

Habt ihr schon gewusst 252 ... elektrische Energieübertragung

Für unser tägliches Leben ein ganz wesentlicher Bestandteil – ich denke, das zweifelt niemand an. Viele Aspekte sind uns aber eventuell unbekannt, obwohl sie gewissermaßen „direkt vor der Haustüre“ liegen und einen starken Alltagsbezug haben.

In den Physikbildungsstandards steht:

Kompetenz Nr. 09 → Strukturen und Analogien

Die Schülerinnen und Schüler erkennen weitere Strukturen und Analogien und können mit den bisher schon bekannten komplexere Fragestellungen bearbeiten. Inhalte: Energiespeicher, Beschreibung von ... elektrischen ... Energietransporten, Strom, Antrieb (Ursache) und Widerstand

Kompetenz Nr. 10 → Naturerscheinungen und technische Anwendungen

Die Schülerinnen und Schüler können .. wichtige Geräte funktional beschreiben. Sie sind immer mehr in der Lage, physikalische Modelle auch in ihrem Alltag gewinnbringend einzusetzen. Inhalte: Energieversorgung: Kraftwerke und ihre Komponenten (z. B. Generator – auch regenerative Energieversorgung (z. B. Solarzelle, Brennstoffzelle)

Die folgenden Fragen kann man in einer „Hausarbeit“ (über einen größeren Zeitraum) einsetzen ... ODER sie sind Ausgangspunkt einer GFS ... ODER die Quelle für ein Projekt am Ende der Klasse 10, falls die Zeit-Ressourcen das zulassen.

Frage 00 – „Abhängigkeit“

Diskutieren Sie in Ihrem Team, wie stark die „Handlungsfreiheit“ in einem normalen Haushalt eingeschränkt ist, wenn die elektrische Energieversorgung für längere Zeit ausfallen würde? Was funktioniert noch ... Was würde passieren ... Wie könnte man sich behelfen ... Wäre ein „normales Leben“ noch möglich ... Was müsste man unter diesen Umständen ändern ... ?

Frage 01 - Verlustfrage

In einer Veröffentlichung der Energiewerke findet man, dass über das UCTE-Netz (Union of coordination of transmission of electricity), das von Nordafrika über 3000km bis zur russisch/ukrainischen Grenze reicht, 50% der elektrischen Energie für die Industrie und 40% für private Haushalte erzeugt werden. In diesem Netz unterscheidet man verschiedene Spannungsebenen (380kV, 220kV, 110kV, 20kV, 10kV, 230V).

- Ist die Formulierung „Erzeugung“ korrekt?
- Wo bleibt der Rest auf 100%? ¹
- Durch welche Parameter (physikalische Größen) wird die elektrische Energieübertragung bestimmt? Welche dieser Parameter ist im gesamten UCTE-Netz bei allen Generatoren identisch?²

Frage 02 – Frequenz-Frage

- Die aktuelle Frequenz des UCTE-Netzes kann man im Internet unter <http://www.entsoe.eu/operation/thefrequency/> abrufen – siehe z.B. Bild 01

Bild herunterladen

28. Juli 2009 – 19:49:41 Uhr

Deuten Sie dieses Bild. Laden Sie zu verschiedenen Zeiten das Frequenzbild herunter und interpretieren Sie den Verlauf!

- Es wird die Behauptung aufgestellt, dass die Frequenz in diesem UCTE-Netz extrem genau kontrolliert und auf dem Sollwert von 50 Hz gehalten wird. Recherchieren Sie im Internet, welche Maßnahmen im UCTE-Netz vorgesehen sind, um diese Frequenzkonstanz zu gewährleisten!³
- Messen Sie mit dem Xplorer-GLX die Frequenz im UCTE-Netz über einen längeren Zeitraum. Welche Schwankungen können Sie feststellen?

¹ 7% gehen bei der Übertragung längs der Hochspannungsnetze verloren – der Rest steckt in „sonstigen Verlusten“.

² So erstaunlich das klingen mag, alle Generatoren laufen mit gleicher Frequenz von 50Hz in Phase zueinander. Die Stromstärken variieren selbstverständlich abhängig von der elektrischen Energiestromstärke, die sie in das UCTE-Netz liefern.

³ Bei 49,8 Hz erfolgt Stufe 1: Personalalarm; bei 49Hz werden 10-15% der angeschlossenen Verbraucher vom Netz genommen (d.h. bei diesen Netzkunden fällt die Versorgung mit elektrischer Energie aus!); bei der Unterschreitung von 48,7 Hz fliegen weitere 10-15% der Kunden vom Netz!, bei 48,4 Hz werden weitere 10-15% der Netzkunden abgeschaltet ... bei 47,5 Hz werden alle Kraftwerke vom Netz genommen. Das ist eine Sicherheitsmaßnahme, um die Eigenversorgung des Kraftwerks zu gewährleisten!

Frage 03 – Black Out

Ein großflächiger Ausfall der elektrischen Energieversorgung wird als „black out“ bezeichnet. Ein spektakulärer Fall für einen „black out“ erfolgte 2003 in den USA. Für Wartungsarbeiten wurde eines der großen Kraftwerke vom Netz genommen. Durch Defekte fielen 3 weitere Kraftwerke aus und mussten ebenfalls vom Netz getrennt werden. Zwei Hochspannungsleitungen (eines durch Feuer, ein anderes aus nicht bekannten Gründen) fielen aus und die elektrische Energie musste auf andere Leitungen „umgeleitet“ werden. Die Folge dieser Umleitung war die Überlastung dieser Leitungen, die dann durch Sicherheitsabschaltungen ebenfalls vom Netz getrennt wurden. Eine Kettenreaktion führte nacheinander zur Sicherheitsabschaltung der Übertragungsstrassen und den damit verbundenen Kraftwerken. Das Hochfahren der Kraftwerke im Verbund miteinander dauerte 2 Tage.

Ein „kleinerer black out“ stellte sich 2003 in Italien ein. Die italienischen Kraftwerke produzieren nicht genügend elektrische Energie für den Eigenbedarf – Italien ist daher auf Zulieferung elektrischer Energie (25%) über eine Alpenstrasse aus den angrenzenden Nachbarländern angewiesen. Als eine der Alpenstrassen ausfällt, führt die Überlastung der „Parallelleitungen“, die den Energiebedarf „ersatzweise“ hätten übernehmen sollen zur Sicherheitsabschaltung dieser Leitungen. Eine Überlastungs-Kettenreaktion der Übertragungsleitungen nach Italien führte dazu, dass Italien vom UCTE-Netz genommen werden musste. Da die italienischen Kraftwerke aber den elektrischen Energiebedarf im eigenen Land nicht decken konnten, brach die elektrische Energieversorgung für mehrere Stunden zusammen.

- Wie muss man sich diese „Kettenreaktion“ vorstellen. Warum gibt es keine „schnell wirksame Maßnahmen“, um diese Kettenreaktion zu verhindern?
- Recherchieren Sie weitere „black outs“!

Frage 04 – Primär-Regelung

- Wie kann man im Kraftwerk an den Parametern der Generatoren feststellen, dass der elektrische Energiebedarf im Netz ansteigt ... wenn sich also immer mehr Verbraucher zuschalten. Wie ändert sich dabei der Widerstand der Summe der Verbraucher und wie wirkt sich das auf die Generatoren der angeschlossenen Kraftwerke aus?⁴
- Was passiert, wenn die Turbine, die einen Generator antreibt, ausfällt und der Generator nicht vom Netz genommen wird?
- Wie wirkt sich eine Abschaltung von „Verbrauchern“ auf die Generatoren aus. Welche Rolle spielt hierbei die Generatorenmasse?⁵
- Die so genannte Primärregelung überwacht die Frequenz der Generatoren und regelt diese Frequenz durch die Manipulation der Leistungsabgabe an den Turbinen. Jedes Kraftwerk muss 2% seiner Nennleistung innerhalb von 30 Sekunden zusätzlich ans Netz bringen können. Jedes Kraftwerk muss diese zusätzliche Leistung 15 Minuten lang aufbringen können. Wie muss man sich das vorstellen? Mit welchen Maßnahmen können die Kraftwerke diese Forderung erfüllen?⁶

Frage 04 – Sekundär-Regelung

Regelkraftwerke übernehmen die Regelung, wenn die Zeitspanne für die Primär-Regelung abgelaufen ist und der auftretende Energiebedarf immer noch besteht. Diese Regelkraftwerke sind so ausgelegt, dass sie 5 – 15% der Standardleistung des Netzabschnittes übernehmen können. Diese Regelkraftwerke starten in wenigen Minuten und sind nach 15 Minuten voll am Netz.

- Welche Kraftwerke können als Regelkraftwerke in dieser kurzen Zeitspanne ans Netz gebracht werden?⁷
- Können z.B. Kohlekraftwerke oder Kernkraftwerke die Aufgabe eines Regelkraftwerks übernehmen? Wäre es sinnvoll, Wasserkraftwerke für diesen Zweck einzusetzen?⁸
- Welche Maßnahmen können ergriffen werden, wenn auf Verbraucherseite die Geräte abgeschaltet werden und damit plötzlich ein Überangebot an elektrischer Energie besteht?⁹

⁴ Wenn immer mehr Verbraucher an das Netz gehen, sinkt quasi der angeschlossene Widerstand. Die Stromstärke steigt und die Frequenz der Generatoren sinkt.

⁵ Wenn Verbraucher abgeschaltet werden, steigt der angeschlossene Widerstand, die Stromstärke sinkt und die Generatoren erhöhen ihre Rotationsfrequenz – die Generatoren werden gewissermaßen beschleunigt – also wirkt die Rotationsmasse der Generatoren im ersten Moment gewissermaßen als ausgleichender Puffer.

⁶ Innerhalb der verlangten Zeitspanne kann man z.B. die Energiestromstärke auf die Turbinen erhöhen ... also dürfen im „Standardbetrieb“ die Kraftwerke nicht an der Obergrenze der maximal möglichen Energiestromstärke laufen.

⁷ Regelkraftwerke können Gasturbinen, Pumpspeicherkraftwerke sein

⁸ Die Anlaufzeiten von Kohle- oder Kernkraftwerken ist viel zu lange, um innerhalb der vorgeschriebenen Regelzeiten reagieren zu können. Wasserkraftwerke könnte man im Prinzip dazu verwenden – es wäre aber unwirtschaftlich.

⁹ In diesem Fall werden die Turbinen bei den Pumpspeicherkraftwerken in den „Pumpbetrieb“ geschaltet ... und die Signalrundsteueranlagen der Energieversorger schalten durch einen Regelimpuls – z.B. im Winter – Nachtspeicheröfen ans Netz.

Frage 05 – Spannungsfrage

Im bisherigen Text haben wir gesehen, dass die Frequenz in einem erstaunlich engen Bereich stabil gehalten wird.

- Welche Spannungsvarianz treten im Netz auf. Messen Sie mit dem Spannungssensor des XplorerGLX die Spannungsschwankungen über einen größeren Zeitraum hinweg. Achten Sie hierbei auf die Sicherheit im Umgang mit Netzspannungen und folgen Sie unbedingt den Anweisungen Ihres Physiklehrers – bzw. Physiklehrerin!
- Unter welchen Bedingungen treten größere Schwankungen auf – diskutieren Sie den Fall, eines Haushaltes in der City im Gegensatz zu einem abgelegenen Bauernhof!
- Recherchieren Sie im Internet, welche Spannungsschwankungen üblicherweise von den Netzbetreibern toleriert werden.¹⁰
- Welche Auswirkungen hat die Spannungsschwankung auf verschiedene Haushaltsgeräte?

Frage 06 – Leitungsfrage

Aus dem Physikunterricht ist sicher bekannt, dass an jedem elektrischen Widerstand eine Potenzialdifferenz auftritt, wenn ein elektrischer Strom durch den Widerstand fließt.

- Von welchen Parametern (physikalischen Größen) hängt der ohmsche Widerstand eines Drahtes der Länge l mit dem Querschnitt A aus dem Material „Kupfer“ ab?
- Bei der Übertragung elektrischer Energie soll ein maximaler Spannungsabfall von 23 Volt nicht überschritten werden. Wie lange darf man dann das verwendete Kabel (Querschnittsfläche $2,5\text{mm}^2$, spezifischer Widerstand von Kupfer $\rho=17,8\cdot 10^{-3}\ \Omega\cdot\text{mm}^2/\text{m}$) machen, wenn das Kabel mit einer normalen Haushaltssicherung (16A) abgesichert ist. Wie ändern sich das Ergebnis, wenn man einem Draht aus Aluminium verwendet?
- Können Sie sich erklären, warum in den USA fast vor jedem Haus ein „Transformator“ steht? Warum ist die dortige Versorgung mit elektrischer Energie anders als bei uns organisiert?
- Eine Übertragungsstrecke in Amerika soll bei einer Länge von 1 km eine Energiestromstärke von 1 kW bei einer Spannung von 110V übertragen. Die Energieübertragung erfolgt durch ein Kupferkabel mit dem Querschnitt von $250\ \text{mm}^2$ ($\rho_{\text{Kupfer bei } 20^\circ\text{C}}=0,017\ \Omega\cdot\text{mm}^2/\text{m}$).
- Wie ändern sich die Verluste, wenn man die Spannung – wie in Europa üblich – auf 230V erhöht und die gleichen Kabel verwendet?
- Welche Verluste stellen sich längs der Übertragungsstrecke ein, wenn man den Querschnitt des Kabels verdoppelt?

Frage 07 – Durchhangs-Frage

In der Technik der Überlandleitungen spricht man vom so genannten „Durchhang“ d der Überlandleitungen. Unter der Feldlänge versteht man den Abstand zwischen zwei Masten (Aufhängepunkten).

- Ein typisches Kabel bei einer 110kV Trasse trägt die Bezeichnung Al/St 185/30 – das bedeutet: Das Seil besteht aus einem Stahlkern (aus mehrere Stahlseile) mit einem Gesamtquerschnitt von $30\ \text{mm}^2$ und einem Alumantel (aus mehrere Aluminiumseilen) mit einem Gesamtquerschnitt von $180\ \text{mm}^2$
- Der Längenausdehnungskoeffizient bei diesem Seil beträgt $\alpha = 18,9 \cdot 10^{-6} \cdot 1/\text{K}$

Fragen

- Warum müsste man im Winter erwarten, dass das Kabel nicht so weit durchhängt wie im Sommer? Haben Sie diesen Effekt schon beobachtet?
- Was versteht man unter dem Längenausdehnungskoeffizient? Welche Formel „steckt“ dahinter?
- Von welchen Randbedingungen, anderen physikalischen Größen hängt der Durchhang d eines Seiles ab? ¹¹
- In den technischen Unterlagen der E-Werke findet man folgenden Erfahrungswert: Bei einer Feldlänge von 350 m und einer Durchschnittstemperatur von 10°C ergibt sich ein Durchhang d zwischen 10m und 15m. Bei einer Feldlänge l von 100m ergibt sich ein Durchhang von nur 2m. Erläutern Sie diesen Zusammenhang.
- In den technischen Unterlagen findet man eine weitere Abschätzung: Bei einer Temperaturänderung von 10K erwartet man bei einer Feldlänge von 400m eine Änderung des Durchhanges um 4%. Bei einer Feldlänge von 200m erwartet man eine Änderung des Durchhanges um 9%. Bei einer

¹⁰ Eine Schwankung von +/- 10% ist zulässig – kommt aber extrem selten vor!

¹¹ d ist eine Funktion des **Seilalters** (in den ersten beiden Jahren nimmt der Durchhang durch die Gewichtskraft um etwa 0,5 m bei einer Feldlänge von 350m zu ... anschließend folgt die geringere Kriechdehnung ...) ... eine Funktion des **Materials** ... eine Funktion der **Feldlänge** l , eine Funktion der **Erwärmung** (also von der Temperatur der umgeben den **Luft**, der **Sonneneinstrahlung**, der **Windstärke** und der Erwärmung durch die **Stromstärke im Kabel**).

Feldlänge von 100m steigt die Änderung des Durchhanges auf 21% ... Wie kann man sich das erklären, dass die Änderung des Durchhanges bei näher beieinander stehenden Masten zunimmt?

- Es gibt unterschiedliche „Wärme-Transportmechanismen“, die Sie aus dem Unterricht kennen. Welche dieser Mechanismen ist möglich ... und welche spielen eine große Rolle bei der „Kabeltechnik“ der Überlandleitungen? ¹²

Im Normalfall rechnen die Betreiber von Überlandleitungen mit einer durchschnittlichen Windgeschwindigkeit von 0,6m/s und einer Durchschnittstemperatur von 10°C.

Die Kabel dürfen maximal bis zu einer Temperatur von 80°C erhitzt werden. Ab dieser Temperatur würde das Fett, das im Kabel zwischen den einzelnen Seilen einen Korrosionsschutz darstellt, flüssig werden.

Bei 0°C erreicht das 110kV-Kabel bei einer Stromstärke von 700A diese kritische Temperatur von 80°C. Bei einer sommerlichen Temperatur von 35°C dürfen die Kabel nur bis 520A belastet werden.

Steigt die Windgeschwindigkeit von 0,6m/s auf 12m/s, könnte man die Maximalstromstärke auf 220% erhöhen, ohne dass die Kabel die kritische Temperatur überschreiten.

- Die E-Werke rechnen bei Feldlängen von 200 bis 400 m mit → „Änderung des Durchhangs ist 3cm pro Kelvin“. Welche Formel steckt hinter dieser Formulierung?¹³
- Warum kann man die Kabel in Norddeutschland um 20% höher belasten als die Kabel in Süddeutschland?
- Kann man behaupten, dass der Durchhang des Kabels im Sommer immer größer ist als der Durchhang im Winter? Kann man den Durchhang überhaupt beobachten?
- Berechne die Änderung des Durchhanges Δd bei folgenden drei Fällen:
 - (A) Feldlänge = 350m | Durchhang bei 10°C ist 14m | die Temperatur steigt auf 20°C an.¹⁴
 - (B) gleiche Feldlänge | die Temperatur ändert sich von - 20° (kalter Wintertag) auf + 35°C (Sonneneinstrahlung).¹⁵
 - (C) gleiche Feldlänge | die Stromstärke im Kabel wird von 80A auf 670A hochgefahren, die Temperatur steigt dabei von 20°C auf 80°C an.¹⁶

Frage 08 - Blindleistung

- Was versteht man unter „Blindleistung“, „Wirkleistung“ und „Scheinleistung“?
- Durch welche Maßnahmen treten „Blindleistungen“ auf?¹⁷
- Warum sitzt im Keller der Schule eine Station, mit der man den Phasenwinkel der Wechselspannung überwacht? Welche Maßnahmen müssen wirken, wenn im Schulhaus alle Leuchtstoffröhren angeschaltet werden? ¹⁸
- Welche Form von Blindleistung erzeugen Hochspannungsleitungen – welche Form von Blindleistung tritt bei der Übertragung in Erdkabel auf? ¹⁹

Frage 09 – Gleichspannungs-Überland-Leitungen

Man unterscheidet Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungsleitungen (HGÜ-Leitungen). Die Technik in diesem Sektor existiert seit den 50er-Jahren. Man unterscheidet hierbei die VSC-Technik (voltage sourced converter) von der CSC-Technik (current sourced converter).

Die VSC-Technik erlaubt die Übertragung von 1100 MW in Erd- oder Seekabeln mit einer Übertragungsspannung von 300kV. Höhere Energiestromstärken bei höheren Übertragungsspannungen lässt die Spannungsfestigkeit (Isolationsgrenzen) der Kabel nicht zu.

Die CSC-Technik erlaubt eine maximale Energiestromstärke von 6400 MW. Die Verluste bei den Umrichtern liegen allerdings höher als bei der VSC-Technik (3-4%).

- Recherchieren Sie, welche Technik hinter diesen beiden Begriffen steckt?
- Welche „Geräte“ spielen bei Gleichstromübertragung eine ganz wesentliche Rolle?

¹² Konvektion durch den Wind spielt die größte Rolle ... Wärmestrahlung spielt eine geringere Rolle ... Wärmeleitung durch die Luft spielt kaum eine Rolle,

¹³ $\Delta d = 3\text{cm/K} \cdot \Delta T$

¹⁴ $\Delta d = 0,3\text{m}$

¹⁵ $\Delta d = 1,5\text{m}$

¹⁶ $\Delta d = 1,8\text{m}$

¹⁷ z.B. erzeugt die Drossel in einer Leuchtstoffröhre eine Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung und damit einen Blindstrom. Bei normalen Haushaltsleuchtstoffröhren wird diese Phasenverschiebung durch einen Kondensator wieder ausgeglichen.

¹⁸ Da die Kondensatoren gerne „auslaufen“, d.h. defekt werden, baut man in Schulen gerne Leuchtstofflampen ein, die keinen Kompensationskondensator haben – diese Kondensatoren sitzen im Keller der Schule. Ein Phasenmesser zeigt dem Hausmeister, wenn er Kondensatoren zuschalten muss, damit kein Blindstrom auftritt.

¹⁹ Hochspannungsleitungen wirken wie Induktivitäten – sie erzeugen also einen so genannten „induktiven Blindstrom“. Erdkabel wirken durch die hierbei auftretende Kapazität und führen zu einem „kapazitiven Blindstrom“.

- Warum kann man mit der VSC-Technik bei einer Spannung von 300 kV die Energiestromstärke nicht durch Erhöhung der elektrischen Stromstärke verdoppeln? Das müsste doch bei gleichen Isolationseigenschaften der Kabel möglich sein?²⁰
- Das Wasserkraftwerk Itaipu (Paraguay) überträgt seit 1987 auf einer Strecke von 800 km eine Energiestromstärke von 6400 MW nach Brasilien. Recherchieren Sie die hierbei eingesetzte Technik!

Frage 10 - Verlustfrage

- Welche Verluste treten bei einem Gleichspannungsnetz auf? ²¹
- Welche Verluste findet man bei einem Wechselspannungsnetz? ²²
- Was versteht man unter einer Elmsfeuer? Laden Sie einen Film unter „<http://www.youtube.com>“ zur Koronarentladung herunter ... präsentieren Sie diesen Film im Rahmen Ihres Referats.
- Was versteht man unter der so genannten Koronarentladung – wie kann man sie sich in einem einfachen Bild erklären? Siehe „wikipedia.org/wiki/corona_discharge“!
- Planen, organisieren und führen Sie ein Experiment zur Koronarentladung durch!
- Welches Phänomen kann man unter Hochspannungsleitungen – vor allem bei großer Luftfeuchtigkeit feststellen?
- Welche elektrischen Feldstärken treten unter einer Hochspannungsleitung auf?
- Legen Sie an eine feine Nadel, die in Richtung einer Kerzenflamme zeigt, eine Hochspannung an. (a) Was erwarten Sie? (b) Was können Sie beobachten? (c) Wie können Sie es erklären?

Frage 11 – Windfrage

- Welche unterschiedlichen Winde findet man auf unserer Erde?²³
- Zeigen Sie, dass die Energiestromstärke in einem Luftpaket mit dem Radius r und der Windgeschwindigkeit v nach der folgenden Formel berechnet werden kann: $P = \pi/2 \cdot \rho \cdot r^2 \cdot v^3 \dots$ ²⁴
- Warum kann man bei einem Windkraftwerk nicht die ganze Bewegungsenergie nutzen, die der Wind mitbringt? Recherchiere den Wirkungsgrad ... gibt es eine höhere Nutzung als 50%?
- Recherchiere im Internet, was man unter dem so genannten Leistungsbeiwert c_p versteht! ²⁵
- Von welchen physikalischen Größen hängt dieser Beiwert ab? ²⁶

Frage 12 – Solarfrage

- In der Sahara trifft eine Sonnenenergie von 2000kWh pro Jahr auf jeden Quadratmeter. Wir nehmen einen Wirkungsgrad von 15% an. Welche Fläche ist dann notwendig, um den elektrischen Energiebedarf Europas zu decken, wenn er bei $3 \cdot 10^{15}$ Wh (3000 TWh) pro Jahr beträgt?²⁷
- Welche Stromstärke wäre nötig, um eine Leistung von 35GW bei einer Übertragungsspannung von 1,6 MV zu übertragen?
- Welche Drahtquerschnittsfläche wäre notwendig, um bei einer Übertragungsstrecke von 2000km und einer Spannung von 1,6 MV nur 7% der anvisierten 35 GW auf dem Übertragungsweg mit einem Aluminiumkabel ($\rho=0,027 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$) - bzw. mit einem Kupferkabel ($\rho=0,017 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$) - zu verlieren? Welchen Vor- bzw. Nachteil bieten Aluminiumkabel im Vergleich zu Kupferkabel. Warum überträgt man diese elektrische Energie nicht mit Glasfaserkabel?

²⁰ ... die Verluste steigen mit der Stromstärke im Quadrat!

²¹ in einem DC-Netz haben wir ohmsche Verlust, Umrichterverluste und Koronarentladung ... Koronarentladungen liegen bei 380kV-Netze je nach Witterung im Bereich von 2-3kW pro Kilometer Übertragungsstrecke.

²² in einem AC-Netz haben wir die obigen Verluste ... zusätzlich induktive und kapazitive Blindströme ... Abstrahlung von elektromagnetischen Wellen,

²³ **See-Land-Wind** ... tagsüber erwärmt sich das Land schneller als das Wasser – also Wind vom Meer in Richtung Land ... nachts kühlt das Land schneller ab als das Meer – also Wind vom Land in Richtung Meer
Berggipfel-Tal-Winde wehen vom Tal zum Gipfel, weil die Täler auf die Erwärmung durch die Sonne langsamer reagieren und daher kühler sind als der Gipfel ...
Wirbelstürme ... Taifune, Orkane, Zyklone, Hurrikane – also **Wirbelstürme** in verschiedenen Bereichen der Erde ... Antrieb ist das warme Meerwasser – Corioliskräfte führen zur Rotation ...
 Passatwinde ... heiße tropische Luft und kalte Polarluft ... Tief- und Hochdruckgebiete ...
 Lokale Wirbelstürme ... Tornados

²⁴ Aus dem Ansatz für die kinetische Energie und der Definition der Dichte folgt die gesuchte Formel

²⁵ $c_p = P\text{-Rotoraufnahme} / P\text{-Wind gesamt} \dots$

²⁶ der Leistungsbeiwert einer Windkraftanlage ist eine Funktion der Drehzahl des Rotors, dem Anstellwinkel der Rotorblätter)

²⁷ 10^{10} m^2