

# Renewable Energy Technologies I

## Hinweise zu den Kärtchen

Die Kärtchen wurden für die Prüfung nach dem WS 2005/2006 bei  
A. Wokaun und A. Steinfeld geschrieben.

Unterlagen:

Diverse Folien die in der Vorlesung verteilt wurden

Übungen

<http://eem.web.psi.ch/Teaching/Teaching.html>

Erstellt von: Thomas Kuster (5. Semester, D-UWIS)

Verfügbar via: <http://fam-kuster.ch>

# Ziele der Vorlesung

Diese Frage ist nicht ganz erst gemeint, da Lernziele jedoch sehr wichtig sind, solltest du wenigstens wissen was das Ziel gewesen wäre.

- Realistisches Potential der erneuerbaren Energien
- Vergleich mit anderen Optionen nach diversen Kriterien
- Verfügbarkeit der fossilen Energieträgern
- Rolle des Wasserstoffs als Energieträger
- Motivation der Vorlesung ist Ihr Interesse!  $\Rightarrow$  Die Vorlesung gibt es also nur wegen uns!
- Aktive Auseinandersetzung mit dem Stoff in den Übungen
- Erfolgreiche Teilnahme (das hast du bereits hinter dir).

# Analysierte Zeitpunkte

- Referenzpunkt (z. B. Kyoto-Vereinbarung)
- statistische Daten Verfügbar
- Zielzeitpunkt von Energie Schweiz und Kyoto
- $\approx$  Zeitpunkt des maximalen globalen CO<sub>2</sub> Ausstosses
- maximaler zeithorizont ökonomischer Modelle
- relevant für globale Klimaänderung; Zielzeitpunkt für weitreichenden Umbau des Energiesystem

**1990** Referenzpunkt (z. B. Kyoto-Vereinbarung)

**2000** statistische Daten Verfügbar

**2010** Zielzeitpunkt von Energie Schweiz und Kyoto

**2020**  $\approx$  Zeitpunkt des maximalen globalen CO<sub>2</sub> Ausstosses

**2050** maximaler zeithorizont ökonomischer Modelle

**2100** relevant für globale Klimaänderung; Zielzeitpunkt für weitreichenden Umbau des Energiesystem

# Energieverbrauch pro Person

$$1 \text{ kW} = 1 \text{ kWh} / \text{h} = 1 \text{ kWa} / \text{a}$$

**0.08 kW** Bedarf des menschlichen Organismus

**0.25 kW** Verbrauch des Jägers und Sammlers

**0.6 kW** sesshafter Ackerbauer (noch heute in wenig entwickelten Ländern)

**5 kW** Schweiz, Japan

**6 kW** Westeuropa

**11 kW** USA

Weltdurchschnitt heute:  $\approx 2 \text{ kW}$

- global 12 TW (6 Milliarden Menschen)
- Primärenergieverbrauch 370 ET =  $370 \cdot 10^{18} \text{ J}$  (1990 bis 2000)



# Energieverbrauch und Emissionen

## Typische Kennzahlen

410 EJ =  $410 \cdot 10^{18}$  J zusätzlich 20-60 EJ (5-15%) nicht-kommerziele

Biomasse

410 EJ =  $410 \cdot 10^{18}$  J entsprechen:

- 12 Milliarden Tonnen (Gt) Steinkohleeinheiten
- 9 Milliarden (Gt) Öläquivalenten

⇒

- 8 Gt Kohlenstoffemissionen (6 Gt energiebedingt und 2 Gt aus Brandrodungen)

# Energieträger und ihre Anteile am globalem Energieverbrauch

10

*Antwort*

**Kohle** 25% (Anteil abnehmend)

**Erdöl** 38% (Anteil seit  $\approx$  konstant)

**Kernenergie** 7%

**Wasserkraft** 6%

# Empfehlungen des IPCC

Langform von IPCC

- globaler Temperaturanstieg auf  $+2^\circ$  beschränken
- CO<sub>2</sub> Konzentration auf 550 ppmv stabilisieren
- Emission bis 2100 auf 5 Gt C/a (Heute 6 Gt + 2 Gt)
- Ziel  $< 1$  Gt C/a im Jahr 2200 (EU im Jahr 2100), dann weitere Absenkung

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

# Verfügbarkeit fossiler Ressourcen

- Produktion folgt der Entdeckung der Reserven mit  $\approx 30$  Jahren Verspätung.
- Wenige echte neue Erdölfunde seit 1980
- Förderpeak des Erdöls innerhalb der nächsten 10 Jahre



# Erdöl

- URR
- Peak of Oil

**URR (Ultimate Recoverable Resources)** Abschätzung der Summe allen förderbaren Öles weltweit. URR = 1950 bis 3500 Gb

**Peak of Oil** Förderpeak bei der Hälfte der URR: jetzt falls URR = 2000 Gb, 2025 falls URR = 3500 Gb

1 Gb = 1 Gigabarrel =  $10^9$  barrel

1 Tonne = 7.3 barrel

1 barrel = 158.987294928 l falls es ein U. S. Fass ist;-)

# Erdgas

Reichweite der Reserven und Ressourcen

**Reserven** statische Reichweite 65 Jahre

**Ressourcen** zusätzliche Reichweite 80 Jahre

**Abbau der Methanhydrate** ökonomisch unwahrscheinlich, ökologisch problematisch

# Reserven und Ressourcen

- Kohle
- Erdöl
- Erdgas
- Uran

	Kohle	Erdöl	Erdgas	Uran
Reserven 2001 [EJ]	19600	6400	5100	1600
Reichweite* [a]	200	44	55	60
Ressourcen 2001 [EJ]	116000	3500	6900	>1000
Reichweite** [a]	300		18	?

\* bezogen auf heutige Jahresförderung

\*\* relativ zum Total von 382 EJ

# Heizwert und Kohlenstoffintensität

- Steinkohle
- Erdöl
- Erdgas
- Biomasse

	Kohle	Erdöl	Erdgas	Biomassen
unterer Heizwert [MJ/kg]	29	42	49	18
oberer Heizwert [MJ/kg]	30	44	54	
kg CO <sub>2</sub> /MJ	0.09	0.08	0.05	neutral



# Kaya Gleichung

$$\text{Totale CO}_2\text{-Emissionen} = \text{Weltbevölkerung} \cdot \frac{\text{GDP}}{\text{Person}} \cdot \frac{\text{Energie}}{\text{GDP}} \cdot \frac{\text{CO}_2}{\text{Energie}}$$

**GDP (Gross domestic product)** Bruttoinlandsprodukt, Maß für die wirtschaftliche Leistung eines Landes

# Optionen zur Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstosses (Mitigation)

- Beschränkung der Nachfrage nach Energiedienstleistungen  $\Rightarrow$  Verhaltensänderung, Wertesystem
- Höherer Effizienz, beim Erbringen von Energiedienstleistungen
- Substitution der Primärenergie-Rohstoffe durch solche mit geringerer Kohlenstoffintensität  $\Rightarrow$  Einsatz von Erdgas und von erneuerbaren Energien
- CO<sub>2</sub>-Sequestrierung: Rückhalten des CO<sub>2</sub> vor der Emission in die Atmosphäre (geologisch, in Ozeanen, in Senken)

Mitigation (engl.) = Milderung

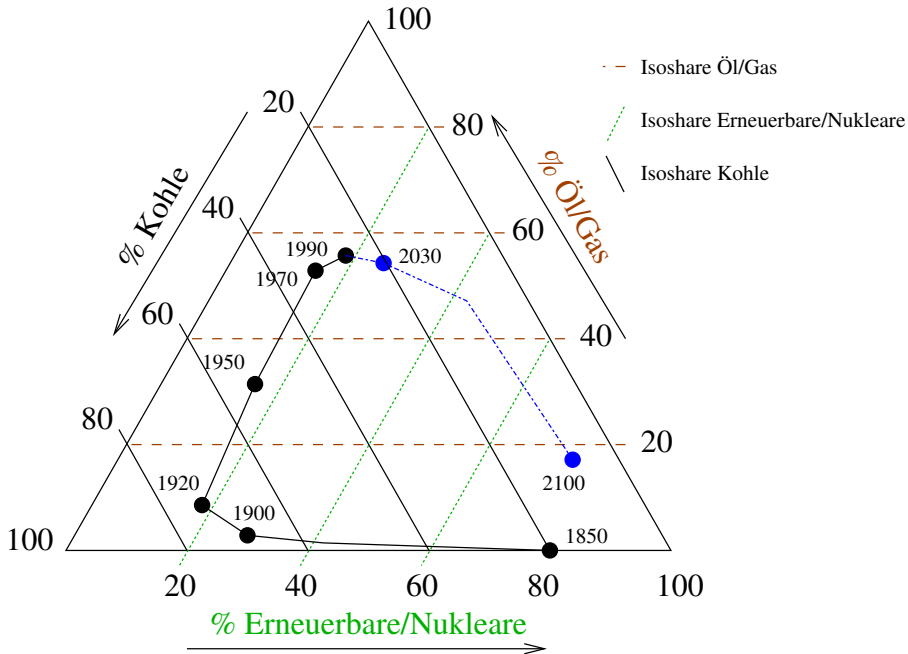
# Effizienzsteigerung

Geringere Verluste bei der Umwandlung von...

- Primärenergie in Sekundärenergie (z. B. Rohöl  $\Rightarrow$  Benzin)
- Sekundärenergie in Endenergie (z. B. Erdgas  $\Rightarrow$  Elektrizität)
- Endenergie in Nutzenergie (z. B. Benzin  $\Rightarrow$  mechanische Arbeit)

Erbringen der Dienstleistung mit weniger Nutzenergie (z. B. Transport in Leichtfahrzeugen, Telekommunikation (Videokonferenz anstelle über den grossen Teich zu fliegen))

# Entwicklung der Primärenergieverteilung





# Kyoto Trends

Szenarien mit CO<sub>2</sub>-Politik

**Annex I Regionen** Kyoto Ziele sind in 2010 erfüllt und nachher 5%  
Reduktion pro Decade

**Non-Annex I Regionen** Ziele sind 2030 erfüllt und nachher 5%  
Reduktion pro Decade

**Nichtteilnehmende Regionen** Nehmen ab 2030 oder 2010 teil???

# Externe Kosten

- CO<sub>2</sub>
- SO<sub>2</sub>
- NO<sub>x</sub>
- PM<sub>10</sub>

Externe Kosten in folgen Luftverschmutzung pro Tonne

Region/Schadstoffe	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>
EU-15 (2004 in EUR <sub>2000</sub> )	2940	2910	117000
Schweiz (2000, in USD)	7500	9400	11000
Asien (2000, in USD)	2000	1100	2300
Südamerika (2000, in USD)	150	200	450
Welt (???, in ???)	1800	1200	2500

Wieso kostet der Feinstaub in Asien nur knapp mehr als SO<sub>2</sub> und in Europa kostet er deutlich mehr? Wieso sind die Kosten für SO<sub>2</sub> in der Schweiz viel höher?

Diskontierte Kosten pro Tonne CO<sub>2</sub>:

	Mittelwert	Maximum
2000 in USD	2.4	16.4
2004 in EUR <sub>2000</sub>	19	

# Szenario der 2000 W-Gesellschaft

**Istzustand**

- Energie pro Kopf und Zeit im globalen Durchschnitt = 2000 W
- 6 Gt energiebedingte Kohlenstoffemissionen
- 6 Milliarden Menschen

	C [t]	CO <sub>2</sub> [t/(Person Jahr)]
Global	1	3.66
Schweiz	2	7
USA	5	18

Habe eine Notiz 6 anstelle 7 bei

der Schweiz, geht dann aber nicht auf?

**Szenario für 2100**

**Menschen** 10 Milliarden

**zulässige Emissionen** gemäss IPCC  $\approx 3 \text{ Gt C}$  (= 50% der heutigen Energieemissionen) =  $0.3 \text{ t C} = 1 \text{ t CO}_2 / \text{Person und Jahr}$

$\Rightarrow$  entspricht 2000 W-Gesellschaft mit 600 W fossilem Anteil.

# Ziele des CO<sub>2</sub> Gesetz der Schweiz

Das CO<sub>2</sub>-Gesetz legt den Grundstein für eine nachhaltige Energie- und Klimapolitik. So müssen bis ins Jahr 2010 die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Verbrennung fossiler Energien insgesamt um 10% unter das Niveau von 1990 gesenkt werden.

Zudem sind Teilziele verankert für Brennstoffe (minus 15%) und Treibstoffe (minus 8%).



# Zusätzliche Argumente für die 2000 W-Gesellschaft

## Preise der fossilen Energieträger

- Gefahr exorbitant steigender Erdölpreise bei Engpässen
- wirtschaftliche Verwerfung als Folge

## Perspektive der Länder in der Entwicklung, zunehmende militärische Macht Chinas und Indiens

- Adaptation für Entwicklungsländer schwierig
- Druck auf Industrieländer zur starken CO<sub>2</sub>-Reduktion
- Bessere Chancen für Entwicklungsländer durch Anstrengungen der Industrieländer (Export neuester Technologien)

⇒ 1. Weltländer müssen ihre Hausaufgaben machen damit 2. und 3. Weltländer mitmachen (**Vorbildfunktion**)

# Nachhaltigkeits-Szenario globales Primärenergie-Portfolio langfristig

neue erneuerbare Energien	Wind	5-10%
	Geothermie	5-10%
	Solarenergie	10-15%
traditionell erneuerbare Energien	Biomasse	25%
	Hydroelektrizität	10%
nichterneuerbare Energien	Kernenergie	10-15%
	fossile Brennstoffe	25-30%

Annahmen:

- Welbevölkerung 10-12 Milliarden
- Energieverbrauch 2000 W
- CO<sub>2</sub>-Emissionen 3 Gt C/a

# Kriterien für die Bewertung von Energiesystemen

- globales Potential, räumliche und zeitliche Verfügbarkeit
- Anwendungsziel (Energiestufe)
  - Primärenergie (z. B. Biomasse)
  - Sekundärenergie (z. B. Methan aus Biomasse), Energie nach der ersten Transformationsstufe
  - Endenergie (z. B. Ecogas an der Tankstelle), Energie welche gekauft werden kann
  - Nutzenergie (z. B. Beförderung mit mechanischer Energie), Energie welche genutzt wird z. B. warmer Raum, Licht. . .
- Energierückzahlzeit, Erntefaktor (Verhältnis produzierte / eingesetzte Energie)
- Energiebereitstellungskosten (siehe Kärtchen (45))
- Rückkopplung
  - Energieaufwand abhängig vom technologischen Reifegrad
  - Kosten abhängig von der installierten Kapazität
  - Ökobilanz abhängig vom Typ der eingesetzten Energie (z. B. welcher Strom(-Mix) wurde zur Herstellung verwendet)

# Kosten der Energiebereitstellung

- Brennstoffkosten (auch wichtig z. B. bei Biomasse)
- Kosten für Betrieb und Unterhalt
- Wirkungsgrad  $\eta$  und jährliche Nutzungsdauer
- Investitionskosten pro installierte Leistung (\$/kW)
  - Verzinsung und Rückzahlung des Fremdkapitals
  - Annuitätenmethode: Zinszahlung und Amortisation gleichmässig über die Produktionszeit verteilt



# Prinzip der Annuität

Investiertes Kapital  $C$  muss während der Laufzeit der Anlage von  $n$  Jahren zurückgezahlt werden. Um (inflationsbereinigt) zeitlich konstanten Energiebereitstellungspreis zu berechnen, soll die Rückzahlung in  $n$  gleich grossen Tranchen  $C \cdot a$  erfolgen (d. h. die Summe aus Zins und Amortisation ist konstant).

$$\sum_{j=1}^n Ca(1+i)^{-j} = Ca \frac{1 - (1+i)^{-n}}{(1+i)(1 - (1+i)^{-1})}$$

$$\Rightarrow a = \frac{i}{1 - (1+i)^{-n}}$$

# Produzierte Energie pro Jahr

**Normierung** Praktischerweise wird die Berechnung auf 1 kW installierte Leistung normiert. Die Investitionskosten  $C$  haben dann die Dimension  $\$/\text{kW}$ .

**load factor** Die Anlage (1 kW) ist während eines Bruchteils des Jahres produktiv, dieser Anteil wird mit  $lf$  (load factor) bezeichnet (z. B. Photovoltaikanlage im Mittelland  $lf \approx 0.1$ )

**Jahresproduktion**  $P \cdot lf \cdot \underbrace{8766 \text{ h}}_{\text{Stunden eines Jahres}}$ , in den Folien wird nur die Jahreslaufzeit  $E$  errechnet (ohne  $\cdot P$ )?

# Kosten pro Jahr

**Annuitätskosten**  $C \cdot a$

**Operation & Maintenance (OM)** Kosten für Betrieb und Unterhalt.

Angabe in % des investierten Kapitals:  $C \cdot b$  oder auch direkt in \$/kWh.

**Brennstoffkosten** =  $E \cdot P_{\text{Brennstoff}}/\eta$  wobei  $P_{\text{Brennstoff}}$  = Brennstoffkosten in \$/kWh und  $\eta$  = Wirkungsgrad (Brennstoff  $\rightarrow$  Sekundärenergie)

$\Rightarrow$  Jahreskosten =  $C \cdot a + C \cdot b + E \cdot P_{\text{Brennstoff}}/\eta$

- $C \cdot a$ : höher bei erneuerbaren Energien
- $E \cdot P_{\text{Brennstoff}}/\eta$  meistens = 0 bei erneuerbaren Energien ( $\neq 0$  falls z. B. Holz verbrannt wird).

# Energiebereitstellungskosten

$$\text{Gestehungskosten } G' = \frac{\text{Gesamtkosten}}{\text{erzeugte Energie}}$$

$$G' = \frac{C \cdot a}{lf \cdot 8766 h} + \frac{C \cdot b}{E} + P_{\text{Brennstoff}}/\eta$$

Naja, ich habe das immer auf einen anderen Weg berechnet.



# Technologisches Lernen

Die spezifischen Investitionskurven  $C$  sinken durch

- Forschung und Entwicklung (learning by research and development)
- Installation (learning by doing, economy of scale)

Lernrate  $LR$  = prozentuale Abnahme von  $C$  bei Verdopplung der installierten Kapazität.

Fortschrittsrate: progress ratio

$$pr = 1 - LR/100$$

Lernraten  $LR$ , abgeschätzt aus statistischen Daten:

fortgeschrittene Kohle- und Kernkraftwerke	5%
GCCT (Gas-Kombikraftwerke)	10%
Windkraftanlagen	15%
Brennstoffzellen, betrieben mit Erdgas	18%
solare Photovoltaik	20%
nicht-elektrische erneuerbare Energie	10 bis 15%

Energie-Erntefaktor  
Energie-Rückzahlzeit

$$\epsilon = \frac{\text{Sekundärenergie}}{\text{Totalaufwand an Energie für die Anlage}}$$

Beide Energien werden über die Lebenszeit der Anlage aufsummiert, zur Aufwandenergie gehört die Energie zum Bau, Unterhalt, Betrieb und Entsorgung der Anlage.

Die Bestimmung des Energie-Erntefaktors erfordert eine Lebenszyklusanalyse (Ökobilanz, life cycle assessment) unter Einbeziehung aller verwendeten Materialien, Produkte und Dienstleistungen.

Energie-Rückzahlzeit

$$T_{\text{Payback}} = \frac{T_L}{\epsilon}$$

$T_L$ : Lebenszeit

# Kennzahlen von Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien

- realer Wirkungsgrad
- Energieerntefaktor
- Lebenszeit
- Energie-Rückzahlzeit

Umwandlungs- anlage	realer Wirkungs- grad [%]	Energie- erntefaktor []	Lebenszeit [a]	Energie- Rückzahl- zeit [a]
Wasserkraft	90%	10-20	$\approx 60$	3-6
Windenergie	40%	$\approx 8$	15-20	2-2.5
Solarthermisches Kraftwerk	30%	$\approx 3$ (Ziel)	$\approx 25$ (Pro- jektion)	$\approx 8$
Photovoltaikanlage	15%	$\approx 4-6$	$\approx 20-30$	$\approx 5$
Sonnenkollektor	50%	4	20	5
Biogas-Block- Heizkraftwerk	50% + Wärme	3	20	7

# Kennzahlen anderer Elektrizitätsanlagen

- realer Wirkungsgrad
- Energieerntefaktor
- Lebenszeit
- Energie-Rückzahlzeit

Umwandlungs- anlage	realer Wirkungs- grad [%]	Energie- erntefaktor []	Lebenszeit [a]	Energie- Rück- zahlzeit [a]
öl/gasbefeuetes Dampfkraftwerk	40%	8	40	5
Dampfheizkraftwerk	35% + Wärme	8	30	4
Gas- und Dampf- Kombikraftwerk	60%	8	40	5
steinkohlebefeuetes Dampfkraftwerk	40%	4	40	8-10
Siedewasserreaktor	30%	7	40	6



# Technologiesubstitution

- Grundsätzlich kann die Energie zum Aufbau einer neuen Technologie aus vorhanden (existierende) Quellen bereitgestellt werden
- Beispiel: Zur Produktion eines PV-Modules wird europäischer Strommix verwendet. Konsequenz: Die Umweltbelastung gehen mit Faktor 0.2 in die Ökobilanz der Photovoltaik ein.
- Aufbaue einer neuen Technologie „aus eigenen Mittel“: bei Verwendung des gesamten Inputs zur Herstellung zusätzlicher Produktionsanlagen kann während der Lebenszeit  $T_L$  maximal das  $\epsilon$ -fache der Anfangskapazität generiert werden.

# Zeitkonstante der Technologiesubstitution

Kapazität im Aufbau

$$\frac{d\text{Cap}}{dt} = \frac{\epsilon}{T_L} \text{Cap} - \frac{1}{T_L} \text{Cap} = \frac{\epsilon - 1}{T_L} \text{Cap}$$

Zeitkonstante

$$T_{\text{Aufbau}} = \frac{T_L}{\epsilon - 1}$$

Hoher Erntefaktor  $\epsilon$  fördert schnellen Aufbau, offensichtlich notwendige Bedingung  $\epsilon > 1$  (eine Anlage  $\epsilon < 1$  gibt doch gar keine Sinn!?).

Beispiel: Photovoltaik,  $\epsilon \approx 5$ ,  $T_L \approx 20$  a

$\Rightarrow T_{\text{Aufbau}} \approx 4$  Jahre unter der Annahme, dass aller PV-Strom für neue Anlagen gebraucht wird!

# Ganzheitliche Betrachtung von Energiesystemen

- Ziele
- Allgemeiner Ansatz

## Ziele

- Multi-disziplinäre Bewertung von Energiesystemen und Szenarien für die Schweiz und andere Länder.
- **Vermittlung** der Resultate an Entscheidungsträger & Interessenten.
- Unterstützung von rationalen und nachhaltigen **Entscheidungen** („Ehrlicher Makler“).

## Allgemeiner Ansatz

- Entwicklung und Implementierung von „state-of-the-art“ Methoden und Datenbanken
- Schwerpunkt auf prozessorientierten Ökobilanzen, Risikoanalysen, Umweltauswirkungen & Externe Kosten, Energieökonomische Modellierung, Simulation des Elektrizitätssektors und Multi-Kriterien Entscheidungsanalysen (EUUS lässt grüssen)

# Defintion Nachhaltigkeit

Brundtland-Kommission

Nachhaltige Entwicklung ist die Fähigkeit, „die Bedürfnisse der Gegenwart zu befriedigen, ohne gleichzeitig die Möglichkeiten zukünftiger Generationen zur Befriedigung ihrer eigenen Bedürfnisse einzuschränken“. Diese Definition ist als Ausgangsbasis akzeptiert.



# Energietechnologien und Nachhaltigkeit

Was müssen Energietechnologien erfüllen!

Energietechnologien müssen sich dem Gebot der Nachhaltigkeit stellen

**ökonomisch** Versorgungssicherheit garantieren „Bezahlbarkeit“  
gewährleisten

**ökologisch** natürliche Ressourcen schonen Emissionen reduzieren und  
Klima schützen

**gesellschaftlich** gesellschaftliche Akzeptanz und Fairness beachten

⇒ Streben nach Nachhaltigkeit ist wohl begründet und keine  
Modeerscheinung

# Regeln für die Nutzung von erneuerbaren Energien

- Die Nutzung der Ressource darf die Erneuerungsrate nicht überschreiten
- Nichterneuerbare Energieträger und Materialien sollten nur in der Menge verwendet werden, welche dem physikalischen und funktionellen Gebrauch einer ökonomisch sinnvollen erneuerbaren Ressource entspricht ???
- Verschmutzung der Umwelt sollte nicht die Absorptionsfähigkeit der Umwelt überschreiten.
- Nicht akzeptable Risiken für die Gesundheit sollten begrenzt werden.
- Der Gebrauch von nicht erneuerbaren Energien ist ein wichtiges Kriterium für die Beurteilung von nachhaltigen Optionen  $\Rightarrow$  Totale Kosten (externe und interne) kann als Nachhaltigkeitsindikator dienen.

Welche Kriterien verschaffen einen Überblick bei der Beurteilung der Nachhaltigkeit von Energiesystemen?

Nachhaltigkeits- bereich	Betroffener Bereich
Ökonomie	benötigtes Kapital Ressourcen
Ökologisch	Globale Erwärmung Regionale Umweltverschmutzung nicht verschmutzungs Effekte Schwere Unfälle Gesamtabfälle
Sozial	Beschäftigung Proliferation (militärische & zivile Nutzung ist möglich) menschliche Gesundheit lokale Störungen Einschränkung von kritischem Abfall Risiko-Aversion

# PSI Kriterien und Indikatoren

Wirtschaftliche Dimension

Einflussgebiet	Indikator	Einheit
Finanzielle Anforderungen	Produktionskosten	Eurocent/kWh
	Anfälligkeit für Preis- erhöhung des Rohstoffs	Faktor (Steige- rung der Pro- duktionskosten bei Verdopplung der Brennstoff- kosten)
Ressourcen	Verfügbarkeit (Lastfaktor)	%
	Geopolitische Faktoren	Relative Skala
	Langzeit-Nachhaltigkeit: Energetisch	Jahre
	Langzeit-Nachhaltigkeit: Nicht energetisch	kg <sub>Cu</sub> /GWh
	Lastfolgeverhalten: Verfügbarkeit z. B. Atom- strom ist nicht sofort verfügbar	relative Skala



# PSI Kriterien und Indikatoren

Ökologische Dimension

Einflussgebiet	Indikator	Einheit
Globale Erwärmung	CO <sub>2</sub> Äquivalente	t/GWh
Regionale Umwelteinflüsse	Veränderung ungeschützte Ökosysteme	km <sup>2</sup> /GWh
Schadstoffunabhängige Auswirkungen	Flächennutzung	m <sup>2</sup> /GWh
Schwere Unfälle	Kollektives Risiko	Todesfälle/GWh
Gesamtabfall	Gewicht	t/GWh

# PSI Kriterien und Indikatoren

Gesellschaftliche Dimension

Einflussgebiet	Indikator	Einheit
Beschäftigung	Technologiespezifische Arbeitsplätze	Ar- Personen- Jahre/GWh
Proliferation (Material welches zivil und militärisch/terroristisch genutzt werden kann)	Potenzial	relative Skala
Auswirkungen auf die Gesundheit (Normalbetrieb)	Sterblichkeit (Reduzierte Lebenserwartung)	Verlorene Lebensjahre/GWh
Lokale Störungen Einschluss des kritischen Abfalls	Lärm, visuelle Effekte „Erforderliche“ Einschlusszeit	relative Skala 1000 Jahre
Risiko-Aversion	Maximale Konsequenzen eines potentiellen Unfalls	Todesfälle/glaubhaftem Unfall

# Life Cycle Assessment (Motivation)

Möglichkeiten, Probleme, Folgerung

- Vergleich der Umwelteinwirkungen verschiedenartiger Systeme
- Betrachtung eines Einzelschrittes ist nicht aussagekräftig, z. B. Vergleich von zwei Fahrzeugen:
  - Auto mit Verbrennungsmotor, Treibstoff: Benzin (aus Raffinerie)
  - Auto mit Brennstoffzellenantrieb, Treibstoff: komprimierter Wasserstoff aus Reformierung von Erdgas

beide Systeme sind nicht sauber, welches ist sauberer/besser?

- Umwelteinwirkungen sind vielfältig: Notwendigkeit der Zusammenfassung in Kategorien, Bewertung mit Äquivalenzfaktoren

⇒ Vor- und Nachteile sind unterschiedlich: Beispiel: Wie vergleiche ich ein Kohlekraftwerk mit einem Kernkraftwerk? → Notwendigkeit der Multikriterien-Analyse

# Life Cycle Assessment

Vorgehen: Welche Schritte müssen gemacht werden?

1. Zieldefinition und Systemgrenzen (goal and scope)
2. Sachbilanz/Ökoinventar (life cycle inventory, LCI)
  - Energie- und Stoffflussbilanz des zu untersuchenden Systems innerhalb der festgelegten Systemgrenzen
3. Wirkungsabschätzung (life cycle impact assessment, LCIA)
  - (a) Kategorien (Umwelteffekte und Schutzgüter)
  - (b) Klassifikation (Umwelteinwirkungen → Auswirkungen)
  - (c) Charakterisierung der Auswirkungen (Äquivalenzfaktoren)
  - (d) Signifikanzanalyse (Relevanz bzgl. Referenzwert)
  - (e) Bewertung (Aggregation der Umweltauswirkungen)
  - (f) Gewichtung (nach ethischen /subjektiven Kriterien). Nach umweltverträgliche Technologien besser nicht machen;-)
4. Interpretation: Sensitivitäten, Fehlerabschätzung, Schlüsse



# Algorithmus der Life Cycle Assessment

Ressourcenverbrauch und Nachfrage nach einem Produkt lösen Nachfrage nach anderen Produkten aus!

Einfaches Beispiel: Welchen effektiven Verbrauch an Benzin und Diesel (Einschränkung auf Treibstoffe) löst ein Personen-Kilometer ( $p_{km}$ ) aus?

Annahmen:

- PW verbraucht: 8 l/100 km, LKW mit 20 t Nutzlast: verbraucht 25 l/100 km.
- Treibstoff (Benzin) werde von einem Tanklastzug (Kapazität 20 t) im Mittel 150 km bis zur Tankstelle transportiert.
- Besetzung PW: 2 Personen, LKW Auslastung 50% (durchschnittswerte)

$$p_{km_{tot}} = p_{km_{end}} \quad t_{km_{tot}} = t_{km_{end}} + n_1 b_{tot} + n_2 d_{tot}$$

$b_{tot}$ : gesamter Benzinverbrauch;  $d_{tot}$ : gesamter Dieselverbrauch Nach mehreren Schritten und Inversion einer  $2 \times 2$ -Matrix folgt:

$$b_{tot} = c_{11} p_{km_{end}}$$

$$d_{tot} = c_{21} p_{km_{end}} + c_{22} t_{km_{end}}$$

Personen und Gütertransport verursacht  $d_{tot}$ , entsprechend aufteilen!

# Impact-Analyse

Wirkungsklassen 1-13

Wirkungsklasse

Stoffbeispiele

---

Treibhauseffekt

CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, FCKW

Ozonabbau (Stratosphäre)

FCKW

Photochemisches / bodennahes Ozon

Kohlenwasserstoffe, NO<sub>2</sub>

Bodenversauerung

SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>

Überdüngung

Phosphat, Nitrat, NH<sub>3</sub>

Freisetzung von Radioaktivität

<sup>137</sup>Cs, <sup>3</sup>H

Humantoxizität

Ökotoxizität

Geruchsbelastung

Lärmbelastung

visuelle Beeinträchtigung der Landschaft

Veränderung der Erdoberfläche

Verbrauch von nicht erneuerbaren Ressourcen

# Äquivalenzfaktoren

Treibhausgas Wärmepotenzial  
(Greenhouse Gas Warming Potentials (GWP))

Wichtigste energiebezogene Treibhausgase: CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O

Die Äquivalenzfaktoren (GWP, ermittelt von IPCC 2001) werden auf 100 Jahre bezogen (entspricht mittlerer Verweilzeit des CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre)

Treibhausgas	GWP <sub>100</sub>
CO <sub>2</sub>	≡ 1
CH <sub>4</sub>	23
N <sub>2</sub> O	296
CF <sub>4</sub>	5700
HFC-134a	1300

# Elektrizitätserzeugung: Strommix

Welche gibt es?

Wie heissen sie?

Welche Energieträger haben welchen Anteil?

Energieträger	UCTE [%]	CH [%]
Braunkohle	11.7	-
Steinkohle	14.5	-
Erdöl	6.4	-
Erdgas	12.6	-
Industriegase	1.6	-
Kernenergie	35.6	38.0
Wasserkraft	14.7	57.7
Andere	2.9	4.3

UCTE: Union for the Coordination of Production and Transmission of Electricity (europäischer Strommix)

Industriegase sind Kokereigase ( $\text{CO}_2 < \text{Erdgas}$ ) und Hochofengase ( $\text{CO}_2$  hoch)

Referenzjahr: 2000



# Kumulierte Treibhausgasemissionen verschiedener Energieketten

Energiekette	CO <sub>2</sub> [g/kWh <sub>e</sub> ]
Photovoltaik (durchschnitt CH)	79
Windkraft (min: Europa; max: CH)	14-21
Wasserkraft (durchschnitt CH)	3
Steinkohle (europäische Anlage)	949-1280
Braunkohle (europäische Anlage)	1060-1690
Erdöl (europäische Anlage)	519-1190
Industriegase (europäische Anlage)	865-2410
Erdgas (europäische Anlage)	485-991
Kernenergie (europäische Anlage)	8-11

# Ökobilanzierung

Zusammenfassung, Ausblick, Probleme

- Systemgrenzen müssen sorgfältig gewählt werden
- Gegenwärtiger Status des Energiesystems beeinflusst Resultat
- Allokation bei Multi-Output-Prozessen kann nach verschiedenen Gesichtspunkten erfolgen
- Gruppierung nach Wirkungsklassen ist unumgänglich
- Verschiedene Wirkungsklassen sind nur schwer vergleichbar
- Eine Reihe von Energiebereitstellungsoptionen mit den Methoden der Multikriterienanalyse erfordert deren Gewichtung durch die Stakeholder → Stakeholder-Dialog, Konsensfindung, robuste Optionen
- Forschungsziel: dynamisierte LCA, d. h. in einem Szenario wird für zukünftige Zeitpunkte eine vollständige Ökobilanz des gesamten Energiesystems erstellt.

YOLL

100

*Antwort*

Year of Life Lost

Einheit um Verschmutzungen vergleichen zu können.

# Mortalität

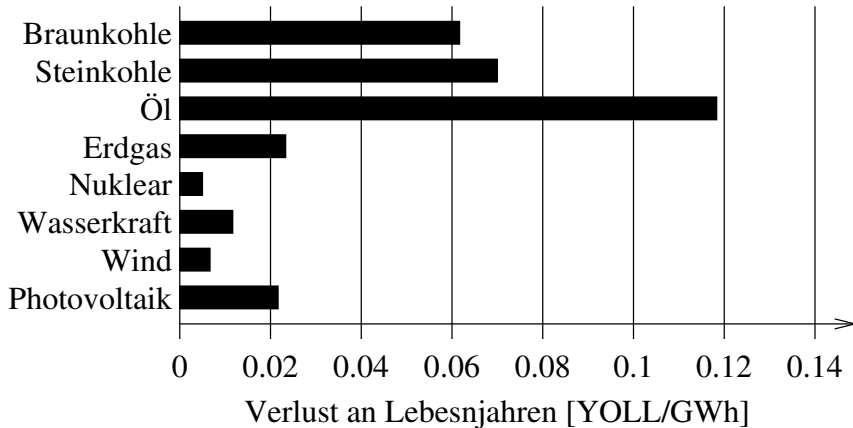
Sterberate



# Morbidität

Unter Morbidität (von lat. morbidus - krank) versteht man die Krankheitswahrscheinlichkeit eines Individuums bezogen auf eine bestimmte Population, also wie wahrscheinlich es ist, dass ein Individuum einer Population eine bestimmte Krankheit oder Störung entwickelt.

# Mortalität verursacht durch heutige Durchschnittstechnologien



Werte für Deutschland

# Vergleiche Todesfälle durch Naturkatastrophen mit menschgemachten Katastrophen

Es gibt um etwa eine Grössenordnung mehr Todesfälle durch Naturkatastrophen bis sogar zwei, falls nur der Energiesektor betrachtet wird, als bei den menschengemachten (im Durchschnitt).

**Naturkatasrophen**  $\approx 100000/a$

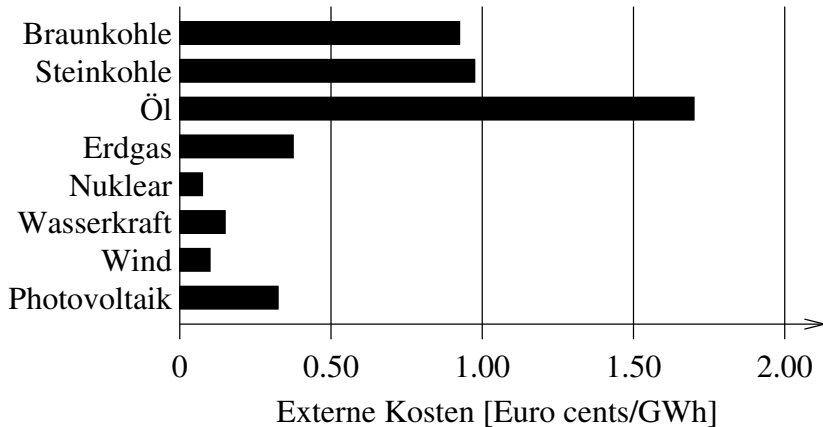
**menschengemachte Katastrophen (nicht im Enegiesektor)**  $\approx 10000$

**menschengemachte Katastrophen (im Energiesektor)**  $\approx 3000$

Die Kurve der menschengemachten Katasprophen scheinen zu steigen (besonders die nicht den Energiesektor betreffenden) und sich daher den Naturkatastrophen anzunähern.

Die Werte im Jahr 2000 der Naturkatastrophen (sehr wenige  $\approx 15000$ ) entspricht beinahe dem der menschgamachten im nicht Energiesektor ( $\approx 12000$ ).

Externe Kosten (ohne globale  
Erwärmung) heutiger  
Durchschnittstechnologien



Werte für Deutschland



# Gerechtfertigte und ungerechtfertigte Kritik von Interessengruppen an Externen Kosten

- Monetarisierung ist nicht von allen akzeptiert (z. B. Monetarisierung des Menschenlebens)
- Alternative Annäherung mit „Willingnes to Pay (WTP)“ wird bevorzugt
- Die Art wie WTP geschätzt wird, wird in Frage gestellt
- Die Gesamtungewissheit für zu nicht genug robusten Bewertungen.
- Die geschichtliche Entwicklung der Kostenschätzung ist mühselig (???)
- Schätzwerte der externen Kosten haben zum Teil eine schlechte Grundlage und einige potentiell wichtigen Werte sind nicht verfügbar
- Soziale Faktoren sind kaum verfügbar
- Es ist unmöglich bzw. sinnlos gewisse Soziale Faktoren zu monetarisieren.

# Die Probleme Multikriterielle

# Entscheidungsverfahren

The Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) Problem

- grosses, komplexes Problem  $\Rightarrow$  viele Interessengruppen, viele Kriterien
- verschiedene Interessen  $\Rightarrow$  verschiedene Vorlieben, keine einfaches Optimum
- Komplexität und die menschliche Unzulänglichkeit alles zu erkennen, können einen einzelnen Entscheidungsmacher daran hindern konsistente Bewertungen zu machen
- Zweck: Hilfe zum Denken und zur Entscheidungsfindung (aber MCDA gibt nicht **die** Antwort)

# Schritte einer MCDA

Langform von MCDA

**MCDA** Multi-Criteria Decision

- wählen oder generieren einer Reihe von Alternativen und Optionen
- wählen der Kriterien und Indikatoren welche notwendig sind die verschiedenen Leistungen zu messen
- Daten sammeln, mit Analysen generieren oder Experten-Meinungen für die Leistungsmatrix  $P_{ji}$  (Alternative $_j \times$  Messungen $_i$ )
- Umwandeln qualitativer und quantitativer Messungen in eine Skala von 0 bis 1 (oder 0 bis 100)
- Gewichten der einzelnen Kriterien durch die Entscheidungsmacher ( $\sum w_i = 1$ )
- Gewichtete Summe berechnen ( $\sum w_i p_{i,j}$ )
- Rangieren der Optionen und die beste Option wählen (z. B. diejenigen mit den meisten Punkten)
- Falls notwendig die Entscheidungsmacher, die Gewichtungen, Transformationen und subjektive Kriterien wiederholen lassen, um die Rangierung anzupassen (bzw. „wie fakte man das ganze“, persönliche Anmerkung;-) )

# Multi-Kriterien Sensitivitätsanalyse

Schlussfolgerung

- Keines der analysierten Systeme kann alle Kriterien hinsichtlich Nachhaltigkeit und Markt erfüllen
- Rangordnung der Technologien kann fallspezifisch unterschiedlich sein (Land, Standort, Zustand der Referenztechnologien)
- Kompromisse zwischen ökologischen, ökonomischen und gesellschaftlichen Nachhaltigkeitskomponenten sind unvermeidlich. Diese sind durch Werturteile beeinflusst.
- Betonung...
  - der Ökonomie: benachteiligt Erneuerbare
  - der Umwelt: benachteiligt fossile Ketten
  - sozialer Aspekt: benachteiligt Kernenergie



# Windräder

Typen und ihre Eigenschaften (nur Grundprinzipien)

vertikale Rotorachse (z. B. Savonius-Rotor, Darrieus-Rotor)

- einfache Verankerung am Boden
- Ausrichtung auf die Windrichtung entfällt
- Wirkungsgrad beschränkt

horizontale Rotorachse (z. B. American multiblade, Dutch four arm, High speed propeller (3-Blatt))

- Propeller heute meist gegen den Wind (upwind)
- Umdrehungszahl und Ausrichtung kritisch

Beiwert für verschiedene Rotortypen

Ausnutzungsgrad der Windenergie

Herleitung nach wem?

Was sagt diese Herleitung aus?

Herleitung nach Betz

Definition  $a = (1 - \frac{U'}{U})$

Windgeschwindigkeit vor dem Windrad:  $U$

Windgeschwindigkeit nach dem Windrad:  $U'$

$$C_p = 4a(1 - a)^2$$

Maximum für:

$$a = \frac{1}{3} \Rightarrow C_p = \frac{16}{27} = 0.59$$

Bei welcher Drehzahl bzw. Lineargeschwindigkeit an der Blattspitze wird dieses Maximum erreicht?

Weshalb baut man  
Asynchrongenerator in Windräder  
ein?

Durch einen Asynchrongenerator kann das Windrad bei seiner optimaler Drehzahl drehen wodurch eine Wirkungsgradsteigerung möglich ist. Bei einem Synchrongenerator muss der Generator genau mit einer bestimmten Umdrehungzahl drehen da ansonsten eine Phasenverschiebung auftritt (das Ding muss halt 50 Hz liefern und kann nicht mal zwischendurch etwas mehr oder weniger als 50 Hz liefern).

# CO<sub>2</sub> Emissionen von Windenergieanlagen

$\approx 40 \text{ t CO}_2/\text{GWh}$

$\approx 200 \text{ kg SO}_2/\text{GWh}$

Abhängig von der Grösse der Anlage und der Windgeschwindigkeit  
Anteile

**Fundament** 8% (Aushub, Beton, Stahl)

**Turm** 10%

**Rotorblätter** 19%

**Gondel** 18%

**Generator, Getriebe, Netzanschluss, Sonstiges** 16%

**Betrieb, Abbruch** 19%



# Potential der Windenergie in der Schweiz

Wie wurde vorgegangen?

Ergebnisse?

Systematische Erfassung aller potentiellen Standorte. Studie im Auftrage des Bundesamtes für Energie (1996)

Raster 250 m × 250 m (geeignet für 500 kW-Windturbine)

Randbegingung erfüllt für 8000 Zellen = 500 km<sup>2</sup>: keine Siedlungen, Wälder, Seen, geeignete Topographie (Kreten, Kuppen, Hochebene), Höhenlage zwischen 800 und 3000 m über Meer, erschlossen/erschliessbar durch Strasse.

Windgeschwindigkeit	>5.5 ms <sup>-1</sup>	4.5 - 5.5 ms <sup>-1</sup>	<4.5 ms <sup>-1</sup>
Potentialgebiet außerhalb Schutzzone, optisch beeinträchtigt	1. Priorität 16 Zellen	1. Priorität 638 Zellen	2. Priorität 2891 Zellen
kritisches Gebiet optisch intaktes Gebiet, bereits belastete Schutzzone	2. Priorität 135 Zellen	2. Priorität 634 Zellen	3. Priorität
Tabugebiet intakte Schutzzone	3. Priorität	3. Priorität	3. Priorität

# Potential der Windenergie in der Schweiz

Ertrag und Stromerzeugungspreis?

Windgeschwindigkeit	$>5.5 \text{ ms}^{-1}$	$4.5 - 5.5 \text{ ms}^{-1}$	$<4.5 \text{ ms}^{-1}$
Volllaststunden/Jahr	1300	1100	900
Stromerzeugungspreis	$<20 \text{ Rp./kWh}$	20- 30 Rp./kWh	30- 40 Rp./kWh

durchschnittliche Investition 2200 sFr./kW (1.1 Mio sFr./Anlage

Gesamtinvestition bis 2030: 4.4 Milliarden sFr.

bei 70% Realisierung  $\Rightarrow$  3.4% Beitrag zum Schweizer Strombedarf (wenn nur 70% der 1. Prioritätstandorte installiert wird, oder???)

# Weltweites Potential der Windenergie

- Gute Standorte haben  $> 3000$  Volllaststunden/Jahr
- Extrahierbare Leistung  $\propto (\text{Windgeschwindigkeit})^3$
- $\exists$  viele Standorte mit  $U > 10 \text{ ms}^{-1}$
- ausgewählte Gegenden mit  $U > 40 \text{ ms}^{-1}$  (z. B. Patagonien)
- installierte Leistung (2002): 36 GW, davon EU 24 GW, DE 12 GW
- jährliches Wachstum  $\approx 40\%$
- Elektrizitätserzeugungskosten in Deutschland  $< 0.10$  Euro/kWh
- Beitrag von 10% zum Welt-Primärenergiebedarf scheint möglich

# Energie aus dem Ozean

Welche Möglichkeiten gibt es und wie hoch ist da Potential?

**Gezeitenenergie** Potential: 2500 GW, praktisch 20 GW

**Wellenenergie** Potential: 10 000 GW (offene See), 500 GW (sich anbietende Gewässer)

**Temperatur Differenz (ocean thermal energy conversion OTEC)**  
Potential: enorm, 40 GW (Ufernah), 10 000 GW (offshore)

**Salinitätgradienten**

**Marine Strömungen**



# Gezeitenkraftwerke

Bauweise, wichtige Kennwerte

- Vom Meer durch einen Damm mit Turbine abgetrenntes Becken (mit der Fläche:  $A$  und einer Dammhöhe:  $h$ )
- Dammhöhe entspricht dem totalen Gezeitenhub
- Potentielle Energiedifferenz:

$$E = \frac{\rho A g h^2}{2}$$

Beachte hängt on  $h^2$  ab.

- Periode der Gezeiten:  $T = 12.4 h \Rightarrow \tau = \frac{T}{2\pi}$ . Füllzeit muss daran angepasst werden.
- Energie pro Zyklus in eine Richtung(???):  $1\,400Ah^2$
- Durchschnittliche Gewinnung pro Jahr ( $\eta = COP$ )

$$\approx 10^6 \cdot COP \cdot A \cdot h^2$$

$$\eta = COP = 0.25-0.35 \text{ } (\eta \text{ ideal oder nicht???)}$$

# Wellenenergie

wichtige Kennwerte

- Höhe  $h$  der Welle (Wellenkamm bis Wellental)
- Potentieller Energiegewinn pro Länge der Wellenfront:

$$\Delta E_{pot} = mg\delta h = \frac{\rho\lambda gh^2}{16}$$

- Oberflächliche Wellenlänge:  $\lambda = \frac{gT^2}{2\pi}$  mit  $T$  Wellenperiode in [s]
- Totale Leistung der Welle:

$$1.96h^2T \text{ in kW/m}$$

- Beispiel:  $h = 2 \text{ m}$ ,  $T = 6 \text{ s} \Rightarrow P = 47 \text{ kW/m}$  mehr als typische Windenergienutzung pro Länge der Rotorblätter

# Wellenenergieumwandler

Welche Konstruktionen wären möglich und wie funktionieren sie?

- zulaufender Kanal füllt ein Becken (Strom via Turbine)
- Oszillierende Wassersäule (Luftturbine am Land)
- Schwimmer (an der Küstenlinie oder an Flossen)
- „Salter-duck“ Körper welcher sich wie ein Stein am Ufer hin und her bewegt wird
- Membranpumpen am Meeresboden welche die Durckschwankungen nutzen
- „Archimedes wave swing“ Kompression und Expansion eines abgeschlossenen Luftvolumen durch Druckschwankungen über dem Volumen(???)

# Ocean Thermal Energy Conversion

## Kurz OTEC

- Idealer Carnowirkungsgrad  $\eta_C = 0.06$  (Oberflächenwassertemperatur  $T_O = 25^\circ\text{C}$  Wasser in der Tiefe (1000 m)  $T_T = 5^\circ\text{C}$ )
- realistischer Wirkungsgrad  $\eta = 0.03$
- Energie zum Pumpen ist notwendig (gegen Dichteunterschied)
- Systeme mit einem offenen (Dampf) oder geschlossenen (Arbeitsfluid) Zyklus sind denkbar
- Nur Konzepte, keine Demonstrationskraftwerk wurde bis jetzt gebaut



# Geschätzte Kosten der Energieformen aus dem Ozean im Vergleich zu fossiler Elektrizität

144

*Antwort*

**Gezeiten** 1.5×

**OTEC** 2×

**Wellen** 2.5×

fossile Elektrizität

# Wärmepumpe

Definiton

Idealer Wirkungsgrad

Jahresarbeitszahl

**Definition** Aufwertung von Umweltwärme durch Aufwenden elektrischer Arbeit

**Ideal Wirkungsgrad** Carno Wirkungsgrad

$$\eta_c = \frac{\text{eingesetzte Arbeit}}{\text{abgegebene Wärme bei } T_H}$$

**Jahresarbeitszahl** einer realen Wärmepumpe

$$JAZ_{\text{real}} = \frac{\text{total genutzte Heizenergie (inkl. Abwärme)}}{\text{elektrische Energie}}$$

# Geothermie

Definiton

Gesteinsarten und Nutzung

Geothermischer Gradient

**Defintion** Nutzung von hochwertiger Mitteltemperaturwärme aus dem Erdinneren zur Heizung / Dampferzeugung

**Gesteinsarten** es wird unterschieden zwischen

**wasserhaltigen** Heisswasser / Heissdampferzeugung

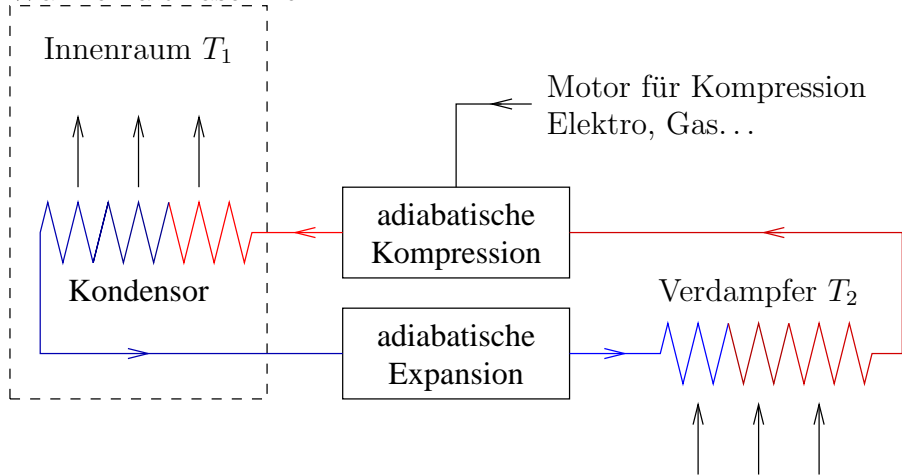
**trockenen** Pumpen und Erhitzen von Wasser

**Geothermischer Gradient**  $3^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$  (Variation von  $2^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$  (Sedimente) bis  $7^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$  (Bruchzone))

# Wärmepumpe

Funktionsweise (schematisch)

Die Wärmepumpe ist eine Umkehrung einer Carnot'schen Wärmekraftmaschine



Der Kondensator/Verdampfer können auch Wärmetauscher sein, wodurch geringere Mengen an bedenkliche Kühlmittelstoffen benötigt (Sekundärkreislauf wird mit einem Glykol-Wasser-Gemisch gefüllt).



# Wärmebereitstellung für die

# Wärmepumpe

Vor- und Nachteile

**Sonden** Höhere Temperatur im Sondenbereich da die Sonde tief hinunter reicht, daher jedoch auch teuer (tiefe Bohrungen notwendig)

**Erdwärmekörbe** billig (werden in eine Tiefe von 1.5 m bis 3.5 m installiert), durch die Phasenverschiebung des Temperaturverlaufs mit der Tiefe, ist es in dieser Tiefe im November am wärmsten (optimal zum heizen), im Sommer ist kühlen ebenfalls gut möglich.

# Geothermische Energienutzung

- Installationskosten
- Stromproduktionskosten
- Wärmebereitstellungskosten
- Entwicklung

**Installationskosten** 500 - 3 000 \$/kW

**Stromproduktionskosten** 0.015 - 0.065 \$/kWh

**Wärmebereitstellungskosten** 0.0003 - 0.003 \$/kWh

**Entwicklung** (erwartete / mögliche): jeweils Verdopplung innerhalb von  
5 Jahren (2005/2010)

# Nutzung von Warm-, Heisswasser-/

# Heissdampfquellen

Wie können sie genutzt werden?

**Idealfall** trockener Dampf (dry stream) direkt in die Turbine

**Dampf/Flüssig** einmaliges bzw. zweimaliges Abziehen von Dampf  
(single double flash) ???

**Direkt** Falls das Wasser zu kühl ist  $\approx 45^\circ\text{C}$  kann es direkt zur  
Wärmeversorgung genutzt werden (z. B. Warmwasser aus dem  
Gotthard-Basistunnel).

# Hot Dry Rock - Verfahren

- Funktion
- Probleme
- Nachhaltigkeit

**Funktion** Wasser wird durch ein Bohrloch in den Fels indiziert ( $\approx 5$  km Tiefe) und verdampft dort und steigt durch ein anderes Bohrloch wieder auf.

**Probleme** Der Fels muss fraktioniert sein um für Wasser/Dampf in grösseren Mengen durchlässig zu sein, evtl. ist er dies bereits natürlich (z. B. Störung) oder ein Spaltsystem muss zuerst durch Wasserdruck (Verfolgen mit Horchbohrungen) angelegt werden.

**Nachhaltigkeit** Es handelt sich um „Deep Heat Mining“, nach Entnahme von  $P = 10$  MW während 70 Tagen dauert der Rückfluss an Wärme 20 Jahre, es stellt sich daher die Frage ob eine solche Nutzung Nachhaltig ist.



# Welweites Potential der Geothermie

**Theorie** Nur 0.1% der Erde ist kühler als 100°C

**Tiefen für praktische Nutzung** zwischen 3 km ( $\approx 100^\circ\text{C}$ ) und 7 km ( $\approx 220^\circ\text{C}$ )

**Reale Limitierung für geothermische Wärmenutzung**

Verfügbarkeit von Fernwärmenetzen (alle Wärme nützt nichts, wenn sie niemand abnimmt)

**Reale Limitierung für geothermische Elektrizitätserzeugung**

Bohrkosten im harten (kristallinen) Gestein  $\Rightarrow$  Standorte für „Deep Heat Mining“

**Einsatz von Wärmepumpen für Niedertemperaturheizungen**

sehr gross für Raumheizungen, Herkunft der Antriebsenergie beachten

$\Rightarrow$  Nutzung von Erdwärme ist nicht durch theoretisches Potential, sondern durch praktische/ökonomische Faktoren limitiert

# Abfall zu Energie / Waste to Energy

Ziele

- Verwendung von gasförmigen Produkten von Abfällen für Erzeugung...
  - elektrischer Energie
  - von Wärme
- Recycling von Wertstoffen zur Reduktion von Abfallproduktion und Energieverbrauch der Primärproduktion (z. B. Aluminium)
- Konversion von energiehaltigem Material (z. B. Kunststoffe) zu Energiespeicher (Öl, Methanol,...)

# Abfall zu Energie / Waste to Energy

Welche Möglichkeiten gibt es?

- Verbrennung
- Pyrolyse (HT)
- Schmelzen
- Anaerobe Zersetzung
- Aerobe Zersetzung
- Pyrolyse (NT) (Unterschied NT, HT: niedrig-, hochtemperatur???)
- Hydrolyse

# Hauptteile einer thermischen Abfallbehandlungsanlage

- Beschickungseinrichtung
- Thermischer Reaktor (Brenn- oder Pyrolyseraum, Vergasungsraum, Fließbett,...)
- Dampferzeuger bzw. Vergaser
- Raugasreinigungsanlage
- Wasseraufbereitung
- Rückstandsbehandlung
- Kraftwerk (Dampf, Gas, Brennstoffzelle...)
- Restwärmenutzung (Fernheizung, Gewächshaus...)



# Probleme einer thermischen Abfallbehandlungsanlagen

- Abwasser
- Feste Rückstände
- Werkstoffe
- Restwärme

Abgasprobleme sind durch moderne Raugasreinigungen gelöst!

# Energie Bilanz einer KVA

Beispiel KVA Basel

Fluss	Input	Abgabe
Kehricht	567.87 GWh (100%)	-
Stromabgabe	-	14.77 GWh (2.6%)
Fernwärmeabgabe	-	356.84 GWh (62.8%)
Dampfabgabe	-	80.35 GWh (14.1%)
Vernichtung	-	3.88 GWh (0.7%)

Das gibt nur 455.84 GWh an Abgabe, somit fehlen 112.03 GWh (19.7%) die nach der nächsten Grafik auf seinen Folien wohl intern (Stromverbrauch, Wärmeverbrauch,...) verbraucht werden.

# Pyrolyse

Weshalb?

- Keine Hochtemperatur Korrosion, da unter Ausschluss von  $O_2$  (stimmt das???)
- Brennstoffgewinnung (Pyrolysegas, -Coke, -Treibstoffe)

# Brennstoffzelle

Welche Brennstoffe sind denkbar?

Was sind ihre Nachteile

**Biogas (Faul- und Klärgase)** Aus Gär- oder Vergasungsprozessen, müssen für ihre Verwendung durch eine Gasaufbereitung geschickt werden.

**Kohle (Stein- oder Braunkohle)** Müssen in einem aufwändigen Verfahren vergast werden, dieses Verfahren ist selbst für konventionelle Kraftwerke noch in der Entwicklung, für Brennstoffzellen sind nur einige Versuche durchgeführt worden → wird nicht darauf eingegangen.

**Methanol** Wird von einigen Vertretern der Automobilindustrie favorisiert: • Enthält chemisch gebunden Wasserstoff, wird unter hohem Energiebedarf hergestellt. • Grosstechnisch wird es durch Dampfreformierung von Erdgas erzeugt. • Energiedichte etwa die Hälfte wie die von Benzin, Diesel, jedoch ungleich giftiger. • Wird in Deutschland aus Off-Gas, Rückstandsölen hergestellt, ausserdem mittels Verschmelzung von Klärschlamm und Altkunststoffen(???). • Zur Deckung der Deutschen Nachfrage wird bereits importiert.



# Andere Möglichkeiten zur Entsorgung/Recycling der Abfälle

**Indirekt geheizter Solar Reaktor für Recycling**

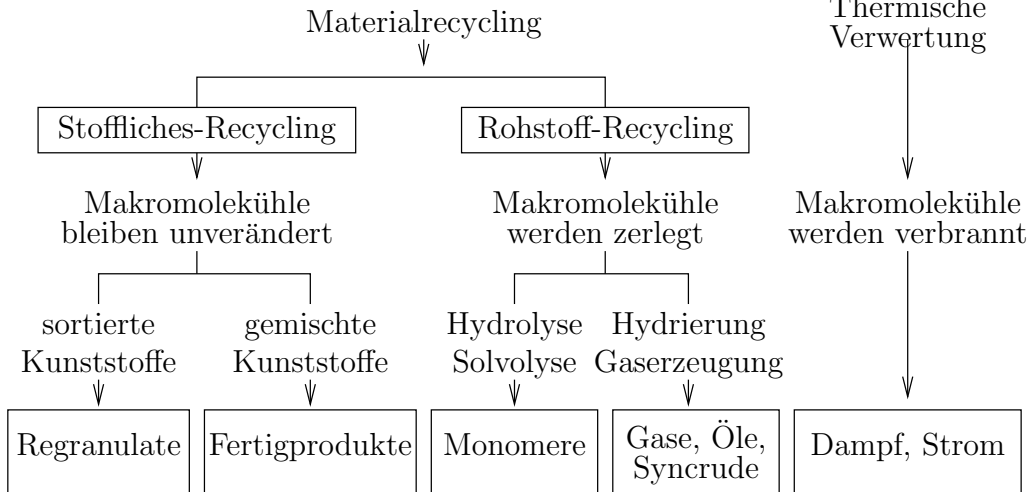
**Zementofen** sehr hohe Temperaturen  $\Rightarrow$  vollständige Verbrennung

**Hochofen** z. B. Kunststoffe welche das Eisenerz zu Roheisen reduzieren

**Rückgewinnung von Metallen aus Schrott** sehr hohe  
Energieeinsparung z. B. bei Aluminium 94%

# Kunststoffverwertung

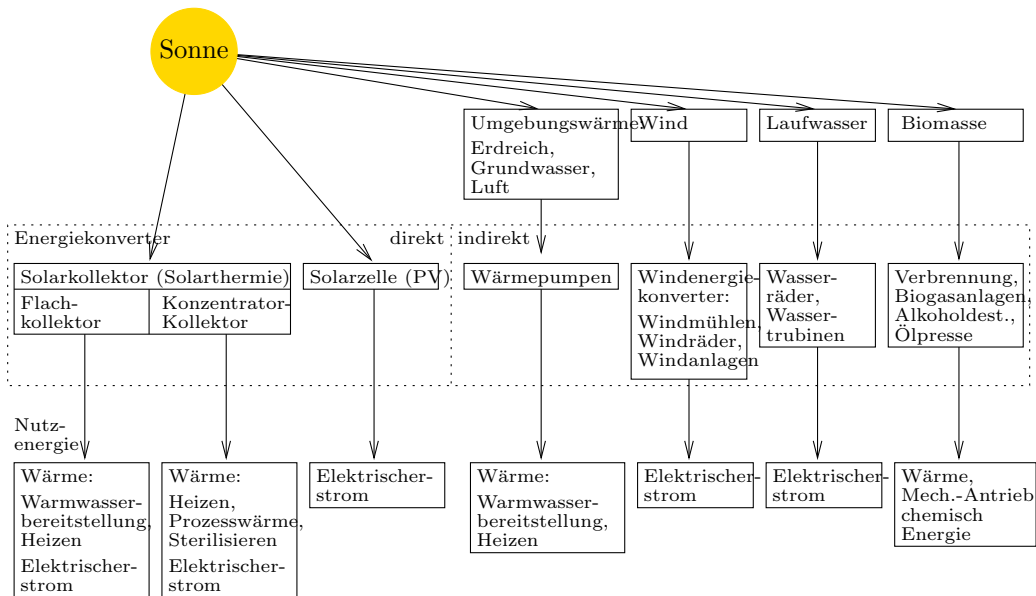
Welche Möglichkeiten gibt es?



# Sonne als Energie Quelle

Wofür?

Überblick



# Sonne und Physik

Was gibt es dazu zu sagen?

Nur das wichtigste, ich denke dies sollte bekannt sein:

**Schwarzkörper** Die Sonne kann als schwarzer Körper mit einer Temperatur von  $T = 5780 \text{ K}$  betrachtet werden und daher gelten die Strahlungsgesetze des schwarzen Körpers

**Planck** Wüestes Intergral das die abgestrahlte Energie in einem Frequenzbereich ergibt.

**Stefan-Boltzmann** Totale abgestrahlte Energie  $e_b = \sigma T^4$  mit  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$  Stefan-Boltzmann-Konstante, folgt aus  $\int_0^\infty$  Planck

**Wiensche Verschiebung**  $\lambda_{max} T = b$  mit  $b \approx 2.898 \cdot 10^{-3} \text{ Km}$

**Standpunkt Erde** Diffuse und direkte Sonnenstrahlung treffen auf die Erde, an einem klaren Tag ist der direkte Anteil 80% der Strahlung.



# Sun Path Diagram

### Sonnen-Weg-Diagramm

Die x-Achse ist der Azimuth (Abweichung) und die y-Achse die Höhe (Altitude) der Sonne.

Das Diagramm beschreibt also den Weg der Sonne am Himmel wenn wir in Richtung Süden (bzw. auf der Südhalbkugel in Richtung Norden) schauen. Für jeden Tag sieht die Linie im Diagramm anders aus (im Sommer ist z. B. die maximale Höhe grösser und daher der Sonnenaufgang auch weiter im Osten).

# Effizienzsteigerung von Flachkollektoren

Welche Varianten gibt es?

**Konzentrator** Reflektor um den Absorber (Rohr) welches die Sonnenstrahlen genau auf den Absorber konzentriert

**Vakuum** Absorber ist in einem Vakuum ( $\Rightarrow$  der Absorber ist isoliert, keine Wärmeableitung gegen aussen möglich)

Und natürlich die Kombination von beidem.

„Astronomie“

Länge, Höhe,...

**slope** =  $\beta$  Neigung des Kollektors

**azimuth** =  $\gamma$  Nord-Süd-Abweichung

**zenith angle** =  $\theta_Z$  ( $90^\circ$  - altitude angle), Winkel zwischen Lot und z. B. der Sonne

**altitude angle** =  $\alpha$  Höhe z. B. der Sonne

**angle of incidence** =  $\theta$  Winkel zwischen Oberfläche und der direkten Strahlung

# Prinzipien der Sonnen Konzentration

Welche gibt es?

**Trough systems** Absorberrohr in der Mitte eines 2D Parabolspiegels

**Power-Tower systems** Receiver auf einem Turm und Heliostaten welche die Sonnenstrahlung auf den Turm reflektieren

**Dish systems** Parabolspiegel welcher die Strahlung konzentriert

**CPC Compound Parabolic Concentrator** linear 2D (am Absorberrohr) oder 3D vor dem Receiver

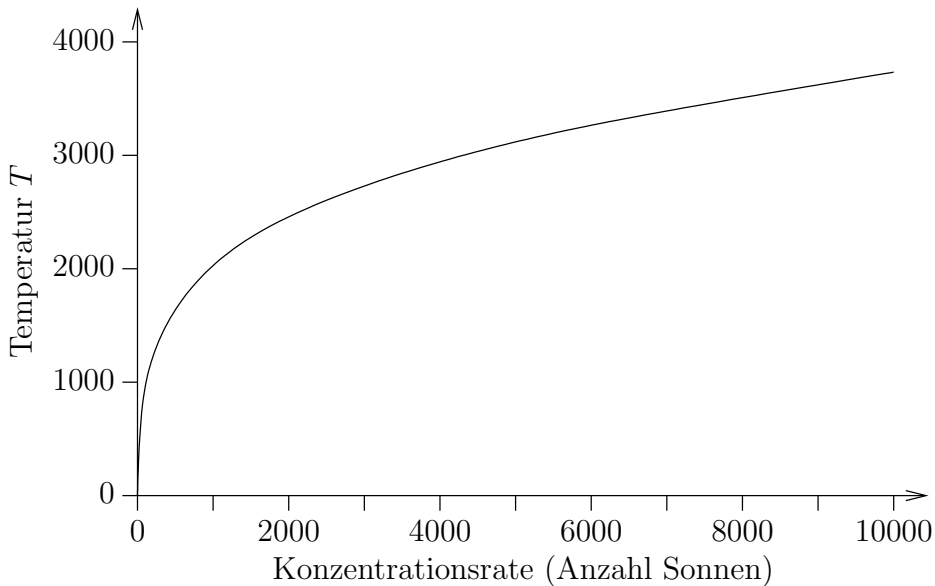
**Tower-reflector** Heliostaten reflektieren das Licht auf einen Tower welcher es wiederum nach unten in den Receiver (mit CPC) reflektiert (Anlage am Weizmann Institute of Science, Israel)

**Solar furnace** Solar Backofen??? Ein Heliostat reflektiert das Sonnenlicht auf einen Parabolspiegel welcher fix ist und das Licht in den Receiver reflektiert (Anlage am PSI ist so gebaut)



# Warum die Leistung der Sonne Konzentrieren?

Anzahl Sonnen C	1	10	100	1000	5000	10000
$T_{\text{stagnation}}$ [K]	364	648	1152	2049	3064	3644



# Idealer Wirkungsgrad eines „Solar-Receiver“

$$\eta_{\text{ideal}} = \eta_{\text{absorption}} \cdot \eta_{\text{Carnot}} = \left( 1 - \underbrace{\frac{\sigma T^4}{CI}}_{\text{Eigenstrahlung}} \right) \cdot \left( 1 - \frac{T_L}{T} \right)$$

Eigenstrahlung: der Receiver ist selber auch wieder ein Schwarzkörper mit:

$$C = \frac{Q_{\text{Solar}}}{A \cdot I}$$
$$I = 1 \text{ kW/m}^2 \text{ (1 Sonne)}$$

# Clausius-Rankine-Prozess

## Zustandsänderung des Arbeitsmittels

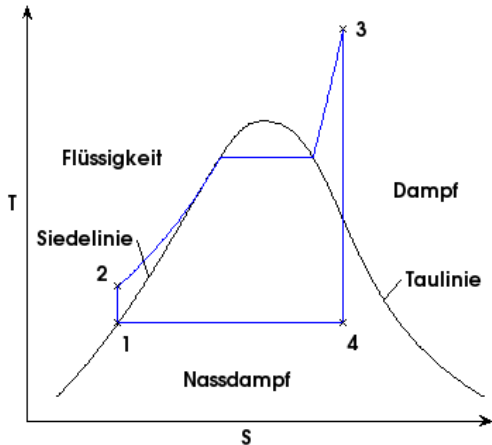


Abbildung 1: Zyklus

- 1 nach dem **Kondensator**: Flüssigkeit bei gegebenen  $p$  und  $T$  (Dampfinsel)
- 1-2 Isentrope Verdichtung in der flüssigen Phase (Entropie bleibt Konstant)
- 2 nach der **Speisepumpe**: komprimierte Flüssigkeit bei hohem Druck
- 2-3 Isobare Wärmezufuhr (Vorwärmung, Verdampfung und Überhitzung)
- 3 nach dem **Solar-Receiver**: überhitzter Dampf (Eigenschaften: Dampfinsel)
- 3-4 Isentrope Expansion
- 4 nach der **Turbine**: Mischung aus Flüssigkeit und Dampf (Eigenschaften aus Dampfinsel); der Zustand ist durch den Dampfanteil  $x$  bestimmt z. B.  $s = s_f + x s_{fg}$
- 4-1 Isobare Wärmeabfuhr und Kondensation

# Volumetrische Absorber

Was versteht man darunter?

Weshalb verwenden sie verwendet?

Ein Volumen welches porös ist (Drahtgeflecht, Schaum, Parallel-Kanal-Struktur), es dient als Absorber von Strahlung. Das Volumen befindet sich auf einem Solar-Tower (kann als Wärmetransportmedium auch Luft verwendet werden???)

Auf Grund der folgenden positiven Eigenschaften wird er verwendet:

- Grosse Absorbtion
- Geringe Extinktion (Auslöschung der Strahlung)
- Hohe Wärmeübertragung
- Hohe Temperaturbeständigkeit
- Stabiles Betriebsverhalten
- Lange Lebensdauer
- Kostengünstig



# Helio­statenfeld

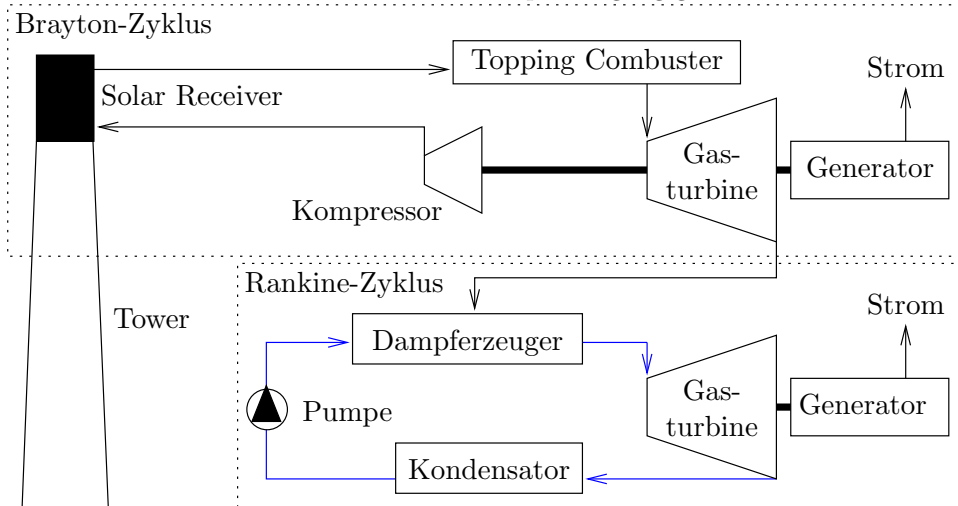
Ausrichtung

**Zirkular** Kreisförmig um den Tower, jedoch mehr Heliostaten im Norden

**Norden** Kreisförmiges Feld im Norden vom Tower (der Tower steht an der Südgrenze des Feldes)

# Combined-Cycle Power Generation

Brayton-Zyklus mit Rankine Zyklus kombiniert. **Brayton-Zyklus:** direkte Nutzung des Gases nach dem Topping Combuster in einer Gasturbine. Die Gasturbine treibt einen Kompressor an welcher Luft (???) durch den Solar Receiver drückt, das aus der Gasturbine ausströmende Gas wird zur Dampferzeugung genutzt.



# Dish Technology

Parabolspiegel mit einem Solarreciever im Brennpunkt.  
Stirlingmotor zur Stromproduktion.

# Thermal Storage

Speicherung der Wärme um auch einen Betrieb am Abend zu ermöglichen. Da die Nachfrage nach Strom z. B. in der USA um 17:00 am höchsten ist (Kilmaanlagen zu Hause), dann jedoch ist die Solarleistung schon sehr gering.

Auch eine Möglichkeit wäre ein Hybridbetrieb, dann könnten zu Spitzenzeiten bzw. am Abend fossile Enegeträger als Wärmequelle genutzt werden.

Als Wärmespeicher können verschieden Materialien verwendet werden:

- Öl
- Natrium
- Wasser
- Salz
- Luft
- Sand



# Funktionsweise einer Photovoltaikzelle

Die Solarzelle besteht aus zwei Halbleiterschichten (n- und p-Seite):

**n-Type** Si-Kristall welcher mit Donor-Atomen dotiert ist (zu viele Elektronen, Schicht ist jedoch neutral)

**p-Type** Si-Kristall welcher mit Akzeptor-Atomen dotiert ist (es fehlen Elektronen, Schicht ist jedoch neutral)

Beim Zusammenfügen der beiden Schichten bildet sich eine „n/p junction“ aus. Elektronen wandern von der n-Seite zur p-Seite (auf der n-Seite entsteht eine positive Ladung und auf der p-Seite ein negative)

Durch diese Ladungsbarriere können Elektronen nur noch von der p-Seite in die n-Seite gelangen, jedoch nicht umgekehrt.

Durch Anregung der Zelle mit Licht werden Elektronen in der p-Seite frei (Elektronen-Loch-Paar Bildung). Dazu muss die Wellenlänge des Lichtes unterhalb einer bestimmten Grenzwellenlänge liegen, ist die Wellenlänge des Lichtes zu hoch erwärmt sich die Zelle nur, ist sie tiefer werden Elektronen frei und die Zelle erwärmt sich. Ein Teil der Elektronen gelangt in die n-Seite wodurch eine Spannung zwischen n- und -p Seite anliegt.

# Theoretical Cell Efficiency / Theoretische Zelleneffizienz

$$\eta = \frac{\text{Output (Elektrischer)}}{\text{Input (Solare Leistung)}}$$

# Polycrystalline vs. Monocrystalline

**Polycristalline** Si-Kristalle sind zufällig orientiert, separiert durch Korngrenzen wodurch Effizientverluste auftreten

**Monocrystalline** haben keine Korngrenzen, Nachteile: brauchen mehr Energie bei der Herstellung, sind teurer

# PV Systeme

**Angeschlossen am Stromnetz** braucht einen DC-AC-Wandler und einen Bi-Directionalen Verteiler (Einspeissung ins Netz, falls mehr Strom hergestellt wird als benötigt wird)

**Alleinstehenden** Elektrische DC-Output wird direkt gebraucht (Ventilatoren, Wasserpumpen, Zirkulationspumpen,...), Problem: elektrische Last der maximaler Leistungsabgabe anzupassen; Mit Speicherung (Batterie) und evtl. DC-AC-Wandler.

**Hybrid** Auch noch andere Stromquellen (Wind, Wasserkraftkleinkraftwerk,...)



# Leistungserhöhung von Photovoltaikzellen

**Spezielle Oberfläche** Kleine Pyramiden auf der Oberfläche reduzieren die Menge des reflektierten Lichtes

**Reflektor** Zelle nach Süden geneigt und einen grösseren Reflektor der leicht gegen Norden geneigt ist.

**Tracking** Nachführen der Zellen

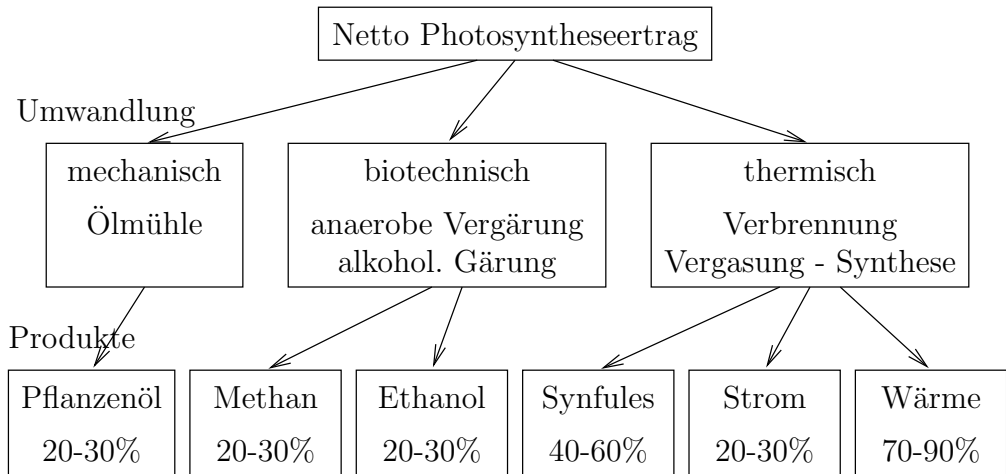
**Konzentrieren** Konzentrieren der Strahlung durch Reflektoren.

**Spektralsplitter** Konzentrator wirft das Licht auf einen Spektralsplitter, dannach sind spezifisch für den jeweiligen Wellenlängenbereich Photovoltaikzellen angebracht (zukünftige Entwicklung).

# Energetische Nutzung von Biomasse

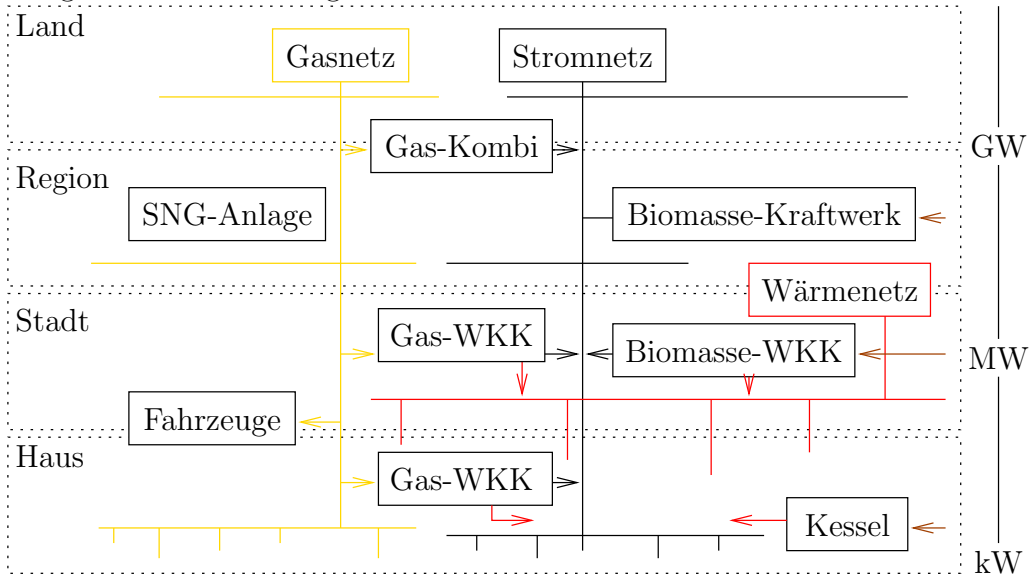
Nutzungswirkungsgrade von der Primär- zur Sekundärenergie

## Roh-Biomasse



Welches sind die Herausforderung bei der energetischen Biomassenutzung?

## Integration der Bioenergie in bestehende fossilen Infrastruktur

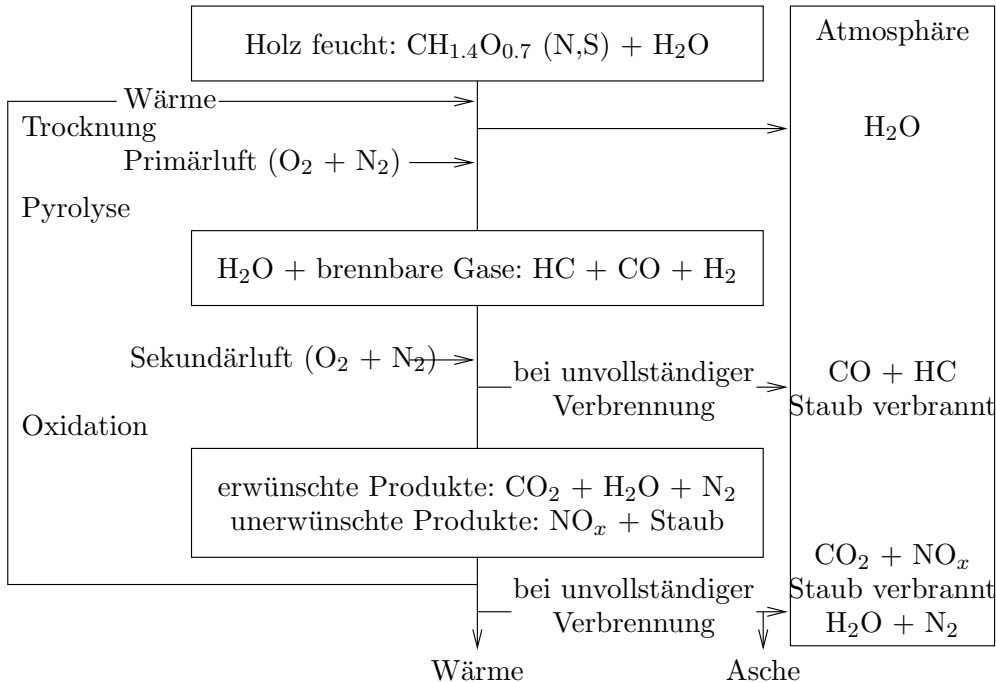


# Vergären

Je länger die Verweilzeit desto mehr Gas wird produziert. Die Gasproduktion konvergiert jedoch sehr schnell gegen ihr Maximum, es lohnt sich daher nicht die Stoffe zu lang im Gärkanal zu lassen (minimaler Mehrnutzen).



# Grundlage bei der thermischen Umwandlung von Biomasse



# Bauarten von Rostfeuerungen

**Gleichstrom** Verbrennungsluft wird in Richtung des Brenngutes welches sich Richtung Rost bewegt geführt (für Biomasse trocken)

**Gegenstrom** Verbrennungsluft strömt vom Rost dem Brenngut entgegen, die nach der Verbrennung beim Rost heissen Gase trocken das Brenngut aus (für Biomasse feucht)

**Mittelstrom** Mittelding zwischen Gegen- und Gleichstrom

# Vergasungsverfahren

**Festbettaufbau** Die Biomasse ist im Reaktor fest geschichtet und es laufen folgende Reaktionen ab (von oben nach unten): Trocknung, Pyrolyse, Vergasung, Oxidation

**Gegenstrom** Vergasungsmittel wird von unten nach oben durch das Festbett geführt, Produktgas wird oben abgeführt

**Gleichstrom** Vergasungsmittel zu führ in der Mitte, Produktgasabfuhr unten

**Wirbelschicht** Biomasse wird durchwirbelt und wird das Vergasungsmittel zugeführt oben das Produktgas entnommen, Wirbelschicht...

**Stationäre** Die Biomasse wird in einem Behälter durchwirbelt durch das von unten einströmende Vergasungsmittel

**Zirkuläre** Die Biomasse wird durch einen Kreislauf gewirbelt

# Brennstoffzelle und biogene Gase

230

*Antwort*

Kann mir jemand die Grafik erklären???



# Alternative Treibstoffe für den Verkehr

Alternative Treibstoffe für den Verkehr
---

limitierte Ressourcen
-----------------------

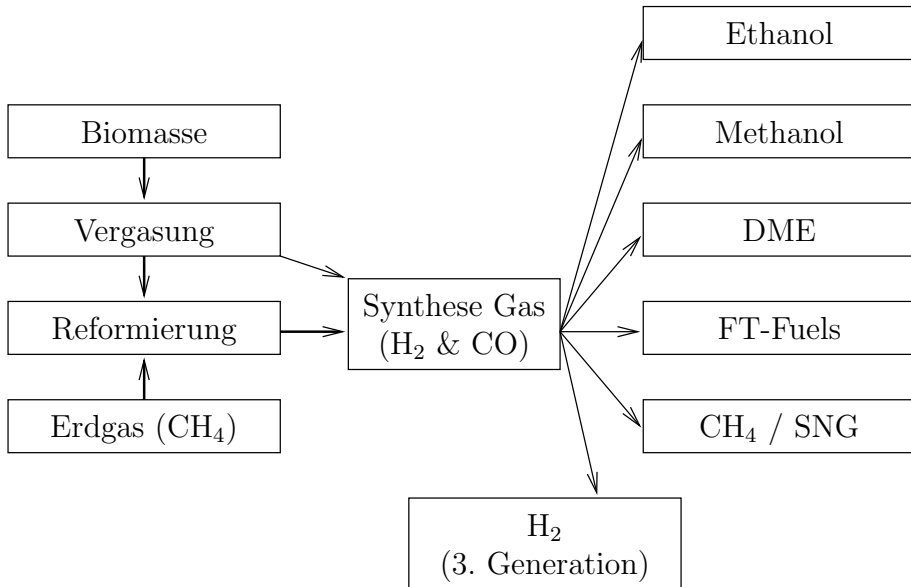
erneuerbare Ressourcen
------------------------

limitierte Ressourcen		erneuerbare Ressourcen	
gasförmig	flüssig	gasförmig	flüssig
komprimiertes Erdgas (CNG)	Gas zu flüssig (GTL)	Biogas	Pflanzenöl
	Kohle zu flüssig (CTL)	synthetisches Erdgas (SNG)	Biodiesel (RME)
			Ethanol & Derivate
			Methanol & Derivate
			Biomasse zu flüssig (BTL)

Treibstoff: 1. Generation

2. Generation

# Treibstoffproduktion für „Treibstoffe der zweiten Generation“



# Evaluationskriterien für die Bio-Treibstoff-Herstellung

- Produktionskosten (bis zum Rad (Well-to-wheel) nicht nur bis zum Tank (well-to-tank))
- CO<sub>2</sub>-Reduktion pro kWh Bio-Treibstoff (bis zum Rad (Well-to-wheel) inkl. Hilfsenergien)
- Kompatibilität zu existierenden fossilen Treibstoffen (lang- und kurzfristig)
- Konkurrenzfähig zu anderen Anwendungen von Biomassenenergie (Heizen, Stromerzeugung)
- Konkurrenzfähig zu anderen erneuerbaren Energien
- LCA,...

# Allgemeines Problem von grossen Biomassenverarbeitungsanlagen

Biomasse muss in der Nähe der Fabrik auch in grossen Mengen verfügbar sein, die Transportwege werden bei grossen Fabriken daher zwangsläufig gross.



# Biomasse und Treibstoffherstellung

Welche verschiedene Verfahren gibt es?

Wie funktionieren sie?

240

*Antwort*

Ist das wichtig???

# CO<sub>2</sub>-Sequestrierung

Warum?

Wieviel?

Grundfrage: Können die Techniken zur Nutzung der CO<sub>2</sub>-freien Primärenergien ausreichend schnell entwickelt werden, um die Klimaschutzziele zu respektieren und den Weltenergiebedarf zu decken? Falls die Antwort „nein“ lautet und fossile Energieträger weiterhin extensive genutzt werden (sollen): Kann das CO<sub>2</sub> derart „entsorgt“ (deponiert) werden, dass es nicht klimawirksam wird? Wenn dem Konzept zugestimmt wird: Welche Menge soll über welchen Zeitraum deponiert werden? „an option to buy time“

# CO<sub>2</sub>-Sequestrierung Probleme

- Abtrennung des  $\text{CO}_2$  vor bzw. nach der Verbrennung, i. a. nur bei grossen Punktquellen möglich
- Deposition des  $\text{CO}_2$  in geologischen Lagerstätten, am Meeresboden oder in den freien Ozeanen. Die Kapazität der Lager bestimmt die akzeptable Menge.

# Menge der erwarteten CO<sub>2</sub>-Sequestrierung

Je tiefer die Anfangsinvestitionskosten und je höher die Lernrate der erneuerbaren Energien, desto weniger CO<sub>2</sub> muss sequestriert werden. In günstigsten Fällen beschränkt sich die Menge auf 100 GtC und stammt aus der Wasserstoffproduktion sowie aus den modernen Methoden der Kohlenutzung. (Das Sleipner-Projekt hat schon einige 100 Gt CO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> nicht C aber trotzdem???)



# Abtrennung des CO<sub>2</sub>

Welche Varianten gibt es?

**,pre-combustion‘** Verbrennung in reinem Sauerstoff (also Vorverbrennung in reinem Sauerstoff, was erhält man dann und was bringt das???)

**,post-combustion‘** Abtrennen aus den Rauchgasen

**Absorption** Absorption in aminhaltiger Waschlösungen,  
Austreiben durch Dampf

**Adsorption** Adsorption an Aktivmaterialien (pressure swing adsorption auf porösen Materialien)

**Membranen** Abtrennen durch Membrantechniken (kann zusätzlich für die Produktion von reinem Sauerstoff verwendet werden)

**Ausfrieren** durch Kryotechniken (kann zusätzlich für die Produktion von reinem Sauerstoff verwendet werden)

# Geologische Einlagerung von CO<sub>2</sub>

Wo ist dies möglich?

Beispiele?

**Wo** In einem Dom zwischen zwei gasundurchlässigen Schichten (ähnliche geologische Gegebenheiten wie bei Lagerstätten von Erdgas)

**Beispiel** Sleipner-Projekt in Norwegen (Statoil)

- Reduktion des CO<sub>2</sub> Gehalt des geförderten Gases von 9% auf 2%
- Finanzieller Anreiz: Vermeidung der norwegischen CO<sub>2</sub>-Steuer
- Beginn der Injektion 1996, seither kontinuierlich in Betrieb
- Injektion 2700 t CO<sub>2</sub>/d  $\approx$  1 Mt/a, bisher 7 Mt kumuliert
- Kapazität geschätzt: einige 100 Gt CO<sub>2</sub>
- kontinuierliche geologische Beobachtung  $\rightarrow$  bisher keine Lecks detektiert

# Andere Varianten der Einlagerung von CO<sub>2</sub>

**CO<sub>2</sub>-Hydrate** Bildung in Wassertiefen  $> 300$  m bei Temperaturen  $< 5^{\circ}\text{C}$ . Eisartige Schicht ähnlich Methan-Hydraten. Langsames Lösen von CO<sub>2</sub> im Wasser am Meeresboden der Kontinentalsockel

**Ablagerung von flüssigen CO<sub>2</sub> unter festen CO<sub>2</sub>-Hydraten** Unter einer Deckschicht von festem CO<sub>2</sub>-Hydrat könnte flüssiges CO<sub>2</sub> deponiert werden.

**Ablagerung von flüssigem CO<sub>2</sub> in Tiefseegräben** Bei Tiefen  $> 3300$  m ist flüssiges CO<sub>2</sub> dichter als CO<sub>2</sub>-gesättigtes Wasser. Nach Einleiten von einem Schiff könnte das CO<sub>2</sub> nicht mehr aufsteigen.

**Steigerung des natürlichen Auflösungsprozesses (2 GtC/a)**  
Einblasen von CO<sub>2</sub>

**Auflösen von flüssigem CO<sub>2</sub> im Meerwasser** Methode des sinkenden oder des aufsteigenden Tropfens. Bedingung: Tropfen muss vollständig aufgelöst sein, bevor er die Meeresoberfläche erreicht.

# Ökologische Bedenken gegenüber Ozeansequestrierung (Lagerung)

Welche gibt es?

Ist mit Sequestrierung nicht nur die  $\text{CO}_2$ -Abtrennung gemeint und somit nicht die Lagerung???

**Ablagerung von „Industriemüll“** Bedenken gegen die Ablagerung von Müll in den Weltmeeren ( $\exists$  Konvention welche dies verbietet???)

**Auflösung von  $\text{CO}_2$**  Über Ablagerung von flüssigen oder festem  $\text{CO}_2$  bildet sich immer eine Wasserschicht mit gelöstem  $\text{CO}_2$

**pH-Veränderung** Auflösung von  $\text{CO}_2$  führt zu pH-Senkung,  $\text{pH} > 6$  ist für viele Organismen unbedenklich,  $\text{pH} < 5.5$  führt zu beobachtbaren Effekten an Flora und Fauna.

**Fauna** Auch in der Tiefsee  $\exists$  eine Fauna (Nematoden)

**Ethische Abwägung** Schäden an Tiefseefauna gegenüber möglichen grossen zivilisatorischen Schäden durch Klimaänderung



# Varianten des „Geoengineering“

Was versteht man darunter?

Welche gibt es?

Wie biegt man alles wieder zurecht, damit man keine Probleme hat.

**Ozeandüngung** zur Mineralisierung durch kalkbildende Lebewesen

**Technische Mineralisierung durch Carbonatbildung** Basisches  
Oxid  $MO + CO_2 \rightarrow MCO_3$

**Science-Fiction-Varianten** bzw. phantasievolle Ideen zum  
„Management“ des Klimas

**Abschwächung der Sonneneinstrahlung** durch Aerosole (mehr  
Feinstaub:-( )

**Reflektoren in der Erdumlaufbahn** Abschirmung der  
Sonneneinstrahlung

**Änderung der Exzentrizität** der Erdumlaufbahn (Nebeneffekt: wir  
sterben früher (Jahr wird länger))

# Grenzkosten der CO<sub>2</sub>-Sequestrierung

Massnahme	Kosten [CHF/t CO <sub>2</sub> ]
Einzelprojekt im Forstsektor	0.5-3
Nutzung biologischer Senken, Aufforstung	10-45
Transport von CO <sub>2</sub> und geologische Lagerung (abhängig von der Länge der Pipeline!)	16
Abtrennung nach fossilem Kraftwerk und Transport und geologische Lagerung	30-45
<hr/> Ziel: Die nun folgenden sollten billiger sein als die Varianten oben	
Erneuerbare Energie (Alleingang CH)	120
mit Lernen und internationalem Zertifikathandel	75
Effizienztechnologien (Alleingang CH)	110
mit internationalem Lernen	80

# Grösse möglicher Lagerstätten für

# CO<sub>2</sub>

Welche gibt es?

Ihre ungefähre Grösse?

Art der Lagerstätte

Grösser der Lagerstätte [GtC]

---

Weltmeere

400-1 200

Aquifere (wasserführende Schichten mit langsamen Fluss), (künstlich San Pellegrino herstellen;-) )

90-1 000

Erschöpfte Erdgasfelder

90-400

Erschöpfte Erdölfelder (enhanced oil recovery)

40-100

chemische Nutzung

0.1-&lt;1 GtC/a

# Realistisches Potential der erneuerbaren Energien

Energie (Vergleich Weltverbrauch 12.8 TW (USA: 3.3 TW))	Potenzial [TW]		ökono- misch
	theoretisch	technisch	
Hydroelektrizität	4.6	1.5	0.6
Geothermie auf den Kontinenten	11.6		
in den Weltmeeren	30		
Windenergie	50	praktisches: 2	
Biomasse (Problem verfügbarkeit)	Wasser- 7-12	bis 2050: 5-7	
Solarenergie	sehr hoch	praktisches: ( $\approx$ 600)	50-1 500
Elektrizität auf Kontinenten		60	
Photosynthese		90	

Schlussfolgerungen: nicht theoretische sondern ökonomische Potential entscheidend.

- Technologien analysieren; Kosten und Kostensenkungspotential.
- Notwendige Infrastruktur für Verteilung und Nutzng berücksichtigen



# Vergleich mit anderen Optionen nach diversen Kriterien

264

? kommt noch

*Antwort*

# Verfügbarkeit der fossilen Energieträgern

266

*Antwort*

? kommt noch

# Rolle des Wasserstoffs als Energieträger

268

*Antwort*

? kommt noch

# Aktive Auseinandersetzung mit dem Soff in den Übungen

Solltes du eigentlich hinter dir haben!