

Vorlesung 2:

Einführung in die regenerativen Energien (EE) – WS21

Vorlesung 2: Bereitstellung elektrischer Energie

Prof. Dr. Frerk Haase

Fakultät: Technik und Informatik

Email: frerk.haase@haw-hamburg.de

Büro: Berliner Tor - Raum 03.85)

Inhalt der Vorlesung

Einführung in die regenerativen Energien



Wirtschaftlichkeit und Ökologie

(Energiegestehungskosten, das EEG in Deutschland, ökologische Betrachtungen)

Photovoltaik

Solarzelle

Aufbau und Funktionsprinzip, Arten, elektr. Beschreibung, PV-Module)

PV-Generatoren

(Aufbau, Belastung, Gleichstromsteller, Wechselrichter/Netzeinspeisung, Anlagenkonzepte, -güte)

Grundlagen der Solarstrahlung

(Fusionsreaktor Sonne, Solarstrahlung auf der Erde(Neigung, Nachführung, Abschattung))

Bereitstellung elektrischer Energie

(Elektr. Energieversorgungssystem in Deutschland, Energiewandlung/Kraftwerke(konventionell, regenerativ))

Einführung

(Grundaufgaben, Begriffsbestimmungen, Energiebedarf und dessen Deckung, Energieträger und deren Bewertung)

2 Bereitstellung elektrischer Energie

1 Einführung

2 Bereitstellung elektrischer Energie

3 Grundlagen der Solarstrahlung

4 Photovoltaik

5 Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit und Ökologie

2 Bereitstellung elektrischer Energie

2 Bereitstellung elektrischer Energie

2.1 Elektrisches Energieversorgungssystem in Deutschland

2.2 Energiewandlung, Kraftwerke

2.2.1 Konventionelle thermische Kraftwerke

2.2.2 Kernkraftwerke

2.2.3 Gasturbinenkraftwerke

2.2.4 Wasserkraftwerke

2.2.5 Windenergieanlagen (WEA)

2.2.6 Photovoltaik-Anlagen (PV)

2.2.7 Biomasse-Kraftwerke

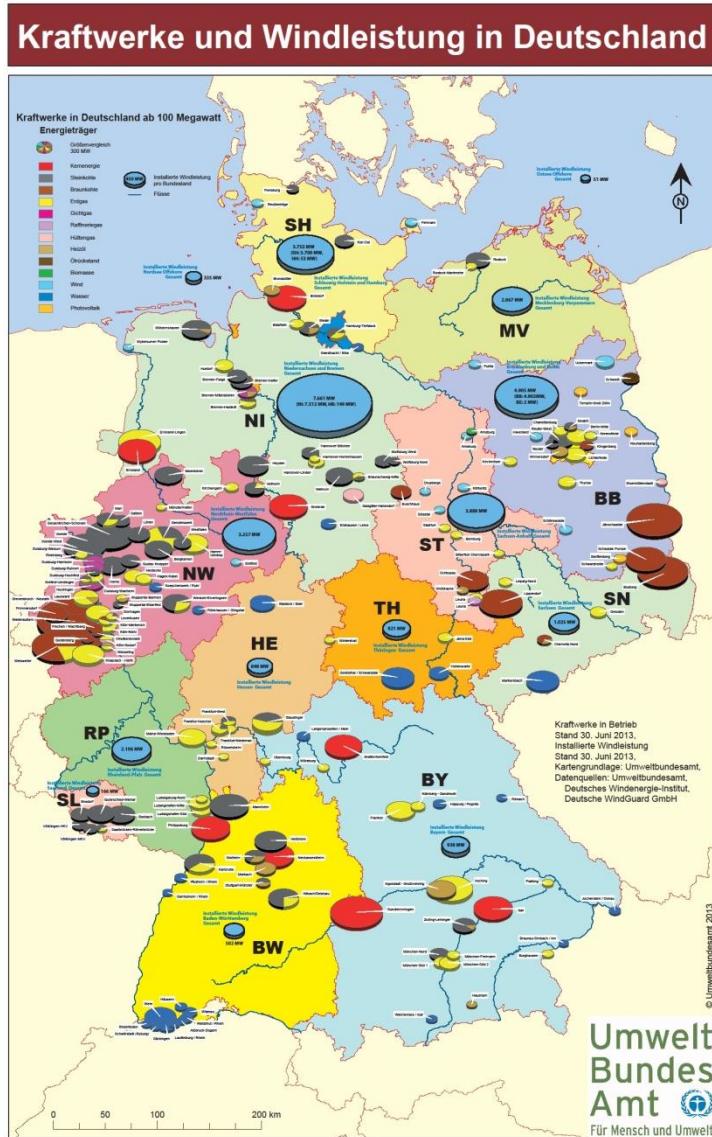
Elektrisches Energieversorgungssystem in Deutschland

Strom-Mix



Quelle: M. Igel, Elektrische Energieversorgung, HTW Saarland, 2011

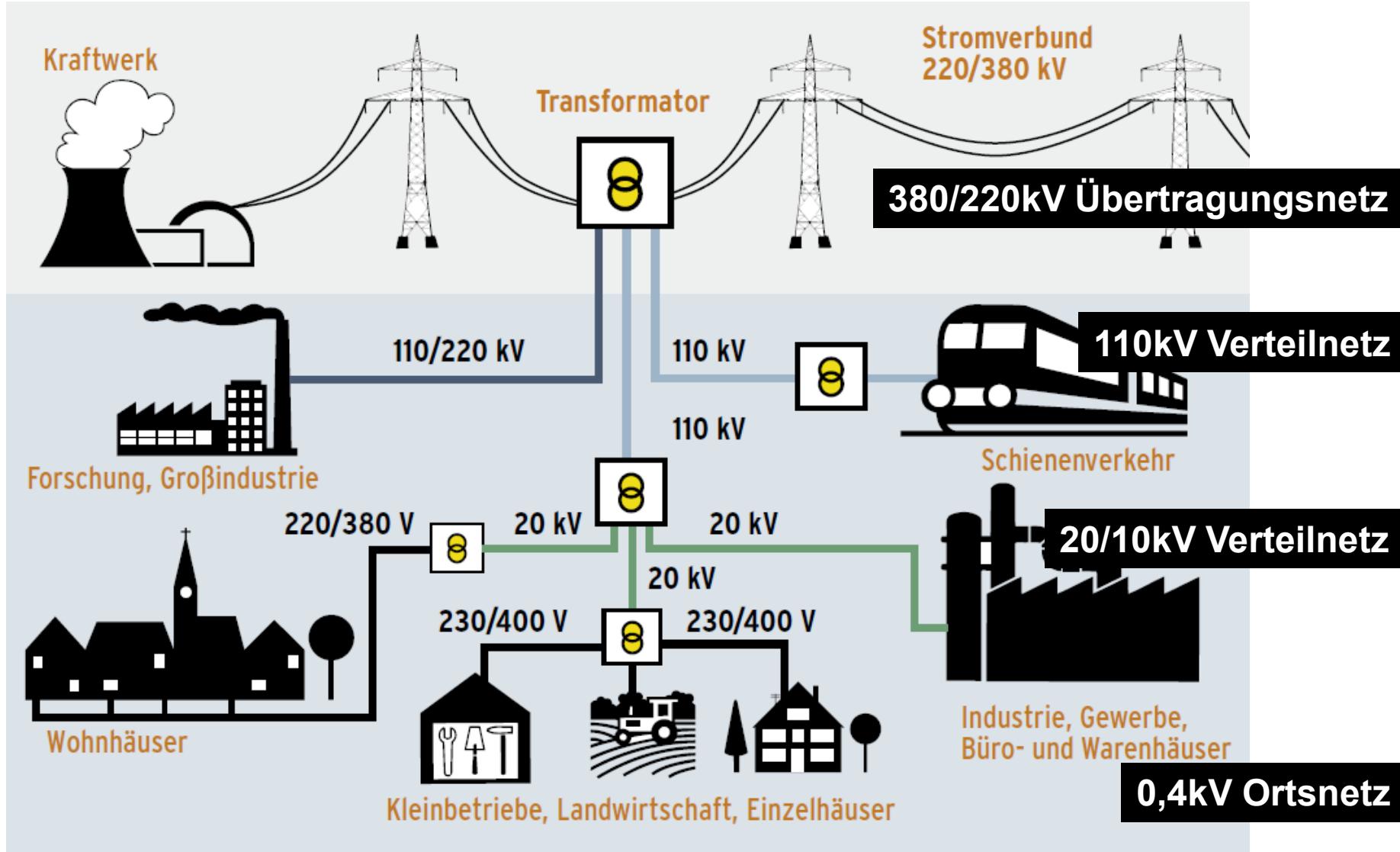
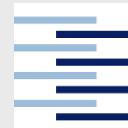
Kraftwerke >100 MW Leistung



Quelle: Umweltbundesamt, 2013 // VDE, 2012

Energieversorgungssystem in Deutschland

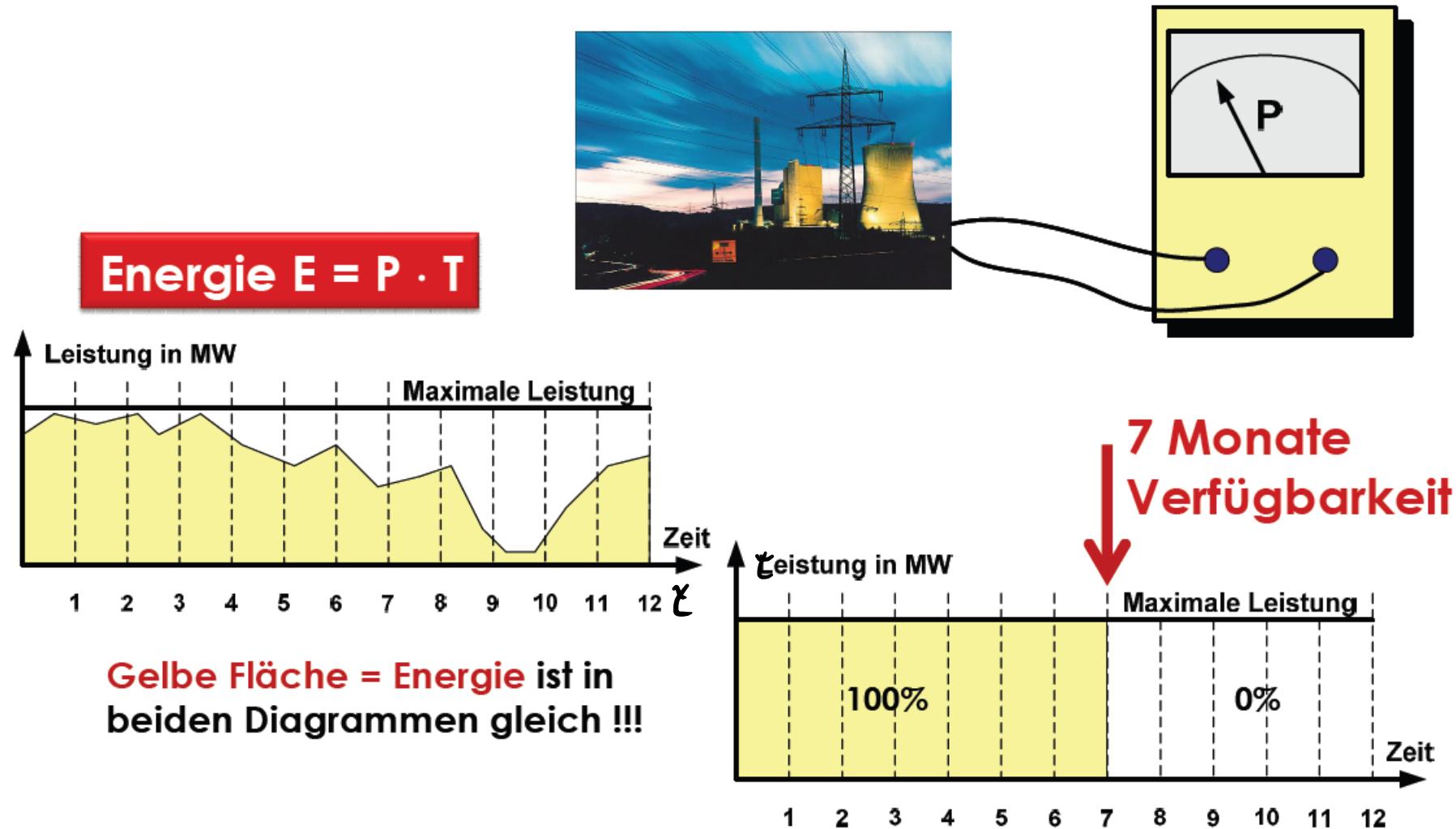
Netze zur Stromversorgung



Quelle: BMU, in Anlehnung an Verband der Netzbetreiber (VDN), 2005

EE – Einführung in die regenerativen Energien – WS22 – Vo2

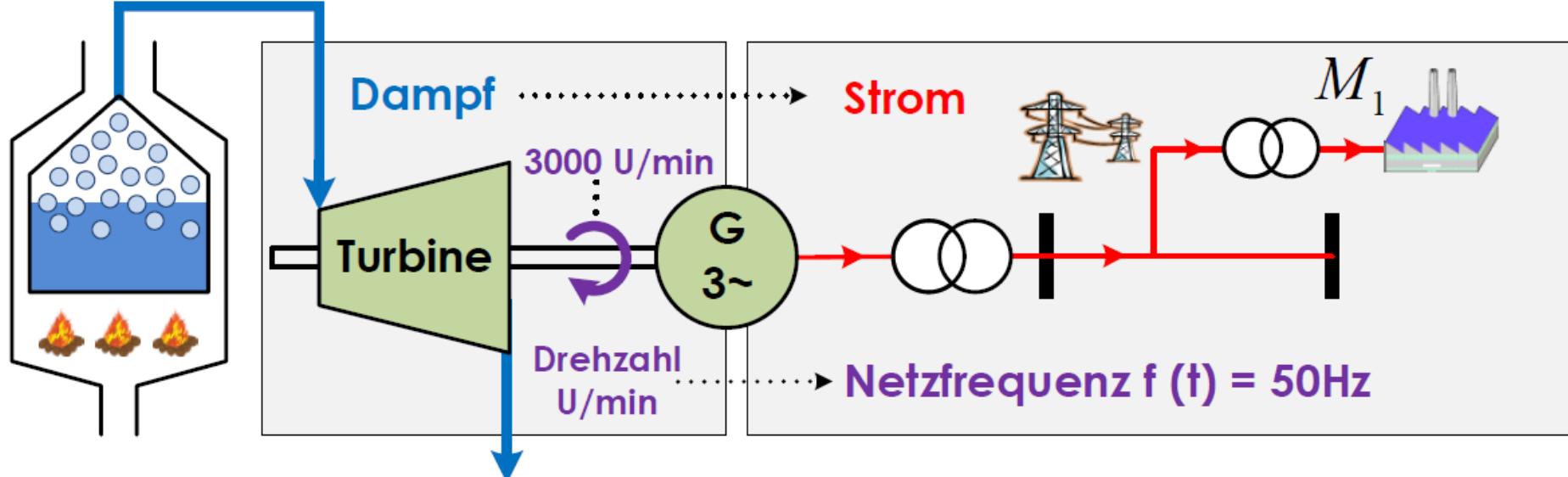
Verfügbarkeit eines Kraftwerks



Quelle: M. Igel, Elektrische Energieversorgung, HTW Saarland, 2011

Verfügbarkeit eines Kraftwerks

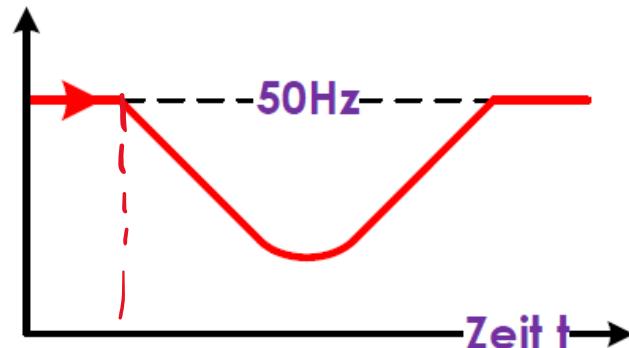
Wer sagt dem Kraftwerk, dass wir Strom brauchen ?



Gleichgewicht der Drehmomente

- Wirkleistung $P = M \cdot 2\pi f$
- Turbine $T = \text{Antrieb}$; Generator $G = \text{Bremse}$

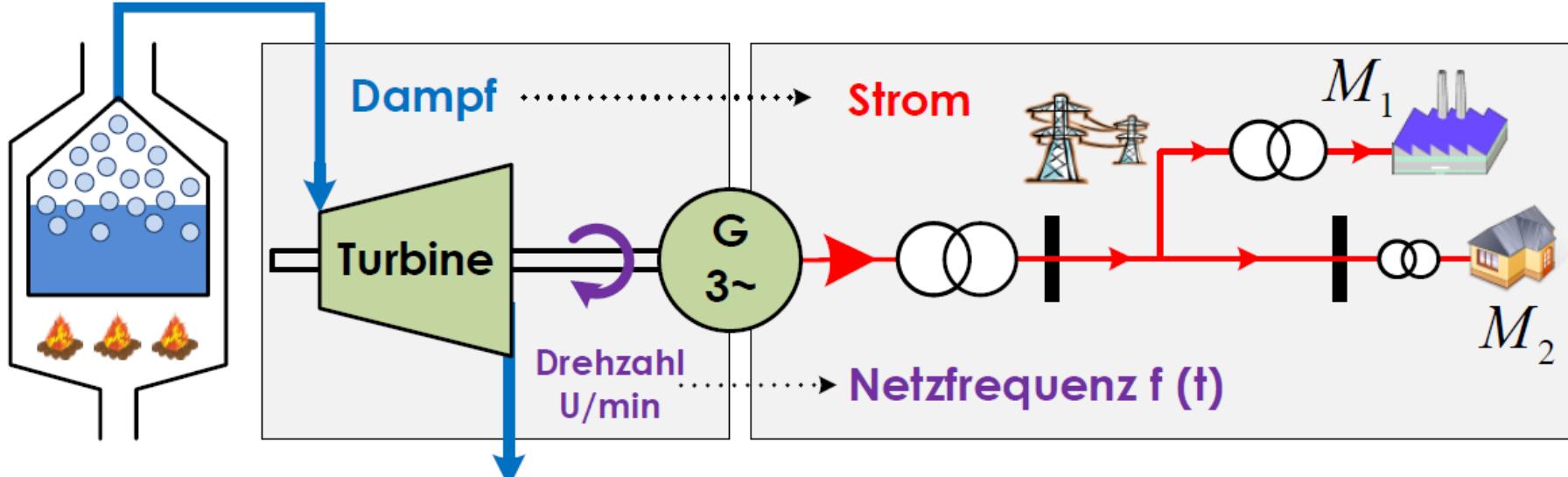
$$M_T = M_G \Rightarrow f_N = 50\text{Hz} = \text{konst.}$$



Quelle: M. Igel, Elektrische Energieversorgung, HTW Saarland, 2011

Verfügbarkeit eines Kraftwerks

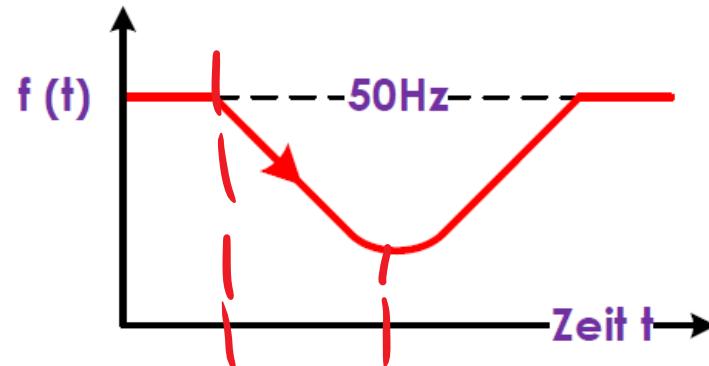
Wer sagt dem Kraftwerk, dass wir Strom brauchen ?



Zusätzliche Last erhöht das Bremsmoment am Generator

- Last wirkt wie eine zusätzliche Bremse
- Drehzahl und Netzfrequenz sinken

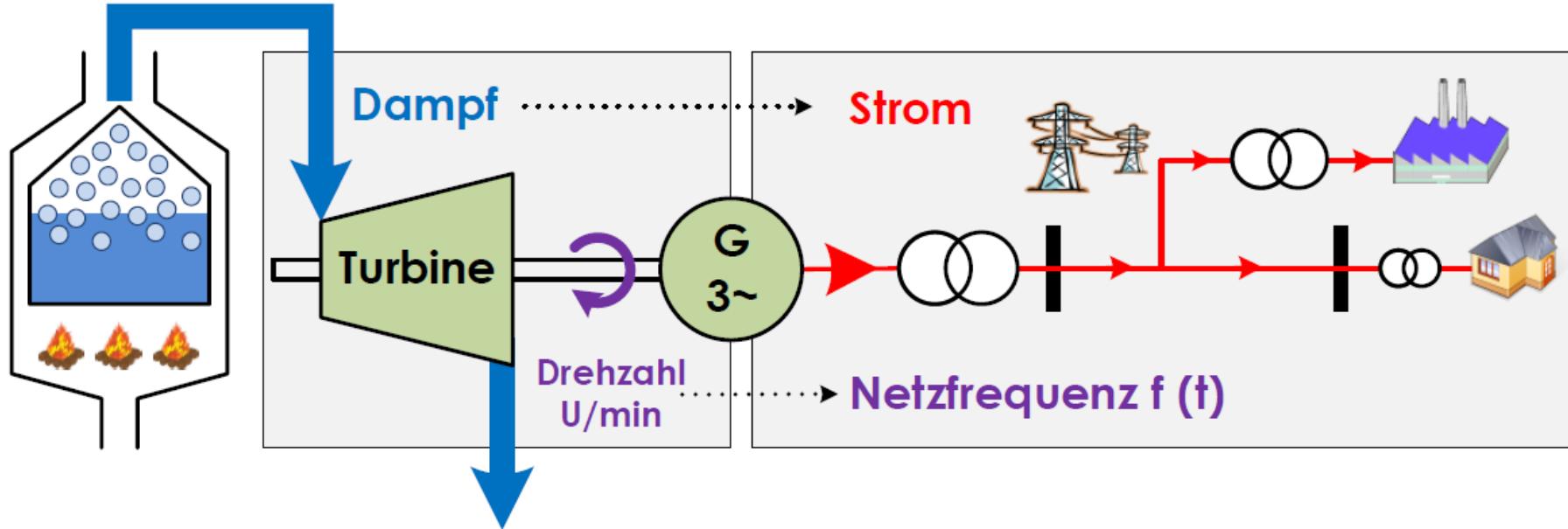
$$M_T < M_G \Rightarrow f_N \downarrow$$



Quelle: M. Igel, Elektrische Energieversorgung, HTW Saarland, 2011

Verfügbarkeit eines Kraftwerks

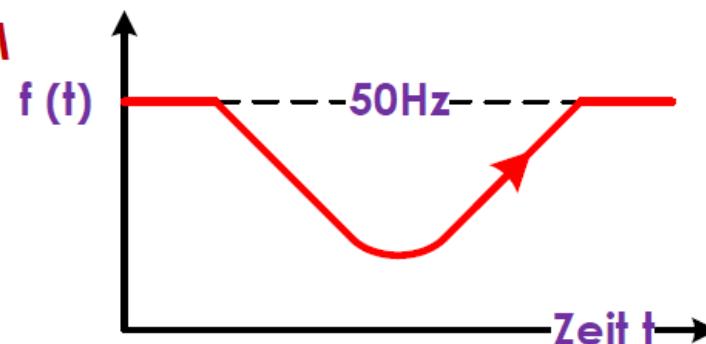
Wer sagt dem Kraftwerk, dass wir Strom brauchen ?



Drehzahlregler erhöht (Dampf)Antrieb ΔM

- Drehzahl und Netzfrequenz steigen

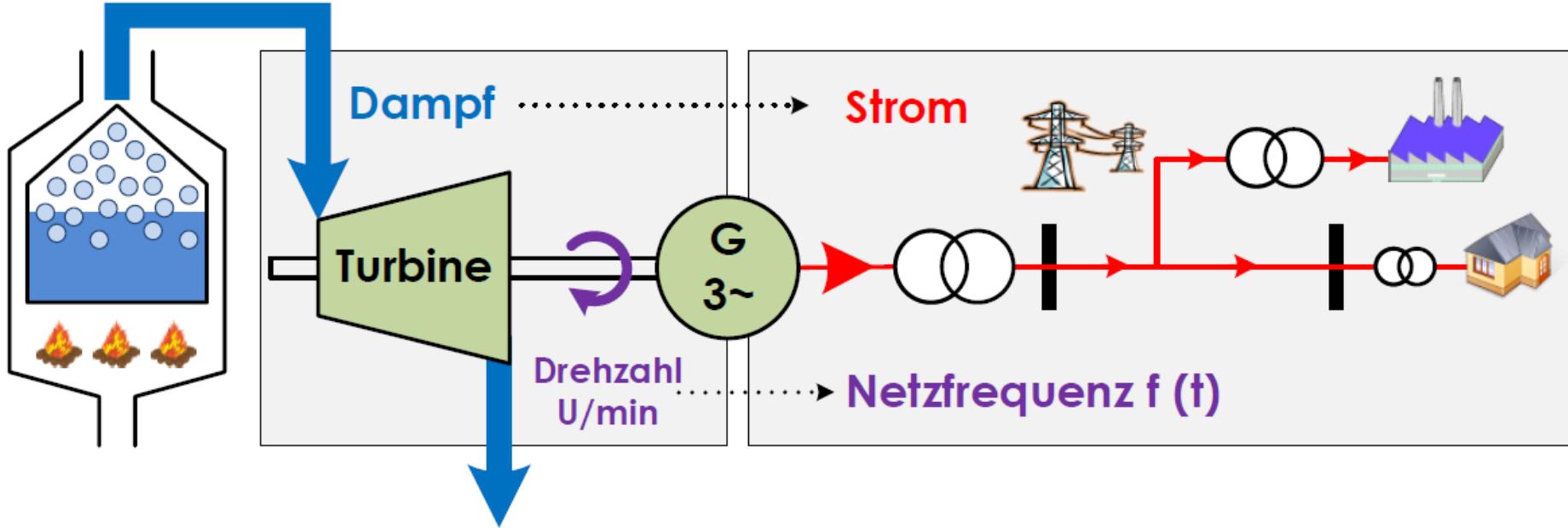
$$M_T + \Delta M < M_G \Rightarrow f \uparrow$$



Quelle: M. Igel, Elektrische Energieversorgung, HTW Saarland, 2011

Verfügbarkeit eines Kraftwerks

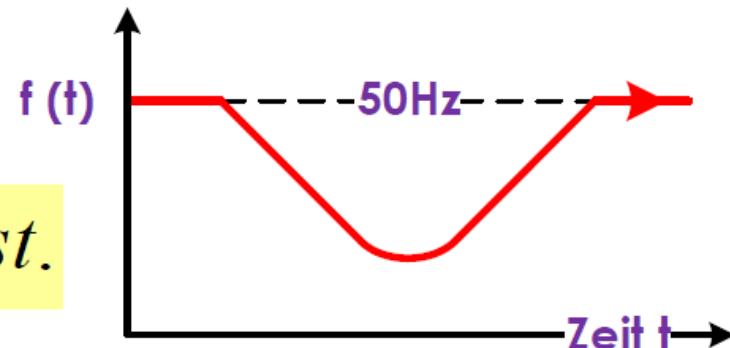
→ Netzfrequenz – Kommunikation mit den Kraftwerken in Echtzeit !!!



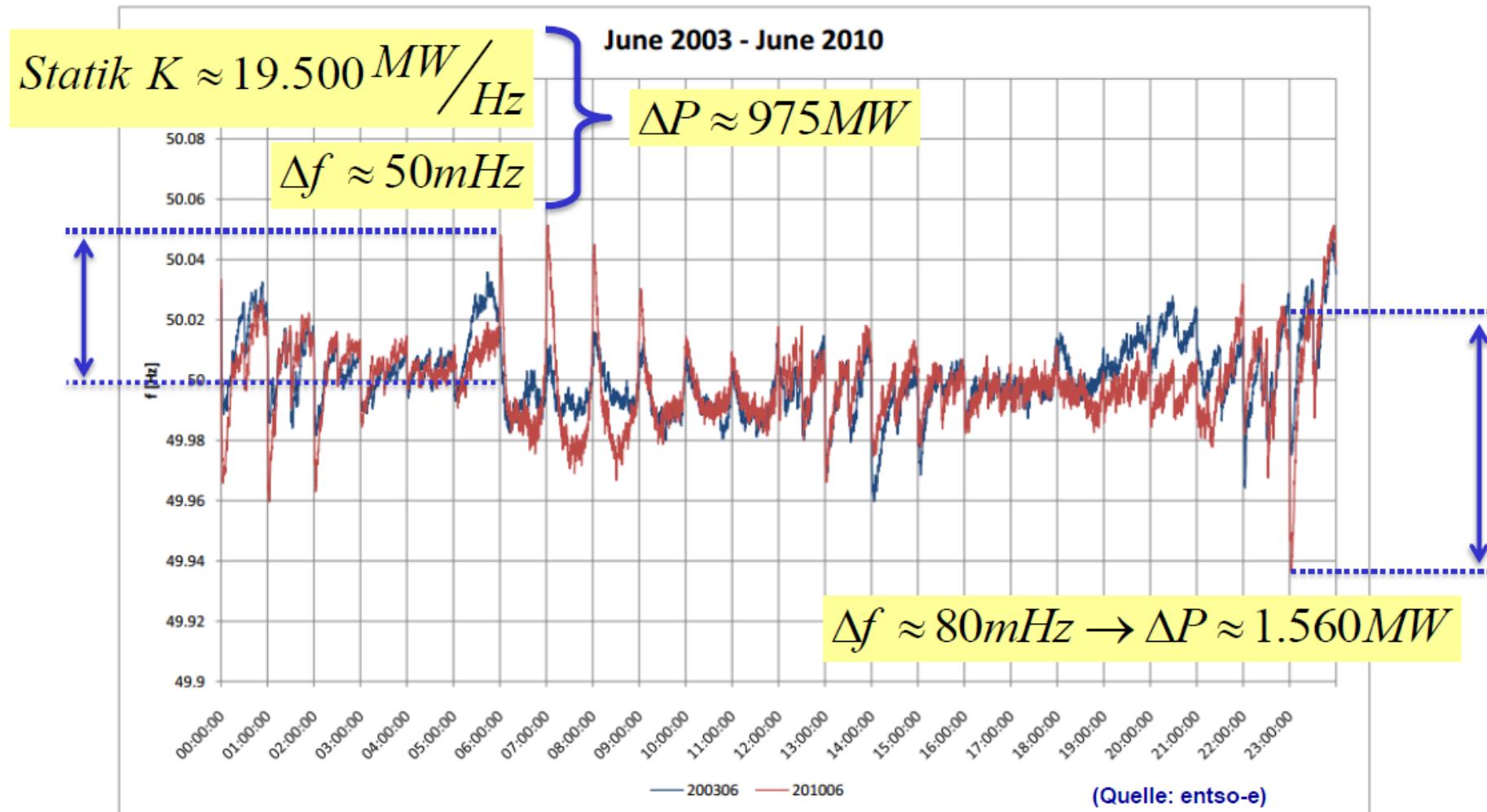
Drehzahlregler erreicht 3000 U/min

- Netzfrequenz 50Hz wieder erreicht

$$M_T = M_G \Rightarrow f_N = 50\text{Hz} = \text{konst.}$$



Quelle: M. Igel, Elektrische Energieversorgung, HTW Saarland, 2011



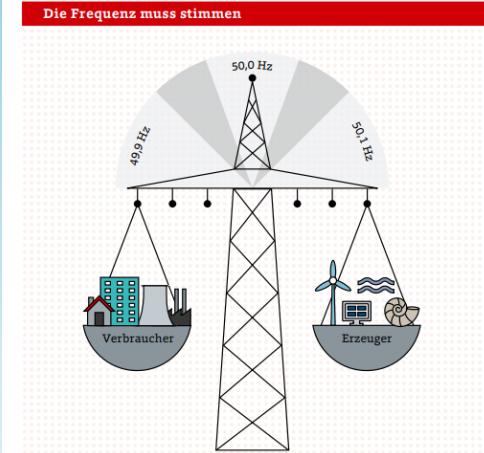
Frequenzregelung = Leistungsregelung

Netzregelung

<https://www.electricitymap.org/map>



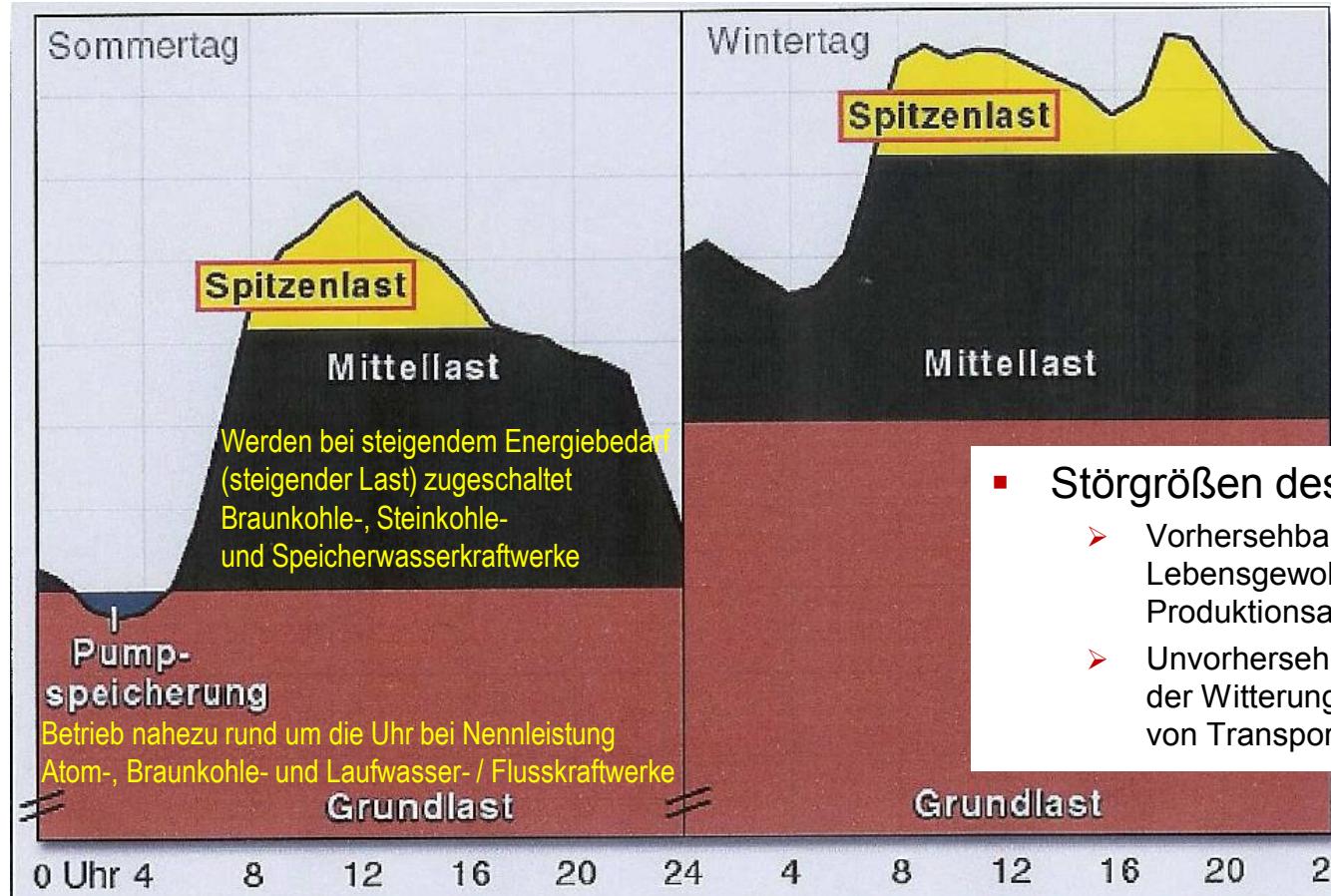
<https://www.netzfrequenzmessung.de/>



Lastgänge für Sommer- und Wintertage

Kraftwerkstypen (konventionell)

Zur Deckung der Lastspitzen
Kurze Anfahrzeiten (wenige Minuten)
Gas-, Öl-, Speicherwasser-
und Pumpspeicherkraftwerke



- Störgrößen des Gleichgewichtszustandes:
 - Vorhersehbare Einflüsse: z.B. Tages- und Jahreszeiten, Lebensgewohnheiten der Bevölkerung, Produktionsabläufe der Wirtschaft
 - Unvorhersehbare Einflüsse: z.B. plötzliche Änderung der Witterung, Ausfälle von Kraftwerkseinheiten, Ausfall von Transportnetzen

- Da elektrische Energie nicht in nennenswertem Umfang speicherfähig ist, ist eine stetige Anpassung des Energieangebots (verfügbare Kraftwerke) an den Energiebedarf erforderlich
→ intelligente Netzbetriebsführung und – Regelung

Lastgänge für Sommer- und Wintertage

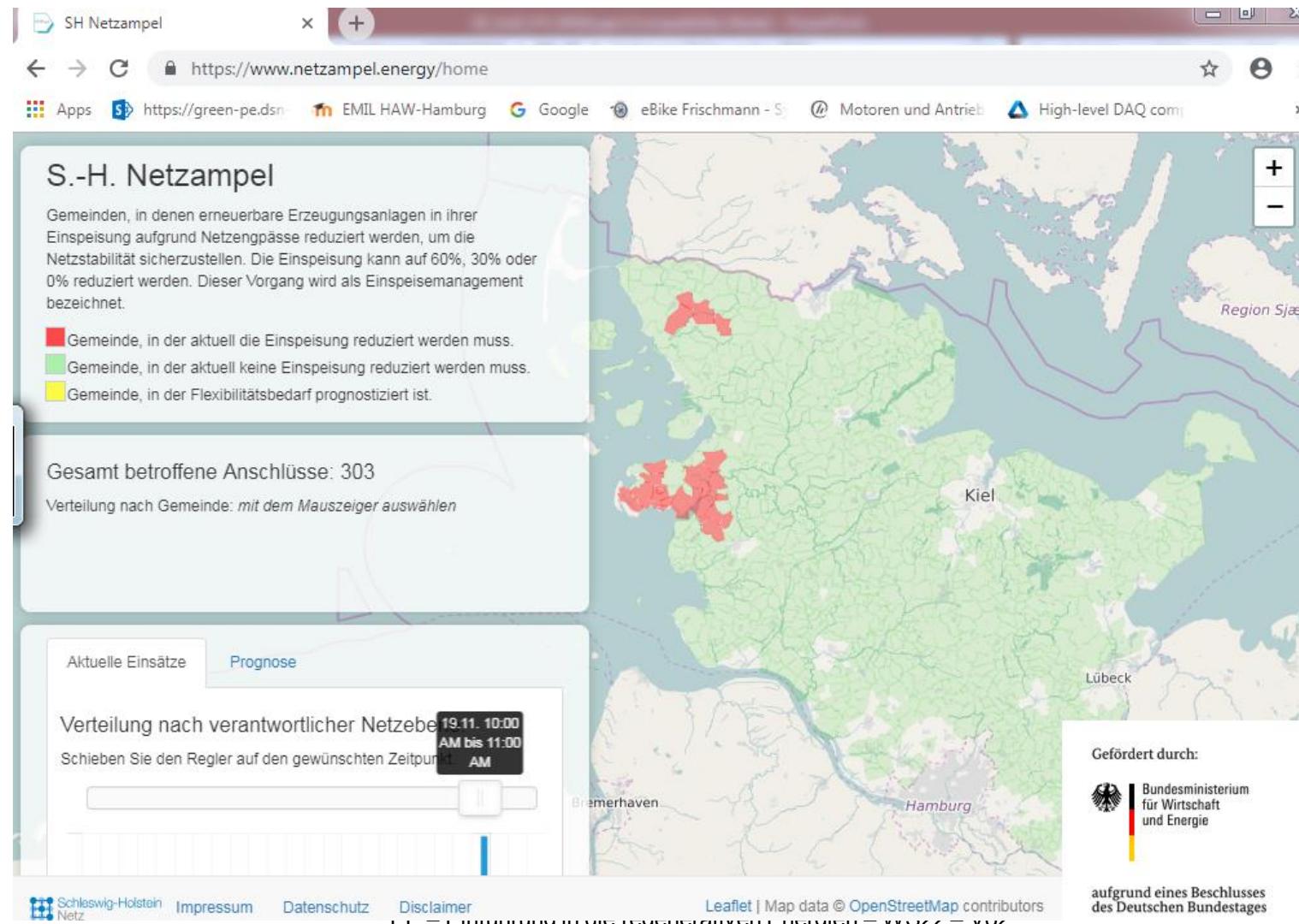
Kraftwerkstypen (konventionell)



Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg

Hamburg University of Applied Sciences

<https://www.netzampel.energy/home>



Kraftwerkstypen (konventionell)

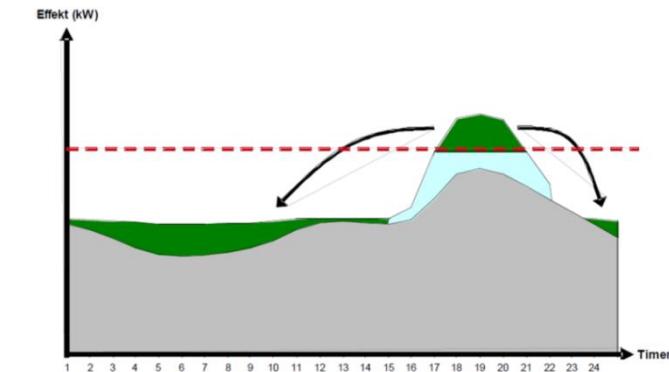
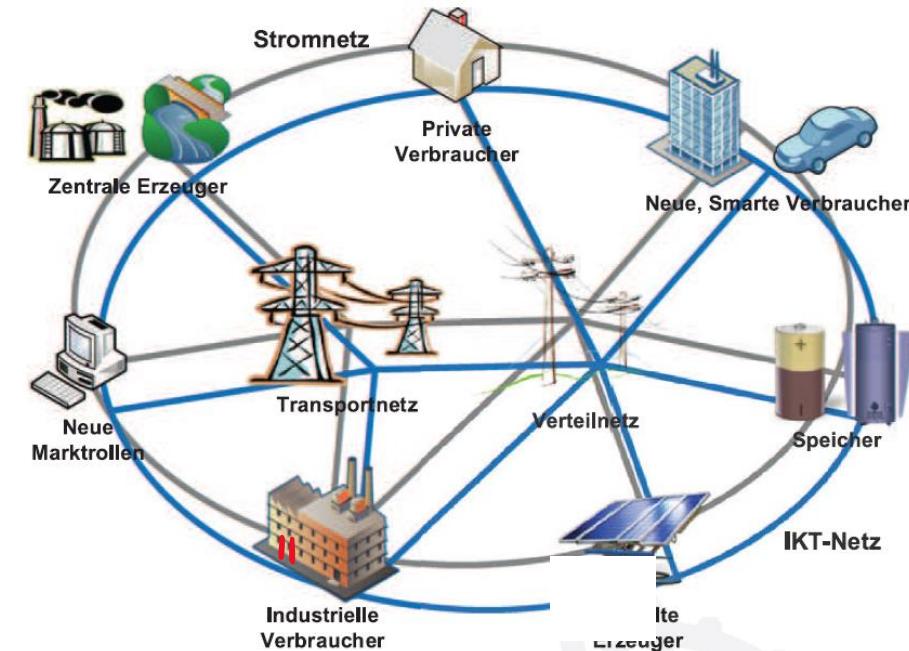
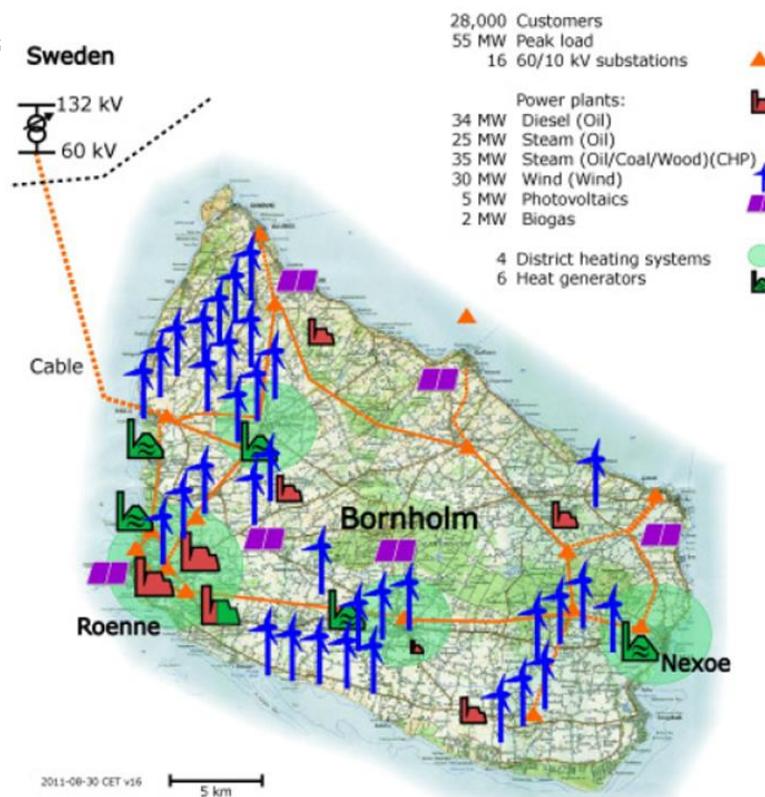
- Grundlastkraftwerke:
 - Betrieb nahezu rund um die Uhr bei Nennleistung
 - Atom-, Braunkohle- und Laufwasser- / Flusskraftwerke

- Mittellastkraftwerke:
 - Werden bei steigendem Energiebedarf (steigender Last) zugeschaltet
 - Braunkohle-, Steinkohle- und Speicherwasserkraftwerke

- Spitzenlastkraftwerke:
 - Zur Deckung der Lastspitzen
 - Kurze Anfahrzeiten (wenige Minuten)
 - Gas-, Öl-, Speicherwasser- und Pumpspeicherkraftwerke

Steuerungstechnik bei zukünftigen Energiesystemen: „Smart-Grids“

Ein „Insel-System“
- Smart Grid-
Bornholm



- Ein zukünftigen Energiesystemen – EcoGrid EU:
- Ziel ist es die HV Leitung nach Schweden zu „kappen“
- Kunden sollen Energieverbrauch (Lasten) flexibilisieren
- Solche flexible Lasten sind u. a. Heizungen
- Ein „Real Time Market Price“ sollen helfen das Netz weiter zu stabilisieren

2 Bereitstellung elektrischer Energie

2 Bereitstellung elektrischer Energie

2.1 Elektrisches Energieversorgungssystem in Deutschland

2.2 Energiewandlung, Kraftwerke

2.2.1 Konventionelle thermische Kraftwerke

2.2.2 Kernkraftwerke

2.2.3 Gasturbinenkraftwerke

2.2.4 Wasserkraftwerke

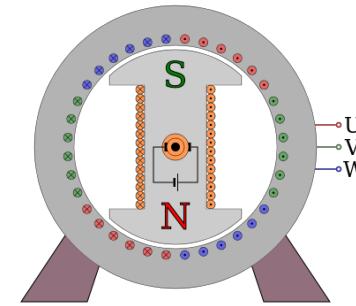
2.2.5 Windenergieanlagen (WEA)

2.2.6 Photovoltaik-Anlagen (PV)

2.2.7 Biomasse-Kraftwerke

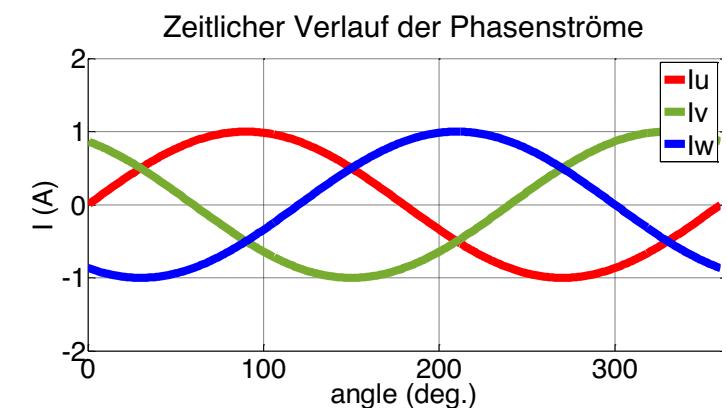
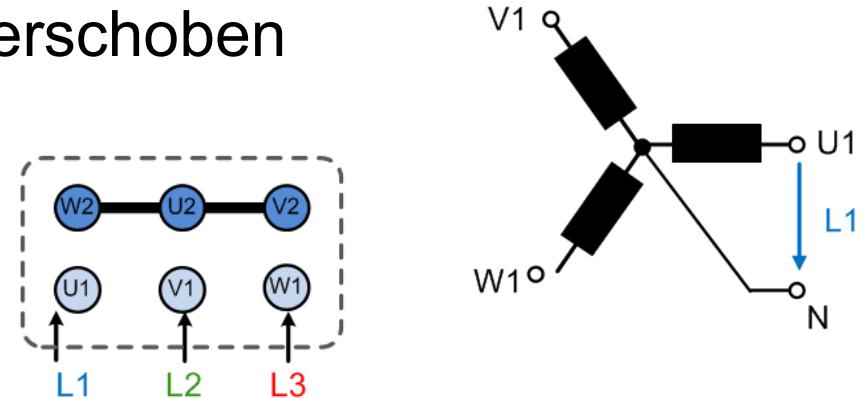
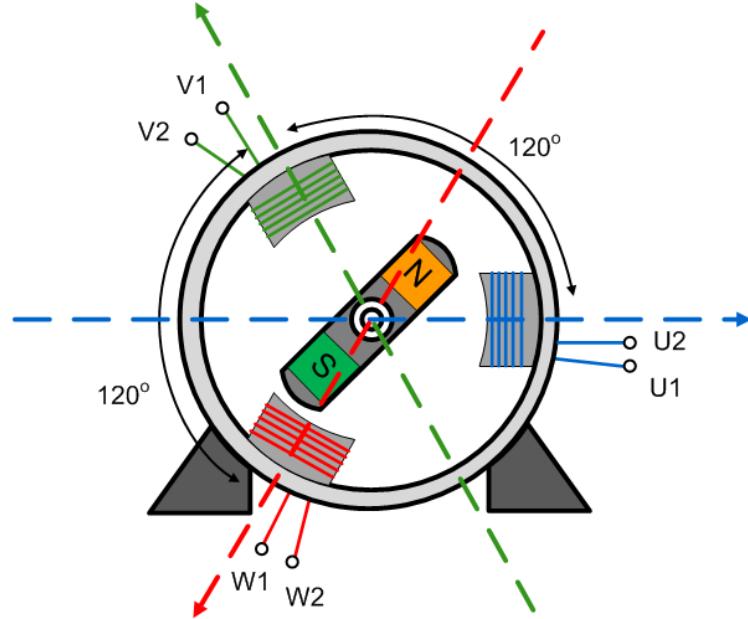
Konventionelle thermische Kraftwerke

- Der größte Teil der benötigten elektrischen Energie wird heute durch Umwandlung in thermischen Kraftwerken gewonnen:
 - fossilen Energieträger (Kohle, Öl, Gas) oder
 - nuklearen Energieträger (Uran)
- Anschließend Wandlung der thermischen Energie in elektrische Energie in Synchrongeneratoren
- Merkmale:
 - Kohle oder Öl als Brennstoff
 - Thermodynamischer Kreisprozess mit Wasserdampf als Arbeitsmedium
 - Grundlastkraftwerk, in D mit Braunkohlebefeuерung, z.B. 900 MW Block in Niederaußem (netto)
 - Mittellastkraftwerk, in D mit Steinkohlebefeuерung, z.B. 676 MW Block in Scholven (netto)
 - Elektrischer Wirkungsgrad 35...45 % (ohne Kraft-Wärme-Kopplung)
 - Gesamtleistung Fossil-thermischer Kraftwerke in D: ca. 70,8 GW
im Betrieb befindlicher Kernkraftwerke in D: ca. 12,7 GW



Umwandlung Mech- in El. Energie:

- Ein Elektromotor mit 3 magnetischen Achsen – Drehstrommotor
- Jede magnetische Achse ist räumlich um 120° verschoben
- Prinzip:

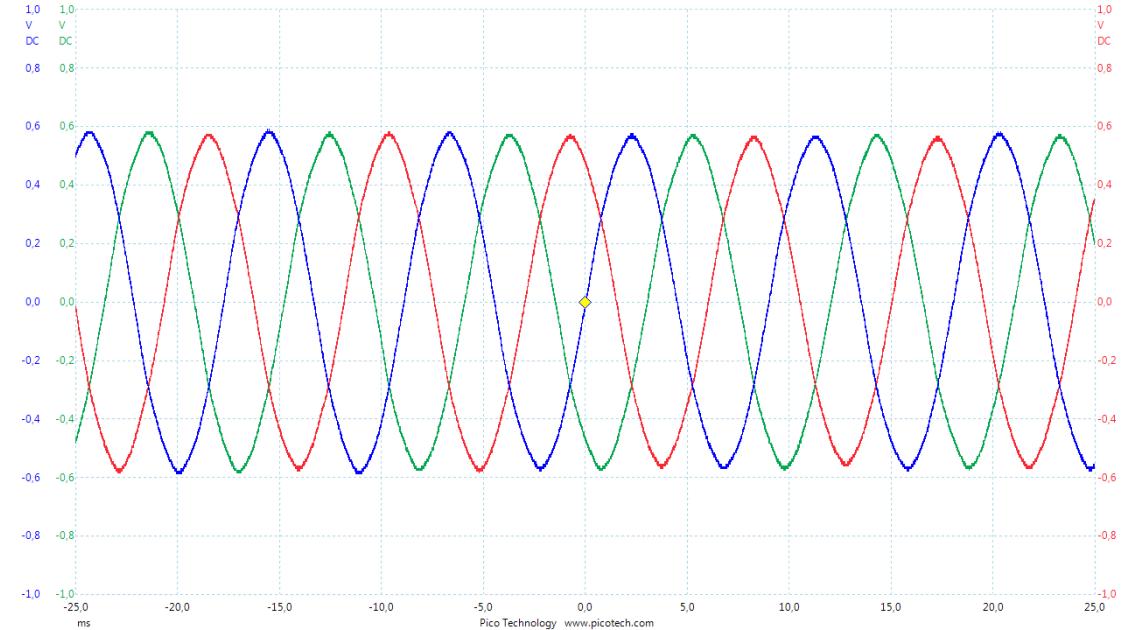
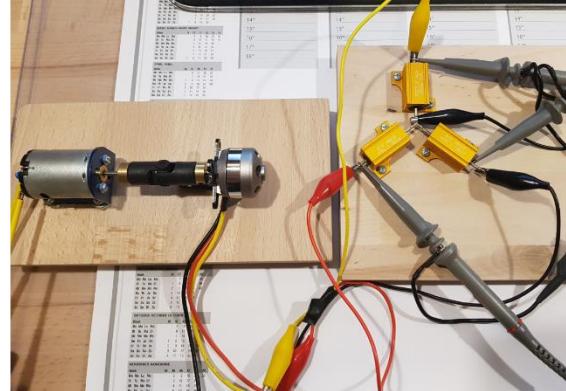
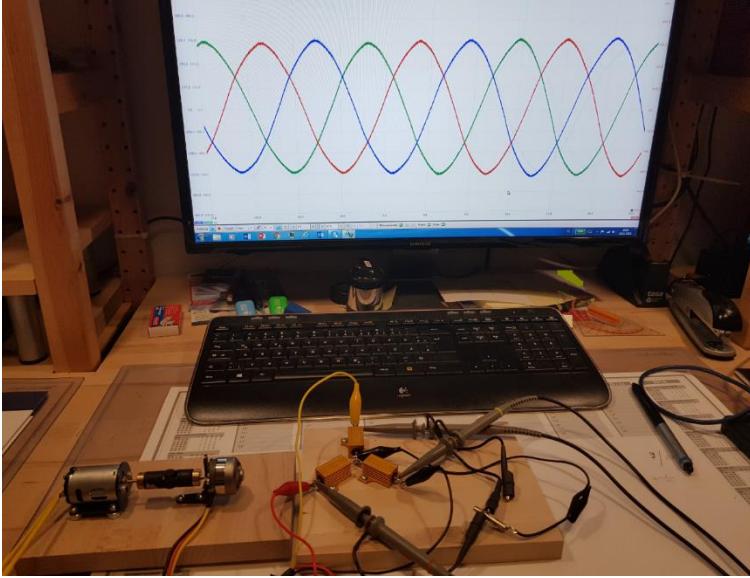


Wird jeder Elektromagnet einer mag. Achse an eine Sinusspannungsquelle angeschlossen die untereinander um 120° Phasenverschoben sind und einen um 120° verschoben Strom zur Folge haben = Die Achse mit den permanent Magneten (Rotor) dreht sich

Umwandlung Mech- in El. Energie:

■ Umwandlung Mech- in El. Energie:

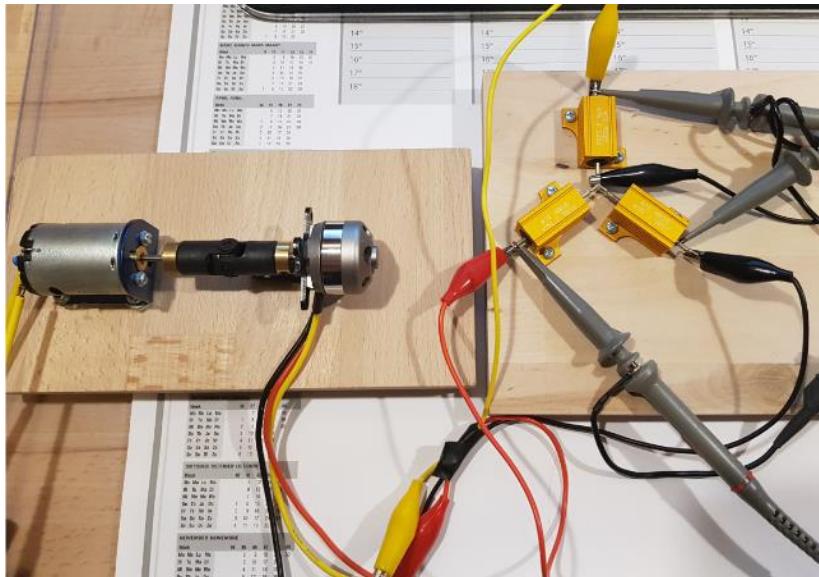
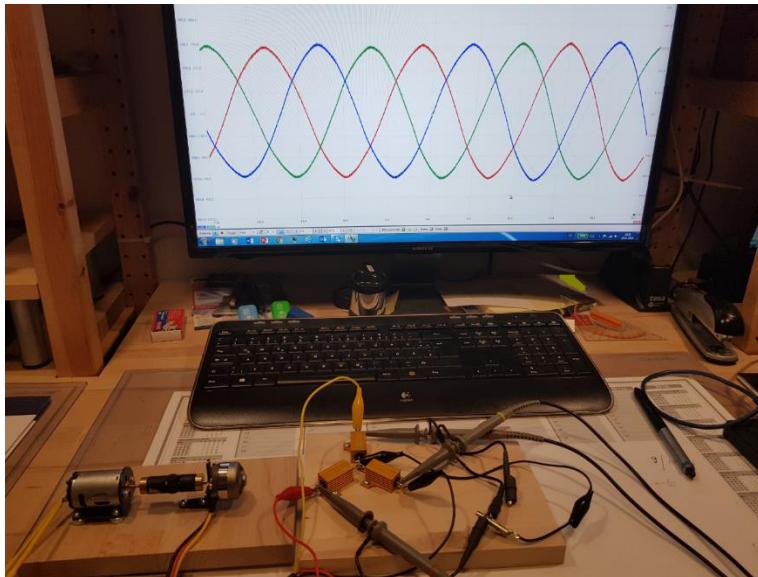
- Ein Elektromotor ist gleichzeitig ein auch ein Elektrogenerator – Allgemein eine Elektrische Maschine
- Versuch: Ein Drehstrom-Elektromotor wird gedreht – Welche Spannungen werden an den um 120° versetzten 3 Spulen gemessen?



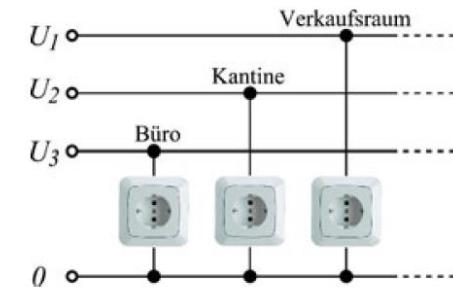
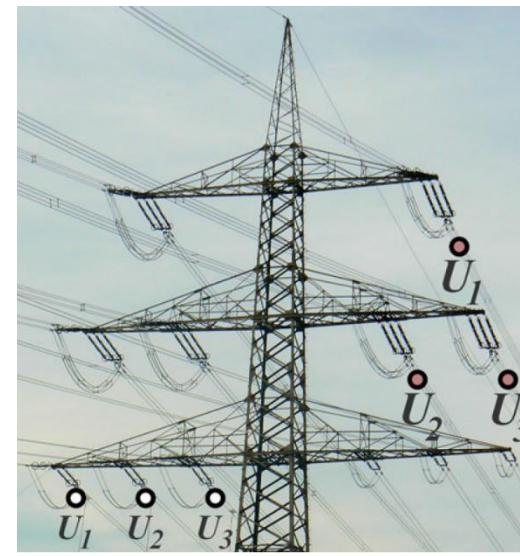
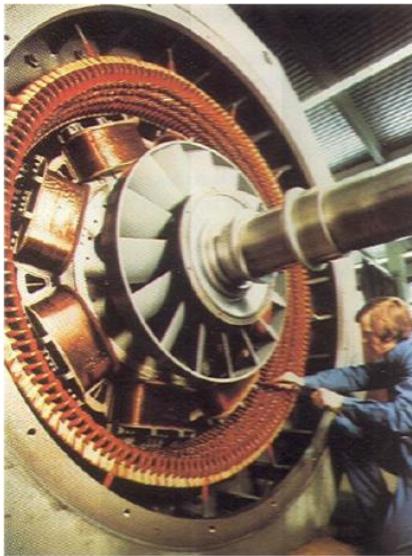
Umwandlung Mech- in El. Energie:

■ Umwandlung Mech- in El. Energie:

- Ein Elektrogenerator erzeugt 3 Spannungen die um 120° Phasenverschoben sind (Drehstrom)
- Versuch: Ein Drehstrom-Elektrogenerator wird „belastet“ - durch veränderbare Widerstände (Potentiometer) – Was kann man beobachten, wenn die Last grösser bzw. der Lastwiderstand kleiner wird?



Umwandlung Mech- in El. Energie:



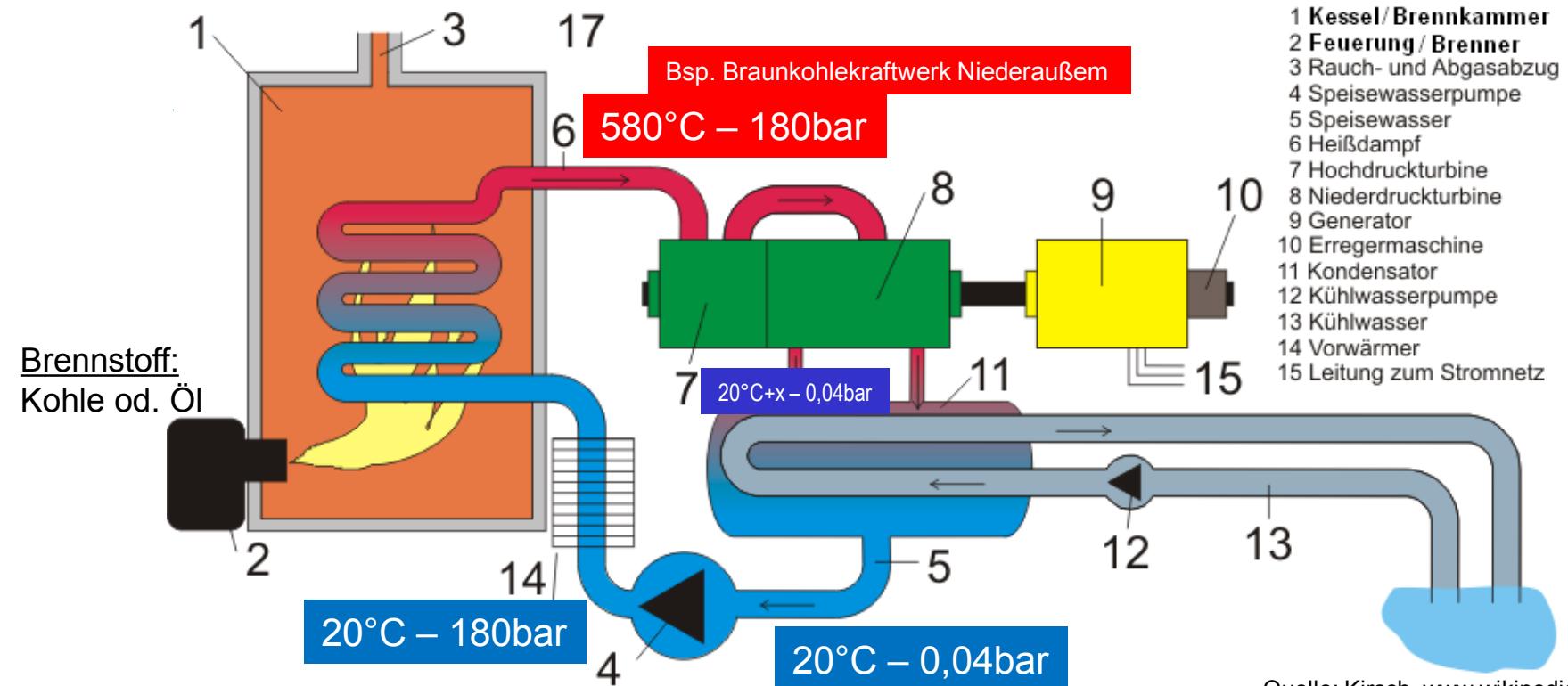
1) Dampfkraftwerk

Prinzip



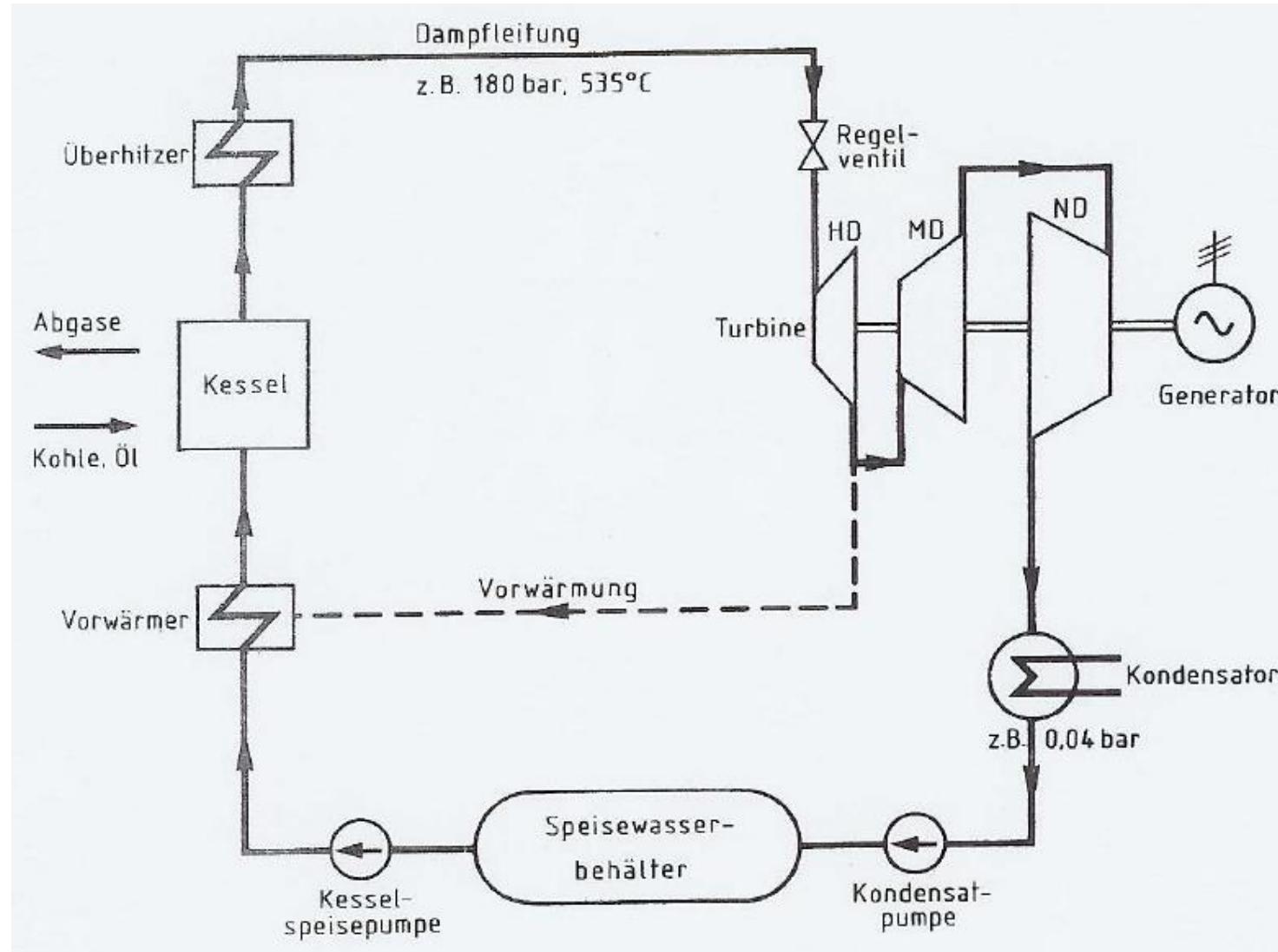
- Wasser durchläuft einen Kreisprozess:

- 4: Kompression in der Kesselspeisepumpe
- 14,1: Erwärmung, Verdampfung und Überhitzung
- 7,8: Expansion des Wasserdampfs → Nutzarbeit der Turbine
Turbine besteht aus mehreren Stufen (Hoch-, Mittel- und Niederdruckstufe)
- 11,13: Wärmeabfuhr und Kondensation des Nassdampfes



1) Dampfkraftwerk

Prinzip



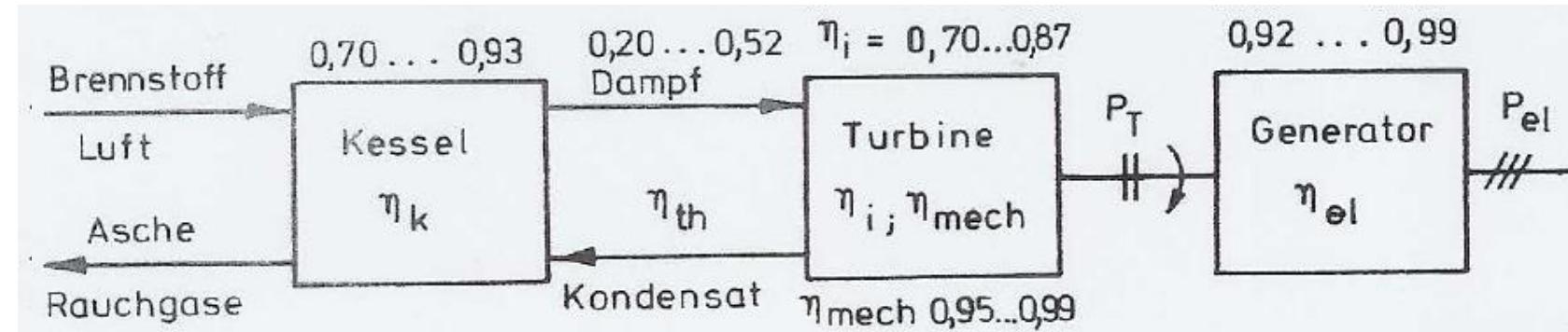
1) Dampfkraftwerk

Energiewandlungskette und Wirkungsgrade



■ Wirkungsgrade der Energiewandlungskette:

- Kessel: Wandlung der im Brennstoff gespeicherten chemischen Energie durch Verbrennung (Oxidation) in thermische Energie
- Dampf/Kondensat: Thermischer Wirkungsgrad des Dampf/Kondensat-Kreisprozesses
- Turbine: Wandlung der im Wasserdampf gespeicherten thermischen Energie in mechanische Energie
- Generator: Wandlung der mechanischen Energie in elektrische Energie



- Gesamter Kraftwerks-Wirkungsgrad: $\eta_{ges} = \eta_k \cdot \eta_{th} \cdot \eta_{mech} \cdot \eta_{el}$
- Warum ist der thermische Wirkungsgrad η_{th} eines thermischen Kraftwerks so niedrig?

1) Dampfkraftwerk

Energiewandlungskette und Wirkungsgrade

- Warum ist der Wirkungsgrad η_{th} eines thermischen Kraftwerks so niedrig?
 - Theoretisch erreichbare, höchstmögliche Wirkungsgrad eines thermodynamischen Kreisprozesses (Carnot-Wirkungsgrad für ideales Gas):
- $$\eta_{th} = \eta_{Carnot} = \frac{T_{Ein}(K) - T_{Aus}(K)}{T_{Ein}(K)}$$
- Temperatur in Kelvin [K]!
- Hängt von der Dampf-Eintrittstemperatur T_{Ein} und der Dampf-Austrittstemperatur T_{Aus} ab
- Wie groß ist der thermische Wirkungsgrad des Braunkohlekraftwerks Niederaußem ($T_{Ein} = 580^\circ\text{C}$, $T_{Aus} = 20^\circ\text{C}$)?

$$\eta_{th} =$$

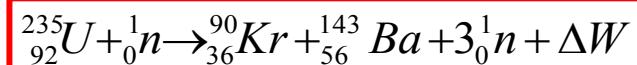
- Wie kann ein Wirkungsgrad von 100% erreicht werden?
 - $T_{Aus} \rightarrow 0\text{K}$, aber Dampf-Austrittstemperatur durch Umgebungstemperatur festgelegt
 - $T_{Ein} \rightarrow \text{unendlich}$ (möglichst hoch)

2) Kernkraftwerke

Prinzip

■ Wasser durchläuft ebenfalls einen Kreisprozess:

- Uran als Brennstoff (Tabletten, Beschuss mit energiearmen Neutronen → Kernspaltung)
- Thermodynamischer Kreisprozess mit Wasserdampf als Arbeitsmedium → damit ebenfalls ein thermisches Kraftwerk
- Grundlastkraftwerk, z.B. leistungsstärkster Reaktorblock in D: 1480 MW in Brokdorf/SCH
- Elektrischer Wirkungsgrad: 35 %
(Leichtwasserreaktor)
- Kettenreaktionsgleichung:

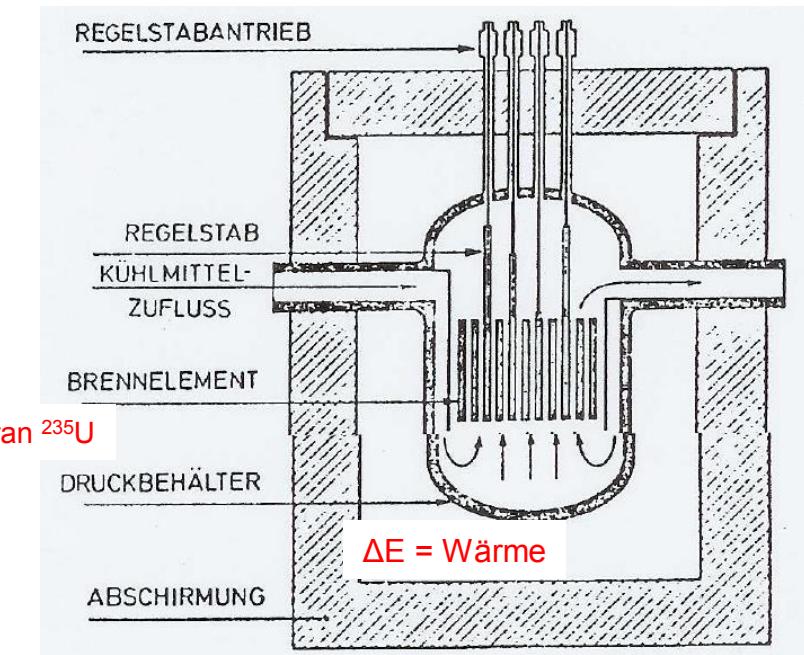


- → 2 neue Atome (Krypton, Barium)
- → 3 freie Neutronen (spalten wieder Urankerne, durch Bor-Regelstäbe regeln)
- → $\Delta E = 2,7$ Mio. kg SKE pro kg ^{235}U

Energiegehalt:

1kg Steinkohle = 8,27 kWh

1kg ^{235}U = 21,98 Mio. kWh



2) Kernkraftwerke

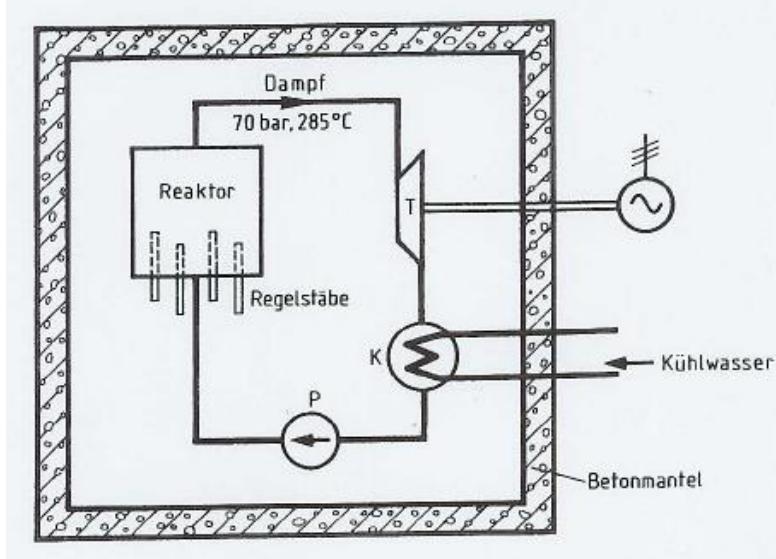
Bauformen

■ Bauformen von Leichtwasserreaktoren:

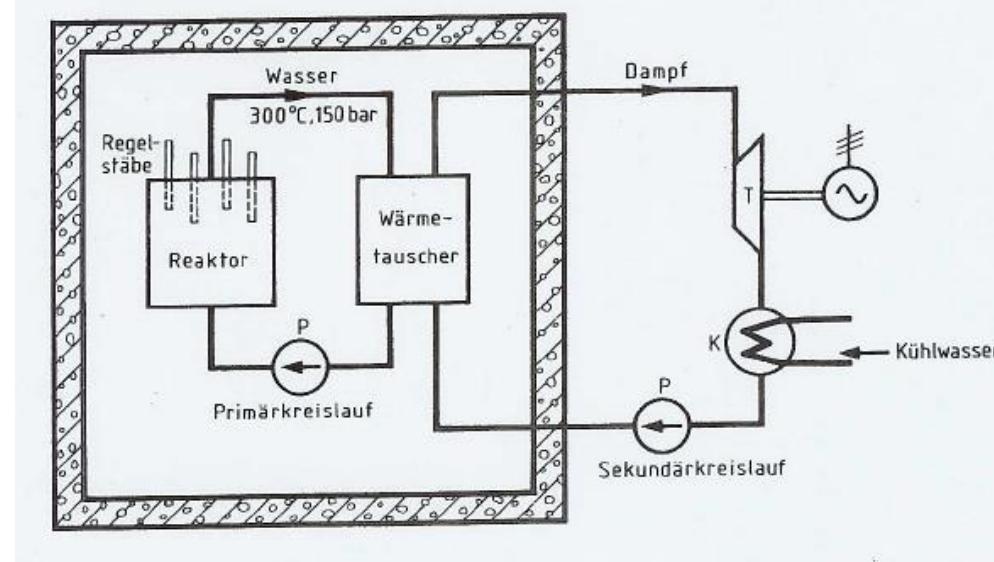
Anne Lund im März
1975:



Siedewasserreaktor



Druckwasserreaktor



- Dampfkreislauf im Reaktor
- Schutzbereich umfasst alle Anlagen-
teile vom Reaktor bis zur Turbine
- Anlagenteile nach der Dampferzeugung entsprechen konventionellem therm. Kraftwerk

- Primärer Wasserkreislauf: Auf 300°C
erhitztes Wasser, das wegen des
hohen Drucks nicht siedet
- Sekundärer Dampfkreislauf (z.B. 265°C, 52bar)
- Schutzbereich umfasst Reaktor und
Dampferzeuger

3) Gasturbinenkraftwerke

Prinzip

■ Thermisches Kraftwerk, offener oder geschlossener Kreislauf:

- Erdgas oder leichtes Heizöl (Diesel) als Brennstoff
- Kein Kühlwasser, Verbrennungsluft wird genutzt
- Spitzenlastkraftwerk, z.B. 100 MW (Notstromaggregat)
- Elektrischer Wirkungsgrad: max. 33 %
→ als Kombikraftwerk mit nachgeschaltetem Dampfkraftwerk bis 58%

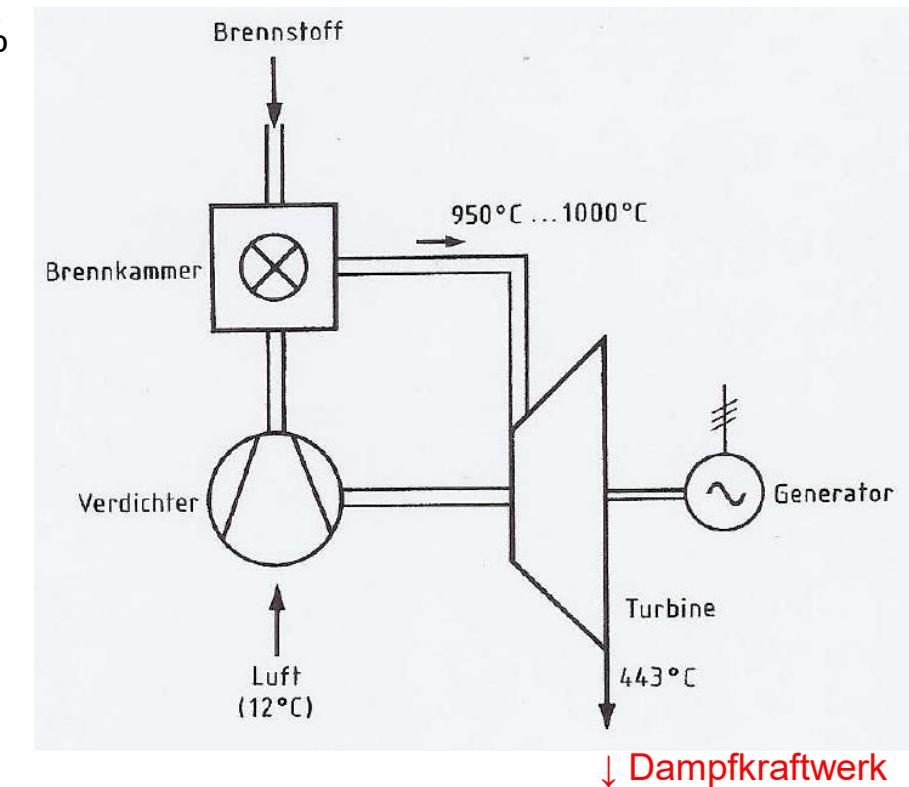
➤ Wirkungsprinzip:

- Kompression der Luft
(Beschaufelung, Verdichterstufen)
- Mischung der Luft mit gasförmigem
oder flüssigem Brennstoff
- Durch Verbrennung entsteht Heißgas
- Entspannung des Heißgases in Turbine:
→ therm.-mech. Energiewandlung
→ Antrieb des Verdichters ($\frac{2}{3}$ d. Energie)
und des el. Generators ($\frac{1}{3}$ d. Energie)

Energiegehalt:

1kg Steinkohle = 8,27 kWh

1kg Flüssiggas = 13,03 kWh



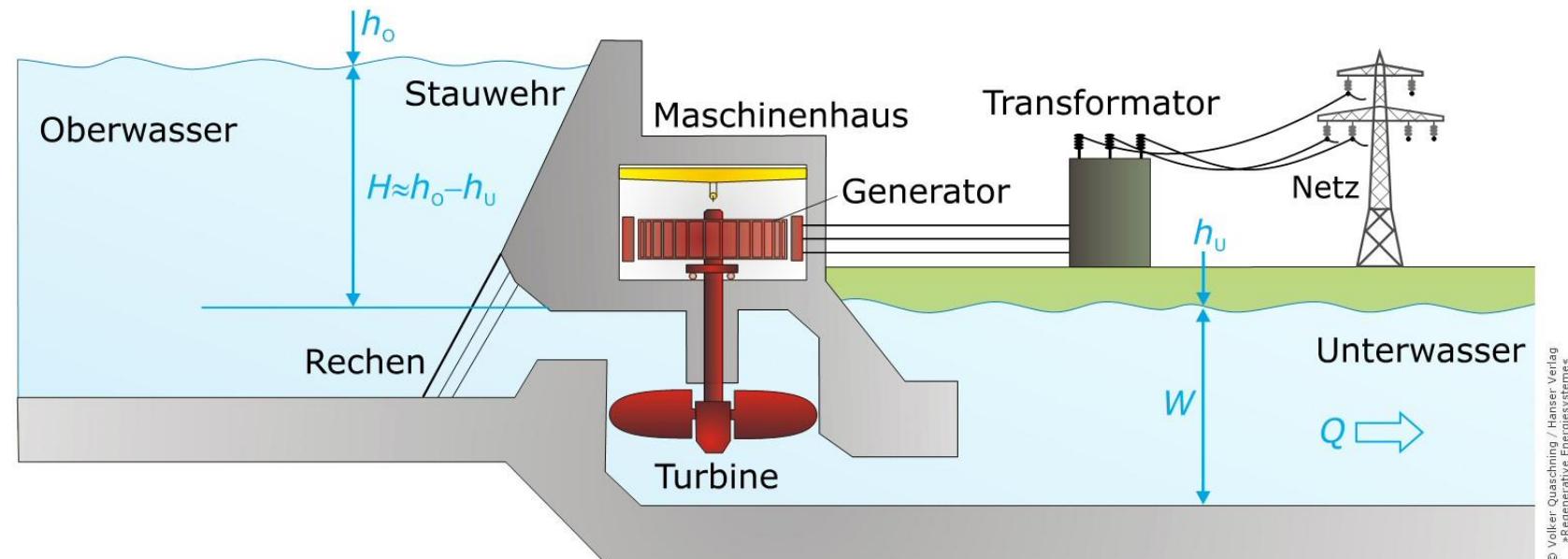
4) Wasserkraftwerke

Prinzip Laufwasserkraftwerke (Flusskraftwerke)



■ Wandlung von potentieller Energie über kin. in elektrische Energie:

- Wandlung der in einer Abflussmenge Q (Volumenstrom) und der Höhe H (Fallhöhe) enthaltenen potentiellen Energie in kinetische Energie (Turbine) und anschließend in elektrische Energie (Generator)
- Grundlastkraftwerke: Laufwasser (Fluss-), Gezeiten, Meereströmungskraftwerke
- Mittellastkraftwerke: Speicherwasserkraftwerke
- Spitzenlastkraftwerke: Speicherwasser, Pumpspeicher und Kavernenkraftwerke
- Elektrischer Wirkungsgrad: 70...90%



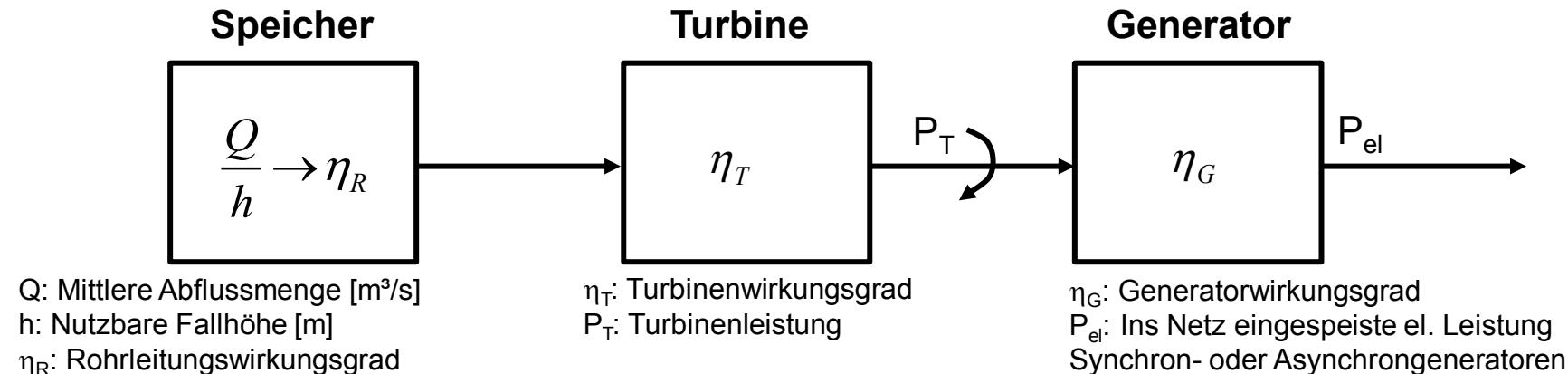
Quelle: V. Quaschning, Regenerative Energiesysteme, Seite 299, Bild 7.6

4) Wasserkraftwerke

Energiewandlungskette und Wirkungsgrade



- Wirkungsgrade der Energiewandlungskette:



➤ **Gesamtleistung:**

$$P_{el} = \eta_{ges} \cdot g \cdot \rho \cdot Q \cdot h$$

$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, Dichte des Wassers
 $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, Erdbeschleunigung

- Beschränkungen:

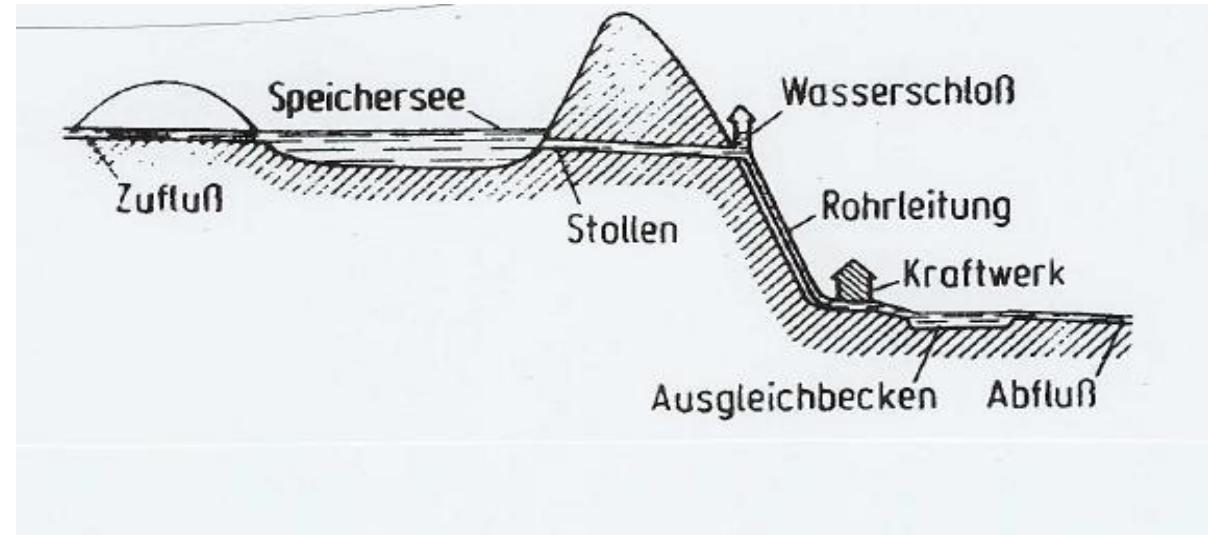
- Erzeugung eines Rückstaus meist durch Wehr
- → Laufwasserkraftwerke verfügen über nahezu keine Speichermöglichkeiten von Wassermassen

4) Wasserkraftwerke

Prinzip Speicherwasserkraftwerke

- Flusskraftwerk mit zusätzlichem Wasserspeicher:

- Aufstauen des Oberwassers in einem Speichersee
- Speicherwasserkraftwerke können natürliche Schwankungen im Wasserkraftangebot ausgleichen



Kenndaten des Drei-Schluchten-Staudamms:

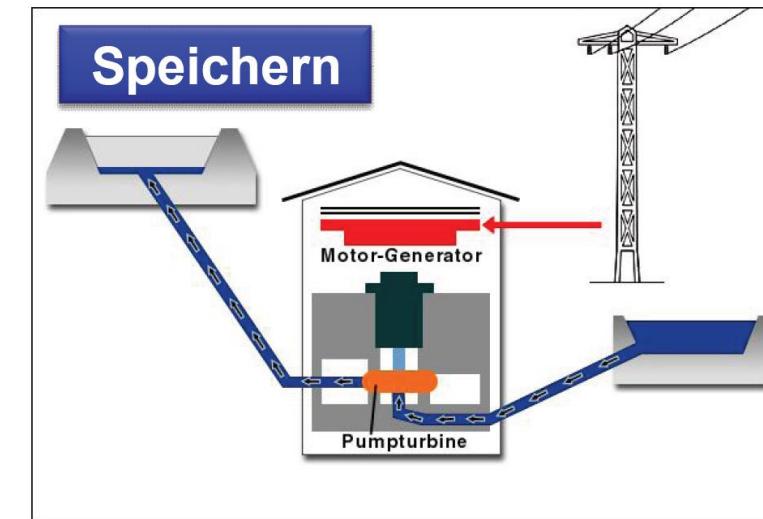
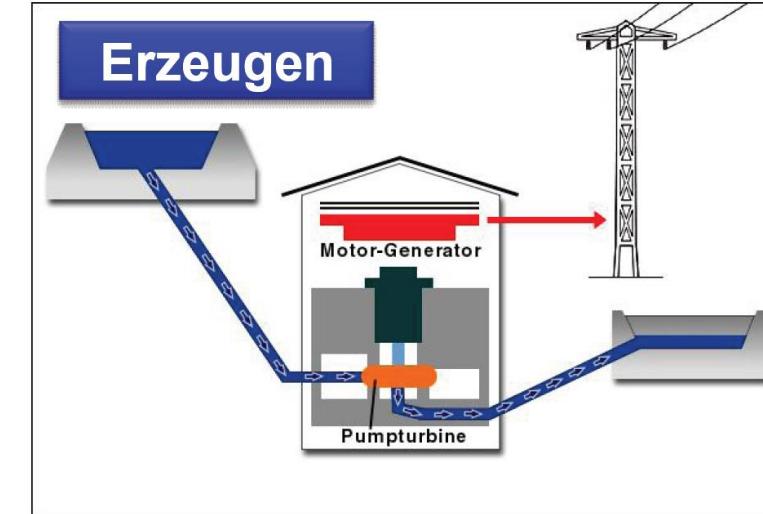
• Reservoir:	Volumen:	$39,3 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ davon $22,15 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ zur Pegelregelung
	Fläche des Wasserbeckens:	1.084 km^2
	Nenn-Pegelstand:	175 m
• Staudamm:	Max. Höhe:	181 m
	Länge:	2.039 m
• Generatorhaus:	Anzahl:	26 Generatoren (erweiterbar um 6 Stk.)
	Nennleistung / Generator:	700 MW
	Installierte Leistung:	18,2 GW (+ 4,2 GW)
	Elektrische Energie (\varnothing):	84,68 TWh / Jahr

4) Wasserkraftwerke

Prinzip Pumpspeicherkraftwerke

- Nicht zur Nutzung des natürlichen Energieangebots aus Wasserkraft, sondern zu dessen Speicherung:

- Bei Bedarf an elektrischer Energie:
⇒ Wasserfluss Oberbecken → Unterbecken
- Bei Überangebot an elektrischer Energie:
⇒ Wasserfluss Unterbecken → Oberbecken
- Unterscheidung in Anlagen mit/ohne natürlichen Zufluss



Quelle: M. Igel, Elektrische Energieversorgung, HTW Saarland, 2011

4) Wasserkraftwerke

Kenndaten Goldisthal – Speicherkapazität



■ Kenndaten des Pumpspeicherkraftwerks Goldisthal (größtes PSKW in D):

- Nutzvolumen Oberbecken: 12 Mio. m³ (auf 55 ha)
- Fallhöhe: 302 m (max. 103m³/s)
- Nennleistung: 1060 MW (4 Turbinen)
- Max. speicherbare Energiemenge: 8,5 GWh
- Reaktionszeit: 98 s



■ In Deutschland sind 32 Pumpspeicherkraftwerke in Betrieb:

- Leistung ca. 7.000 MW
- Wirkungsgrad ca. 75% **≈ 10.000 Haushalte für 1 Jahr**
- Gesamtspeicherkapazität ca. 40 GWh (= 40.000 MWh = 40.000.000 kWh)

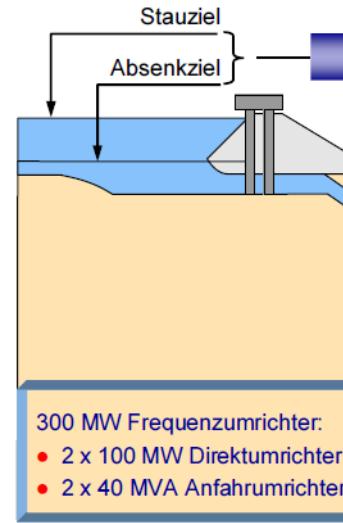
■ Bruttostromerzeugung D/2012: 617 TWh / 365 Tage ≈ 1,7 TWh/Tag

≈ 2,4% des Energieverbrauchs eines Tages in Deutschland

Das Netz kann nichts speichern!

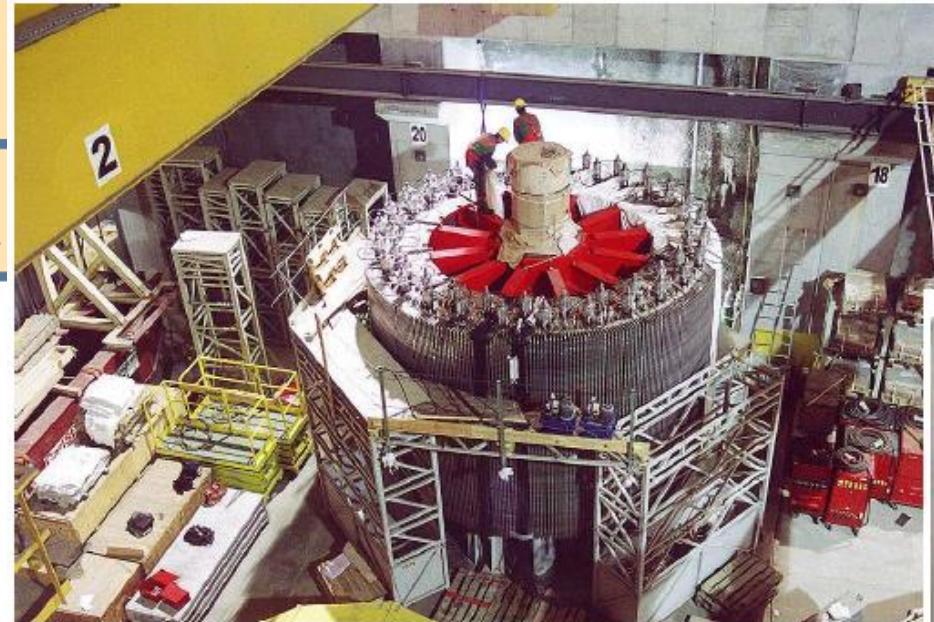
4) Wasserkraftwerke

Kenndaten Goldisthal – Speicherkapazität

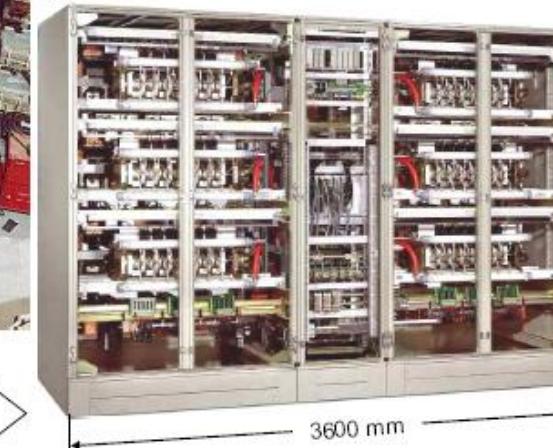


MASCHINENRAUM GOLDISTHAL

CONVERTEAM
THE POWER CONVERSION COMPANY



- Einsatz von 1000 Thyristoren
- Gesamtlänge der Umrichterschränke: 44 m



Quelle: Converteam GmbH, R. Arndt, HAW Hamburg, 11.01.2011

4) Wasserkraftwerke

Kenndaten Goldisthal – Speicherkapazität



■ Kenndaten des Pumpspeicherkraftwerks Goldisthal (größtes PSKW in D):

- Nutzvolumen Oberbecken: 12 Mio. m³ (auf 55 ha)
- Fallhöhe: 302 m (max. 103m³/s)
- Nennleistung: 1060 MW (4 Turbinen)
- Max. speicherbare Energiemenge: 8,5 GWh
- Reaktionszeit: 98 s



■ Wie groß ist die volumetrische Energiedichte des Pumpspeicherkraftwerks Goldisthal?

$$w_{\max} = \frac{W}{V} = \frac{8,5 \cdot 10^9 Wh}{12 \cdot 10^6 m^3} = 0,71 kWh/m^3$$

■ Wie lange kann das Pumpspeicherkraftwerk Goldisthal theoretisch mit Nennleistung betrieben werden?

$$t = \frac{W}{P} = \frac{8,5 GWh}{1060 MW} = 8,02 h$$

■ Wie groß ist der Wirkungsgrad einer Turbine?

$$\text{aus } P = \rho \cdot g \cdot h \cdot \dot{V} \cdot \eta \Rightarrow \eta = \frac{P}{\rho \cdot g \cdot h \cdot \dot{V}} = \frac{1060 MW / 4}{1000 \frac{kg}{m^3} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot 302 m \cdot 103 \frac{m}{s^2}} = \frac{265 MW}{305,15 MW} = 86,84\%$$

$Q = \dot{V} : \text{Volumenstrom}$

4) Wasserkraftwerke

Kenndaten Goldisthal – Speicherkapazität

■ Aufgabe 1 Pumpspeicherkraftwerk:

- Welche Energie ist notwendig, um 1 m³ Wasser der Dichte $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ um 335 m anzuheben?

■ Aufgabe 2 Pumpspeicherkraftwerk:

- Wie groß ist die theoretisch erzielbare Leistung in MW des Pumpspeicherkraftwerks „Edersee“ bei einem Abfluss von 180 t Wasser pro Sekunde über eine Höhendifferenz von 335 m?

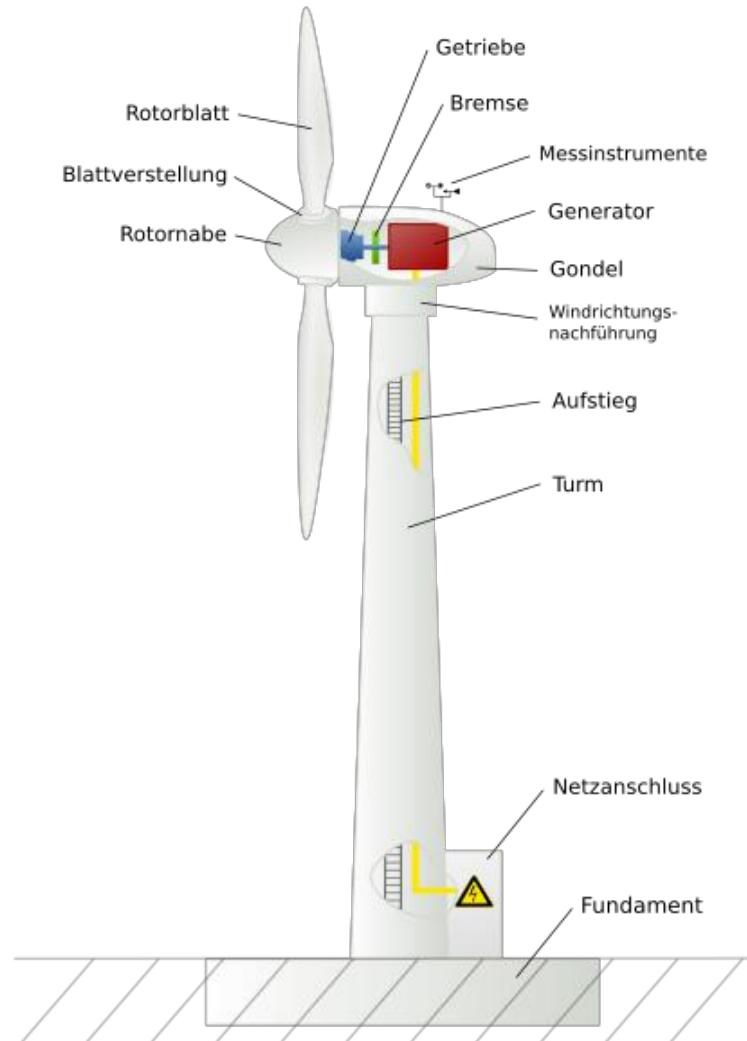


Quelle: J. Rybach, Physik für Bachelors

5) Windenergieanlagen (WEA)

Prinzip - Hauptkomponenten

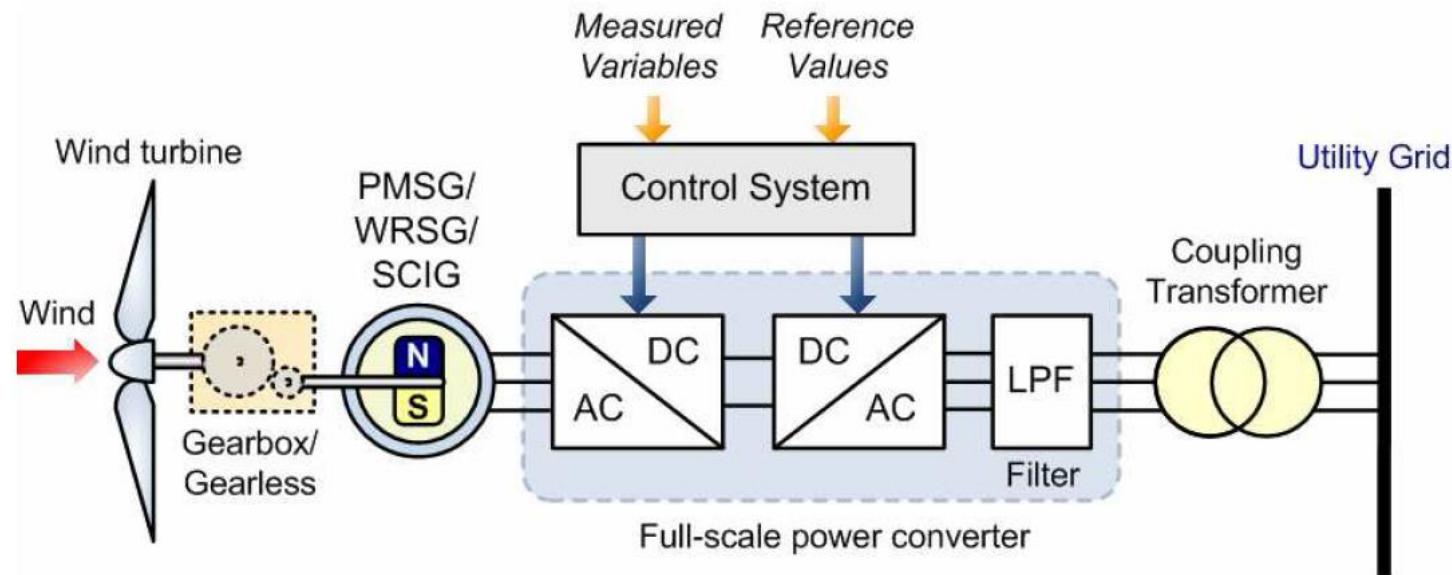
- Nutzung der Ausgleichsströmung (Wind) durch unterschiedliche Erwärmung der Luftmassen und der Erdoberfläche
 - Nennleistung derzeit bis 7MW
- Große Schwankungen in der Leistungsabgabe aufgrund ungleichmäßigen Wind
 - Offshore-Standorte bessere Windbedingungen
- Rotordurchmesser:
 - 40m (< 1MW), 90m (< 3MW), 126m (bis 7MW)
- Narbenhöhe:
 - 65m (< 1MW), 114m (< 3MW), 130m (bis 7MW)



Quelle: www.wikipedia.de

5) Windenergieanlagen (WEA)

Prinzip - Hauptkomponenten

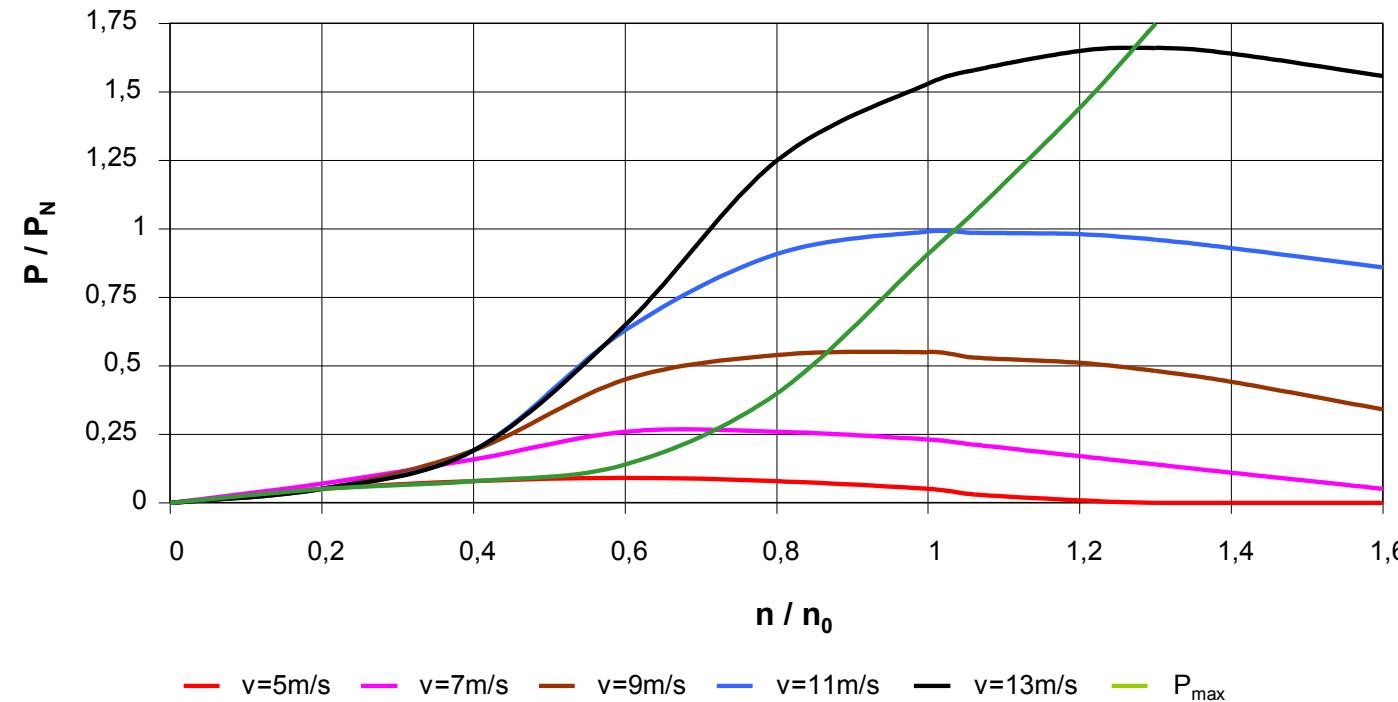


- Typ D: Synchrongenerator mit „full scale“ Frequenzumformer:
 - PM erregter Synchrongenerator
 - Frequenzumformer im Ständerkreis muss die komplette Leistung umsetzen
 - Daher eine komplette Entkopplung von Generator und Netz möglich

5) Windenergieanlagen (WEA)

Leistungskennlinien einer WEA

- Elektrische Ausgangsleistung (bezogen auf ihre Nennleistung) über die Generatordrehzahl (bezogen auf seine synchrone Drehzahl) mit dem Parameter Windgeschwindigkeit:
 - Grüne Linie zeigt Punkte maximaler Leistung



6) Biomasse-Kraftwerke

Möglichkeiten der Biomassenutzung



■ Unterscheidung:

- Nutzung von Reststoffen und Abfällen oder gezielter Anbau von „Energiepflanzen“

■ Bezeichnung:

- Nur thermische Energie:

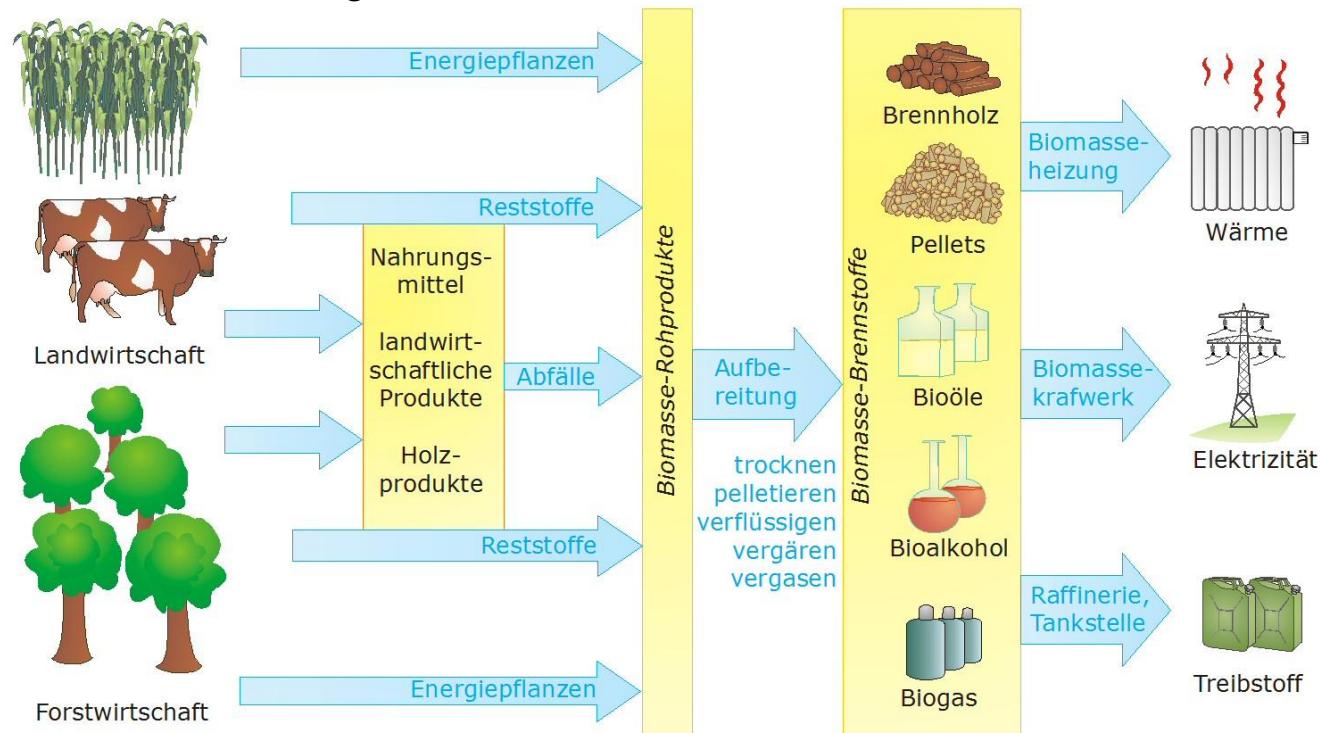
Biomasse**heiz**werk

- Nur elektrische Energie:

Biomasse**kraft**werk

- Thermische und elektrische Energie:

Biomasse**heizkraft**werk



Quelle: V. Quaschning, Regenerative Energiesysteme, Seite 333, Bild 9.1

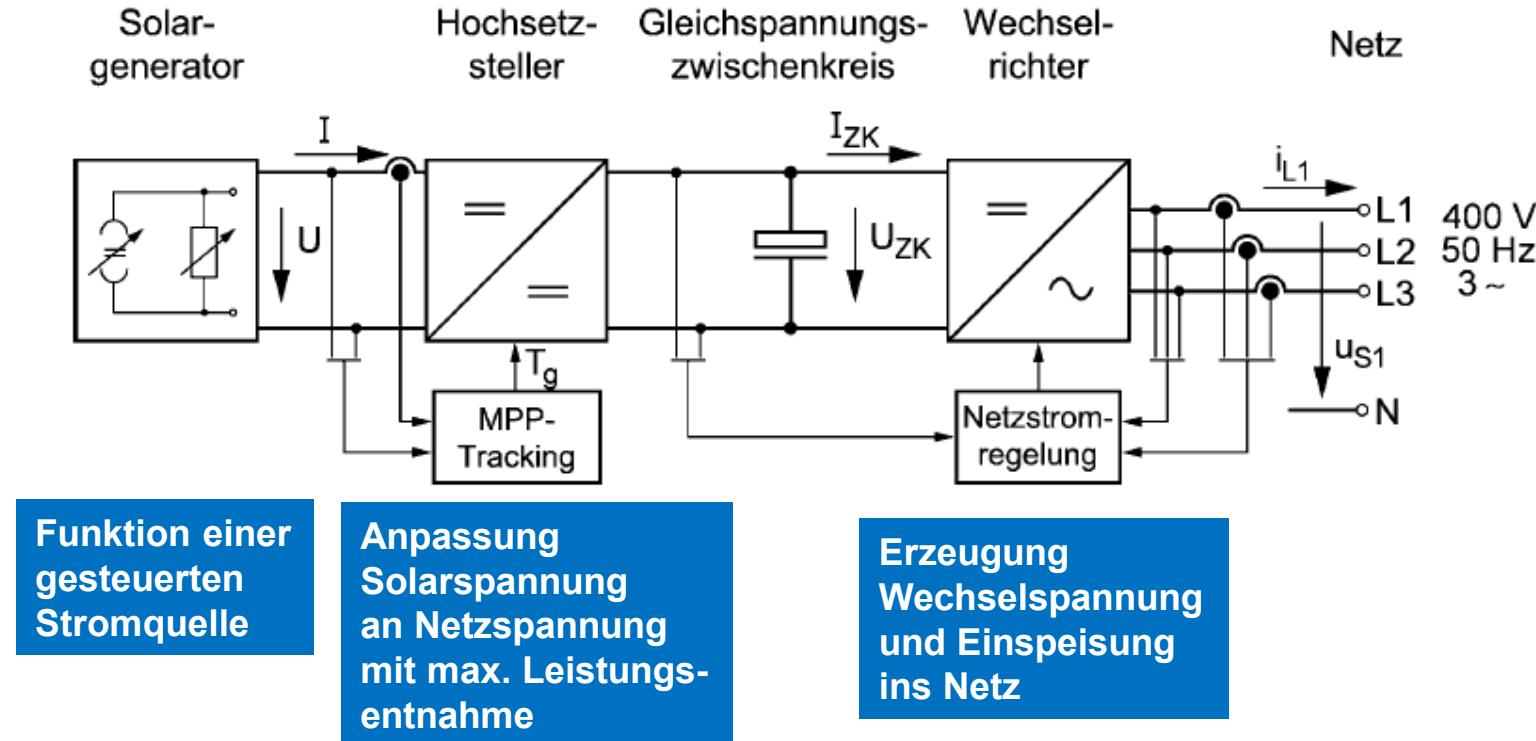
7) Photovoltaik-Anlagen

Hauptkomponenten

■ Wirkungsprinzip:

- Direkte Umwandlung der solaren Strahlungsenergie in elektrische Energie
- Wirkungsgrade: 14% (polykristallin) ... 20% (monokristallin)

■ Hauptkomponenten einer PV-Anlage:



Quelle: V. Quaschning, Regenerative Energiesysteme, Seite 333, Bild 9.1



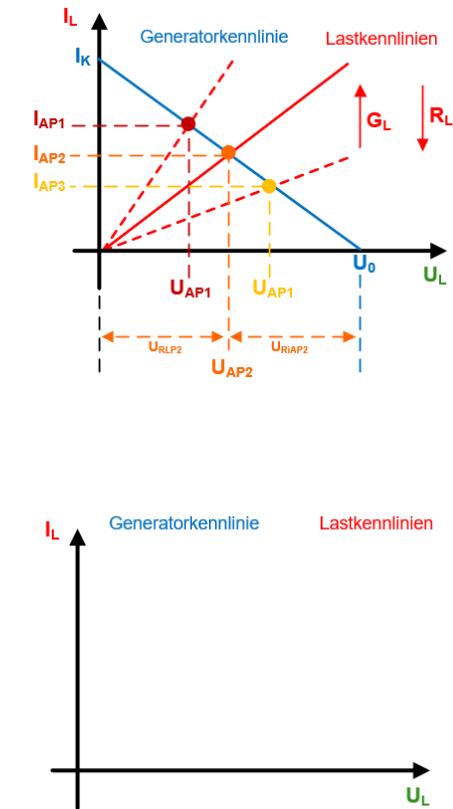
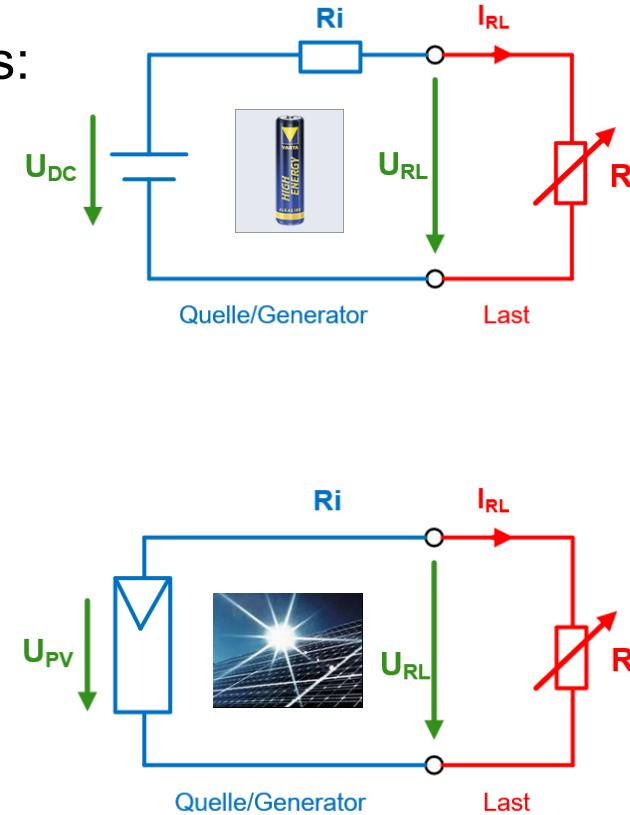
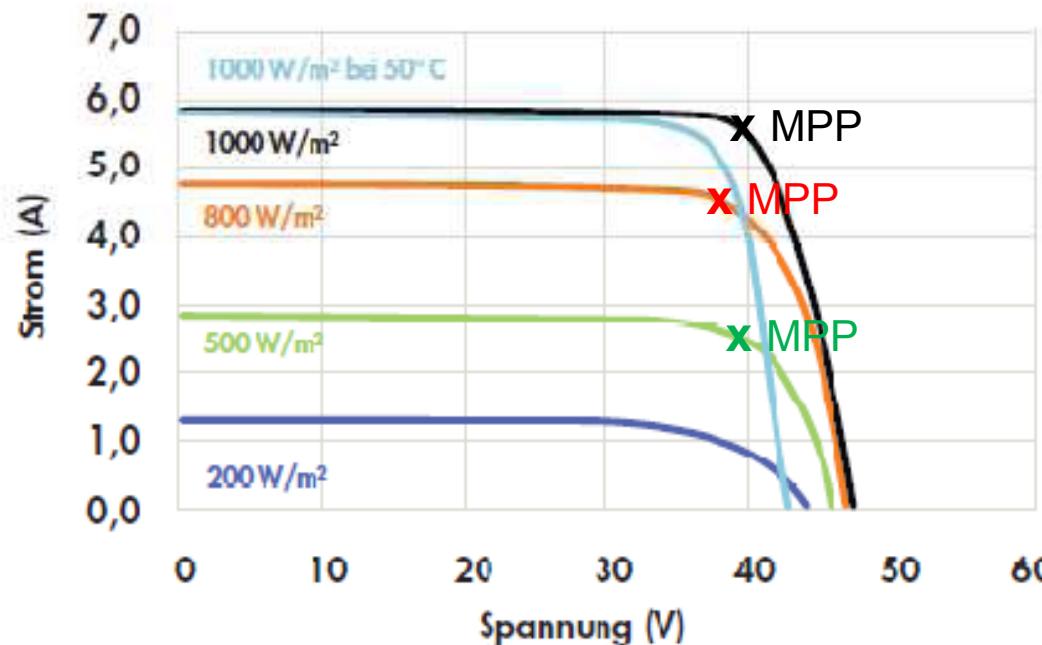
6) Photovoltaik-Anlagen

Strom-Spannungs-Kennlinie

Kennwerte:

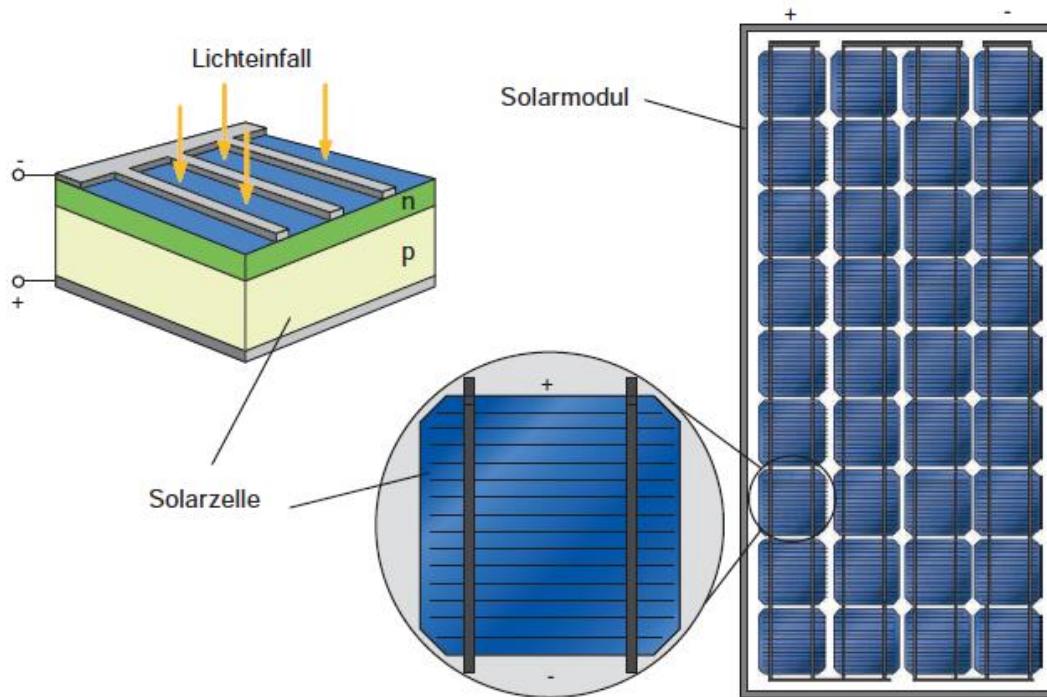
- U_L : Leerlaufspannung, steigt mit Bestrahlungsstärke und sinkt mit der Temperatur
- I_K : Kurzschlussstrom, steigt mit Bestrahlungsstärke und Temperatur
- MPP: Punkt maximaler Leistung $P_{MPP} = U_{MPP} \cdot I_{MPP}$

Strom-Spannungs-Kennlinie eines PV-Moduls:



Aufbau und Funktionsprinzip einer Solarzelle

Herstellung von Standard Solarzellen/Modulen



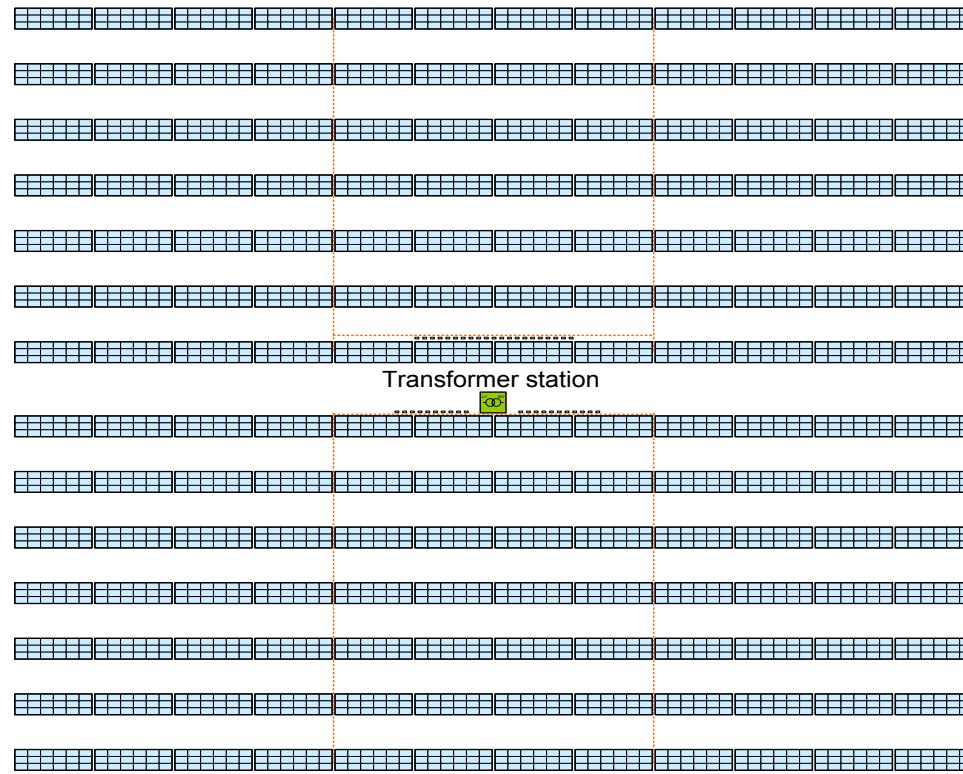
Quelle: Photovoltaik, K. Mertens, 2015



- **Konzepte mit dezentralen Wechselrichtern**

- **Strangwechselrichterkonzept (Stringkonzept)**

- Strangwechselrichter eignen sich auch gut um Zentralwechselrichter in großen PV Anlagen zu ersetzen



Quelle: Danfoss AS

Aufbau und Funktionsprinzip einer Solarzelle

Zelltechnologie-Vergleich



- Vergleich zwischen Dünnschicht-Zellen (rechts) und kristallinen Silizium-Zellen (links):

