

Elektrische Energietechnik

Philipp Wagner

10. Februar 2009

Inhaltsverzeichnis

1 Übersicht und Einführung	2
1.1 Basiswissen und Verständnisfragen	2
2 Erzeugung von elektrischer Energie	3
2.1 Basiswissen und Verständnisfragen	3
3 Das Drehstromsystem	5
3.1 Basiswissen und Verständnisfragen	5
4 Elektrische Maschinen	6
4.1 Basiswissen und Verständnisfragen	6
5 Übertragung elektrischer Energie	12
5.1 Basiswissen und Verständnisfragen	12
6 Elektrische Energieversorgungsnetze	14
6.1 Basiswissen und Verständnisfragen	14
7 Hochspannungstechnik	14
7.1 Basiswissen und Verständnisfragen	14
8 Elektrische Antriebe	17
8.1 Basiswissen und Verständnisfragen	17
9 Stromrichter	18
9.1 Basiswissen und Verständnisfragen	18
10 Elektrosicherheit	20
10.1 Basiswissen und Verständnisfragen	20

1 Übersicht und Einführung

1.1 Basiswissen und Verständnisfragen

Geben Sie für die nachfolgenden Kennziffern aktuelle Werte an:

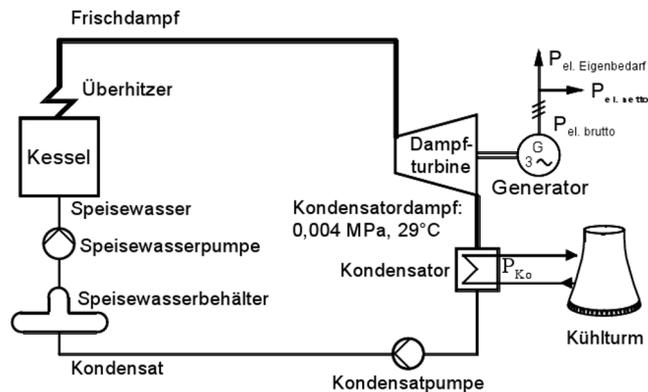
- 1 t SKE entspricht wie viel kWh?
 - Jahreshöchstlast im öffentlichen Stromversorgungsnetz in Deutschland
 - jährlicher Primärenergiebedarf Deutschlands in t SKE
 - jährlicher Primärenergiebedarf weltweit in t SKE
- 1 t SKE \cong 8140 kWh
 - Jahreshöchstlast im öffentlichen Stromversorgungsnetz in Deutschland: 80 GW
 - jährlicher Primärenergiebedarf in Deutschland in t SKE: ca. 485 Mio. t SKE
 - jährlicher Primärenergiebedarf weltweit in t SKE: ca. 14 Mrd. t SKE
2. Wie ist etwa das Verhältnis des Verbrauchs von Primär- zu Sekundär- zu Nutzenergie in Deutschland?
 - Verhältnis von Primär- zu Sekundär- zu Nutzenergie in Deutschland: 100 : 46 : 32
 - Verhältnis von Primär- zu End- zu Nutzenergie in Deutschland: 3 : 2 : 1
3. **neu!**
Was versteht man unter Ressourcen, Reserven und der Reichweite der Rohstoffe?
 - **Ressourcen:** Menge an Energiereserven, deren Vorhandensein bekannt, vermutet oder geschätzt ist
 - **Reserven:** Menge eines Rohstoffs, dessen Vorhandensein bekannt und abbauwürdig ist ("rentabel").
 - **Reichweite:** berechnet aus dem aktueller jährlicher Energieverbrauch und den bekannten Reserven (Kunstabgrenzung; geht nicht auf Verschiebungen im Markt oder im Verbrauch ein)
4. **neu!**
Welchen prozentualen Anteil hat die elektrische Energie am gesamten Energieverbrauch in Industrieländern?
bis zu 15 %
5. Welche Vorteile haben Drehstromsysteme gegenüber einphasigen Wechselstromsystemen? (Nennen Sie zwei Vorteile.)
 - Weniger Materialbedarf und Verluste durch Wegfall des Nulleiters
 - zwei verschiedene Spannungen können abgegriffen werden (Sternschaltung oder Dreiecksschaltung)
6. Warum erfolgt die Übertragung elektrischer Energie bei hohen Spannungen?
Energieübertragung erfolgt bei hohen Spannungen, um die Leitungsverluste zu minimieren ($P_V \sim \frac{1}{U^2}$)
7. Nennen Sie die typischen Nennspannungen der verschiedenen Spannungsebenen des Elektrizitätsversorgungssystems in Deutschland.
 - Verbundnetz: Höchstspannungsebene 380/220 kV
 - Verteilnetz: Hochspannungsebene 110 kV
 - Verteilnetz: Mittelspannungsebene 6/10/20 kV
 - Ortsnetz: Niederspannungsebene 0,4 kV
8. Welche Vorteile bietet der nationale und internationale Verbundbetrieb? (Nennen Sie 3 Vorteile.)
 - Optimierung der Erzeugungskosten durch wirtschaftliche Lastverteilung auf unterschiedliche Kraftwerke
 - Baumöglichkeit größerer, wirtschaftlicher Kraftwerke und Freizügigkeit bei der Standortwahl

- Austausch von Spotmengen und Bandlieferungen
- Bereitstellung von Netzreserve bei Netzüberlastung oder Netzausfällen
- Übertragung von Reserveleistung bei Störungen oder Erzeugungsmangel

2 Erzeugung von elektrischer Energie

2.1 Basiswissen und Verständnisfragen

1. Skizzieren Sie den schematischen Aufbau eines konventionellen Dampfkraftwerks (Grundschriftplan)



Schema eines Dampfkraftwerks [Quelle: Vorlesungsscript]

2. **neu!**

Was wird in Zusammenhang mit thermischen Kraftwerken als Kraftwerksblock bezeichnet?

Eine Kombination aus einem Dampferzeuger mit Turbinensatz und Generator.

3. **neu!**

Was versteht man unter dem Maschinensatz eines Kraftwerks?

Der Maschinensatz eines Kraftwerks ist die Kombination aus Turbine und Generator.

4. Erläutern Sie den Unterschied zwischen einem Kernkraftwerk mit Siede- bzw. Druckwasserreaktor.

Siedewasser und Druckwasserreaktoren sind beides Leichtwasserreaktoren. Die Unterschiede:

Siedewasserreaktor: Dampf wird bereits im Reaktor erzeugt und direkt auf die Dampfturbine geleitet (\Rightarrow größerer Kontrollbereich nötig, da die Turbine mit radioaktivem Material in Berührung kommt)

Druckwasserreaktor: Wasser wird im Reaktor erhitzt, verdampft aber aufgrund des großen Drucks (ca. 16 MPa = 160 bar) nicht. Über einen Wärmetauscher gelangt die Energie in einen Sekundärkreislauf, in Dampf mit geringerem Druck (ca. 6 MPa = 60 bar) erzeugt wird.

5. Was versteht man unter einem GuD-Kraftwerk? Welchen Wirkungsgrad erreichen GuD-Kraftwerke?

GuD-Kraftwerk = Gas- und Dampfkraftwerk. Die Abgase des Gaskraftwerks (nach der Turbine) werden über einen Wärmetauscher in einen Dampfkraftprozess übertragen. Das führt zu einem Wirkungsgrad von 50 bis 60 %.

6. Was versteht man unter Kraft-Wärme-Kopplung? Welchen Gesamtwirkungsgrad erreichen solche Kraftwerke?

Kraftwerk mit Kraft-Wärme-Kopplung (Heizkraftwerk): Der Abdampf eines Dampfkraftwerks wird weiterverwendet, um über einen Wärmetauscher Wasser in einem zweiten Kreislauf zu erwärmen, beispielsweise um es zur Fernwärmeversorgung zu verwenden. Der Gesamtwirkungsgrad beträgt so 70 bis 90 %.

7. Nennen Sie drei Turbinentypen für Wasserkraftwerke und ihre Einsatzbereiche (Fallhöhe). Welcher Turbinentyp ist auch für Pumpbetrieb geeignet?

Kaplan-Turbine (Propellerturbine): Fallhöhen bis 60 m

Francis-Turbine: Fallhöhe zwischen 40 und 400 m. Auch für Pumpbetrieb verwendbar!

Pelton-Turbine (Freistrahlturbine): Fallhöhe mehr als 200 m

8. Kann man durch einen Windpark mit 300 MW Bemessungsleistung ein konventionelles Kraftwerk gleicher Leistung ersetzen? Begründen Sie Ihre Aussage.

Nein, da die Windenergie nicht planbar ist und die Ausnutzungsdauer pro Jahr häufig sehr viel geringer als bei konventionellen Kraftwerken (max. ca. 3000h von 8760h/Jahr = 30%)

9. Benennen Sie drei Leistungsbereiche, die den Einsatz und die Ausnutzungsdauer von Kraftwerken charakterisieren. Ordnen Sie jedem Leistungsbereich einen geeigneten Kraftwerkstyp zu.

Grundlastkraftwerke: Laufwasser-, Braunkohle- oder Kernkraftwerke

Mittelleistungskraftwerke: Steinkohlekraftwerke

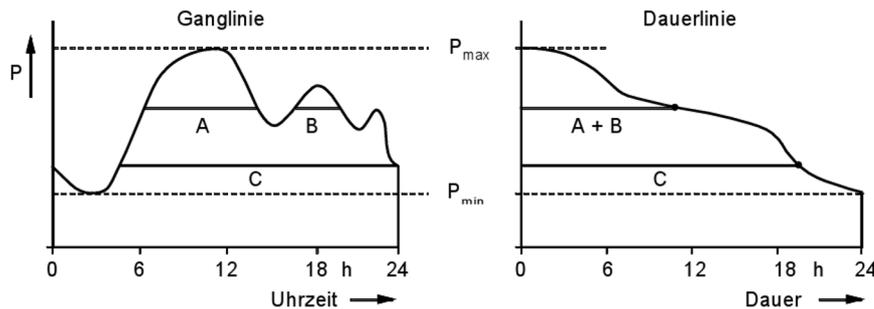
Spitzenleistungskraftwerke: Speicher- und Pumpspeicherkraftwerke, reine Gasturbinenkraftwerke

10. **neu!**

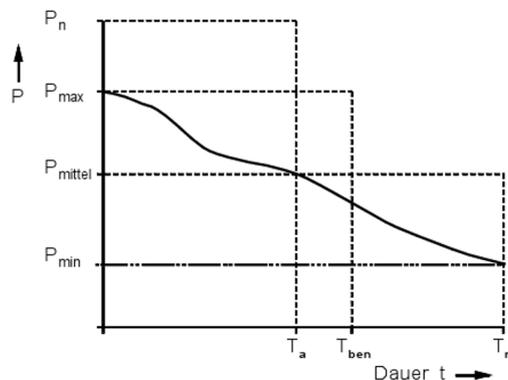
Skizzieren Sie eine typische Tages-Lastganglinie des Bedarfs an elektrischer Leistung in Deutschland und konstruieren Sie daraus die zugehörige Tages-Dauerlinie.

Welcher Zusammenhang besteht zwischen Nennbetriebsdauer T_n , Ausnutzungsdauer T_a , Benutzungsdauer T_{ben} , maximaler und mittlerer Last P_{max} bzw. P_{mittel}

Konstruktion der Tages-Dauerlinie



Konstruktion einer Dauerlinie aus der Ganglinie [Quelle: Vorlesungsskript]



Kenngrößen der Dauerlinie [Quelle: Vorlesungsskript]

Wichtige Kenngrößen:

- Nennbetriebsdauer T_n
- Ausnutzungsdauer T_a
- Benutzungsdauer T_{ben}
- mittlere Last P_{mittel}
- maximale Last P_{max}

Zusammenhang: $W = P_{mittel} \cdot T_n = P_n \cdot T_a = P_{max} \cdot T_{ben}$

3 Das Drehstromsystem

3.1 Basiswissen und Verständnisfragen

- Wie ist der Effektivwert einer periodisch veränderlichen Größe $x(t)$ mit der Periodendauer T definiert?
1. Welcher Zusammenhang besteht zwischen dem Effektivwert und dem Scheitelwert speziell bei sinusförmigen Größen?

Allgemeine Definition:

$$X_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} x^2(\tau) d\tau}$$

Bei sinusförmigen Größen:

$$X_{\text{eff}} = \frac{\hat{x}}{\sqrt{2}}$$

2. Wie ist der Phasenverschiebungswinkel zwischen Strom und Spannung definiert?

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

Der Phasenverschiebungswinkel ist immer auf den Strom bezogen, d.h. φ ist positiv, wenn der Strom der Spannung nacheilt.

3. Welche Funktion hat der Drehoperator \underline{a} und wie ist er im symmetrischen Drehstromsystem definiert?

Der Drehoperator \underline{a} zeigt den Phasenverschiebung einer Größe im Drehstromsystem an. Er ist wie folgt definiert:

$$\underline{a}^0 = 1 \text{ (Einheitszeiger)}$$

$$\underline{a} = e^{j \cdot 120^\circ} \text{ (um } 120^\circ \text{ gegen den UZS (= mathematisch positiv) verschobener Einheitszeiger)}$$

$$\underline{a}^2 = e^{j \cdot 240^\circ} \text{ (um } 240^\circ \text{ gegen den UZS (= mathematisch positiv) verschobener Einheitszeiger)}$$

4. **neu!**

In welchem Verhältnis stehen die Beträge der Strangströme eines Verbrauchers in Dreieckschaltung I_Δ zu den Außenleiterströmen I_L ?

$$I_L = \sqrt{3} I_\Delta$$

5. **neu!**

Vergleichen Sie Stern- und Dreieckschaltung eines symmetrischen ohmschen Verbrauchers im Drehstromsystem:

- Wie ist das Verhältnis der Leistungsaufnahme bei gleichen Lastwiderständen?
- In welchem Verhältnis müssen die Lastwiderstände stehen, damit gleiche Leistung aufgenommen wird?

- Leistungsaufnahme bei gleichem Lastwiderstand:

$$P_{\text{Stern}} = \frac{P_{\text{Dreieck}}}{3}$$

- Bei Wechsel von Dreieck- auf Sternschaltung muss der Lastwiderstand auf $\frac{1}{3}$ verkleinert werden, damit die Leistungsaufnahme gleich bleibt.

6. Wie ist in einem einphasigen Wechselstromsystem die Schein-, Wirk- und Blindleistung definiert und mit welchen Einheiten werden sie bezeichnet?

- **Scheinleistung:** $S = U \cdot I = \sqrt{P^2 + Q^2}$
[S] = VA
- **Wirkleistung:** $P = \operatorname{Re}\{\underline{S}\} = U \cdot I \cdot \cos \varphi = S \cdot \cos \varphi$
[P] = W
- **Blindleistung:** $Q = \operatorname{Im}\{\underline{S}\} = U \cdot I \cdot \sin \varphi = S \cdot \sin \varphi = \sqrt{S^2 - P^2}$
[Q] = Var

7. Geben Sie die Formeln für die Berechnung der Schein-, Wirk- und Blindleistung in einem symmetrischen Drehstromsystem an.

Scheinleistung: $S = 3 \cdot U \cdot I$
 Wirkleistung: $P = 3 \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$
 Blindleistung: $Q = 3 \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi$

4 Elektrische Maschinen

4.1 Basiswissen und Verständnisfragen

1. Welche Verluste treten beim Betrieb von technischen Transformatoren auf und wodurch werden sie verursacht?

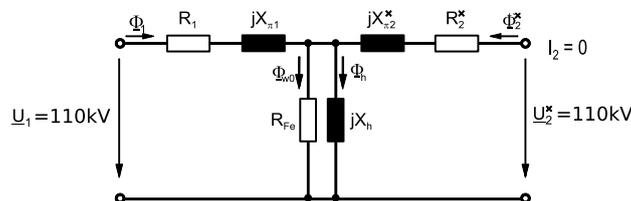
- **Kupferverluste** (Stromwärmeverluste), verursacht durch die **ohmschen Widerstände** R_1 und R_2 in den Wicklungen
- **Wirbelstromverluste**, verursacht durch die zeitlich veränderlichen **magnetischen Flüsse im Eisen** ($\sim f^2 \cdot B^2$).
- **Hystereseverluste**, verursacht durch das Durchlaufen der **Hystereseschleife** ($\sim f \cdot B^2$)

Ein einphasiger Zweiwicklungstransformator speise aus dem 110-kV-Bahnstromnetz eine 15-kV-Fahrleitung. Zeichnen Sie das ESB des einphasigen Zweiwicklungstransformators für den stationären Betrieb:

- 2.
- vollständiges Ersatzschaltbild,
 - Ersatzschaltbild für Transformator ohne Eisenverluste
 - vereinfachtes Ersatzschaltbild für den Betrieb mit Bemessungsstrom

Beschriften und benennen Sie die einzelnen Bestandteile des Ersatzschaltbildes und zeichnen Sie die an den Klemmen des Ersatzschaltbildes wirkenden Spannungen ein.

Vollständiges Ersatzschaltbild im Leerlauf

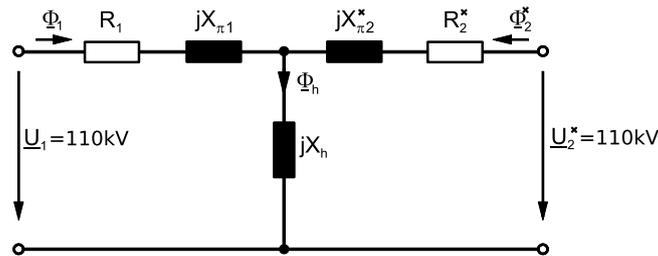


Vollständiges ESB eines einphasigen Transformators im Leerlauf

- $\ddot{u} = \frac{w_1}{w_2} = \frac{U_{1B}}{U_{2B}}$: Übersetzungsverhältnis (w_1, w_2 : Zahl der Wicklungen, U_{xB} : Bemessungsspannung)
- $U_1 = 110 \text{ kV}$: Primärspannung/Oberspannung
- $U_2 = 15 \text{ kV}$: Sekundärspannung/Unterspannung
- $U_2^x = \ddot{u} \cdot U_2 = \frac{110 \text{ kV}}{15 \text{ kV}} \cdot 15 \text{ kV} = 110 \text{ kV}$: Unterspannung (Sekundärspannung) auf die OS-Seite (Primärspannung) bezogen
- R_1 : Widerstand Wicklung 1 (OS-Wicklung)
- R_2 : Widerstand Wicklung 2 (US-Wicklung)
- $R_2^x = \ddot{u}^2 \cdot R_2$: Widerstand US-Wicklung auf die OS-Seite bezogen

- $X_{\sigma 1}$: Streureaktanz der OS-Wicklung
- $X_{\sigma 2}$: Streureaktanz der US-Wicklung
- $X_{\sigma 2}^{\times} = \dot{u}^2 \cdot X_{\sigma 2}$: Streureaktanz der US-Wicklung auf die OS-Seite bezogen
- X_h : Hauptreaktanz
- I_1 : Primärstrom/OS-Strom
- I_2 : Sekundärstrom/US-Strom
- $I_2^2 = \frac{1}{\dot{u}} \cdot I_2$: Strom auf der US-Seite auf die OS-Seite bezogen
- I_h : Magnetisierungsstrom (0,1 bis 1 % des Bemessungsstroms)
- I_{w0} : Leerlaufstrom
- R_{Fe} : Eisenwiderstand

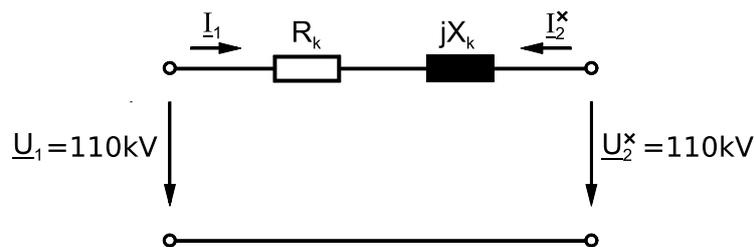
Ersatzschaltbild für Transformator ohne Eisenverluste



ESB eines einphasigen Transformators ohne Eisenverluste

- $U_1 = 110 \text{ kV}$: Primärspannung
- $U_2 = 15 \text{ kV}$: Sekundärspannung
- R_1 : Widerstand Wicklung 1
- R_2 : Widerstand Wicklung 2
- $X_{\sigma 1}$: Streureaktanz Wicklung 1
- $X_{\sigma 2}$: Streureaktanz Wicklung 2
- X_h : Hauptreaktanz
- I_1 : Primärstrom
- I_2 : Sekundärstrom
- I_h : Magnetisierungsstrom (0,1 bis 1 % des Bemessungsstroms)

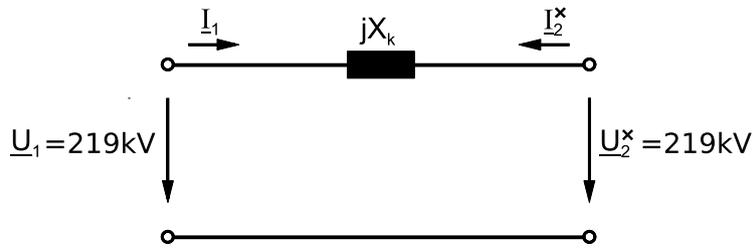
Vereinfachtes Ersatzschaltbild für den Betrieb mit Bemessungsstrom



ESB eines einphasigen Transformators bei Betrieb mit Bemessungsstrom

- $U_1 = 110 \text{ kV}$: Primärspannung
- $U_2 = 15 \text{ kV}$: Sekundärspannung
- X_k : Kurzschlussreaktanz
- R_k : Widerstand entsprechend dem Realteil der Kurzschlussreaktanz
- I_1 : Primärstrom
- I_2 : Sekundärstrom

3. Ein Transformator arbeite als Netzkuppltransformator zwischen dem Höchstspannungsnetz und dem Hochspannungsnetz mit den jeweiligen Nennspannungen 380 kV und 110 kV. Zeichnen Sie das vereinfachte einphasige Ersatzschaltbild eines technischen Drehstromtransformators bei Betrieb mit Bemessungsstrom. Beschriften und benennen Sie die einzelnen Bestandteile des Ersatzschaltbildes und zeichnen Sie die an den Klemmen des Ersatzschaltbildes wirksamen Spannungen ein.



Drehstromtransformator bei Belastung mit Bemessungsstrom

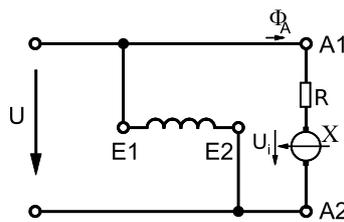
- $U_1 = \frac{380 \text{ kV}}{\sqrt{3}} = 219 \text{ kV}$: Primärspannung
- $U_2 = \frac{110 \text{ kV}}{\sqrt{3}} = 64 \text{ kV}$: Sekundärspannung
- X_k : Kurzschlussreaktanz

4. Beschreiben Sie in Stichworten, wie die Kurzschlussspannung eines Transformators ermittelt wird.

Der Transformator wird an der Unterspannungsseite kurzgeschlossen ($U_2 = 0$) und dann die Oberspannung U_1 so lange erhöht, bis der Bemessungsstrom I_r fließt.

5. **neu!**

Zeichnen Sie für eine Gleichstromnebenschlussmaschine das Ersatzschaltbild für den stationären Betrieb und geben Sie die Gleichung für den Zusammenhang zwischen Drehzahl, Drehmoment und Klemmenspannung an. Leiten Sie daraus ab, durch welche Maßnahmen die Leerlaufdrehzahl und das Anlaufmoment wie beeinflusst werden können.



Gleichstromnebenschlussmaschine im stationären Betrieb (ESB)

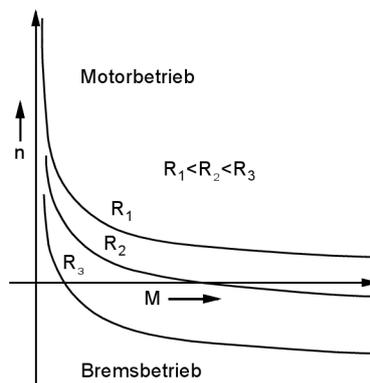
$$n = \frac{U}{K_1 \cdot \Phi} - \frac{R}{K_1 \cdot K_2 \cdot \Phi^2} M$$

(K_1, K_2 : Maschinenkonstanten, Φ : wirksamer magnetischer Fluss (abhängig vom Erregerstrom I_E))

Beeinflussung von Leerlaufdrehzahl und Anlaufmoment durch Spannungsänderung (U) oder Widerstandsänderung (R , Vorwiderstand einbauen). Vgl. alte und neue U-Bahnen in München!

6. **neu!**

Zeichnen Sie für die Gleichstromreihenschlussmaschine die Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie. Was geschieht, wenn eine Gleichstromreihenschlussmaschine ohne mechanische Last an das Netz geschaltet wird?



Wird eine Gleichstromreihenschlussmaschine ohne mechanische Last ans Netz geschaltet, kann die Drehzahl bis zur Zerstörung der Maschine ansteigen, die Maschine „geht durch“.

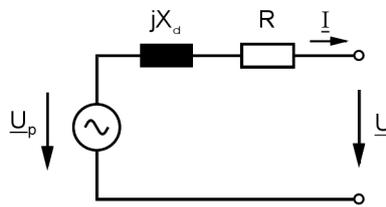
7. Was versteht man unter einem „Drehfeld“ im Zusammenhang mit elektrischen Maschinen?

Ein Drehfeld ist die räumlich sinusförmige Verteilung der magnetischen Induktion im Luftspalt einer elektrischen Maschine, die gegenüber dem Ständer umläuft.

8. Welche zwei Arten von Synchronmaschinen kann man hinsichtlich der Bauart unterscheiden und wo werden diese jeweils bevorzugt eingesetzt?

- **Schenkelpolmaschine:** Verwendung hauptsächlich in Wasserkraftwerken, da die Drehzahl auf ca. 1000 U/min beschränkt ist (ansonsten zu hohe Fliehkräfte wegen großer Durchmesser der Läufer).
- **Vollpolmaschine (Turboläufer):** Verwendung in Gas- oder Dampfturbinenkraftwerken, da dort eine hohe Drehzahl erwünscht ist. Geringerer Läuferdurchmesser, aber länger.

9. Zeichnen Sie das einphasige Ersatzschaltbild einer Synchronmaschine für den stationären Betrieb.



Einphasiges ESB eines Synchrongenerators im EZS

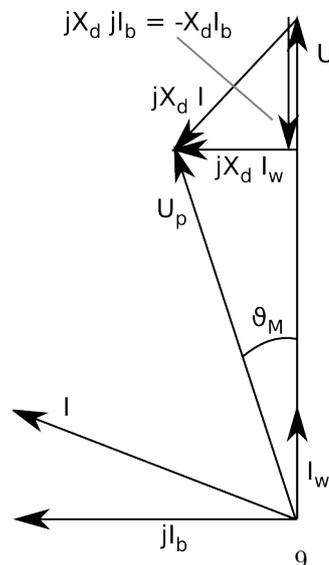
10. Was versteht man unter einer über- bzw. untererregten Synchronmaschine? Wie wirken diese jeweils am Netz?

- übererregt: $|U_p| > |U|$. Der Synchrongenerator gibt induktive Blindleistung ab und wirkt im Netz wie eine Kapazität.
- untererregt: $|U_p| < |U|$. Der Synchrongenerator nimmt induktive Blindleistung auf und wirkt im Netz wie eine Induktivität.

(U_p : Polradspannung, veränderlich durch die Änderung des Erregerstroms, U : Klemmenspannung)

11. Zeichnen Sie ein Zeigerdiagramm (Spannungs- und Stromzeiger) einer ohmsch-kapazitiv belasteten Synchronmaschine im Erzeugerzählpfeilsystem (EZS).

Last wirkt ohmsch-kapazitiv \Rightarrow Maschine muss Blindleistung aufnehmen \Rightarrow Maschine muss untererregt betrieben werden ($|U_p| < |U|$)

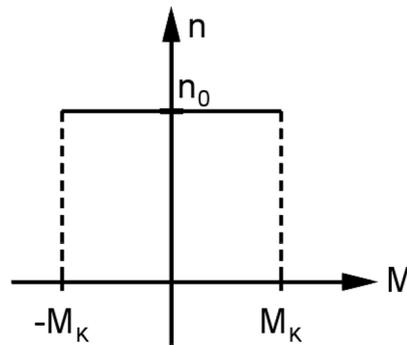


U : Klemmenspannung, I : Klemmenstrom, U_p : Polradspannung, ϑ_m : Polradwinkel (Maschinenwinkel), X_d : synchrone Reaktanz, $I_w = \operatorname{Re}\{I\}$, $I_b = \operatorname{Im}\{I\}$

12. Wie werden bei einer Synchronmaschine die Blindleistungsabgabe und die Wirkleistungsabgabe eingestellt?

- Blindleistungsabgabe: Einstellung über den Erregerstrom
- Wirkleistungsabgabe: Einstellung durch die dem Läufer zur Verfügung gestellte Wirkleistung

13. Zeichnen Sie die Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie einer Synchronmaschine. Was sagt diese aus?



Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie einer Synchronmaschine

Die Kennlinie zeigt, dass die Drehzahl im stabilen Betrieb stabil gleich der synchronen Drehzahl n_0 ist. Wird das Kippmoment M_K , das abhängig vom Erregerstrom ist, überschritten, fällt die Maschine außer Tritt.

14. **neu!**

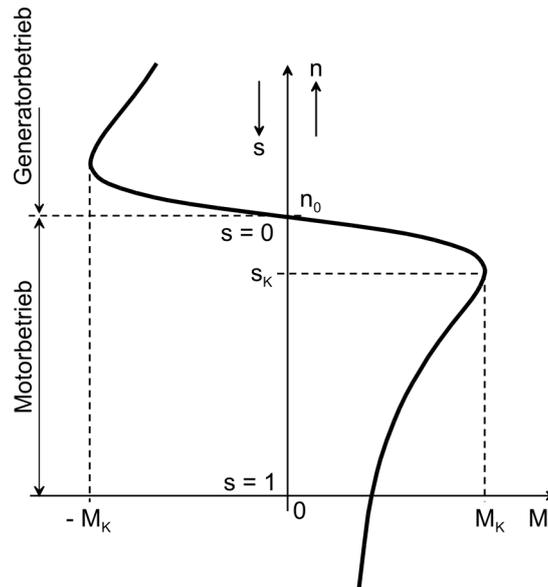
Mit welcher Drehzahl n dreht sich ein Synchrongenerator mit der Polpaarzahl $p = 5$ im 50 Hz-Drehstromnetz?

$$n = \frac{f}{p} \cdot \frac{60 \text{ s}}{\text{min}} = \frac{50 \text{ Hz}}{5} \cdot \frac{60 \text{ s}}{\text{min}} = 600 \text{ U/min}$$

15. Warum weicht die Drehzahl einer Asynchronmaschine im Normalbetrieb von der synchronen Drehzahl ab?

Bei gleicher Läufer- und Drehfelddrehzahl wird der Läufer von einem konstanten Magnetfeld durchsetzt. Dadurch würde keine Spannung im Läufer induziert und somit kein Drehmoment an der Welle anliegen. Es muss also eine Relativbewegung des Läufers zum Drehfeld vorhanden sein, um ein Moment zu erzeugen.

16. Zeichnen Sie die Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie einer Asynchronmaschine, tragen Sie die charakteristischen Kenngrößen ein und benennen Sie diese.



Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie einer Asynchronmaschine

Charakteristische Kenngrößen:

- synchrone Drehzahl n_0
- Kippschlupf s_K
- Kippmoment M_K

17. **neu!**

Wie ist der Schlupf einer Asynchronmaschine definiert? Geben Sie die Formel für die Definition des Schlupfs und benennen Sie die verwendeten Formelzeichen.

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0}$$

n_0 : synchrone Drehzahl, n : Läuferdrehzahl

18. **neu!**

Welchen Einfluss haben bei einer Asynchronmaschine die Klemmenspannung und deren Frequenz auf die Drehzahl und das maximal zur Verfügung stehende Drehmoment im stationären Betrieb?

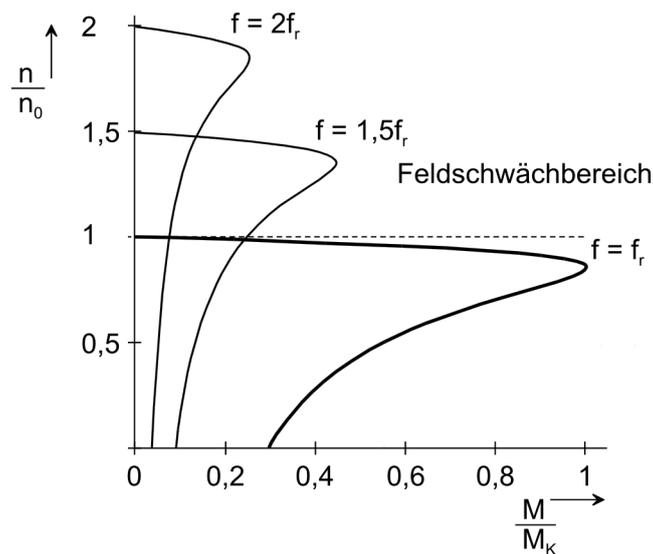
Das maximal zur Verfügung stehende **Drehmoment** ist das Kippmoment.

- Das Kippmoment M_K ist proportional zum Quadrat der Klemmenspannung: $M_K \sim U_1^2$
- Das Kippmoment M_K ist umgekehrt proportional zum Quadrat der speisenden Frequenz: $M_K \sim \frac{1}{f^2}$

Die **Drehzahl** ist proportional zur Netzfrequenz ($n \sim f$) und unabhängig von der Klemmenspannung.

19. Was muss beachtet werden wenn eine Asynchronmaschine oberhalb ihrer Bemessungsfrequenz betrieben wird und wie verändert sich dabei die Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie? Wie nennt man diesen Bereich?

Wird eine höhere Frequenz als die Bemessungsfrequenz eingestellt, wird der Fluss im Ständer kleiner. Man befindet sich im Feldschwähebereich. Dabei nimmt das Kippmoment, d.h. das maximal zur Verfügung stehende Drehmoment, quadratisch ab. Die Ständerspannung U_1 darf dabei nicht erhöht werden, da ansonsten die Isolierung der Maschine Schaden nehmen könnte.



Kennlinien der Asynchronmaschine bei verschiedenen Frequenzen

5 Übertragung elektrischer Energie

5.1 Basiswissen und Verständnisfragen

1. Wie sind üblicherweise die Leiterseile von Hochspannungsfreileitungen aufgebaut (Begründung)?

Es werden Aluminium-Stahl-Seile verwendet. In der Mitte befindet sich eine Stahlseele haben, die umgeben ist von Aluminiumdrähten (etwa im Querschnittsverhältnis Aluminium:Stahl 6:1). Dies erhöht die Zugbelastbarkeit der Seile.

2. Weshalb verwendet man für Hochspannungsfreileitungen Bündelleiter?

Es werden Bündelleiter verwendet, um die maximal zulässige Randfeldstärke von $17 \text{ kV}_{\text{eff}}/\text{cm}$ nicht zu überschreiten (ansonsten verursachen Koronaentladungen hochfrequente Störungen).

3. Was versteht man im Zusammenhang mit den elektrischen Kenngrößen einer Leitung unter den Leitungsbelägen? Nennen Sie drei Leitungsbeläge.

Der Leitungsbelag ist eine Kenngröße der Leitung als längenbezogene Größe. Beispiele für Beläge sind der ohmsche Querleitwertbelag (Ableitungsbelag) G'_b , der kapazitive Ableitungsbelag (Kapazitätsbelag) $Y'_b = \omega C'_b$ oder der Induktivitätsbelag $X'_b = \omega L'_b$.

4. Wie errechnen sich der Betriebswellenwiderstand Z_w und die Phasenkonstante β einer verlustlosen Leitung aus den Leitungsbelägen?

$$\beta = \omega \sqrt{L'_b C'_b}$$

$$Z_w = \sqrt{\frac{\omega L'_b}{\omega C'_b}} = \sqrt{\frac{L'_b}{C'_b}}$$

5. Nennen Sie für eine verlustlose 110-kV-Freileitung die Richtwerte für die längenbezogene Betriebsreaktanz, die längenbezogene Betriebsadmittanz und den Betriebswellenwiderstand.

- längenbezogene Betriebsreaktanz $X'_b = \omega L'_b = 0,40 \frac{\Omega}{\text{km}}$
- längenbezogene Betriebsadmittanz $Y'_b = \omega C'_b = 3,0 \frac{\mu\text{S}}{\text{km}}$
- Betriebswellenwiderstand $Z_w = \sqrt{\frac{\omega L'_b}{\omega C'_b}} = 365 \Omega$

6. Wie ist die natürliche Leistung einer Drehstromleitung definiert? Was kennzeichnet diesen Betriebszustand?

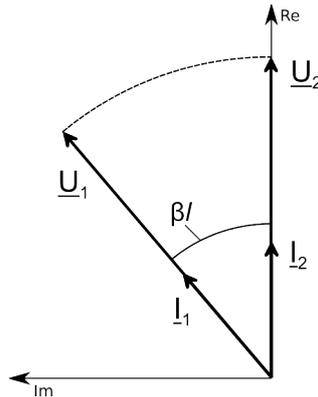
$$P_{\text{nat}} = \frac{U_n^2}{Z_w}$$

(U_n : Nennspannung des Netzes, Z_w : Betriebswellenwiderstand)

Im natürlichen Betrieb wird die natürliche Leistung P_{nat} (reine Wirkleistung) am Leitungsende entnommen.

7. **neu!**

Zeichnen Sie in der komplexen Ebene die Zeiger der Spannungen und Ströme jeweils am Anfang und am Ende einer Leitung im natürlichen Betrieb.



U_1 : Spannung am Leitungsanfang, I_1 : Strom am Leitungsanfang, U_2 : Spannung am Leitungsende, I_2 : Strom am Leitungsende, β : Phasenkonstante, l : Leitungslänge

8. Was geschieht, wenn über eine Leitung $P_2 < P_{\text{nat}}$ (oder $P_2 > P_{\text{nat}}$) übertragen wird? Wie kann man dem entgegenwirken? Nennen Sie Vor- und Nachteile der beiden möglichen Maßnahmen.

unternatürlicher Betrieb: $P_2 < P_{\text{nat}}$

Die entnommene Leistung ist kleiner der natürlichen Leistung, im Grenzfall ist die Leitung im Leerlauf. Es kommt dann zu einer Spannungsüberhöhung am Leitungsende. Zur Kompensation gibt es zwei Möglichkeiten:

- Erhöhung des Induktivitätsbelages L'_b . Dies vermindert die Stabilität der Übertragung, da βl größer wird.
- Verminderung des Kapazitätsbelages C'_b . Dies erhöht die Stabilität der Übertragung, da βl kleiner wird.

übernatürlicher Betrieb: $P_2 > P_{\text{nat}}$

Die entnommene Wirkleistung am Leitungsende ist größer als die natürliche Leistung. Dadurch kommt es zu einem hohen Laststrom. Als Gegenmaßnahmen gibt es wieder zwei Möglichkeiten:

- Verminderung des Induktivitätsbelages L'_b . Dies erhöht die Stabilität der Übertragung, da βl kleiner wird.
- Erhöhung des Kapazitätsbelages C'_b . Dies vermindert die Stabilität der Übertragung, da βl größer wird.

9. Für welche Anwendungen werden HGÜ-Anlagen eingesetzt? Worin liegen jeweils die Vorteile?

- **Zur Überbrückung langer Strecken** (ab ca. 500 km bei Freileitungen).

Vorteile:

- keine Reaktanzbeläge \Rightarrow keine Kompensation nötig, keine Stabilitätsprobleme
- keine Längenbegrenzung durch Ladeleistung (wichtig bei Kabeln)
- nur ein (bei Seekabeln, Rückweg über das Meerwasser) oder zwei statt drei Leitern \Rightarrow weniger Platzbedarf, geringere Leitungskosten

- **Zur Kopplung von Netzen mit verschiedenen Nennfrequenzen.**

Vorteile:

- die Netze werden entkoppelt
- im Fehlerfall werden keine hohen Kurzschlussleistungen übertragen

6 Elektrische Energieversorgungsnetze

6.1 Basiswissen und Verständnisfragen

1. **neu!**

Welche Kriterien bestimmen die Auswahl der Netzstruktur von Energieversorgungsnetzen?

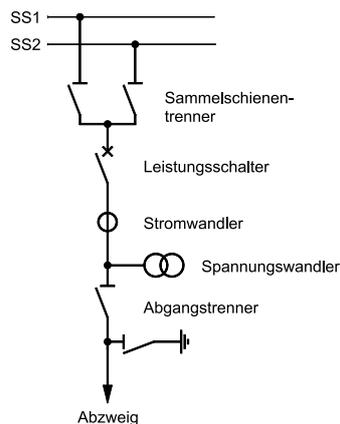
- Lastdichte
- angestrebte Versorgungszuverlässigkeit
- Wirtschaftlichkeit

2. Nennen Sie die 4 typischen Netzstrukturen von elektrischen Energieversorgungsnetzen.

- Strahlennetz
- Ringnetz
- verzweigtes Ringnetz
- Maschennetz

3. **neu!**

Skizzieren Sie die Schaltung für einen typischen Abzweig in einer Schaltanlage mit Doppelsammelschiene und benennen Sie die Betriebsmittel.



4. **neu!**

Welche Aufgabe haben Trennschalter und welche Aufgabe haben Leistungsschalter in Schaltanlagen?

Trennschalter:

- Stromwege in Schaltanlagen festlegen
- nach dem Öffnen eine sichtbare Trennstrecke zwischen ausgeschaltetem und unter Spannung stehenden Teilen einer Schaltanlage mit genügend Längsisolation erzeugen

Leistungsschalter:

Schaltung von Stromkreisen mit allen im Normalbetrieb und im Störfall vorkommenden Strömen beliebiger Phasenlage willkürlich (d.h. durch Bedienpersonal) oder selbsttätig (d.h. computergesteuert).

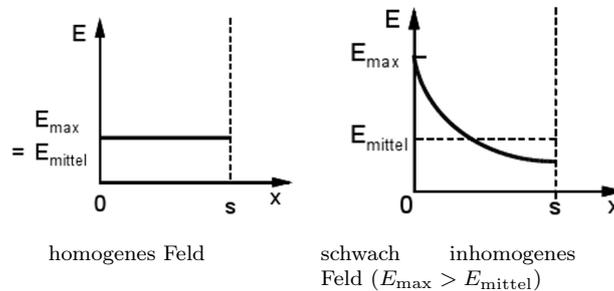
7 Hochspannungstechnik

7.1 Basiswissen und Verständnisfragen

1. Erläutern Sie die Begriffe Isolation, Isolierung und Isolator.

- **Isolation:** Grad der galvanischen Trennung leitender Teile
- **Isolierung:** technische Realisierung einer Isolation
- **Isolator:** Stoff an sich

2. Skizzieren Sie den Verlauf der elektrischen Feldstärke zwischen den Elektroden eines homogenen und eines inhomogenen elektrischen Feldes?



3. Wodurch unterscheidet sich ein schwach inhomogenes von einem stark inhomogenen elektrischen Feld?

- **schwach inhomogenes Feld:** Entladungseinsatz führt unmittelbar zum Durchschlag. $\eta_{\text{grenz}} < \eta < 1$
- **stark inhomogenes Feld:** Im Bereich zwischen Einsatzspannung U_i und Durchschlagspannung U_d treten stabile Entladungen auf. $\eta < \eta_{\text{grenz}}$

jeweils mit $\eta_{\text{grenz}} \approx 0,2$ in Luft.

4. Wie ist der Homogenitätsgrad eines elektrischen Feldes definiert?

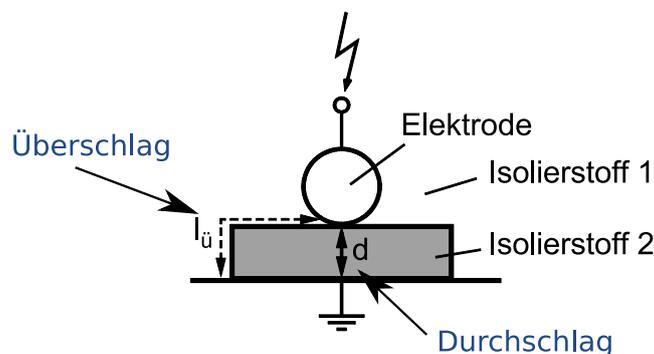
$$\eta = \frac{E_{\text{mittel}}}{E_{\text{max}}} = \frac{U/s}{E_{\text{max}}}$$

5. Wie groß ist die innere elektrische Festigkeit von Luft bei atmosphärischen Bedingungen?

$$E_0 = 25 \text{ kV/cm}$$

6. Erläutern Sie den Unterschied zwischen einem Durchschlag und einem Überschlag am Beispiel eines Isolators (Skizze oder Stichworte).

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



7. Wie hoch ist der Richtwert für den mittleren spezifischen Spannungsbedarf für den Durchschlag (Streamerentladung) einer Stab-Platte-Anordnung bei positiver und bei negativer Polarität an der Stabelektrode?

- bei **positiver** Polarität an der Stabelektrode: 4 – 5 kV/cm (Merkwert: 4,5 kV/cm)
- bei **negativer** Polarität an der Stabelektrode: 5 – 10 kV/cm

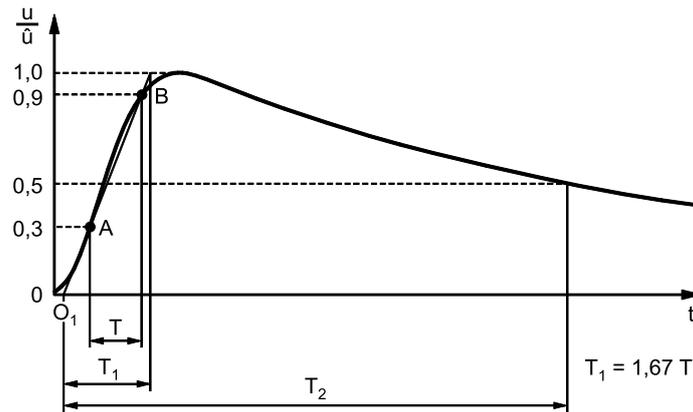
8. Was versteht man unter einem Kriechweg?

Weg des Stroms entlang der Isolatoroberfläche beim Überschlag

9. Was versteht man unter einer selbstheilenden Isolierung?

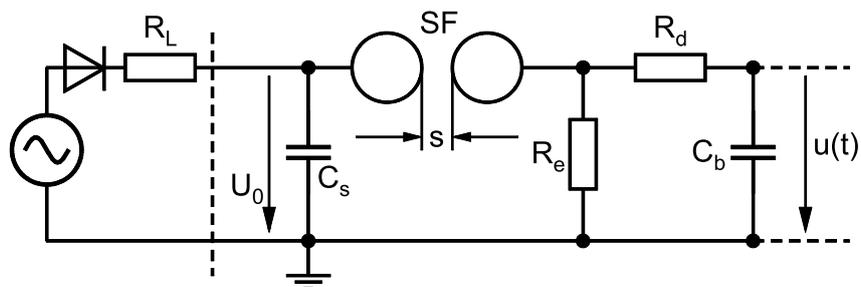
Isolierung, die nach einem Durchschlag ihr Isoliervermögen vollständig wiedererlangt.

10. Skizzieren Sie den zeitlichen Verlauf einer Blitzstoßspannung, tragen Sie die Kennwerte ein und geben Sie deren Werte für die genormte Blitzstoßspannung an.



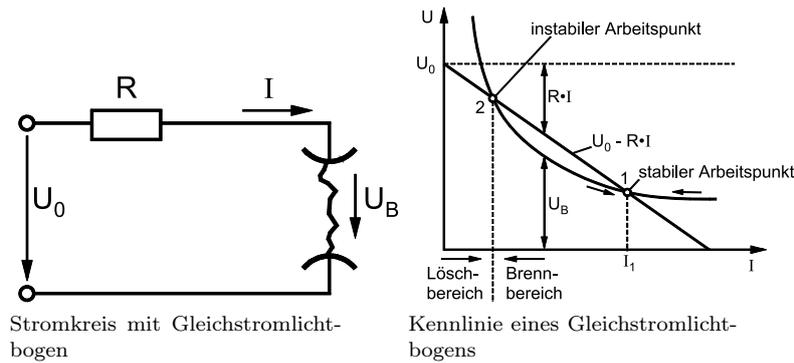
- O_1 : Stoßbeginn
- T_1 : Stirnzeit (genormte Blitzstoßspannung: $T_1 = 1,2 \mu s$)
- T_2 : Rückenhalbwertzeit (genormte Blitzstoßspannung: $T_2 = 50 \mu s$)

11. Skizzieren Sie eine Schaltung zur Erzeugung von Blitzstoßspannungen.



- U_0 : Ladespannung
- R_L : Ladewiderstand (hochohmig, mehrere $M\Omega$)
- SF: Schaltfunkenstrecke
- C_s : Stoßkondensator
- C_b : Belastungskondensator ($C_b < C_s$)
- R_d : Dämpfungswiderstand
- R_e : Entladewiderstand ($R_e \gg R_d$)

12. Skizzieren Sie eine Schaltung zur Erzeugung stationärer Lichtbogen mit Gleichspannung. Erläutern Sie mittels der entsprechenden Kennlinien den stabilen Arbeitspunkt eines stationären Gleichstromlichtbogens.



13. Beschreiben Sie das Prinzip einen Gleichstromlichtbogen zu löschen und nennen Sie drei Methoden.

Prinzip: Die Lichtbogenspannung muss über die treibende Spannung hinaus erhöht werden.

Methoden:

- Verlängerung des Lichtbogens
- Kühlung des Lichtbogens
- Aufteilung des Lichtbogens in mehrere Lichtbögen

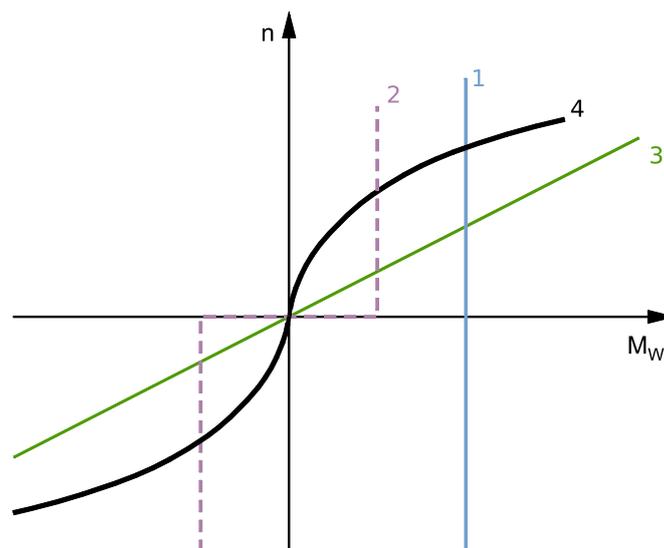
8 Elektrische Antriebe

8.1 Basiswissen und Verständnisfragen

1. Aus welchen Komponenten besteht ein komplettes Antriebssystem?

- Aktor (Antriebsmaschine mit Stellglied)
- ggf. Getriebe
- Arbeitsmaschine

2. Skizzieren Sie 4 typische Drehzahl-Drehmoment-Kennlinien von Arbeitsmaschinen und geben Sie jeweils ein Beispiel an.



- 1: Schwerkraftwirkung (z.B. Hubwerk)
 2: passive Reibung (z.B. Gleitlager, Bürstenreibung)
 3: aktive Reibung (z.B. Generator auf Widerstand)
 4: Schleuderwirkung (z.B. Pumpen)

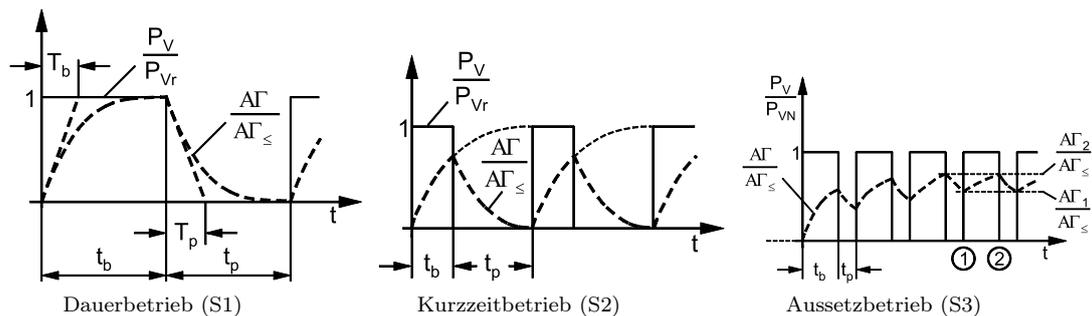
- Was sagt die thermische Klasse einer elektrischen Maschine aus?

Die thermische Klasse gibt die angemessene Höchsttemperatur unter der angenommenen Belastung und sonstigen Bedingungen an.

- Weshalb definiert man für elektrische Maschinen verschiedene Betriebsarten (S1 - S10)?

Die Erwärmung einer elektrischen Maschine ist ein wesentliches Kriterium für deren Bemessung. Da elektrische Maschinen häufig nicht auf Dauer mit konstanter Leistung betrieben werden, und damit unter Umständen bei Betrieb mit Bemessungsgrößen nicht die Bemessungstemperatur erreichen, wäre die grundsätzliche Auslegung elektrischer Maschinen auf Dauerbelastung mit Bemessungsgrößen unwirtschaftlich.

- Stellen Sie die Unterschiede der Betriebsarten S1, S2 und S3 anhand einer Skizze des zeitlichen Verlaufs der Belastung und der Übertemperatur dar.



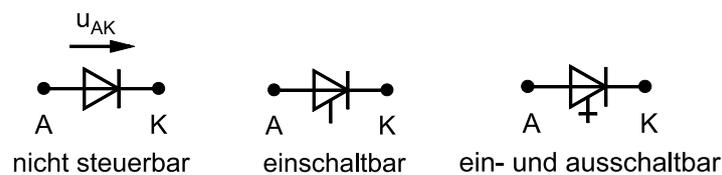
9 Stromrichter

9.1 Basiswissen und Verständnisfragen

- Was versteht man unter einem Stellglied?

Unter einem Stellglied versteht man die gerätetechnische Vorrichtung zur Veränderung der Stellgröße.

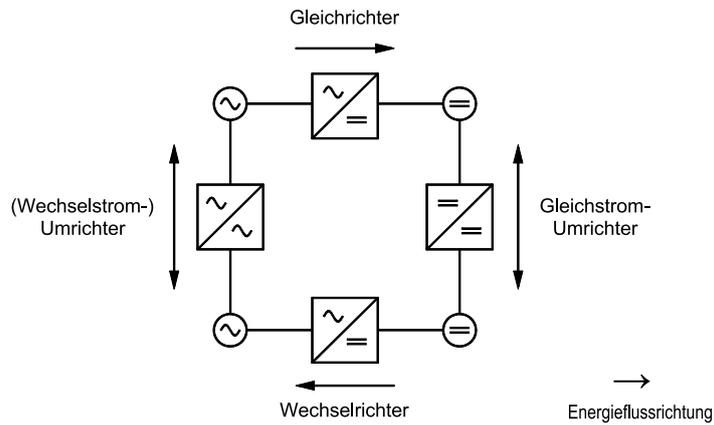
- In welche drei für die Energietechnik wesentlichen Gruppen kann man elektronische Schalter einteilen. Welche grafischen Symbole werden dafür in Schaltplänen verwendet? Nennen Sie je ein elektronisches Bauelement als Beispiel.



Beispiele für elektronische Bauelemente:

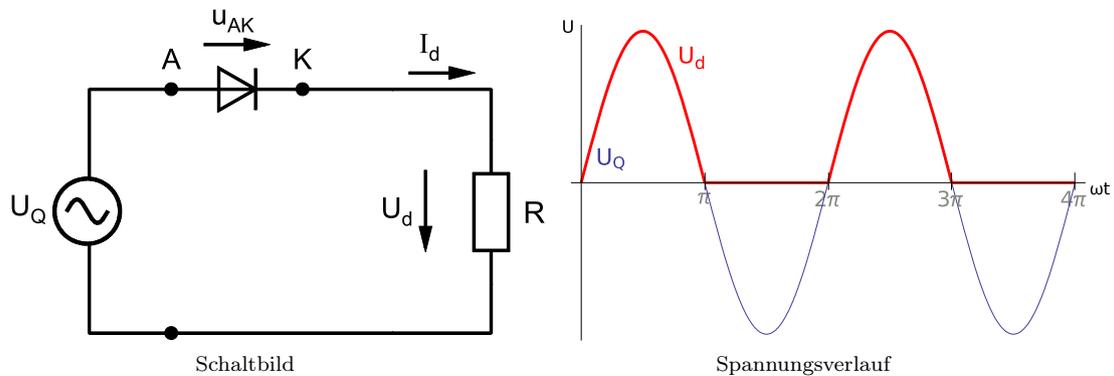
- **nicht steuerbar:** Diode
- **einschaltbar:** Thyristor
- **ein- und ausschaltbar:** GTO-Thyristor

- Nennen Sie die 4 Grundtypen von Stromrichtern, und zeichnen Sie die Richtung der Energieflüsse zwischen den jeweils beteiligten Energiesystemen.

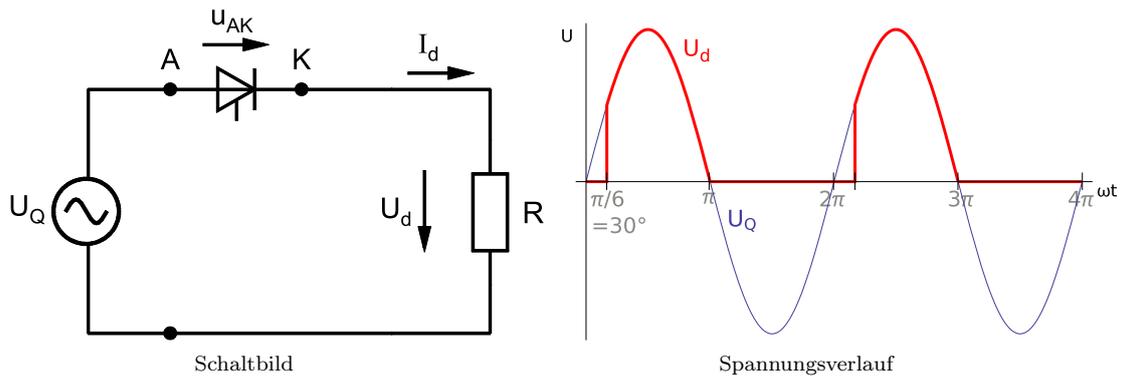


4. Zeichnen Sie den Schaltplan einer Einweggleichrichterschaltung mit ohmscher Last und skizzieren Sie die prinzipiellen Spannungsverläufe, wenn für die Schaltung die folgenden elektronischen Ventile verwendet werden: Diode, Thyristor mit Steuerwinkel 30° .

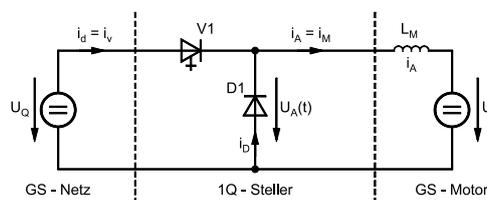
mit Diode



mit Thyristor, Steuerwinkel 30°



5. Skizzieren Sie die Grundschaltung eines Tiefsetzstellers für ohmsch-induktive Lasten. Welche grundsätzlichen Steuerverfahren gibt es?



Grundsätzliche Steuerverfahren:

- Pulsweitensteuerung
- Pulsfolgesteuerung

10 Elektrosicherheit

10.1 Basiswissen und Verständnisfragen

1. Von welchen zwei Faktoren hängt bei gegebenem Stromweg durch den menschlichen Körper die Gefahr für Personen hauptsächlich ab?

Größe und Dauer des Stromflusses

2. Wo liegt die vereinbarte Grenze der Berührungsspannung bei Wechsel- und Gleichspannung nach DIN VDE 01000 und welcher Körperwiderstand wird bei der Bestimmung angesetzt?

- Körperwiderstand: $R_K = 1 \text{ k}\Omega$
- max. Berührungsspannung für Gleichspannung: $U_L = 120 \text{ V}$
- max. Berührungsspannung für Wechselspannung: $U_L = 50 \text{ V}$

3. Was versteht man unter dem Basisschutz? Nennen Sie 3 Beispiele für die Realisierung von Basisschutz.

Basisschutz ist der Schutz vor direkter Berührung von spannungsführenden Teilen. Möglichkeiten zur Realisierung:

- Basisisolierung der stromführenden Leiter
- Abdeckungen (Umhüllungen), z.B. Gehäuse beim Heizlüfter
- Hindernisse (Zäune), z.B. bei Freiluftschaltanlagen und Hochspannungsprüfanlagen
- Abstände, z.B. Mindestdistanzen bei Freileitungen und Schaltanlagen

4. Erläutern Sie die Funktion eines Fehlerstromschutzschalters.

Das Messglied im Fehlerstromschutzschalter ist ein Summenstromwandler. Im Ungestörten Normalbetrieb ist der Summenstrom $\approx 0 \text{ A}$, da das durch die Anlage „hineinfließenden“ Ströme aufgebaute Magnetfeld durch die „zurückfließenden“ aufgehoben wird. Im Fehlerfall fließt ein Fehlerstrom über einen Schutzleiter, außerhalb des Summenstromwandlers, zum Transformator zurück. Dabei wird im Summenstromwandler eine Spannung induziert. Überschreitet der Fehlerstrom den Bemessungs-Differenzstrom $I_{\Delta n}$ kommt es zum Auslösen des Schutzes.