

Ausarbeitung Energieversorgung

www.fet.at

15. Mai 2014

Zum Geleit

Die Energie kann als Ursache für alle Veränderungen in der Welt angesehen werden.

– Werner Heisenberg, deutscher Physiker und Philosoph (1901-1976)

Alte Prüfungsfragen

Eine Sammlung alter Prüfungsfragen findet man unter:

<http://www.et-forum.org/index.php/topic/10828-mundliche-pruefungsfragen/>

Poste bitte auch die Fragen die du bei der Prüfung bekommen hast!

1 Sicherheitsregeln

Für Arbeiten an und in elektrischen Anlagen gelten die folgenden fünf Sicherheitsregeln:

1. Allpolig und allseitig abschalten (Freischalten)
2. Gegen Wiedereinschalten sichern
3. Auf Spannungsfreiheit prüfen
4. Erden und Kurzschließen
5. Gegen benachbarte unter Spannung stehende Teile schützen

Zum leichteren Merken der Sicherheitsregeln: <https://www.youtube.com/watch?v=TDTtdPOiewQ>

2 Grundlagen der Energieversorgung

2.1 Welche Aufgaben hat die Energieversorgung?

- Primärenergieträger verfügbar machen (Kohle, Gas, Wasserkraft, Wind, Sonne)
- Umwandlung in verschiedene andere Energieformen (Elektrizität, Wärme)
- Transport der Energie zu den Endkunden (Strom-, Gas-, Wärmenetze)
- Verteilung der Energie bei den Endkunden (Hausanschluss für Strom, Gas, Wärme)

2.2 Welche Anforderungen müssen Energieversorgungssysteme erfüllen?

- Sichere und zuverlässige Versorgung
Ausfälle so kurz als möglich, Bedarf muss gedeckt sein
- Wirtschaftliche Energieversorgung
geringer Preis und stabiler Preis
- Umweltschonende Energieversorgung
so wenig wie möglich Emissionen sowie Zerstörung der Umwelt durch Leitungen und Wasserkraftwerke, Windparks

2.3 Was versteht man unter Reserven, Ressourcen und der statistischen Reichweite von nichterneuerbaren Energieträgern?

- Reserve
wieviel Erdöl (oder was anderes) lässt sich wirtschaftlich fördern
- Ressource
wieviel Erdöl (oder was anderes) ist noch nicht sicher ausgewiesen oder lässt sich noch nicht wirtschaftlich fördern
- statistische Reichweite
wie lange reichen die Ressourcen/Reserven hypothetisch noch: $Reichweite = \frac{Weltvorräte}{Jahresverbrauch}$

2.4 Welche nichterneuerbaren Energieträger gibt es?

- | | |
|--------------------|----------|
| • Uran | • Erdöl |
| • Stein/Braunkohle | • Erdgas |

2.5 Welche erneuerbaren Energieträger gibt es?

- | | |
|------------|-----------------|
| • Biomasse | • Wasserkraft |
| • Wind | • Gezeitenkraft |
| • Sonne | • Geothermie |

2.6 Wie setzt sich der Energieverbrauch in Österreich zusammen?

- ca. 40% Erdöl
- ca. 20% Gas
- ca. 20% sonstige erneuerbare
- ca. 10% Wasser
- ca. 10% Kohle

2.7 Welche Rolle spielt die Wasserkraft in der Energieversorgung Österreichs?

Anteil an Wasserkraft ist in Österreich besonders hoch. Er beträgt 10% des Gesamtenergieverbrauches. Möglich ist das, aufgrund der topografischen Situation Österreichs. 60% des österreichischen Stromes wird aus Wasserkraft erzeugt.

2.8 Welche Aufgaben haben elektrische Energiesysteme?

- Energie verlustfrei übertragen und verteilen
- Spannungsschwankungen gering halten bei Be- und Entlastungen
- Ausreichende Überlastbarkeit bei Ausfällen von Komponenten
- Schnelle Wiederversorgung nach Spannungsunterbrechungen

2.9 Welche Nachteile haben Gleichstromsysteme?

- Gleichstrom kann nicht einfach in andere Spannungsebenen transformiert werden
- Abschalten ist schwierig, da keine Nulldurchgänge \rightarrow Lichtbogen reißt nicht ab

Heute wieder in Einsatz bei Seekabeln und zum Kuppeln nichtsynchrone Drehstromsysteme

3 Grundlagen der Berechnung

3.1 Was versteht man unter Amplitude, Effektivwert, Periodendauer und Frequenz sinusförmiger Wechselgrößen?

Zeitlicher Verlauf lässt sich darstellen als $U(t) = \hat{U} \cos(\omega t + \varphi_u)$.

- Amplitude: \hat{U} ist der Maximalwert der Wechselgröße
- Frequenz: $f = \frac{\omega}{2\pi}$ gibt an, wie oft sich die Wechselgröße pro Sekunde wiederholt
- Periodendauer: $T = f^{-1} = \frac{2\pi}{\omega}$ gibt an, wie lange es dauert bis sich die Wechselgröße wiederholt.
- Effektivwert: $U = U_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt}$ bei einer Sinusgröße gilt $U = \frac{1}{\sqrt{2}} \hat{U}$. U entspricht der Höhe einer Gleichspannung, die die gleiche Leistung verursacht.

3.2 Welche Größe haben diese Werte z.B. für eine Spannung im 0,4kV-Netz?

Als Nennspannungen in Drehstromsystemen werden generell die verketteten Spannungen verwendet. Deshalb spricht man beim Niederspannungsnetz für Hausanschlüsse auch vom 0,4kV-Netz und nicht vom 230V Netz

$U = 400V$, $\hat{U} = 400 \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{2} V \approx 325V$, $f = 50Hz$, $T = 20ms$ in Europa

3.3 Wie kann man eine sinusförmige Wechselgröße mittels eines komplexen Zeigers darstellen?

Allgemein gilt $\hat{Z} \cos(\varphi) = \Re(\hat{Z} e^{j\varphi}) = \Re(\underline{Z}) = \hat{Z} \frac{1}{2} (e^{j\varphi} + e^{-j\varphi}) = \frac{1}{2} (\underline{Z} + \underline{Z}^*)$, eine sinusförmige Wechselgröße kann somit als $U(t) = \hat{U} \cos(\omega t + \varphi_u) = \frac{1}{2} [\underline{\hat{U}} e^{j\omega t} + \underline{\hat{U}}^* e^{-j\omega t}]$ dargestellt werden, mit dem komplexen Amplitudenzeiger $\underline{\hat{U}} = \hat{U} e^{j\varphi_u}$

3.4 Was versteht man unter Augenblicksleistung, Wirkleistung, Blindleistung und Scheinleistung im Wechselstromsystem?

- Augenblicksleistung: $p(t) = U(t) \cdot I(t)$ ist der Momentanwert der Leistung
- Wirkleistung: $P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{2} \hat{U} \hat{I} \cos(\varphi_u - \varphi_i) = UI \cos(\varphi_u - \varphi_i) = \Re(\underline{U} \underline{I}^*)$ ist der Mittelwert der Augenblicksleistung
- Blindleistung: $Q = \Im(\underline{U} \underline{I}^*) = UI \sin(\varphi_u - \varphi_i)$
- Scheinleistung: $S = U \cdot I = \sqrt{P^2 + Q^2}$ ist der Betrag der Komplexen Scheinleistung $\underline{S} = \underline{U} \cdot \underline{I}^*$

3.5 Wie sind Wirkstrom und Blindstrom im Wechselstromsystem definiert?

Der Wirkstrom entspricht dem Anteil des Stromzeigers, der in Richtung des Spannungszeigers, verläuft, der Blindstrom dem Anteil, der senkrecht zur Richtung des Spannungszeigers verläuft.

- Wirkstrom $I_W = I \cos(\varphi_u - \varphi_i)$
- Blindstrom $I_B = I \sin(\varphi_u - \varphi_i)$

3.6 Was versteht man unter einem Drehstromsystem und wie kann es aus einzelnen Wechselstromsystemen zusammengesetzt werden?

Ein Drehstromsystem wird aus 3 Wechselstromsystemen gleicher Frequenz aber um $\frac{2\pi}{3}$ (120°) verschobener Phase gebildet.

3.7 Was sind die Vorteile von Wechselstromsystemen gegenüber Gleichstromsystemen

- leichte Transformierbarkeit
- bessere Schaltbarkeit

3.8 Was ist der Vorteil von Drehstromsystemen gegenüber Wechselstromsystemen?

- zeitlich konstante Leistung

3.9 Was bedeutet Sternschaltung oder Dreieckschaltung von Spannungsquellen in Drehstromsystemen?

- Dreieckschaltung:
Die Last ist zwischen die einzelnen Phasen geschaltet.
- Sternschaltung:
Die Last ist zwischen jeweils einer Phase und dem Sternpunkt geschaltet.

3.10 Was versteht man unter „verketteter Spannung“ und wie wird die Nennspannung von Drehstromsystemen angegeben?

Die verkettete Spannung ist die Spannung zwischen 2 Phasen. Als Nennspannungen in Drehstromsystemen werden generell die verketteten Spannungen verwendet.

3.11 Was versteht man unter Augenblicksleistung, Wirkleistung, Blindleistung und Scheinleistung in Drehstromsystemen?

- Augenblicksleistung: $p(t) = U_{aN}(t) \cdot I_a(t) + U_{bN}(t) \cdot I_b(t) + U_{cN}(t) \cdot I_c(t) = P + \tilde{p}(t)$ ist der Momentanwert der Leistung
- Wirkleistung: $P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \Re(\underline{U}_{aN} \underline{I}_a^* + \underline{U}_{bN} \underline{I}_b^* + \underline{U}_{cN} \underline{I}_c^*)$. Wenn sowohl die Spannungen als auch die Ströme symmetrisch sind gilt: $P = 3UI \cos(\varphi_u - \varphi_i)$ und für den pulsierenden Anteil gilt: $\tilde{p} = 0$
- Blindleistung: $Q = \Im(\underline{U}_{aN} \underline{I}_a^* + \underline{U}_{bN} \underline{I}_b^* + \underline{U}_{cN} \underline{I}_c^*)$ bei symmetrischen Drehstromsystemen gilt: $Q = 3UI \sin(\varphi_u - \varphi_i)$
- Scheinleistung: $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ ist in symmetrischen Drehstromsystemen $S = 3UI$

3.12 Welche Transformationen für Drehstromsysteme kennen Sie? Wie lauten die Transformationsvorschriften und welche Voraussetzungen müssen für ihre Anwendung erfüllt sein?

- **symmetrische Komponenten**

Man kann ein Drehstromsystem in seine symmetrischen Komponenten aufspalten. Die Transformationsvorschrift lautet:

$$\begin{bmatrix} \underline{V}_{(0)} \\ \underline{V}_{(1)} \\ \underline{V}_{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{V}_a \\ \underline{V}_b \\ \underline{V}_c \end{bmatrix}$$

Es müssen die selben Voraussetzungen wie für die komplexe Wechselstromrechnung erfüllt sein. Alle Zustände müssen eingeschungen sein und die Erregung darf nur sinusförmig (eine Frequenz) sein.

- **Raumzeiger und Nullgröße**

Kann auf beliebige Dreiphasensysteme (also auch mit nicht-sinusförmigen Zeitverläufen) angewendet werden. Es werden die Momentanwerte der drei Phasen $v_a(t)$, $v_b(t)$ und $v_c(t)$ verwendet. Die Transformationsvorschrift lautet:

$$\underline{v}(t) = \frac{2}{3} [v_a(t) + \underline{a} \cdot v_b(t) + \underline{a}^2 \cdot v_c(t)]$$

$$v_0(t) = \frac{1}{3} [v_a(t) + v_b(t) + v_c(t)]$$

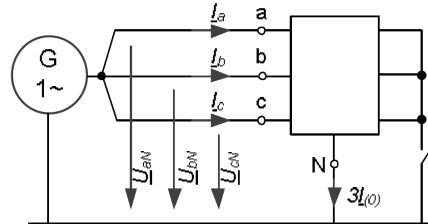
$\underline{v}(t)$ heißt Raumzeiger, $v_0(t)$ ist die Nullgröße. Im Gegensatz zu den symmetrischen Komponenten sind die transformierten Größen zeitabhängig. Diese Transformation eignet sich für Drehstromsysteme mit nicht sinusförmigen Vorgängen, die z.B. Oberschwingungen enthalten oder für nicht-stationäre Vorgänge. Der Raumzeiger kann leicht in ein rotierendes Koordinatensystem übergeführt werden und so zur Beschreibung von Vorgängen in Ständer und Läufer von rotierenden elektrischen Maschinen verwendet werden (Park'sche Komponenten bzw. d,q-Komponenten).

3.13 Was versteht man unter Mitsystem, Gegensystem und Nullsystem und wie können diese Komponenten mittels einer Messschaltung ermittelt werden?

- Das Mitsystem $\underline{V}_{(1)}$ beschreibt den symmetrischen Idealbetriebszustand. Bei einem symmetrischen Drehsystem verschwinden alle Komponenten bis auf das Mitsystem. Das Mitsystem beschreibt ein Drehfeld, das die gleiche Drehrichtung wie der Generator aufweist.

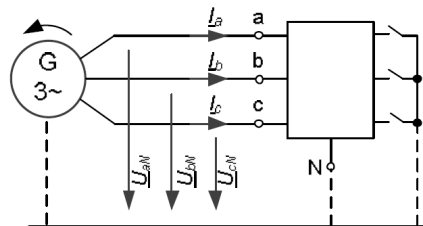
- Das Gegensystem $\underline{V}_{(2)}$ beschreibt Betriebsvorgänge gegen der normalen Drehrichtung des Systems. Diese Komponente entsteht beispielsweise bei unsymmetrischer Belastung des Systems. Die meisten Betriebsmittel (rotierende elektrische Maschinen z.B. nicht!) haben keine Vorzugsrichtung und verhalten sich deshalb für Mit- und Gegensystem gleich.
- Das Nullsystem $\underline{V}_{(0)}$ beschreibt Vorgänge die in allen 3 Phasen gleichzeitig ablaufen. Ein Nullsystem im Strom kann nur existieren wenn ein Neutralleiter vorhanden ist.

Die Nullimpedanz kann mit der Messschaltung



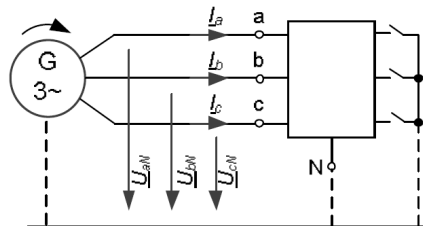
und $\underline{Z}_{(0)} = \frac{U_{(0)}}{I_{(0)}}$ berechnet werden.

Die Berechnung der Mitimpedanz erfolgt mit der Messschaltung



und $\underline{Z}_{(1)} = \frac{U_{(1)}}{I_{(1)}}$.

Die Gegenimpedanz kann mit der Messschaltung



und $\underline{Z}_{(2)} = \frac{U_{(2)}}{I_{(2)}}$ berechnet werden.

3.14 Erläutern Sie den Begriff symmetrische Impedanzkomponenten.

Wenn man die symmetrische Transformation auf die Impedanzmatrix anwendet ergeben sich symmetrische Impedanzkomponenten. Für einen symmetrischen Elementar-Längsachtpol ergibt sich eine Diagonalmatrix als symmetrische Impedanzkomponenten, was die Berechnung stark vereinfacht.

3.15 Was versteht man unter einem symmetrischen Betriebszustand?

Sämtliche Ströme und Spannungen sind symmetrisch. Die Spannungsquellen ergeben ein reines Mitsystem.

3.16 Warum ist die Berechnung symmetrischer Betriebszustände in symmetrischen Komponenten besonders einfach?

Wenn Quellen, Lasten und verbindende Elementar-Achtpole symmetrisch aufgebaut sind, dann sind die symmetrischen Komponenten voneinander entkoppelt und ermöglichen eine einfachere Berechnung der symmetrischen Betriebszustände. Im Falle eines reinen Mitsystems vereinfacht sich die Rechnung noch weiter.

3.17 Erläutern Sie die Transformation von Fehlerbedingungen in symmetrischen Komponenten und welche Kopplungen zwischen den Komponenten an der Fehlerstelle auftreten bei 1/2/3-poliger Leiterunterbrechung bzw 1/2/3- poligem Kurzschluss mit/ohne Erdberührung.

z.B. Kurzschluss ohne Erdberührung zwischen Phase a und Phase b:

1. Fehlergleichungen aufstellen

$$\begin{aligned}\underline{I}_{a,F} + \underline{I}_{b,F} &= 0 \\ \underline{I}_{c,F} &= 0 \\ \underline{U}_{aN,F} &= \underline{U}_{bN,F}\end{aligned}$$

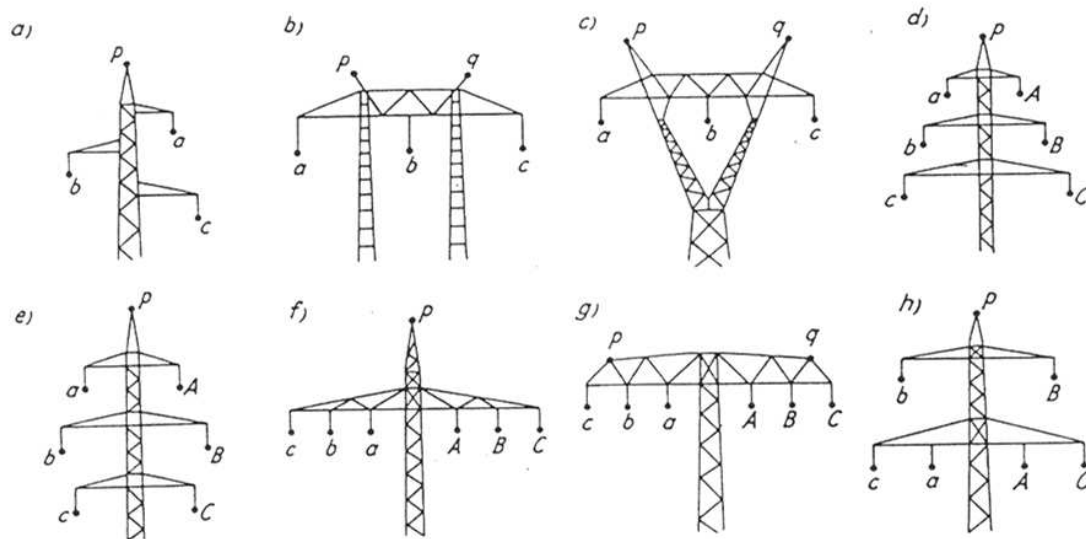
2. Strom und Spannungsvektoren transformieren
3. Vektoren vereinfachen

4 Betriebsmittel in Elektro-Energiesystemen

4.1 Welche Arten von Drehstromleitungen kennen Sie?

- Stromschienen:
Für kurze Leitungen, kann auch als gasisolierte Leitung (GIL) für längere Entfernungen eingesetzt werden
- Freileitungen:
hochbelastbar, da gut gekühlt, preiswerter und besser zugänglich als Kabel
- Kabel:
können sowohl unter- als auch oberirdisch verlegt werden, geringere Ausfallrate, aber längere Ausfallszeit wegen der schlechteren Zugänglichkeit, bessere öffentliche Akzeptanz, teurer als Freileitungen

4.2 Welche Mastkopfbilder für Drehstromfreileitungen kennen Sie?



A,B,C,a,b,c Leiterseile, p,q Erdseile

- | | |
|---|-----------------------------------|
| (a) Mittelspannungsleitung | (e) Tonnenform |
| (b), (c) Einebenen-Hochspannungsleitung | (f),(g) Einebenen-Doppelleitungen |
| (d) Tannenform | (h) Donauförmig |

4.3 Was versteht man unter Tragmasten, Abspannmasten und Verdrillungsmasten?

- Tragmasten tragen nur die Last (Isolatoren hängen senkrecht nach unten)
- Abspannmasten nehmen zusätzlich Zugkräfte auf (Isolatoren hängen schräg, 2 Isolatoren pro Seil)
- Verdrillungsmasten dienen zum Wechseln der Position der Phasen. (Unsymmetrien werden über die gesamte Länge der Leitung ausgeglichen)

4.4 Beschreiben Sie den grundsätzlichen Aufbau eines Freileitungsseils.

Es gibt eine Stahlseile in der Mitte des Leitungsseils. Diese dient zum Aufnehmen der Zugbelastung, trägt aber nur wenig zur Leitfähigkeit bei. Außen sind Aluminium oder (selten) Kupferleiter. Die gegenseitige Isolierung der Einzeldrähte durch die sie umgebende Aluminiumoxid-Schicht verringert Stromverdrängungseffekte.

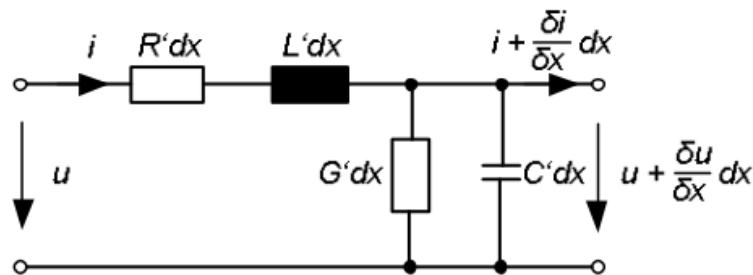
4.5 Beschreiben Sie den grundsätzlichen Aufbau eines Einleiter- bzw. Mehrleiterkabels.

- Einleiter: Aluminium- oder Kupferader mit einem Isolator ummantelt. Ggf. noch mit einer Metall- und einer Kunststoffschuttschicht ummantelt. Im Hochspannungsbereich werden ausschließlich Einleiterkabel verwendet wegen der durch den Metallmantel gegebenen Feldsteuerung. Feldsteuerung dient ab dem Mittelspannungsbereich um die maximal auftretende Feldstärke zu verkleinern.

- Mehrleiter: Aluminium- oder Kupferadern sind einzeln isoliert. Dann (nicht immer) zur Feldsteuerung leitfähig ummantelt. Mehrere dieser Adern sind von einem gemeinsamen Schutz-mantel umgeben.

4.6 Was versteht man unter einer homogenen Leitung und wie kann sie mathematisch beschrieben werden?

Eine homogene Leitung ist eine Leitung, deren Eigenschaften sich über die Länge nicht ändern. Diese kann mit folgendem Ersatzschaltbild, welches aus infinitesimal kleinen differentiellen Längenelementen besteht, dargestellt werden.



Man kann die Leitung mit der Telegrafengleichung beschreiben.

$$u + \frac{\delta u}{\delta x} dx = u - R' dx i - L' dx \frac{\delta u}{\delta t}$$

$$i + \frac{\delta i}{\delta x} dx = G' u + C' \frac{\delta u}{\delta t}$$

umformen und vernachlässigen des Termes mit dx^2 ergibt

$$-\frac{\delta u}{\delta x} = R' i + L' \frac{\delta i}{\delta t}$$

$$-\frac{\delta i}{\delta x} = G' u + C' \frac{\delta u}{\delta t}$$

1. Gleichung nach x , 2. Gleichung nach t und ineinander einsetzen ergibt:

$$\frac{\delta^2 u}{\delta x^2} = R' G' u + (R' C' + L' G') \frac{\delta u}{\delta t} + L' C' \frac{\delta^2 u}{\delta t^2}$$

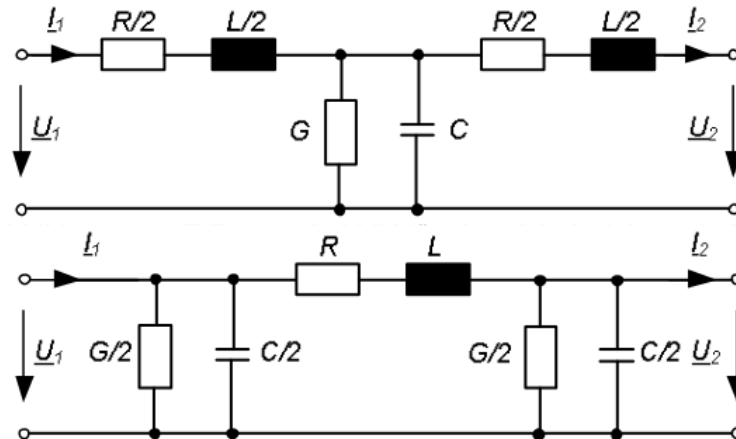
Analoges Vorgehen für Strom. Diese Gleichungen beschreiben die Ausbreitung einer Strom- bzw. Spannungswelle auf der Leitung. Diese Gleichungen heißen Telegraphengleichungen.

4.7 Was versteht man unter dem Wellenwiderstand und der Ausbreitungskonstante einer homogenen Leitung?

- Ausbreitungskonstante $\underline{\gamma} = \sqrt{(R' + j\omega L')(G' + j\omega C')} = \alpha + j\beta$ wobei α die Dämpfungskonstante und β die Phasenkonstante genannt wird.
- Wellenwiderstand $\underline{Z}_W = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}}$

4.8 Welche Ersatzschaltbilder kann man für elektrisch kurze Leitungen verwenden?

Eine kurze Leitung ist eine Leitung, die kurz gegenüber der Wellenlänge der übertragenen Spannung ist. Ersatzschaltbilder können sein:



4.9 Wie werden Widerstandsbelag, Induktivitätsbelag und Kapazitätsbelag von Leitungen bestimmt?

- Widerstandsbelag: $R' = k_{sR} \frac{\varrho}{A} \beta$ mit ϱ : spezifischer Widerstand, A Querschnittsfläche, β Verseilungsfaktor, k_{sR} resistiver Stromverdrängungsfaktor
- Induktivitätsbelag & Kapazitätsbelag kann man mittels der Spiegelleitermethode bestimmen und setzen sich aus Selbstinduktivitätsbelag und Koppelinduktivitätsbelag bzw. Selbstpotentialkoeffizienten und Gegenpotentialkoeffizienten zusammen.

4.10 Warum und wie werden Leitungen verdreht?

Verdrillung dient dazu, die Leitungen zu Symmetrieren. Weil ansonsten die mittleren Leiterabstände bzw. der mittlere Erdbabstand nicht für jede Phase gleich ist. Die Verdrillung wird auf Verdrillungsmasten durchgeführt. Es gibt die α -Verdrillung für Einfachleitungen und die β - und γ -Verdrillung für Drehstromdoppelleitungen.

4.11 Was ist ein Bündelleiter und wie wirkt sich ein Bündelleiter auf Widerstandsbelag, Induktivitätsbelag und Kapazitätsbelag aus?

Ein Bündelleiter besteht aus mehreren Einzelleitern welche einen gewissen Abstand zueinander haben.

- Widerstandsbelag wird mit $\frac{1}{n}$ reduziert
- Induktivitätsbelag wird mit $\approx \frac{1}{n}$ reduziert
- Kapazitätsbelag wird mit $\approx n$ erhöht

4.12 Was versteht man unter einer verlustlosen Leitung?

Verlustlos bedeutet $R' = 0$ und $G' = 0 \rightarrow$ damit gibt es auf der Leitung keine ohmschen Verluste

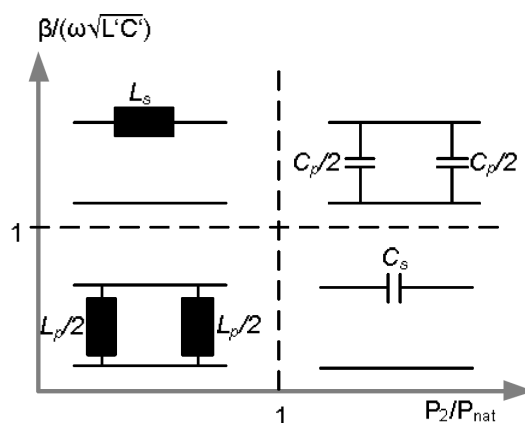
4.13 Welche Probleme treten bei leerlaufenden Leitungen auf?

Es gibt Spannungsüberhöhungen durch den Ferranti-Effekt. Resonanzstelle bei $\frac{\lambda}{4}$.

4.14 Was ist das Ziel von Leitungskompensation, und wie kann sie durchgeführt werden?

- Spannung entlang der Leitung im zugelassenen Spannungsband halten
- für einen ausgeglichenen Blindleistungshaushalt am Anfang/Ende der Leitung zu sorgen damit nur Wirkleistung übertragen wird

Kompensation kann durch Spulen, Kondensatoren oder Leistungselektronik (TCR) erfolgen. Ziel ist es den Wellenwiderstand der Leitung an die jeweilige Belastung am Ende der Leitung anzupassen. Die Elemente können unterschiedlich mit der Leitung verschaltet werden. Wobei ein kleinerer Phasenwinkel β günstig ist.



4.15 Welche Probleme entstehen beim Betrieb von Kabeln gegenüber Freileitungen verstärkt?

- Durch höheres ε_r kommt es schon bei kürzeren Leitungslängen zu einem wesentlichen Ferrantieffekt
- Durch eine höhere Leitungskapazität entstehen größere kapazitive Blindströme
- Schlechtere Wärmeableitung und dadurch geringere thermische Verlustleistung

4.16 Welche Arten von Transformatoren kennen Sie und wie unterscheiden Sie sich hinsichtlich Aufbau und Verwendung?

Einsatz:

- Blocktransformatoren bilden mit dem Generator und der antreibenden Turbine den Kraftwerksblock und transformiert die Nennspannung des Generators (bis 27kV) auf die Nennspannung des Übertragungsnetzes (z.B. 380kV)
- Netzkuppltransformatoren koppeln unterschiedliche Spannungsebenen des Hoch- und Höchstspannungsnetzes (z.B. 20kV mit 110kV)
- Verteiltransformatoren passen die Spannung von Mittelspannungsnetzen (z.B. 10kV, 20kV oder 30kV) an das Niederspannungsnetz (z.B. 0.4kV) an
- HGÜ-Transformatoren verbinden Drehstromnetze mit Hochleistungsgleichrichtern der Hochspannungs-Gleichspannungs-Übertragungsnetze

Aufbau:

- Einphasentransformator: hat nur eine Phase auf dem Transformator (Mantel- oder Kerntransformator), lässt sich leichter transportieren, es muss nur ein Einphasentransformator in Reserve gehalten werden
- Drehstromtransformator: drei Phasen auf gleichem magnetisch leitfähigem Material (Drei- oder Fünfschenkelkern-Form)

Sonstiges:

- Spartransformator: US-Wicklung nutzt Teil der OS-Wicklung, daher keine galvanische Trennung zwischen OS- und US-Wicklung und kleinere Kurzschlussspannung, aber Material und Gewichtseinsparung
- Dreiwicklungstransformatoren: im Gegensatz zu den oben genannten Transformatoren, welche alle Zweiwicklungstransformatoren sind, haben sie eine dritte Wicklung. Die dritte Wicklung kann entweder eine dritte Spannungsebene oder ein vom ersten sekundären Drehstromsystem getrenntes zweites Drehstromsystem bilden. Sie kann auch als Ausgleichswicklung Nullströme aus Primär- und Sekundärwicklung aufnehmen.
- Strom- und Spannungswandler: übertragen keine Leistung, sondern wandeln Strom und Spannung auf ein für Schutz- und Messgeräte verträgliches Niveau.

4.17 Welche Informationen enthält die Schaltgruppe eines Drehstromtransformators?

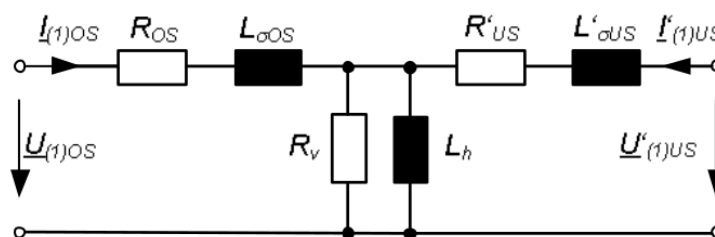
z.B. Dyn5

- D: Dreieckschaltung an der Primärseite
- y: Sternschaltung an der Sekundärseite
- n: Sternpunkt (Neutralleiter) an der Sekundärseite herausgeführt
- 5: $5 \cdot 30^\circ = 150^\circ$ Phasenverschiebung von $\underline{U}_{\text{primär}}$ zu $\underline{U}_{\text{sekundär}}$ also $\underline{U}_{\text{sekundär}} = \underline{U}_{\text{primär}} e^{j150^\circ}$

Wicklungen die nicht zusammengeschaltet sind werden mit „I“ oder „i“ gekennzeichnet. Tertiärwicklungen bei Dreiwicklungstransformatoren werden ebenfalls mit Kleinbuchstaben gekennzeichnet.

4.18 Welche Modelle für Drehstromtransformatoren gibt es und wie unterscheiden sie sich? Welche Gesichtspunkte werden dabei wie modelliert, welche vernachlässigt?

- idealer Übertrager: $\underline{u} = \frac{U_{rTos}}{U_{rTus}}$, im Nullsystem Schalter offen
- stromidealer Transformator: berücksichtigt Streuinduktivitäten L_S sowie Wicklungsverluste R_S auf OS- und US-Seite
- berücksichtigen von Eisenverlusten, modelliert durch den Widerstand R_V , und Magnetisierungsstrom, modelliert durch die Hauptfeldinduktivität L_h



Wicklungs- und Streuverluste für hoch belasteten Transformator von Bedeutung. Im Leerlauf sind dagegen der Magnetisierungsstrom und die Eisenverluste relevant.

4.19 Welche Forderungen müssen erfüllt sein, damit ein Parallelbetrieb von Transformatoren möglich und sinnvoll ist?

- gleiches Übersetzungsverhältnis und Kennzahl $\underline{u}_1 = \underline{u}_2$
- Ströme sollen sich entsprechend der Leistung aufteilen, daher sollen die bezogenen Kurzschlussspannungen gleich sein $u_{k1} = u_{k2}$
- circa gleiche Leistung weil damit Redundanz sichergestellt wird $\frac{1}{3} \leq \frac{S_{rT1}}{S_{rT2}} \leq 3$

4.20 Erklären Sie das Zustandekommen von Inrush-Strömen.

Beim Einschalten von Transformatoren entsteht eine Flussverlagerung, da der Fluss sich nicht sprunghaft ändern kann. Diese Verlagerung kann zu einer Verdoppelung des maximalen Flusses führen. Wegen der Sättigung des Kerns, entstehen wegen dem nichtlinearen Zusammenhang zwischen Fluss und Magnetisierungsstrom ein großer Magnetisierungsstrom beim Einschalten, der auch Inrush-Strom genannt wird.

4.21 Welchen Einfluss hat die Sternpunktbehandlung auf das Verhalten im Nullsystem?

Wenn beide Sternpunkte im Transformator fehlen (z.B. beim Yy0 Transformator), so ist das Nullsystem offen auf beiden Seiten. Wenn beide Sternpunkte geerdet sind (z.B. YNyn0) können Nullströme zwischen den Systemen übertragen werden. Man versucht dies allerdings zu vermeiden weil die Trafoverluste erhöht werden. Bei Dy Transformatoren ist auf der Sekundärseite ein Nullstrom möglich ohne die Verluste zu erhöhen, da innerhalb der Dreieckswicklung ein Nullsystem im Strom existieren kann, ohne dass es ins speisende Netz verschleppt wird.

4.22 Welche Ausführungen von Synchrongeneratoren kennen Sie?

- Vollpolläufer: Massiver Läufer, die Wicklungen befinden sich in Nuten in der Oberfläche des Rotors.
- Schenkelpolläufer: komplette Spule auf ausgeprägten Schenkeln des Läufers.

Ehrlich gesagt keine, jedenfalls nicht persönlich.

4.23 Was unterscheidet Synchron- von Asynchronmaschinen?

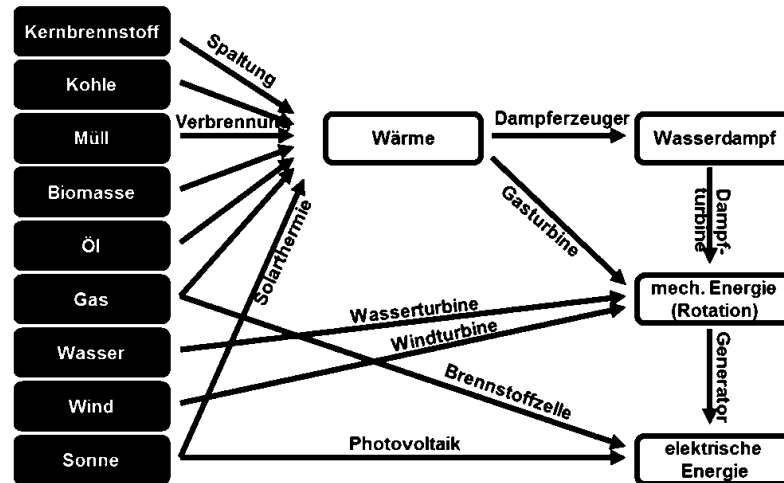
Synchronmaschinen haben keinen Schlupf, d.h. der Rotor dreht sich synchron zur Netzfrequenz. Asynchronmaschinen benötigen den Schlupf weil über die induzierten Ströme das Rotormagnetfeld aufgebaut wird. Das Drehmoment bei Asynchronmaschinen ist direkt proportional zum Schlupf (Schlupf = 0 → Drehmoment = 0).

4.24 Wofür werden Drosselspulen in elektrischen Energiesystemen eingesetzt?

- Ladestromdrosseln werden zugeschaltet um zu hohe Spannungen im Netz (z.B. bei leerlaufenden oder schwach belasteten Leitungen) zu senken.
- Kurzschlussbegrenzungsdrosseln werden zum Begrenzen des Kurzschlussstromes benutzt. Sie verursachen permanent Verluste, da sie nicht erst im Kurzschlussfall zugeschaltet werden können.

5 Energiewandlung

5.1 Beschreiben Sie die grundsätzlichen Wege der Energiewandlung



5.2 Welche Bewertungsfaktoren für das Dargebot an Energie kennen Sie?

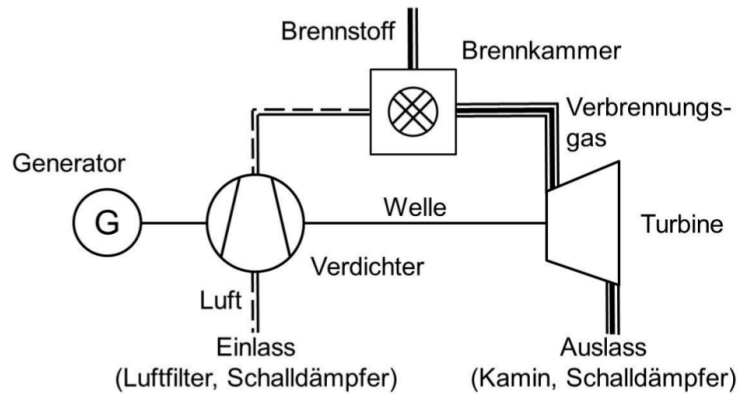
- Wertigkeit
- Leistungsdichte
- Erntefaktor
- Stromgestehungskosten
- Volllaststunden

5.3 Erläutern Sie die Begriffe Wertigkeit, Leistungsdichte, Erntefaktor, Stromgestehungskosten und Volllaststunden. Wie unterscheiden sie sich zwischen einem fossil befeuerten thermischen Kraftwerk und einem Kraftwerk mit regenerativem Energieträger?

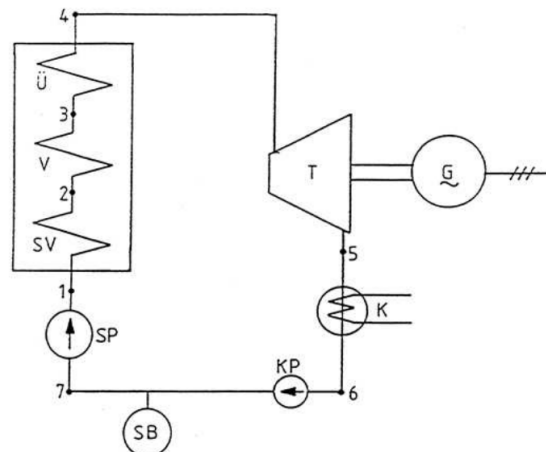
- Die Wertigkeit drückt die Verfügbarkeit des Dargebots an Primärenergie aus (zeitliche Gleichmäßigkeit und Prognostizierbarkeit). Bei einem fossil befeuerten thermischen Kraftwerk ist sie hoch. Bei Kraftwerken mit regenerativen Energieträgern ist sie bis auf Wasserkraft und Biomasse niedrig.
- Die Leistungsdichte $\frac{W}{m^2}$ beschreibt wie groß der Flächenverbrauch für die Gewinnung und Verarbeitung des Energieträgers ist. Bei einem fossil befeuerten thermischen Kraftwerk ist sie hoch. Bei Kraftwerken mit regenerativen Energieträgern ist sie bis auf Laufwasserkraftwerke niedrig (daher große Rotorflächen, Solarflächen).
- Der Erntefaktor beschreibt das Verhältnis der Gesamt über die Lebensdauer eines Kraftwerkes gewonnenen Nutz-Energie zur Energie die für den Bau und die Erhaltung des Kraftwerks gebraucht wurde. Bei einem fossil befeuerten thermischen Kraftwerk ist der Erntefaktor < 1 , wenn man den Energieinhalt des Brennstoffs mit in die aufgebrachte Energie hineinrechnet. Bei Kraftwerken mit regenerativen Energieträgern ist er hoch.
- Die Stromgestehungskosten beschreiben die Kosten pro erzeugter kWh. Sie hängen davon ab ob Subventionen, CO_2 -Zertifikate usw. mitgerechnet werden. Abgeschriebene Kraftwerke ohne Brennstoffkosten (z.B. Wasserkraft) und geringen Betriebskosten können deutlich geringere Stromgestehungskosten aufweisen.
- Die Volllaststunden beschreiben, wie lange das Kraftwerk unter Volllast laufen muss, um die mittlere Jahresenergieproduktion zu erbringen. Volllaststunden von Windkraftanlagen und

Photovoltaik werden durch Wetterverhältnisse und Aufstellungsort beeinflusst. Volllaststunden von Gaskraftwerke werden durch die hohen Brennstoffkosten beeinflusst (Spitzenlastkraftwerk). Kernkraftwerke haben hohe Investitionskosten, aber sehr geringe Brennstoffkosten und werden daher als Grundlastkraftwerke eingesetzt (Hohe Zahl an Volllaststunden)

5.4 Erläutern Sie die wesentlichen Komponenten einer Gasturbine.



5.5 Erläutern Sie die wesentlichen Komponenten einer Dampfturbine.



- SB: Speisebecken
- SP: Speisepumpe
- SV: Vorwärmer
- V: Verdampfer
- Ü: Überhitzer
- T: Turbine
- K: Kondensator

5.6 Worin unterscheidet sich ein Siedewasserreaktor von einem Druckwasserreaktor?

Der Siedewasserreaktor verdampft das Wasser zu Wasserdampf und treibt die Dampfturbine direkt an, dadurch ist der Dampf in der Turbine leicht radioaktiv. Beim Druckwasserreaktor wird der Dampf in 2 Wasserkreisläufen mit einem Wärmetauscher getrennt.

5.7 Welche prinzipiellen Bauformen von Wasserkraftwerken gibt es?

- Niederdruck-Kraftwerke (Fluss-, Laufwasserkraftwerke)
- Hochdruck-Kraftwerke (Pumpspeicher-, Speicherkraftwerke)
- Gezeitenkraftwerke
- Wellenkraftwerke
- Meeresströmungs-Kraftwerke

5.8 Erläutern Sie die Begriffe Einzugsgebiet, Jahresspeichervolumen und Energieinhalt von Speicherkraftwerken.

- Das Einzugsgebiet eines Speicherkraftwerkes erstreckt sich über die Flächen, aus denen natürliche Zuläufe zum Speicherbecken existieren. Diese sind üblicherweise ausschließlich durch die geographischen Gegebenheiten bestimmt
- Das Jahresspeichervolumen gibt die Menge des Zuflusses in einem Jahr an. Es kann mit $\text{Jahresspeichervolumen} = \text{Einzugsgebiet} \cdot \text{Jahresniederschlagsmenge}$ abgeschätzt werden.
- Der Energiegehalt eines Speicherkraftwerkes gibt an, wieviel potentielle Energie im Obersee gespeichert ist.

5.9 Welche unterschiedlichen Bauformen von Wasserturbinen kennen Sie und wie unterscheiden sie sich?

- historische Nutzung:
 - Das überschlächtige Wasserrad nutzt die potentielle Energie des Wassers aus. Das Rad ist maximal so hoch wie die Fallhöhe.
 - Das unterschlächtige Wasserrad nutzt die kinetische Energie des Wassers.
- moderne Wasserturbinen:
 - Die Pelton-Turbine (Hochdruckturbine) besitzt becherförmige Schaufeln die von Düsen angeblasen werden. Sie nutzt die kinetische Energie des Wassers. Pelton-Turbinen werden für große Fallhöhen (300...2000m) eingesetzt.
 - Die Francis-Turbine ist eine Überdruckturbine die man auch als Pumpe einsetzen kann. Sie wird bei mittleren Fallhöhen (50...300m) eingesetzt.
 - Die Kaplan-Turbine ist eine Überdruckturbine für niedrige Fallhöhen. Im Gegensatz zur Francis-Turbine ist die Schaufelstellung änderbar und damit der Arbeitspunkt einstellbar.

Bei der Francis- und Kaplan-Turbine wird die Wasserströmung zunächst in einem Leitapparat mit (meist feststehenden)Schaufeln umgelenkt und damit eine zum Laufrad tangential Geschwindigkeitskomponente erzeugt.

5.10 Erläutern Sie die Funktionsweise einer Wasserturbine anhand der Peltonturbine.

Der Wasserstrahl tritt reibungsfrei auf die Schaufel auf und wird durch diese umgelenkt und abgebremst. Der Wasserstrahl tritt dann mit einer geringeren Geschwindigkeit aus den Bechern des Laufrades aus. Die freigesetzte Energie ergibt sich als Differenz der Aufprall- und Abflussgeschwindigkeit über $E = \frac{m\Delta v^2}{2}$

5.11 Wie hängen Windgeschwindigkeit und verfügbare Leistung bei Windkraftanlagen zusammen?

Proportional zu v^3 , $P_W = \frac{1}{2}\rho_L A v^3$

5.12 Beschreiben Sie charakteristische Größen und Gesetzmäßigkeiten von Windkraftanlagen.

- Die mittlere Windgeschwindigkeit gibt den Jahresmittelwert der Windgeschwindigkeit an und dient zur Bewertung des Standortes.
- Die Häufigkeitsverteilung gibt an, wie oft welche Windgeschwindigkeit gemessen wurde und wird für die Berechnung des Jahresertrags benötigt.
- Anhand von Jahresdauerlinien kann man erfahren, wie viele Stunden im Jahr die Windgeschwindigkeit einen bestimmten Wert überschreitet. Sie erlauben einen guten Vergleich unterschiedlicher Winddargebote und zeigen die maximal erreichten Sturmgeschwindigkeiten an, welche für die Dimensionierung wichtig sind.
- Die Stetigkeit kann man in
 - Tagesgang
 - jahreszeitliche Variationen
 - langfristige Schwankungen (Probleme mit der Finanzierung)
 - Windturbulenzen und Böen (müssen für die Ermüdungsfestigkeit berücksichtigt werden)einteilen
- Windgeschwindigkeit nimmt mit der Höhe zu (Reibung mit der Erdoberfläche). Die Windgeschwindigkeitszunahme kann mit der logarithmischen Höhenformel oder mit dem Potenzansatz nach Hellmann berechnet werden.

Das Kurzzeitverhalten ist wichtig für die Regelung und Strukturfestigkeit. Das Langzeitverhalten bestimmt die Energielieferung und damit die Wirtschaftlichkeit der Anlage.

5.13 Was ist der Leistungsbeiwert und welche maximale Größe hat er unter welchen Voraussetzungen?

Der Leistungsbeiwert c_p ist das Verhältnis der entziehbaren mechanischen Leistung zu der im Luftstrom enthaltenen Leistung. Die maximale Leistung kann man bei $\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{3}$ finden, dabei ergibt sich der maximale Leistungsbeiwert zu $c_{p,max} \approx 0,6$

5.14 Worin unterscheiden sich Widerstandsläufer und Auftriebsläufer bei Windkraftanlagen?

Der Widerstandsläufer benutzt den Luftwiderstand einer Fläche zur Energiewandlung und wird eher selten zur energetischen Nutzung von Windenergie herangezogen. Als Messgeräte finden sie aber verbreiteten Einsatz. Der Auftriebsläufer hat seine Rotorblätter so gestaltet, dass sie aerodynamischen Auftrieb erzeugen. Dadurch lassen sich größere Leistungsbeiwerte erreichen.

5.15 Welche Bauformen für Windkraftanlagen kennen Sie? Welche haben sich durchgesetzt?

- Auftriebsprinzip mit horizontaler Achse
Auftriebsprinzip am häufigsten verwendete Effekt, horizontale Ausrichtung verbreitetste Anordnung
 - Schnellläufer: Schnelllaufzahl (Verhältnis der Geschwindigkeit der Rotorblattspitze zur Windgeschwindigkeit in der Ebene) größer als 3, geringe Blattzahl (1-3), weisen die beste Ausnutzung des Winddargebots auf, höchste Leistungsbeiwerte
 - Langsamläufer: höheres Drehmoment, sehr gut für Antrieb von Pumpen, historisch für Mühlen
- Auftriebsprinzip mit vertikaler Achse
Darrius-Rotor, H-Rotor; der Darrius-Helix Rotor verursacht weniger Geräusche und wird daher im Stadtgebiet häufiger verwendet
- Konzentrierende Maschinen
noch im Experimentierstadium, durch starre Baumaßnahmen werden durch Erhöhung der Anströmgeschwindigkeit oder Wirbelerzeugung die Leistungsausbeute bezogen auf die Rotorkreisfläche erhöht
- Widerstandsprinzip
älteste Anlagen, Savoniusrotor, Schalenkreuz

Es haben sich dreiblättrige Horizontalachsenkonverter durchgesetzt, da sie die beste Nutzung des Winddargebotes bieten und sich damit schneller rentieren.

5.16 Welche unterschiedlichen Netzanbindungsvarianten für Windkraftanlagen gibt es und wie unterscheiden sie sich hinsichtlich des verwendeten Generators?

- mechanisches Getriebe zur Drehzahlumsetzung oder getriebeloser Aufbau
- direkte Anbindung des Generators über Trafo ans Netz (drehzahlvariabel) oder Verwendung eines Stromrichters (drehzahlvariabel)
- Synchron-, Asynchron-, oder Gleichstromgenerator

Mit einem **Asynchrongenerator** kann direkt in das Netz eingespeist werden, hierbei ergibt sich ein drehzahlstarrer Betrieb. Kostengünstige Komponenten, jedoch geringe Regelungsmöglichkeit und zusätzliche Netzbelastung durch Blindleistungsbedarf des Generators

Bei der **doppelt gespeisten ASM** wird dem Läuferfeld ein drehzahlvariables Feld überlagert, wodurch die abgegebene Frequenz unabhängig von der Läuferdrehzahl wird. Der Umrichter ist dabei kostengünstig, weil die eingespeiste Leistung klein gegenüber der Nennleistung der Anlage ist.

Ein **Synchrongenerator** kann drehzahlvariabel gefahren werden, es wird jedoch ein Frequenzumrichter zum Einspeisen ins Netz benötigt. Der Umrichter muss für die Anlagennennleistung ausgelegt sein, das Konzept bietet aber gute Regelbarkeit und mit vielpoligen Generatoren kann das Getriebe entfallen.

5.17 Erläutern Sie die Leistungsregelung von Windkraftanlagen unter Verwendung der Begriffe Pitchregelung und Stallregelung.

Durch Einsatzeinschränkungen wie mechanisch maximal zulässige Drehzahl, Leistungsbeschränkungen des Generators oder Umrichters muss die dem Wind entnommene Leistung durch Regel-

und Steuereinrichtungen bei höheren Windgeschwindigkeiten beschränkt werden, am besten direkt beim Rotor.

- Bei der Stall-Regelung werden die Blätter nicht verstellt, der Luftstrom reißt selbstständig ab wenn er zu hoch wird. Sie wird insbesondere bei direkt ans Netz gekoppelte Anlagen verwendet. Sie ist günstig, jedoch kann es durch starke Böen oder Umströmungen zur Überbeanspruchung der Rotorblätter kommen. Es gibt auch die Aktiv-Stall-Regelung bei der mittels Blattwinkelverstellung der Rotor kontrolliert in den Stall gefahren wird, dadurch kommt es zu einem sanfteren Verlauf.
- Bei der Pitch-Regelung wird der Anstellwinkel der Rotorblätter verändert und somit die Leistungsaufnahme (ab einem gewissen Wert) konstant gehalten. Ein Stall wird vermieden. Mit der Pitch-Regelung kann im Vergleich zur Stall-Regelung die Anlage sanfter abgeschaltet werden bei Überschreiten der Abschaltgeschwindigkeit

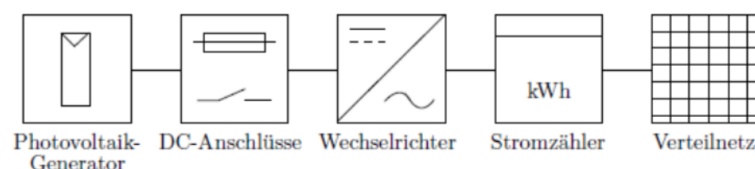
5.18 Welche grundsätzlichen Arten der direkten Nutzung von Solarenergie gibt es?

- Solarthermie benutzt die Sonne als Wärmequelle. Durch die Wärmespeicherfähigkeit des Arbeitsmedium steht die Energie den ganzen Tag zur Verfügung.
- Photovoltaik wandelt Sonnenenergie direkt in elektrische Energie. Sie unterliegt erheblichen tages- und jahreszeitlichen Schwankungen.

5.19 Welche unterschiedlichen Kollektorbauformen für Solarthermie kennen Sie?

- Niedrigtemperaturkollektoren (üblicherweise für Heizzwecke):
 - Flachkollektoren
 - Vakuumröhrenkollektoren ohne Konzentrator
- Hochtemperaturkollektoren (durch höhere Temperaturen können sie mittels thermodynamischen Prozess zur solarthermischen Stromerzeugung verwendet werden):
 - Vakuumröhrenkollektoren mit Konzentrator
 - Fresnel-Kollektoren
 - Parabolkollektoren
 - Solartürme mit Heliostaten

5.20 Nennen Sie die grundsätzlichen Komponenten einer Photovoltaikanlage.



6 Betriebsvorgänge und Störungen

6.1 Welche Ergebnisse liefert eine Lastflussberechnung?

- Spannungen an allen Knoten

- Leistungen nach Wirk- und Blindleistung der spannungsabhängigen Lasten
- Leistungsflüsse in allen Netzzweigen
- Verluste in allen Zweigen und im gesamten Netz

6.2 Was versteht man unter Kippleistung und von welchen Einflussgrößen hängt sie ab?

Die Kippleistung ist die maximal übertragbare Leistung $P = 3 \frac{U_1 U_2}{X}$, der Leitungswinkel muss 90° betragen. U_1 ist die Spannung im Netz 1, U_2 ist die Spannung im Netz 2 und X ist die Reaktanz zwischen den beiden Netzen.

6.3 Was unterscheidet eine Leistungsübertragung in Netzen mit Spannungsstützung von einer solchen in Netzen ohne Spannungsstützung?

Im Allgemeinen stellen leerlaufende Freileitungen auf Grund ihrer physikalischen Eigenschaften Blindleistungsverbraucher dar. Deshalb kann man die am Anfang eingeleitete Nennleistung nicht über längere Distanz der Leitung aufrecht halten. Aber man möchte, am Ende der Leitung eine Last, einen Verbraucher anschließen und ihn mit einer konstanten Versorgungsspannung betreiben. Damit das möglich ist, braucht man Spannungsunterstützung, d.h. zusätzliche Blindleistungseinspeisung, zum Ausgleich was auf dem Weg des Strom-/Spannungstransportes verbraucht wurde. Je nachdem ob die Last kapazitive/induktive Scheinleistung-Rückwirkung hat -> Kompensationselemente.

6.4 Welche unterschiedlichen Knotenarten für Lastflussberechnungsverfahren kennen Sie?

- Kraftwerkseinspeisung
- Knotenbelastungen
- Zweigflüsse zu Nachbarknoten

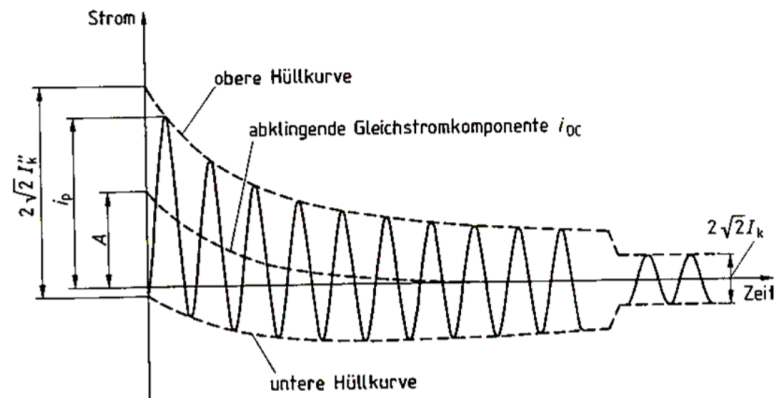
6.5 Was versteht man unter einem Kurzschluss? Was versteht man unter einem Erdschluss?

Ein Kurzschluss ist ein Fehler der Isolation zwischen 2 Phasen. Ein Erdschluss ist ein Fehler der Isolation zwischen einem Leiter und Erde. Kurzschlussvorgänge sind dadurch gekennzeichnet, dass bei ihnen sehr große Fehlerströme (bis und über 100kA) und entsprechend hohe mechanische (durch Stromkräfte) und thermische Belastungen (bis 20.000K) auftreten können.

6.6 Nach welchen Gesichtspunkten kann man eine Isolation in Hochspannungsanlagen unterscheiden?

- selbstheilend, nach Abschalten der Spannung stellt sich die Isolation selbst wieder her (z.B. Luftisolation)
- nicht selbstheilend, nach Abschalten der Spannung ist die Isolation dauerhaft geschädigt (z.B. Feststoffisolation oder Öl)

6.7 Welchen grundsätzlichen Verlauf hat der Kurzschlussstrom in Abhängigkeit vom Fehlereintrittszeitpunkt? Welche kennzeichnenden Größen kann man aus dem Verlauf ablesen?



6.8 Worin unterscheiden sich generatornaher und generatorferner Kurzschlussstromverlauf?

Beim generatorfernen Kurzschluss klingt der Wechselstromanteil des Kurzschlussstromes nicht ab. Der generatornahe Kurzschluss tritt dann auf wenn der Kurzschlussstrom mindestens den zweifachen Nennstrom eines Synchrongenerators ausmacht. Beim generatornahen Kurzschluss bewirkt der Kurzschluss eine Gegenregung im Generator wodurch die magnetischen Flüsse abklingen.

6.9 Welche Kenngrößen werden zur Beschreibung von Kurzschlussverläufen verwendet?

- Der Anfangs-Kurzschluss-Wechselstrom I_k'' ist der Effektivwert des Wechselstromes.
- Der Stoßkurzschlussstrom i_p ist der kurzzeitige Maximalwert des Kurzschlussstromes.
- Der Ausschaltstrom I_a ist der maximale Strom den die Schalter trennen können.
- Der größte Dauerkurzschlussstrom $I_{k,max}$ ist für Auslegung von Sicherungen und Schutzgeräten mit Übersromauslösung wichtig, um thermische Überlastung von Betriebsmitteln bei langen Kurzschlussdauern zu vermeiden.
- Der kleinste Dauerkurzschlussstrom $I_{k,min}$ ist zum Detektieren eines Fehlerfalles wichtig.

6.10 Beschreiben Sie die prinzipielle Vorgehensweise bei der Berechnung von Kurzschlussströmen.

- In allen drei Phasen tritt gleichzeitig das größtmögliche Gleichstromglied auf.
- Transiente Vorgänge werden vernachlässigt. (kein Abklingen)
- Alle Generatoren haben die gleiche innere treibende Spannung mit Sicherheitsfaktor $c = 1,1$ für $U \geq 1\text{kV}$ oder $c = 1,05$ für $U = 0,4\text{kV}$.
- Lastimpedanz der Verbraucher wird vernachlässigt.
- Beim dreipoligen Kurzschluss entsprechen die Innenimpedanzen den Mitimpedanzen.

6.11 Wie hängen Stosskurzschlussstrom und Anfangskurzschlusswechselstrom zusammen?

Über einen Faktor κ . $i_p = 2(1 + e^{-\frac{t_R}{L}})I_k = 2\kappa I_k$, $1 \leq \kappa \leq 2$

6.12 Wie beeinflusst die Sternpunktbehandlung die Größe des einpoligen Fehlerstromes?

Bei offenem Sternpunkt fließen wesentlich kleinere Fehlerströme als bei geschlossenem. ($Z_{(0)} = \frac{1}{j\omega C_l}$). Es kann jedoch eine Serienresonanz mit den Impedanzen aus Mit- und Gegensystem auftreten, wenn das Nullsystem überwiegend kapazitiv ist. Dabei können Ströme auftreten, die größer als der dreipolige Kurzschlussstrom sind.

6.13 Was versteht man unter einem kompensierten Netz?

Es wird eine Induktivität (Petersen-Spule) vom Generatorsternpunkt nach Erde geschaltet, diese ist in Parallelresonanz mit der Leitungskapazität, dadurch wird der Erdschlussstrom zu null.

6.14 Was ist die Funktion eines Erregersystems? Welche unterschiedlichen Erregersysteme kennen Sie? Worin unterscheiden sie sich?

Für den Fall, dass das magnetische Feld des Läufers durch eine rotierende Wicklung erzeugt wird, muss diese Erregerwicklung von einem Gleichstrom, dem Erregerstrom, durchflossen werden. Es ist Aufgabe des Erregersystems, den Erregerstrom und die Erregerspannung zu erzeugen und so zu regeln, dass die Klemmenspannung des Generators einem vorgegebenen Sollwert entspricht.

- Beim statischen Erregersystem wird der Erregerstrom über Kohlebürsten und Schleifringe auf die Generatorwelle übertragen. Bei hohen Strömen ist die Verwendung von Kohlebürsten problematisch.
- Beim bürstenlosen Erregersystem wird der Erregerstrom über einen zusätzlich auf der Welle aufgetragenen Haupterregemaschine, ausgeführt als Außenpolmaschine, erzeugt. Es kann nicht die Erregerspannung des Generators direkt sondern nur die Erregerspannung der Haupterregemaschine beeinflusst werden.

6.15 Erläutern Sie die Begriffe „übererregter Betrieb“ und „untererregter Betrieb“ eines Synchrongenerators.

Der Generator verhält sich bezüglich seines Blindleistungsanteils im

- übererregten Betrieb wie eine Kapazität (Blindleistungsquelle)
- untererregten Betrieb wie eine Induktivität (Blindleistungssenke)

6.16 Erläutern Sie den Begriff „kritische Fehlerklärungszeit“.

Die kritische Fehlerklärungszeit gibt an, wie lange es dauern kann einen Fehler im Netz zu finden, ohne dass der Generator anfängt zu schlüpfen.

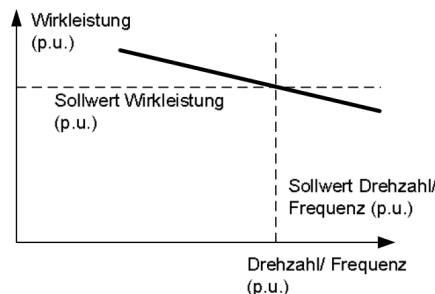
6.17 Erläutern Sie die Begriffe „Drehzahlregelung“, „Leistungsregelung“ und „Leistungs/Drehzahlregelung“.

Das antreibende Turbinenmoment wird vom Turbinenregler geregelt, der unterschiedliche Regelziele verfolgen kann.

- Bei der Leistungsregelung wird die abgegebene Wirkleistung gemessen und mit dem Soll-Wert der Wirkleistung verglichen. Bei einer Abweichung wird das Turbinendrehmoment erhöht. Die Leistungsregelung wird bei kleineren Generatoren verwendet die nicht an der Frequenzregelung des Netzes beteiligt sind.
- Bei der Drehzahlregelung wird die Drehzahl des Generators geregelt. Sie dient zum Regeln der Netzfrequenz durch einzelne große Generatoren.
- Bei der Leistungs/Drehzahlregelung wird die Regelabweichung der Leistung und der Drehzahl über die sog. Statik miteinander verknüpft. Dies geschieht, wenn sich mehrere Generatoren bei der Netzfrequenzregelung beteiligen sollen.

6.18 Erläutern Sie den Begriff „Statik in der Frequenzregelung“.

Die Statik stellt sicher, dass mehrere an der Leistungs-/Frequenzregelung beteiligte Kraftwerke einen gemeinsamen eindeutigen Arbeitspunkt finden, wenn eine Drehzahlabweichung auftritt.



7 Netzführung und Netzregelung

7.1 Beschreiben Sie die Begriffe „Regelblock“ und „Regelzone“.

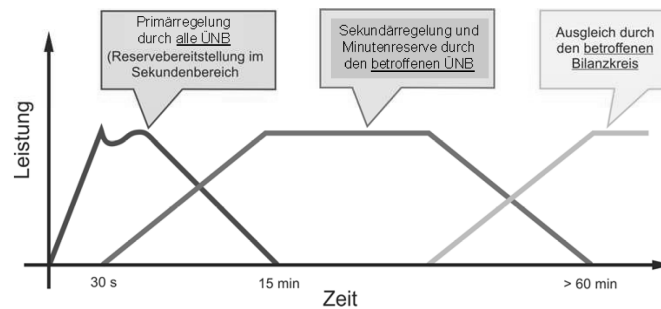
- Die Regelzone ist die kleinste Einheit eines Verbundsystems, die mit einer Frequenz-Leistungs-Regelung ausgerüstet ist. In der Regelzone muss ein bestimmtes primäres Mindestregelvermögen sichergestellt sein. Es muss auch genug Sekundärregelvermögen vorhanden sein um einen Kraftwerksausfall zu kompensieren.
- Mehrere Regelzonen können einen Regelblock bilden. Es gibt nur eine Regelzone in Österreich.

7.2 Beschreiben Sie die Begriffe „Primärregelung“, „Sekundärregelung“ und „Tertiärregelung“. In welchem Zeitrahmen spielen sich die Regelvorgänge ab?

- Die Primärregelung stabilisiert die Systemfrequenz im Falle einer Störung auf einen stationären Wert, jedoch wird die Frequenz nicht ausgeregelt, da der Regler ein reiner Proportionalregler ist. Die Primärregelung ist eine automatische Funktion der Turbinenregler. Die minimale Dauer für die Fähigkeit der Lieferung von Primärregelleistung beträgt 15 Minuten. Alle Übertragungsnetzbetreiber beteiligen sich an der Primärregelung.
- Die Sekundärregelung dient dazu, das Leistungsgleichgewicht in einer Regelzone zu erhalten bzw. wiederherzustellen. Damit ist auch die Einhaltung bzw. Rückführung der Systemfrequenz auf ihren Sollwert (PI-Regler), die Einhaltung bzw. Rückführung der Übertragungsleistungen in benachbarte Regelzonen auf ihre Fahrplanwerte, sowie die Ablösung und Freigabe der aktivierten Primärregelleistung, um diese für weitere Aufgaben wieder vollständig zu

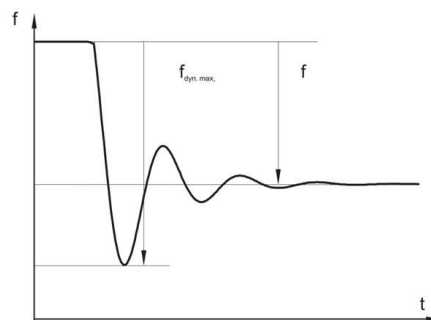
Verfügung zu haben. Sie verläuft kontinuierlich und parallel zur Primärregelung. Sie arbeitet im Zeitbereich von mehreren Minuten, wobei der Regler spätestens nach 30 Sekunden in Aktion treten muss und der Regelvorgang spätestens nach 15 Minuten abgeschlossen sein muss. Es beteiligen sich nur die betroffenen Übertragungsnetzbetreiber.

- Die Tertiärregelung wird hauptsächlich eingesetzt um Sekundärregelreserve in einem balanzierten System wieder freizugeben. Darüber hinaus wird sie aber auch als Ergänzung zur Sekundärregelreserve im Fall größerer Störungen eingesetzt, um die Systemfrequenz zurückzuführen und die systemweit aktivierte Primärregelreserve wieder freizugeben. Sie ist an ein $\frac{1}{4}$ h Zeitraster gebunden. Es dauert ca. 15 Minuten um den Sekundärregelbereich wiederherzustellen, die Tertiärregelung kann jedoch über einen längeren Zeitraum aktiviert bleiben. Es ist der ganze betroffene Bilanzkreis beteiligt bei der Tertiärregelung.



7.3 Beschreiben Sie die Begriffe „dynamische Frequenzabweichung“ und „quasi-stationäre Frequenzabweichung“.

- Die dynamische Frequenzabweichung ist die Momentanabweichung der Netzfrequenz von der Sollfrequenz.
- Die quasi-stationäre Frequenzabweichung bleibt auch nachdem die Primärregelung abgeschlossen ist vorhanden.



7.4 Wozu dient das Netzkennlinienverfahren? Wie funktioniert es?

Das Netzkennlinienverfahren dient dazu, festzustellen ob die Abweichung der Übergabeleistungen an andere Regelzonen durch eine Unausgeglichenheit in der eigenen Regelzone oder durch die Aktivierung von Primärregelleistung zustande kommt. Der Regelzonenfehler G_I wird dabei über

$$G_I = \Delta P_I + K_{RI} \Delta f \quad (1)$$

bestimmt. ΔP_I ist die Änderung der Austauschleistung der Regelzone und $K_{RI} \Delta f$ ist die primär in der Regelzone erzeugte Regelleistung. Falls die primär im Regelblock erzeugte Mehrleistung vollständig exportiert wird, wird die Sekundärregelung in diesem Block nicht aktiviert, da der Kraftwerksausfall in einem anderen Block aufgetreten ist.

8 Deregulierung und Bilanzgruppen

8.1 Welche Systemdienstleistungen kennen Sie?

- **Frequenzhaltung**
Die Frequenzhaltung umfasst die Primär-, Sekundär- und Tertiärregelung der Kraftwerke.
- **Spannungshaltung und Blindleistungsbereitstellung**
Es muss Blindleistung lokal erzeugt werden um das Spannungsband an allen Netzknoten einzuhalten. Außerdem sollen Blindleistungsflüsse über Kuppelknoten zu benachbarten Verbundnetzen gering gehalten werden.
- **Versorgungswiederaufnahme**
Der Übertragungsnetzbetreiber muss in seinem Netz sicherstellen, dass ein rascher Wiederaufbau möglich ist und dass die dafür vorgesehenen Maßnahmen vorbereitet sind.
- **Betriebsführung für den Normalbetrieb und den gestörten Betrieb**
Die Organisation des Strommarktes erfolgt über Bilanzgruppen. Die Marktteilnehmer melden hierzu Fahrpläne an, die im Raster von Viertelstunden die Leistungswerte angeben. Aus den Fahrplänen der einzelnen Bilanzgruppen wird ein Gesamtfahrplan für das österreichische Netz zusammengestellt, woraus sich die Leistungsflüsse zum überlagerten europäischen Übertragungsnetz ergeben. Der Fahrplan wird genau eingehalten, auch dann wenn einzelnen Bilanzgruppen von ihren Fahrplänen abweichen. Dies wird durch einen Netzregler bewerkstelligt. Fahrplanabweichungen werden durch Einspeisen von Energie oder zurückfahren von Kraftwerksleistung ausgeregelt.

8.2 Was ist eine Bilanzgruppe und wie ist sie organisiert?

Bilanzgruppen sind virtuelle Gebilde, die aus unabhängigen Erzeugern und Abnehmern bestehen können. Bilanzgruppen können nur in einer Regelzone gebildet werden.

- Das Bilanzgruppenmitglied teilt den Bilanzgruppenverantwortlichen seinen Fahrplan mit.
- Der Bilanzgruppenverantwortliche erstellt aus den Fahrplänen und geschätzten Profilen einen Gesamtfahrplan. Bei Abweichungen vom Gesamtfahrplan kann der Bilanzgruppenverantwortliche seine Mitglieder zu veränderten Fahrplänen veranlassen oder Regelenergie einkaufen. Geschieht das nicht veranlasst der Regelzonenführer einen Ausgleich über alle Bilanzgruppen.
- Der Bilanzgruppenkoordinator hat die Aufgabe die Bilanzgruppen organisatorisch und abrechnungstechnisch zu verwalten, die Preisbildung für Ausgleichsenergie durchzuführen und die Ausgleichsenergie auf die Bilanzgruppen aufzuschlüsseln. Es gibt nur einen Bilanzgruppenkoordinator pro Regelzone.

8.3 Welchen Zweck erfüllen standardisierte Lastprofile?

Lastprofile dienen dazu, den Verbrauch von Kleinkunden zu schätzen. Es gibt verschiedene Lastprofile für Haushalt und Gewerbe. Mittels der normierten kundenspezifischen Lastprofile sind die Stromhändler in der Lage, die Einspeisefahrpläne ihrer Kundengruppen zu berechnen und die benötigten Leistungen zeitgerecht einspeisen zu lassen.

8.4 Welche Arten von Engpassmanagement kennen Sie?

Ein Engpass ist eine Konstellation bei der z.B. durch den vorhandenen Lastfluss das (n-1)-Kriterium nicht eingehalten werden kann.

- kurzfristiges Engpassmanagement (nicht vorhersehbarer Ausfall von Netzbetriebsmitteln oder nicht geplante Flussverschiebung im Verbundnetz)
 - Ändern der Netzkonfiguration (überlastete Leitungen anders befahren)
 - Eingriffe in die Erzeugerinfrastruktur (Kraftwerke verpflichten ihren Einsatz zu ändern)
 - Eingriffe in die Verbrauchsstruktur (Verbraucher abschalten)
- langfristiges Engpassmanagement (aufgrund der Fahrpläne ist ersichtlich, dass es Engpässe gibt, sie können z.B. durch ungenügend ausgebaute Netze entstehen)
 - First-come-first-served (die Anfragen werden der Reihe nach beantwortet, bis die Übertragungskapazität erschöpft ist)
 - Pro rata (alle Anfragen bekommen anteilmäßig etwas)
 - Auktion (die Kapazität wird versteigert)

8.5 Was versteht man unter Counter-Trading?

Durch Erhöhen der Netztarife an Knoten mit knapper Übertragungskapazität und Erniedrigen an Knoten mit ausreichender Kapazität kann der Kraftwerkseinsatz verändert werden. Der Übertragungsnetzbetreiber verwendet die Differenzen der erhöhten Tarife als Ausgleichszahlung zur Tariferniedrigung an anderen Knoten. Das Verfahren wird als Re-Dispatching bezeichnet, falls es im Netzbereich eines Übertragungsnetzbetreibers angewendet wird. Wenn die Netzgebiete mehrerer Übertragungsnetzbetreiber betroffen sind, wird es als Counter-Trading bezeichnet.

9 Wirtschaftlichkeit in der Energieversorgung

9.1 Aus welchen Bestandteilen setzt sich der Strompreis beim Kunden zusammen?

- Energiepreis (Erzeugungskosten)
- Netzpreis (Übertragung und Verteilung)
- Steuern und sonstige Belastungen

9.2 Welche Methoden der Wirtschaftlichkeitsanalyse kennen Sie?

- Benchmarking
- Kosten- und Gewinnanalyse
- Rentabilitätsvergleich
- Investitionsrechnung

9.3 Beschreiben Sie den Begriff „Benchmarking“.

Beim Benchmarking werden Energiesysteme mit ähnlichen Versorgungsaufgaben miteinander verglichen, z.B. mehrere großstädtische Versorgungsunternehmen oder mehrere ländliche Versorgungsnetze. Dabei werden mehrere Inputfaktoren (z.B. übertragene Jahresenergie im MWh) und Outputfaktoren (z.B. verkaufte kWh pro Mitarbeiter) ausgewählt.

9.4 Beschreiben Sie den Begriff „Kosten-Gewinn-Analyse“.

Es werden Kosten und Einnahmen gegenübergestellt. Kosten bestehen aus festen und variablen Kosten. Die Erlöse sind durch die Netztarife und die übertragene Energie vorgegeben. Der Gewinn ergibt sich als Differenz von Erlösen und Kosten $G(x) = E(x) - K(x)$.

9.5 Beschreiben Sie den Begriff „Rentabilitätsvergleich“.

Hierbei wird die Rendite $r = \frac{G(x)/a}{\text{Kapitaleinsatz}}$ des eingesetzten Kapitals mit der Rendite von anderen Geldanlagen verglichen, somit kann festgestellt werden, ob sich eine Investition lohnt, bzw. das Kapital dort eingesetzt wird, wo es die höchste Rendite abwirft.

9.6 Beschreiben Sie die Begriffe „Barwertmethode“ und „Annuitätenmethode“.

Werden verwendet um die jährlichen Kosten von Investitionen zu bestimmen (Investitionsrechnung).

- Bei der Barwertmethode wird die gesamte Nutzungsdauer einer Investition betrachtet. Der Barwert wird auf einen frei wählbaren Betrachtungszeitraum bezogen, d.h. es werden laufende Kosten und Einnahmen auf diesen Betrachtungszeitpunkt bezogen. (Wieviel Geld bekomme ich wenn ich 20 Jahre lang jedes Jahr einen Euro bekomme und wieviel ist dieses Geld heute wert.) Der Barwert stellt das zum Zeitpunkt der Betrachtung vorhandene Barvermögen dar, das auf einem Bankkonto durch die Zahlungsvorgänge bei dem vorgegebenen Zinsfaktor entstehen würde, daher der Begriff "Barwert". Verschiedene Investitions- und Rückzahlungsvarianten können über den Barwert miteinander verglichen werden. Die Methode stellt eine dynamische Wirtschaftlichkeitsrechnung dar.
- Die Annuitätenmethode stellt die Umkehrung der Barwertmethode dar. Der Kapitalwert wird in gleichbleibende Jahresraten über die Nutzungsdauer umgelegt. Die Annuitätenmethode wird häufig zum wirtschaftlichen Vergleich von Kraftwerkstypen und Netzanlagen eingesetzt.

9.7 Beschreiben Sie den Begriff „Stromgestehungskosten“.

Die Stromgestehungskosten beschreiben wieviel das Erzeugen von 1 kWh Strom kostet.

9.8 Aus welchen Bestandteilen setzen sich die Stromgestehungskosten zusammen?

Aus den leistungsabhängigen und den arbeitsabhängigen Kosten. Die leistungsabhängigen Kosten setzen sich aus den kapitalsabhängigen Leistungskosten und den betriebsabhängigen Leistungskosten im Stillstand. Die arbeitsabhängigen Kosten bestehen aus den Kosten der Primärenergie und den betriebsabhängigen Kosten. Ein Solarkraftwerk hat fast 0 arbeitsabhängige Kosten.

9.9 Was versteht man unter dem kalorischen Kostenäquivalent?

Vergleicht man zwei unterschiedlich effiziente Kraftwerke, so lässt sich eine Volllaststundenzahl berechnen ab der das effizientere (aber teurere) Kraftwerk wirtschaftlicher ist.

9.10 Welches Ziel hat die Kraftwerkseinsatzoptimierung?

Wenn ein Unternehmen verschiedene Kraftwerke zur Auswahl hat um eine gewisse Menge an Energie zu produzieren, versucht es mittels Kraftwerksoptimierung die günstigste Möglichkeit des Kraftwerksmix zu finden und dabei trotzdem den Fahrplan zu erfüllen.