Φ hindurch, so gilt bei w Windungen: $\Psi = w \cdot \Phi$

Der mit einer Schleife verkettete Fluss kann sich entweder durch eine zeitliche Änderung des magnetischen Feldes (Transformator) oder durch eine Bewegung/Verformung der Schleife ändern. Somit gilt allgemein für den Spulenfluss: $\Psi = f(t, x)$

\rightarrow Für den magnetischen Schwund gilt:

$$-\frac{d\Psi}{dt} = -\frac{\partial\Psi}{\partial t} - \frac{\partial\Psi}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad -\frac{\partial\Psi}{\partial t}: \text{Ruheschwund} \quad -\frac{\partial\Psi}{\partial x} \frac{dx}{dt}: \text{Bewegungsschwund}$$

Allgemeiner Fall: Leiterschleifen bewegen sich in zeitlich veränderlichem Magnetfeld:

$$U_i = \oint \vec{E} d\vec{s} = - \iint_A \frac{d\vec{B}}{dt} d\vec{A} + \oint (\vec{v} \times \vec{B}) d\vec{s} \quad U_i : \text{induzierte Spannung}$$

Transformator:

Mit Hilfe von Transformatoren lassen sich im Netz unterschiedliche Spannungsebenen miteinander verbinden, und/oder zwei Netze voneinander galvanisch trennen. In der Nachrichtentechnik werden sie als Übertrager und in der Messtechnik als Wandler verwendet. Für Transformatoren wird ein möglichst hoher Wirkungsgrad angestrebt. Sie bestehen in der Regel aus zwei elektrischen Kreisen, Ober- & Unterspannungswicklung (bei definiertem Leistungsfluss Primär- & Sekundärwicklung), die über einen Eisenkern magnetisch miteinander gekoppelt sind.

Einphasiger Zweiwicklungstransformator:

Im Gegensatz zum idealen Transformator erzeugen technische Transformatoren Verluste. Hierzu gehören die stromabhängigen Kupferverluste (ohmscher Widerstand der Wicklung), die spannungsabhängigen Eisenverluste (Wirbelstromverluste & Hystereseverluste) [Streuung → unvollständige magnetische Verkettung].

Die elektrischen & magnetischen Kreise dieses Transformators, bestehend aus zwei Wicklungen mit den Windungszahlen w_1, w_2 sind durch einen Eisenkern magnetisch miteinander gekoppelt. Der durch die Spule 1 fließende Strom i_1 hat einen Hauptfluss Φ_h im Eisenkreis mit magnetischen Leitwert Λ_h durch beide Wicklungen und einen Streufluss $\Phi_{\sigma 1}$ mit dem magnetischen Leitwert $\Lambda_{\sigma 1}$ zur Folge. Dies gilt analog für die zweite Wicklung.

Da reale Eisenkerne nur eine endlich große Permeabilität besitzen, ist der Aufbau des magnetischen Hauptflusses Φ_h mit einem relativ geringen aber im Leerlauf messbaren Magnetisierungsstrom i_h verknüpft.

Ersatzschaltbild für den technischen einphasigen Zweiwicklungstransformator:

Ziel ist es die magnetischen Kopplungen durch äquivalente galvanische Verbindungen auszudrücken.

Ist die relative Permeabilität des Eisens konstant (keine Eisenverluste), so gilt für die magnetischen Flüsse:

$\Phi_h = \Lambda_h w_1 i_1 + \Lambda_h w_2 i_2$	Hauptfluss
$\Phi_{\sigma 1} = \Lambda_{\sigma 1} w_1 i_1$	Streufluss Wicklung 1
$\Phi_{\sigma 2} = \Lambda_{\sigma 2} w_2 i_2$	Streufluss Wicklung 2
$\Phi_1 = \Phi_h + \Phi_{\sigma 1}$	Fluss durch Wicklung 1
$\Phi_2 = \Phi_h + \Phi_{\sigma 2}$	Fluss durch Wicklung 2

Es ist zweckmäßig die sekundäre Spannung und den sekundären Strom nicht in der Originalgröße einzuführen, sondern auf die Primärseite bezogene Größen zu verwenden. Diese unterscheiden sich nur wenig von den primären Größen und werden mit einem hochgestellten Kreuz gekennzeichnet.

$$\ddot{u} = w_1 / w_2 \quad \text{Übersetzungsverhältnis}$$

$$i_2^x = i_2 / \ddot{u} \quad \text{auf Oberspannungsseite bezogener Sekundärstrom}$$

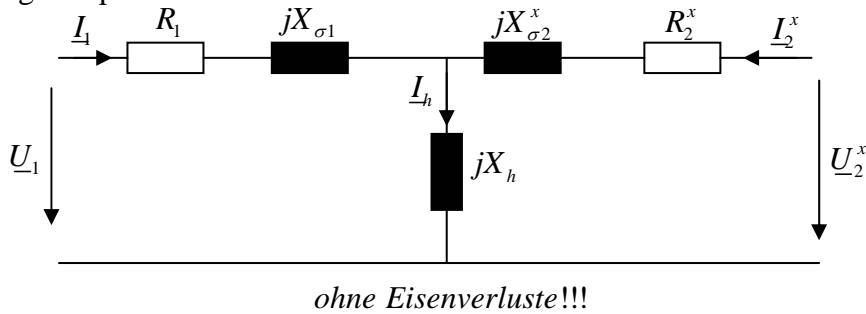
$$u_2^x = \ddot{u} \cdot u_2 \quad \text{auf Oberspannungsseite bezogene Sekundärspannung}$$

$$L_{\sigma 2}^x = \ddot{u}^2 \cdot L_{\sigma 2} \quad \text{Induktivität der US-Wicklung auf OS-Seite bezogen}$$

$$R_2^x = \ddot{u}^2 \cdot R_2 \quad \text{ohmscher Widerstand der US-Wicklung auf OS-Seite bezogen}$$

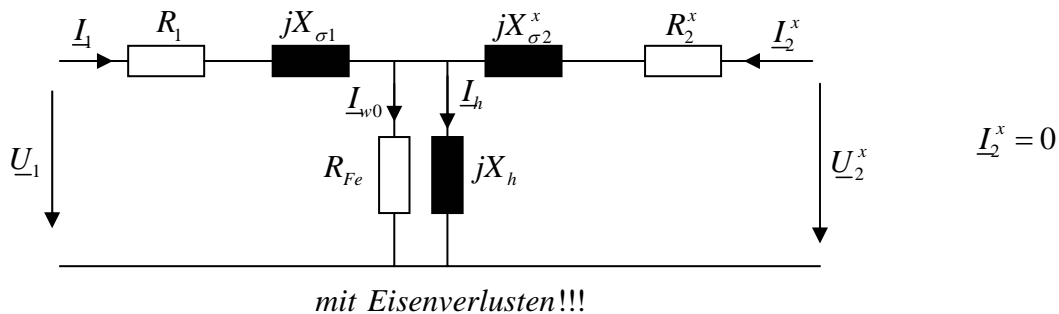
→ T-Ersatzschaltbild: (Streuflüsse → zusätzlicher Induktiver Spannungsfall → X_σ)

Verwendung komplexer Größen!



Leerlauf:

Transformatoren bleiben auch dann in Betrieb, wenn sie nicht oder nur wenig belastet werden. Dabei fließt der Leerlaufstrom und es treten Leerlaufverluste auf, die im Wesentlichen aus Eisenverlusten im Eisenkern bestehen.



Widerstand R_1 und Reaktanz $X_{\sigma 1}$ können in den meisten Fällen gegenüber X_h vernachlässigt werden:

$$I_{10} = \sqrt{I_{m0}^2 + I_{w0}^2} \quad I_{m0} = I_h = \frac{U_1}{jX_h} \quad I_{w0} = \frac{P_0}{U_1}$$

Kurzschluss:

Zu unterscheiden sind der Stoßkurzschluss und der Dauerkurzschluss. Unmittelbar nach dem Kurzschließen der Sekundärwicklung tritt ein hoher Strom auf (Stoßkurzschlussstrom), der im Laufe der Zeit auf den stationären Dauerkurzschlussstrom abklingt. Der Stoßkurzschlussstrom ist maßgebend für die mechanische Beanspruchung der Wicklungen. Der Dauerkurzschluss eignet sich zur experimentellen Bestimmung charakteristischer Daten (Kurzschlussspannung). Chließt man die US-Wicklung kurz und erhöht die Spannung U_1 auf der OS-Seite so lange bis der Bemessungsstrom I_r fließt, lässt sich die Kurzschlussimpedanz Z_k bestimmen. Die dabei an der OS-Seite anliegende Kurzschlussspannung U_k wird üblicherweise auf die Bemessungsspannung U_r des Transformators bezogen und als bezogene oder relative Kurzschlussspannung u_k bezeichnet.

$$u_k = \frac{U_k}{U_r} \quad Z_k = \frac{U_k}{I_r} \quad u_k = \frac{U_k}{U_r} = Z_k \cdot \frac{I_r}{U_r} = \frac{Z_k}{Z_r} = z_k$$

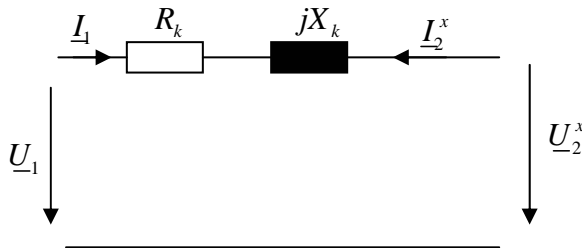
Belastung mit Bemessungsstrom:

Da der Magnetisierungsstrom I_h sehr klein gegenüber dem Bemessungsstrom I_r ist, können für diesen Betriebszustand R_{Fe} & X_h im Ersatzschaltbild vernachlässigt werden.

$$X_h \rightarrow \infty \quad R_{Fe} \rightarrow \infty$$

$$R_k = R_1 + R_2^x \quad X_k = X_{\sigma 1} + X_{\sigma 2}^x \quad \underline{Z}_k = R_k + jX_k$$

$$R_k = P_{Cu} \cdot \frac{U_{r1}^2}{S_{rT}^2} = \frac{P_{Cu}}{3 \cdot I_1^2}$$



$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2}$$

$$R_k \leq 0,3 \cdot X_k \Rightarrow Z_k \approx X_k$$

Drehstromtransformator:

Grundsätzlich lässt er sich aus drei Einphasentransformatoren aufbauen. Bei symmetrischer Belastung folgt für die Summe der magnetischen Flüsse in den mittleren Schenkeln $\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = 0$ → Bei Verbindung der Joche miteinander kann auf einen mittleren Schenkel verzichtet werden → symmetrischer Drehstrom-Kerntransformator. Aus Platzgründen werden die Schenkel in einer Ebene angeordnet. Um die Höhe des Jochs gering zu halten wird ein Teil auf zwei weitere Schenkel übertragen → Fünfschenkeltransformator. Die Schaltung der Wicklungen kann sowohl in Stern als auch in Dreieck erfolgen. Da bei der Stern-Schaltung die Strangspannung gegenüber der Dreieckspannung um den Faktor $\sqrt{3}$ kleiner ist, wird vorzugsweise die Oberspannungswicklung in Stern und die Unterspannungswicklung in Dreieck geschaltet.

Die Kenngrößen (Übersetzungsverhältnis, Bemessungsspannung, Bemessungsleistung, Kurzschlussspannung) sind bei Drehstromtransformatoren analog zu den Einphasentransformatoren definiert. Die bezogene Kurzschlussspannung u_k gilt für einen dreipoligen Kurzschluss bei symmetrischen Spannungssystemen.

Auch ein symmetrischer Drehstromtransformator lässt sich durch ein einphasiges ESB darstellen. Dabei werden alle Größen auf eine Sternschaltung bezogen.

Bei Drehstromtransformatoren wird die Kurzschlussspannung U_{kT} ebenso wie die Bemessungsspannung U_{rT} stets als Aussenleiterspannung (Dreieckspannung) angegeben.

Gespeiste Wicklung als Sternschaltung:

$$\text{Relative Kurzschlussspannung: } u_k = \frac{U_{kT}}{U_{rT}} = \frac{X_k \cdot I_{rT}}{U_{rT} / \sqrt{3}}$$

$$\text{Bemessungsleistung: } S_{rT} = \sqrt{3} \cdot U_{rT} \cdot I_{rT}$$

$$\text{Kurzschlussreaktanz: } X_k = \frac{u_k \cdot U_{rT}^2}{S_{rT}}$$

Eingespeiste Wicklung als Dreieck:

Dreieck-Stern-Umwandlung:

$$X_{k\text{Stern}} = \frac{X_{k\Delta}}{3}$$

Verluste eines Drehstromtransformators:

Eisenverluste (unabhängig von der Belastung): $P_{Fe} = p_{Fe} \cdot S_r$

Kupferverluste (abhängig von der Belastung): $P_{Cu} = 3 \cdot R \cdot I^2$ $R \approx R_1 + R_2^x$

Elektrisch umlaufende Maschinen:

Grundlagen:

Elektrische Maschinen können als Generator, Motor, Bremse arbeiten. Sowohl im Generator- als auch im Motorbetrieb entstehen Verluste. Im Bremsbetrieb wird der Maschine über die Welle mechanische Leistung und vom Netz elektrische Leistung zugeführt. Beide Leistungen werden in Wärme umgesetzt. Bremswirkung kann auch im Generatorbetrieb erzielt werden (Nutzbremsung: Energie an Netz abgegeben; Widerstandsbremsung: Energie an Widerständen in Wärme).

Jede rotierende elektrische Maschine besteht aus einem feststehenden Teil (Ständer/Stator) und aus einem umlaufenden Teil (Läufer,Rotor). Als Anker wird der Teil bezeichnet, in dessen Wicklungen durch relative Drehung gegen ein magnetisches Feld elektrische Spannungen erzeugt werden (Bei Gleichstrommaschinen im Läufer, bei Synchronmaschinen meist im Ständer).

Das Grundprinzip beruht auf dem Induktionsgesetz und der Kraftwirkung zwischen zwei Magnetfeldern. Der Leerlauf stellt einen Sonderfall dar, da im verlustfreien Fall nur die Wirkung einer stromlosen Leiterschleife im Magnetfeld zu betrachten ist.

Eine sich drehende stromlose Spule wird von einem zeitlich konstanten Magnetfeld, das von einem Permanent- oder Elektromagneten (Erreger- bzw. Feldwicklung) erzeugt wird, durchflutet. Dreht man eine Spule mit $w = 1$ Windungen, in einem homogenen und zeitlich konstanten Feld mit der magnetischen Induktion B mit konstanter mechanischer Winkelgeschwindigkeit Ω , wird in der Spule entsprechend dem Induktionsgesetz eine sinusförmige Spannung induziert.

$$u_i = 2 \cdot R \cdot l \cdot B \cdot \Omega \cdot \sin(\Omega t)$$

In realen elektrischen Maschinen versucht man den magnetischen Widerstand des Erregerflusses möglichst gering zu halten und strebt einen kleinen Luftspalt δ an. Dazu werden die Drähte der einzelnen Windungen einer Spule auf einem Blechpaket angeordnet. Wird der Läufer mit der Spule mit konstanter mechanischer Winkelgeschwindigkeit Ω gedreht, wird in der Spule eine nahezu rechteckförmige Spannung induziert, die jeweils dann die Polarität wechselt, wenn die Spule die sog. Neutrale Zone durchläuft.

Die korrekte Betrachtung des Funktionsprinzips elektrischer Maschinen mit Hilfe der Wechselwirkung zwischen zwei Magnetfeldern ist der vereinfachten Betrachtung der Wechselwirkung zwischen einem Magnetfeld und einem stromdurchflossenen Leiter gleichwertig.

Gleichstrommaschine:

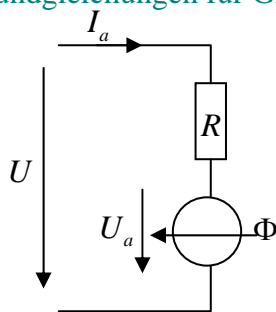
Arbeitet die Maschine als Generator im Leerlauf, so liegt an den Klemmen die in der Spule induzierte Spannung u_i an. Sie ist bei einer Spule mit $w = 1$ Windungen dem räumlichen Verlauf der magnetischen Induktion proportional. Fließt in der Spule ein Strom i , verursacht

die auf die Leiter der Spule wirkende Lorentzkraft $\vec{F}_L = i \cdot l \cdot (\vec{e}_i \times \vec{B})$ ein Drehmoment entgegen der Drehrichtung (Rechte-Hand-Regel). Um den Läufer zu drehen muss somit mechanische Leistung zugeführt werden und somit wird elektrische Leistung an das Netz abgegeben (Generator). → Erzeugung von Wechselspannung, da der Strom während einer Umdrehung der Spule zweimal die Richtung ändert.

Um Gleichspannung zu erhalten muss man dafür sorgen, dass die Richtung des Stroms an den Anschlussklemmen dann umgekehrt wird, wenn die Spule in der neutralen Zone liegt (induzierte Spannung gleich 0). Hierzu benutzt man einen Kommutator (Stromwender), der aus einzelnen Kupfersegmenten besteht, die mit der Leiterschleife umlaufen und auf denen feststehende Kohlebürsten schleifen. → Richtungsumkehr des Stromes beim Durchgang durch die neutrale Zone. → pulsierende Gleichspannung.

Um motorischen Betrieb zu erreichen, muss eine Gleichspannung U an die Klemmen angelegt werden. Auf die vom Strom I durchflossenen Leiter der Spule wirkt die Lorentzkraft und verursacht ein Drehmoment, das den Läufer in Drehung versetzt. → Motor. Das Prinzip der Stromwendung muss hier genauso wie beim Betrieb als Generator angewendet werden, da das Drehmoment sonst zwei mal die Richtung ändert und das resultierende somit im Mittel Null wäre.

Grundgleichungen für Gleichstrommaschinen:



- U : Klemmenspannung
- U_a : im Anker induzierte Spannung
- I_a : Strom im Ankerkreis
- R : Widerstand des Ankerkreises
- Φ : wirksamer magnetischer Fluss

Die im Anker induzierte Spannung U_a weist stets in dieselbe Richtung wie die Klemmenspannung. Im Generatorbetrieb ist sie größer, im Motorbetrieb kleiner als die Klemmenspannung.

Grundgleichungen für den stationären Betrieb mit Gleichstrom:

$$U_a = U - R \cdot I_a = K_1 \cdot \Phi \cdot n$$

$$M = K_2 \cdot \Phi \cdot I_a$$

K_1, K_2 : Maschinenkonstanten

$$n = \frac{U}{K_1 \cdot \Phi} - \frac{R}{K_1 \cdot K_2 \cdot \Phi^2} M$$

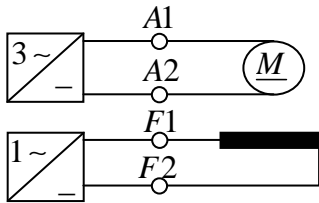
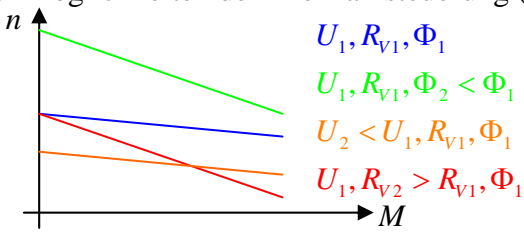
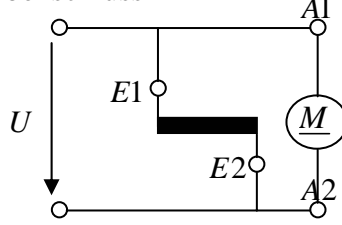
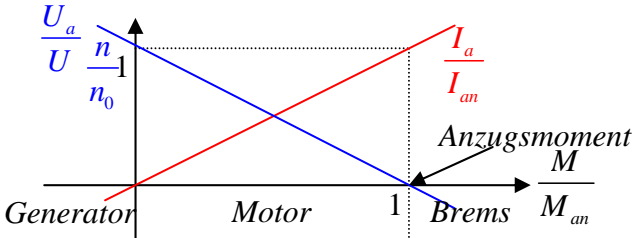
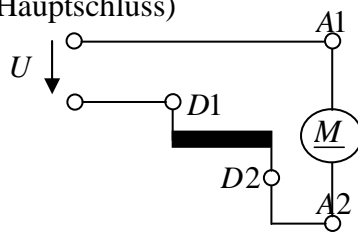
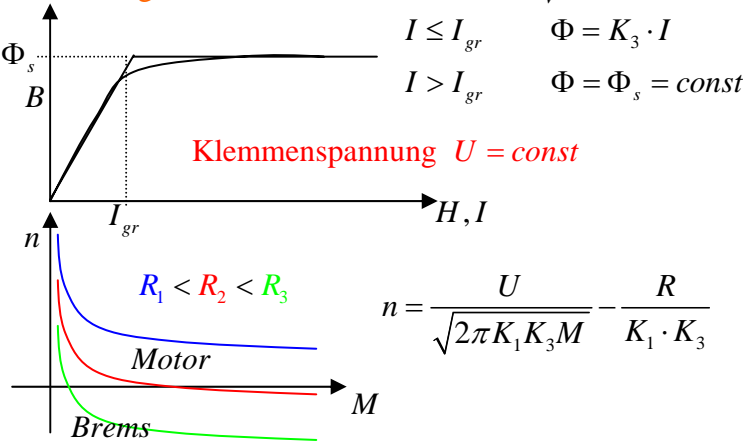
$$\Omega = 2\pi n$$

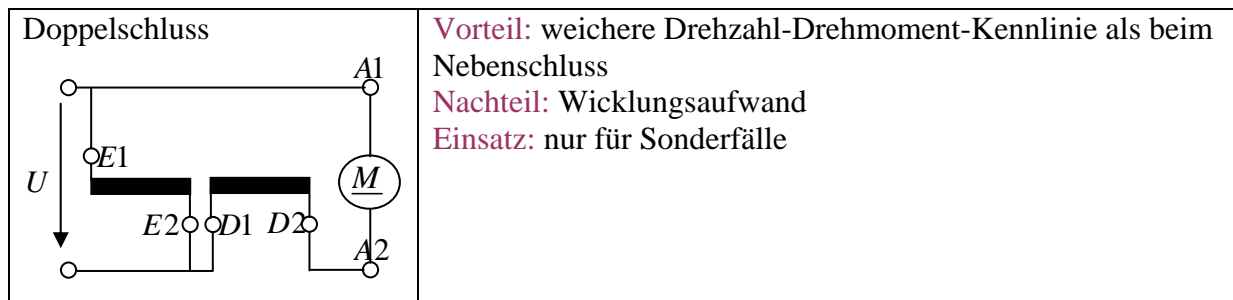
$$M_{Nutz} = M - M_R$$

$$K_1 = 2\pi \cdot K_2$$

Schaltungsarten der Erregerwicklung:

Die Ziffer 1 in der Klemmenbezeichnung einer Wicklung kennzeichnet immer die positive Seite, bei der bei Generatorbetrieb der Strom des Ankers herausfließt und bei Motorbetrieb hineinfließt.

<p>Fremderregung</p>  <p>Wirkungsgrad:</p> <p>Motor: $\eta_M = \frac{U_a}{U}$</p> <p>Generator: $\eta_G = \frac{U}{U_a}$</p> <p>Da beim Anlaufen aus dem Stillstand sehr hoher Anlaufstrom nötig, erfolgt Begrenzung durch Vorschaltwiderstände!!!</p>	<p>Vorteil: getrennte Stellung von Anker- & Erregerstrom, dadurch 2 Freiheitsgrade für Drehzahlstellung</p> <p>Nachteil: zwei speisende Stellglieder oder Permanenterregung</p> <p>Einsatz: drehzahl geregelter Antrieb</p> <p>Verwendung eines Vorschaltwiderstands R_V im Ankerkreis!!</p> $n = \frac{U}{K_1 \cdot \Phi} - \frac{R}{K_1 \cdot K_2 \cdot \Phi^2} M \quad R = R_V + R_a$ <p>➔ Drei Möglichkeiten der Drehzahlsteuerung (U, R_V, Φ)</p> 
<p>Nebenschluss</p> 	<p>Vorteil: nur eine Speisespannung</p> <p>Nachteil: Feldschwächung bei Spannungsabsenkung führt zu geringem Anlaufmoment</p> <p>Einsatz: Antriebe ohne Drehzahlsteuerung</p> 
<p>Reihenschluss (Hauptschluss)</p>  <p>Einsatz nur wenn kein Leerlauf möglich sonst geht Maschine durch (Zerstörung)!!!</p> <p>Da beim Anlaufen aus dem Stillstand sehr hoher Anlaufstrom nötig, erfolgt Begrenzung durch Vorschaltwiderstände!!!</p>	<p>Vorteil: großes Drehmoment bei kleinen Drehzahlen</p> <p>Nachteil: Im Generatorbetrieb keine Netzzurückspeisung möglich</p> <p>Einsatz: Hubwerke, Traktionsantriebe</p> <p>Verwendung eines Vorschaltwiderstands R_V !!!</p>  <p>$I \leq I_{gr} \quad \Phi = K_3 \cdot I$</p> <p>$I > I_{gr} \quad \Phi = \Phi_s = const$</p> <p>Klemmenspannung $U = const$</p> $n = \frac{U}{\sqrt{2\pi K_1 K_3 M}} - \frac{R}{K_1 \cdot K_3}$



Maschine kann nicht wahlweise in Neben- oder Reihenschluss betrieben werden, da Erregerwicklung jeweils anders ausgelegt ist.

Drehfeldmaschinen:

Drehstrommaschinen besitzen eine 3-strängige Wicklung (Drehstromwicklung). Die Kraftwirkung zwischen Ständer und Läufer bzw. die induzierten Spannungen in den Wicklungen beruhen auf der Wirkung von Drehfeldern.

Erzeugung des Drehfeldes mit gleichstromerregter Wicklung oder Permanentmagneten:

Ein ruhendes gleichstromerregtes Polrad (Läufer) erzeugt an der Innenseite des Ständers einer elektrischen Maschine einen räumlichen Verlauf der magnetischen Induktion, welcher durch geeignete Gestaltung des Polrades (Abflachung der Pole zu den Rändern hin) einen sinusförmigen Verlauf über dem Umfangswinkel α erreicht. Dreht sich das Polrad mit der mechanischen Winkelgeschwindigkeit Ω , so wird in eine Ständerwicklung eine Spannung $u_i(t)$ mit der Kreisfrequenz ω induziert, deren zeitlicher Verlauf mit dem räumlichen Verlauf der Luftspaltinduktion korrespondiert.

Erzeugung des Drehfeldes durch ruhende mit Drehstrom gespeister Drehstromwicklung:

Werden drei Spulen so angeordnet, dass sich die Spulenachsen unter 120° schneiden, erhält man ein Drehfeld, wenn die drei sinusförmigen Spulenströme um $T/3$ zeitlich zueinander versetzt sind. Die Überlagerung der von den einzelnen Spulen verursachten Induktion $B_i(t)$ ergibt die zeitlich veränderliche gerichtete magnetische Induktion $B_z(t)$.

$$B_z(t) = \vec{e}_1 \cdot B_1(t) + \vec{e}_2 \cdot B_2(t) + \vec{e}_3 \cdot B_3(t) = B_1(t) + \underline{a} \cdot B_2(t) + \underline{a}^2 \cdot B_3(t)$$

Dieser rotiert mit der Kreisfrequenz ω in positiver Drehrichtung \rightarrow Drehfeld.

Synchronmaschine:

Die Synchronmaschine ist durch ein zeitlich konstantes Magnetfeld, das mit dem Läufer umläuft, und einer symmetrischen Drehstromwicklung gekennzeichnet. Im Motorbetrieb erzeugen die Ströme in der Drehstromwicklung ein Drehfeld, das in Wechselwirkung mit dem Gleichfeld des Läufers diesen in eine mit dem Drehfeld synchrone Drehbewegung zwingt. Im Generatorbetrieb induziert das umlaufende Gleichfeld des Läufers in der Drehstromwicklung des Ständers eine dreiphasige sinusförmige Spannung. Das zur Induktion der Phasenspannungen notwendige Magnetfeld wird durch die im Läufer aufgebrachte Erregerwicklung erzeugt, in der der Erregerstrom I_e fließt. Dabei gibt p die Anzahl der

Spulensätze (Polpaare) der Maschine an. Für die Läuferdrehzahl gilt: $n = \frac{f}{p} \cdot \frac{60s}{\text{min}}$

Die Bauart von Synchronmaschinen werden in Schenkel- (einzeln ausgeprägte Magnetpole mit unterschiedlichen Luftspaltweiten, Läufer haben großen Durchmesser → rel. hohe Fliehkräfte → max. 1000/min, Verwendung bei Wasserkraftwerken) und Vollpolmaschinen (Turboläufer mit konstantem Luftspalt, Verteilung der Erregerwicklung auf die Nuten, kleiner Aussendurchmesser aber große Baulänge → höhere Drehzahlen, Verwendung bei Dampf-/Gasturbinen) unterschieden.

Die Ankerwicklungen werden so ausgeführt, dass bei einer zweipoligen Maschine Hin- & Rückleiter der Windungen jedes Wicklungsstranges einander diametral gegenüber liegen. Bei Drehstrommaschinen (Anzahl der Stränge m , p) werden die Wicklungsstränge der Drehstromwicklung um den Winkel $360^\circ/pm$ gegeneinander versetzt angeordnet. Somit entstehen ab $p \geq 2$ zusätzliche Spulen für die Drehstromwicklung. Dabei werden die einander entsprechenden Spulen entweder parallel oder in Reihe geschaltet.

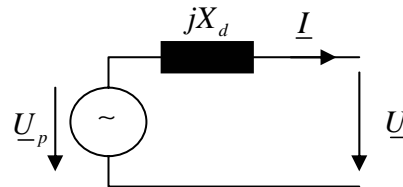
Im stationären Betrieb induziert das mit dem Läufer umlaufende Gleichfeld der Erregerwicklung eine jeweils um 120° zeitlich versetzte sinusförmige Spannung in den symmetrisch aufgebauten Ständerwicklungen. Diese Polradspannung ist über den Erregerstrom einstellbar. Sie können als eingepreßte Spannungsquellen aufgefasst werden und bilden ein symmetrisches dreiphasiges System. Im stationären Betrieb gilt:

$$\underline{U} = \underline{U}_p - \underline{I} \cdot (R + jX_d)$$

$$X_d = \varpi \cdot (L_h + L_\sigma)$$

\underline{U} : Klemmenspannung
 \underline{U}_p : Polradspannung
 \underline{I} : Strangstrom
 L_h : Drehfeldinduktivität
 L_σ : Streuinduktivität

Im einphasigen Ersatzschaltbild kann der Widerstand R im Allgemeinen vernachlässigt werden:



Die synchrone Reaktanz ist relativ groß; deshalb bezieht man ihren Wert auf die Bemessungsspannung U_{rG} und den Bemessungsstrom I_{rG} → bezogene synchrone Reaktanz x_d .

$$x_d = \frac{X_d \cdot I_{rG}}{U_{rG} / \sqrt{3}} \approx 1, 2, \dots, 3, 0$$

Mit der Bemessungsleistung S_{rG} folgt: $X_d = \frac{x_d \cdot U_{rG}^2}{S_{rG}}$

Durch Verändern der Polradspannung über den Erregerstrom sind Betrag und Phasenlage des Ständerstroms und damit das Blindleistungsverhalten beeinflussbar. Synchrongeneratoren, die nur Blindleistung abgeben oder aufnehmen werden als Phasenschieber bezeichnet. Sie werden eingesetzt um die überwiegend induktiven Netzströme durch ihr kapazitives Verhalten blindleistungsmäßig zu kompensieren. Durch eine Veränderung der Erregung wird der Betrag der Polradspannung \underline{U}_p verändert. Bleibt die Phasenlage der Netzspannung \underline{U} und der Polradspannung \underline{U}_p erhalten und wird ausgehend vom Leerlaufzustand lediglich die Erregung so verändert, dass $\underline{U}_p > \underline{U}$ spricht man von übererregtem Betrieb. Es fließt im Zeigerbild (EVS) ein um 90° nacheilender Strom, damit gibt der Synchrongenerator induktive Blindleistung ab und wirkt im Netz wie eine Kapazität. Beim untererregten Betrieb eilt der

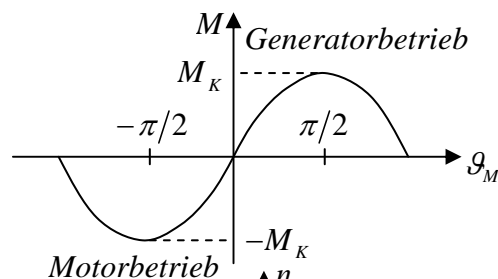
Strom im Zeigerbild um 90° vor. Somit nimmt der Generator induktive Blindleistung auf und wirkt im Netz wie eine Induktivität.

Soll der Synchrongenerator auch Wirkleistung abgeben, ist dem Läufer eine mechanische Leistung $P_n = M\Omega$ zuzuführen. Da sich die Drehzahl des Polrades nicht ändern kann wirkt ein Moment auf den Läufer, das ihn aus seiner Leerlauflage gegenüber dem Drehfeld in Drehrichtung verschiebt. Somit wird die induzierte Polradspannung \underline{U}_p gegenüber der Netzspannung \underline{U} um den Polradwinkel vorgekehrt \rightarrow zeitliche Phasenverschiebung. Somit gibt der Synchrongenerator Wirkleistung ab und kann dabei induktive Blindleistung sowohl aufnehmen als auch abgeben. Energieversorgungsnetze wirken meist induktiv, diese Blindleistung kann vom Generator nur dann geliefert werden, wenn $\underline{U}_p > \underline{U}$ (übererregt). Der Strom \underline{I} eilt dabei der Klemmenspannung \underline{U} nach. Generator gibt induktive Blindleistung ab! Wird der Generator untererregt betrieben ($\underline{U}_p < \underline{U}$) wird induktive Blindleistung aus dem Netz aufgenommen und der Strom \underline{I} eilt der Klemmenspannung \underline{U} voraus. Generator nimmt induktive Blindleistung auf. Bei untererregtem Betrieb führt die gleiche Wirkleistungsabgabe zu relativ großen Polradwinkeln; dies wirkt sich nachteilig auf die Stabilität des Synchrongenerators aus.

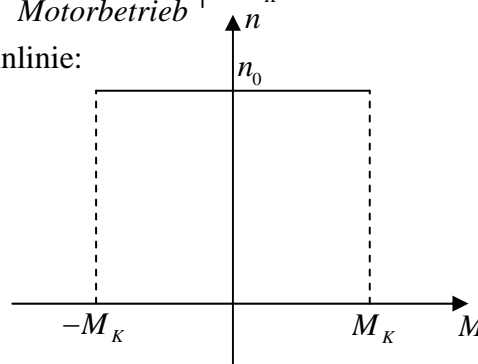
Für den Zusammenhang von Wirkleistungsabgabe und Polradwinkel ϑ_M gilt: $X_d \cdot I_w = U_p \cdot \sin \vartheta_M$

Für die Wirkleistungsabgabe an das Netz gilt: $P = 3 \cdot U \cdot I_w = 3 \cdot \frac{U \cdot U_p}{X_d} \cdot \sin \vartheta_M$

Das maximale Drehmoment tritt bei einem Lastwinkel von $\pm \pi/2$ auf und wird Kippmoment M_K genannt. Wird das Kippmoment der Maschine überschritten, so kann sie ihre synchrone Drehzahl nicht mehr halten. Daher wird der Polradwinkel kleiner als $\pi/2$ gehalten.



Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie:



Fazit:

- Blindleistungsabgabe durch Erregerstrom einstellen
- Übererregter Synchronen. verhält sich wie Kapazität; gibt induktive Blindleistung ab
- Untererregter Synchronen. verhält sich wie Induktivität; nimmt induk. Blindleistung auf
- Wirkleistungsabgabe wird durch Läufer zur Verfügung gestellte Wirkleistung eingestellt
- Drehzahlerhöhung \rightarrow Verdrehung des Polradfeldes gegenüber Drehfeld \rightarrow Strom, dessen Wirkkomponente proportional zum aufgebrauchten Moment ist

Asynchronmaschine:

Der Läufer der Asynchronmaschine trägt anstelle der Erregerwicklung eine symmetrisch aufgebaute Mehrphasenwicklung, die in der Regel kurzgeschlossen ist. Bei diesem Kurzschlussläufer (Käfigläufer) liegen in den Nuten des Blechpakets Leiterstäbe aus Kupfer oder Aluminium, die über Kurzschlussringe an den Stirnseiten verbunden sind. → Einfacher Aufbau, günstig in der Herstellung, zuverlässig im Betrieb.

Bei einer Maschine mit p Polpaaren beträgt die Drehzahl des Drehfeldes: $n_1 = \frac{f_1}{p}$

Im Normalbetrieb weicht die Drehzahl des Läufers von der Drehzahl des Drehfeldes ab →

Schlupf: $s = \frac{n_0 - n}{n_0}$ Dabei ist sie im Motorbetrieb langsamer und im Generatorbetrieb

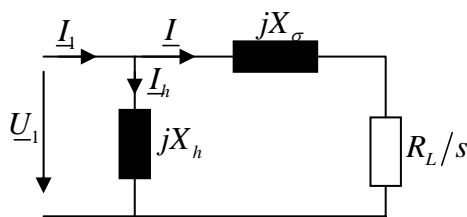
schneller.

Die im Läufer induzierte Spannung mit der Frequenz $f_2 = s \cdot f_1$ führt über die

Kurzschlussringe zu einem Stromfluss, wodurch ein Drehmoment entsteht, das versucht den Läufer in Richtung des umlaufenden Drehfeldes zu bewegen.

$$n = n_1 (1 - s) = \frac{f_1 (1 - s)}{p} = \frac{f_1 - f_2}{p}$$

Vereinfachtes ESB der Asynchronmaschine für stationären Betrieb:



U_1 : Ständerspannung

I_h : Magnetisierungsstrom

X_σ : Streureaktanz

X_h : Hauptreaktanz

R_L : Läuferwiderstand

Wird der Magnetisierungsstrom I_h vernachlässigt, so gilt:

$$\underline{I} = \frac{U_1}{R_L/s + jX_\sigma}$$

$$P_{zu} = \frac{3 \cdot I^2 \cdot R_L}{s}$$

$$I = \frac{U_1}{\sqrt{(R_L/s)^2 + X_\sigma^2}}$$

$$P_{mech} = \frac{3 \cdot I^2 \cdot R_L}{s} (1 - s) = P_{zu} (1 - s) = M \Omega = M \cdot 2\pi n_0 (1 - s)$$

$$M = \frac{P_{mech}}{2\pi n} = \frac{3}{2\pi n_0 s} \frac{U_1^2 \cdot R_L}{[(R_L/s)^2 + X_\sigma^2]} = \frac{2M_K}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}}$$

$$\eta = \frac{P_{mech}}{P_{zu}} = (1 - s)$$

$$s_K = R_L / X_\sigma$$

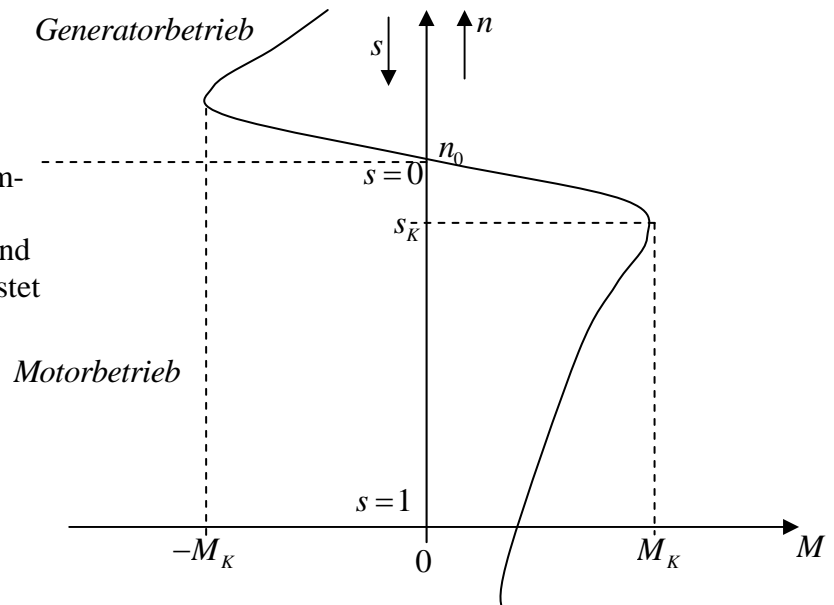
$$M_K = \frac{3}{2\pi n_0} \frac{U_1^2}{2X_\sigma} = \frac{3p}{\omega} \frac{U_1^2}{2X_\sigma}$$

Fazit:

- Bei konst. Schlupf ändert sich das Drehmoment quadratisch mit der Klemmenspannung
- Drehmoment ist umgekehrt proportional dem Quadrat der speisenden Frequenz
- Kippmoment ist unabhängig vom Läuferwiderstand
- Für großes Anlaufmoment sind große Wirkwiderstände im Läufer vorteilhaft. Sie vergrößern den Kippschlupf und verschieben so das Kippmoment zu kleineren Drehzahlen
- Wirkungsgrad ist unabhängig vom Läuferwiderstand

Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie:

Generatorbetrieb erfordert, dass die Asynchronmaschine an ein Drehstromnetz angeschlossen ist, wodurch die synchrone Drehzahl vorgegeben ist und die magnetische Induktion gewährleistet ist.



Bei einer Spannungs-Frequenz-Regelung einer Asynchronmaschine muss bei Absenken der Frequenz auch die Spannung abgesenkt werden, damit das Verhältnis von Drehmoment zu

Kippmoment bei Verringerung der Drehzahl konstant bleibt. $\frac{U_1}{f_1} = \frac{U_{1r}}{f_{1r}} = const.$

Bei Erhöhung der Frequenz kann die Spannung nicht höher als die Bemessungsspannung U_{1r} werden, somit verringert sich bei steigender Drehzahl das Verhältnis von Drehmoment zu Kippmoment.

Sondermaschine – Linearmotor:

Schneidet man gedanklich den Ständer und den Läufer einer Synchronmaschine auf und wickelt beide zu einer ebenen Fläche ab, wird aus dem magnetischen Drehfeld ein magnetisches Wanderfeld und die Drehbewegung geht in eine lineare Bewegung über (Wanderfeldmaschine). Der Linearmotor ist als synchrone oder asynchrone Maschine möglich.

Übertragung elektrischer Energie:

Freileitungen:

Holzmaße	Nieder- / Mittelspannung
Betonmaße	Mittelspannung
Stahlgittermaße	Hochspannung

Freileitungen bestehen aus Erdseil (schützen Leiterseile vor direktem Blitzeinschlag), Leiterseilen, Abspannmasten, Tragmasten, Traversen, Abspannisolatoren, Hängeisolatoren. Der Abstand zweier Masten wird als Feldlänge l bezeichnet ($U \uparrow \Rightarrow l \uparrow$). Leiterseile für Hochspannungsleitungen sind aus mehreren einzelnen, verdrehten Leitungsdrähten aufgebaut. Aluminium-Stahl-Seile bestehen aus einer Stahlseele umgeben von mehreren Lagen aus Aluminiumdrähten. Das Querschnittsverhältnis Al/St = 6:1 (z.B.: Al/St 240/40) Dabei erfolgt die Bemessung der Leiterseile nach der wirtschaftlichen Stromdichte ($0,7..1A/mm^2$) und der maximal zulässigen Randfeldstärke ($17kV_{eff}/cm$) (Minimierung von Störungen und Koronaentladungen). Ab 220kV werden anstelle von Einzelleitern Bündelleiter, bestehend aus mehreren Teilleitern verwendet. Diese werden charakterisiert

durch die Anzahl n der Teilleiter, dem Teilleiterradius r , Teilleiterabstand a und dem Radius des Teilkreises r_T .

Kabel:

Gürtelkabel	Niederspannung
Dreimantelkabel	Mittel-/Hochspannung (Radialfeldkabel)
Einleiterkabel	Höchstspannung (Radialfeldkabel)

Als Isoliermedien verwendet man mit zähflüssigem Dielektrikum imprägnierte Papierlagen (Massekabel) oder mit dünnflüssigem Mineralöl (Öl-Papier-Kabel) und Kunststoffe (PE) die durch Extrusion aufgebracht werden (extrudierte Isolierung). Sie werden im Erdreich, oder Kabelschächten verlegt. Vergleich mit Freileitungen:

- Kabel sind erheblich teurer als Freileitungen
- Störungen sind bei Freileitungen leichter lokalisier- und behebbar.
- Kabel weisen hohe Kapazität auf → hohe thermische Belastung → max. Länge 30km.

Elektrische Kenngrößen von Drehstromleitungen:

Das Verhalten der Drehstromleitungen ist bestimmt durch:

- Widerstand der einzelnen Leiter R_i
- Eigeninduktivität L_{ii} , Koppelinduktivitäten M_{ij} und M_{iE}
- Querleitwerte G_{ij} und G_{iE}
- Koppelkapazitäten C_{ij} und C_{iE}

Dabei werden die Kenngrößen als längenbezogenen Größen (Beläge) angegeben. Symmetrisch belastete Drehstromleitungen können mit einpoligen Ersatzschaltbildern für Längsimpedanz \underline{Z}_b und Queradmittanz \underline{Y}_b dargestellt werden.

Vereinfachte Leitungsbetrachtung:

Hierbei werden die Queradmittanz G_b und Suszeptanz Y_b vernachlässigt. Widerstandsbelag R' und Induktivitätsbelag L_b' sind konstant. → $R = R' \cdot l$ und $X_b = \omega L_b = \varpi \cdot L_b' \cdot l$

Für einen ohmsch-induktiven Verbraucher am Ende der Leitung ergibt sich für den Spannungsabfall längs der Leitung:

$$\underline{U}_{12} = \Delta U + j\delta U$$

$$\Delta U = R \cdot I_w + \varpi L_b \cdot I_b \quad (\text{Längsspannungsabfall})$$

$$\delta U = \varpi L_b \cdot I_w - R \cdot I_b \quad (\text{Querspannungsabfall})$$

ΔU ist maßgebend für die Spannungshaltung, δU bestimmt den Leitungswinkel ϱ (Er sollte 20-25° nicht überschreiten!!) und damit die Stabilität. Für die Stabilität ist der Winkel zwischen Polradspannung U_p und Spannung U_2 am Ende der Leitung entscheidend.

Bei Hoch- & Mittelspannungsleitungen kann der ohmsche Längswiderstand $R \ll \varpi L_b$ vernachlässigt werden: $\underline{U}_{12} = \underline{I} j \varpi L_b$

$$\Delta U = \varpi L_b \cdot I_b \quad (\text{Q-abhängig})$$

$$\delta U = \varpi L_b \cdot I_w \quad (\text{P-abhängig})$$

Verlustfreie Fernleitung:

Bei Hoch- und Höchstspannungsleitungen. Hierbei gibt es keine ohmschen Längs- und Querelemente → verlustfreie Leitung. Da die Stromstärke $i(x, t)$ entlang der Leitung nicht zu jedem Zeitpunkt jeweils dieselbe ist, wird ein so kleiner Abschnitt der Leitung betrachtet, dass in ihm die Stromstärke als konstant anzunehmen ist.

Leitungsgleichungen:

$$\underline{U}(x) = \underline{U}_1 \cos(\beta x) - j\Gamma \underline{I}_1 \sin(\beta x)$$

$$\text{Phasenkonstante: } \beta = \varpi \sqrt{L' C'}$$

$$\underline{I}(x) = \underline{I}_1 \cos(\beta x) - j \frac{\underline{U}_1}{\Gamma} \sin(\beta x)$$

$$\text{Wellenwiderstand: } \Gamma = \sqrt{\frac{L'}{C'}}$$

Elektrische Größen am Leitungsende ($x = l$):

$$\underline{U}_2 = \underline{U}_1 \cos(\beta l) - j\Gamma \underline{I}_1 \sin(\beta l)$$

$$\underline{I}_2 = \underline{I}_1 \cos(\beta l) - j \frac{\underline{U}_1}{\Gamma} \sin(\beta l)$$

Sind $\underline{U}_2, \underline{I}_2$ am Ende der Leitung bekannt so gilt:

Elektrische Größen in der Leitung (x):

$$\underline{U}(x) = \underline{U}_2 \cos(\beta(l-x)) + j\Gamma \underline{I}_2 \sin(\beta(l-x))$$

$$\underline{I}(x) = \underline{I}_2 \cos(\beta(l-x)) + j \frac{\underline{U}_2}{\Gamma} \sin(\beta(l-x))$$

Elektrische Größen am Leitungsanfang ($x = 0$) → Zweitorgleichungen:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cos(\beta l) + j\Gamma \underline{I}_2 \sin(\beta l)$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 \cos(\beta l) + j \frac{\underline{U}_2}{\Gamma} \sin(\beta l)$$

$$\begin{pmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{I}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\beta l) & j\Gamma \sin(\beta l) \\ j \frac{1}{\Gamma} \sin(\beta l) & \cos(\beta l) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 \end{pmatrix}$$

$$C' = \varepsilon_0 \varepsilon_r g_c$$

$$\beta = \varpi \sqrt{\varepsilon_r \mu_r} \frac{1}{c_0}$$

$$L' = \mu_0 \mu_r g_L$$

$$\Gamma = \Gamma_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \sqrt{\frac{g_l}{g_c}}$$

(377Ω Wellenwiderstand des Vakuums)

Bei symmetrischen Drehstromleitungen gilt für den Betriebswellenwiderstand: $Z_w = \sqrt{\frac{\varpi L_b'}{\varpi C_b'}}$

Die Leitung als Vierpol (Zweitor):

Die Leitung wird im π -Ersatzschaltbild mit einer Längsimpedanz Z_l und zwei symmetrischen Queradmittanzen $\frac{Y_q}{2}$ dargestellt.

Elektrisch lange Leitung (Fernleitung)	$Z_l = jZ_w \sin(\beta l)$	$\frac{Y_q}{2} = \frac{\cos(\beta l) - 1}{jZ_w \sin(\beta l)}$
Elektrisch kurze Leitung Freileitung: max 200km Kabel: max 100km	$Z_l = j\omega L_b 'l$	$\frac{Y_q}{2} = \frac{j\omega C_b 'l}{2}$

Dabei darf die Näherungslösung nicht um mehr als 1% von der genauen Lösung abweichen ($\beta l < 12^\circ$)

Stationäres Betriebsverhalten verlustfreier Leitungen:

Für stationäres Betriebsverhalten können Hoch- & Höchstspannungsleitungen als verlustfrei angenommen werden. Es gilt das einphasige π -Ersatzschaltbild.

Übertragung der natürlichen Leistung ($P_2 = P_{nat}$):

Wird die Drehstromleitung mit einem ohmschen Widerstand R_2 mit der Größe des Betriebswellenwiderstandes Z_w abgeschlossen, wird die natürliche Leistung P_{nat} (reine Wirkleistung) am Leitungsende entnommen. Dieser Zustand wird als natürlicher Betrieb bezeichnet.

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 e^{j\beta l} \quad \underline{I}_1 = \underline{I}_2 e^{j\beta l}$$

Spannung und Strom sind am Anfang und Ende der Leitung jeweils betragsgleich, jedoch weisen sie untereinander eine Phasendifferenz um den Leitungswinkel $\vartheta = \beta l$ auf, die mit steigender Leitungslänge l größer wird.

Bei einer Speisung mit Nennspannung U_n des Netzes nimmt die so betriebene

Drehstromleitung am Eingang die natürliche Leistung auf: $P_{nat} = \frac{U_n^2}{Z_w}$

Übertragung einer Leistung ($P_2 < P_{nat}$):

Ist $R_2 > Z_w$ so liegt ein unternatürlicher Betrieb vor. Somit dominiert das kapazitive Verhalten, da der Laststrom und damit das Magnetfeld klein sind. Der Grenzfall ist eine leerlaufende Leitung:

$$\underline{I}_2 = 0 \quad \underline{U}_1 = const \quad \underline{U}_2 = \frac{\underline{U}_1}{\cos(\beta l)}$$

→ stationäre Erhöhung der Spannung am Leitungsende gegenüber der Spannung am Leitungsanfang (Ferranti-Effekt). Dies tritt auch bei elektrisch kurzen Leitungen auf. Um einen natürlichen Betrieb zu ermöglichen, muss natürliche Leistung der tatsächlichen angepasst werden:

$$P_{nat} = 3 \frac{U_2^2}{Z_w} \quad Z_w = \sqrt{\frac{L_b '}{C_b '}} \quad \beta = \omega \sqrt{L_b ' \cdot C_b '}$$

→ $Z_w \uparrow$ mit $L_b ' \uparrow$ oder $C_b ' \downarrow$ → $L_b ' \uparrow \Rightarrow \beta \uparrow \Rightarrow \text{Stabilität} \downarrow$
 → $C_b ' \downarrow \Rightarrow \beta \downarrow \Rightarrow \text{Stabilität} \uparrow$

→ Anschalten einer Kompensationsinduktivität L_k am Leitungsende hat eine Reduktion von C_b' , Anpassung der natürlichen Leistung und Erhöhung der Stabilität zur Folge.

$$j\omega \frac{C_b^*}{2} = j\omega \left(\frac{C_b}{2} - \frac{1}{\omega^2 L_k} \right)$$

Übertragung einer Leistung ($P_2 > P_{nat}$):

Bei Entnahme hoher Wirkleistung liegt ein übernatürlicher Betrieb vor. Somit dominiert das induktive Verhalten, da der Laststrom und somit der Blindleistungsbedarf der Betriebsinduktivitäten, der das Blindleistungsangebot der Betriebskapazitäten übersteigt, sehr groß sind. Um einen natürlichen Betrieb zu ermöglichen, muss natürliche Leistung der tatsächlichen angepasst werden:

$$P_{nat} = 3 \frac{U_2^2}{Z_w} \quad Z_w = \sqrt{\frac{L_b'}{C_b'}} \quad \beta = \omega \sqrt{L_b' \cdot C_b'}$$

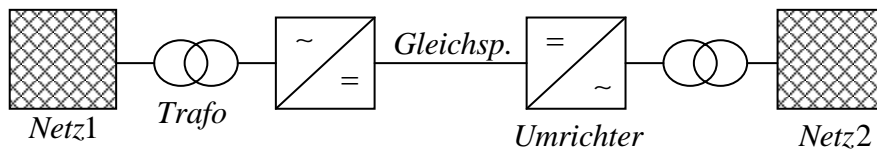
→ $Z_w \downarrow$ mit $L_b' \downarrow$ oder $C_b' \uparrow$ → $C_b' \uparrow \Rightarrow \beta \uparrow \Rightarrow Stabilität \downarrow$
 → $L_b' \downarrow \Rightarrow \beta \downarrow \Rightarrow Stabilität \uparrow$

→ Einfügen einer Kompensationskapazität C_k im Zuge der Leitung hat eine Reduktion von L_b' , Anpassung der natürlichen Leistung und Erhöhung der Stabilität zur Folge.

$$j\omega L_b^* = j\omega \left(L_b - \frac{1}{\omega^2 C_k} \right)$$

Auch bei Übertragung von Leistung im Bereich der natürlichen Leistung ist ab ca. 500km zur Erhöhung der Stabilität eine Längskompensation mit Kapazitäten erforderlich.

HGÜ-Anlagen:



Die Spannung des Drehstromnetzes 1 wird mit einem Trafo und einem Umrücker zu Gleichstrom mit einer Spannung von einigen hundert kV umgeformt. Die Energie wird über Kabel oder Freileitung zur Gegenstation transportiert. Dort wird sie wiederum durch einen Umrücker und Trafo an des Drehstromnetz 2 angepasst und eingespeist. Dabei können auch Netze unterschiedlicher Frequenz gekoppelt werden und der Leistungsfluss gesteuert bzw. umgekehrt werden. Bei einer bipolaren (Hin-&Rückleiter) Übertragung liegt eine erhöhte Betriebssicherheit vor, da bei Ausfall eines Leiters noch die Hälfte der elektrischen Energie übertragen werden kann. Bei einer monopolan Übertragung wird nur der Hinleiter verkabelt, die Rückleitung erfolgt über das Seewasser.

- Spannungsabfall längs der Leitung nur durch ohmsche Widerstände bestimmt → keine Stabilitätsprobleme und somit größere Leitungslängen möglich!
- Keine Ladeleistung für die Leitungen. → Längenbegrenzung bei Kabeln durch die Ladeleistung entfällt.
- Höhere Investitionen für Stromrichterstationen, Leitungskosten geringer (geringerer Platzbedarf, einfachere Mastenkonstruktion) → ab 500km HGÜ mit Freileitungen wirtschaftlicher!!!
- Netze mit unterschiedlichen Frequenzen oder mit gleichen Frequenzen aber unterschiedlicher Frequenzkonstanz kuppelbar. Netze entkoppelt → im Fehlerfall werden keine hohen Kurzschlussleistungen übertragen. Nur einige 10m Gleichstromkreis = Gleichstrom-Kurzschluss.

Elektrische Energieversorgungsnetze:

Stromversorgung:

- Öffentlich
- Nicht öffentlich (industrielle Eigenversorgung)

Orientierung für Kraftwerksstandorte:

- Günstige Bereitstellung von Primärenergie
- Möglichst nahe Lastschwerpunkte
- Orte mit ausreichender Kühlwasserdarbietung

Spannungsebenen der öffentlichen Versorgungsnetze:

- Höchstspannungsnetz (380&220kV): überregionaler & internationaler Austausch, regionale Übertragung von großen Kraftwerken zu nachgeordneten Netzen; in Einzelfällen direkte Versorgung von Industrie.
- Hochspannungsnetz (60&110kV): Übertragung & regionale Verteilung (Primärverteilung); Einspeisung von kleinen bis mittleren Kraftwerken. Versorgung von Sondervertragskunden mit hohem Leistungsbedarf.
- Mittelspannungsnetz (10&20kV): Versorgung der Mehrzahl von Sondervertragskunden; Speisung der Ortsnetze (Niederspannungsnetze 230/400V).

Netzicherheit:

Durch einen einfachen Ausfall eines Betriebsmittels (Transformator, Leitung) darf die Versorgung nicht unterbrochen werden. Erst ab zwei gleichzeitig auftretenden Fehlern kann es zu Versorgungsunterbrechungen kommen. $(n-1)$ -Ausfallkriterium.

Dies bedeutet, dass der Ausfall eines Betriebsmittels in den benachbarten Netzen weder zu einer Funktionseinschränkung noch zu einer Versorgungsunterbrechung führen darf. Deshalb muss der Netzbetrieb bei einem Betriebsmittelausfall nicht unterbrochen werden, jedoch muss die Systemstruktur so schnell wie möglich wieder hergestellt werden.

Struktur von Verteilungsnetzen:

Die Struktur von Verteilungsnetzen wird im wesentlichen von der Lastdichte (Summe aller Lasten bezogen auf die Fläche des zu versorgenden Gebietes) bestimmt.

Niederspannungsnetze:

- Strahlennetze: Sie werden bei sehr niedrigen Lastdichten eingesetzt; sie bestehen aus mehreren verzweigten Leitungen die von einer Trafostation gespeist werden. $(n-1)$ -Prinzip nur bedingt durch evtl. Kuppelschalter zu Nachbarnetzen erfüllt. Absinken der Netzspannung beim Einschalten großer Lasten.
- Ringleitung: Höhere Lastdichten; meist Kabel statt Freileitungen; entlang von Straßenzügen auf beiden Straßenseiten und im Normalbetrieb in der Mitte getrennt; mit zusätzlichen Trennstellen; → fehlerbehaftetes Leitungsstück kann gezielt isoliert werden durch öffnen der Kuppelschalter und verbinden der Trennstelle. Erhöhte Versorgungssicherheit, da alle Stationen von zwei Seiten gespeist werden können. Durch verbinden von Ringnetzen untereinander Vermaschungsgrad und damit Versorgungssicherheit vergrößern.

- Maschennetze: Ab Lastdichten von 5MVA/km²; vorhandene Trennstellen in der Mehrzahl auch im Betrieb durchverbunden (Ständig mindestens zwei Übertragungswege eingeschaltet) → hohe Versorgungssicherheit; nach Zusammenbruch Problem der Inbetriebnahme, da Netzstationen nicht gleichzeitig eingeschaltet werden können und somit häufig überlastet werden (evtl. vorübergehende Auftrennung der Vermaschung); ansteigende Kurzschlussströme mit zunehmendem Vermaschungsgrad.

Mittelspannungsnetze:

Vorwiegender Betrieb als Ringnetze, die von sicheren vermaschten Stützpunkten aus versorgt werden. Ringe meistens offen → Strahlennetze; Versorgungssicherheit durch Zuschaltmöglichkeit jedoch erheblich gesteigert.

Hochspannungsnetze:

Betrieb als Maschennetze, wobei große Lastzentren meist von einer Ringleitung umschlossen werden.

Schaltanlagen:

Als Schaltanlage wird die Gesamtheit aller Betriebsmittel an einem Ort (Raum/Gelände) bezeichnet. Einzelne Leitungen werden dort an Netzknoten verbunden bzw. die Möglichkeit des Freischaltens gegeben. Bei kleineren Einheiten spricht man von Ortsnetzstationen.

Betriebsmittel:

- Sammelschienen
- Leistungsschalter (im Normalbetrieb und Störfall vorkommende Ströme schalten, in Anlagen mit Kurzunterbrechung (KU) muss die Schaltfolge AUS-EIN-AUS bewältigt werden; schnelle Löschung des Lichtbogens durch Gas)
- Trennschalter (nur stromlos schalten – Verriegelung mit Leistungsschalter!, sichtbare Trennstrecke, Längsisolation deutlich über Leiter-Erde-Isolation) Zwei-/Dreistützer-Drehtrenner, Zweistützer-Klapptrenner, Einsäulen(Scheeren)trenner
- Stromwandler (Strommessung)
- Spannungswandler (Spannungsmessung)
- Überspannungsableiter
- Sicherungen (nur MS-Netz)
- Einrichtungen zum Schutz, Überwachung, Steuerung
- (Transformatoren → Umspannanlage)

Bei Schaltanlagen mit Doppelsammelschienen ist es möglich, ohne Betriebsunterbrechung der anderen Abzweige, einzelne Sammelschienen oder Abzweige freizuschalten. Dabei werden alle anderen Abzweige auf die andere Sammelschiene umgeschaltet.

Freiluftschaltanlagen sind in der Nähe großer Verbraucherzentren (Städte) zu finden. Jedoch haben sie einen großen Platzbedarf. Wird statt Luft das synthetische Isoliergas Schwefelhexafluorid SF_6 verwendet, so erreicht man eine wesentlich kompaktere Bauform (Platzbedarf nur 10% → Unterbringung in Gebäuden innerhalb der Stadt möglich)

„Gasisolierte metallgekapselte Schaltanlagen (GIS)“

Man unterscheidet dabei in einphasige (jeder spannungsführende Leiter koaxial in einem geerdeten Rohr) und dreiphasige (drei Leiter pro Rohr) Kapselung.

Kraftwerksregelung:

Kraftwerke benötigen Zeit für eine Laständerung; Lastprognosen dienen als Grundlage für den Leistungsfahrplan.

Ein Gleichgewicht von erzeugter und abgenommener Leistung ist notwendig, um die Netzfrequenz stabil zu halten.

$$\frac{\Delta P_L}{P_n} = c_p \cdot \frac{\Delta f}{f_n}$$

ΔP_L : Änderung des Wirkleistungsbedarfs

c_p : abhängig von Verbraucherstruktur des Lastgebiets (ca. 0,5)

Kraftwerksregelung im Inselbetrieb:

Bei begrenztem Netz mit wenig Kraftwerken (Inselbetrieb) würde bereits kleine Änderung des Wirkleistungsbedarfs zu starken Drehzahl und Frequenzänderungen führen, wenn Antriebsleistung P_T der Turbine konstant bleibt.

$$P_T - P = \frac{dW}{dt}$$

Primärregler (Drehzahlregelung):

Proportionalregler (P-Regler) regelt die Turbine. Regelparameter werden so eingestellt, dass stationäre Regeldifferenz zwischen Schwachlast P_s und Nennlast P_n ca. 2,5Hz beträgt.

Verhältnis der Leistungsänderung zur Frequenzänderung ergibt Leistungskennzahl K_T der

Turbine (Statik: $\delta = 1/K_T$): $K_T = -\frac{\Delta P}{\Delta f}$

Durch geeignete Wahl der Statik kann erreicht werden, dass ein Kraftwerk entweder unabhängig von der vorherrschenden Netzfrequenz seine Nennleistung abgibt (Grundlastkraftwerk) oder sich im Rahmen seiner Leistungsfähigkeit an der Frequenzhaltung des Netzes beteiligt (Spitzenlastkraftwerk).

Primärregelung innerhalb weniger Sekunden wirksam!

Bei fortwährend veränderter Last verbleibt eine veränderte Turbinendrehzahl und somit eine veränderte Netzfrequenz (Regeldifferenz)!

Sekundärregler (Frequenzregelung):

Proportional-Integral-Regler (PI-Regler) vergleicht f mit f_{soll} und verändert n_{soll} (Eingangsgröße für Vergleichs Primärregler) so, dass Regelabweichung ausgeglichen wird. Sekundärregelung benötigt einige Minuten!

Inselnetz ist in sich geschlossener Netzverband, in dem nur ein einziger Kraftwerksblock mit einem Sekundärregler ausgerüstet sein darf. Solche Regelkraftwerke (meist Wasserkraftwerke) haben eine freie Regelleistung von 5-15% der gesamten Netzleistung vorzuhalten.

Kraftwerksregelung und Frequenzhaltung im Verbundbetrieb:

Bei zwei im Verbund betriebenen Netzen muss im Falle eines Leistungsanstieges des einen Netzes das andere Netz so lange Leistung zur Verfügung stellen (Übergabeleistung) bis das Kraftwerk die Mehrleistung langfristig ausgeregelt hat.

Bei der Übergabeleistungs-Frequenzregelung wird nach einer Störung durch den übergeordneten Netzregler (für Übergabeleistung, Sekundärregler) die Frequenz durch Verschieben der Frequenz-Leistungs-Kennlinie wieder auf den Sollwert zurückgeführt!

Mit der Leistungsregelung einhergehende Frequenzschwankungen im normalen Netzbetrieb bewegen sich zwischen $\pm 10\text{mHz} - \pm 50\text{mHz}$.

Kraftwerksanlagen erhalten über diese Schwankungen Informationen über die notwendige Leistungsabgabe.

Sinkt die Netzfrequenz zu weit ab, tritt ein 5-Stufenplan zum frequenzabhängigen Lastabwurf in Kraft, um einen großflächigen Zusammenbruch des Netzes zu verhindern.

Stufe 1	49,8Hz	Alarmierung des Personals; Einsatz noch nicht mobilisierter Kraftwerksleistung
Stufe 2	49,0Hz	Unverzögerlicher Lastabwurf von 10-15% der Netzlast
Stufe 3	48,7Hz	Unverzögerlicher Lastabwurf von weiteren 10-15% der Netzlast
Stufe 4	48,4Hz	Unverzögerlicher Lastabwurf von weiteren 15-20% der Netzlast
Stufe 5	47,5Hz	Abtrennen aller Kraftwerke vom Netz

Primärregelung bei Großstörungen:

Gleichzeitiger Einsatz der Drehzahlregler der Turbinen aller Regelblöcke des Systems. Die dabei von der Primärregelung auszugleichende maximale Abweichung ΔP zwischen Erzeugung und Verbrauch beträgt im UCPTE-Netz 3000MW (Referenzstörung). Bis zu diesem Wert darf die quasi-stationäre Frequenzabweichung nicht mehr als 180mHz betragen.

Kurzschlussstromberechnung in elektrischen Energieversorgungsnetzen:

- Satter Kurzschluss: Direkter Kontakt, Übergangswiderstand ist zu vernachlässigen
- Lichtbogenkurzschluss: Leiter sind über Lichtbogen miteinander verbunden

Kurzschluss bedeutet eine mechanische und thermische Beanspruchung, Spannungseinbruch im Netz und somit eine verminderte Leistungsabgabe, die zu einer steigenden Frequenz und sinkenden Stabilität führt!

Kurzschlussarten:

Einpoliger Kurzschluss	Ein Außenleiter wird mit Neutralleiter oder Erde kurzgeschlossen (unsymmetrisch)
Zweipoliger Kurzschluss ohne Erdberührung	Zwei Außenleiter sind kurzgeschlossen ohne Verbindung zu Erde oder Neutralleiter (unsymmetrisch)
Zweipoliger Kurzschluss mit Erdberührung	Zwei Außenleiter sind kurzgeschlossen mit gleichzeitiger Verbindung zu Erde oder Neutralleiter (unsymmetrisch)
Dreipolige Kurzschluss	Alle Außenleiter sind miteinander kurzgeschlossen. Eine zusätzliche Verbindung zu Erde oder Neutralleiter ist möglich. (symmetrisch)

Grundlage der Kurzschlussstromberechnung ist der quasistationäre, subtransiente Kurzschlussstrom, der in Wirklichkeit nur wenige Millisekunden andauert, aber als stationär angenommen wird. Alle Lasten und Kapazitäten werden vernachlässigt. Generatoren werden durch ihre Anfangsreaktanz (subtransiente Reaktanz) und eine um den Faktor $c = 1,1$ über der Netzspannung liegende innere Spannung nachgebildet.

Der Kurzschlussstrom besteht aus einem betriebsfrequenten Wechselstrom mit zeitlich veränderlicher Amplitude und einem überlagerten, auf Null abklingenden Gleichstrom. Somit nehmen die Amplituden von einem relativ großen Anfangswert I_k^+ auf den Endwert I_k ab.

Generatornaher Kurzschluss	$I_k < I_k''$
Generatorferner Kurzschluss	$I_k \approx I_k''$

Der Anfangswert des Gleichstroms ist vom Augenblick des Kurzschlussbeginns abhängig. Die Abklingzeitkonstante wird aus dem Verhältnis zwischen Wirk- und Blindwiderständen der Kurzschlussbahn bestimmt. Dabei wird der größtmögliche Augenblickswert (Scheitelwert) des Kurzschlussstromes als Stoßkurzschlussstrom i_p bezeichnet.

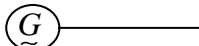
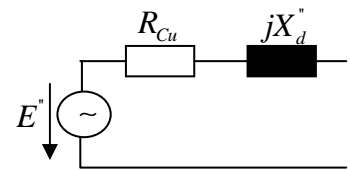

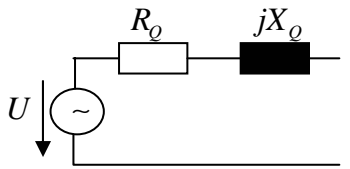
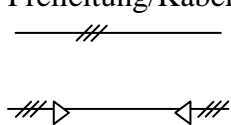
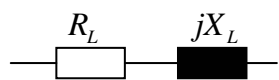
$$i_p = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_k''$$

$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot I^{-3 \frac{R_k}{X_k}} \quad (= 2 \text{ schlechtester Fall!!})$$

Dreipoliger Kurzschluss in unverzweigten/verzweigten Netzen mit einer Netzeinspeisung:

Verbraucher können bei der Kurzschlussberechnung vernachlässigt werden, da sie nicht auf die Kurzschlussstelle speisen und somit keine Auswirkungen haben. Ziel ist die Ermittlung des Anfangs-Kurzschlusswechselstroms I_k'' , der bei einem generatorfernen Kurzschluss gleich dem stationären Dauerkurzschlussstrom ist.

Ersatzschaltungen:

 Synchrongenerator		$X_d'' = x_d'' \cdot \frac{U_r^2}{S_r}$ x_d'' : bezogene Anfangsreaktanz $E'' = 1,1 \cdot \frac{U_r}{\sqrt{3}}$
 Netzeinspeisung		$X_Q = 1,1 \cdot \frac{U_n^2}{S_{kQ}''}$ S_{kQ}'' : Anf.Kurzschl.Wechselleistung $U = 1,1 \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}}$
 Freileitung/Kabel		$X_L = X_L' \cdot l$ X_L' : Betriebsreaktanzenbelag $R_L = R_L' \cdot l$ l : Leitungslänge

In Hochspannungsnetzen ist der Längswiderstand der Betriebsmittel meist klein gegenüber deren Reaktanz. $R_k / X_k \leq 0,3$

→ Für die Berechnung des Anfangskurzschlussstromes I_k'' kann der ohmsche Widerstand vernachlässigt werden. Für die Bestimmung des Stoßfaktors κ und des Stoßkurzschlussstroms i_p sind die ohmschen Widerstände jedoch immer zu berücksichtigen!!

Dreipoliger Kurzschluss in verzweigten Netzen mit mehreren Netzeinspeisungen:

Hierbei wird das Verfahren der Ersatzspannungsquelle angewendet (Rückführung auf ein einfach gespeistes Netz). Die Ersatzspannungsquelle ist jeweils an der Fehlerstelle wirksam und dann die einzige Spannungsquelle im Netz; andere Spannungsquellen werden kurzgeschlossen. Für die wirksame Spannung gilt im Mittel- & Hochspannungsnetz: $E^* = 1,1 \cdot U_n / \sqrt{3}$

Hochspannungstechnik:

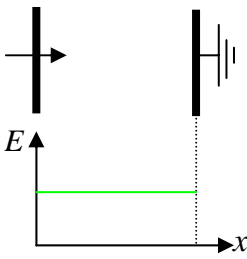
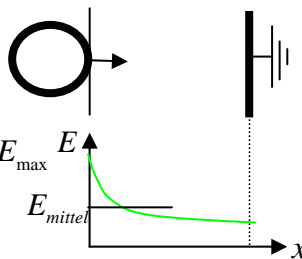
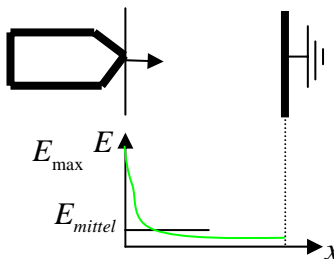
Grundlagen:

Isolation	Grad der galvanischen Trennung
Isolierung	Technische Realisierung einer Isolation
Isolator	Selbständiges Betriebsmittel (Langstab-, Stütz-, Durchführungsisolator)
Isolierstoff	Stoff, der zur Isolierung weiterverarbeitet wird
Elektrische Festigkeit	Feldstärke E_d , bei deren Überschreitung Zerstörungen im Isolierstoff auftreten können
TE-Einsatzspannung U_i	Spannung, bei der bei Spannungssteigerung Teilentladungen einsetzen (unvollkommener Durchschlag, nur örtlich begrenzte Beanspruchung des Dielektrikums)
Durchschlagspannung U_d	Spannung von bestimmtem zeitlichen Verlauf, bei der das Dielektrikum durch einen Entladungsvorgang vorübergehend oder bleibend seine Isolierfähigkeit verliert.

Belastung → *Beanspruchung*
 (Spannung) → (Feldstärke)

Hochspannungsisolierungen:

Einteilung von Hochspannungsisolierungen nach Feldtyp:

Homogenes Feld	Inhomogenes Feld	
		
$E_{\max} = E_{\text{mittel}}$	$E_{\max} > E_{\text{mittel}}$	$E_{\max} \gg E_{\text{mittel}}$
$E_{\text{mittel}} > E_d$	$E_{\max} > E_d$	
<p>→ Entladungsbedingung im gesamten Bereich erfüllt!</p> <p>→ Durchschlag!</p>	<p>Gilt $E > E_d$ auf genügend große Strecke x, so können selbständige Entladungen zünden! → schwach leitfähige Kanäle, die das Feld verändern. → Entladungen breiten sich in Bereiche $E < E_d$ aus.</p> <p>Erreichte Länge hängt vom mittleren spezifischen Spannungsbedarf der Streamerentladung E_s ab.</p> <p>(Luft: $E_s \approx 4,5 - 5 \text{ kV/cm}$)</p>	
	$E_{\text{mittel}} > E_s$	$E_{\text{mittel}} < E_s$
	<p>→ Entladung wächst bis zur Gegenelektrode</p> <p>→ Durchschlag!</p> <p>→ schwach inhomogenes Feld</p>	<p>→ Entladung erreicht Gegenelektrode nicht</p> <p>→ stabile Teilentladungen</p> <p>→ stark inhomogenes Feld</p>

Charakterisierung des Feldstärkeverlaufs:

Ausnutzungsfaktor nach Schwaiger (Homogenitätsgrad): $\eta = \frac{E_{\text{mittel}}}{E_{\text{max}}} = \frac{U/s}{E_{\text{max}}}$ (s : Elektrodenabstand)

→ Abschätzung der maximalen Feldstärke bei bekanntem Ausnutzungsfaktor: $E_{\text{max}} = \frac{U}{\eta \cdot s}$

Homogenfeld	$\eta = 1$
Schwach inhomogenes Feld	$\eta < 1$
Stark inhomogenes Feld	$\eta \ll 1$

Übergang vom schwach zum stark inhomogenen Feld ist durch den Grenzausnutzungsfaktor gekennzeichnet. In atmosphärischer Luft gilt: $\eta_{\text{Grenz}} \leq 0,2$

Geometrische Charakteristik: $p = \frac{r+s}{r}$

Elektrische Festigkeit in Luft:

Die elektrische Festigkeit E_d ist abhängig vom Isolierstoff!

Innere elektrische Festigkeit E_{di}	Bei Überschreitung sind Entladungsvorgänge im Isolierstoff möglich. In atmosphärischer Luft gilt: $E_{di} = 25 \text{ kV/cm}$
Einsetzhöchstfeldstärke E_{dh}	Wert der maximalen Feldstärke in einem inhomogenen Feld, bei dem die innere elektrische Festigkeit auf einer so großen Strecke x_{krit} überschritten ist, dass selbständige Entladungen auftreten können ($E_{\text{max}} = E_{dh} > E_{di}$) Für die Einsetzhöchstfeldstärke ist nur der Krümmungsradius der stärker gekrümmten Elektrode von Bedeutung (Abstand der Elektroden vernachlässigbar, so lange $s > r/2$)
Teilentladungseinsetzspannung	Spannung bei der $E_{\text{max}} = E_{dh}$ wird
Polaritätsabhängigkeit des Durchschlag-Verhaltens (Stab-Platte-Anordnungen)	Positive Polarität der Stabelektrode begünstigt die Entwicklung des Durchschlags! Negative Polarität der Stabelektrode hemmt das Fortschreiten der Entladung! Bei atmosphärischer Luft ergibt sich ein spezifischer Spannungsbedarf von 5kV/cm bei positiver Polarität und 5-10kV/cm bei negativer Polarität. Bei Wechselspannungen erfolgt der Durchschlag im Scheitel der positiven Halbwelle (→ 5kV/cm).
Durchschlagspannung	$E_{\text{max}} \geq E_{dh}$ & $E_{\text{mittel}} \geq E_s$ Eine Entladung U_i muss einsetzen und diese muss die Gegenelektrode erreichen U^* !

Abschätzung der TE-Einsatz- bzw. Durchschlagspannung:

TE-Einsatzspannung	$U_i = E_{dh} \cdot s \cdot \eta$		
Spannungsbedarf der Streamerentladung	$U^* = E_s \cdot s$		
Feldkonfiguration	homogen	schwach inhomogen	stark inhomogen
	$U^* < U_i = U_d$	$U^* < U_i = U_d$	$U_i < U_d = U^*$
Durchschlagspannung	$U_d = U_i = E_{dh} \cdot s \cdot \eta$	$U_d = U_i = E_{dh} \cdot s \cdot \eta$	$U_d = U^* = E_s \cdot s$

Technische Isolierungen:

Durchschlag	Entladung durch einen Isolierstoff
Überschlag	Entladung längs einer Grenzfläche zwischen verschiedenen Isolierstoffen

Freiluftisolierungen:

Durch leitfähige Fremdschichten (Verschmutzung, Regen) auf den Oberflächen kann es zu einem Kriechüberschlag kommen. Durch Verwendung von Isolatoren mit Schirmen wird der Kriechweg verlängert (Kriechweg >> Überschlagweg) und der elektrische Widerstand der Fremdschicht erhöht (→ geringe Ableitströme). Durch geeignete Form bzw. Oberflächen wird Schmutzablagerung behindert, eine Umhüllung mit Kunststoffen wirkt wasserabweisend (Silikonelastomere übertragen die wasserabweisende Wirkung auch auf die Schmutzablagerung).

Durchschlagverhalten:

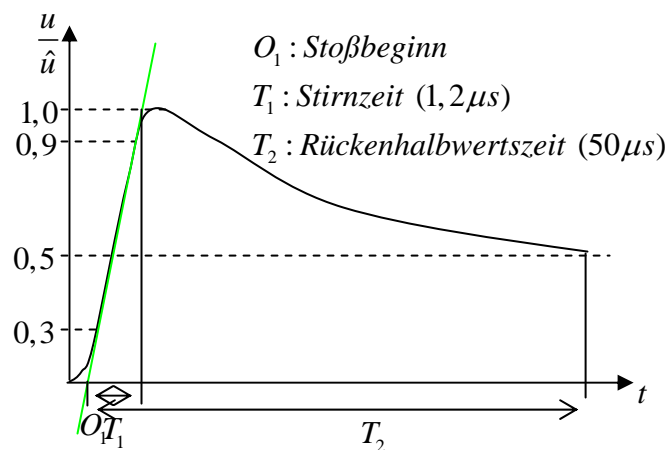
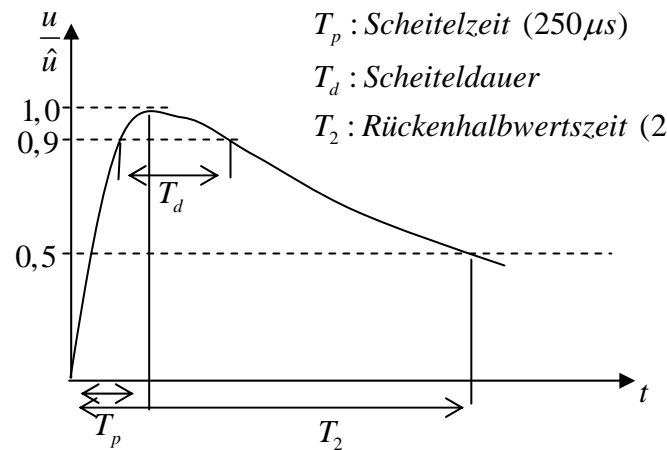
selbstheilende Isolierungen	Isolierung, die nach einem Durchschlag ihr Isoliervermögen vollständig wiedererlangt	Gasförmige Isolierstoffe, teilweise flüssige Isolierstoffe
Nicht selbstheilende Isolierungen	Isolierung, die nach einem Durchschlag ihr Isoliervermögen verliert oder nicht vollständig wiedererlangt	Feste Isolierstoffe (Glas, Kunststoff, Porzellan)

Grundregeln für die Bemessung von Hochspannungsisolierungen:

Regel 1	$U_{b\max} < U_d$ $U_{b\max} < U_{ii}$ $U_{b\max} < U_i$	U_d : Durchschlagspannung U_{ii} : Überschlagspannung U_i : TE – Einsatzspannung $U_{b\max}$: max. Betriebsspannung
Regel 2	$(U_d, U_{ii})_{Gas} < (U_d, U_{ii})_{Flüss.} < (U_d, U_{ii})_{Fest.}$ mindestens: $U_{ii} < U_d$	Ein bei Überbeanspruchung entstehender Durchschlag soll in dem Stoff erfolgen, in dem der geringste Schaden verursacht wird. → Durchschlag zuerst in Gas, dann in Flüssigkeit und zuletzt im Feststoff

Nachweis des Isoliervermögens elektrischer Betriebsmittel:

Genormte Prüfspannungen:

Wechselspannung	Durch Frequenz und Effektivwert charakterisiert
Gleichspannung	Durch den arithmetischen Mittelwert und der Amplitude der Welligkeit charakterisiert. $\delta U = 0,5(U_{\max} - U_{\min})$
Genormte Stoßspannungen	<p>Genormte Blitzstoßspannung:</p>  <p>Genormte Schaltstoßspannung:</p> 

Prüfverfahren zum Nachweis des Isoliervermögens:

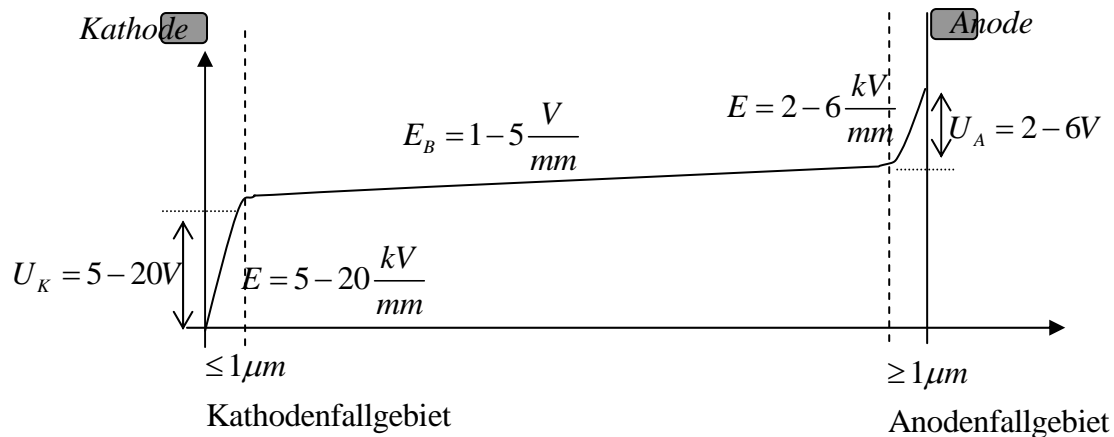
Wechselspannung	1 Minute ohne Durch- bzw. Überschlag bei allen Isolierungen	
Stoßspannungen	<u>Selbstheilende Isolierung:</u> 15 Beanspruchungen ≤ 2 Durch- bzw. Überschläge	<u>Nicht selbstheilende Isolierung:</u> 3 Beanspruchungen keine Durch- bzw. Überschläge

Lichtbogen:

Wird in einem realen Stromkreis mit stets vorhandener Induktivität der fließende Strom plötzlich unterbrochen würde dadurch eine unendlich hohe Überspannung entstehen. Durch einen sich an der Unterbrechungsstelle ausbildenden Schaltlichtbogen geht der Strom jedoch mit endlicher Geschwindigkeit nach Null. Schädliche Überspannungen können so verringert bzw. ganz vermieden werden. → Schaltlichtbogen ist unerwünscht, aber notwendig!!

Der Spannungsfall am Lichtbogen hängt vom Strom, der Bogenlänge und weiteren äußeren Einflüssen ab. Für die Bogenspannung des stationär brennenden, stromschwachen Lichtbogens gilt die Ayrtonsche Gleichung:

$$U_B = a + b \cdot l + \frac{c + d \cdot l}{I}$$



Löschung des Gleichstromlichtbogens:

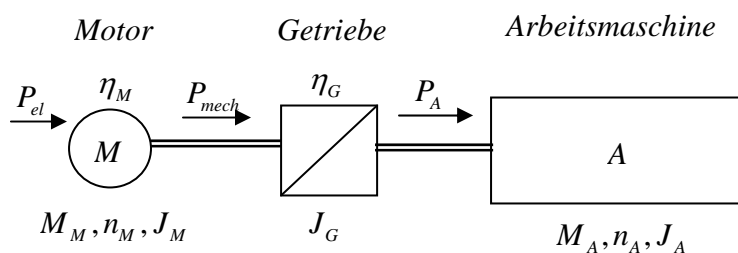
Zur Löschung eines Gleichstromlichtbogens muss die Lichtbogenspannung über die treibende Spannung hinaus erhöht werden:

- Verlängerung des Lichtbogens (hörnerartige Elektroden, Isolierstege)
- Kühlung des Lichtbogens (Isolierstege)
- Aufteilung des Lichtbogens in Teilbögen (Löschblechkammer $n \cdot U_B > U_{Netz}$ bei einigen 10A und wenigen mm Blechabstand gilt $U_B \approx 20V$)

Elektrische Antriebe:

Ein elektrischer Antrieb ist im einfachsten Fall ein elektromechanischer Wandler (Motor), der elektrische Leistung aus dem Netz aufnimmt und mechanische Leistung an eine Arbeitsmaschine abgibt. Der Motor kann direkt oder über mechanische Komponenten (Kupplungen, Wellen, Getriebe) an die Arbeitsmaschine angekuppelt werden. Stellglieder zwischen Netz und Antriebsmaschine versorgen die Antriebsmaschine im gewünschten Zeitraum mit der gewünschten Spannung, nach Höhe und Frequenz. Etwa 40% der elektrischen Antriebe werden geregelt betrieben. Stellglied und Antriebsmaschine werden zusammen als Aktor bezeichnet.

Beschreibung elektrischer Antriebssysteme:



- P : Leistung
 M : Drehmoment
 J : Trägheitsmoment
 n : Drehzahl
 η : Wirkungsgrad
- M : Motor
 G : Getriebe
 A : Arbeitsmaschine
 W : Widerstand, Last
 R : Reibung

$$M_A = M_{AW} + M_{AR}$$

$$J = \int_m r^2 dm \quad \text{hom. Zylinder der sich um Längsachse dreht : } J = \frac{1}{2} m R^2$$

Übertragungsstellen:

Rotatorisch/ rotatorisch	<p>Gleiche Geschwindigkeit: $\Omega_1 \cdot R_1 = \Omega_2 \cdot R_2$</p> <p>Kraft = Gegenkraft: $F = \frac{M_1}{R_1} = \frac{M_2}{R_2}$</p> <p>Übersetzung: $\ddot{u} = \frac{\Omega_1}{\Omega_2} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{n_M}{n_A}$</p> <p>Auf Motorachse bezog. Moment der Arb.masch.: $M_2^x = \frac{R_1}{R_2} \cdot M_2 = \frac{1}{\ddot{u}} \cdot M_2$</p> <p>Trägheitsmoment: $J_2^x = \frac{1}{\ddot{u}^2} \cdot J_2$</p> <p>Trägheitsmoment Welle 1: $J_{1ges} = J_1 + J_2^x$</p>
Rotatorisch/ translatorisch	<p>$\frac{1}{2} J_2^x \cdot \Omega^2 = \frac{1}{2} m v^2$</p> <p>$v = R \cdot \Omega$</p> <p>$J_2^x = m \cdot R^2$</p>

Nach Umrechnung der Drehzahlen, Momente und Trägheitsmomente der Arbeitsmaschine auf die Motorseite ergibt sich die Ersatzanordnung eines Antriebssystems. Fasst man nun die Trägheitsmomente des Motors, des Getriebes und der Arbeitsmaschine zusammen, erhält man schließlich die vereinfachte Ersatzanordnung eines Antriebssystems.

Bewegungsgleichungen & Bewegungsarten:

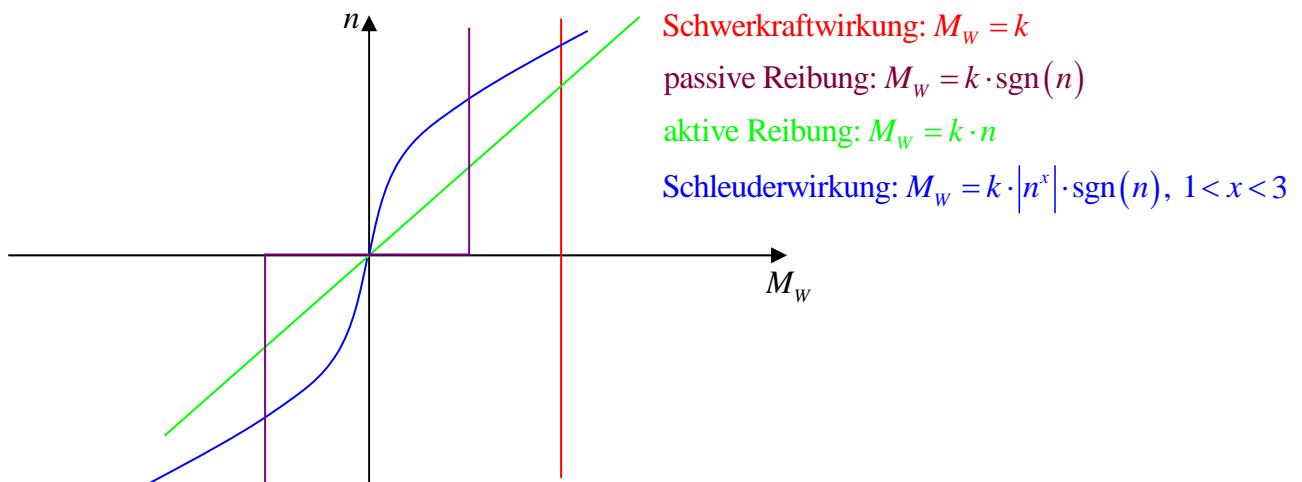
$$M = J \cdot \frac{d\Omega}{dt} \quad E_{kin} = \frac{1}{2} J \Omega^2 \text{ (rotierender Körper)} \quad M_M - M_W = J_{ges} \cdot \frac{d\Omega_M}{dt}$$

Bewegungsarten:

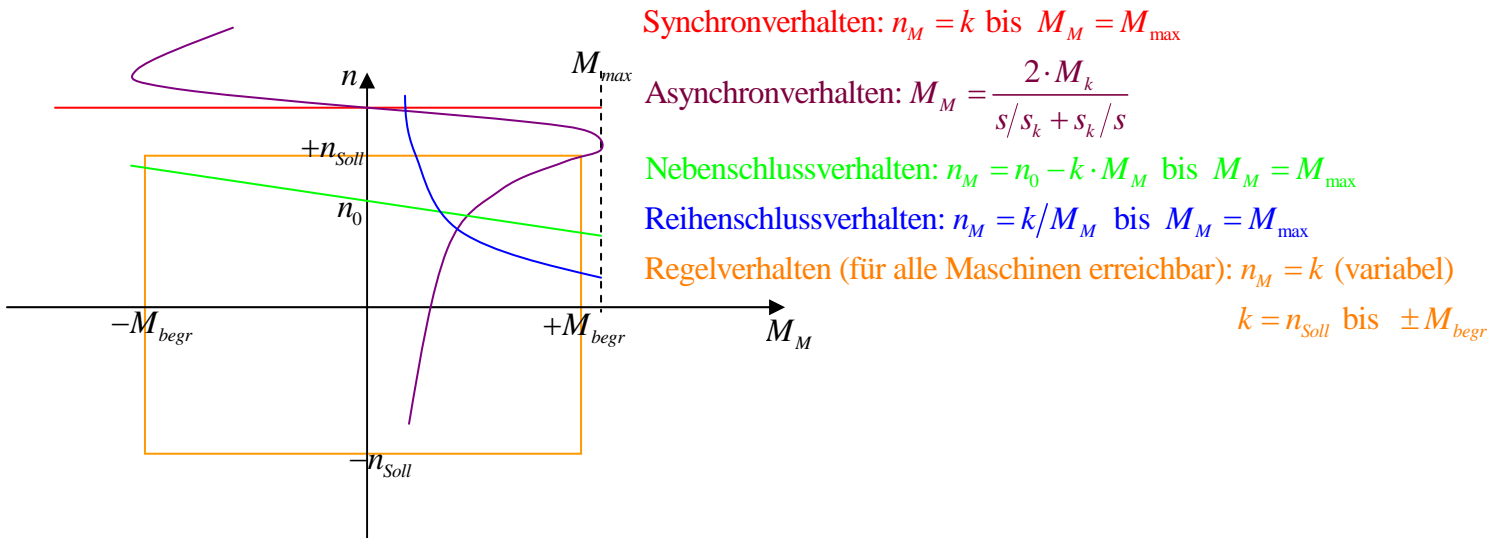
Gleichförmige Bewegung	Anlauf und Stillsetzen unwichtig
Ungleichförmige Bewegung	Periodisches Drehzahlprogramm
Positionierbewegung	Ruck $d\Omega_M/dt$ begrenzen, beide Drehrichtungen nötig
Absolute Gleichlaufbewegung	$\Delta\Omega = 0, \Delta\varphi = 0$
Relative Gleichlaufbewegung	$\Delta\Omega \approx 0$ (einstellbar), $\Delta\varphi \neq 0$

Stationäres Verhalten des Systems Arbeits- & Antriebsmaschine:

Typische Drehzahl Drehmoment Kennlinien von Arbeitsmaschinen:



Typische Drehzahl Drehmoment Kennlinien von elektrischen Maschinen:



Im stationären Zustand (Antrieb mit konstanter Drehzahl) sind die vom Motor abgegebene Leistung P_M und die auf die Motorwelle bezogene Leistung der angetriebenen Maschine P_W im Gleichgewicht:

$$P_M = P_W = P_{\text{mech}}$$

$$P_{\text{mech}} = \Omega_M \cdot M_M = 2\pi n_M \cdot M_M$$

$$P_{\text{mech},r} = 2\pi n_r \cdot M_{M,r} = P_{\text{el},r} \cdot \eta_r$$

Erwärmung und Bemessung elektrischer Maschinen:

Verlustleistung & Temperatur:

Die beim Betrieb elektrischer Maschinen entstehende Verlustleistung P_V wird in Wärme umgesetzt. Für $\Delta T < 50K$ gilt (Konstante A bezeichnet Wärmeabgabefähigkeit):

$$P_{ab} = A(\vartheta - \vartheta_A) = A \cdot \Delta \vartheta$$

$$P_V = P_{ab} + C_g \frac{d\vartheta}{dt} = A(\vartheta - \vartheta_A) + C_g \frac{d\vartheta}{dt}$$

Befindet sich die elektrische Maschine im Ruhezustand und ist ihre Temperatur ϑ gleich der Umgebungstemperatur ϑ_A , so führt eine sprungförmige Zufuhr von Verlustleistung P_V zu einer zeitlich veränderlichen Temperaturdifferenz (Übertemperatur):

$$\Delta \vartheta(t) = \Delta \vartheta_{\infty} (1 - e^{-t/T_g}) \quad \Delta \vartheta_{\infty} = \vartheta_{\infty} - \vartheta_A = \frac{P_V}{A} \quad T_g = \frac{C_g}{A}$$

Thermische Klassen für elektrische Maschinen:

Entsprechend den Anforderungen an die zulässige Erwärmung können elektrische Maschinen mit unterschiedlichen Isolierungen ausgerüstet werden. → thermische Klassen (geben max Temperaturen an, die nicht überschritten werden dürfen)

Y	90°C	B	130°C	200	200°C
A	105°C	F	155°C	220	220°C
E	120°C	H	180°C	250	250°C

Bei der Auslegung luftgekühlter Maschinen wird davon ausgegangen, dass die Umgebungstemperatur am Aufstellort der Maschine 40°C nicht überschreitet.

Betriebsarten für elektrische Maschinen:

Elektrische Maschinen werden allgemein mit veränderlicher Belastung während der Betriebszeit sowie mit unterschiedlichen Pausen- und Leerlaufzeiten betrieben. Um für diese Betriebszustände eine Berechnungsbasis für die zulässige Erwärmung zu finden, wurden 10 verschiedene Betriebsarten (S1-S10) definiert. Dabei muss die Betriebsart so gewählt werden, dass sie einer größeren Belastung entspricht und es damit im Betrieb nicht zu einer Überlastung und unzulässigen Erwärmung kommt.

S1 - Dauerbetrieb	S2 - Kurzzeitbetrieb	S3 - Aussetzbetrieb
$\frac{t_b}{T_b} > 3 \quad \frac{t_p}{T_p} > 3$	$\frac{t_b}{T_b} < 3 \quad \frac{t_p}{T_p} > 3$	$\frac{t_b}{T_b} < 3 \quad \frac{t_p}{T_p} < 3$
<p>Betrieb mit einer konstanten Belastung, die so lange ansteht, dass die Maschine den thermischen Beharrungszustand erreichen kann.</p> <p>t_b : Betriebszeit t_p : Pausenzeit T_b : Erwärmungszeitkonstante T_p : Abkühlungszeitkonstante</p>	<p>Betrieb mit konstanter Belastung, dessen Dauer nicht ausreicht, den thermischen Beharrungszustand zu erreichen, mit nachfolgendem Stillstand bei dem die Temperatur auf weniger als 2K unterschied zum Kühlmittel absinkt. Maschine kann im Kurzzeitbetrieb über Bemessungsbelastung belastet werden, ohne das Bemessungstemperatur erreicht wird.</p>	<p>Betrieb, der sich aus einer Folge identischer Teile zusammensetzt, von denen jeder eine Betriebszeit mit konstanter Belastung und eine Stillstandszeit mit stromlosen Wicklungen umfasst, wobei der Anlaufstrom die Übertemperatur nicht merklich beeinflusst.</p>

Begriffe für die Bemessung und das Betriebsverhalten:

Bemessungsgröße	Größe, die der Maschine für bestimmte Betriebsbedingung vom Hersteller zugeordnet wird
Bemessung	Gesamtheit der Bemessungsgrößen und Betriebsbedingungen
Bemessungsleistung	In Bemessung eingeschlossene Leistung
Belastung	Gesamtheit der elek. & mech. Größen, welche der Lastzustand einer Maschine zu einem best. Zeitpunkt durch elek. oder mech. Belastung erfordert.
Leerlauf	Betrieb der Maschine ohne Belastung
Volllast	Belastung, die zu einem Betrieb führt, für den die Maschine bemessen ist
Pause	Stillstand der Maschine ohne Zufuhr elek. Energie und ohne mech. Antrieb
Betrieb	Festlegung der Belastung der Maschine
Therm. Beharrungszustand	Zustand, indem sich die Übertemperatur während einer Stunde um max. 2K ändert
Kühlung	Wärme wird an primäres Kühlmittel abgegeben
Primäres Kühlmittel	Flüssigkeit/Gas, das die Wärme von der Maschine abführt
Sekundäres Kühlmittel	Flüssigkeit/Gas, das die Wärme des primären Kühlmittels abführt

Stromrichter:

Stromrichter sind Einrichtungen zum Umformen elektrischer Energie unter Verwendung von Stromrichterventilen (leistungselektronische Schalter). Mit Stromrichtern kann der Energiefluss zwischen jeweils zwei unterschiedlichen Stromsystemen gesteuert werden.

Grundtypen von Stromrichtern:

Gleichrichter	Umwandlung von Wechsel- oder Drehstrom in Gleichstrom. Energiefluss vom Wechsel- zum Gleichstromsystem
Gleichstrom-Umrichter	Umwandlung von Gleichstrom gegebener Spannung und Polarität in Gleichstrom anderer Spannung/Polarität. Energiefluss ist in beide Richtungen möglich
Wechselrichter	Umwandlung von Gleich- in Wechselstrom. Energiefluss vom Gleich- zum Wechselstromsystem
Wechselstrom-Umrichter	Umwandlung von gegebenem Wechselstrom in anderen Wechselstrom bezüglich Spannung, Frequenz, Phasenfolge und Phasenanzahl

Umrichter sind Stromrichter, bei denen die Stromart erhalten bleibt.

Als Steller werden Stromrichter bezeichnet, bei denen sowohl die Stromart erhalten bleibt, als auch Frequenz, Phasenanzahl und Phasenfolge unverändert bleiben. Der Wert der Ausgangsspannung und damit der Leistungsfluss kann entsprechend verändert oder verstellt werden.

Mit Stromrichtergeräten werden Spannung und Strom unidirektional und teilweise auch bidirektional gesteuert oder geregelt.

Stellglieder:

Das Stellglied ermöglicht den steuernden Eingriff in einen Energiestrom (elektrische Energie). Bei der Umformung sollen möglichst geringe Verluste entstehen.

Für geregelte Antriebe werden die Stellglieder meist in Kombination mit Reglern eingesetzt.

Ein Regelkreis dient dazu, eine vorgegebene physikalische Größe (Regelgröße) auf einen gewünschten Wert (Führungsgröße/Sollwert) zu bringen und dort, unabhängig von auftretenden Störungen (Störgröße), zu halten. Dazu muss der Augenblickswert der Regelgröße gemessen werden und mit der Führungsgröße verglichen werden. Aus den Abweichungen (Regelabweichung) bildet der Regler unter Berücksichtigung der ihm eigenen Übertragungsfunktion eine Steuergröße (Stellsignal). Dieses kann entweder direkt auf die Regelstrecke wirken, muss jedoch meist durch ein Stellglied (gerätetechnische Vorrichtung zur Veränderung der Stellgröße) verstärkt werden, da der Ausgang des Reglers nur gering belastbar ist.

Wird die Regelgröße nicht zurückgeführt und mit dem Sollwert verglichen, handelt es sich um eine offene Wirkungskette und man spricht von Steuerung.

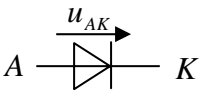
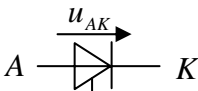
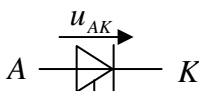
Leistungselektronische Schalter:

Leistungselektronik befasst sich mit dem Umrichten oder Schalten und teilweise auch der Steuerung elektrischer Leistung unter Verwendung von elektronischen Bauelementen.

Anforderungen an leistungselektronische Bauelemente für Stromrichter:

- Hohe Stromtragfähigkeit
- Geringe Sättigungsspannung (geringe Verluste am Bauteil & geringe therm. Belastung)
- Hohe Sperrspannungen
- Kurze Schaltzeiten ($t_{\text{schalt}} < 5\mu\text{s}$)
- Hohe Schaltfrequenz ($f_{\text{schalt}} = 50\text{kHz} \dots 1\text{MHz}$)

Steuerbarkeit elektronischer Schalter:

 Nicht steuerbar	 Einschaltbar	 Ein-/Ausschaltbar
--	---	--

Leistungsbaulemente dürfen nicht überlastet werden, auch nicht kurzfristig, da ein Temperaturanstieg zu Überhitzung und damit zur Zerstörung führt!!

Grundfunktionen der leistungselektronischen Bauelemente in Stromrichtern:

- Ungesteuertes Schalten durch Verwendung einer Diode: Sobald eine positive Spannung in Durchlassrichtung anliegt $u_{AK} > 0$, wird die Diode leitfähig. In Rückwärtsrichtung (Sperrrichtung) sperrt die Diode. Es werden nur positive Halbwellen durchgelassen (Einweggleichrichtung mit festem Effektivwert der Spannung)
- Gesteuertes Einschalten durch Verwendung eines Thyristors: Sobald eine positive Spannung in Durchlassrichtung anliegt, kann der Thyristor zu einem beliebigen Zeitpunkt gezündet werden und wird damit leitfähig. In Rückwärtsrichtung sperrt der Thyristor. Es werden nur die positiven Teilhalbwellen durchgelassen (Einweggleichrichtung mit steuerbarem Effektivwert der Spannung)
- Gesteuertes Ein-/Ausschalten einer Gleichspannung (MOS-FET): Pulsweitenmodulation (Mittelwert der Gleichspannung kann eingestellt werden) positives Steuersignal \rightarrow Einschalten; negatives Steuersignal \rightarrow Ausschalten
- Gesteuertes Ein-/Ausschalten einer Wechselfspannung (GTO Thyristor)

Einteilung und Kennzeichnung von Stromrichterschaltungen:

Stromrichter lassen sich auch nach ihrer inneren Wirkungsweise unterscheiden (Kommutierung und Herkunft der Taktfrequenz).

Unter Kommutierung versteht man die Übergabe des Stroms vom stromführenden auf den folgenden Zweig. Man spricht von natürlicher Kommutierung, wenn die im Wechsel- bzw. Drehstromnetz vorhandenen Spannungen als Kommutierungsspannung genutzt werden. Wird dagegen eine von der Last erzeugte Wechselfspannung zur natürlichen Kommutierung genutzt, spricht man von Lastkommutierung. Ist keine natürliche Kommutierungsspannung im Kommutierungskreis vorhanden, so kann die Kommutierung z.B. durch eine Widerstandserhöhung im zu löschenden Stromzweig erzwungen werden und man spricht von einer Zwangskommutierung oder erzwungenen Kommutierung.

→ Entsprechend der Kommutierung wird unterschieden in:

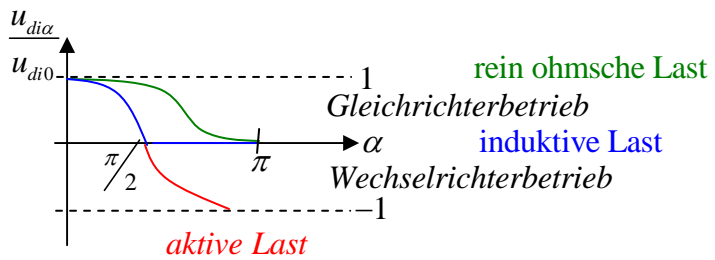
- Fremdgeführte Stromrichter (natürliche Kommutierung, Lastkommutierung)
- Selbstgeführte Stromrichter (Zwangskommutierung)

Je nach Art der Eingangsspannung sowie Ausgangsspannung kommen verschiedene Arten von Stromrichterschaltungen zum Einsatz:

- Kennbuchstabe für Schaltungsart (M: Mittelpunktsschaltung, B: Brückenschaltung)
- Kennzahl (Pulszahl q)
- Steuerbarkeit (U: ungesteuert, C: vollgesteuert, H: halbgesteuert)

Netzgeführte Stromrichter:

Hierbei wird zwischen ungesteuerten und gesteuerten Schaltungen unterschieden. Dabei ist die gesteuerte Schaltung dadurch gekennzeichnet, dass neben der Umwandlung von Wechselstrom in Gleichstrom auch die Höhe der erzeugten Gleichspannung verstellt werden kann. In einem netzgeführten Stromrichter ist auch eine Umkehrung der Richtung des Energieflusses möglich (netzgeführter Wechselrichter).

<p>Einpuls-gleichrichter (M1)</p>	<p>Thyristor als leistungselektronischer Schalter; Thyristor kann frühestens eingeschaltet werden, wenn $u_{AK} > 0$. Dieser Zeitpunkt wird als natürlicher Zündzeitpunkt und als Bezugspunkt für den Steuerwinkel α definiert. Der Thyristor geht wieder in den Sperrzustand sobald $u_{AK} < 0$. Bei Stromrichterschaltungen sind die Spannungs- und Stromverläufe sowohl vom Zündzeitpunkt als auch von der Art der Last abhängig. Ferner wird unterschieden, wie der Strom auf der Gleichspannungsseite fließt (kontinuierlicher oder unterbrochener Stromfluss) Für die gesteuerte Einpuls-Mittelpunktsschaltung (M1C) erhält man mit ohmscher Last:</p> $U_{di\alpha} = \frac{1}{2} U_{di0} (1 + \cos \alpha)$
<p>Zweipuls-Mittelpunktsschaltung (M2)</p>	<p><u>M2C Schaltung mit passiven Lasten:</u> Ohmsche Last: $U_{di\alpha} = \frac{1}{2} U_{di0} (1 + \cos \alpha)$ Ohmsch-induktive Last mit idealer Glättung ($L \gg R$): $U_{di\alpha} = U_{di0} \cos \alpha$</p>  <p><u>M2C Schaltung mit aktiven Lasten:</u> Gegenspannung U_0 im Lastkreis und Steuerwinkel $\alpha > 90^\circ \rightarrow$ Wechselrichterbetrieb \rightarrow Richtung des Energieflusses kehrt um; von der Gegenspannungsquelle wird Energie in das Wechselstromnetz zurückgespeist.</p> $I_d = \frac{U_{di\alpha} - U_0}{R} \quad U_{di\alpha} = U_{di0} \cos \alpha$

<p>Sechspuls- Brückenschaltung (B6)</p>	<p>Die Sechspuls-Brückenschaltung besteht aus zwei Ventilgruppen (Anoden-, Kathodengruppe). Dabei wird diejenige Ventilgruppe als Kathodengruppe bezeichnet, deren Kathoden an der Last anliegen.</p> <p>Im ungesteuerten Betrieb wird aus der Anodengruppe jeweils das Ventil mit der größten U_{AK} Spannung den Strom übernehmen (niedrigstes Kathodenpotential). Entsprechend wird in der Kathodengruppe jeweils das Ventil mit dem höchsten Anodenpotential leiten.</p> <p>Im gesteuerten Betrieb wird das Ventil aus der Anodengruppe mit dem niedrigsten Kathodenpotential den Strom leiten, wenn es über einen Steuerimpuls gezündet wird, und so lange führen, bis der Strom auf ein anderes Ventil kommutieren kann.</p> <p>Die Zündzeitpunkte der beiden Gruppen sind im gesteuerten und ungesteuerten Betrieb zeitlich gegeneinander versetzt. → sechspulsige Ausgangsspannung (geringe Welligkeit)! $U_{di0} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_n$</p> <p>Der Laststrom und die Lastspannung weisen eine Periodendauer von T/p auf, dabei ist jedes Ventil $2T/p$ durchgeschaltet.</p>
---	--

Unterschiede zwischen Mittelpunkt- & Brückenschaltung von Stromrichtern:

- Mittelpunktschaltungen sind nur zulässig, wenn der Mittelpunkt der verwendeten Transformatoren belastbar ist.
- Brückenschaltungen ergeben bei gleichem Transformator höhere Gleichspannungsmittelwerte als die Mittelpunktschaltung
- Die maximale Sperrspannung \hat{U}_T an einem Ventil ist bezogen auf die Gleichspannung U_{di0} bei einer Brückenschaltung nur halb so groß wie bei einer Mittelpunktschaltung gleicher Phasenzahl

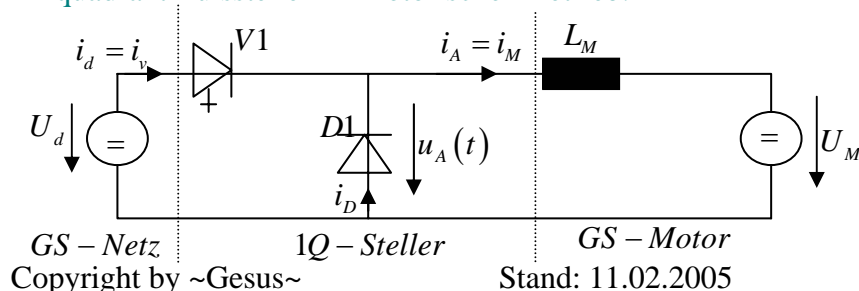
Selbstgeführte Stromrichter:

Hier kann der Stromfluss in einem Ventil durch eine zum Stromrichter selbst gehörende Anordnung unterbrochen werden (abschaltbare Leistungshalbleiter). Zur Gruppe der selbstgeführten Stromrichter zählen: Gleichstromquellen, Gleichstromsteller, selbstgeführte Wechselrichter. Mit der Hintereinanderschaltung eines Gleichrichters und eines selbstgeführten Wechselrichters wird der Zwischenkreis-Wechselstrom-Umrichter aufgebaut.

Gleichstrom-Umrichter (Gleichstromwandler):

Gleichstrom-Umrichter erfordern den Einsatz von gesteuert ein- und ausschaltbaren leistungselektronischen Bauelementen (→ selbstgeführte Stromrichter)

Einquadrant-Pulssteller im motorischen Betrieb:



Die Steuerung des Ventils V1 kann mit Pulsfrequenzvariation oder Pulsbreitenmodulation mit konstanter Pulsfrequenz erfolgen. $U_A = ED \cdot U_d$ $ED = \frac{t_e}{T_p}$

U_A : mittlere Spannung ED : relative Einschaltdauer
 t_e : Einschaltdauer des Ventils V1 $T_p = t_e + t_a$: Periodendauer

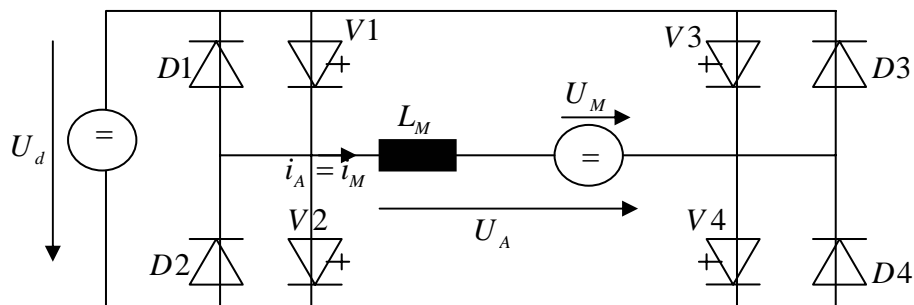
Aus Schaltungsgründen ist der Stellbereich nach unten und oben geringfügig eingeschränkt. Eine Umkehr der Leistungsrichtung ist nicht möglich. Die Drehzahl und damit U_M sind immer positiv. Der Steller gibt eine wellige Gleichspannung ab.

Steuerverfahren von Gleichstromstellern:

Pulsbreitensteuerung	Ein- bzw. Ausschaltdauer veränderbar; Periodendauer und Frequenz konstant. Zu beachten sind minimale und maximale Einschalt Dauern, die nicht unter- bzw. überschritten werden dürfen. $U_A = \frac{U_d \cdot t_e}{T_p} \quad t_e = T_p - t_a$
Pulsfolgesteuerung	Einschaltdauer t_e konstant; Ausschaltdauer t_a , Periodendauer T_p und Frequenz sind variabel. $f_p = \frac{1}{t_e + t_a} = \frac{1}{T_p} \quad f_{\max} = \frac{1}{t_e} \quad f_{\min} = \frac{U_{A,\min}}{U_d \cdot t_e}$ $U_{A,\min} : \text{minimale Ausgangsspannung}$

Vierquadranten-Pulssteller (4QS):

Der Vierquadranten-Pulssteller ist selbstkommutierend, d.h. die Ventile werden abgeschaltet. Dieser Pulssteller ist die Grundschaltung für Gleichspannungssteller, Pulsleichrichter und Pulswechselrichter.



$$T_p = t_e + t_a = \frac{1}{f_p}$$

$$\bar{U}_A = ED \cdot U_d - (1 - ED)U_d = (2 \cdot ED - 1) \cdot U_d$$

$$ED = \frac{t_e}{T_p} \quad (\text{relative Einschaltdauer})$$

$$\text{Schwankungsbreite des Ankerstromes: } \Delta i_A = \frac{1}{L_M \cdot f_p} \cdot 2 \cdot U_d (1 - ED) \cdot ED$$

Wechselstrom-Umrichter:

Erzeugen aus einem Drehspannungssystem mit fester Spannung und Frequenz ein Drehspannungssystem mit variabler Spannung und Frequenz. Sie werden anhand der Art der Verbindung der zwei Netze miteinander unterschieden:

Direktumrichter: Bestehen aus mehreren netzgeführten Stromrichtern; je Phase ein kompletter Umkehrstromrichter (2 antiparallel geschaltete B6C-Schaltungen); sie enthalten keine nennenswerten Energiespeicher → Last direkt mit dem Netz gekoppelt (harte Netzankopplung); Aufgrund der Kommutierungsbedingungen für netzgeführte Stromrichter kann die Frequenz der Lastspannung nicht höher sein als die Netzfrequenz. Um die Oberschwingungen der Lastspannung zu begrenzen, wird in der Praxis die Frequenz auf der Lastseite auf Werte um $0,4 \cdot f_{\text{Netz}}$ begrenzt. → Nur für langsam laufende Antriebe geeignet. Sie werden nur für besondere Anwendungen oberhalb Leistungen von 100kW eingesetzt, da sehr viele (36) Thyristoren benötigt werden.

Zwischenkreisumrichter: Zwei Stromrichter sind in Reihenschaltung über einen Zwischenkreis miteinander gekoppelt. Der Zwischenkreis stellt einen Energiespeicher dar. Energiespeicherung im magnetischen Feld → Gleichstromzwischenkreis (I-Umrichter); Energiespeicherung im elektrischen Feld → Gleichspannungszwischenkreis (U-Umrichter); Die Momentanleistungen der beiden Stromrichter sind durch die Energiespeicher entkoppelt → weiche Koppelung zwischen den beiden Netzen!

Pulsrichter (konstante Zwischenkreisspannung):

Bei Umrichtern mit einer konstanten Zwischenkreisspannung wird der Zwischenkreis über eine Diodenbrücke eingespeist. Die Ausgangsspannung des selbstgeführten Wechselrichters wird über eine Pulssteuerung erzeugt (→ Pulswechselrichter); dabei werden die steuerbaren Ventile des Wechselrichters mehrmals pro Periode der Ausgangsspannung ein- und ausgeschaltet. Steuerung erfolgt durch einfache Zweipunktregelung. Schaltet man im Gleichspannungszwischenkreis einen Mittelpunkt, so steht an den Ventilen des ausgangsseitigen Stromrichters jeweils die halbe Zwischenkreisspannung an. In Abhängigkeit von der Differenz zwischen dem vorgegebenen Sollwert und dem Istwert des Stromes werden die Ventile so geschaltet, dass abwechselnd eine positive und eine negative Spannung (halbe Zwischenkreisspannung) anliegt. Der Stromverlauf an den überwiegend induktiven Lasten folgt dabei der Gesetzmäßigkeit zwischen Spannung und Strom an Induktivitäten. → Der Strom wird innerhalb eines vorgegebenen Toleranzbandes gehalten. Die Pulsfrequenz und die Einschaltdauer stellen sich dabei frei ein. Für einen dreiphasigen Pulswechselrichter ist als Steuerbedingung zu beachten, dass in jedem Augenblick die Summe der Ströme gleich Null ist.

Elektrosicherheit:

Begriffe:

Elektrisches Betriebsmittel	Gegenstand, der zum Zwecke der Erzeugung, Nutzung,... elektrischer Energie verwendet wird
Bezugserde	Elektrisch leitfähig angesehener Teil der Erde, der ausserhalb des Einflussbereiches von Erdungsanlagen liegt und dessen elektrisches Potential vereinbarungsgemäß 0 gesetzt wird.
Elektrischer Schlag	Physiologische Wirkung, hervorgerufen von einem elektrischen Strom durch den Körper

Basisschutz	Schutz gegen elektrischen Schlag, wenn keine Fehlerzustände vorliegen (Schutz gegen direktes Berühren)
Fehlerschutz	Schutz gegen elektrischen Schlag unter den Bedingungen eines Einzelfehlers (Schutz gegen indirektes Berühren)
Körper (eines elek. Betriebsmittel)	Leitfähiges Teil eines elektrischen Betriebsmittles, das berührt werden kann und bei intakter Basisisolierung nicht unter Spannung steht
Basisisolierung	Isolierung von gefährlichen aktiven Teilen als Basisschutz
Zusätzliche Isolierung	Unabhängige Isolierung (zusätzlich zur Basisisolierung)
Doppelte Isolierung	Isolierung, die aus Basis- und zusätzlicher Isolierung besteht
Verstärkte Isolierung	Isolierungen die im gleichen Maße Schutz bieten wie doppelte Isolierung (nicht in Basis- und Zusatzisolierung trennbar)
Handbereich	Der Berührung zugänglicher Bereich, der sich von Standflächen aus erstreckt, die üblicherweise betreten werden und dessen Grenzen eine Person in allen Richtungen ohne Hilfsmittel mit der Hand erreichen kann.
Schutzerdung	Erdung eines oder mehrerer Punkte in einem Netz, Anlage oder Betriebsmittel, zum Zweck der elektrischen Sicherheit
Funktionserdung	Erdung eines oder mehrerer Punkte in einem Netz, Anlage oder Betriebsmittel, die nicht der elektrischen Sicherheit dienen

Elektrosicherheit:

Elektrosicherheit umfasst den Personenschutz (gefährliche Körperströme, magnetische & elektrische Felder, Blitzeinwirkungen) und den Sachwertschutz (Überströme, Überspannungen, Leckströme, Funken & Lichtbögen, Unterspannungen).

Wirkung des elektrischen Stromes auf Menschen:

Schwelle	Wechselstrom 50/60Hz	Gleichstrom
<u>Wahrnehmbarkeitsschwelle:</u> Von Personen noch wahrgenommener Kleinstwert des Stromes	0,5mA	2mA
<u>Reaktionsschwelle:</u> Kleinster Stromwert, der unbeabsichtigt Muskelkontraktionen bewirkt	-	-
<u>Loslassschwelle:</u> Größter Stromwert, bei dem die Person die Elektroden noch loslassen kann	10mA	Nicht festlegbar
<u>Schwelle des Herkammerflimmerns:</u> Kleinster Stromwert, der Herkammerflimmern bewirkt	50mA bei $t > 1s$ 1000mA bei $t < 100ms$	150mA bei $t > 1s$ 1000mA bei $t < 100ms$

Die elektrische Impedanz des menschlichen Körpers ist abhängig von der Berührungsspannung, der Frequenz, dem Grad der Hautfeuchte, dem Stromweg und der Größe der Berührungsfläche. Die Körperinnenimpedanz kann überwiegend als ohmsch angenommen werden. Die Werte hängen hauptsächlich vom Stromweg ab. Die Hautimpedanz hängt jedoch von Berührungsfläche, Spannung, Frequenz, Feuchte und Kontaktdruck ab. Bei Berührungsspannungen bis zu 50V Wechselspannung verändert sich der Wert der

Hautimpedanz stark. Bei Berührungsspannungen über 50V sinkt sie beträchtlich und wird vernachlässigbar, wenn die Haut durchschlägt. Wegen der Frequenzabhängigkeit der Hautimpedanz ist die Gesamtimpedanz Z_T bei Gleichstrom größer und nimmt mit steigender Frequenz ab. Sie wird üblicherweise für den Stromweg Hand zu Hand angegeben. ($Z_T = 1000\Omega$ für 200V AC 50/60Hz, bei steigenden Spannungen $\rightarrow 650\Omega$)

Vereinbarte Grenze der Berührungsspannung: $U_L = 50V$ AC, 120V DC
 $U_L = R_K \cdot I_{Flimmer} = 1k\Omega \cdot 50mA = 50V$

Wirkung von sinusförmigem Wechselstrom (15-100Hz) auf den Menschen:

Die Wirkung ist abhängig von Stromparametern, Dauer, Stromweg und individuellen physiologischen Eigenschaften des Menschen.

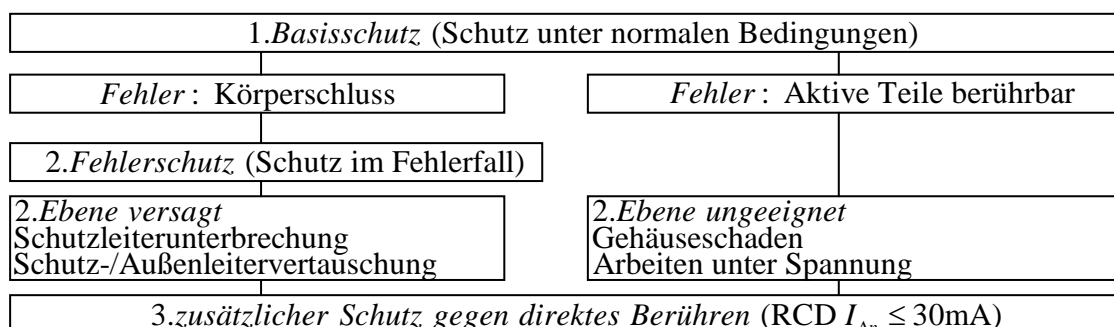
Bezeichnung	Auswirkung auf den Menschen
AC-1	Normalerweise keine Reaktion
AC-2	Normalerweise keine physiologisch schädlichen Effekte
AC-3	Normalerweise keine organischen Schäden Stromfluß $>2s \rightarrow$ wahrscheinlich krampfartige Muskelkontraktionen & Atemschwierigkeiten Mit zunehmender Stromstärke und Einwirkdauer reversible Störungen der Bildung und Weiterleitung der Impulse im Herz mit Vorhofflimmern und vorübergehendem Herzstillstand ohne Herzkammerflimmern
AC-4	Gefährliche pathophysiologische Effekte (Herzstillstand, Atemstillstand, schwere Verbrennungen) können mit zunehmender Stromstärke und Einwirkdauer zusätzlich zu den obigen Effekten auftreten
AC-4.1	Wahrscheinlichkeit Herzkammerflimmern $<5\%$
AC-4.2	Wahrscheinlichkeit Herzkammerflimmern $\leq 50\%$
AC-4.3	Wahrscheinlichkeit Herzkammerflimmern $>50\%$

Herzkammerflimmern ist die häufigste Ursache bei Tod durch elektrischen Schlag!

Fehlerarten in elektrischen Anlagen:

Kurzschluss	Durch Fehler entstandene ungewollte Verbindung zwischen aktiven Teilen, wenn sich im Fehlerstromkreis kein Nutzwiderstand befindet
Erdschluss	Durch Fehler entstandene ungewollte Verbindung eines Außenleiters oder betriebsmäßig isolierten Neutralleiters mit Erde
Körperschluss	Durch Fehler entstandene ungewollte Verbindung zwischen Körper und aktiven Teilen elektrischer Betriebsmittel
Leiterschluss	Durch Fehler entstandene ungewollte Verbindung zwischen aktiven Teilen, wenn sich im Fehlerstromkreis ein Nutzwiderstand befindet

Personenschutz – Schutz gegen elektrischen Schlag:



Schutz gegen elektrischen Schlag unter normalen Bedingungen:

- Schutz durch Isolierung von aktiven Teilen
- Schutz durch Abdeckungen oder Umhüllungen
- Schutz durch Hindernisse
- Schutz durch Abstand
- Zusätzlicher Schutz durch RCDs

Schutz gegen elektrischen Schlag unter Fehlerbedingungen:

- Schutz durch automatische Abschaltung der Stromversorgung
- Schutz durch Verwendung von Betriebsmitteln der Schutzklasse II oder Schutzisolierung
- Schutz durch nichtleitende Räume
- Schutz durch erdfreien örtlichen Potentialausgleich
- Schutz durch Schutztrennung

Netzsysteme:

Bezeichnung:

<u>1. Buchstabe:</u> Gibt Erdungsverhältnisse der Spannungsquelle an	T: Direkte Erdung vom Sternpunkt oder einem Aussenleiter I: Sternpunkt oder Aussenleiter sind gegen Erde isoliert oder über eine Impedanz mit Erde verbunden
<u>2. Buchstabe:</u> Gibt die Erdungsverhältnisse der Körper der Betriebsmittel an	T: Körper der Betriebsmittel sind direkt geerdet N: Körper der Betriebsmittel sind direkt mit dem Betriebsender (Sternpunkt) verbunden C: Neutralleiter & Schutzleiter sind im PEN Leiter kombiniert S: Neutralleiter & Schutzleiter sind getrennt verlegt

Systeme:

TN-C-System	Alle Körper der Anlage müssen mit dem geerdeten Punkt des speisenden Systems durch Schutzleiter verbunden sein! Neutral- & Schutzleiter sind im gesamten System zum PEN Leiter zusammengefasst! Im Niederspannungsnetz üblich; in Hausinstallationen nicht mehr zulässig!
TN-S-System	Alle Körper der Anlage müssen mit dem geerdeten Punkt des speisenden Systems durch Schutzleiter verbunden sein! Getrennter Neutralleiter & Schutzleiter im gesamten System
TN-C-S-System	Alle Körper der Anlage müssen mit dem geerdeten Punkt des speisenden Systems durch Schutzleiter verbunden sein! Neutral- & Schutzleiter sind in einem Teil des Systems als PEN Leiter zusammengefasst (Leiterquerschnitt A groß genug!) und im anschließenden Teil getrennt geführt! Für Hausinstallationen übliches System! Bedingung für die automatische Abschaltung durch eine Schutzeinrichtung in der festgelegten Zeit: $Z_s \cdot I_a \leq U_0$ In Verteilungsstromkreisen sind Abschaltzeiten $\leq 5s$ erlaubt! Abschaltzeiten: 230V \rightarrow 0,4s 400V \rightarrow 0,2s >400V \rightarrow 0,1s

TT-System	<p>Sternpunkt des Transformators oder Generators muss geerdet werden! Bedingung für die automatische Abschaltung durch eine Schutzeinrichtung in der festgelegten Zeit: $R_A \cdot I_a \leq U_L$ Alle Körper die durch gleiche Schutzeinrichtung geschützt sind, müssen durch einen Schutzleiter an einen gemeinsamen Erder angeschlossen werden.</p>
IT-System	<p>Aktive Teile sind gegen Erde isoliert oder über eine hohe Impedanz geerdet. Damit keine Gefährdung bei Auftreten eines Körperschlusses erfolgt, muss die Bedingung erfüllt sein: $R_A \cdot I_d \leq U_L$ Bei Auftreten nur eines Körper- oder Erdschlusses ist keine Abschaltung erforderlich. Mit einer Isolationsüberwachungseinrichtung muss das auftreten des ersten Fehlers signalisiert werden!</p>

Schutzklassen:

0	Nur Basisisolierung, keine Vorkehrung für Fehlerschutz (nur für die Verwendung in nichtleitender Umgebung oder geschützt durch Schutztrennung)
I	Basisisolierung und Schutzleiteranschluss vorhanden
II	Doppelte oder verstärkte Isolierung, kein Schutzleiteranschluss
III	Schutzkleinspannung (SEL V)

Überstromschutzeinrichtungen:

- Leitungsschutzsicherungen
- Leitungsschutzschalter
- Leistungsschalter mit elektromagnetischem Auslöser
- Teilbereichssicherungen

RCDs (Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen):

- RCDs mit (Differenzstrom) oder ohne (Fehlerstrom) Hilfsspannungsquelle

Kleinspannungen:

	SEL V	PEL V		FEL V
Nennspannung	$\leq 50V$ AC oder $\leq 120V$ DC			
Stromquelle & Stromkreis	sichere Trennung			Trennung durch Basisisolierung
Erdung aktiver Teile	verboten	zulässig		zulässig
Schutzleiter	verboten	zulässig		gefordert außer bei Schutztrennung (Potentialausgleichsleiter)
Schutz gegen direktes Berühren	kann entfallen bei Nennspannung			Isolierung, Abdeckung, Umhüllung
	$\leq 25V$ AC $\leq 60V$ DC	innerhalb von Gebäuden		
		trockene Räume $\leq 25V$ AC $\leq 60V$ DC	allgemein $\leq 6V$ AC $\leq 15V$ DC	