

Chancen heutiger Energiekonzepte im Jahr 2030  
WS 06/07  
(Grundlagen wissenschaftlichen Arbeitens)

Sinan Teske 220990  
Max Schmidt 222845  
Simon Kamaryt 170552  
Jan-Stefan Fischer 304694

1. Februar 2007

## Inhaltsverzeichnis

## 1 Abstract

## 2 Aufgabenstellung

## 3 Formulierung der Kriterien

Tabelle 1: default

$C_\mu$	$C_{\epsilon 1}$	$C_{\epsilon 2}$	$\sigma_k$	$\sigma_\epsilon$
0,09	1,44	1,92	1,0	1,3

## 4 Prozessauswahl

### 4.1 Wandlung von Wellenenergie

#### 4.1.1 technische Realisation

Die Nutzung von Wasser für Energieumwandlungsanlagen besitzt seit jeher einen hohen Stellenwert in der menschlichen Geschichte. Bereits 1200 v. Chr. wurden die ersten Wasserschöpfräder erfunden[?] und zur Wandlung von kinetischer Strömungsenergie in mechanische Energie genutzt. Dies ermöglichte u.a. die Anhebung von Wasser auf ein höheres Potential sowie eine Bewässerung der Felder mit deutlicher Ersparnis an Muskelkraft. Heute wandeln Pumpspeicherwerke bei örtlich großen Höhendifferenzen die potenzielle Energie des angesammelten Wassers aus einem vorgelagerten Stausee in elektrische Energie um. Dabei wird die potenzielle Energie des Wassers durch den Höhenunterschied in kinetische Energie gewandelt und anschließend in einer Turbine entspannt. Obwohl das größte Kraftwerk der Welt ein Pumpspeicherkraftwerk in Paraguay ist, und den Strombedarf von ganz Paraguay sowie dreißig Prozent des brasilianischen Strombedarfs deckt [?], ist die Nutzung von Strömungen auf dem Festland stark limitiert. Die Gewinnung von elektrischer Energie in großer Menge bleibt auf wenige Standorte beschränkt, weswegen diese Art der Energiewandlung hier nicht betrachtet wird. Unter Wandlung von Wellenenergie werden hier drei verschiedene Verfahren beurteilt. Dazu zählen die Nutzung eines Rampensystems oder einer Pneumatikkammer sowie die Energiewandlung durch Hydraulikzylinder.

Das Rampensystem nutzt das Prinzip eines Wellenkonzentrators. Dazu werden zwei v-förmig angeordnete Barrieren zur Mitte hin konzentriert. Die Wellen werden so verstärkt und fließen nach Überwinden der Rampe durch eine Turbine, welche durch Verbindung zu einem Generator die zugeführte Energie speichert. Das Wasser gelangt anschließend zurück ins Meer. Die Anlage kann flexibel eingesetzt werden, da sie ein schwimmendes Offshore-Kraftwerk ist. Die folgende Abbildung zeigt das Funktionsprinzip des Projekts *Wave Dragon*.

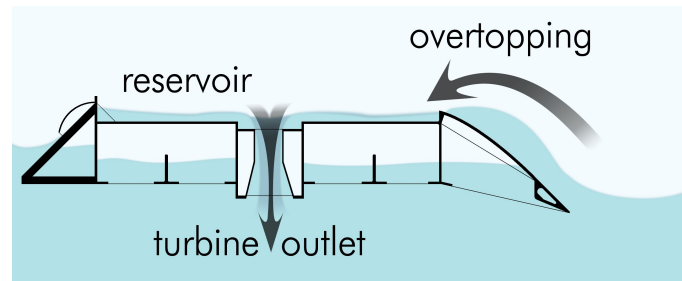


Abbildung 1: Prinzipskizze Wave Dragon (aus [?])

Das weltweit erste Wellenkraftwerk funktioniert nach dem OWC-Prinzip (*oscillating water column*). Dazu wird jede Welle durch Betonröhren in eine Pneumatikkammer geleitet, wobei weitere Betonröhren auf einer anderen Seite in einer so genannten Wells-Turbine enden. Durch die Ein- und Ausleitung der Wellen zirkuliert die in der Kammer enthaltene Luft und treibt so eine Turbine an. Diese kennzeichnet sich durch ein symmetrisches Flügelprofil, welches senkrecht zum Luftstrom angeordnet ist, und ist somit unabhängig von der Strömungsrichtung.

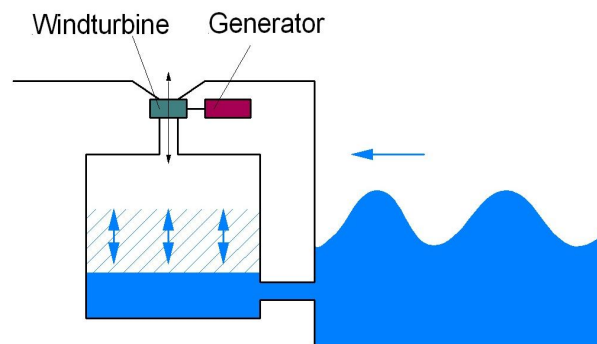


Abbildung 2: Prinzipskizze OWC[?]

Eine weitere Möglichkeit zur Nutzung der Wellenenergie besteht in der Reihenschaltung von Modulen auf der Wasseroberfläche, welche durch bewegliche Gelenke miteinander verbunden sind. In diesen Gelenken befinden sich Hydraulikzylinder, welche durch die Relativbewegung der der Module zueinander die enthaltene Hydraulikflüssigkeit in einen Ausgleichsbehälter leiten. Durch Zwischenschalten einer Turbine mit einem Generatoranschluss kann die Wellenenergie so gespeichert werden. Das System schwimmt etwa 50 – 60 m über dem Meeresboden und wird durch drei Sicherheitsleinen befestigt[?].

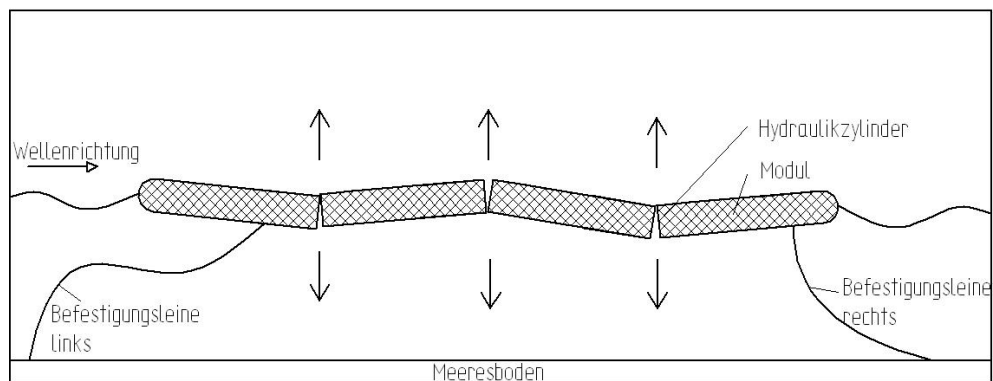


Abbildung 3: Prinzipskizze Hydraulikzylinder

#### 4.1.2 Bewertung

### 4.2 Kernfusion

### 4.3 Biomasse und Kohle

4.1 Kohle ist einer der wichtigsten fossilen Energieträger mit einer Förderungsrate von 4.791 Millionen Tonnen pro Jahr weltweit. Der Anteil von Kohle an der Stromerzeugung ist mit ca. 39 Prozent weltweit relativ groß. In Europa liegt er bei ca. 38 Prozent. Laut IEA wird der Bedarf bis 2030 auf bis zu 79 Prozent weltweit ansteigen.

Auch die Industrie hat heute, zum Beispiel für die Produktion von Stahl, einen hohen Bedarf an hochqualitativem Kohlenstoff, welcher momentan noch mit einem Anteil von 16 Prozent der weltweiten Förderung von Kohle gedeckt wird. Da die erwiesenen Kohlenreserven bei gleichbleibenden Förderungsraten für ca. 200 Jahre reichen werden nimmt Kohle als Energieträger und Kohlenstofflieferant gegenüber Erdöl eine wichtige Rolle ein.

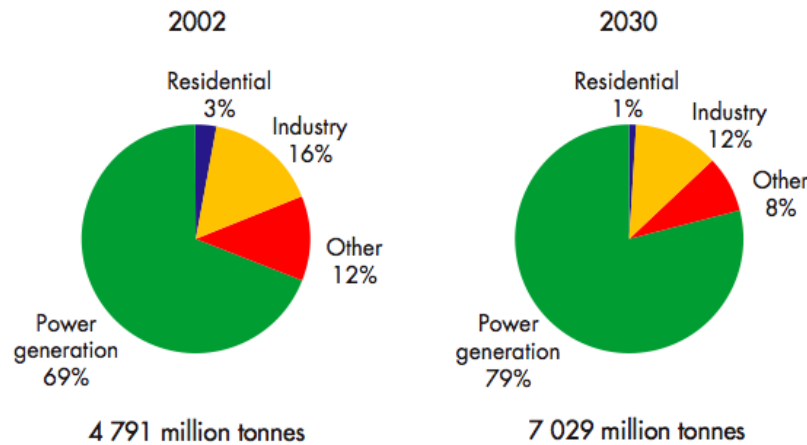


Abbildung 4: Anteile des Kohlebedarfes

Die hinter der Inkohlung stehenden chemischen und physikalischen Wandlungsprozesse, also die Umwandlung von Biomasse in Kohlenstoff, sind auch heute noch nicht vollständig geklärt. Das Ergebnis ist ein komplexes Gemisch aus teils hochpolymeren Stoffen. Im Verlaufe längerer Zeiträume, unter Luftabschluss und hohem Sedimentdruck, kommt es in Folge von Huminsäurebildung zur Polymerisation und zur Senkung des pH-Wertes und aus lignozellulöser Biomasse, wie Pflanzenresten, entsteht zunächst Torf. Die mikrobiologischen und chemischen Prozesse, die zur Inkohlung führen, bezeichnet man gemeinhin als Ver torfung. Im weiteren Gefolge bilden sich dann Braunkohle, Steinkohle, Anthrazit und eventuell Grafit mit Kohlenstoffanteilen von je 70 Prozent - 100 Prozent. Während dieses Inkohlungsprozesses werden die Moleküle völlig umgebaut, so dass die molekularen Ausgangsstrukturen verloren gehen. Es verflüchtigen sich die Anteile von Wasserstoff, Sauerstoff und Stickstoff, so dass der Kohlenstoffgehalt zum Schluss auf nahezu 100 Prozent(Grafit) ansteigen kann.

#### 4.3.1 Verfahren zum Ersatz von Kohle als Kohlenstofflieferant

#### 4.3.2 Hydrothermale Karbonisierung

Es ist nun Markus Antonietti, Direktor am Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung in Potsdam, gelungen den Inkohlungsprozess im Labor nachzuvollziehen und somit Kohlenstoff aus Biomasse, im Versuch waren dies Gartenabfälle wie Eichenlaub, Tannennadeln, Holzstückchen und Pinienzapfen, zu gewinnen. In einem Druckkessel werden Biomasse, Wasser und Zitronensäure( $C_6H_8O_7$ ) als Katalysator unter luftabschlusS und hohem Druck auf ca. 180 Grad Celsius erhitzt und 12 Stunden lang gekocht. Nach dem Abkühlen findet man einen schwarzen Schlamm, welcher aus feinstverteilten Kohlenstoffpartikeln und Wasser besteht. Da es sich hierbei um eine exotherme Reaktion handelt wird sogar noch Wärme frei welche genutzt werden kann. Mittlerweile ist es möglich den Inkohlungsprozess so einzustellen, dass alle Vorstufen von Kohle also auch Mutterboden, Torf, und andere, erzeugt werden kön-

nen. Der Reifegrad dieses Verfahrens ist wohl schon sehr hoch ein zu schätzen. Eine Umsetzung im industriellen Maßstab scheint sehr bald möglich zu sein.

Ein Vorteil der selbst gemachten Kohle ist dass sie den Kohlendioxid-Haushalt nicht weiter belastet, da nur soviel  $\text{CO}_2$  freigesetzt wird wie die Pflanzen, welche zur Gewinnung genutzt wurden, vorher aus der Luft aufgenommen haben. Sie lässt sich aus jeder Art von Biomasse erzeugen, also z.B.: aus Stroh, Holzabfällen, Gartenabfällen. Das jetzt gefundene Verfahren kann also dazu dienen Kohle zur Energiegewinnung und Synthese von Polymeren zu erzeugen ohne dass weiter die Kohlevorkommen in der Erde ausgebeutet werden müssen. Der Kohlenstoffschlamm kann auch in einer neuartigen Brennstoffzelle, welche sich momentan auch im Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung in Potsdam in der Erprobungsphase befindet, direkt in Strom umgewandelt werden.

Die folgende Abbildung [] zeigt eine Übersicht über die Möglichkeiten die in der Nutzung von Biomasse stecken.

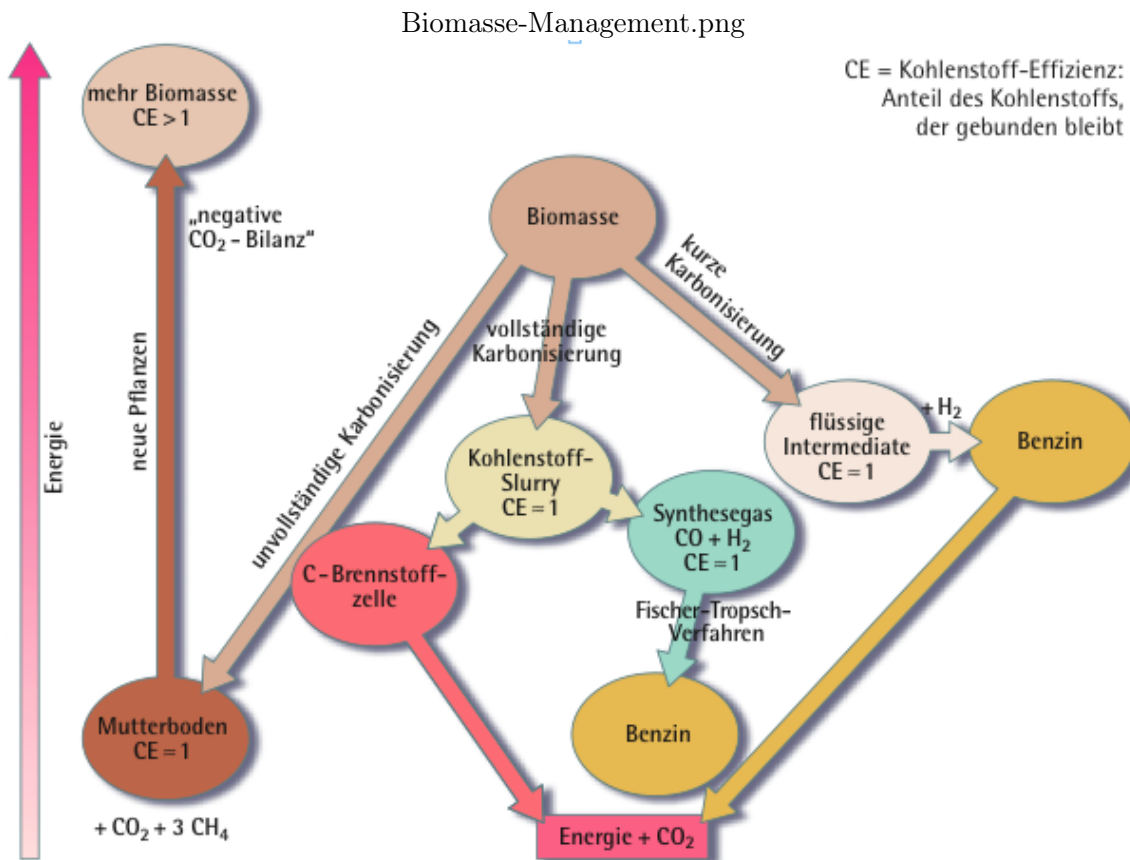


Abbildung 5: Vision eines alternativen Biomasse-Managements

### 4.3.3 Umwandlung von Kohlenstoff in Kraftstoffe und Energie

Da Kohlenstoff nur die Grundlage beziehungsweise den Rohstoff für eine Vielzahl an Anwendungen darstellt, sind dadurch weitere Verfahren nötig um die gewünschten Produkte zu erzeugen. Aus einigen dieser Verfahren, zum Beispiel dem Bergius-Pier-Verfahren oder dem Fischer-Tropsch-Verfahren, erhält man flüssige Endprodukte. Dies sind so genannte CtL, also Coal to Liquide-Verfahren, bei welchen Benzin, Diesel, Heizöl und Aromaten für die chem. Industrie erzeugt werden. Beim Bergius-Pier-Verfahren wird Kohle (C) mit Wasserstoff ( $H_2$ ) in einer exothermen Reaktion in Kohlenwasserstoffen umgewandelt. Beim Fischer-Tropsch-Verfahren wird die Kohle erst mit Wasserdampf und Luft in ein Synthesegas umgesetzt. Als weiteres Endprodukt erhält man hierbei noch Wasser. Die CtL sind in Ländern ohne eigene Ölproduktion interessante Alternativen zur Kraftstoffgewinnung. Allein schon aus politischen Aspekten ist eine Unabhängigkeit von Öl als Energielieferant zweckmäßig. Südafrika deckt heute, bedingt durch die Ölebargos während der Apartheid, immer noch einen Großteil seines petrochemischen Kraftstoffbedarfs mit Hilfe des Fischer-Tropsch-Verfahrens. Aktuelle Anlagen erreichen einen Umsatz von 4 Kilogramm Holz zu 1 Liter Kraftstoff. Es ist für 2009 eine Anlage mit einer Produktion von 200.000 Tonnen pro Jahr geplant. Es sind verschiedenste Kraftstoffe möglich wobei Diesel den Schwerpunkt bildet.

Eine weitere Möglichkeit zur Erzeugung von Kohlenwasserstoffen sind die BtL, so genannte Biomass to Liquide-Verfahren. Bei diesen wird Biomasse durch einen Vergasungsprozess zu kohlenstoffhaltigen Verbindungen umgesetzt und kann dann wie bei den CtL in Kraftstoffe und Produkte für die chemische Industrie weiterverarbeitet werden. Schätzungen zufolge soll sich auf einem Hektar Ackerland soviel Biomasse anbauen lassen, dass daraus jährlich ca. 4000 Liter BtL-Kraftstoff hergestellt werden können. Mit Hilfe bestehender Anlagen lassen sich jährlich 50000 Tonnen Bioabfälle in 25000 Tonnen Kohlenstoff umsetzen.

Bei dem in der folgenden Abbildung [2] gezeigten Biomassevergasungsverfahren wird aus Holzabfällen und anderer Biomasse ein Synthesegas und daraus später Biokraftstoff und elektrische Energie erzeugt. Das dargestellte Verfahren zeigt den von der deutschen Choren Industries GmbH seit 2003 in einer Pilotanlage verwendeten Prozess zur Gewinnung von Biodiesel welcher unter den Handelsnamen Biotrol, SunFuel und SunDiesel auf dem Markt ist und unter anderem von DaimlerChrysler und Volkswagen vertrieben wird.

Die Pyrolyse ist ein BtL-Verfahren zur Gewinnung von kurzkettigen Kohlenwasserstoffen wie z.B. Ethen und Propen aus nachwachsenden Rohstoffen, durch Vergasung von Holz. Das Holz wird dabei unter Sauerstoffabschluss auf  $700^\circ\text{C}$  -  $800^\circ\text{C}$  erhitzt und somit eine Lösung der bestehenden chemischen Verbindungen im Holz bewirkt. Die Hauptbestandteile des Holzgases sind Kohlenstoffdioxid, Kohlenstoffmonoxid, Methan, Ethen, Wasserstoff und Wasserdampf, welche sich in nachgelagerten Prozessen weiter nutzen lassen. Es ist auch möglich entsprechend konzipierte Fahrzeuge mit Holzgas zu betreiben.



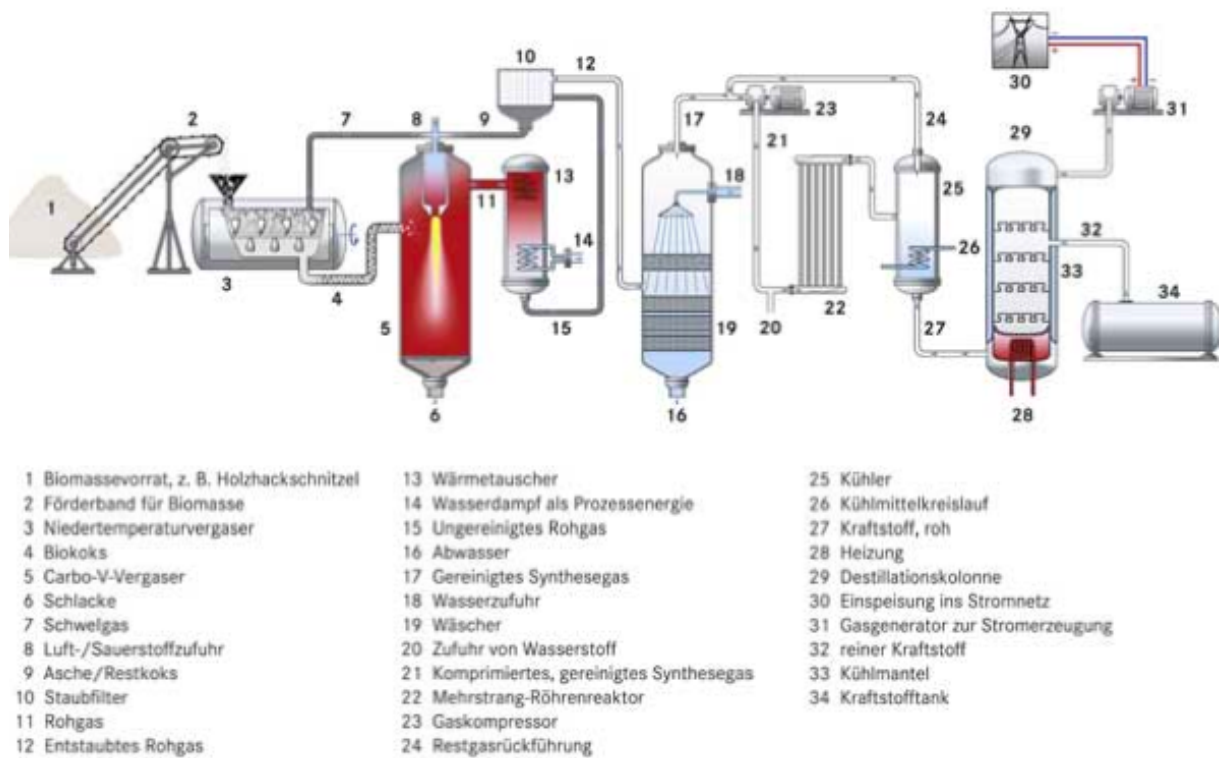


Abbildung 6: Synthese von Biotrol-Kraftstoff

#### 4.3.4 Fazit/Bewertung

- Energieträger: Kohle ist und bleibt auch weiterhin ein wichtiger Energieträger welcher uns, wie oben im Text bereits erwähnt, noch länger zur Verfügung stehen wird als Öl, bei welchem man mit einem Förderungsende in 50 - 100 Jahren rechnet. In Ländern mit groSSen Kohlenreserven wie zum Beispiel China, Kanada und Australien ist davon auszugehen, dass es auch bei steigendem Bedarf nicht zu Engpässen in der Energieversorgung durch Kohle kommen wird. Durch einen weltweiten Handel mit Kohle wird auch der steigende Bedarf anderer Länder gedeckt werden können.

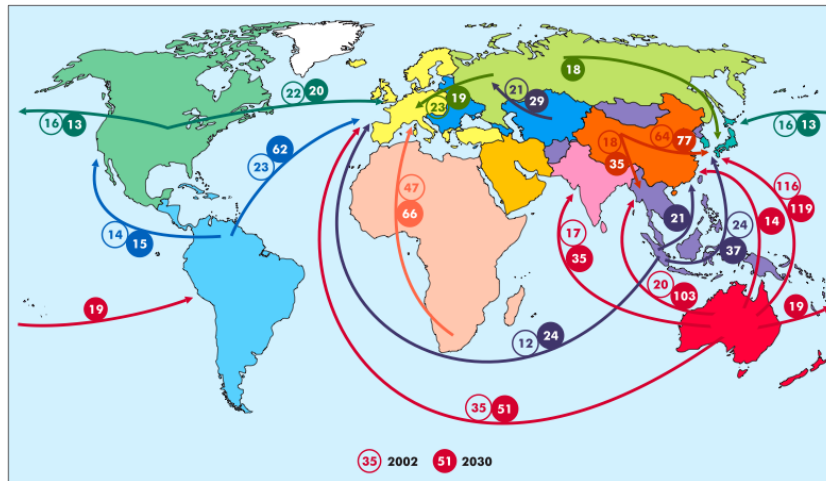


Abbildung 7: weltweiter Kohlehandel

- Standortfaktor und politische Unabhängigkeit: Wie beim Erdöl spielt der Standort bei der Kohle eine wichtige Rolle da sonst wieder eine Abhängigkeit zu Kohle fördernden Ländern entsteht. Diese Abhängigkeit lässt sich nur durch eine verstärkte Nutzung von Biomasse als Energieträger und regenerative Energiegewinnung verringern. Die Abhängigkeit von den Öl produzierenden Staaten der OPEC und anderen welche durch Absprache groSSen Einfluss auf den Ölpreis an den internationalen Märkten haben.

-gesicherte Energieversorgung: Es hat sich gezeigt, dass mit Kohlenstoff angereicherte Erde in Nährstoff ärmeren Regionen ertragreicher ist und Pflanzen mit höheren Energiegehalten wachsen, da der Kohlenstoff zu einer besseren Bindung der Nährstoffe an das Erdreich führt und diese nicht mehr so schnell durch Niederschläge herausgewaschen werden können. Laut WEO2004 wird der Anteil von Biokraftstoffen

-Reifefaktor und Eingliederung in bestehende Infrastruktur: Die in diesem Bericht beschriebenen Verfahren sind über das Laborstadium hinaus und zum Teil schon seit Jahren in industriellem MaSSstab in Gebrauch. Die Kohleverflüssigung mit Hilfe des Ihre Effizienz lässt sich zum Beispiel wie bei der oben dargestellten Herstellung von Biotrol durch eine Kombination von Kraftstoffsynthese und Stromerzeugung beziehungsweise Fernwärme steigern.

- Wirtschaftlichkeit: Der Einsatz von aus Biomasse gewonnenen Kraftstoffen rechnet sich heute ab einem Rohölpreis von 60 US-Dollar/Barrel; einer Marke die dieses Jahr bereits überschritten wurde. Beim Fischer-Tropsch-Verfahren liegen die Preise bei 8-10 US-Dollar/GigaJoule bei einem Kohlepreis von 1 US-Dollar/GigaJoule.

- Emissionen und Sicherheit: Durch die Verwendung alternativer Energiegewinnungsverfahren wie Biomasseverkohlung, -vergasung, Geothermie und anderen ist es allerdings möglich die Abhängigkeiten von Kohle und Erdgas fördernden Staaten zu minimieren. Nachteil bei der Nutzung von Kohle als Energieträger ist allerdings der AusstoSS von CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre. Die in diesem Kapitel beschriebenen Verfahren zeichnen sich allerdings, im Gegensatz zu geförderter Kohle, durch ihre CO<sub>2</sub>-Neutralität aus. Dies bedeutet dass nur soviel CO<sub>2</sub> in

die Atmosphäre gelangt wie vorher von den Pflanzen, welche zur Energiegewinnung genutzt werden, aus ihr entnommen wurde.

Quellen: - Focus 2/06 (Magazin der Max-Planck-Gesellschaft) - Wikipedia (06/07) - ERNEUERBARE ENERGIEN 9/2005 - www.choren.com - World Energy Outlook 2004

## 4.4 regenerative Energien

Die Informationen dieses Kapitel basieren zum größten aus Quelle [?].

*Regenerative Energiequelle* sind Lieferanten, die in zeitlicher Hinsicht nicht erschöpfen bzw. erst nach einer extrem langen Zeit. Sie sind Bestandteil des natürlichen Energiekreislaufs auf der Erde und im Sonnensystem. Durch ihre Nutzung wird dadurch nicht global das Gleichgewicht gestört. Im Gegensatz dazu die fossilen Energieträger, die zur Erderwärmung und Klimawandel beitragen.

### 4.4.1 Quellen und Nutzung regenerative Energie

Es gibt drei natürliche Energiequellen, die zur elektrischen Energiegewinnung direkt bzw. indirekt genutzt werden können. Folgendes Schema zeigt diese und die jeweilige Nutzungsmöglichkeit:

//Abb 1.7

In den nächsten Unterkapiteln werden auf drei verschiedene Systeme zur Grund- bzw. Teillastdeckung ausführlich eingegangen.

### 4.4.2 Erdwärme

#### Energiequelle

Die Erdwärme bezieht ihre Energie aus drei verschiedenen Quellen:

- Die innere gespeicherte Energie, die bei dem Aufprall von Massen (Himmelskörpern) auf die Erde freigesetzt wurde. Diese Gravitationskraft wurde fast vollständig in Wärme umgewandelt.
- Die so genannte Ursprungswärme, stammt noch aus den Anfangszeit bei der eigentlichen Erdentstehung.
- Im inneren befinden sich radioaktive Elemente darunter vor allem Uran 238 und Uran 235, Th 232 und K 40. Sie zerfallen und die dadurch freigesetzte Energie wird in Form von Wärme gespeichert. Da die Erdkruste ein schlechter Wärmeleiter ist, wurde ein Großteil dieser Energie gespeichert.

## Elektrische Energieversorgung durch Erdwärme

Sie ist unabhängig von Umwelteinflüssen wie Tagen -bzw. Jahreszeit, Wind und Sonneneinstrahlung. Aus diesem Grund eignet sich diese Form der Energiegewinnung sehr gut zur Deckung der Grundlast. Dabei werden Heißwasser -und Dampfquellen mit Temperaturen über 100°C und einer Tiefe mehr als 1000m genutzt. Hauptproblem neben zumeist niedrigen Wassertemperaturen ist die geringe hydraulische Permeabilität (Durchlässigkeit) des Bodens, jedoch gibt es grundsätzlich drei technisch relevante Möglichkeiten die Erdwärme zunutzen für die elektrische Energiegewinnung:

### *Heißwasseraquifere*

Erdschichten die heißes (>100°C) Grund- oder Mineralwasser enthalten nennt man Heißwasseraquifere. Diese lassen sich vor allem in Sandsteinen, Muschelkalk, Karbonatgesteinen verwenden. Um diese Schichten zu nutzen werden zwei Bohrungen benötigt. Aus dem Produktionsrohr wird das Thermalwasser gefördert. Mit einem Mindestabstand von einem Kilometer befindet sich die Reinjektionsbohrung. Diese dient zum Herunterpumpen des genutzten Thermalwassers. Bohrtechniken werden zum größten Teil aus der Erdöl/Erdgas-Industrie genutzt.

### *Störzonen*

Störzonen sind Gebiete mit regionalen Ausmaßen, die Risse und Klüften im tiefen Erdreich besitzen. Diese dehnen sich mitunter mehrere 10 Kilometer aus. Klüfte in Störzonen dringen steil in die Erde ein. Dabei stoßen sie in Tiefen von mehr als 10 Kilometer vor. Störzonen lassen sich vor allem in Karbonat -und kristallinen Steinen nutzen.

### *Kristalline Tiefengesteine*

Die Gesteine besitzen meist eine zu geringe Permeabilität. Um diese niedrige Durchlässigkeit auszugleichen, wird kaltes Wasser in die Reinjektionsbohrung unter hohem Druck (bis 150bar) eingepumpt. Dieses erwärmt sich in den Rissen der Formation auf die Gesteintemperatur. Das Erdreich fungiert so als Wärmeüberträger. Das erwärmte Wasser wird über die Produktionsbohrung gefördert.

## Stromerzeugung

Grundsätzlich gibt es zwei Prinzipien, um die Erdwärme in elektrische Energie umzuwandeln. Diese Methoden können einzeln für sich oder in Kombination verwendet werden.

### *Offene Systeme*

Bei den offenen Systemen werden wiederum 2 Arten unterschieden. Um eine direkte Dampfnutzung zu betreiben, muss die Thermalquelle überhitzten Dampf liefern. Bei diesem Verfahren wird sofort nach einer Tropen -und Feststoffabscheidung, der Dampf in eine Turbine geleitet. Das andere Prinzip nennt man Flashsystem. Dabei wird das geförderte Thermalwasser/Dampfgemisch in einen Flashbehälter geleitet und teilentspannt. Danach folgt Feststoffabscheidung und die Trennung von Dampf -und Flüssigphase. Der flüssige Anteil wird reinjiziert. In der Turbine entspannt sich der Dampf auf Atmosphärendruck. Das Kondensat wird entweder über einen Diffusor an die Atmosphäre abgegeben oder in einem Kondensator zurückgekühlt und reinjiziert.

### *Geschlossene Systeme*

In einem geschlossenen System wird zur Energieumwandlung ein anderes Arbeitsmedium verwendet. Wärmeübertrager und Verdampfer eignen sich als Energieübertrager von dem Thermalwasser zum Arbeitsmittel. Das zu verwendende Arbeitsmedium muss tiefsiedend sein, so können auch Thermalquellen mit niedriger Temperatur und Druck genutzt werden. Dies gilt auch für Thermalwasser mit negativen chemischen Eigenschaften. Auch beim geschlossenen System gibt es zwei häufig verwendete Verfahren. Beim Rankine-Prozess werden oft organische Stoffe als Arbeitsmedium (vor allem Kohlenwasserstoffe oder Fluorkohlenwasserstoffe) genutzt. Das zweite Verfahren nennt man Kalina-Prozess. Das hier verwendete Arbeitsmedium ist ein Stoffgemisch aus Ammoniak und Wasser. Vorteil dieses Prozesses ist es, dass die Verdampfung nicht isotherm abläuft (im Gegensatz zu reinen Stoffen). Dadurch werden die Verluste in den Wärmeübertragern reduziert und somit der Wirkungsgrad erhöht.

## Ökonomie

Die ökonomischen Aspekte eines Erdwärme-Kraftwerks wird im folgenden anhand eines Beispiels mit einer Leistung von 850kW untersucht. Die Thermalquelle befindet sich in einer Tiefe von 2700-4600m, hat eine Wassertemperatur von 150°C und eine Förderrate von 100m³/h.

### *Investitionskosten*

Folgende Aufzählung enthält die Kosten für Bau und Planung eines solchen Kraftwerks. Die nötigen Investitionen für die Bohrung sind großen Schwankungen ausgesetzt, da sie abhängig von der Tiefe und Art des Gesteins sind.

- Bohrung bis 3000m ca. 1000€/m
- Bohrung 4000-5000m ca. 1150€/m
- Tiefenpumpen 150000€
- Stützmittel für Gestein 360000-550000€
- Rohre, Ventile, Regelungen für Thermalwasserkreislauf 390000€
- Systemelemente (z.B. Filter) 25€/kW
- Rankine-Anlage mit 850kW 1,5 Mio €
- Wärmeübertrager 10€/kW
- Gebäude 150000€
- Planung / Vorbereitung / Gutachten 500000€

### *Betriebskosten*

Die jährlich anfallenden Kosten für den Betrieb der Anlage werden anhand von dem Prozentsatz der jeweiligen Investitionskosten geschätzt.

- 0,5% Bohrung

- 4% Rohrleitungen, Wärmeübertrager, Filter, etc.
- 1% Rankine-Anlage

#### *Stromkosten*

Die tatsächlichen Stromkosten sind vor allem abhängig von den Investitions -und jährlichen Betriebskosten, da der Rohstoff (Thermalwasser) kostenlos zu Verfügung steht. Die weiteren ausschlagenden Einflussgrößen sind die Temperatur und Fördermenge des Thermalfluids. Die hier betrachtete Referenzanlage ergibt sich ein Betrag von ca. 0,13-0,22€/kWh.

### Ökologie

Die ökologischen Auswirkungen werden in diesen Kapitel und die gesamte Lebensdauer, sowie Planung und Bau. 85-90% der Emission werden beim Bau ausgestoßen. Wenn man die Erdwärme mit einer Kraftwärmekopplung betreibt, verbessert sich der Wirkungsgrad und somit wird der Ausstoß von Schadstoffen pro Kilowattstunde reduziert.

#### *Herstellung/Bau*

Die Umweltfolgen und Gefahren beim Bau des Kraftwerks sind zu vergleichen mit denen der Erdöl/Gas Industrie. Im Allgemeinen sind die Folgen als gering anzusehen. Lärmbelästigungen sind eng zeitlich begrenzt.

#### *Normalbetrieb*

Beim der normalen Betriebszeit können aus dem Untergrund Salze und Mineralien gelöst werden und das Thermalwasser weiter verunreinigen. Schwermetall und Schwefelverbindungen sind nur in Vulkangebieten nachweisbar. Für die Umwelt ist dies unproblematisch, wenn man ein geschlossenes System verwendet und das Thermalwasser aufdringt aus dem Kreislauf und zurück in den Boden gepresst wird.

#### *Störfall*

Da das Thermalwasser mit Salzen und Mineralien versetzt ist, können bei dem möglichen Austritt an der Oberfläche geringe Umweltschäden entstehen. Auch könnten toxische Gase im Falle einer Störung in Umwelt gelangen, aber mit den richtigen Vorschriften kann das Risiko deutlich gesenkt werden. Folgen eines derartigen Austritts wären nur von lokaler Natur.

#### *Betriebsende*

Um Umweltschäden auch nach dem Betriebsende auszuschließen, müssen die Bohrungen versiegelt werden, sodass kein Thermalwasser an die Oberfläche gerät.

### 4.4.3 Photovoltaik

#### Energiequelle

Bei der Photovoltaik wird die Sonnenenergie direkt zur Umwandlung in elektrischen Strom genutzt. Die Sonne sendet Strahlung in Form von Photonen aus. Diese dringt durch die Atmosphäre und entweder direkt ohne Umwege auf die Erdoberfläche treffen (Direktstrahlung)

oder durch Streuung an Partikeln in der Luft abgelenkt werden und so auftreffen (Diffusionsstrahlung). Die Addition beider Strahlungsarten ist die nutzbare globale Strahlung.

### Elektrische Energieversorgung durch Photovoltaik

Solarzellen bestehen zum größten Teil aus Halbleitermaterialien. Durch Bestrahlung einer Solarzelle mit Sonnenlicht, dringen Photonen ein. Sie werden vom Material. Die dabei freigesetzte Energie löst Elektronen. Es entsteht eine Potentialdifferenz. Durch Anschluss von Verbindungsleitungen kann ein Stromkreis erstellt werden.

### technische Umsetzung

Solarzellen werden mit verschiedenen Möglichkeiten zusammen geschaltet (Abb. [??]). Dadurch werden unterschiedlich Stromstärken bzw. Spannung erreicht. Die Anzahl der Zellen bestimmt die maximale Leistung des Moduls. Die Lebensdauer beträgt ca. 20-30Jahre. Da das Modul nur Gleichstrom produziert, muss ein Wechselrichter ihn in Wechselstrom umwandeln, damit man ihn ins Stromnetz einspeisen kann.

### Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad einer Solarzelle ist sehr abhängig vom Material (folgende Tabelle). Die theoretisch maximale Leistung liegt bei nur ca. 30%. Dies liegt vor allem an Photonen mit zu geringer Energie, die keine Elektronen anregen können. Real sind der Wirkungsgrade noch geringer, aufgrund von z.B. Reflexionen.

Tabelle 2: Wirkungsgard verschiedener Solarzellentypen ([?], S.214)

Matrial	Typ	Wirkungsgrad in %		Stand der Technik
		Labor	Produktion	
Silicium	Einkristall	24,7	14-18	groSStechnische Prod.
Poly-Silicium	Polykristall	19,8	13,0-15,5	groSStechnische Prod.
MIS-Inversionsschicht (Si)	Einkristall	17,9	16,0	Kleinproduktion
Konzentratorzelle (Si)	Einkristall	26,8	25,0	Kleinproduktion
Si auf Glassubstrat	Transfertechnik	16,6		LabormaSSstab
Amorphes Si	Dünnschicht	13,0	8,0	groSStechnische Prod.
Tandem 2-Schicht, amor. Si	Dünnschicht	13,0	8,8	Kleinproduktion
Tandem 3-Schicht, amor. Si	Dünnschicht	14,6	10,4	groSStechnische Prod.
GaInP/GaAs	Tademzelle	30,3	21,0	Kleinproduktion
Cadmium-Tellurid	Dünnschicht	16,5	10,7	Kleinproduktion
Kupfer-Indium-Di-Selenid	Dünnschicht	18,4	12,0	Kleinproduktion/ Pilotprojekt

Andere Verluste treten beim Wechselrichten auf. Ein Überblick über diese liefert folgende Abbildung.

//abb 5.30

## Ökonomische Analyse

Bei einer ökonomischen Analyse von Photovoltaikanlagen muss man zwischen einfachen Dachanlagen und großen Solarkraftwerken unterscheiden. In diesem Kapitel werden, deshalb diese getrennt betrachtet. Folgende Tabelle zeigt die Eigenschaften von den exemplarisch untersuchend Anlagen.

Tabelle 3: Technische Daten von den exemplarischen Photovoltaik-Anlagen ([?], S.260)

	Dachanlage	Kraftwerk
Modulnennleistung in kW	5	1000
Basismaterial	Si	Si
Solorzellentyp	multi	multi
Wirkungsgrad in %	13,5	13,5
Lebensdauer in a	30	30
Volllaststunden in h/a	800	860

### *Investitionskosten*

Der größte Teil der Kosten für Inversionen fällt ab auf die Module (55-65%). Die Wechselrichter nehmen einen Anteil von 7-12% ein. Darüber hinaus müssen 10-15% für Befestigungsgestelle veranschlagt werden.

### *Betriebskosten*

Je nach Bauart schwanken die jährlichen Kosten pro installierter Kilowattstunde der Anlagen zwischen 30 und 60Ä/kW. Die folgende Tabelle zeigt die Gesamtkosten für die Refernzanlagen.

## Ökologische Analyse

Der Materialaufwand ist hoch, da eine große Oberfläche vorhanden sein muss, um die Sonnenstrahlen zu absorbieren. Der überwiegende Teil der Emissionen wird beim Bau der Anlage ausgestoßen. Hierbei spielt vor allem der Herstellungsaufwand der Solarzelle eine Rolle.

//abb 5.34

### *Herstellung*

Umweltbelastungen entstehen vor allem in der Produktion von den Solarzellen. Bei Anlagen mit CdTe- und CIS-Technologie, sind großen Anteile von Cadmium, Tellur und Kupfer pro-



Tabelle 4: durchschnittliche Investitions-, Betriebs- und Stromgestehungskosten ([?], S.262)

	Dachanlage	Kraftwerk
Investitionen		
Module in k $\text{\AA}$	16,3	2582
Wechselrichter in k $\text{\AA}$	2,5	415
Sonstige Bauteile in k $\text{\AA}$	2,7	486
Sonstiges in k $\text{\AA}$	6,3	648
Summe in k $\text{\AA}$	27,8	4131
Betriebskosten $\text{\AA}/\text{a}$	280	42000
Stromgestehungskosten in $\text{\AA}/\text{kWh}$	0,50	0,34

blematisch. Sie sind vergleichbar mit den Umweltproblemen die durch die Halbleiterindustrie entstehen. Es können auch in der Herstellung toxische Gase (z.B. Selenwasserstoff) austreten, jedoch mit bestehenden Gesetzesvorgaben kann diese Gefahr gering gehalten werden.

#### *Betriebsende*

Das Recycling der Solarmodule ist weitgehend möglich. Bei CdTe und CIS-Zellen kann der hohe Schwermetallgehalt zu Problemen führen.

### 4.4.4 Windenergie

#### Energiequelle

Bei der elektrischen Stromerzeugung wird die kinetische Energie der strömenden Luftmassen verwendet. Aufgrund der Sonneneinstrahlung auf die Erde heizt sich die Atmosphäre unterschiedlich auf. Dadurch entstehen gebiete mit unterschiedlichen Luftdrücken, worauf der Luft beginnt vom Hochdruck -zum Tiefdruckgebiet zuströmen.

#### Technische Realisierung

Es gibt zwei Prinzipien um die kinetische Energie zu nutzen. Widerstandsprinzip Hierbei wird die Windstandskraft genutzt. Durch die direkte Anströmung der Rotorblattfläche bewegt sich der Rotor. Die Leistung ist abhängig von der Windgeschwindigkeit, der Flächengröße und Anzahl der Rotorblätter. Dieses Prinzip ist weniger effektiv und wird heutzutage nur noch selten genutzt. Auftriebsprinzip Bei diesem Prinzip wird die gleichen Auftriebseffekte wie bei Flugzeug -oder Vögelflügel genutzt. Die Luft strömt unsymmetrisch um das Rotorblatt, da der Flügel in einen bestimmten Winkel zum Wind gestellt wird. Diese Unsymmetrie hat die Folge, dass die Luftmassen unterschiedlich lange Wege oberhalb und unterhalb des Rotorblattes zurücklegen müssen. Der Teil mit der längeren Strecke besitzt eine höhere Geschwindigkeit. Somit kommt es zu Druckunterschieden, die zu einer nutzbaren Auftriebskraft führen. Abbildung [??] veranschaulicht das Prinzip graphisch.

//Abb 6.5

Die Kärfte können über einen oder mehreren Rotorblättern mithilfe einer Drehbewegung in mechanische Energie umgewandelt. Diese wiederum kann z.B. über ein Getriebe zu einem Generator weitergeleitet werden, um sie in elektrischen Strom umzuformen.

#### *Bauformen*

Es gibt unterschiedliche Methoden/Formen um Windenergie zu nutzen. Folgende Haupteigenschaften charakterisieren sie:

- Rotorachse (vertikal/horizontal)
- Anzahl der Rotorblätter
- Schnellläufigkeit / Rotordrehzahl (konstant/variabel)

Heutzutage werden vor allem zwei -bzw. dreiblättrige Horizontalachsenwindanlagen genutzt. //Abb 6.11

#### **Wirkungsgrad/Verluste**

//Abb 6.15 Die obige Abbildung zeigt die durchschnittlichen Verluste einer Windkraftanlage. Die aerodynamischen nehmen größten Teil ein. Auch die Umwandlungsprozesse führen zu Verlusten. Heutige Anlagen besitzen einen maximalen Wirkungsgrad von 30-45

#### **Ökonomie**

In diesem Kapitel werden drei Referenzanlagen mit einander verglichen. Sie besitzen eine Nennleistung von je 600, 1500 und 2500 Kilowatt. In folgender Tabelle sind die einzelnen charakteristischen Eigenschaften aufgeführt. Pro Anlage werden außerdem noch drei unterschiedliche mittlere Windgeschwindigkeiten (5,5; 6,5; 7,5m/s) für den Vergleich betrachtet.

Tabelle 5: Eigenschaften der Beispiel-Windanlagen ([?], S.325)

	600kW-Klasse	1,5MW-Klasse	2,5MW-Klasse
Nennleistung in kW	600	1500	2500
Lebensdauer in a	20	20	20
Volllaststunden in h/a			
5,5m/s	1600	1550	1650
6,5m/s	2300	2200	2450
7,5m/s	3000	2900	3050

#### *Investitionskosten*

Den größten Teil der Investitionen fallen auf den eigentlichen Windkonverter (ca. 60-80%). Weitere Kosten entstehen durch die Netzanbindung, Landerschließung, Fundament und Planung.

*Betriebskosten*

2 bis 4% der Gesamtinvestitionskosten müssen jährlich für den Betrieb aufgewendet werden. Darunter fallen Kosten für Instandhaltung, Wartung und Pachtgebühren.

*Stromkosten*

Aus den jährlichen Betriebsleistung und Aufwendungen für die Investition und Betrieb entstehen die Kosten pro Kilowattstunde. Im Vergleich zu den vorher betrachteten regenerativen Systemen sind diese deutlich günstiger. Die Referenzanlage mit 2,5 Megawatt Leistung ist dabei die ökonomisch beste Lösung. Sie hat Stromerzeugungskosten von ca. 3,9 bis 7,2 ¢/kWh pro Kilowattstunde.

Tabelle 6: durchschnittliche Investitions-, Betriebs- und Stromerzeugungskosten ([?], S.328)

	600kW-Klasse	1,5MW-Klasse	2,5MW-Klasse
Investitionen			
Windkonverter in k€	520	1443	2332
Netzanbindung in k€	104	216	233
Sonstiges in k€	130	216	233
Summe k€	754	1876	2800
Betriebskosten in k€/a	18,2	50,5	81,6
Stromerzeugungskosten in ¢/kWh			
5,5m/s	0,079	0,084	0,072
6,5m/s	0,055	0,059	0,048
7,5m/s	0,042	0,045	0,039

**Ökologie***Emissionen*

Im Vergleich ist die Referenzanlage mit 600 Kilowatt Nennleistung die ökologisch beste Variante, da bei der Herstellung und Betrieb am wenigsten Schadstoffemissionen entstehen ([?], S.332). Rund 80% des produzierten CO<sub>2</sub> wird beim Bau der Windkraftanlage ausgestoßen. Folgende Abbildung schlüsselt den kompletten Ausstoß auf. Die beim Betrieb entstehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen sind auf Wartung und Reparatur der Anlagen zurückzuführen.

//Abb 6.26

*Herstellung*

Umweltschäden bei der Herstellung einer Windkraftanlage sind zu vergleichen mit den Belastungen durch die Industriezweige des Maschinenbaus und Elektrotechnik. Da die Umweltauflagen in den Branchen schon meist sehr hoch sind, sind die Effekte auf Umwelt und Mensch eher gering.

*Normalbetrieb*

Hauptumweltbelastung durch Windkraftanlagen im normalen Betrieb entsteht durch Lärmbelastung. Diese werden hauptsächlich durch aerodynamische Effekte, Rotor, Getriebe und Generator erzeugt. Diese Belastung kann vor allem auf Tiere wie Vögel Einfluss nehmen.

## 4.4.5 Potentiale der betrachteten Energiesysteme

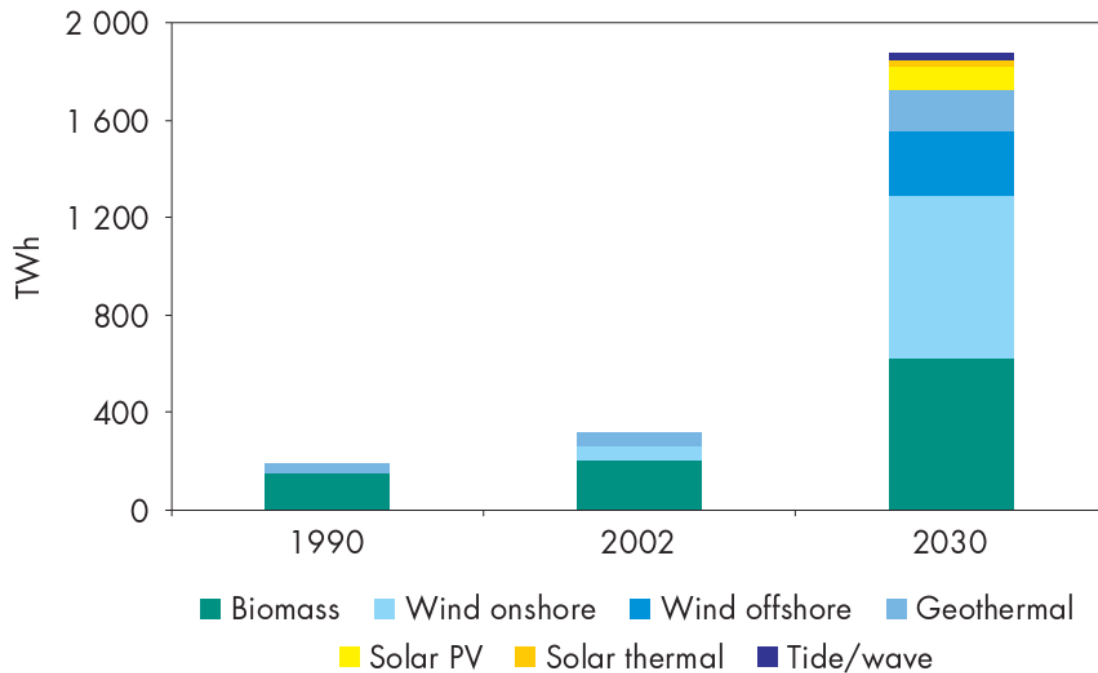


Abbildung 8: Entwicklung der jährlichen Produktionsleistung von regenerativen Energiequellen (außer Wasser)

Die vorangegangene Abbildung zeigt die mögliche Entwicklung der Energiegewinnung durch regenerative Systeme. Dabei zeigt sich, dass die in diesem Kapitel betrachteten Energiequellen den deutlich größten Teil einnehmen werden. Die nächste Abbildung zeigt die Entwicklung der Investitionskosten pro Kilowatt. Auffällig ist der Rückgang der Kosten bei der Photovoltaik, jedoch wird sie weiterhin deutlich über denen der anderen Systemen. Am kostengünstigsten wird weiterhin die Windenergie sein. Sie wird dadurch auch in Zukunft einen wichtigen Platz einnehmen.

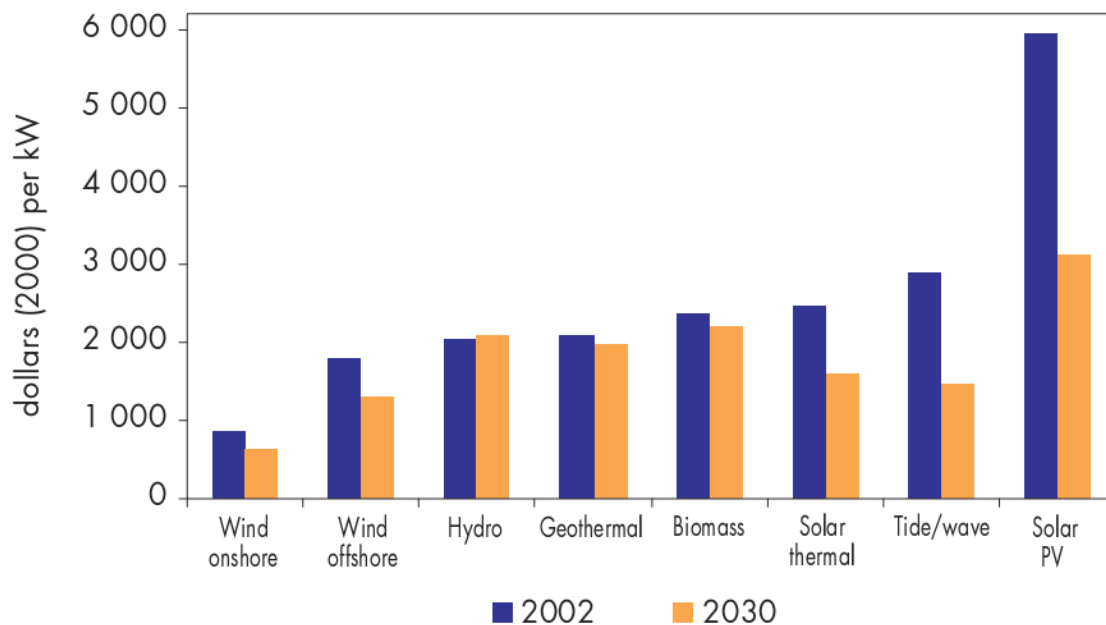


Abbildung 9: Entwicklung der Investitionskosten pro Kilowatt bei regenerativen Energiesystemen

### Erdwärme

2002 wurden 57TWh elektrische Energie mittels Geothermie produziert. Der grösste Teil der Anlagen stehen in den USA. In Ländern mit günstigen Bodenbedingungen, kann die Erdwärme eine wichtige Rolle im Energie-Mix spielen. So wird in El Salvador fast 25% des Bedarfs damit gedeckt. Bis 2030 soll sich die jährliche weltweite Produktion auf bis 167TWh steigern.

### Photovoltaik

Da die Solarzelle eine Reihe von Einschränkungen besitzt, wird sich in der Zukunft diese Form der Energiegewinnung weiterhin nur begrenzt zum Einsatz kommen. Hauptprobleme sind der hohe Materialverbrauch von knappen Ressourcen und der niedrige Wirkungsgrad. Aus diesen Gründen folgen die hohen Investitionskosten. Auch zur Grundlastdeckung kann sie nicht beitragen, da die Sonnenenergie nicht ständig zur Verfügung steht. 119TWh jährliche elektrische Leistung sollen mit Hilfe von Sonnenstrahlen produziert werden. Photovoltaik stellt 80% davon zur Verfügung.

### Windenergie

Die Energiegewinnung aus Wind wird auch in Zukunft den grössten Teil der regenerativen Quellen einnehmen. Zwar ist der Anteil am gesamten Energie-Mix noch mit jährlich

52TWh (0,3% im Jahr 2002) gering, aber wird sich bis zum Jahr 2030 auf 3% und 929TWh steigern. Dieser Anstieg ist, im Sektor der umweltfreundlichen Energiesysteme, der Grösste.

#### 4.4.6 Beurteilung der regenerativen Energiesysteme

##### Energieträger

Bei der Wind- und Sonneenergie steht der Energieträger direkt zur Verfügung. Sie müssen nicht noch aufbereitet werden. Wind und Sonnenstrahlung sind kostenlos und können von jedem frei genutzt werden. Sie sind nahezu unverbrauchbar. Beschreckend wirkt, dass diese nicht immer zeitlich verfügbar sind. Bei Windstille bzw. nachts sind sie nicht nutzbar. Aus diesem Grund können diese Energieträger keine kontinuierliche Stromversorgung liefern, so eignen sie sich vor allem zur günstigen Spitzenlastdeckung oder für Inselösungen, bei denen eine Netzanbindung unwirtschaftlich wäre. Erdwärme kann noch über extrem lange Zeit genutzt werden, da gigantische Energiereserven sich noch im Erdinneren befinden. Weiterer Vorteil ist, dass diese Wärme kontinuierlich abgegeben wird und so zeitlich immer genutzt werden kann und nicht von äusseren Einflüssen abhängt. Dadurch ist diese Energieform gut für ein Teil der Grundlastdeckung geeignet.

##### Standortfaktor, politische Unabhängigkeit

Der Standort spielt eine grössere Rolle bei den hier betrachteten regenerativen Systemen, da die Anlagen in einer Umgebung stehen müssen, wo der Energieträger nutzbar zur Verfügung steht. Der Wirkungsgrad ist ortsabhängig (z.B. von Einstrahlwinkel, mittlere Windgeschwindigkeit, Thermalwassertemperatur). Für die Windenergie sind vor allem Küstengebiete und erhöhte Hügel bzw. Berge vorteilhaft. Bei der Nutzung von Sonnenenergie empfehlen sich Orte mit einem grossen Sonneneinstrahlwinkel und günstige Meteorologie (viele Sonnenstunden). Die Erdwärmenutzung erfordert gute Bodenbeschaffenheit mit hohen Temperaturen des geförderten Wassers. Aus diesen Gründen kann man diese Anlagen nicht ohne weiteres an den Stellen errichten, wo der Bedarf tatsächlich da ist. Viele günstige Orte liegen weit ab von Industriezentren (Solarenergie aus der Sahara oder Wind-offshore-Anlagen auf dem Meer). Jedoch gibt es genügend Gebiete auf der Welt, wo ein wirtschaftlicher Betrieb der regenerativen Systeme möglich ist, sodass eine breite Nutzung zur Deckung des Energiebedarfs empfehlenswert ist. Solche Anlagen können auch, wenn sie im eigenen Land betrieben werden, genutzt werden um die politische und Rohstoffabhängigkeit (z.B. Erdöl / Erdgas) von anderen Ländern zu reduzieren, da der Energieträger frei verfügbar ist.

##### gesicherte Energieversorgung

Da bei der Sonnen- und Windenergieanlagen sind abhängig von veränderlichen Umweltfaktoren, sodass nicht zu jeder Zeit elektrischen Strom liefern. Jedoch kann man mit moderner Meteorologie gute Vorhersagen machen und bei Engpässen zum Beispiel schnell anlaufende Gaskraftwerke starten. Geothermie ist davon unabhängig, sodass eine hohe Sicherheit garantiert ist. Alle drei Typen haben gemein, dass sie nicht von Rohstofflieferungen abhängen und somit

eine krisensichere Versorgung garantieren. Da Solar -und Windanlagen meist aus mehreren Modulen (bei Windparks mehrere Windräder) bestehen, hat ein defekt eines Moduls keine schwerwiegenden Folgen, da die anderen meist problemlos weiter arbeiten können.

### **Reifefaktor**

Die Nutzung von Windenergie besitzt eine lange Geschichte, sodass auch die Entwicklung weit voran geschritten ist. Moderne Anlagen besitzen einen Wirkungsgrad von bis zu 45%, sind erprobt und werden schon in groSSen Stückzahlen produziert. Bei der Photovoltaik wird vor allem noch an den Halbleitermaterialien geforscht, da sie nur begrenzt sind und kleine Wirkungsgrade liefern. Solaranlagen werden jedoch schon breit genutzt, sowohl als Insellösungen als auch groSSen Photovoltaikkraftwerken. Die Energienutzung aus der Erdwärme ist noch nicht so weit verbreitet und es müssen noch technische Hindernisse überwunden werden (z.B. Bohrlochtiefen). Aus der Erdöl -und Erdgasindustrie kommen sehr viele hilfreiche Erkenntnisse, wie neue Bohrtechniken, die die Möglichkeiten von Erdwärme erweitern.

### **Wirtschaftlichkeit**

Bei der Wirtschaftlichkeitsrechnung besticht vor allem die Windenergie. Sie ist schon heute, mit günstigen Randbedingungen, konkurrenzfähig zu anderen klassischen Energiesystemen. Dies liegt vor allem an den niedrigen Investitions -und Betriebskosten. Die Photovoltaik hat das Problem des hohen Materialverbrauchs von Halbleitern, dies führt zu sehr hohen Investitionskosten. Dadurch ist diese Form der Stromproduktion oft unrentabel, obwohl die Kosten bis 2030 um die Hälfte sinken soll. Dadurch wird auch in Zukunft die Photovoltaik ein Randprodukt bleiben und nur in speziellen Gebieten (wie Insellösungen) zum grösSTen Teil zum Einsatz kommen. Die Geothermie liegt im Mittelfeld bei Wirtschaftlichkeitsfaktor. Sie lohnt sich vor allem bei günstigen Randbedingungen (z.B. vulkanisches Gebiet), da dort die Produktionsleistung deutlich erhöht werden kann. Beste Beispiele hierfür sind Island und El Salvador.

### **Emissionen, Umweltaspekte**

Bei den Umwelt und Emissionsaspekten sind die drei betrachteten Systeme mit in der Spitzengruppe. Da sie während des Betriebs kaum CO<sub>2</sub> oder andere schädliche Stoffe produzieren oder ausstoSSen. Bis zu 90% des CO<sub>2</sub> werden nur bei Herstellung und Bau der Anlage frei gesetzt. Einen kleinen Nachteil besitzt die Photovoltaik, da die Herstellung des benötigten Halbleiters viel Energie und Ressourcen benötigt, sodass die gesamte Bilanz etwas schlechter ausfällt. Alle Auswirkungen auf die globale und lokale Umwelt sind vernachlässigbar klein.

## **Literatur**

- [1] <http://www.wikipedia.de>  
03.12.2006

- [2] Lübbert D., Das Meer als Energiequelle, Info-Brief der wissenschaftlichen Dienste des deutschen Bundestages, Berlin, 2005
- [3] <http://www.wavedragon.net>  
07.12.2006
- [4] <http://www.oceanpd.com>  
03.12.2006
- [5] Kaltschmitt M. / Streicher W. / Wiese A., Erneuerbare Energien 4. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2006