

Übung zur Lehrveranstaltung „Einführung in die Energiewirtschaft“

SoSe 2017

PD Dr. Patrick Jochem
Übung 5: Erneuerbare Energieträger

INSTITUT FÜR INDUSTRIEBETRIEBSLEHRE UND INDUSTRIELLE PRODUKTION (IIP)
Lehrstuhl für Energiewirtschaft (Prof. Fichtner)



Agenda

Klausuranmeldung ab nächster Woche:

<https://campus.studium.kit.edu>

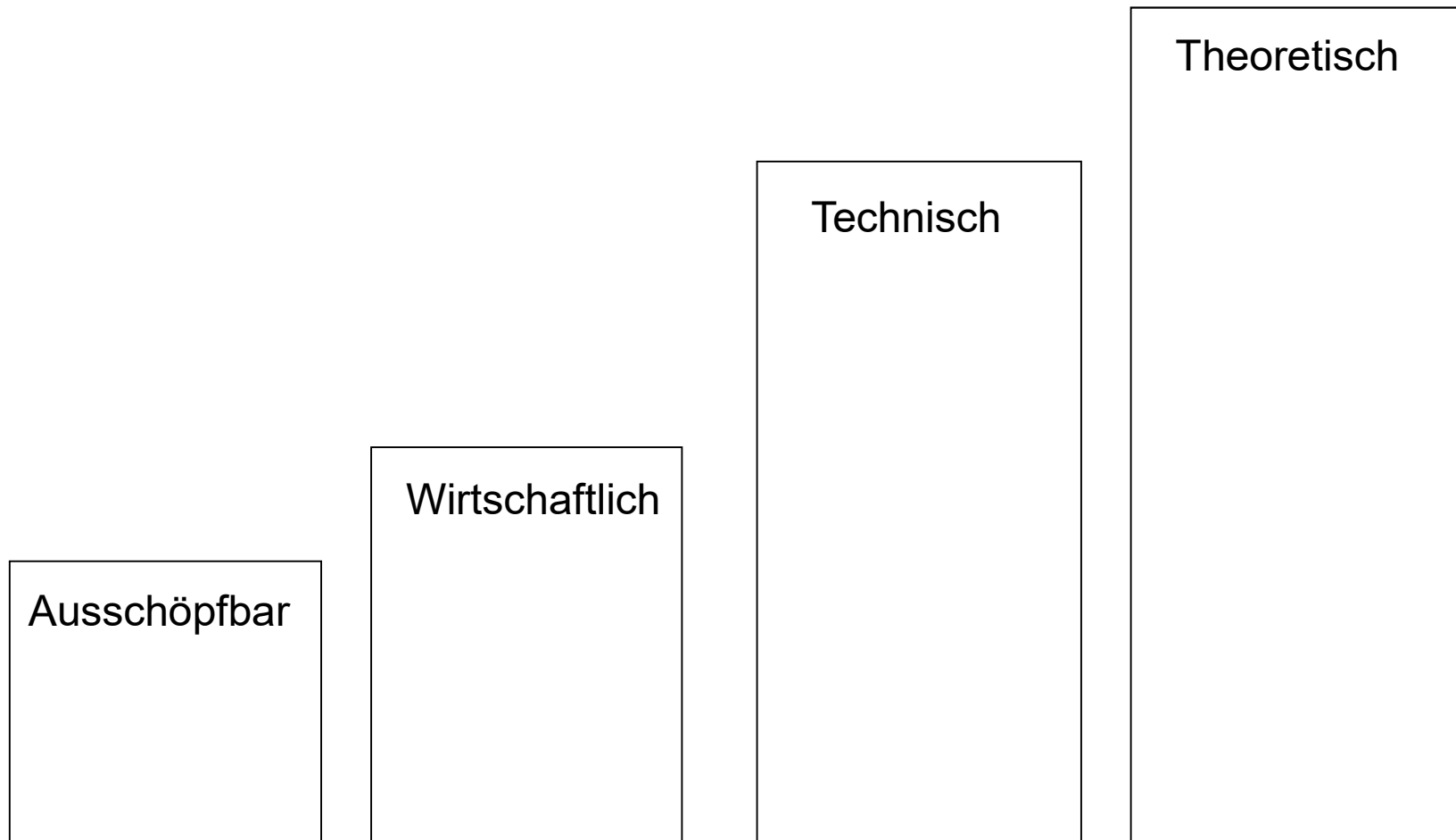
- Wiederholung Übung 4
- Potenzialbegriff EE
- Wasserkraft
- Windenergie
- Photovoltaik
- Bioenergie
- Erdwärme



Wiederholung Übung 4

- Entstehung von Kohle (Torf, Braun- und dann Steinkohle)
- Unterschiede der beiden Kohlearten
- Vorkommen, Reserven und Ressourcen
- SO₂-Emissionen bei der Verbrennung und deren Filterung
 - Calciumcarbonat
 - Chemische Gleichungen
 - Gewichtsbestimmung mit Periodensystem
- Subventionen der Deutschen Kohle und deren Implikationen

Potenzialbegriff



Quelle: AG Energiebilanzen, Stand Jan. 2007
Prof. Fichtner, Lehrstuhl für Energiewirtschaft, IIP

Potenzialbegriff

■ Theoretisch:

- Innerhalb einer Region und eines bestimmten Zeitraums theoretisch nutzbares Energieangebot eines regenerativen Energieträgers (i.d.R. langjähriges Mittel z.B. der Sonneneinstrahlung, der Windgeschwindigkeit etc.)

■ Technisch:

- Unter Berücksichtigung technischer Restriktionen (Wandlungstechnologie, ökologisch, gesetzlich, kulturell, Nutzungskonkurrenzen etc.) nutzbarer Anteil des theoretischen Potenzials

■ Wirtschaftlich:

- Wirtschaftlich nutzbarer Anteil des technischen Potenzials

■ Ausschöpfbar:

- In bestimmtem Zeitraum erschließbarer Anteil des wirtschaftlichen Potenzial

Quelle: Strauß, Kraftwerkstechnik

Übungsaufgaben 1 – Potenzialbegriffe

1. Beschreiben Sie die Potenzialbegriffe für den Erneuerbaren Energieträger „Solare Einstrahlung“ mit der Wandlungstechnologie „Photovoltaik“ für die Region Europa.

■ **Theoretisch:**

■ **Technisch:**

■ **Wirtschaftlich:**

■ **Ausschöpfbar:**

Statistik der Kohlenwirtschaft e.V.

Übungsaufgaben 1 – Potenzialbegriffe – Photovoltaik

■ Theoretisch:

- Solare Einstrahlung (z.B. durchschnittliche kWh/m²) auf die gesamte Landfläche (km²) Europas innerhalb eines Jahres (=kWh/a)

■ Technisch:

- Berücksichtigung Wirkungsgrad, Anteil an Gebäude-Dachflächen, ggf. anteilige Freiflächen (Nutzungskonkurrenzen beachten)

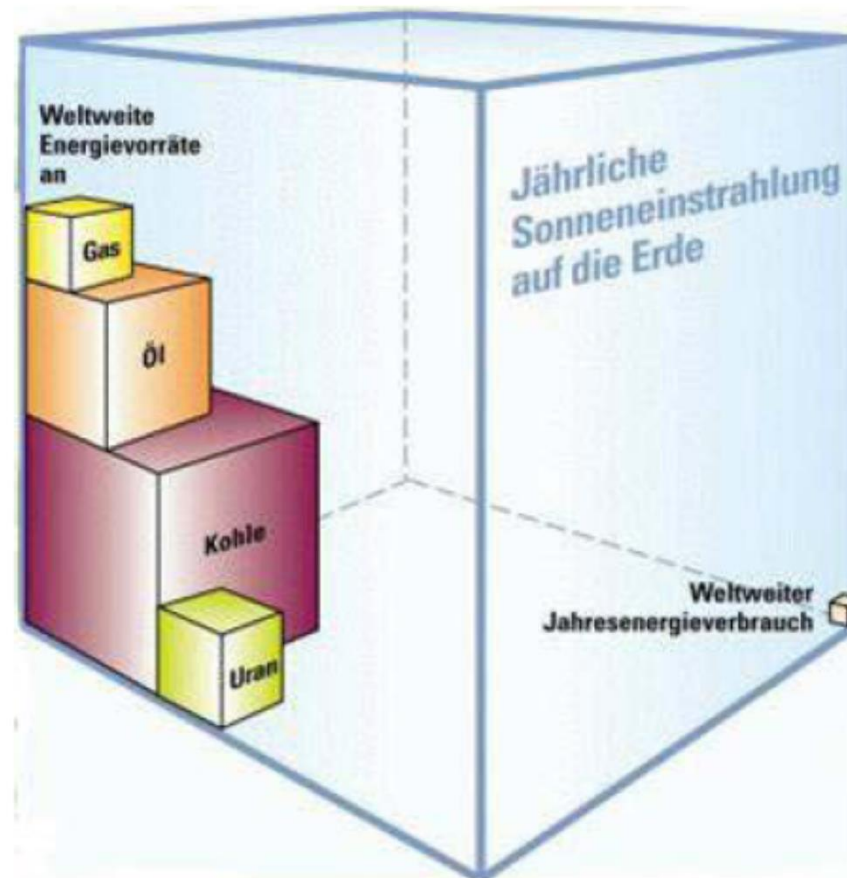
■ Wirtschaftlich:

- Berücksichtigung der nutzbaren Flächen in den Ländern Europas, in denen entsprechende, mindestens kostendeckende Fördermaßnahmen existieren und in denen die Solare Einstrahlung „ausreichend“ ist (Wirtschaftlichkeitsberechnung notwendig)

■ Ausschöpfbar:

- Abbildung eines möglichen Ausbaus der Photovoltaiknutzung in Europa (Jahresproduktionskapazität, Finanzierungsmöglichkeiten, Installationsbetriebe usw.)

Globales Potential an erneuerbaren Energien



Vergleich der jährlichen Sonneneinstrahlung mit erschöpflichen Energieträgern und dem weltweiten Jahresenergieverbrauch

Quelle: Brütting 2005

Energiequellen

- Atomkern
 - Fusion
- Sonnenenergie
 - Vergangene Sonnenenergie
 - Braunkohle, Kohle, Erdöl, Erdgas, andere fossile Energiequellen
 - **Heutige Sonnenenergie**
 - **Solar, Photovoltaik (PV), Wind, Biomasse, Meeresströmung, ...)**
- Geothermie
 - Geothermie
- Gravitation und Bewegung der Planeten
 - Gezeitenkraftwerke

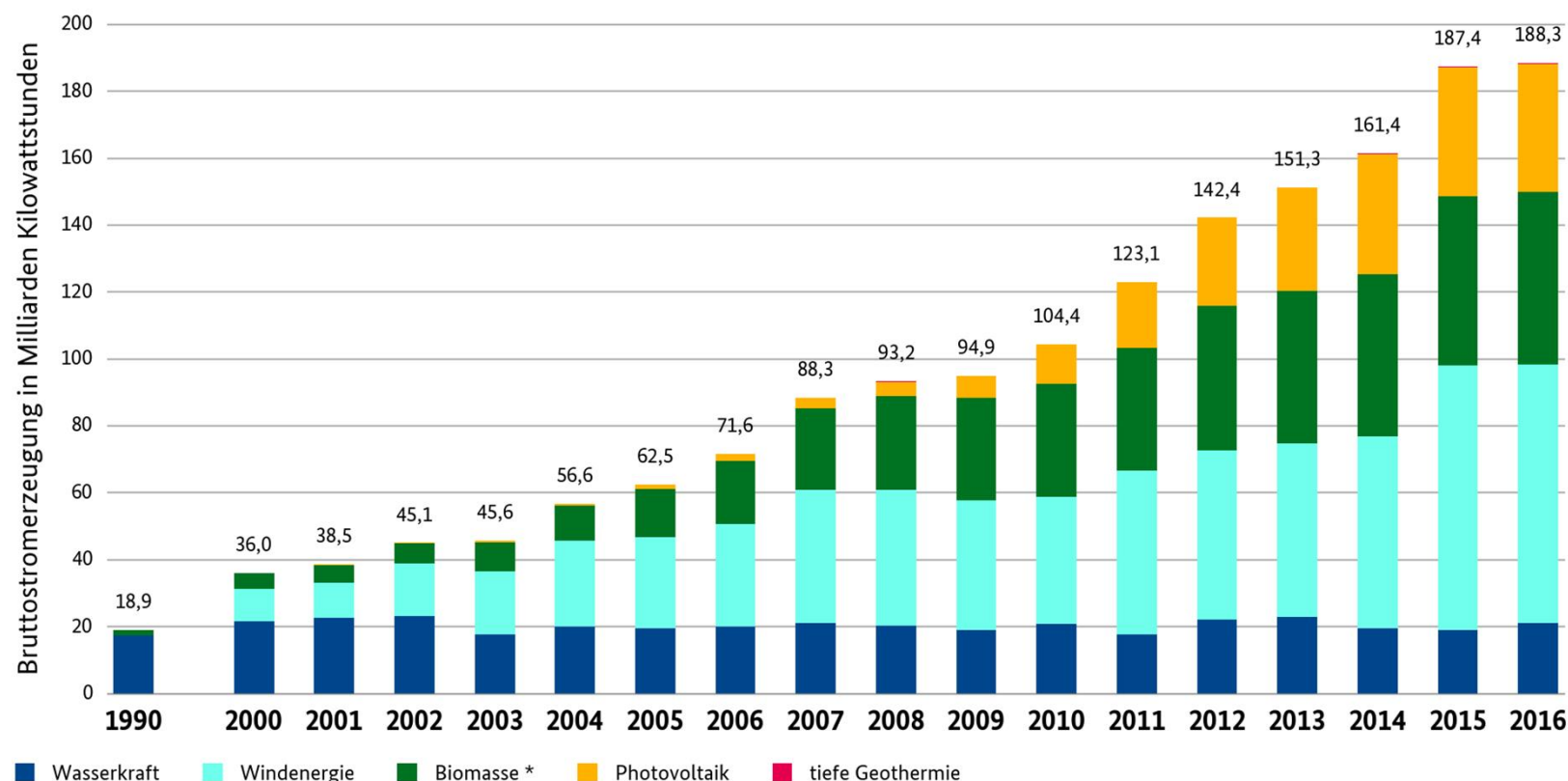
„Nicht-Erneuerbar“
„Nuklear“
„Nicht-Nuklear“

Nach Kaltschmitt, 2007, Renewable Energy: Technology, economics and environment, Berlin.

Ausbau der Erneuerbaren Energien (EE)

... führt zu veränderten Rahmenbedingungen im konventionellen Kraftwerkspark

Entwicklung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Deutschland



* inkl. feste und flüssige Biomasse, Biogas inkl. Biomethan, Klär- und Deponiegas und dem biogenen Anteil des Abfalls, ab 2010 inkl. Klärschlamm; BMWi auf Basis Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat); Stand: Februar 2017; Angaben vorläufig

http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Entwicklung_der_erneuerbaren_Energien_in_Deutschland/entwicklung_der_erneuerbaren_energien_in_deutschland_im_jahr_2016.html

Inhalt – Übung Erneuerbare Energieträger

- Potenzialbegriff

- **Wasserkraft**



- Windenergie



- Photovoltaik



- Bioenergie



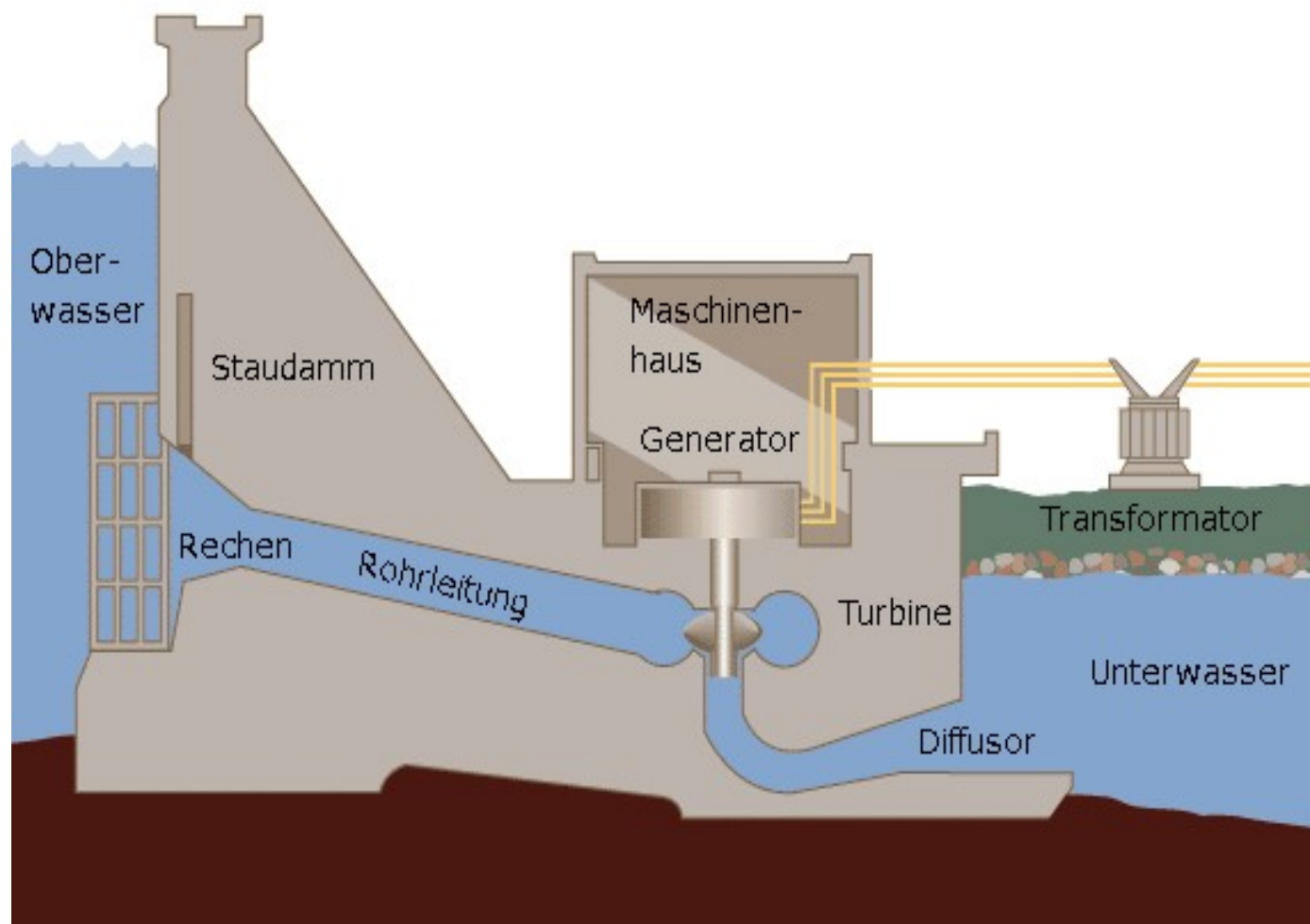
- Erdwärme



Übungsaufgaben 2 – Wasserkraft

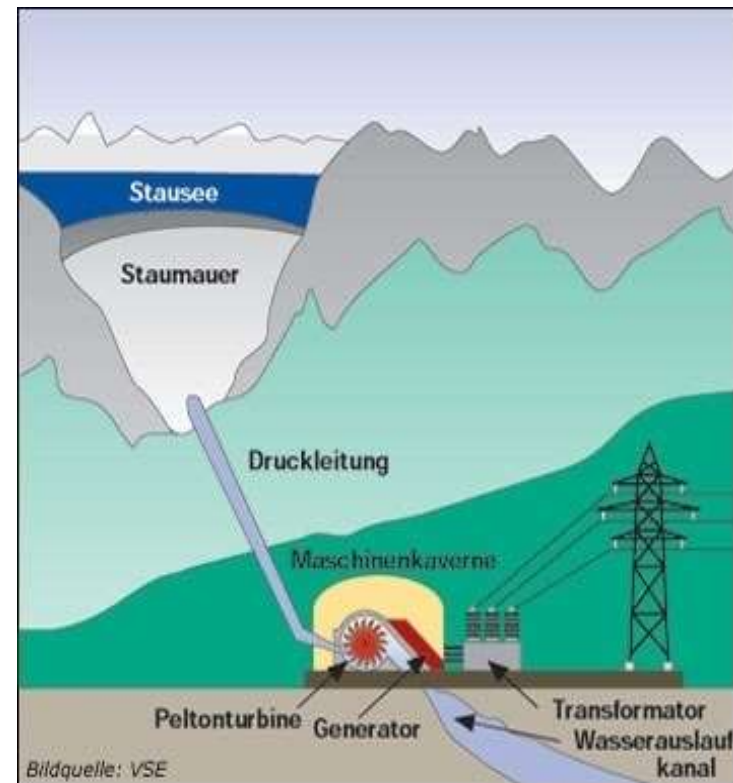
2. Welche Arten der Wasserkraftnutzung sind Ihnen bekannt?

Laufwasserkraftwerk



Quelle: Tennessee Valley Authority

Speicherkraftwerk

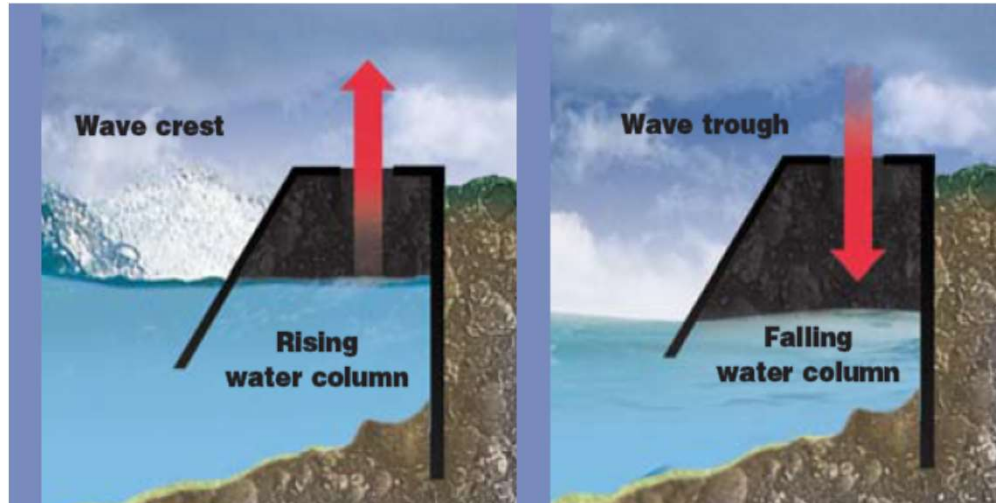


Pumpspeicherkraftwerk



Wirkungsgrad =
ca. 70%

Wellenkraftwerk



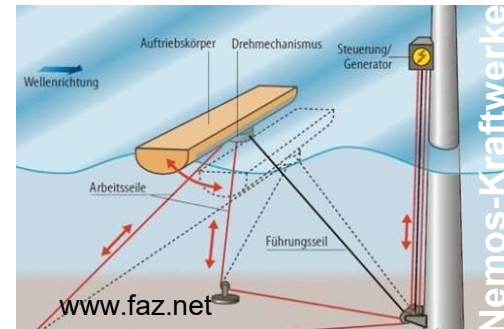
Quelle: Wavegen 2006



Quelle: WaveSwing 2006



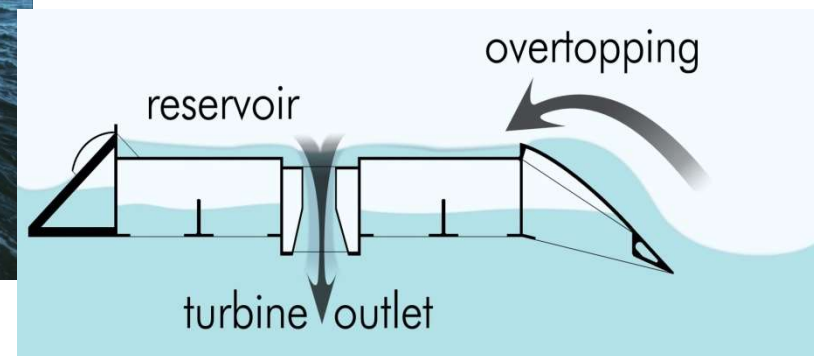
Quelle: Wave Dragon



Nemos-Kraftwerke



Quelle: Ocean Power Delivery Ltd. 2006



Meeresströmungskraftwerk



Projekt: SEAFLOW

Quelle: Uni Kassel 2006

Übungsaufgaben 2 – Wasserkraft

3. An der Weser soll ein Wasserkraftwerk errichtet werden. Die **Fallhöhe** an der Staustufe wird durch die Nordsee-Gezeiten bestimmt und beträgt an 165 Tagen des Jahres bei Tideniedrigwasser (Ebbe) etwa 5m und an 200 Tagen des Jahres bei Tidehochwasser (Flut) rund 2m.

Die durchschnittliche **Abflussmenge** beträgt $Q = 792.000 \text{ m}^3/\text{h}$.

Konstanten:

- Dichte des Wassers: $\rho = 1,0 \text{ kg/dm}^3$
- Erdbeschleunigung: $g = 9,81 \text{ m/s}^2$
- Gesamtwirkungsgrad: $\eta_{\text{ges}} = 85 \%$

Berechnen Sie die durchschnittliche elektrische Leistung, die dieses Wasserkraftwerk unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Wasserstände abgeben kann.

Übungsaufgaben 2 – Wasserkraft

- Berechnung der elektrischen Leistung einer Wasserkraftanlage:

$$P_{el} = Q * H * g * \rho * \eta_{gesamt}$$

$$[P_{el}] = \left[\frac{m^3}{s} \right] * [m] * \left[\frac{m}{s^2} \right] * \left[\frac{kg}{m^3} \right] * [1]$$

$$[P_{el}] = \left[\frac{1}{s} \right] * [m] * \left[\frac{m}{s^2} \right] * \left[\frac{kg}{1} \right] * [1] = \left[\frac{kg * m^2}{s^3} \right] = [W]$$

Inhalt – Übung Erneuerbare Energieträger

- Potenzialbegriff

- Wasserkraft



- **Windenergie**



- Photovoltaik



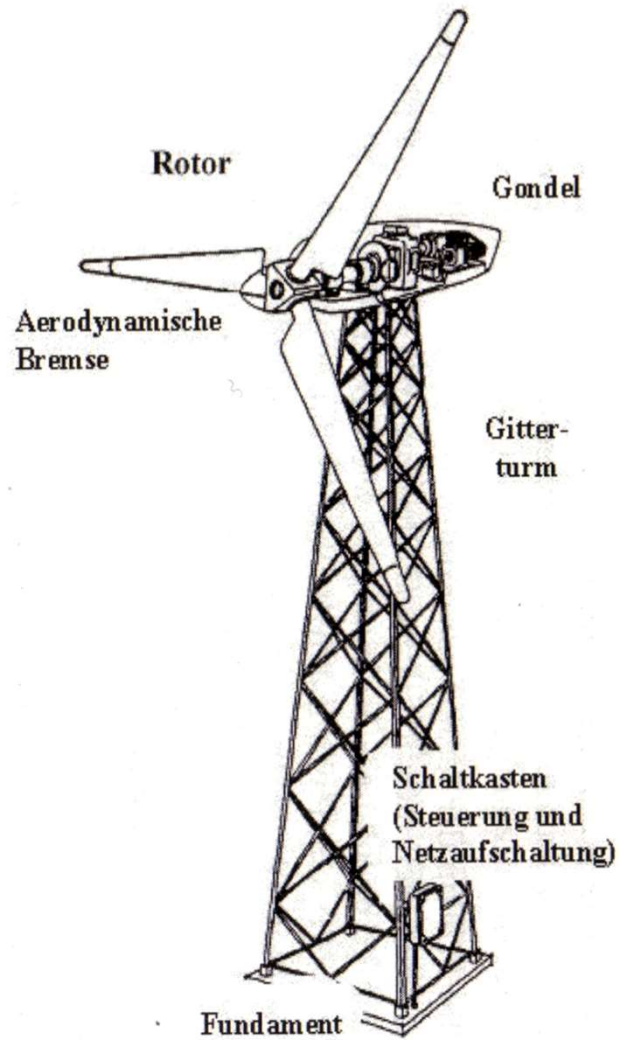
- Bioenergie



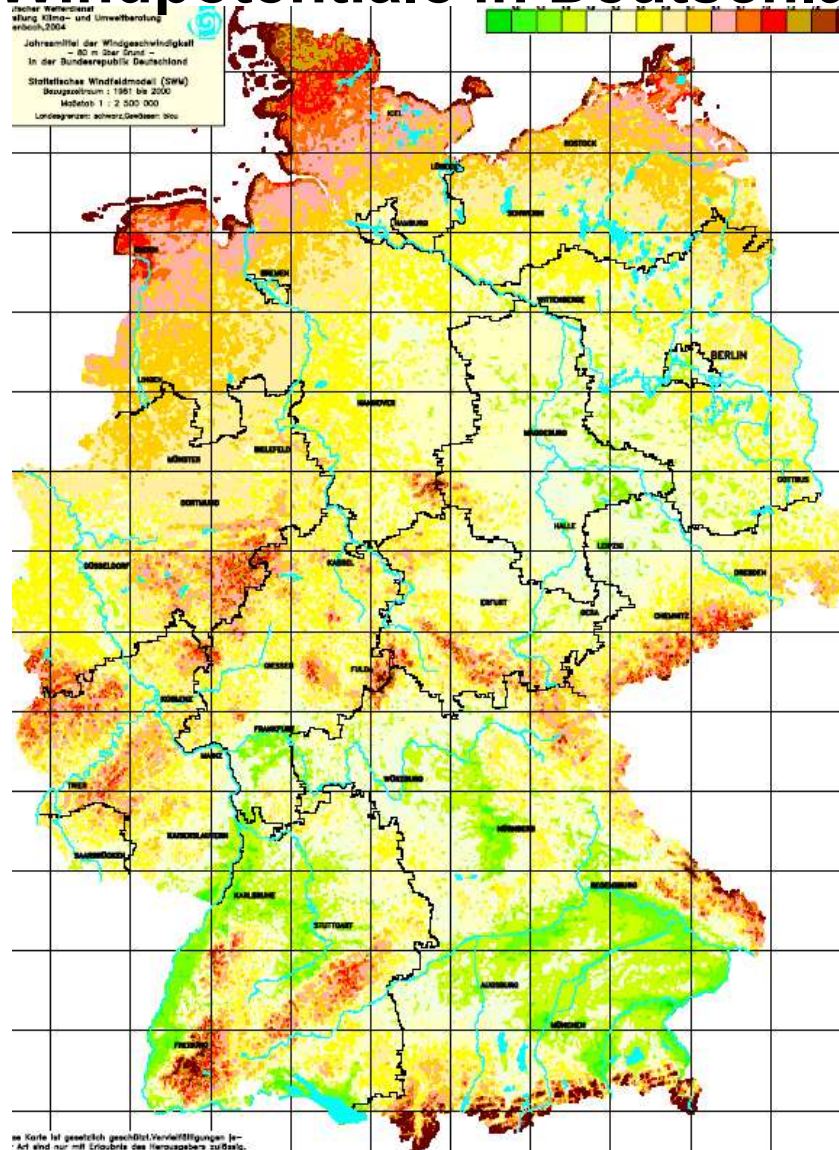
- Erdwärme



Windenergie



Windpotentiale in Deutschland

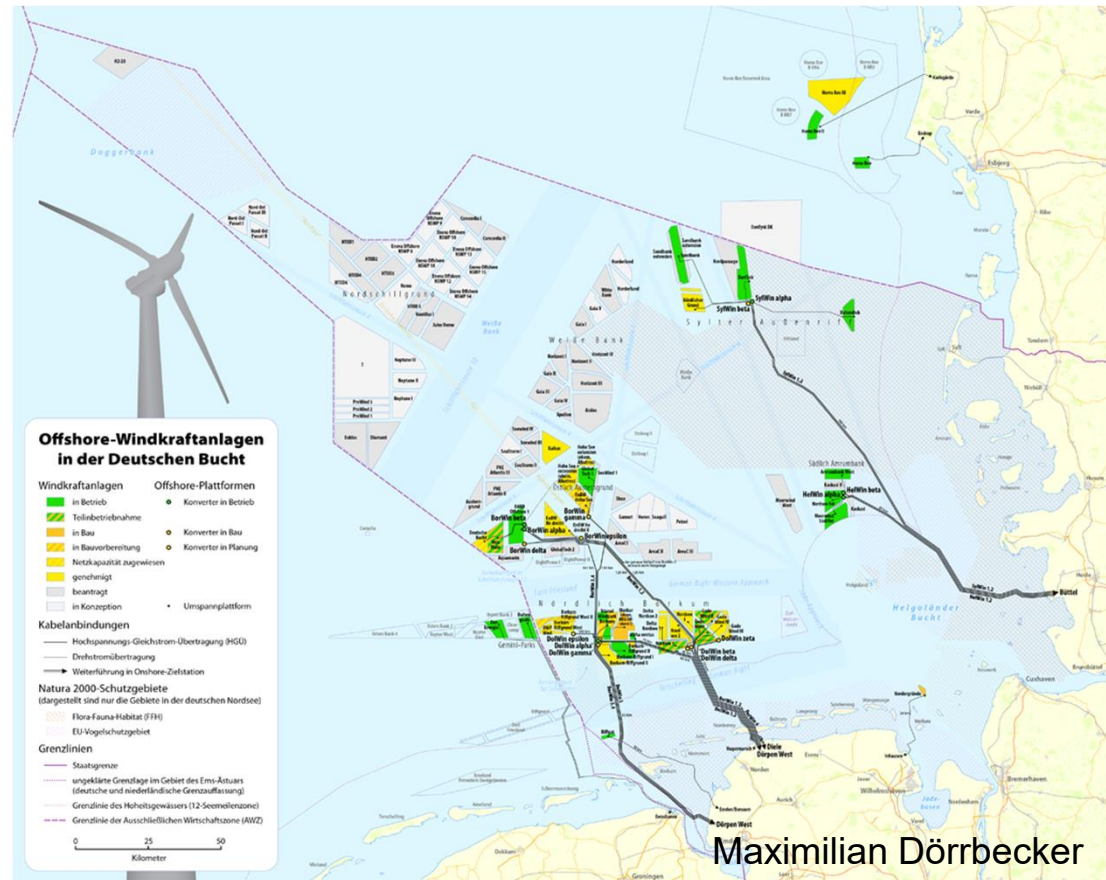


- Potentiale eher im Norden
- Nachfrage eher im Westen/Süden
 - → Netzprobleme
- Weiteres Problem:
Potential ≠ Ästhetisch, Kostengünstig,
Akzeptiert, ...

<http://www.dwd.de/windkarten>

Windenergie 2016

- Nabhöhe heute ca. 100 m
- Rotordurchmesser ca. 100 m
- Verschiedenste Bauformen
- Leistung: Off-Shore (bis zu 8 MW) und On-Shore (2 MW)
- 2016 Nennleistung: 487 GW
 - 1. China 169 GW
 - 2. USA 82 GW
 - 3. D 50 GW
 - 4. Indien 29 GW
 - 5. Spanien 23 GW
- 2016 Energieerzeugung D: ca. 88 TWh
- Trend in D: Off-Shore mit bis zu 5000 VLS



Übungsaufgaben 3 – Windenergie

4. In Deutschland waren zum 31.12.2008 insgesamt 20.301 Windenergieanlagen mit einer Gesamtleistung von 23.903 MW installiert. Die Leistung von Einzelanlagen wird maßgeblich durch die Windgeschwindigkeit bestimmt (siehe Formel).

$$P_{\text{WEA}} = \frac{1}{2} * \rho * A * v^3 * c_p$$

ρ Luftdichte (1,184 kg/m³ bei 25°C)

A Rotorfläche [m²]

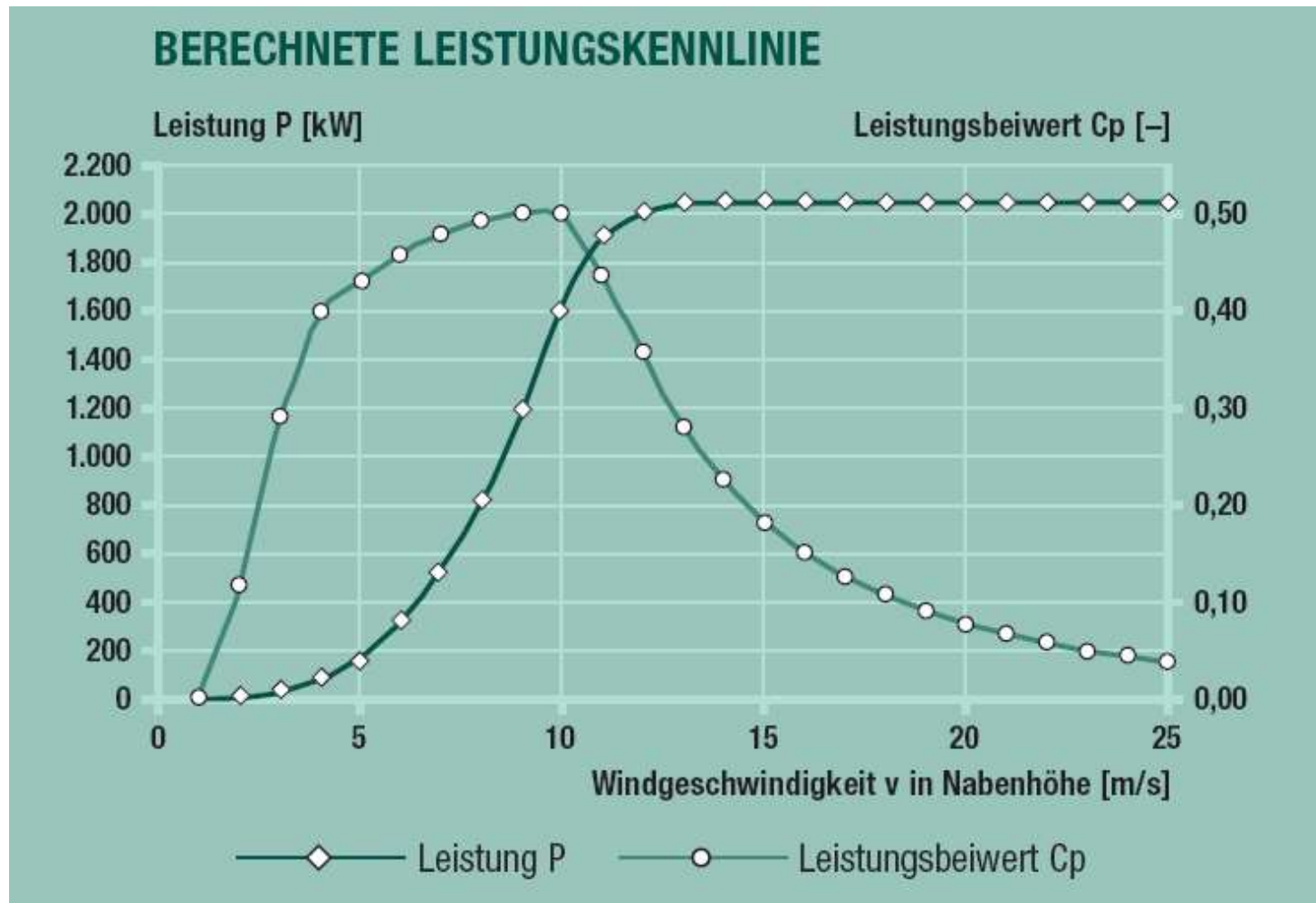
v Windgeschwindigkeit [m/s]

c_p Leistungsbeiwert (Anlagenkennwert)

Berechnen Sie den **theoretischen Jahresenergieertrag** (in kWh) folgender Windenergieanlagen bei Standardluftdichte bei 25°C und einer zeitlichen Jahresverfügbarkeit von 95 %:

- a) An der Küste: $v=8$ m/s; Rotordurchmesser $WEA_1=71$ m, $WEA_2=90$ m
- b) Im Binnenland: $v=4$ m/s, Rotordurchmesser $WEA_1=71$ m, $WEA_2=90$ m

Übungsaufgaben 3 – Windenergie



Übungsaufgaben 3 – Windenergie – Lösung

	8,0 m/s Wind	4,0 m/s Wind
71m Rotor	4.993 MWh	499 MWh
90m Rotor	8.024 MWh	802 MWh

Übungsaufgaben 4 – Windenergie

Ausgehend von der vorhergehenden Aufgabe:

5. Die Kennziffer „**Jahresbenutzungsstundenzahl**“ wird beschrieben als Anzahl der Stunden, an denen die Windenergieanlage ihre theoretisch mögliche Höchstleistung (Nennleistung) erreicht hat, wenn man annimmt, dass sie nur ihre Nennleistung erreicht hätte oder nicht in Betrieb gewesen wäre (Maßzahl zur vergleichenden Betrachtung mit anderen Kraftwerken).

Berechnen Sie die **Jahresbenutzungsstundenzahl** (auch **Volllaststunden** genannt) für die Jahresenergieerträge der Aufgabe 4 für eine Windenergieanlage mit einer elektrischen Nennleistung von 2.000 kW.

Übungsaufgaben 4 – Windenergie – Lösung

■ Lösung:

a. $VLh_{WEA-1} = 2497 \text{ h}$
 $VLh_{WEA-2} = 4012 \text{ h}$

b. $VLh_{WEA-1} = 249 \text{ h}$
 $VLh_{WEA-2} = 401 \text{ h}$

Inhalt – Übung Erneuerbare Energieträger

- Potenzialbegriff

- Wasserkraft



- Windenergie



- **Photovoltaik**



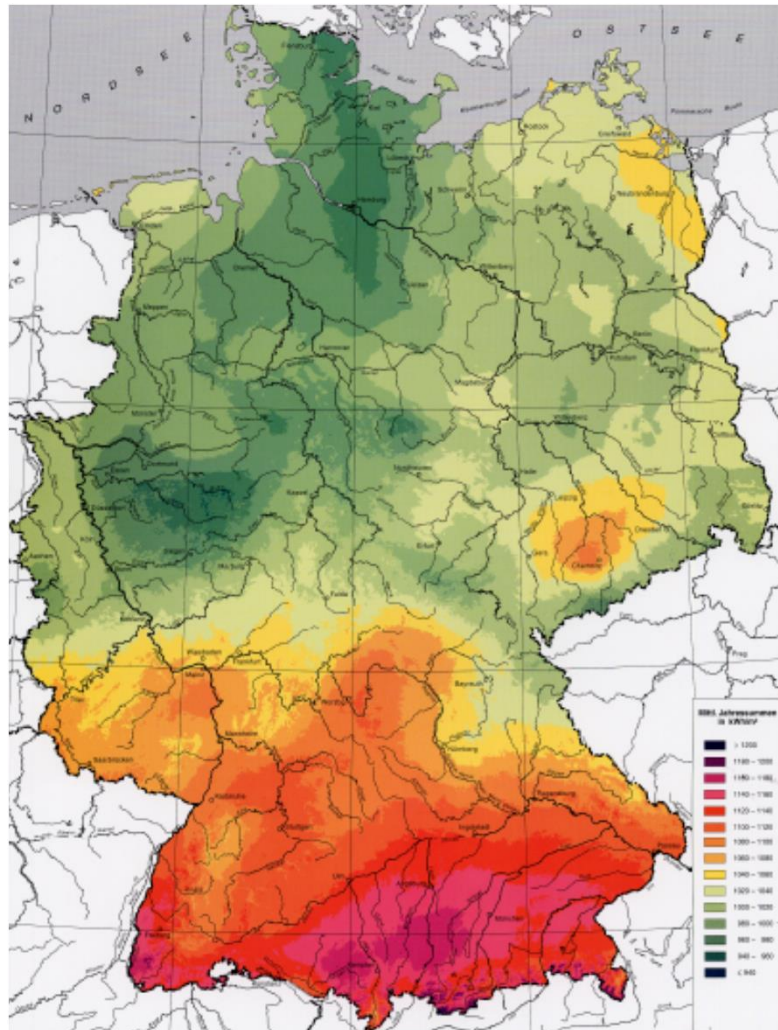
- Bioenergie



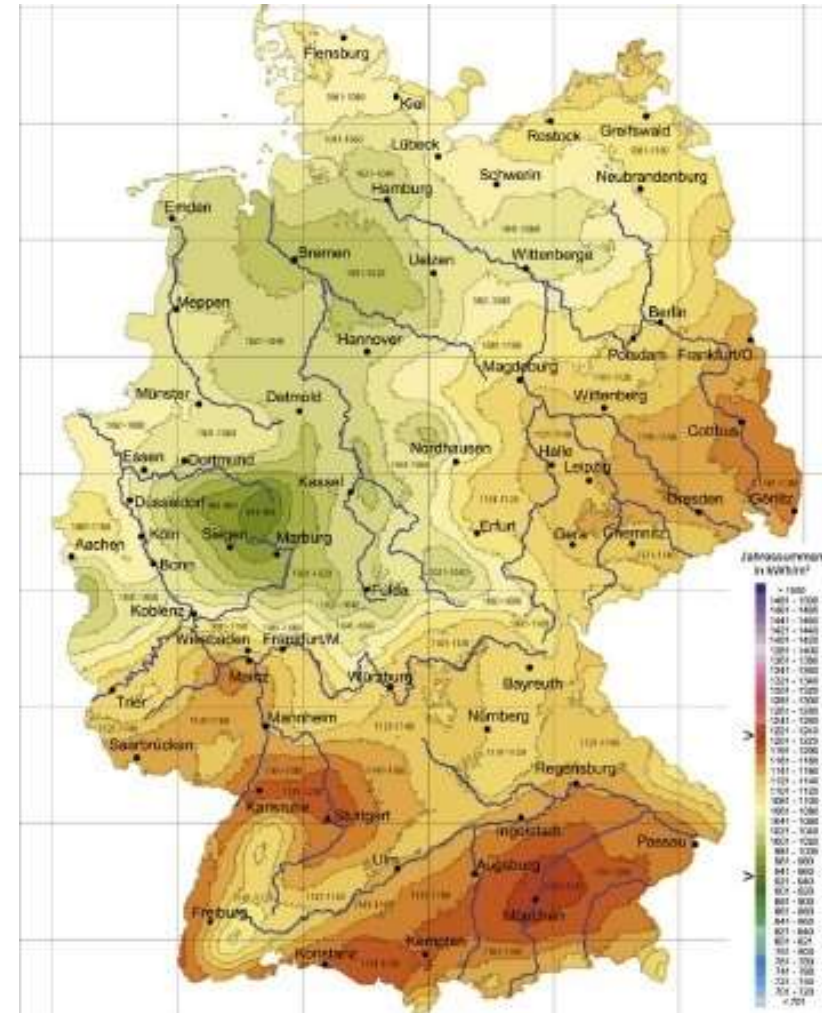
- Erdwärme



Solare Einstrahlung

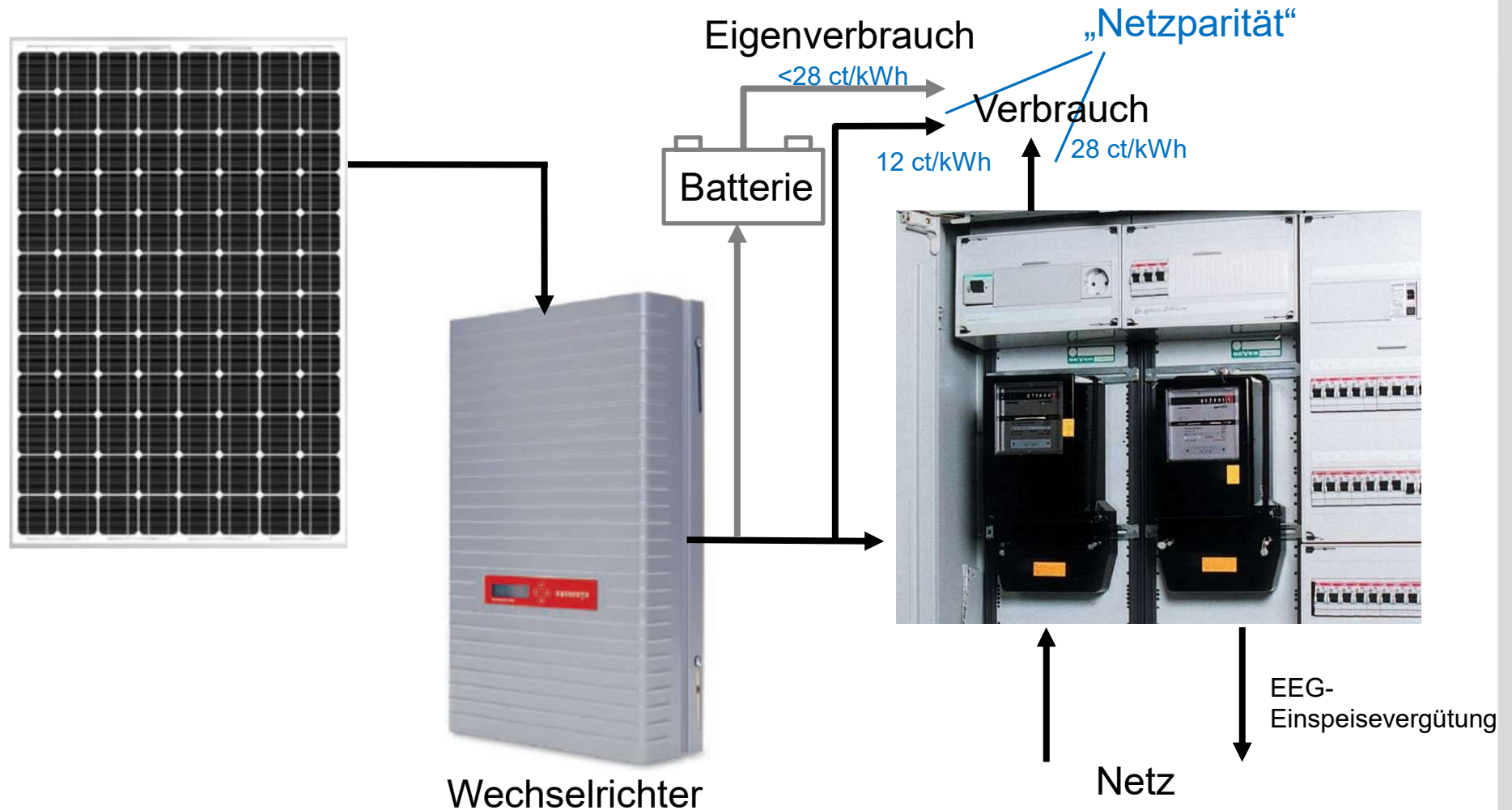


Quelle: Einstrahlung 1981-2000 (DWD 2004)



Quelle: Einstrahlung 2005 (DWD 2006)

Photovoltaik-Anlagen



Quelle: SOARWATT / sunways / Viessmann 2006

Übungsaufgaben 5 – Photovoltaik

- Der Weltprimärenergieverbrauch betrug 2007 etwa 465 EJ/a.
 - Welcher durchschnittlichen Leistung entspricht dies?
 - Würde es reichen Deutschland (Fläche: 357.050 km²) mit Photovoltaikanlagen ($\eta=10\%$) zuzubauen, um diesen Bedarf zu erzeugen? Gehen Sie von einer durchschnittlichen jährlichen Solarstrahlung in Höhe von 1.000 kWh/m²*a aus.

Übungsaufgaben 5 – Photovoltaik – Lösung

- Lösung:
 - a. $P = 14,76 \text{ TW}$
 - b. benötigte Fläche = $1.290.000 \text{ km}^2$
→ 3,6-fache der Fläche Deutschland

Übungsaufgaben 6 – Photovoltaik

- Die Einstrahlung auf die Fläche ($74,93 \text{ m}^2$) einer PV-Anlage betrage 950 kWh/m^2 (unter Berücksichtigung von Neigung und Ausrichtung (Azimuth)). Der Wirkungsgrad der Module betrage 15%. Die Kabel verursachen einen Verlust von 1% der elektrischen Arbeit. Der Wechselrichter soll einen Wirkungsgrad von 97% aufweisen.
 - a. Berechnen Sie die jährliche elektrische Arbeit (in kWh) dieser Photovoltaikanlage.
 - b. Berechnen Sie die spezifische Jahresarbeit (elektrische Jahresarbeit / Nennleistung) der PV-Anlage, wenn 1 PV-Modul mit einer Fläche von $1,27 \text{ m}^2$ eine elektrische Nennleistung von 170 W hat.

Übungsaufgaben 6 – Photovoltaik – Lösung

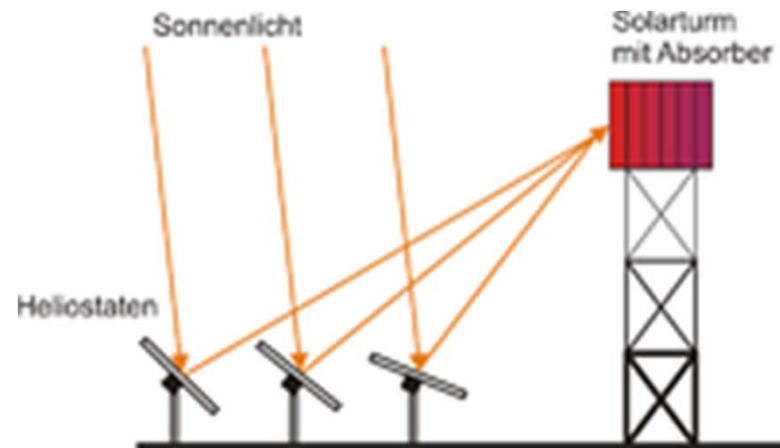
Lösung:

a. $W = 10.254 \text{ kWh}$

b. spez. Jahresarbeit = $1.022 \text{ kWh/kW} = 1.022 \text{ h}$ (Volllaststunden)

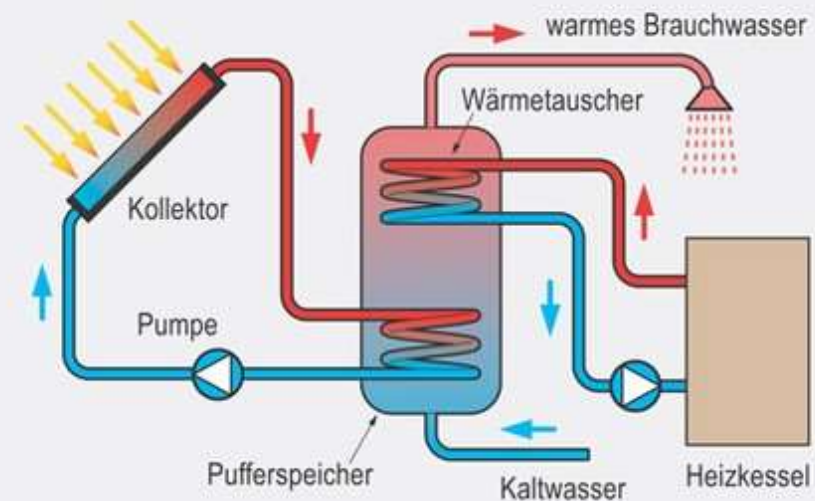
Solarthermie

Solarthermische Kraftwerke



Solarthermie für Haushalte

Funktionsweise der Solarthermie



Inhalt – Übung Erneuerbare Energieträger

- Potenzialbegriff

- Wasserkraft



- Windenergie



- Photovoltaik



- **Bioenergie**



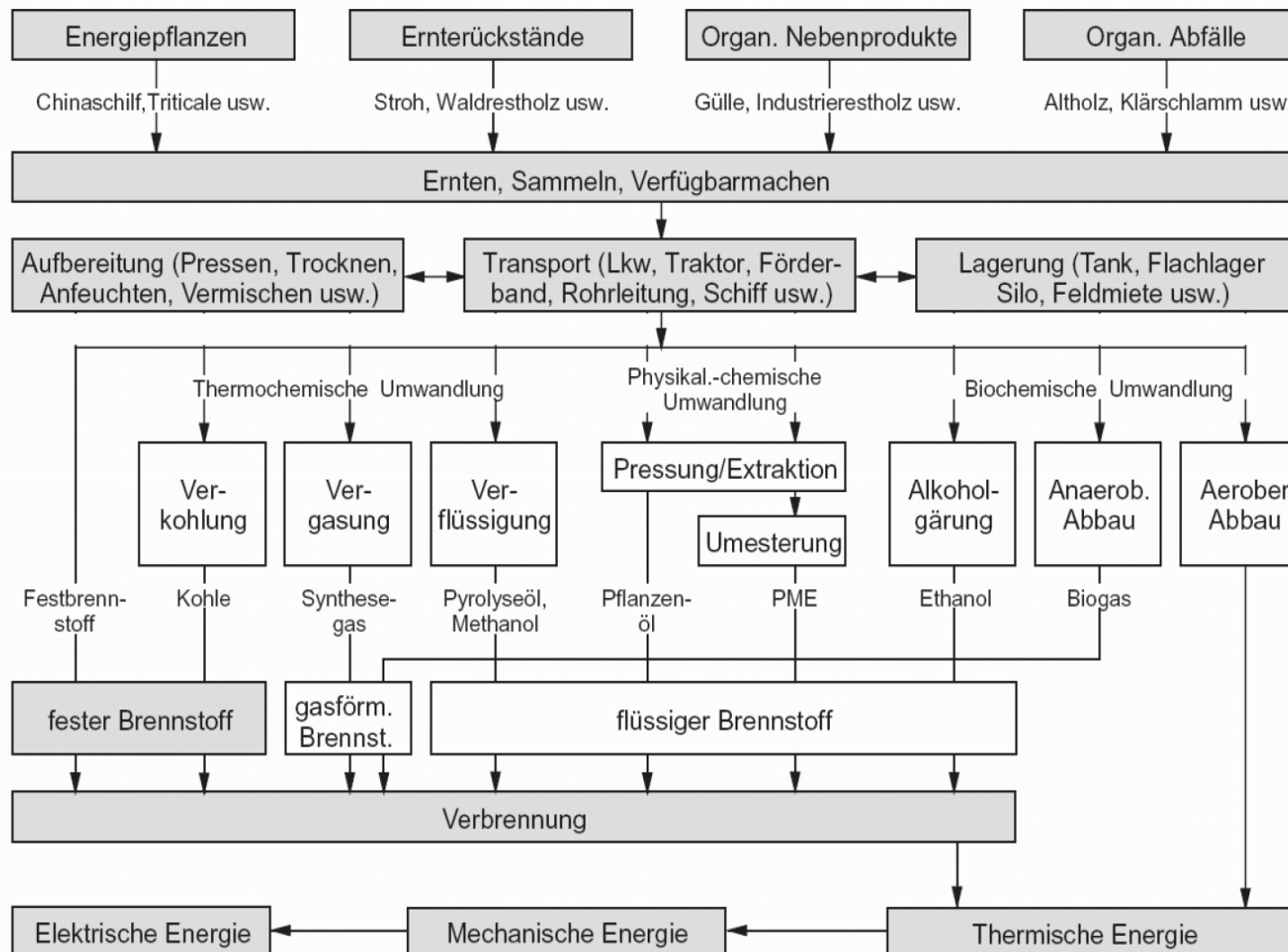
- Erdwärme



Übungsaufgaben 7 – Bioenergie

Welche Arten von Biomasse kennen Sie, die zur Bioenergieerzeugung eingesetzt werden können?

Biomasse



Quelle: Kaltschmitt et al. 2001

Biogasanlagen

Tabelle 1: Zusammensetzung und Eigenschaften von Biogas

Gaszusammensetzung

Methan	Vol.-%	50 - 75
Kohlendioxid	Vol.-%	25 - 50
Wasserdampf	Vol.-%	1 - 10
Stickstoff	Vol.-%	0 - 5
Sauerstoff	Vol.-%	0 - 2
Wasserstoff	Vol.-%	0 - 1
Ammoniak	Vol.-%	0 - 1
Schwefelwasserstoff	Vppm	50 - 6.000

Gaseigenschaften

		Biogas	Erdgas
Heizwert	kWh/m ³	6	10
Dichte	kg/m ³	1,2	0,7
Dichteverhältnis zu Luft	-	0,9	0,54
Zündtemperatur	° C	700	650
Verbrennungsgeschw.	m/s	0,25	0,39
Explosionsgrenzen	Vol.-%	6 - 12	5 - 15

Quelle: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe 2000

Inhalt – Übung Erneuerbare Energieträger

- Potenzialbegriff

- Wasserkraft



- Windenergie



- Photovoltaik



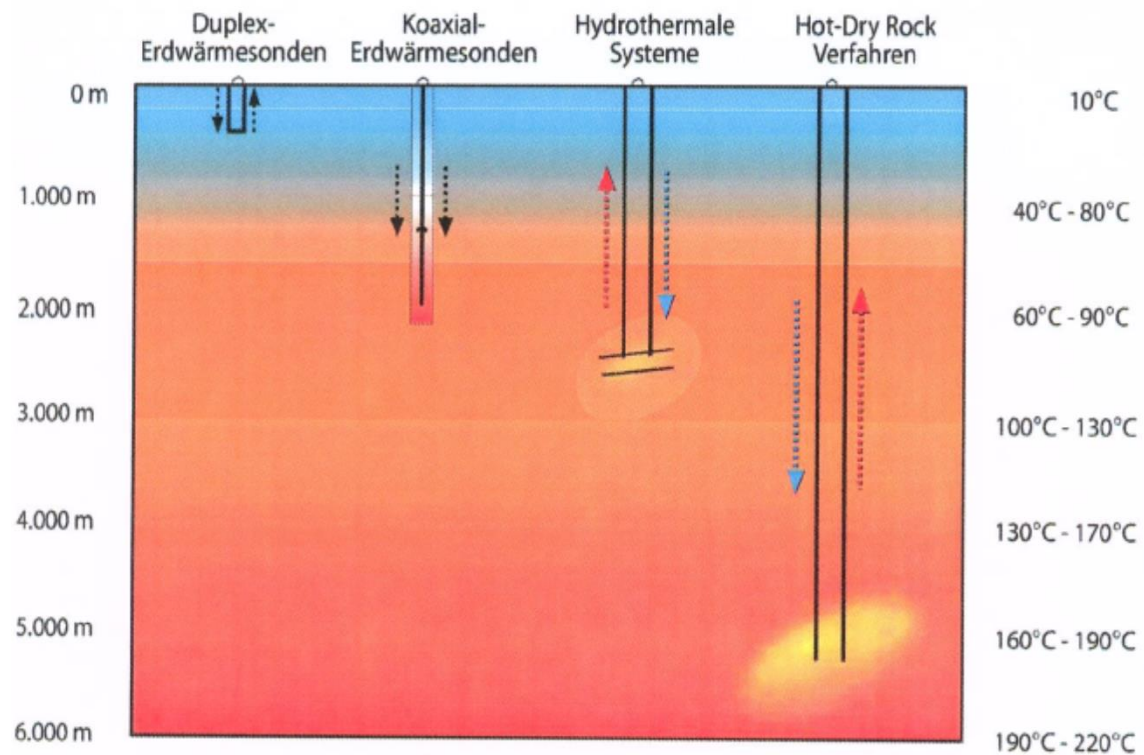
- Bioenergie



- **Erdwärme**



Nutzungskonzepte für Geowärme



Quelle: Green Energy Geotherm Power Fonds 2005

Potentiale der Geothermie

Norddeutsches Becken

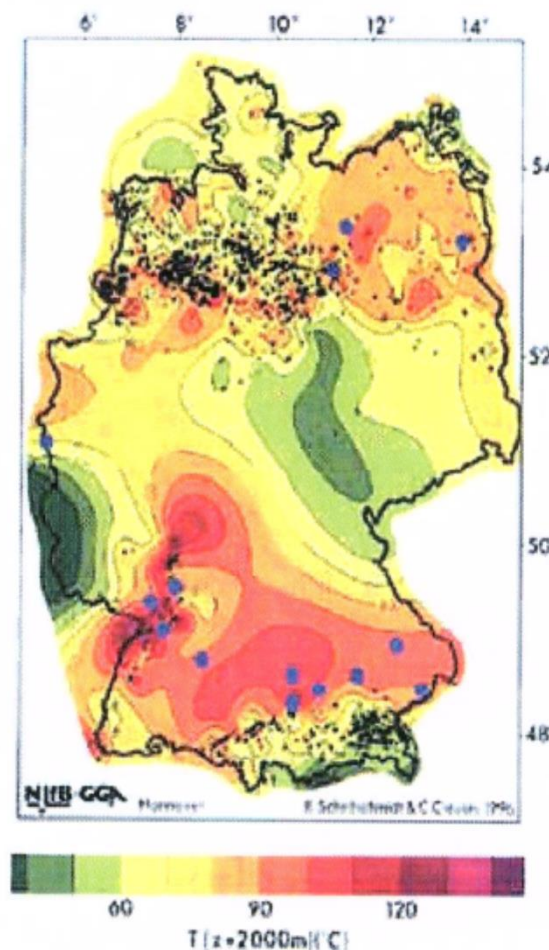
Energie: ~ 290 EJ
Tiefe: ~ 2.500 m
Temp.: < 100 °C

Bayerisches Molassebecken

Energie: ~ 60 EJ
Tiefe: ~ 3.500 m
Temp.: < 120 °C

Rheingraben

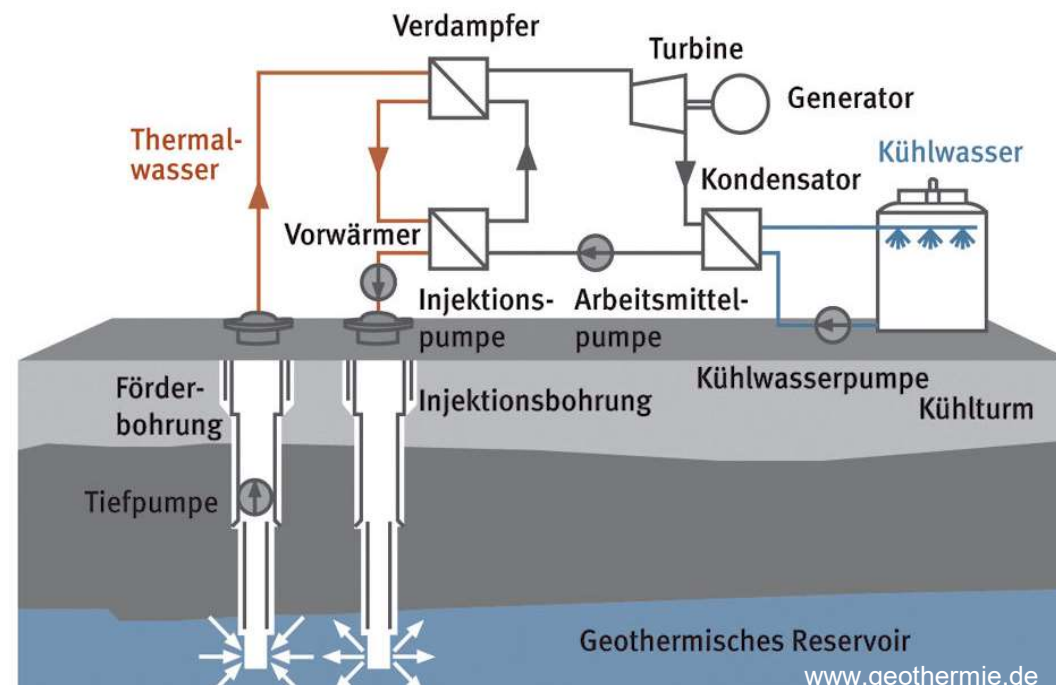
Energie: ~ 150 EJ
Tiefe: ~ 3.000 m
Temp.: < 180 °C



Quelle: Green Energy Geotherm Power Fonds 2005

Wärmenutzung und Stromerzeugung

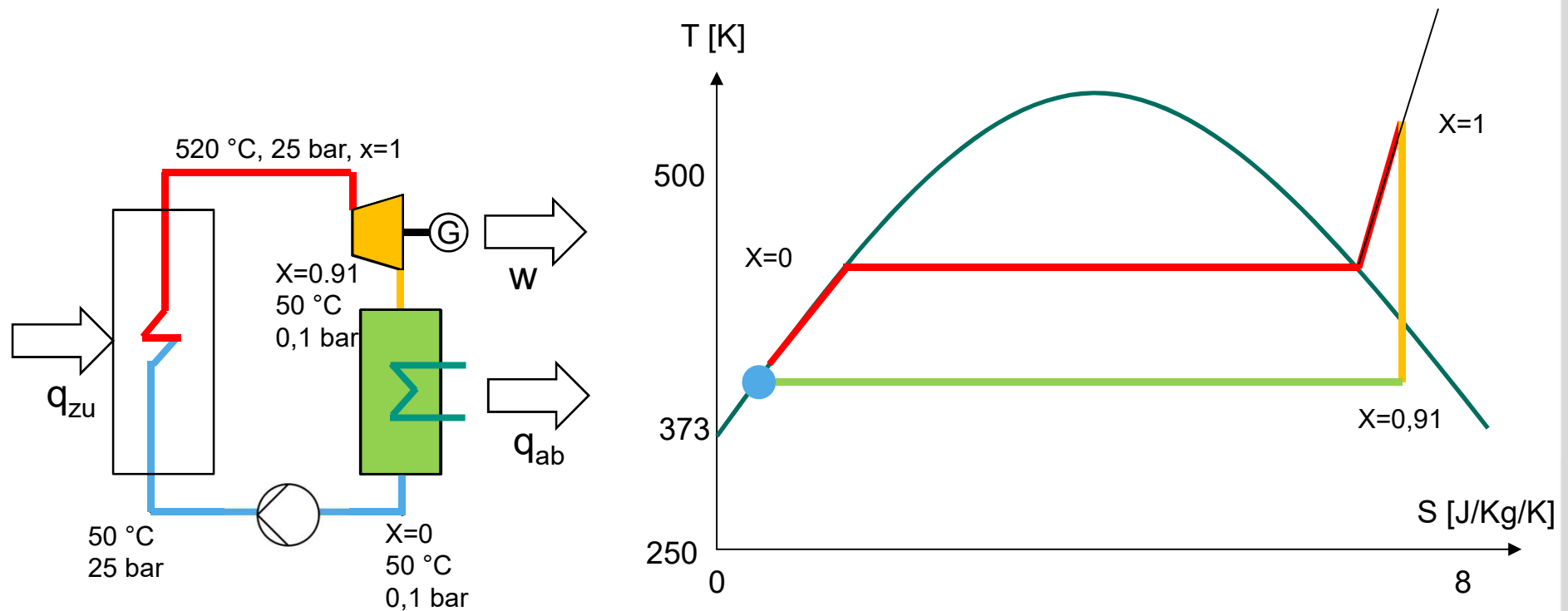
- Dampfkraftprozess um Wärme in Arbeit zu überführen
- Dampfkraftprozesstechnologien in der Tiefengeothermie:
 - Direkte Nutzung des (Hochtemperatur-)Thermalfluids als Trockendampf (Italien) bzw. single oder double Flash
 - Binäre Systeme: Organic-Rankine-Cycle(ORC)- oder Kalina-Verfahren
 - Hybridsysteme



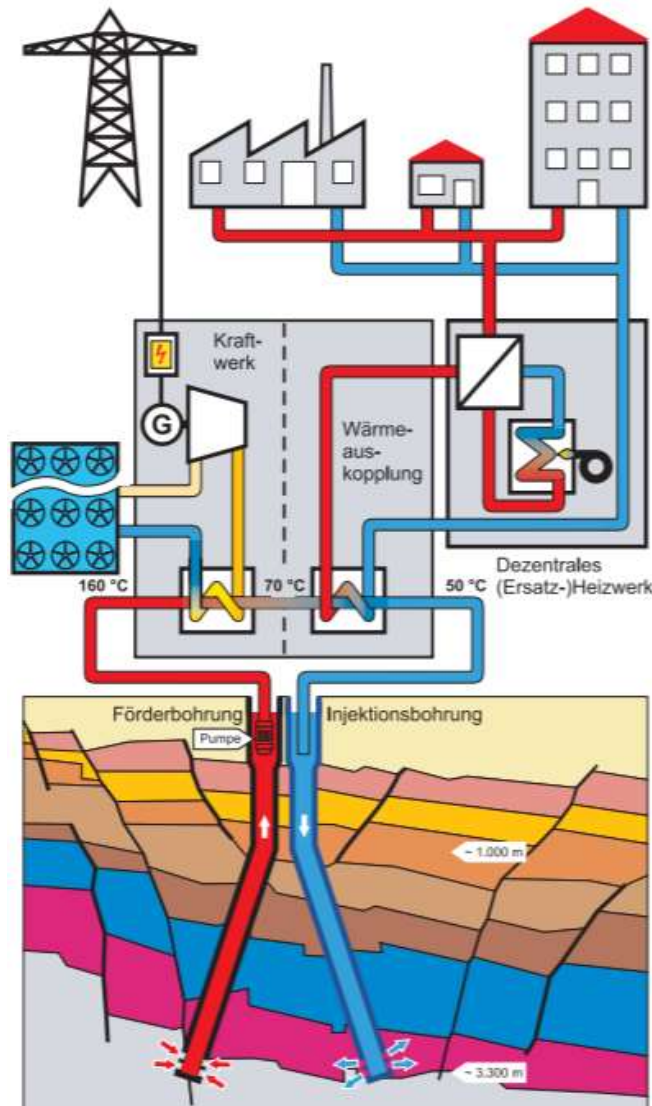
Prinzip der ORC-Anlage:

Schematischer Wärmekreislauf

- Theoretischer, vereinfachter Wärmekreislauf mit Wasser als Anlagenschema und T,s-Diagramm



Beispielanlage – Landau



Leistung: 3 MW_{el}
Energie: 22 GWh_{el}/a (9,2 GWh_{th})
Thermalfluid: Isopentan 
Eintrittstemperatur: 160°C
Reinjektionstemperatur: 50°C
Fördermenge: 50-80 l/s
Volllaststunden: 7.600h/a
Borlochtiefe: 3,3 km



www.bine.info

Wärmepumpen für Haushalte



Nutzung der Erdwärme

Luft-Wärmepumpe

Wirtschaftlichkeitsanalyse für eine PV-Anlage

- Annahme: Sie investieren in eine PV-Anlage mit 5 kW_{peak} (ca. 50 m²) auf Ihrem Hausdach mit den gegebenen Annahmen (s.u.).
- Ab wann lohnt sich die Anlage und wie viel CO₂ lässt sich einsparen? [Exemplarische Berechnung mit Kapitalwertmethode; vgl. **.XLSX-Datei**]

■ Mit:

Inv	Investitionssumme (inkl. Wartung, Installation, Wechselrichter etc.) = 8750 €	$x_{Netz,t}^{OPV}$	Strombezug vom Netz ohne PV = 3.500 kWh p.a.
$p_{Netz,t}$	Netzstrombezugspreis = 0,25 €/kWh	$x_{Netz,t}^{MPV}$	Strombezug vom Netz mit PV = 2.500 kWh p.a.
$p_{Netz,t}^{Einsp}$	Einspeisevergütung = 0,1288 €/kWh	$x_{Netz,t}^{Einsp}$	Stromeinspeisung ins Netz = 2.750 kWh p.a.
i	Kalkulationszinssatz = 5% [20 a Annuität = 0,08]	C_0^{mitPV}	Kapitalwert mit PV = -14.591,76 €
		C_0^{ohnePV}	Kapitalwert ohne PV = -14.667,64 €

Wirtschaftlichkeitsanalyse für eine PV-Anlage

- Mit Skizze der verwendeten Kapitalwertmethode [.XLSX-Datei]

- Allgemeine Formel:

$$C_0(i) = -I + \sum_{t=1}^T \frac{E_t - A_t}{(1+i)^t} + \frac{R}{(1+i)^T} \quad (1)$$

- Kapitalwert ohne PV:

$$C_0^{ohnePV} = - \sum_{t=1}^{20} \frac{p_{Netz,t} \cdot x_{Netz,t}^{OPV}}{(1+i)^t} \quad (2)$$

- Kapitalwert mit PV:

$$C_0^{mitPV} = -Inv - \sum_{t=1}^{20} \frac{p_{Netz,t} \cdot x_{Netz,t}^{MPV}}{(1+i)^t} + \sum_{t=1}^{20} \frac{p_{Netz,t}^{Einsp} \cdot x_{Netz,t}^{Einsp}}{(1+i)^t} \quad (3)$$

- Vergleich der beiden Kapitalwerte:

$$C_0^{ohnePV} < C_0^{mitPV} \quad (4)$$

CO₂-Emissions-Einsparung

- Spezifische CO₂-Emissionen pro kWh in D: 500 gr. CO₂/kWh
- Spezifische CO₂-Emissionen pro kWh für PV: 100 gr. CO₂/kWh (Annahme)
- Strombezug Netz: Ohne PV = 3.500 kWh p.a. (ca. 1,75 t CO₂ p.a.)
Mit PV = 2.500 kWh p.a. (ca. 1,35 t CO₂ p.a.)
- Lebensdauer PV-Anlage: 20 a
- CO₂-Einsparungen:
1,75 t – 1,35 t = 0,4 t p.a. → 8 t über 20 Jahre
- Zusatzfrage: Mit einer Batterie könnte der Eigenverbrauch gesteigert werden, wie hoch dürfte die Investition der Batterie maximal sein um den Kapitalwert der PV-Anlage (plus Batterie) noch weiter zu verbessern?