

# 2009

Projektarbeit für  
Systemorientierte Rahmenbedingungen

## Solarthermische Kraftwerke



Björn Dobritzsch  
Matthias Gehling  
Stefan Ackermann

**Akademie für Erneuerbare Energien**  
**Lüchow-Dannenberg**  
28. Dezember 2009



## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis .....	III
Tabellenverzeichnis .....	III
Abkürzungen.....	IV
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Einführung in die Solarthermie .....</b>	<b>2</b>
<b>3 Solarthermische Kraftwerke .....</b>	<b>3</b>
3.1 Funktionsweise und Aufbau .....	3
3.1.1 Parabolrinnenkraftwerke.....	5
3.1.2 Fresnel-Kraftwerke .....	7
3.1.3 Solarturm-Kraftwerke.....	8
3.1.4 Dish-Stirling-Kraftwerke.....	9
3.2 Anforderungen.....	11
3.2.1 Klima .....	11
3.2.2 Standort .....	11
3.2.3 Infrastruktur.....	13
3.2.4 Rohstoffe .....	13
3.3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung .....	14
3.3.1 Kosten.....	14
3.3.2 Erlöse.....	16
3.3.3 Markt.....	17
3.3.4 Wettbewerb.....	18
3.4 Vor- und Nachteile .....	19
3.4.1 Parabolrinnenkraftwerke.....	20
3.4.2 Fresnel- Kraftwerke .....	20
3.4.3 Solarturm-Kraftwerke.....	20
3.4.4 Dish-Stirling-Kraftwerke.....	21
3.5 Andere Anwendungsbereiche.....	22
3.5.1 Prozesswärme .....	22
3.5.2 Solarbrennstoffe .....	22
3.5.3 Entsalzung .....	22
3.6 Referenzprojekte .....	23
<b>4 Vergleich Solarthermie und Photovoltaik .....</b>	<b>26</b>
<b>5 Ökologische Betrachtung .....</b>	<b>27</b>
5.1 Einfluss und Entwicklung von CO <sub>2</sub> in der Atmosphäre .....	27
5.2 Auswirkungen auf die Umwelt.....	31
5.3 Wirtschaftliche Bewertbarkeit von Umweltauswirkungen .....	32
<b>6 Politik und Interessensgruppen .....</b>	<b>34</b>
6.1 Länder .....	34
6.1.1 Entwicklungsländer.....	34
6.1.2 Schwellenländer .....	34
6.1.3 Industrieländer .....	34
6.1.4 OPEC-Länder .....	35
6.1.5 Wüstenländer ohne Rohstoffe .....	35
6.2 Wirtschaft .....	35



6.2.1	Nuklear-, Kohle- und Ölindustrie .....	35
6.2.2	Energiekonzerne .....	36
6.2.3	Branche der Erneuerbaren Energien .....	36
6.2.4	Versicherer .....	37
6.3	Umweltschutzorganisationen .....	37
<b>7</b>	<b>Prognose</b> .....	<b>38</b>
7.1	Kurzfristig (2010 - 2015).....	38
7.2	Mittelfristig (2015 - 2030) .....	38
7.3	Langfristig (2030 - 2100).....	38
	<b>Literatur- und Quellenverzeichnis</b> .....	<b>40</b>



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung der verschiedenen konzentrierenden Kollektoren [1].	3
Abbildung 2: Einfaches Schema der Solarthermischen Kraftwerke .....	4
Abbildung 3: Prinzip eines Parabolrinnenkraftwerks mit parallelem Dampferzeuger und getrennten Kollektor- Dampfturbinenkreis [19] .....	5
Abbildung 4: Prinzip eines Parabolrinnenkraftwerks mit einem thermischen Speicher [19] .....	6
Abbildung 5: Fresnel Kollektor [24] .....	7
Abbildung 6: Solarturmkraftwerk mit offenen volumetrischen Receiver [19] .....	8
Abbildung 7: Solarturmkraftwerk mit einem volumetrischen Druck-Receiver [19] .....	9
Abbildung 8: EuroDish-Prototyp an der Forschungseinrichtung PSA bei Almeria in Süds Spanien [19] .....	10
Abbildung 9: Fläche für Weltbedarf elektrischer Energie (oberes rotes Quadrat) .....	13
Abbildung 10: Ergebnisse einer Simulationsrechnung des DLR: Kosten und Ertragsdaten für Parabolrinnen- und Fresnel-Technologie (span. Standorte) [17] .....	15
Abbildung 11: Ergebnisse einer Simulationsrechnung des DLR: Kosten und Ertragsdaten für Parabolrinnen- und Fresnel-Technologie (Afrikanische Standorte) [17] .....	15
Abbildung 12: Gesetzlich vorgeschriebenen Einspeisetarife weltweit, Juni 2009 [1] .....	17
Abbildung 13: Externe Kosten der Stromerzeugung in Deutschland (2005) aus einer Studie des deutschen Umweltbundesamtes (2007) .....	19
Abbildung 14: Erste kommerzielle Solarkraftwerke [1] .....	23
Abbildung 15: Kommerzielle Solarkraftwerke im Betrieb, im Bau oder in Planung [1] .....	24
Abbildung 16: Kommerzielle Solarkraftwerke im Betrieb, im Bau oder in Planung [1] .....	25
Abbildung 17: Vergleich der Entwicklung der Stromgestehungskosten von Photovoltaikanlagen und Parabolrinnen-Kraftwerken [26] .....	26
Abbildung 18: Solare Strahlung und ihre Wechselwirkung mit der Atmosphäre, Entstehung des Treibhauseffekts .....	28
Abbildung 19: Steigerung der CO <sub>2</sub> Konzentration in der Atmosphäre (rote Linie) in ppm .....	29
Abbildung 20: Solare und thermale Strahlung sowie Absorption in Abhängigkeit von den in der Atmosphäre vorhandenen Stoffen .....	30
Abbildung 21: Vermeidungspotenzial der CO <sub>2</sub> -Emissionen aus der Erzeugung elektrischer Energie in Millionen Tonnen pro Jahr, DLR .....	31
Abbildung 22: Elektrische Energie nach Kraftwerkstyp mit jeweiligem CO <sub>2</sub> -Äquivalent .....	32

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wüstengebiete mit Flächenangabe und durchschnittlicher Strahlung [14] .....	12
Tabelle 2: Stromgestehungskosten unterschiedlicher Technologien [22] .....	18
Tabelle 3: Allgemeine Vor- und Nachteile von solarthermischer Kraftwerke .....	19
Tabelle 4: Vor- Nachteile von Parabolrinnenkraftwerken .....	20
Tabelle 5: Vor- und Nachteile von Fresnel-Kraftwerken .....	20
Tabelle 6: Vor- und Nachteile von Solarturm-Kraftwerken .....	20
Tabelle 7: Vor- und Nachteile von Dish-Stirling-Kraftwerken .....	21
Tabelle 8: CO <sub>2</sub> -Ausstoß 2007 in Mio. t .....	27



## Abkürzungen

CSP	Concentrated Solar Power
DNI	Direct Normal Irradiance
EEG	Erneuerbares Energien Gesetz
F&E	Forschung und Entwicklung
HGÜ	Hochspannung-Gleichstrom-Übertragung
ISCC	International Sustainability & Carbon Certification
MENA	Middle East and North Africa
OPEC	Organization of Petroleum Exporting Countries
SEGS	Solar Electric Generation Systems



## 1 Einleitung

Seitdem der von den Vereinten Nationen veröffentlichte Klimabericht im Jahr 2007 die Welt schockte, erleben die Themen Klima- und Umweltschutz eine nie da gewesene Medienpräsenz. Auf einmal ist es nicht mehr nur eine kleine Minderheit von Intellektuellen, die sich für den Kauf von Ökoprodukten entscheidet oder gegen Atom- und Kohleenergie protestiert.

Es formiert sich nun spürbarer Widerstand in der Bevölkerung gegen die immer sichtbarer werdende Umweltzerstörung und gegen die auf Profit und Wachstum gepolte Wirtschaft.

Nachdem nun auch die letzten Klimaskeptiker verstummen und die vom Menschen zu verantwortende Klimaerwärmung nicht mehr zu leugnen ist, sind nun Lösungen gesucht, die den Weg in eine nachhaltige und saubere Zukunft weisen. Dies gilt vor allem für die Energiewirtschaft. Große Hoffnungen werden dabei auf die „Erneuerbare Energien“ gesetzt. Unter diesem Begriff sind alle Technologien zur Nutzung von Solar-, Wind-, Wasser-, Bio- und Geenergie zusammengefasst.

In dieser Projektarbeit soll die Nutzung der Sonnenenergie mit Hilfe von solarthermischen Kraftwerken untersucht werden. Ziel dieses Dokuments ist es, Basisinformationen zu Funktionsweise und Aufbau dieser Technologien zu vermitteln, wirtschaftliche Faktoren aufzuzeigen, mögliche politische Gegner und Förderer zu beleuchten und eine Prognose zu wagen, welche Rolle solarthermische Anlagen für die Zukunft unserer Energieversorgung spielen könnten.



## 2 Einführung in die Solarthermie

Unter Solarthermie versteht man die thermische Nutzung der Sonnenenergie. Die Einsatzmöglichkeiten solarthermischer Anlagen sind vielfältig, jedoch lassen sich grundsätzlich zwei Arten unterscheiden:

**Konzentrierende** und **nicht konzentrierende** solarthermische Anlagen.

Die nicht konzentrierenden Anlagen übernehmen in der Haustechnik einen immer größer werdenden Teil der Wärmegewinnung. Hierbei wird über Flach- oder Röhrenkollektoren solare Wärmeenergie gewonnen, die durch ein Wasser-Glykol-Gemisch abtransportiert und über einen Wärmetauscher in einen bereitgestellten isolierten Wassertank gespeichert wird. Das aufgeheizte Wasser steht der Heizungsunterstützung oder als Brauchwasser zur Verfügung. Für die Klimatisierung von Gebäuden wird viel elektrische Energie für Kompressionskältemaschinen (Klimaanlage) benötigt. Die Solarthermie kann auch hier einen großen Beitrag leisten. Durch den Einsatz von Absorptionskältemaschinen wird solar erzeugte Wärmeenergie in Kälte zum Kühlen von Räumen umgewandelt. Nicht konzentrierende Anlagen finden auch in der Schwimmbaderwärmung Gebrauch. Das zu erwärmende Badewasser strömt mittels Umwälzpumpen durch großflächige Absorber, nimmt dort die Wärme auf und gelangt direkt in das Schwimmbecken zurück.

Für die herkömmliche Stromerzeugung über Hochtemperatur-Prozesswärme sind nicht konzentrierende Anlagen durch die begrenzten Arbeitstemperaturen weniger geeignet. Um mit konzentrierenden Anlagen höhere Arbeitstemperaturen zu erreichen wird das Sonnenlicht durch einen Konzentrator (Reflektor) auf einen Empfänger (Receiver) gebündelt. Es gibt vier Typen von Kraftwerken, die im nächsten Kapitel detailliert beschrieben werden.

### 3 Solarthermische Kraftwerke

Bei der Stromproduktion durch Sonnenenergie werden Solarthermische Kraftwerke eingesetzt. Grundsätzlich wird zwischen konzentrierenden und nicht konzentrierenden solarthemischen Systemen unterschieden. Bisher spielen nur konzentrierende Systeme (CSP = Concentrated Solar Power) eine Rolle bei der Energieerzeugung und werden deshalb im Folgenden detailliert vorgestellt. Dieses Kapitel umfasst die Funktionsweise und den Aufbau sowie die Anforderungen an konzentrierenden Kraftwerkstypen. Des Weiteren werden wirtschaftliche Aspekte, Referenzprojekte und die Vor- und Nachteile solcher Anlagen gegenübergestellt.

#### 3.1 Funktionsweise und Aufbau

Ein Solarthermisches Kraftwerk bündelt das Sonnenlicht und erzeugt über einen Carnot-Prozess (idealer Kreisprozess) elektrische Energie. Wie in Kapitel 2 erwähnt existieren vier verschiedene Generatortypen.

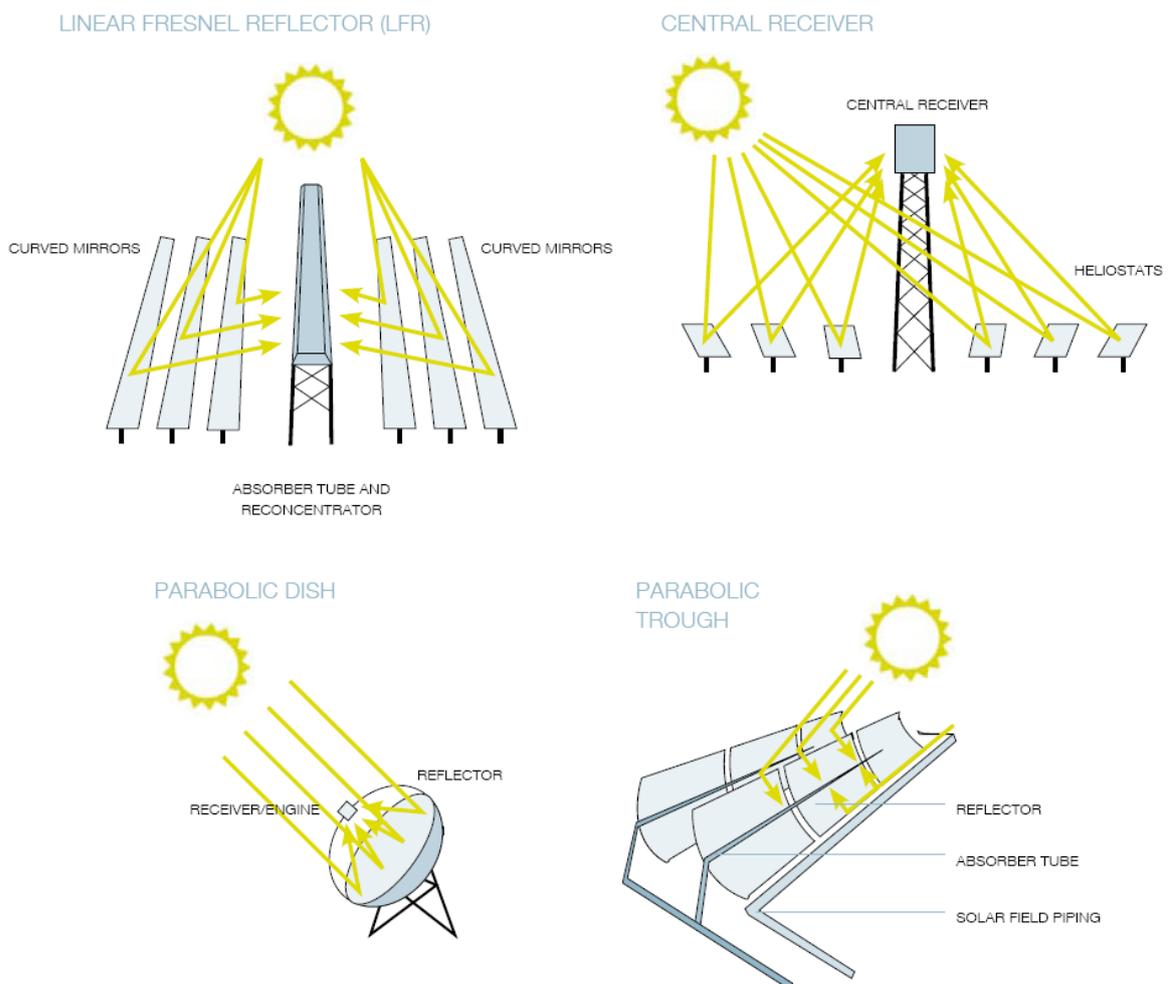


Abbildung 1: Schematische Darstellung der verschiedenen konzentrierenden Kollektoren [1]



Die obige Abbildung zeigt den vereinfachten Aufbau der verschiedenen Kollektortypen. Oben links befindet sich der Fresnel-Konzentrator, der eine Weiterentwicklung des unten rechts abgebildeten Parabolrinnenkollektors ist. Der Solarturm (oben rechts) sowie der Paraboloidkollektor (unten links), auch Dish-Stirling genannt, konzentrieren die Sonnenstrahlen punktuell und nicht linear, wie es bei den anderen beiden Typen der Fall ist.

Die Funktionsweise der verschiedenen solarthermischen Kraftwerke läuft nach einem sehr ähnlichen Schema ab. Zuerst wird die Sonnenstrahlung auf dem Kollektorfeld konzentriert und gesammelt, d.h. dass alle Anlagen der Sonne sehr genau nachgeführt werden müssen. Falls zu viel Energie zur Verfügung steht, wird ein thermischer Speicher gefüllt. Dieser Speicher gibt die Energie für den Prozess frei, wenn die Sonne mal nicht scheint. Einige Kraftwerke beinhalten eine zusätzliche Befeuerung. Hiermit wird sichergestellt, dass rund um die Uhr Strom produziert werden kann. Die thermische Energie wird über eine herkömmliche Turbine oder einer Stirling-Maschine (Heißluftmotor) in elektrische Energie gewandelt. Nach dem Wärmekraftmaschinenprozess steht außer der Elektrizität bei einigen Prozessen auch noch Dampf zur Verfügung, der in der Turbine nicht komplett umgesetzt werden konnte. Die Abbildung unterhalb des Textes zeigt das zuvor beschriebene einfache Schema eines Solarthermiekraftwerkes.

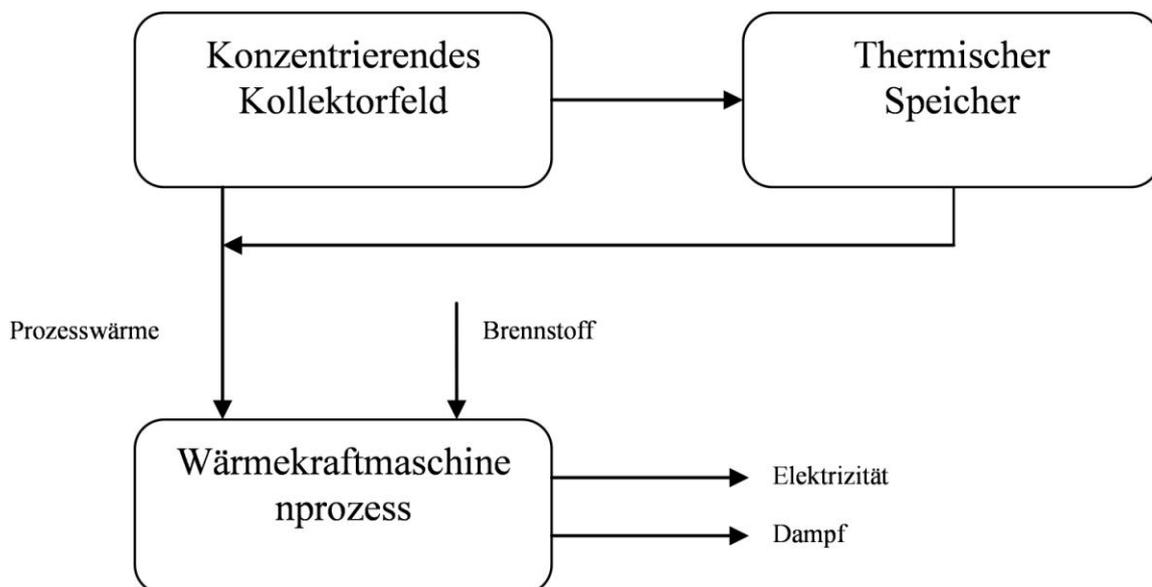


Abbildung 2: Einfaches Schema der Solarthermischen Kraftwerke

Die folgenden Unterpunkte beschreiben die einzelnen Generatortypen in Aufbau und Funktionsweise sowie deren Prozesse genauer.

### 3.1.1 Parabolrinnenkraftwerke

Das Kollektorfeld von Parabolrinnenkraftwerken kann die Sonnenstrahlen zwischen 70 – 100fach konzentrieren. Dabei entstehen Betriebstemperaturen von 350 – 550 °C. Da als Wärmeträgermedium Thermalöl mit einer Höchsttemperatur von 400 °C eingesetzt wird, ist der Wirkungsgrad im Dampfturbinenprozess begrenzt. Einige Kraftwerksvarianten, z.B. die spanischen Andasol-Anlagen, benutzen Wasser als Medium, welches in den Absorberrohren direkt verdampft. Der Vorteil ist, dass kein Thermalöl und kein Wärmetauscher benötigt werden.

Der Clausius-Rankine-Prozess findet hier Anwendung und ist ein realer Dampfturbinenprozess. Es handelt sich hierbei um ein geschlossenes System. Bei einem Druck von 100 bar verdampft das Wasser bei einer Temperatur von 311 °C. Um einen höheren Wirkungsgrad zu erzielen wird der Dampf vor dem Eintritt in die zweite Turbinenstufe zwischenüberhitzt. Durch den geschlossenen Kreislauf kann der Dampf in der Turbine bis unterhalb von 100 mbar entspannt werden. Die Kondensationstemperatur des Wasserdampfes beträgt dann 46 °C. Je niedriger die Kühltemperatur in einem Nass- oder Trockenkühlturm ist, desto niedriger ist der Kondensatordruck und desto höher ist der Wirkungsgrad. Dieser Gesamtwirkungsgrad einer Dampfturbine liegt bei etwa 35 %. Der Spitzenwirkungsgrad von Parabolrinnenkraftwerken liegt bei 23 %.[19], [8]

Bei den Parabolrinnenkraftwerken existieren zwei verschiedene Arten, um den Prozess nachts oder bei Schlechtwetterperioden aufrecht zu erhalten. Die kalifornischen SEGS-Parabolrinnenkraftwerke (Solar Electric Generation Systems) setzen auf den Einsatz von fossilen Brennstoffen zur Dampferzeugung, die in der nächsten Abbildung schematisch dargestellt ist.[8]

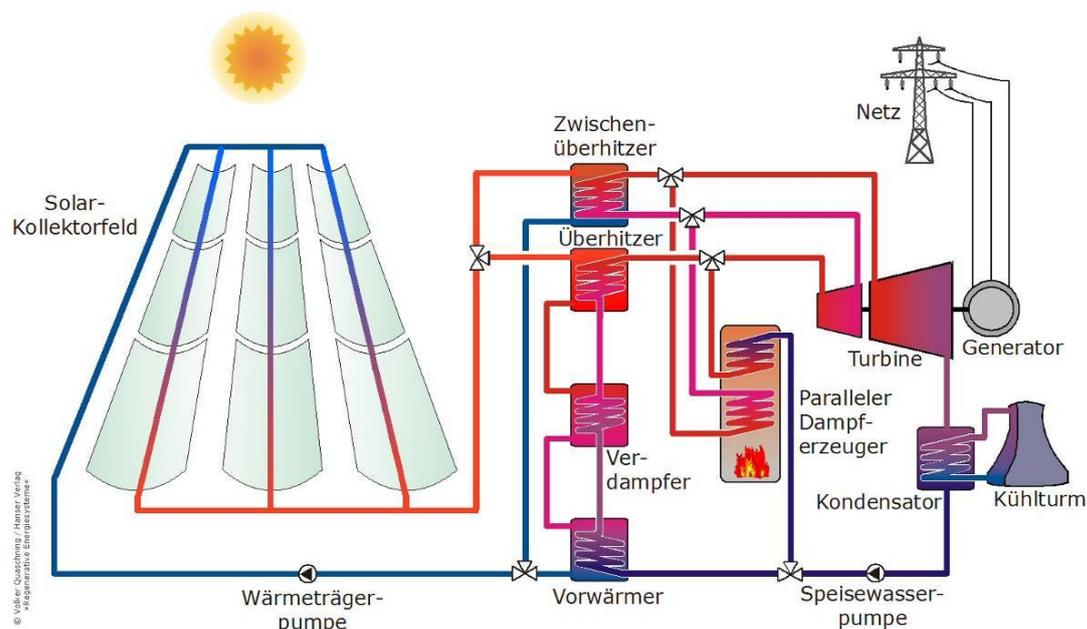


Abbildung 3: Prinzip eines Parabolrinnenkraftwerks mit parallelem Dampferzeuger und getrennten Kollektor- Dampfturbinenkreis [19]

Bei den spanischen Kraftwerksvarianten ist der fossile Anteil gesetzlich stark begrenzt. Hier werden thermische Speicher eingesetzt, die durch ein überdimensioniertes Kollektorfeld die Überschusswärme zwischenspeichern. In der nächsten Abbildung ist der fossile Dampferzeuger durch ein Zweitanksystem ersetzt worden. Hierbei handelt es sich um einen Flüssigsalzspeicher, indem zum Beladen flüssiges Salz vom kalten Tank (280 °C) in den heißen Tank (380 °C) gepumpt wird und zum Entladen wieder zurück.[1]

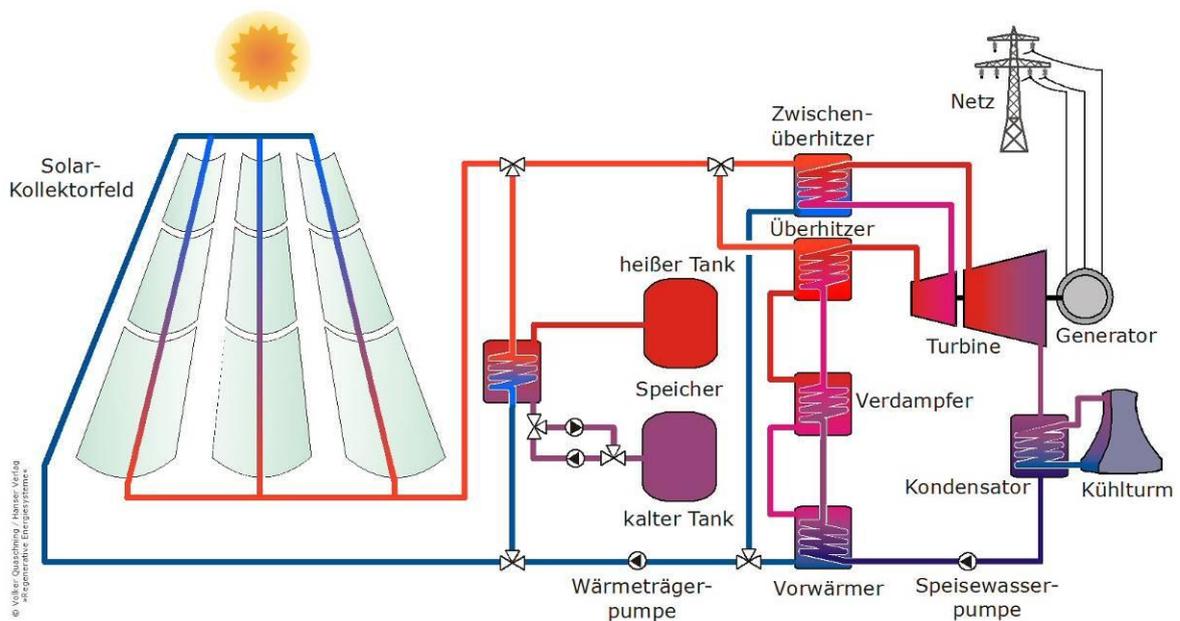


Abbildung 4: Prinzip eines Parabolrinnenkraftwerks mit einem thermischen Speicher [19]

### 3.1.2 Fresnel-Kraftwerke

Bei den Fresnel-Kollektoranlagen handelt es sich um eine Weiterentwicklung der Parabolrinnenkraftwerke. Der thermische Prozess ist jedoch der Gleiche.

Auf der nächsten Abbildung ist der typische Fresnel-Kollektor abgebildet um die Unterschiede in der Weiterentwicklung besser darlegen zu können.



Abbildung 5: Fresnel Kollektor [24]

Auf Grund eines etwas schlechteren optischen Wirkungsgrades, bedingt durch geringere Konzentration des Sonnenlichts durch einfache, ungewölbte Spiegelstreifen, fallen die Betriebstemperaturen etwas niedriger aus. In einem australischen Kohlekraftwerk in der Nähe von Sydney unterstützt eine Fresnel-Kollektoranlage die Dampfproduktion und erzeugt bei einer Dampftemperatur von 285 °C eine thermische Energie von rund 15 Megawatt. Diese Anlage ist so ausgelegt, dass in dem Absorberrohr das Wasser direkt verdampft wird.[1]

Über die Anordnung der Reflektoren entsteht ein höherer Flächennutzungsgrad. Ein Vorteil für Wüstenregionen ist, dass ein Halbschattenbereich unter den Anlagen entsteht, der Anbauflächen, Weideland oder Wasserspeicher verschatten kann. Tagsüber schützt die Anlage vor übermäßiger Verdunstung und nachts vor dem kalten Wüstenhimmel.

Ein weiterer Vorteil gegenüber den Parabolrinnenkraftwerken ist, dass das Absorberrohr nicht bewegt wird. Aus diesem Grund kann auf Rohrbögen und flexible Verbindungen verzichtet werden. Hieraus resultieren weniger Strömungswiderstände in den Rohrleitungen, die eine sehr lange Bauweise der Kollektoren zulässt. Durch diese einfache Bauweise entstehen geringere Baukosten. Dieser große Kostenvorteil steht dem geringeren Wirkungsgrad von 14 % gegenüber.[21]

### 3.1.3 Solarturm-Kraftwerke

Die Solarturm-Kraftwerke können durch einen höheren Temperaturbereich auch höhere Spitzenwirkungsgrade von 30 % erzielen. Über Heliostaten wird die direkte Solarstrahlung 600 – 1000fach auf einen Receiver konzentriert, so dass ein viel höheres Temperaturniveau erreicht werden kann. Auf den nächsten beiden Abbildungen sind die zwei unterschiedlichen Bauweisen dieser Kraftwerkstypen dargestellt. Der Hauptunterschied liegt in der Bauweise der Receiver. In der ersten Abbildung ist ein Kraftwerk mit einem offenen volumetrischen Receiver dargestellt. Durch diesen Receiver wird Umgebungsluft angesaugt und auf 650 – 850 °C erwärmt. Gegebenenfalls werden über einen Kanalbrenner gewünschte Prozesstemperaturen erreicht und über einen Wärmetauscher an den Dampfprozess abgegeben. Dieser Prozess wurde bei den Parabolrinnenkraftwerken beschrieben.[19]

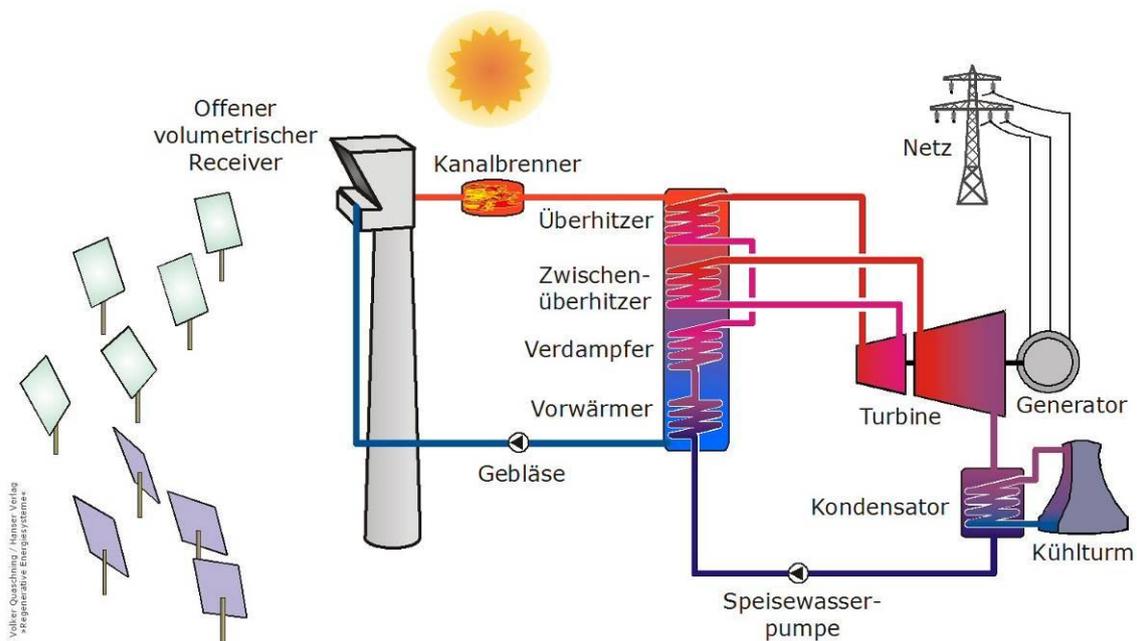


Abbildung 6: Solarturmkraftwerk mit offenen volumetrischen Receiver [19]

In der nächsten Abbildung ist ein Solarturmkraftwerk mit einem volumetrischen Druck-Receiver dargestellt, der Prozesstemperaturen von 1100 °C erreicht. Dieser Anlagentyp beinhaltet zwei Prozesse. Vor dem bereits beschriebenen Dampfprozess findet ein realer Kreisprozess statt. Dieser Prozess wird als Joule-Prozess bezeichnet. Die dazugehörige Turbine heißt Gasturbine. In der ersten Stufe der Gasturbine wird Umgebungsluft angesaugt und auf 15 bar komprimiert. Die komprimierte Luft wird im Receiver erwärmt, gegebenenfalls über einen Kanalbrenner nacherhitzt und in der zweiten Turbinenstufe wieder entspannt. Diese zweite Stufe treibt die erste Stufe und eine Generator an, der einen Teil der im Kraftwerk entstehenden Elektrizität erzeugt. Die Abwärme aus der zweiten Turbinenstufe reicht aus um den Dampfprozess anzutreiben. Der zweite Generator in diesem Kraftwerk wird von dem Dampfprozess angetrieben. [19]

Die Anordnung von Gas- und Dampfturbine wird als GuD-Prozess bezeichnet. Der Gesamtwirkungsgrad von GuD-Prozessen wird mit 60 % angegeben.[19]

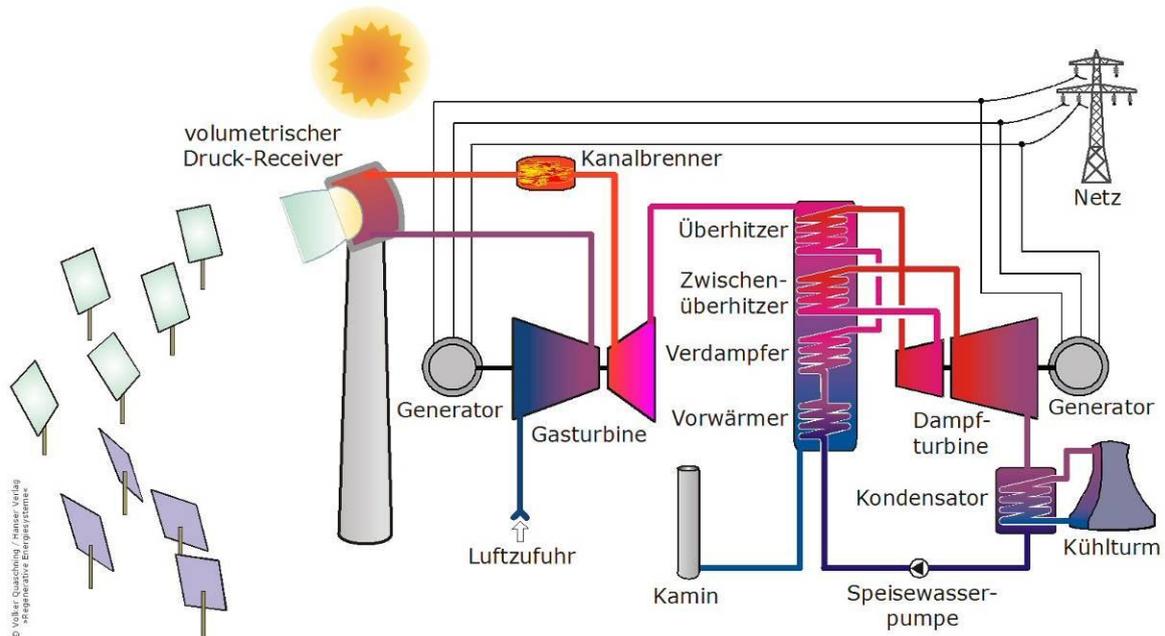


Abbildung 7: Solarturmkraftwerk mit einem volumetrischen Druck-Receiver [19]

### 3.1.4 Dish-Stirling-Kraftwerke

Dish-Stirling-Kraftwerke, auch Paraboloidkraftwerke genannt, benutzen zur Energieerzeugung einen Stirlingmotor (Heißluftmotor), der wie alle konzentrierenden Kraftwerke zusätzlich mithilfe von fossilen Brennstoffen betrieben werden kann. Der mittlere Konzentrationsfaktor liegt bei diesen Anlagen bei etwa 2500. Der Motorgenerator befindet sich direkt im Brennpunkt der Anlage. Der Motor selbst kann mit Luft, Helium oder Wasserstoff als Arbeitsgas betrieben werden.

Bei der abgebildeten Anlage handelt es sich um einen EuroDish-Prototyp an der Forschungseinrichtung PSA bei Almeria in Südspanien. Bei dieser Anlage wird das Arbeitsgas Helium mit einer Receiver-Gastemperatur von 650 °C und einem Gasdruck von 20-150 bar verwendet. Die elektrische Netto-Leistung beträgt 8,4 kW. Im Gegensatz zu den Rinnen- oder Turmkraftwerken, die nur mit ihren großen Leistungsklassen von etlichen Megawatt wirtschaftlich betrieben werden können, bieten Dish-Stirling-Anlagen eine ideale Versorgung für abgelegene Ortschaften. Spitzenwirkungsgrade von 31 % wurden in New Mexico erreicht. Größere Anlagenparks mit 20.000 Einheiten könnten eine elektrische Leistung von 100 MW erzeugen und sind in Australien für die Stahlverarbeitung geplant.[1], [21]



Abbildung 8: EuroDish-Prototyp an der Forschungseinrichtung PSA bei Almería in Südspanien [19]

Das Prinzip eines Stirlingmotors ist sehr einfach. Das Gas wird abwechselnd isotherm komprimiert, isochor erwärmt, isotherm expandiert und dann wieder isochor ausgekühlt. Hierzu werden meistens zwei Kolben eingesetzt. Der eine Kolben bildet den heißen Arbeitsraum und der andere den kalten Arbeitsraum. Diese Kolben verschieben das Arbeitsgas und sind durch einen Regenerator voneinander getrennt. Der Regenerator dient als Wärmespeicher, der sehr schnell Wärme aufnimmt und an den gleichen Arbeitsraum wieder abgibt. Die Expansion und Kompression bewegt dabei die Kolben. Die Kraft der Kolben wirkt auf eine Kurbelwelle, die dann den Generator antreibt.[19]



## 3.2 Anforderungen

### 3.2.1 Klima

Eine der wichtigsten Ressourcen für solarthermische Kraftwerke ist die solare Strahlung. Es werden also klimatische Bedingungen mit einer andauernden, ungestörten, direkten und möglichst senkrecht einfallenden Strahlung der Sonne benötigt. Sie soll mit maximaler Ausbeute energetisch genutzt werden.

Orte mit einer hohen natürlichen Wolkenbildung sind auszuschließen. Auch solche mit einem hohen Anteil an zivilisatorisch verursachten Partikeln und Gasen (Smog) sind zu vermeiden. Das führt zu Eintrübung der Atmosphäre und steigert den Anteil der diffusen Strahlung an der Gesamtstrahlungsleistung.

Verschiedene Untersuchungen haben als Standorte mit dem besten Klima für solarthermische Anwendungen vor allem die Wüstenregionen der Erde zwischen dem 40. Grad südlicher und dem 40. Grad nördlicher Breite ausgemacht.

### 3.2.2 Standort

Bevor mit dem Bau einer solarthermischen Anlage begonnen wird, stellt sich dem Projektentwickler die Frage nach dem Standort. Hier sollen die geografischen und die physikalischen Standortfaktoren betrachtet werden.

Es wird eine genügend große Fläche, die möglichst eben und relativ einfach auf dem Landweg zu erreichen ist, benötigt. Weiterhin kommen nur Gebiete in Frage, die für Bauvorhaben günstigen Untergrund aufweisen und deren Fläche nicht landwirtschaftlich nutzbar oder bewaldet ist. Auch sind historische, kulturelle und sakrale Bauwerke sowie Naturschutzgebiete auszuschließen. Die Verfügbarkeit von Wasser ist Voraussetzung.

Für das 50 MW Kraftwerk Andasol 1 in Spanien wurde eine unbebaute Fläche von etwa 1.300 m x 1.500 m genutzt. Es verfügt mit ca. 510.000 m<sup>2</sup> effektiver Spiegelfläche über ein sehr hohes „Solar Multiple“, das hier ökonomisch sinnvoll ist, weil ein sehr großer thermischer Speicher mit fast 8 äquivalenten Volllaststunden gefüllt werden soll. Bei kleinerem Speicher oder mehr Sonneneinstrahlung wird deutlich weniger Fläche benötigt, um die gleiche Leistung bereit zu stellen. Parabolrinnenkraftwerke mit besserem Wirkungsgrad werden in Zukunft auch geringeren Flächenbedarf haben. Neue Technologien wie Linear Fresnel können gegenüber dem heutigen Bedarf der Parabolrinne den Flächenbedarf näherungsweise halbieren. Das ist auf die Form dieser Anlage (z.B. weniger Abschattungsverluste) zurückzuführen. Allerdings ist das Verhältnis Leistung zu Fläche in vielen ariden Regionen kein entscheidendes Kriterium da sie für den Menschen nicht anderweitig nutzbar sind. [2]

Zu den physikalischen Größen, die bei der Planung oder Simulation betrachtet werden, gehört hier vor allem die Sonne mit ihrer Strahlungsenergie aus der direkten Strahlung. Sie ist im Gegensatz zur diffusen die Strahlung, die ohne jegliche Wechselwirkung mit der Erdatmosphäre direkt auf die Erdoberfläche trifft.



Sie wird beschrieben durch die Leistung pro Flächeneinheit und wird gemessen in Watt pro Quadratmeter [  $W / m^2$  ]. Um die vorhandene Energie darzustellen, fließt die Zeit ein und wird pro Fläche in [  $kWh/ m^2$  ] angegeben. Damit man lokal spezifische Aussagen über die zu erwartende Strahlung im Verlauf der Betriebszeit eines solarthermischen Kraftwerks machen kann, werden in der Projektqualifizierung heute meist zwei Methoden kombiniert: Es werden die von Satelliten abgeleiteten solaren Strahlungsdaten mit den bodenbasierten meteorologischen Messungen möglichst über mehrere Jahre verglichen. Dort, wo nicht genügend bodennahe Stationen vorhanden sind, wird nur mit Satellitendaten gearbeitet. „Die Verwendung dieser Daten ist sinnvoll für Simulation sowie Optimierung von Ausrichtung und Größe einer geplanten Anlage.“ [15],[13]

Auf der Erde stehen als Standorte für CSP-Anlagen nach Loster die folgenden Gebiete zur Verfügung:

<b>Location Desert</b>	<b>Desert Size</b>	<b>Irradiation</b>
	<b>km<sup>2</sup></b>	<b>W/m<sup>2</sup></b>
<b>Africa, Sahara</b>	9,064,960	260
<b>Australia, Great Sandy</b>	388,500	265
<b>China, Takla Makan</b>	271,950	210
<b>Middle-East, Arabian</b>	2,589,910	270
<b>South America, Atacama</b>	139,860	275
<b>U.S.A., Great Basin</b>	492,100	220

Tabelle 1: Wüstengebiete mit Flächenangabe und durchschnittlicher Strahlung [14]

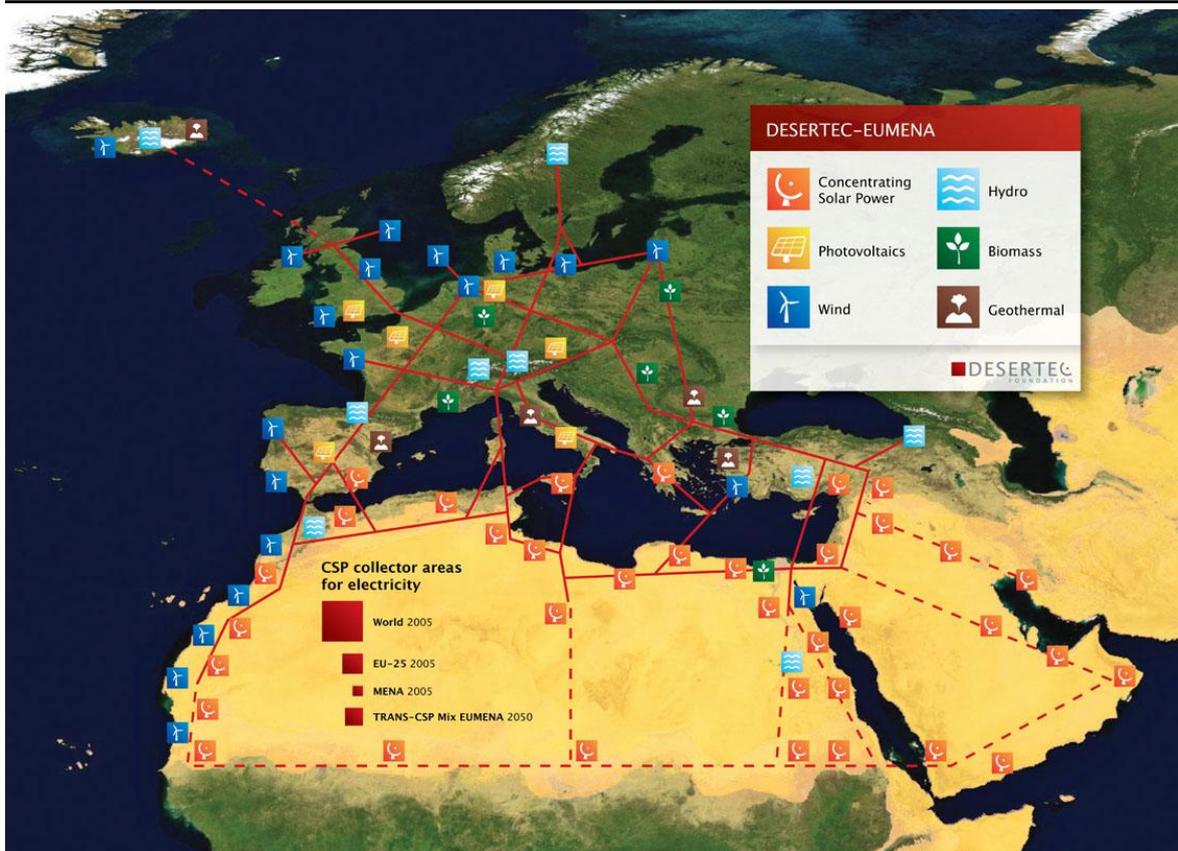


Abbildung 9: Fläche für Weltbedarf elektrischer Energie (oberes rotes Quadrat)

Die DLR (Franz Trieb et al.) hat eine Berechnung angestellt, nachdem etwa 0,4 bis 2,8 % der weltweit für CSP geeigneten Fläche ausreichen würde, um den Weltbedarf an elektrischer Energie zu decken. Das entspricht etwa der Größe Bayerns und Baden-Württembergs zusammen. Es könnten in diesem Szenario alle heute bekannten Anlagentypen wie Parabolrinnenkraftwerk, Solarturmkraftwerk, Fresnel-Spiegelkraftwerke sowie Dish-Stirling-Anlagen zum Einsatz kommen. [3],[6],[7]

### 3.2.3 Infrastruktur

Als Voraussetzung werden Verkehrswege, eine Wasserversorgung sowie ein Netz zum Weiterleiten der elektrischen Energie benötigt. Für die Versorgung der Bevölkerung vor Ort muss die Netzinfrastruktur ergänzt oder teilweise neu erstellt werden. In einem Modell des DLR wird davon ausgegangen, dass 90% der Weltbevölkerung mit einem Hochspannungs-Gleichstrom-Netzwerk unter 3.000 km Länge zwischen CSP-Anlage und Verbraucher versorgt werden könnte. [7],[16]

### 3.2.4 Rohstoffe

Um Solarkraftwerke mit herkömmlichen Kraftwerken vergleichen zu können, ist es sinnvoll, die Rohstoffe zu beschreiben, die zur Errichtung und Betrieb eines solarthermischen Kraftwerkes nötig sind. Was sind also die Komponenten existierender solarthermischer Kraftwerke und die zu ihrer Herstellung verwendeten Rohstoffe? Es sind Spiegel, die das Solarfeld bilden, die Absorber, die die Strahlungsenergie umwandeln mit dem Medium Wasserdampf oder Öl, die



Maschinentechnik mit thermischen Speichern, Dampf- oder Gasturbinen sowie Elektrotechnik und Steuerung.

Als hauptsächlich eingesetzte Rohstoffe gelten Eisen, Kupfer, Bauxit, Glas und das Wärmeträgeröl Phenol. „Dabei gehen 91 % des Eisenverbrauchs in die Stahlträgerherstellung für das Solarfeld und 97 % des Kupferverbrauchs in die Herstellung von Pumpen und Steuerleitungen. Die 93 % des Bauxits sind für die Legierung von Edelstahl bestimmt, welcher zum größten Teil in das Absorberrohr eingeht. Der Materialaufwand für die übrigen Anlagenteile ist im Vergleich zum Solarfeld eher gering. Auch der kumulierte Energieaufwand entfällt zu 47 % hauptsächlich auf den Solarfeldbau, davon 41 % für Stahl, 30 % für das Wärmeträgeröl Phenol und knapp 15 % für Flachglas.“ [16]

### 3.3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die Wirtschaftlichkeit eines solarthermischen Kraftwerks hängt stark von der Sonneneinstrahlung und damit auch von der geographischen Breite seines Standortes ab (siehe Anforderungen an Klima und Standort). Um die Wirtschaftlichkeit einer Investition im Allgemeinen analysieren zu können, müssen folgende Aspekte betrachtet werden:

- Kosten
- Erlöse
- Wettbewerb
- Markt

#### 3.3.1 Kosten

Die Kosten für solarthermische Kraftwerke setzen sich aus einer zunächst hohen Anschubinvestition und den Betriebs- und Wartungskosten zusammen.

Über die gesamte Lebensdauer eines Kraftwerks betrachtet, nehmen der Bau und das damit verbundene Darlehen ca. 80% der Gesamtkosten ein, wohingegen nur 20% auf den Betrieb und die Wartung einer Anlage entfallen. Die Wirtschaftlichkeit hängt somit stark von den Kapitalkosten und dem Diskontsatz ab. Ein weiterer wichtiger Faktor ist die Qualität und Lebensdauer der Anlagenkomponenten (z.B. Turbine).

Die Investitionskosten für ein solarthermisches Kraftwerk sind abhängig vom Kraftwerkstyp, der installierten Leistung, dem Standort und der Anbindung an das Stromnetz und der lokalen Infrastruktur. Nachdem eine Anlage entschuldet ist, fallen über einen Zeitraum von 25 bis 30 Jahren nur noch die Betriebskosten an, die zurzeit bei ca. 3 Cent pro kWh liegen.[1]

Derzeit liegen die Stromerzeugungskosten von solarthermischen Kraftwerken bei 10 bis 23 Cent pro Kilowattstunde (kWh) und sind abhängig von der durchschnittlichen Sonneneinstrahlung (siehe Abbildungen).



Spanische Standorte		Murcia		Tabernas	
Direktnormalstrahlung (DNI)	kWh/m <sup>2</sup> a	1.851		2.201	
<b>System-Auslegung</b>		<b>Fresnel</b>	<b>Rinne</b>	<b>Fresnel</b>	<b>Rinne</b>
Kollektorfläche	m <sup>2</sup>	456.000	319.000	400.000	302.000
<b>Investition</b>					
Power Block Investition	T€	36.027	35.846	36.027	35.846
Solarfeld-Investition	T€	68.400	70.141	59.940	66.545
Andere Kosten (inkl. Landkosten, ...)	T€	9.808	10.249	9.047	9.925
Unvorhergesehene Ausgaben	5%	5.712	5.812	5.251	5.616
<b>Investition gesamt</b>	<b>T€</b>	<b>119.946</b>	<b>122.048</b>	<b>110.264</b>	<b>117.932</b>
<b>Erträge (jährlich)</b>					
Solarstrahlung gesamt (DNI)	GWh/a	844	590	880	665
Wärmeenergie (solar)	GWh/a	227	218	265	275
Elektrische Energie (netto)	GWh/a	78,0	66,0	92,9	87,5
Jährl. Wirkungsgrad th. zu el.		34,4%	30,3%	35,1%	31,8%
Jährl. Wirkungsgrad DNI zu el.		9,2%	11,2%	10,6%	13,2%
<b>Stromgestehungskosten</b>	<b>ct/kWh<sub>el</sub></b>	<b>19,2</b>	<b>23,1</b>	<b>14,9</b>	<b>16,9</b>

Abbildung 10: Ergebnisse einer Simulationsrechnung des DLR: Kosten und Ertragsdaten für Parabolrinnen- und Fresnel-Technologie (span. Standorte) [17]

Afrikanische Standorte		Bechar - Algerien		Sohag - Ägypten		Aswan - Ägypten	
Direktnormalstrahlung (DNI)	kWh/m <sup>2</sup> a	2.431		2.733		3.071	
<b>System-Auslegung</b>		<b>Fresnel</b>	<b>Rinne</b>	<b>Fresnel</b>	<b>Rinne</b>	<b>Fresnel</b>	<b>Rinne</b>
Kollektorfläche	m <sup>2</sup>	372.000	294.000	360.000	278.000	388.000	262.000
<b>Investition</b>							
Power Block Investition	T€	36.027	35.846	36.027	35.846	36.027	35.846
Solarfeld-Investition	T€	55.800	64.746	54.000	61.149	43.200	57.552
Andere Kosten (inkl. Landkosten, ...)	T€	8.674	9.763	8.512	8.512	7.540	9.116
Unvorhergesehene Ausgaben	5%	5.025	5.518	4.927	5.322	4.338	5.126
<b>Investition gesamt</b>	<b>T€</b>	<b>105.526</b>	<b>115.873</b>	<b>103.466</b>	<b>111.756</b>	<b>91.105</b>	<b>107.640</b>
<b>Erträge (jährlich)</b>							
Solarstrahlung gesamt (DNI)	GWh/a	904	715	984	760	884	805
Wärmeenergie (solar)	GWh/a	295	304	338	349	337	382
Elektrische Energie (netto)	GWh/a	102,3	95,5	119,2	114,3	118,0	128,0
Jährl. Wirkungsgrad th. zu el.		34,7%	31,5%	35,2%	32,8%	35,0%	33,5%
Jährl. Wirkungsgrad DNI zu el.		11,3%	13,4%	12,1%	15,0%	13,3%	15,9%
<b>Stromgestehungskosten</b>	<b>ct/kWh<sub>el</sub></b>	<b>13,0</b>	<b>15,2</b>	<b>10,9</b>	<b>12,3</b>	<b>9,8</b>	<b>10,6</b>

Abbildung 11: Ergebnisse einer Simulationsrechnung des DLR: Kosten und Ertragsdaten für Parabolrinnen- und Fresnel-Technologie (Afrikanische Standorte) [17]

### Kostenvergleich solarthermischer Kraftwerkstypen:

Die Parabolrinnentechnologie ist sicherlich die am besten erprobte unter den solarthermischen Technologien. Die Stromgestehungskosten liegen derzeit bei 10-40 Cent pro kWh.

Zwar sind für die Fresnel-Technologie bisher weit weniger Anlagen in Betrieb, jedoch lassen erste Anlagen bereits einen Kostenvorteil von 10-15% gegenüber der Parabolrinnentechnologie erkennen. Dieser entsteht in erster Linie durch niedrigere Investitions-, Betriebs- und Wartungskosten. Die realen Marktkosten für Strom aus der Solarturms-technologie sind bisher noch nicht bekannt, da die meisten Anlagen erst in den letzten Jahren entstanden sind oder sich derzeit noch in Bau oder Planung befinden. Jedoch geht man davon aus, dass diese Technologie mittelfristig günstigeren Strom liefern wird als die Parabolrinnentechnologie.[1]



Für Dish-Stirling-Systeme können in Südeuropa bei in größerer Serie gefertigten Anlagen Stromgestehungskosten unter 20 Cent pro kWh erzielt werden, an sehr guten Standorten auch 12 bis 15 Cent und darunter.[25]

### **Historische Kostenentwicklung**

Seit den ersten solarthermischen Anlagen in den 80er Jahren (siehe Referenzen) haben sich die Stromgestehungskosten von 44 Cent pro kWh auf 17 Cent pro kWh (Standort: Südwesten der USA) um etwa zwei Drittel verringert. Die Betriebs- und Wartungskosten sind im gleichen Zeitraum von 8 auf 3 Cent pro kWh gefallen.

### **Prognostizierte Kostenentwicklung**

Mit zunehmender Größe solarthermischer Anlagen, einer höheren Anzahl von Komponentenherstellern mit höheren Fertigungskapazitäten sowie Fortschritten im Bereich Forschung und Entwicklung werden die Kosten pro erzeugte Kilowattstunde weiter sinken. Studien erwarten eine Entwicklung, die die Stromgestehungskosten um mindestens 50 % von derzeit ca. 10 Cent pro kWh auf 5 Cent pro kWh im Jahr 2050 reduzieren würde. Im Hybridbetrieb mit fossilen Brennstoffen oder in Kombination mit Meerwasserentsalzung könnten die Stromgestehungskosten sogar auf 2 Cent und weniger pro kWh bis 2050 sinken.

Für die Kapitalkosten einer Investition ist das Vertrauen der Finanzinstitute von entscheidender Bedeutung, damit Fremdkapital ohne hohe Risikozuschläge verfügbar wird. Es wird allgemein erwartet, dass Diskontsätze von derzeit 8% deutlich sinken werden.[1]

### **Förderungen**

Je nach Standort können für den Bau von solarthermischen Kraftwerken Fördermittel abgerufen werden. So wurde z.B. die Anlage „Andasol 1“ in Spanien mit einem Gesamtinvestitionsvolumen von 300 Millionen Euro mit 5 Millionen Euro durch die EU gefördert. Andere Möglichkeiten der Förderung können z.B. Vorzugsdarlehen oder Anschubfinanzierungen sein.

### **3.3.2 Erlöse**

Die Erlöse eines solarthermischen Kraftwerks sind das Produkt aus der zu erwartenden Stromleistung und dem Preis, der sich für den produzierten Strom erzielen lässt. Der erste Faktor hängt direkt mit der Sonneneinstrahlung am jeweiligen Standort zusammen und zeigt, dass die Wahl eines geeigneten Standorts entscheidend für die Wirtschaftlichkeit der Anlage ist (siehe Anforderungen).

Beim zweiten Faktor handelt es sich um die Einspeisevergütung für eine Kilowattstunde Strom. Viele Länder haben bereits eine Förderung nach deutschem Vorbild (EEG) umgesetzt oder planen diese in naher Zukunft. Somit ist auch der zweite Faktor standortabhängig.



LAND	TARIF	STATUS
Algerien	Bis zu 200% des normalen Tarifs für ISCC-Anlagen mit >20% Solarstrom.	Seit März 2004
Frankreich	30 €-Cent/kWh	Seit 2006
Südafrika	2,10 R / kWh (17 €-Cent/kWh)	Angekündigt im März 2006
Israel	16,3 US-Cent/kWh (12,6 €-Cent/ kWh)	Seit November 2006
Spanien	27 €-Cent/ kWh über einen Zeitraum von 25 Jahren	Seit 2007
Italien	22-28 €-Cent/ kWh	Seit 2008
Indien	Bis zu 10 Rupien / kWh (19 US-Cent/kWh)	2008 angekündigt
Türkei	24 €-Cent/ kWh für die ersten zehn Jahre, danach 20 €-Cent/ kWh	Entwurf, nicht endgültig beschlossen

Abbildung 12: Gesetzlich vorgeschriebenen Einspeisetarife weltweit, Juni 2009 [1]

Eine staatlich garantierte Einspeisevergütung über eine Laufzeit von bis zu 25 Jahren sowie die relativ konstante Sonneneinstrahlung für die meisten Standorte machen eine Wirtschaftlichkeitsberechnung für solarthermische Kraftwerke sehr einfach.

Voraussetzung hierfür ist jedoch eine fast 100%ige Verfügbarkeit und eine konstante Leistungsabgabe über die Lebensdauer der Anlage.

Tatsächlich liegt die Verfügbarkeit solarthermischer Kraftwerke bei über 99%. Was die Leistungsabgabe angeht, so gibt es derzeit nur für die Parabolrinnentechnologie aussagekräftige Langzeitdaten. Diese jedoch versprechen eine relativ konstante Stromproduktion bei einem durchschnittlichen Verlust von ca. 3% in 20 Jahren.

Wenn, wie beispielsweise im DESERTEC-Projekt angedacht, Strom in großem Umfang aus den MENA-Ländern durch Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) nach Europa exportiert werden soll, würden Übertragungsverluste von 10 bis 15% zu Buche schlagen.

Auf die Erlöse solarthermischer Anlagen in anderen Anwendungsbereichen, wie in Punkt 3.5 beschrieben, wird in diesem Abschnitt nicht näher eingegangen.

### 3.3.3 Markt

Die Energienachfrage ist trotz weltweiter, gegensteuernder Bemühungen in den meisten Weltregionen an Wirtschaftskraft und Wirtschaftswachstum gekoppelt.

#### Wesentliche Faktoren für die weltweite Nachfrage nach Energie sind:

- + Bevölkerungswachstum
- + Steigerung der Lebenserwartung
- + Höherer Pro-Kopf-Verbrauch
- Steigerung der Energieeffizienz
- Verbessertes Umweltbewusstsein und –verhalten
- Technologischer Fortschritt

(„+“ bedeutet nachfragesteigernd, „-“ bedeutet nachfragemindernd)



Obwohl gerade in den letzten Jahren viele Faktoren einem Anstieg des Energieverbrauchs gegensteuern, wird weltweit ein jährlicher Anstieg des Energiebedarfs von bis zu 1,6 % erwartet.[22]

Um den zukünftigen Strombedarf ermitteln zu können, ist es notwendig zu beachten, dass bisher nur ein geringer Teil des Energiebedarfs durch Strom gedeckt werden kann, was hauptsächlich mit den Schwierigkeiten der Speicherung von Strom zusammenhängt. Gelingt es künftig, Strom ohne große Verluste zu speichern, wird auch die Nachfrage signifikant steigen (z.B. durch die Umstellung auf Elektroautos).

### 3.3.4 Wettbewerb

Die Wirtschaftlichkeit eines Betriebs hängt maßgeblich von der Wirtschaftlichkeit der Konkurrenz und der damit verbundenen Wettbewerbsfähigkeit ab. Solarthermische Kraftwerke stehen im Wettbewerb zu allen anderen Formen der Energiegewinnung. Wichtigstes Kriterium der Vergleichbarkeit sind die Stromgestehungskosten pro Kilowattstunde (kWh).

**Folgende Kosten entstehen bei der Produktion einer kWh Strom mit:**

Kernenergie	3,5 Ct.
Braunkohle	2,8 Ct.
Steinkohle	3,3 Ct.
Gas	4,2 Ct.
Wasserkraft	10,2 Ct.
Wind (on-shore)	7,6 – 12,7 Ct.
Wind (off-shore)	10,0 – 16,1 Ct.
Biomasse	9,6 Ct.
Photovoltaik	50 – 60 Ct.
Solarthermie	10 – 40 Ct.

*Tabelle 2: Stromgestehungskosten unterschiedlicher Technologien [22]*

Die Kosten der solarthermischen Stromerzeugung sind, je nach Standortbedingungen, bereits konkurrenzfähig zu anderen, erneuerbaren Energieformen wie Wasserkraft, Wind und Biomasse. Jedoch ist die Stromerzeugung aus fossilen Brennstoffen im Moment noch wesentlich günstiger.

Diese Betrachtung berücksichtigt jedoch noch nicht die externen Kosten, die bei der Stromgewinnung anfallen. Unter externen Kosten versteht man Folgekosten, die außerhalb des Preismechanismus liegen, der das zentrale Steuerungselement der Marktwirtschaft darstellt. Beispiele hierfür sind Umwelt- und Gesundheitskosten.



Energieträger zur Stromerzeugung	Externe Kosten in Cent/KWh
Braunkohle	8,7
Steinkohle	6,8
Heizöl	6,1
Erdgas	3,9
Wasserkraft (Laufwasser 300 kW)	0,4
Photovoltaik (monokristallin, Dach, 3 kW peak)	0,8
Windkraft (onshore, 800 kW peak)	0,1

Abbildung 13: Externe Kosten der Stromerzeugung in Deutschland (2005) aus einer Studie des deutschen Umweltbundesamtes (2007)

Die in dieser Grafik nicht aufgeführten externen Kosten für solarthermische Kraftwerke wurden in einer Studie von Krewitt zu 0,18 Cent pro kWh berechnet. Auch wenn die externen Kosten derzeit bei Investitionsentscheidungen noch keine allzu große Beachtung finden, macht diese Aufstellung einen Vergleich zu gleichen Bedingungen erst möglich.[22]

Da zukünftig mit einer monetären Bewertung von Umweltschäden zu rechnen ist, wird das die Wettbewerbsfähigkeit von erneuerbaren Energien im Vergleich zu fossilen Brennstoffen erheblich verbessern. Momentan sind Investitionen in solarthermische Kraftwerke jedoch noch stark von öffentlichen Förderungen und Subventionen abhängig.

### 3.4 Vor- und Nachteile

Dieses Kapitel soll die Vor- und Nachteile von Solarthermischen Kraftwerken in tabellarischer Form darstellen. Nach einer allgemeinen Beschreibung in der folgenden Tabelle werden die einzelnen Kraftwerkstypen gesondert behandelt.

Vorteile	Nachteile
Nutzung einer nie versiegenden Energiequelle	Nur Direktstrahlung nutzbar
Zuverlässige tägliche Leistungsabgabe über Hybridbetrieb	Nur in sonnenreichen Regionen wirtschaftlich
Modularer Aufbau	Großteils noch in der Forschung und Entwicklung
Vielseitige Einsatzmöglichkeiten	Noch nicht ohne Subventionen wirtschaftl.
Keine radioaktive Strahlung	Abhängigkeit von Stromkonzernen und von politisch instabilen Regionen
Kein CO <sub>2</sub> Ausstoß	Stromproduktion abseits der Verbraucher
Vielseitige Einsatzmöglichkeiten	

Tabelle 3: Allgemeine Vor- und Nachteile von solarthermischer Kraftwerke



### 3.4.1 Parabolrinnenkraftwerke

Vorteile	Nachteile
Ausgereifte verfügbare Technologie	Thermoöl als Wärmeträgermedium in manchen Anlagentypen
Modularer Aufbau	Zusätzlicher Wärmetauscher bei Thermoöl
Hybridanlagen bewährt	Absorberrohr beweglich, flexible Verbindungen, dadurch hohe Strömungswiderstände
Geringe Materialanforderungen	Aufwendige Absorberrohre und Reflektoren
Speichermöglichkeit	Beschränkte Betriebstemperatur

*Tabelle 4: Vor- Nachteile von Parabolrinnenkraftwerken*

### 3.4.2 Fresnel- Kraftwerke

Vorteile	Nachteile
Kostengünstiger als Parabolrinne durch einfachere Form der Spiegel	Verschattungsverluste zwischen den Spiegelstreifen
Absorberrohr wird nicht bewegt, dadurch längere Konstruktionen möglich und weniger Strömungswiderstände	Niedriger Wirkungsgrad
Halbschattenbereich unter den Anlagen, gut für Wüstenregionen, unter der Anlage Ackerland oder Wasserspeicher, Schutz des Erdreichs vor Sonne und vor kalten Nachthimmel	Niedrige Prozesstemperatur
Hoher Flächennutzungsgrad	
Einfache Verfügbarkeit	
Hybridbetrieb möglich	

*Tabelle 5: Vor- und Nachteile von Fresnel-Kraftwerken*

### 3.4.3 Solarturm-Kraftwerke

Vorteile	Nachteile
Hohe Prozesstemperatur	Ungenügend kommerziell getestet
Hoher Wirkungsgrad	
Speicherung auf hohem Temperaturniveau	
Hybridbetrieb möglich	

*Tabelle 6: Vor- und Nachteile von Solarturm-Kraftwerken*



### 3.4.4 Dish-Stirling-Kraftwerke

Vorteile	Nachteile
Sehr hohe Wirkungsgrade	Keine groß angelegten kommerziellen Beispiele
Modularer Aufbau	Geringere Anpassung an Bedarfsschwankungen im Stromnetz
Einfache Herstellung	
Keine Wasseranforderungen für die Kühlung	
Ideal für die Versorgung von abgelegenen Ortschaften	

*Tabelle 7: Vor- und Nachteile von Dish-Stirling-Kraftwerken*



## 3.5 Andere Anwendungsbereiche

Hauptanwendungsbereich solarthermischer Kraftwerke ist derzeit noch die Stromerzeugung. Jedoch gibt es andere, innovative Anwendungsmöglichkeiten, die wirtschaftlich und ökologisch sinnvoll sind und versprechen, noch mehr aus der Solarthermie herauszuholen.

### 3.5.1 Prozesswärme

Eine von der Internationalen Energieagentur (IEA) in Auftrag gegebenen Studie aus dem Jahr 2008 stellte fest, dass in verschiedenen Branchen, wie der Lebensmittel-, Wein- und Getränke-, Transportmittel-, Maschinenbau-, Textil-, Zellstoff- und Papierindustrie, etwa 27 % der Wärme bei mittleren Temperaturen (100 - 400°C) und 43% bei Temperaturen von über 400°C benötigt werden.[1]

Der Studie zufolge eignen sich die Lebensmittel- (inklusive Wein- und Getränke-), Textil-, Transportmittel-, Metall und Kunststoff verarbeitende sowie die chemische Industrie am besten für den Einsatz von Prozesswärme aus solarthermischen Anlagen. Solarthermische Anlagen könnten auch für das Beheizen oder Kühlen von Fabrikgebäuden eingesetzt werden.

Für Temperaturen bis 400°C sind Anlagen mit Parabolrinnen- und Fresnel-Technologien am besten geeignet. Bei Hochtemperaturverfahren (mehr als 1000°C), wie z.B. bei der Keramikverarbeitung, könnte der Einsatz von Solartürmen oder Dish-Stirling-Systemen sinnvoll sein.

### 3.5.2 Solarbrennstoffe

Die Entwicklung solarer Brennstoffe (z.B. Wasserstoff) ist für die Wirtschaft von enormer Bedeutung, nicht zuletzt auch aufgrund derzeitiger Probleme mit der Speicherung von Strom. Bis 2050 wird eine Wasserstoff-Nachfrage prognostiziert, die etwa dem Energiegehalt von einer Milliarde Tonnen Erdöl entsprechen soll.[1]

Bisher ist die Herstellung solarer Brennstoffe sehr energieaufwändig und aus Klimagesichtspunkten problematisch. Eine „saubere“, weil emissionsfreie Massenproduktion wäre mit Hilfe von solarthermischen Anlagen möglich. Dafür wäre besonders die Solarturm-Technologie aufgrund der erzielbaren Temperaturen von über 1000°C geeignet.

### 3.5.3 Entsalzung

Bisher wurde die Entsalzung, d.h. die Umwandlung von Meerwasser zu Trink- und Nutzwasser, nicht als mögliche Lösung gegen die zunehmende Wasserknappheit gerade in ariden Regionen angesehen. Gründe hierfür waren vor allem der große Energiebedarf und mögliche Schäden für Meereslebewesen.

Die deutlich höhere Verfügbarkeit und Bezahlbarkeit solarthermisch erzeugter Energie hat jedoch zu einem Umdenken geführt. Eine Studie des Deutschen Luft- und Raumfahrtzentrums (DLR) bescheinigt, dass Solarressourcen in der MENA-Region genug Energie für die Entsalzung liefern könnten um das wachsende Problem der Wasserversorgung zu lösen.[1]



### 3.6 Referenzprojekte

Das Prinzip der Bündelung direkter Sonneneinstrahlung zur Erzeugung hoher Temperaturen und der Umwandlung dieser thermischen Energie in Strom ist seit über einem Jahrhundert bekannt.

Bereits 1912 wurden Parabolrinnen zu Dampferzeugung für eine 45 kW-Dampfmotorpumpe in Ägypten eingesetzt. Die Bewilligung für eine Parabolrinnen-Demonstrationsanlage in Deutsch-Südwest-Afrika erteilte der Deutsche Reichstag bereits 1916, jedoch kam es aufgrund des Ersten Weltkriegs und des aufkommenden Erdölzeitalters nicht zu einer Umsetzung.[26]

Wirtschaftlich genutzt wird das Prinzip der Solarthermie erst seit Mitte der 80er Jahre.

Frühe Solarkraftwerke					
NAME	STANDORT	LEISTUNG (MWE)	TYP, WÄRMETRÄGER & WÄRMESPEICHER	INBETRIEBNAHME	FINANZIERUNG
Eurelios	Adrano, Sizilien	1	Solarturm, Wasser-Dampf	1981	Europäische Gemeinschaft
SSPS/CRS	Almería, Spanien	0.5	Solarturm, Natrium	1981	8 europäische Länder & USA
SSPS/DCS	Almería, Spanien	0.5	Rinne, Öl	1981	8 europäische Länder & USA
Sunshine	Nio, Japan	1	Solarturm, Wasser-Dampf	1981	Japan
Solar One	Kalifornien, USA	10	Solarturm, Wasser-Dampf	1982	US Energieministerium & Versorgungsbetriebe
Themis	Targassonne, Frankreich	2.5	Solarturm, Salzschnmelze	1982	Frankreich
CESA-1	Almería, Spain	1	Solarturm, Wasser-Dampf	1983	Spanien
MSEE	Albuquerque, USA	0.75	Solarturm, Salzschnmelze	1984	US Energieministerium & Versorgungsbetriebe
SEGS-1	Kalifornien, USA	14	Rinne, Öl	1984	Private Projektfinanzierung – Luz
Vanguard 1	USA	0.025	Schüssel, Wasserstoff	1984	Advanco Corp.
MDA	USA	0.025	Schüssel, Wasserstoff	1984	McDonnell-Douglas
C3C-5	Krim, Russland	5	Solarturm, Wasser-Dampf	1985	Russland

Abbildung 14: Erste kommerzielle Solarkraftwerke [1]

Aufgrund gestiegener Preise für fossile Brennstoffe und gezielten Fördermaßnahmen für solarthermische Kraftwerke, wurden insbesondere in den letzten Jahren viele neue solarthermische Anlagen geschaffen oder sind im Bau bzw. in Planung.

Denn das Potenzial in den trockenen Regionen der Erde ist durchaus vorhanden. Das beweist eine Anlage in der Mojave-Wüste in Kalifornien. Hier besteht seit 1984 ein Parabolrinnenkraftwerk, das nach der Erweiterung im Jahr 2011 sogar 550 MW leisten soll. Diese Leistung entspricht etwa der Größe eines kleinen Kernkraftwerkes.



**Wichtige solarthermische Kraftwerke die Mitte 2009 in Betrieb oder im Bau sind\***  
(Status zeigt an ob O = in Betrieb, C = im Bau/Auftragsvergabe, P = in Planung)

STANDORT	NAME DER ANLAGE: BAUHERR	STATUS	TYP	LEISTUNG (MW)	SOLAR-LEISTUNG (MWE)	INBE-TRIEB-NAHME
Israel	Ashalim: Ausschreibungsverfahren; Zwei solarthermische Kraftwerke, jeweils mit einer installierten Leistung von 80 MW bis 125 MW und einer installierten Gesamtleistung von bis zu 220 MW.	P	Rinne	220	220	2012
Marokko	Marokko ISCC Anlage 2	O	Rinne		6	TBD
Marokko	Abi Ben Mathar: ONE / Abengoa	C	ISCC/Rinne	470	20i	TBD
Algerien	Hassi R'mel: Abengoa (GEF-Finanzierung); NEAL hat Angebote von nationalen und internationalen Investoren für den Bau-Besitz-Transfer dieses 150-MW-Solar-/Erdgas-Hybridkraftwerkes ausgeschrieben	C	ISCC/Rinne	150	25ii	2010
Ägypten	Kuramayt: Iberdola (GEF-Finanzierung); Das Thermalkraftwerk wird durch einen gestützten JBIC-Kredit über US\$ 97 Mio. mitfinanziert. Das Projekt wird der NREA gehören, welche die lokalen Mittel bereitstellt, die für das Projekt benötigt werden.	C	ISCC/Rinne	150	25	2010i
Algerien	2 x ISCC-Anlagen: NEAL; Zwei Anlagen von je 400 MW, davon jeweils 70 MW Solarenergie	P	ISCC/Rinne	800	140	2015
Südafrika	Northern Cape Province: Eskom	P	Solarturm	100	100	TBC
Spanien	Solucar PS-10: Abengoa; Nahe Sevilla, das erste spanische solarthermische Kraftwerk, das ans Netz ging. Das PS-10-Projekt erhielt €5 Mio. vom 5. Rahmenprogramm der Europäischen Union. Es wird jährlich 24 GWh Solarstrom erzeugen.	O	Solarturm	11	11	2006
Spanien	Anzacollar TH: Abengoa	O	Schüssel/Stirling	8 x 0.01	0.08	TBD
Spanien	Andasol 1 & 2: Solar Millennium/ ACS Cobra; Zwei Anlagen mit je 50 MW	O	Rinne	100	100	2008/09ii
Spanien	Andasol 3: Solar Millennium; 50 MW, 7.5 h storage	C	Rinne	50	50	2011
Spanien	Ibercol: Solar Millennium; 50 MW, 7.5 h storage	C	Rinne	50	500	2011
Spanien	PS-20: Abengoa; Bau hat bereits begonnen. Die Anlage wird 2008 am gleichen Standort wie die PS-1 ans Netz gehen und 4.8 GWh / Jahr erzeugen.	C	Solarturm	20	20	2009
Spanien	Solnova Electricidad 1, 3 und 4: Abengoa; Drei 50 MW-Anlagen im Bau, zwei weitere in Planung. Solnova 1, 2, 3, 4 und 5 werden zusammen insgesamt 114,6 GWh / Jahr erzeugen.	C	Rinne	150	150	2009-10iii
Spanien	Lebrija: Sacyr, Solel (Valoriza)	C	Rinne	50	50	2010iv
Spanien	Ibercol Ciudad Real: Iberdrola; Wird über einen Zeitraum von 25 Jahren 114 GWh /Jahr erzeugen.	C	Rinne	40	40iii	2009
Spanien	Alvarado 1: Acciona	C	Rinne	50	50	2009
Spanien	Palma de Rio 1 & 2: Acciona; Zwei Anlagen mit je 50 MW, der Bau der zweiten beginnt im Juni 2009.	C	Rinne	100	100	2010
Spanien	Puertollano: Iberdrola	C	Rinne	50	50	TBC
Spanien	Manchasol 1: ACS Cobra; Zwei Anlagen mit je 50 MW	C	Rinne	100	100	2010/11
Spanien	Extresol 1 & 2: ACS Cobra; Zwei Anlagen mit je 50 MW	C	Rinne	100	100	2009/10v
Spanien	Gemasolar (Solar Tres): Sener, Masdar; Das erste Solarkraftwerk mit zentralem Solarturm und Salzabsorbertechnik, das für die kommerzielle Versorgung geeignet ist. Wird ca. 100 GWh/Jahr erzeugen	C	Solarturm	50	17	2008
Spanien	PE1: Novatec/Prointec	O	LFR	1.4	1.4	2009
Spanien	Badajoz: La Dehesa	C	Rinne	50	50	2009
Spanien	Badajoz: La Florida: SAMCA	C	Rinne	50	50	2010
Spanien	Majadas 2: Acciona	C	Rinne	50	50	2009
Italien	Solarleistung in bestehendes Kombikraftwerk integriert	C	Rinne	760	5	2010
Spanien	Andasol 3: Solar Millennium	P	Rinne	50	50	2011
Griechenland	Solarleistung unter Verwendung des Dampfzyklus	P	Rinne	50	50	TBD
Deutschland	Solar Tower Jülich	O	Solarturm	1.5	1.5	2008

Abbildung 15: Kommerzielle Solarkraftwerke im Betrieb, im Bau oder in Planung [1]



STANDORT	NAME DER ANLAGE; BAUHERR	STATUS	TYP	LEISTUNG (MW)	SOLAR-LEISTUNG (MWE)	INBE-TRIEB-NAHME
USA	SEGS VIII und IX: Luz / Solel; Zwei Anlagen mit je 80 MW	O	Rinne	160	160	1989/90
USA	SEGS II- VII: Luz / Solel; Sechs Anlagen mit je 30 MW	O	Rinne	180	180	1984-89
USA	SEGS I: Luz / Solel	O	Rinne	13.8	13.8	1984
USA	Saguaro APS Plant: Solargenix	O	Rinne	1	1	2006
USA	Nevada Solar One: Acciona; Bau hat 2006 begonnen. Kommerzieller Betrieb wird über 130 GWh / Jahr erzeugen	O	Rinne	64	64	2007
USA	Kimberlina: Ausra	O	LFR	5	5i	2008
USA	Idaho Demonstration plant: Sopogy	C	Mikro-STA		0.05	
USA	Mojave: Solel; Diese Anlage könnte Strom für 400.000 Haushalte liefern. Stromabnahmevertrag wurde 2007 geschlossen.	P	Rinne	553	553ii	2011
USA	Solar One, Phase 1: Stirling Energy Systems (SES)	P	Schüssel-Motor	300	300	2009-2012
USA	Solar Two, Phase 1: SES; Stirling Energy Systems (SES) haben einen Stromabnahmevertrag mit Southern California Edison Company über 500 MW Strom aus ihren Stirlingmotoren abgeschlossen, optionale Ausweitung auf 850 MW.	P	Schüssel-Motor	500	500	2009-2010
USA	Solana: Abengoa; In Arizona gelegen, der Bauherr hat mit Arizona Public Service einen Vertrag für den Bau und Betrieb abgeschlossen.	P	Rinne	280	280	2012
USA	Carrizo (Kalifornien): Ausra; Die Komponenten für diese Anlage werden in einem eigens dafür gebauten Werk in den USA gefertigt.	P	LFR	177	177	2010ii
USA	Harper Lake (Kalifornien): NextEra	P	Rinne	250	250	2011
USA	Beacon (Kalifornien): NextEra	P	Rinne	250	250	2011
USA	Ivanpah 1: Brightsource Energy	P	Solarturm	100	100	2010
USA	Invanpah 2 : Brightsource Energy	P	Solarturm	300	300	2012-2013
USA	Kalifornien: BrightSource; Stromabnahmevertrag mit PG&E	P	Solarturm	900	900	TBD
USA	Kalifornien: Brightsource; Stromabnahmevertrag mit Southern California Energy	P	Solarturm	1300	1300	TBD
USA	Florida: Florida Power and Light, Ausra	P	LFR	300	300	No data
USA	New Mexico: eSolar	P	Solarturm	105	105	2011
USA	Südkalifornien: eSolar; Stromabnahmevertrag mit SCE	P	Solarturm	140	140	2011
USA	Coalinga: Martifer Renewables	P	Rinne	107	107	2011
USA	Next Generation Solar Centre: NextEra	P	Rinne als Zusatz zu ISCC	75	75	2011
USA	Solar Two, Phase 2: SES	P	Schüssel-Motor	600	600	2011
USA	Solar One, Phase 2: SES	P	Schüssel-Motor	300	300	2013-2014
USA	Nevada: Solar Millennium	P	Rinne	250	250	2013*2014
Mexiko	Solarthermisches Hybridkraftwerk: GEF-Finanzierung, Auftrag nicht erteilt	P	Rinne	480	31	TBD
USA	Kalifornien: Bethel Energy	P	Parabolrinne	100	100	TBD
USA	Palmdale Hybrid: Inland Energy	P	Rinne als Zusatz zu ISCC	50	50	TBD
USA	Victorville Hybrid: Inland Energy	P	Rinne als Zusatz zu ISCC	50	50	TBD
China	China Plant Expansion: Solar Millennium	C	Rinne		50	TBD
Australien	Liddel Power Station: Ausra/ Macquarie Generation	C	LFR	2000	2	2009
<b>Summe in Betrieb (MW)</b>				560 MW		
<b>Summe im Bau (MW)</b>				984 MW		
<b>Summe in Planung/angekündigt (MW)</b>				7,463 MW		

Abbildung 16: Kommerzielle Solarkraftwerke im Betrieb, im Bau oder in Planung [1]

## 4 Vergleich Solarthermie und Photovoltaik

Im Gegensatz zur Photovoltaik, bei der direkte und diffuse Lichtstrahlung über Halbleiter in Strom umgewandelt werden, wird bei der Solarthermie nur die direkte Sonneneinstrahlung über große Parabolspiegel gebündelt, um aus Flüssigkeiten Dampf zu erzeugen, der wiederum Turbinen antreibt.

Solarthermische Kraftwerke erreichen, je nach Bauart, höhere Wirkungsgrade bei meist niedrigeren spezifischen Investitionen als Photovoltaikanlagen, haben jedoch höhere Betriebs- und Wartungskosten.[26]

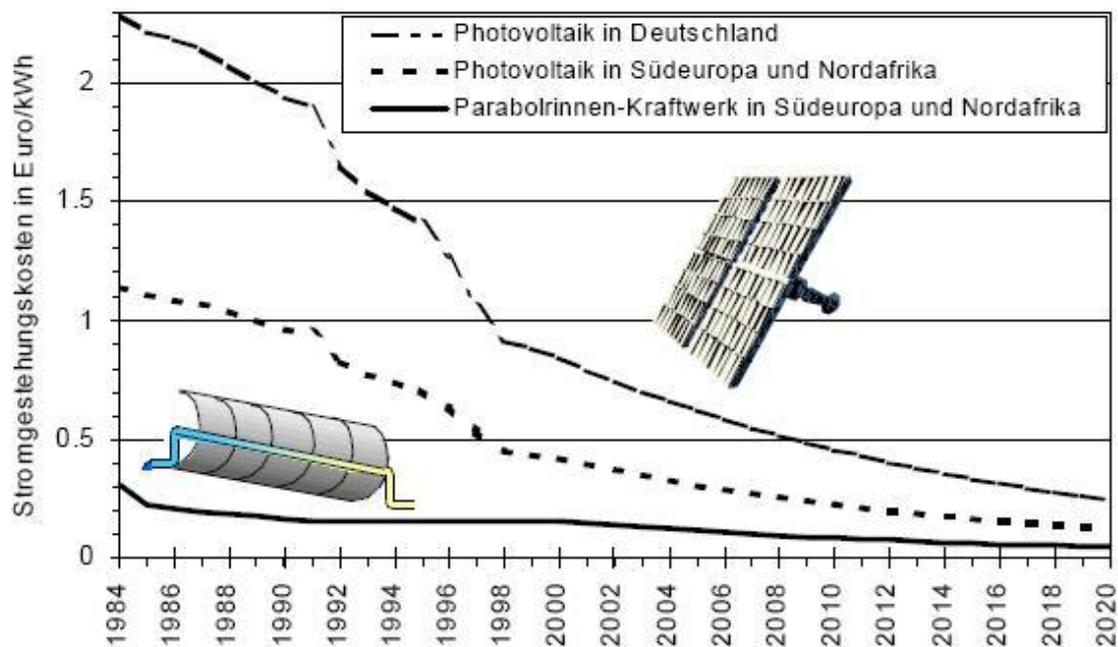


Abbildung 17: Vergleich der Entwicklung der Stromgestehungskosten von Photovoltaikanlagen und Parabolrinnen-Kraftwerken [26]

Wie in Abbildung 17 zu sehen, liegen die Stromgestehungskosten bei solarthermischen Anlagen deutlich unter denen der Photovoltaik.

Durch den Einsatz von Wärmespeichern oder im Hybridbetrieb können solarthermische Kraftwerke im Gegensatz zur Photovoltaik eine tägliche Leistungsabgabe garantieren, was eine höhere Attraktivität und Planungssicherheit im Kraftwerksverbund bedeutet.

Während solarthermische Kraftwerke zentral, in großen Anlagen und überwiegend in sonnenreichen Regionen Strom erzeugen, können photovoltaische Anlagen dezentral und auch in Kleinanlagen dort Strom produzieren, wo er benötigt wird.



## 5 Ökologische Betrachtung

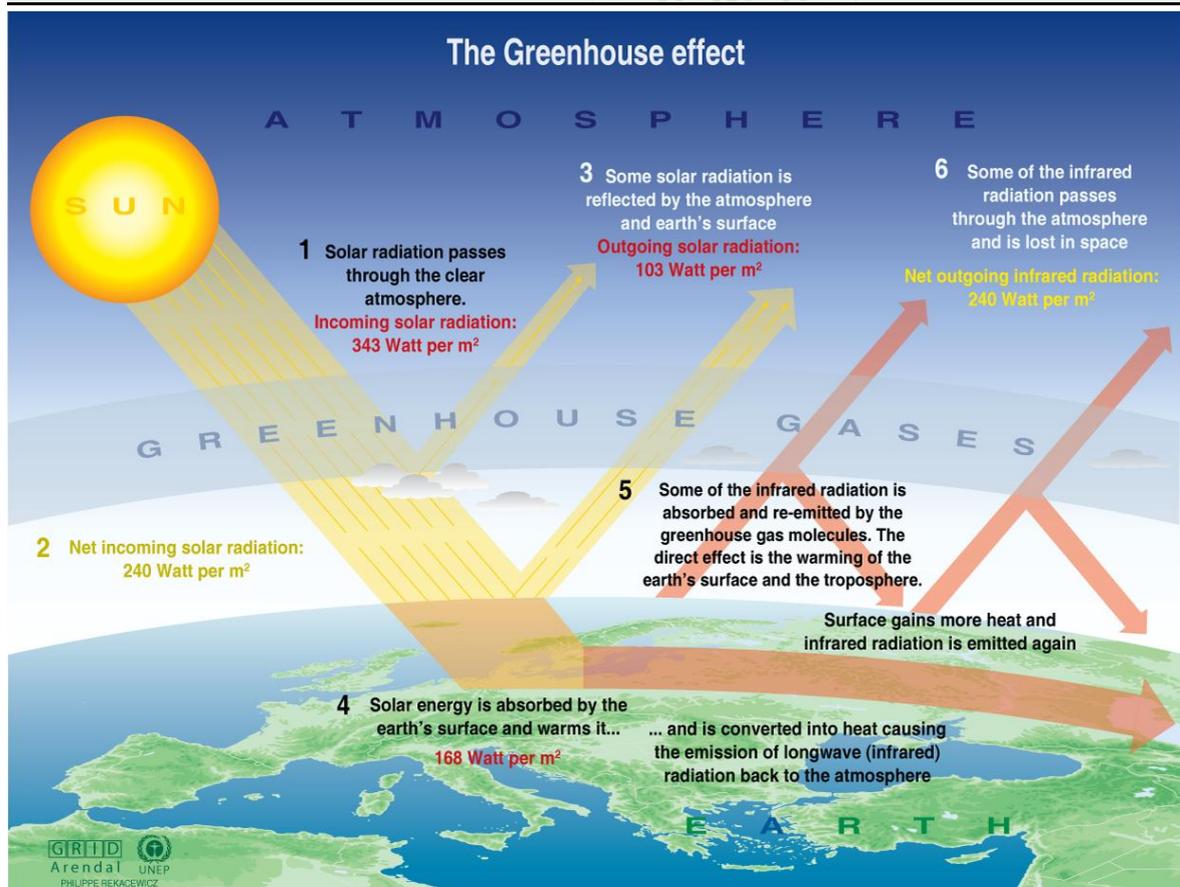
### 5.1 Einfluss und Entwicklung von CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre

Für den sogenannten Treibhauseffekt sind verschiedene gasförmige Stoffe verantwortlich. Wie in den folgenden Abbildungen beschrieben, geschieht das durch die Wärmestrahlung (infrarot), die durch die Treibhausgase in der Atmosphäre absorbiert und zur Erde zurück emittiert wird. Die Erderwärmung durch natürlich vorhandenen Wasserdampf und CO<sub>2</sub> macht das Leben auf der Erde erst möglich. Doch seit einigen Jahren wird ein Anstieg der Temperatur auf der Erde beobachtet. Das ist nachweislich durch den vom Menschen verursachten Ausstoß von sogenannten Treibhausgasen zurückzuführen. Es entsteht eine globale Erwärmung und damit einhergehend ein Klimawandel auf der Erde. Der Anteil am Treibhauseffekt liegt für Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) bei etwa 26%. Die Hauptverursacher sind in erster Linie die westlichen Industrieländer und seit neuestem auch China.[11]

Weltweit	30.892
USA	6.575
China	6.389
frühere SU	2.553
Mittlerer Osten	1.573
Japan	1.393
Südamerika	1.159
Afrika	1.020
Deutschland	861
GB	590
Italien	493
Frankreich	421
Spanien	398
Niederlande	265

*Tabelle 8: CO<sub>2</sub>-Ausstoß 2007 in Mio. t*

Zu bedenken ist hier, dass China als Exportweltmeister einen Großteil seiner Waren in die Industrieländer sendet. Seine CO<sub>2</sub>-Bilanz ist somit zu einem Teil durch diese Exportproduktion belastet. Wie man aber Schwellenländern das Recht auf industrielle Entwicklung zubilligen kann, ohne einen Anstieg der Treibhausgase zu verursachen, kann hier nicht erörtert werden. Das ist Thema weltweiter Klimakonferenzen.



Sources: Okanagan university college in Canada, Department of geography, University of Oxford, school of geography; United States Environmental Protection Agency (EPA), Washington; Climate change 1995, The science of climate change, contribution of working group 1 to the second assessment report of the intergovernmental panel on climate change, UNEP and WMO, Cambridge university press, 1996.

Abbildung 18: Solare Strahlung und ihre Wechselwirkung mit der Atmosphäre, Entstehung des Treibhauseffekts

Der Anstieg der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emmisionen beschreibt R.Weiler in einer Präsentation wie folgt: "Pre-industrial CO<sub>2</sub>: 280 ppmv - Today CO<sub>2</sub>: 384 ppmv". Eine Konzentration von 350 ppmv ist für eine nachhaltige Entwicklung jedoch gerade noch vertretbar. Die Steigerung der letzten 2000 Jahre wird durch folgende Grafik veranschaulicht. Dabei zeigt der Anstieg seit dem Jahr 1750 die menschlichen Aktivitäten mit Beginn der Industrialisierung. [18],[9],[12]

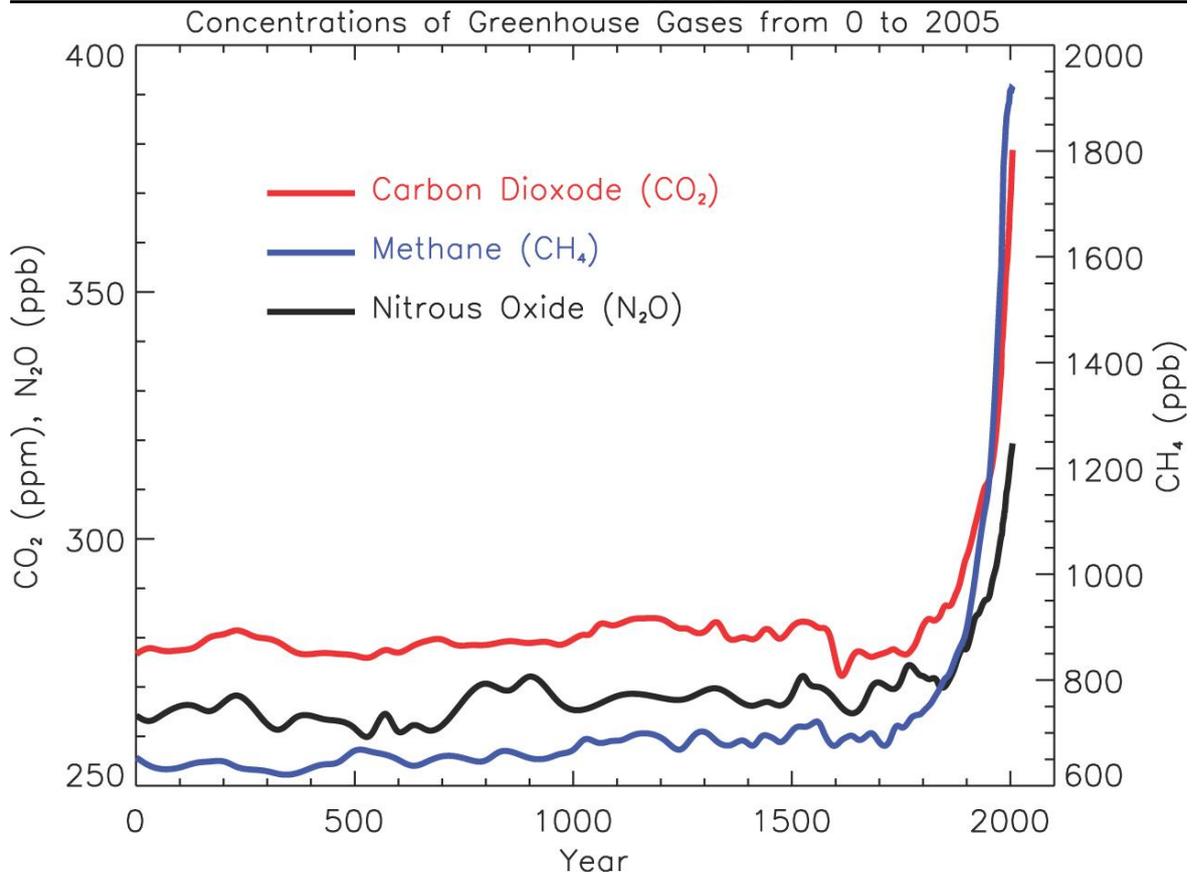


Abbildung 19: Steigerung der CO<sub>2</sub> Konzentration in der Atmosphäre (rote Linie) in ppm

Die Strahlungsverteilung und Intensität lässt sich sehr gut in der folgenden Grafik von Rhode ansehen. Die auf die Erde wirkende Sonneneinstrahlung (sichtbares Licht) ist rot und die Strahlung die von der Erdoberfläche emittiert wird ist blau (infrarot) dargestellt. Der Anteil der absorbierten und gestreuten Strahlung ist kumuliert (alle gasförmigen Stoffe) und einzeln (Wasserdampf, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, Methan [CH<sub>4</sub>]) darunter aufgeführt.[20]

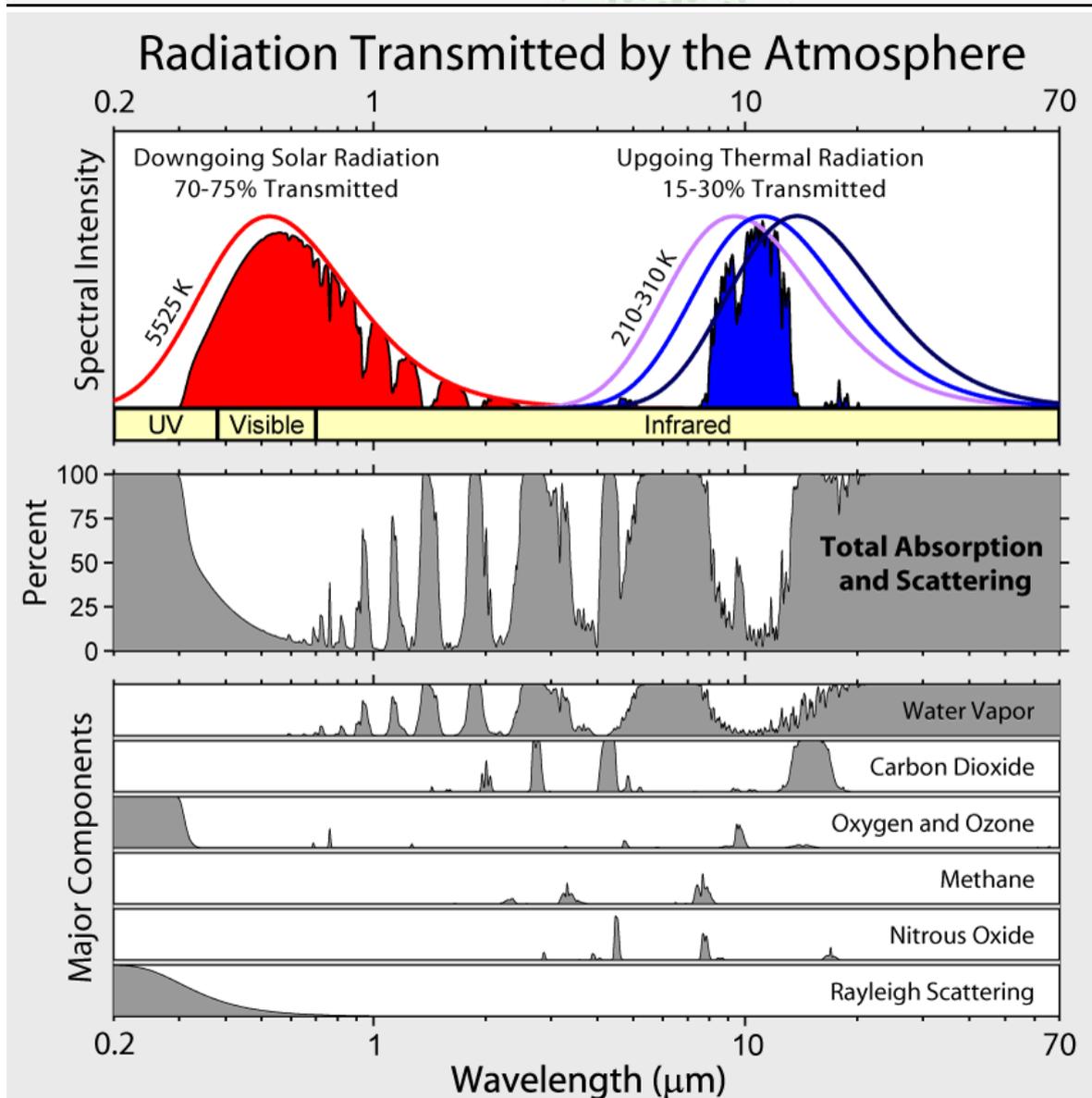


Abbildung 20: Solare und thermale Strahlung sowie Absorption in Abhängigkeit von den in der Atmosphäre vorhandenen Stoffen

Aus den klimaschädlichen Auswirkungen, die unter anderem auch durch herkömmliche Kraftwerke verursacht werden, ergeben sich somit Anforderungen an neue Kraftwerkstechnologien, zum Beispiel mit der Hilfe erneuerbarer Energien. In Zukunft muss hier ein Beitrag zur Reduzierung des Treibhauseffektes geleistet werden. Die folgende Grafik stellt die vorhandenen Reduzierungs-Potenziale (weißer Bereich) aller TRANS-CSP-Länder überzeugend dar.

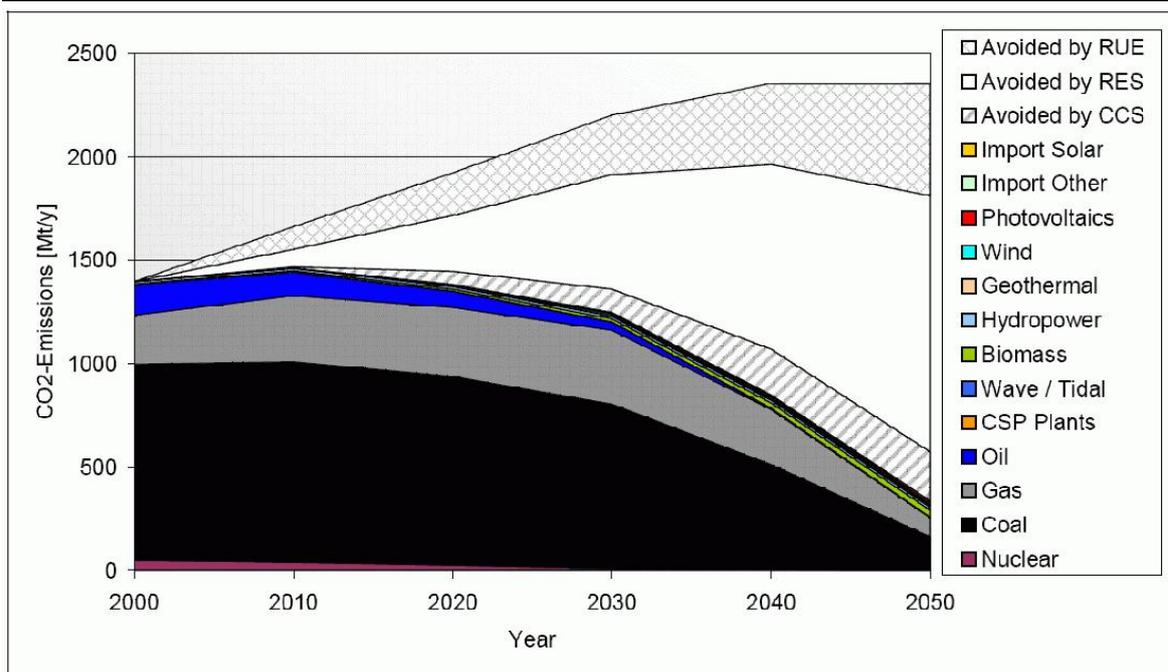


Abbildung 21: Vermeidungspotenzial der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Erzeugung elektrischer Energie in Millionen Tonnen pro Jahr, DLR

Zu diesen Ländern gehören: Skandinavien, die europäischen Länder und die Türkei. Es wurden die Vermeidung von Emissionen durch folgende Faktoren betrachtet: Rational Use of Energy (RUE 22 %), Renewable Energy Source (RES 66 %) und Carbon Capture and Sequestration (CCS 12 %, CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Lagerung). Ausgegangen wurde vom sogenannten Strom-Mix des Jahres 2000.[4]

Die Emissionen, die bei der Erzeugung elektrischer Energie durch Verbrennung fossiler Stoffe wie Erdöl, Kohle und Gas entstehen, sind heute noch vergleichsweise hoch (schwarzer, grauer und blauer Bereich). Sie werden in Zukunft abnehmen müssen und stellen den weißen und weiß-schraffierten Bereich dar. Offen ist jedoch, wie sich der Anteil der verschiedenen erneuerbaren Energieformen auf diese weiße Fläche in Zukunft verteilen wird. Ein Teil wird sicher durch solarthermische Kraftwerke gedeckt werden. Denn beim Betrieb eines CSP-Kraftwerkes entstehen praktisch keine CO<sub>2</sub>-Emissionen, und die natürliche Ressource für diese Anwendung ist nahezu unbegrenzt verfügbar.

## 5.2 Auswirkungen auf die Umwelt

Die Auswirkungen von CSP-Projekten in der EUMENA-Region (Europe, Middle East, North Africa) werden in einer Ökobilanz der Technischen Universität Braunschweig untersucht. Dabei fallen die Umweltwirkungen und der Ressourcenverbrauch der Solarfelder über den gesamten Lebenszyklus besonders ins Gewicht und sind fast für die Hälfte der Treibhausauswirkungen verantwortlich. Ebenso hat der Lebenszyklus der Speicheranlagen einen starken Anteil. „Die negativen Umweltwirkungen und der Ressourcenverbrauch eines solarthermischen Kraftwerkes werden hauptsächlich durch den Herstellungsprozess des Solarfeldes verursacht.“[16]



In einer Studie des Öko-Instituts in Freiburg werden die CO<sub>2</sub>-Emissionen von importiertem Strom aus solarthermischen Anlagen anderen Arten der Stromerzeugung gegenübergestellt. In einer Lebenszyklusbetrachtung zeigt sich, dass Strom aus solarthermischen Kraftwerken (Solarstrom-Import Spanien) sogar gegenüber Wasserkraft und Atomkraft deutlich im Vorteil liegt.[5]

Strom aus:	CO <sub>2</sub> -Äq. in g/kWh <sub>el</sub>
AKW	32
<b>AKW (Uran nur aus Südafrika)</b>	<b>126</b>
Steinkohle-Import-Kraftwerk	949
Steinkohle-Import-Heizkraftwerk	622
<b>Braunkohle-Kraftwerk</b>	<b>1153</b>
Braunkohle-Heizkraftwerk	729
Erdgas-GuD-Kraftwerk	428
Erdgas-GuD-Heizkraftwerk	148
Erdgas-Blockheizkraftwerk	49
Biogas-Blockheizkraftwerk	-409
Wind Park onshore	24
Wind Park offshore	23
Wasser-Kraftwerk	40
Solarzelle (multikristallin)	101
Solarstrom-Import (Spanien)	27

Abbildung 22: Elektrische Energie nach Kraftwerkstyp mit jeweiligem CO<sub>2</sub>-Äquivalent

### 5.3 Wirtschaftliche Bewertbarkeit von Umweltauswirkungen

Der Emissionshandel ist ein marktwirtschaftliches Instrument der Klimapolitik. Er basiert auf einer Idee, Verschmutzungsrechte für Gewässer oder für die Luft an Industriebetriebe zu vergeben. Diese Art der Steuerung von Obergrenzen wurde zum ersten Mal weltweit im sogenannten Kyoto-Protokoll 1997 festgeschrieben und gibt der Politik die Möglichkeit, Umweltziele verbindlich festzulegen. Sie sollten in den Folgejahren in nationale Gesetze umgesetzt werden.

Seit 2005 ist der Emissionshandel in der EU für CO<sub>2</sub>-Emissionen eingeführt und gesetzlich geregelt. Die Zertifikate wurden in den ersten Jahren kostenlos zugeteilt, werden jetzt über die KfW an der Leipziger Strombörse (EEX) gehandelt und, um eine Bevorzugung von einzelnen Industrien vorzubeugen, ab 2010 im Auftrag der Bundesregierung an der EEX versteigert.[10]

Andere Wirtschaftsräume der Welt haben diese Regulierung noch nicht umgesetzt. So ist ein ähnliches System jedoch nur auf freiwilliger Basis in den USA und Kanada eingeführt worden. In Australien wird es voraussichtlich 2010 gesetzlich festgeschrieben werden.



Dieses Zertifikats-System ist eine von vielen Möglichkeiten, die Umweltauswirkungen industriellen Handelns in vernünftige Bahnen zu lenken. Es wird in Europa natürlich auch auf die industrielle Produktion solarthermischer Kraftwerke angewendet.

Dieses ökologisch sinnvolle Instrument macht jedoch nur Sinn, wenn es weltweit verbindlich eingesetzt wird.



## 6 Politik und Interessensgruppen

Klimaerwärmung, Rohstoffspekulationen, Ölkriege, Wirtschaftskrise – das alles sind Themen, die die Energiewirtschaft weltweit seit einigen Jahren beschäftigen. An bestehenden Strukturen festhalten und dabei parallel neue Zukunftstechnologien entwickeln, oder eine schnelle Energiewende herbeiführen? Die Diskussionen sind kontrovers, wie auch die Interessen. Im Folgenden sollen die verschiedenen Interessensgruppen und ihre Politik beleuchtet werden.

### 6.1 Länder

#### 6.1.1 Entwicklungsländer

Viele Entwicklungsländer sind besonders stark vom Klimawandel betroffen und deshalb auf Hilfe der Industriestaaten angewiesen (z.B. Bangladesch). Naturkatastrophen und Ernteaussfälle häufen sich und die Grundversorgung der Bevölkerung, die vielerorts schon immer in Gefahr war, wird immer schwieriger. Einige Staaten, z.B. die Malediven, kämpfen sogar um die Existenz.

Den Einsatz erneuerbarer Energien im Allgemeinen, den solarthermischer Kraftwerke im Speziellen, werden diese Länder sicherlich gutheißen, jedoch mangelt es ihnen an finanziellen Mitteln zur Umsetzung.

Eine nicht zu unterschätzende Möglichkeit könnte sein, diesen Ländern kostenfrei die Technologien bereitzustellen, damit nach und nach fossil befeuerte Anlagen durch nachhaltige ersetzt werden.

#### 6.1.2 Schwellenländer

Aufstrebende Schwellenländer wie China und Indien treiben durch ihren „Energiehunger“ die Rohstoffpreise in die Höhe. Diese Länder streben nach dem Lebensstandard, den die Industrieländer längst erreicht haben. Seit einigen Jahren entstehen auch dort Projekte, die den Einsatz erneuerbarer Energiequellen, u.a. auch solarthermischer Anlagen, erproben und fördern sollen. Auch wenn diese Staaten das Recht auf steigende Treibhausgasemissionen für sich in Anspruch nehmen, um den angestrebten Wohlstand zu erlangen, werden erneuerbare Energiequellen für das weitere Wirtschaftswachstum immer wichtiger.

#### 6.1.3 Industrieländer

Die wichtigste Aufgabe einer demokratisch gewählten Regierung ist es, die Interessen seiner Bürgerinnen und Bürger zu vertreten. Dazu gehört zweifellos und in erster Linie, die Lebensgrundlagen zu sichern (auch wenn viele Regierungen dieses langfristige Ziel aus den Augen verloren haben und ihm kurzfristige Ziele wie Wirtschaftswachstum vorziehen). Durch den Klimawandel sind die Lebensgrundlagen in vielen Regionen akut bedroht, besonders die Küstengegenden (z.B. Niederlande, Großbritannien). Ein anderes wichtiges Argument für die Unterstützung einer Energierevolution ist die momentane Abhängigkeit von einigen wenigen, zum Teil politisch instabilen, rohstoffexportierenden Ländern (z.B. Iran) und den zum Teil sehr deutlich schwankenden Rohstoffpreisen (vgl. Rohstoffpreisexplosion in 2007). Die Risiken für jede hochindustrielle Volkswirtschaft könnten dadurch deutlich gesenkt werden.

Darüber hinaus bieten sich aus der Umwälzung einer Branche immer auch Chancen für neue Einnahmequellen. Gerade Hochtechnologieländer liefern sich gerade einen Wettbewerb in der



Erforschung und Entwicklung neuer, effizienterer Solarmodule oder Windkraftanlagen. Denn ein neuer Energiemarkt, dem ein jährliches Investitionsvolumen von 50 bis 90 Milliarden Euro prognostiziert wird, bietet neue Exportmöglichkeiten und würde auch neue Arbeitsplätze entstehen lassen.

#### **6.1.4 OPEC-Länder**

Die OPEC-Länder sind, so das öffentliche Bild, uneins, wie mit erneuerbaren Energiequellen umgegangen werden soll. In vielen Ländern schlummern zum Teil noch große Ölvorkommen, die helfen sollen, den durch Ölverkauf erlangten Wohlstand zu mehren und zu sichern (z.B. Saudi-Arabien). Dieses Ziel könnte durch eine Energiewende in Gefahr geraten, da dann der Bedarf an Öl zurückgehen würde. Einige Länder fürchten und bekämpfen daher den Einsatz von erneuerbaren Energiequellen oder fordern, im Falle einer Energiewende, eine finanzielle Entschädigung von den Industrieländern.

Andere Länder wiederum machen sich schon jetzt Gedanken über die Zeit nach Versiegen dieser Ölquellen und haben dabei die erneuerbaren Energiequellen für sich entdeckt (z.B. Vereinigte Arabische Emirate / MASDAR). Solarthermische Kraftwerke spielen dabei aufgrund der klimatischen Verhältnisse eine wichtige Rolle und werden entsprechend gefördert.

#### **6.1.5 Wüstenländer ohne Rohstoffe**

Im Gegensatz zu den Wüstenländern, die durch Rohstoffe Wohlstand erlangen konnten, gibt es Länder, die bisher keine Perspektive auf einen gehobenen Lebensstandard hatten. Was bisher als Fluch angesehen wurde, nämlich die lebensfeindlichen Wüsten und das trockene Klima, könnte nun zu einer Geldquelle werden. Einige Länder bewerben sich schon aktiv darum, als Standort für DESERTEC (siehe [www.desertec.org](http://www.desertec.org)) oder andere CSP-Projekte erwählt zu werden (z.B. Marokko).

### **6.2 Wirtschaft**

Im Gegensatz zur Politik ist die Wirtschaft „kapitalgesteuert“, d.h. Investitionen fließen in der Regel dorthin, wo sie den größtmöglichen Profit versprechen. Doch die Wirtschaft übt zum Teil massiven Einfluss auf die Politik aus. Man spricht dabei von Wirtschaftslobbyismus. Beide Seiten sind voneinander abhängig (z.B. Arbeitsplätze, Steuern, Steuersätze, Infrastruktur) und versuchen natürlich, für sie wichtige Bedingungen mit zu gestalten.

#### **6.2.1 Nuklear-, Kohle- und Ölindustrie**

Die Nuklear-, Kohle- und Ölindustrien stellen den wichtigsten Gegenpart zu den erneuerbaren Energien dar. Um ihre Technologien, ihr Know-How oder ihre Rohstoffe weiterhin verkaufen zu können, müssen die Rahmenbedingungen aus ihrer Sicht beibehalten werden. Die staatliche Förderung und der massive Einsatz erneuerbarer Energiequellen bringen diese Industrien in Bedrängnis. Was für diese Industrien jedoch besonders besorgniserregend ist, ist die Tatsache, dass sie sich einer zunehmend kritischen öffentlichen Meinung gegenüber sehen, vor allem verursacht durch Risiken für Umwelt, Klima und Gesundheit, für die sie verantwortlich gemacht werden.



Einige Firmen bekämpfen die Erneuerbaren offen, andere versteckt und wiederum andere versuchen die öffentliche Meinung durch eigene wissenschaftliche Berichte zu beeinflussen. Ein neuer Trend scheint zu sein, dass Ölfirmen aktiv in den Bereich erneuerbare Energien vorstoßen und eigene Forschung betreiben. Es wird sich in den nächsten Jahren herausstellen, ob es sich dabei nur um „Greenwashing“-Aktionen oder um wirkliche Förderung dieser neuen Technologien handelt.

## 6.2.2 Energiekonzerne

Ähnlich wie die Nuklear-, Kohle- und Ölindustrie sind auch die Energiekonzerne primär auf die Sicherung ihrer Einnahmequellen bedacht. In Deutschland ist das Stromnetz noch fest in der Hand einiger weniger Stromerzeuger. Damit sind neue, aufstrebende Konkurrenten einer direkten Abhängigkeit von den etablierten Konzernen ausgesetzt. So gibt es beispielsweise Windparks, die bei idealen Produktionsbedingungen abgeschaltet oder gedrosselt werden müssen, da der Strom nicht eingespeist werden kann. Noch machen die Energiekonzerne mit einem Mix aus Öko- und konventionell erzeugtem Strom Milliarden Gewinne. Mehrkosten, die durch die Förderung von Strom aus erneuerbaren Energien entstehen, werden direkt an die Verbraucher weitergegeben.

Einige Konzerne versuchen sich seit Jahren ein sauberes, grünes Image zu verleihen (z.B. RWE mit Autostrom), doch vielfach blockieren sie aktiv den Ausbau erneuerbarer Energiequellen. Besonders dezentral produzierte Energie, wie bei der Photovoltaik, ist nicht im Sinne der etablierten Energiekonzerne. Man darf gespannt sein, wie sich die Mitglieder der DESERTEC-Initiative EON und RWE in den nächsten Jahren einbringen werden.

## 6.2.3 Branche der Erneuerbaren Energien

Alleine in Deutschland arbeiten mittlerweile fast 300.000 Menschen (Stand 2008) in der Branche der erneuerbaren Energien – Tendenz stark steigend (Plus 12% in 2008).[23]

Einige Forschungseinrichtungen (z.B. Fraunhofer Institut, DLR) leisten wichtige Grundlagenforschung und F&E-Arbeiten für die Branche, aber auch die Unternehmen selbst investieren enorm in die Verbesserung ihrer Technologien. Da für diese Firmen große Konkurrenz in Asien und Nordamerika entsteht, werden Wettbewerb und damit Kostendruck zukünftig weiter zunehmen und in der Folge die Preise auch für solarthermische Anlagen fallen.

Im Vergleich zu anderen Branchen wird die Branche der erneuerbaren Energien wegen ihrer immer größer werdenden volkswirtschaftlichen Bedeutung, politisch weiter an Einfluss gewinnen und so die Rahmenbedingungen zukünftig mit beeinflussen können.



#### **6.2.4 Versicherer**

Mit der Ankündigung von „DESERTEC“ (siehe [www.desertec.org](http://www.desertec.org)) hat die deutsche Wirtschaft, insbesondere MunichRe (ehemals Münchener Rück), einen Paukenschlag gelandet. Versicherer stehen sich immer größeren Risiken ausgesetzt. Insbesondere das Risiko von Naturkatastrophen ist in den letzten Jahrzehnten extrem angestiegen. Deshalb steuern einige Unternehmen wie MunichRe aktiv dagegen und sind mittlerweile der größte Versicherer von großen Solar- und Windkraftprojekten.

### **6.3 Umweltschutzorganisationen**

Umweltschutzorganisationen haben es derzeit nicht schwer, neue Mitglieder und aktive Unterstützer zu rekrutieren. Die Themen Umweltschutz und Klimaerwärmung sind seit der Vorstellung des UN-Klimaberichts im Jahr 2007 in aller Munde. Organisationen wie Greenpeace kämpfen seit Jahren gegen die Verbrennung fossiler Brennstoffe oder den Einsatz von Nukleartechnologie und fordern einen schnellen Umstieg auf nachhaltige Energiequellen.

Standen manche Organisation dem massiven Einsatz von solarthermischen Anlagen vor einigen Jahren noch ablehnend gegenüber (u.a. könnte der Lebensraum Wüste Schaden nehmen), hat sich ihre Haltung mittlerweile geändert. Großflächig angelegte solarthermische Projekte wie DESERTEC oder Andasol finden durch die meisten Umweltschutzorganisationen aktive Unterstützung.



## 7 Prognose

„Geld regiert die Welt“ – so heißt es oft im Volksmund. Der Einsatz erneuerbarer Energiequellen im Allgemeinen, der solarthermischer Anlagen im Speziellen, muss nicht nur ökologisch, sondern auch ökonomisch sein. Gegenwärtig sind viele Einsatzgebiete noch in der Erprobung und Entwicklung und somit auf Fördermittel angewiesen. Wagen wir eine Prognose:

### 7.1 Kurzfristig (2010 - 2015)

Wichtig für kurzfristige Projektentwicklungen unter Nutzung solarthermischer Kraftwerkstechnologien werden die Rahmenbedingungen sein, die die Politik in den nächsten Jahren absteckt. Ein ehrgeiziges Klimaabkommen in Kopenhagen (Klimakonferenz in Kopenhagen im Dezember 2009) würde auch schon kurzfristig neue Projektentwicklungen unterstützen. Viele Länder haben, nach Vorbild des deutschen Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), Förderprogramme für den Ausbau erneuerbarer Energiequellen installiert.

Eine Kombination solarthermischer Kraftwerke mit fossiler Zusatzfeuerung (Hybridsystem) könnte die Stromgestehungskosten schon jetzt deutlich senken und so die Wettbewerbsfähigkeit erhöhen. Solarthermischen Kraftwerken wird bis 2015 eine jährliche Neuinstallation von 5 – 7 GW prognostiziert.[1]

Dabei könnten zunehmend auch private Investoren in die Finanzierung solcher Anlagen eingebunden werden (z.B. andasol Fonds für Andasol 3).

### 7.2 Mittelfristig (2015 - 2030)

Zwei Entwicklungen werden hauptverantwortlich dafür sein, wann man mit der Konkurrenzfähigkeit subventionsfreier Stromerzeugung aus solarthermischen Anlagen rechnen kann: Zum einen die Kostendegression der solarthermischen Technologien (siehe 3.3.1), zum anderen die Verteuerung fossiler Brennstoffe aufgrund knapper werdender Ressourcen. Wenn sich dann auch noch die externen Kosten, die bei der Stromerzeugung anfallen, auf den Marktpreis auswirken, werden sich die Stromgestehungskosten solarthermischer Anlagen denen aus konventionellen Kraftwerken angleichen oder diese sogar unterschreiten (siehe 3.3.4).

Manche sehen die Konkurrenzfähigkeit mit Mittellastkraftwerken (z.B. Kohlekraftwerken) bereits in 5 bis 10 Jahren erreicht, andere eher ab 2025.[22]

Viele mögliche Standorte solarthermischer Kraftwerke befinden sich in politisch instabilen Regionen. Die politische Stabilisierung der MENA-Länder (z.B. Algerien oder Libyen) wird deshalb von enormer Wichtigkeit für den Ausbau solarthermischer Kapazitäten sein. Bis 2030 wird mit einer jährlichen Neuinstallation von 20 bis 35 GW solarthermischer Anlagen gerechnet.[1]

### 7.3 Langfristig (2030 - 2100)

Durch endliche Ressourcen fossiler Brennstoffe ist die Umstellung auf nachhaltige Energiequellen nur eine Frage der Zeit. Je früher die Wettbewerbsfähigkeit solarthermischer Anlagen



eintritt, desto schneller wird ihr Anteil an der weltweiten Stromerzeugung steigen. Die Klimaerwärmung unseres Planeten wird sicherlich beschleunigend auf diese Veränderung wirken.

Laut dem Bericht „Globaler Ausblick für solarthermische Kraftwerke 2009“ könnten solarthermische Kraftwerke bei einem Szenario mit einer ehrgeizigen Branchenentwicklung und hoher Energieeffizienz im Jahr 2030 bis zu 7 Prozent des voraussichtlichen globalen Strombedarfs decken. Im Jahr 2050 sogar ein Viertel.[1]



## Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] ESTELA, Solar PACES, Greenpeace International: Sauberer Strom aus den Wüsten, 2009
- [2] Aus einer E-Mail mit Dr. Richard Meyer, Epuron, 11/2009
- [3] Bild aus <http://www.desertec.org/de/konzept/studien/> Stand 24.11.2009
- [4] Characterisation of Solar Electricity Import Corridors from MENA to Europe, DLR Franz Trieb et al., July 2009
- [5] CO<sub>2</sub>-Emissionen im Vergleich (Ökoinstitut Freiburg, Fritsche 2007)
- [6] F.Trieb, DLR Concentrating Solar Power for the Mediterranean Region, Final Report
- [7] GLOBAL ENERGY SUPPLY POTENTIAL OF CONCENTRATING SOLAR POWER von Breyer, Knies, DLR, Desertec 2009
- [8] Heidler, K., Hindenburg, C., Kasper, B.-R.: Solarthermische Anlagen. 8. Auflage. DGS, Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, 2008
- [9] Heimann, Kaminski, Max-Planck-Institut, Meteorologie, Hamburg
- [10] <http://www.bmu.de/emissionshandel/> Stand 12.12.2009
- [11] Internationales Wirtschaftsforum Regenerative Energien (IWR)
- [12] IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change, Bericht 2007
- [13] LANGJÄHRIGE STRAHLUNGSZEITREIHEN AUS SATELLITENDATEN – VALIDIERUNG UND ANWENDUNGSPOTENZIAL FÜR DIE SOLARENERGIE A. Drews
- [14] Matthias Loster 2006, Department of Physics, University of California, Berkeley
- [15] Meyer, et al., 2009 Epuron, 2009 TOWARDS STANDARDIZATION OF CSP YIELD ASSESSMENTS
- [16] Ökobilanz eines Solarstromtransfers von Nordafrika nach Europa, Diplomarbeit Nadine May, TU Braunschweig, 2005
- [17] Parabolrinnen- und Fresnel-Technologie im Vergleich, DLR
- [18] Präsentation, Raoul Weiler, University of Leuven, 1990
- [19] Quaschnig, Volker: Regenerative Energiesysteme. 6. Auflage. München: Hanser, 2006
- [20] Robert A. Rohde, Ph.D. University of California, Berkeley, 2006
- [21] Watter, Holger: Vorlesungsskript Solarthermische Anlagen. Akademie fuer Erneuerbare Energien Luechow-Dannenberg Stand 12.12.2007
- [22] [www.burkina.at](http://www.burkina.at) Stand 23.11.2009
- [23] [www.erneuerbare-energien.de](http://www.erneuerbare-energien.de) Stand 1.12.2009
- [24] [www.pressebox.de](http://www.pressebox.de) Stand 9.12.2009
- [25] [www.sbp.de](http://www.sbp.de) Stand 7.11.2009
- [26] [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org) Stand 20.11.2009

