

"Ökologische Chancen und Risiken großtechnisch angelegter solarthermischer Kraftwerke"

Wuppertal Institut für Klima, Energie und Umwelt
im Auftrag der BMW AG

Harry Lehmann, Torsten Reetz, Stefan Roewer, Christa Liedtke
Kontakt : hl@isusi.de

Zusammenfassung :

Die vom Wuppertal-Institut vorgelegte Studie befaßt sich mit der Fragestellung der ökologischen Chancen und Risiken eines 80 MWe Parabolrinnenkraftwerks (SEGS Kraftwerk). Das Ziel der Untersuchung war die Ermittlung der Umweltbelastung bei der Erzeugung einer kWh elektrischen Stroms und das Aufzeigen von Wegen zur Ressourcenoptimierung der betrachteten SEGS-Anlage. Hierfür wurde das **MIPS (Materialintensität pro Serviceeinheit)**-Verfahren eingesetzt. Mit diesem Konzept wird die Umweltbelastung von Gütern und Dienstleistungen durch die Bestimmung des Ressourcenverbrauch an abiotischem Rohmaterial (z.B. mineralische Rohstoffe, fossile Energieträger, Abraum und bewegte Erde), Wasser und Luft je Tonnage Gut oder Dienstleistungseinheit ermittelt. Auch wurde der Ressourcenverbrauch des betrachteten 80 MWe SEGS-Kraftwerks mit dem fossil befeuerter Kraftwerke heutiger Bauart verglichen.

Die Analyse ergab, daß zum Bau eines Kraftwerkes vom SEGS-Typ etwa 600 Tonnen Material pro MWe installierter Leistung erforderlich sind. Hieran haben die Baustoffe Stahl, Beton und Glas einen Anteil von über 80%. Beim Betrieb wird vor allem Kühl-, Speise- und Reinigungswasser benötigt. Hinzukommt der Erdgasverbrauch der Zusatzfeuerung. Berechnet man aus der Massenbilanz die Materialintensität, so ergibt sich für eine 80 MWe SEGS-Anlage ein Bedarf von 273 kg abiotischem Material, 4.241 kg Wasser und 216 kg Luft pro Megawattstunde (MWe) ins öffentliche Versorgungsnetz (netto) eingespeister elektrischer Energie. Zieht man in Betracht, daß solarthermische Anlagen auch zukünftig, bedingt durch die Nutzung intensiver Sonnenstrahlung, überwiegend in ariden Gegenden eingesetzt werden, ist gerade die Ressource Wasser ein knappes und teures Gut. Technische Innovationen, wie z.B. der Einsatz eines Trockkühlturms anstatt einer Naßkühlung, die Direktverdampfung des Wärmeträgermediums im Primärkreislauf anstatt eines sonst notwendigen Sekundärkreislaufs und der Verzicht auf eine Zusatzfeuerung, mindern den Naturverbrauch pro Serviceeinheit erheblich. Im Vergleich zu einem Steinkohlekraftwerk erlaubt die beste Option einer solarthermischen Parabolrinnenanlage um einen Faktor 7 kleineren abiotischen Naturverbrauch, um einen Faktor 10 geringeren Wasserbedarfs und um einen Faktor >70 kleineren Luftbedarf pro kWh erzeugtem Strom.

Die vorgelegte Untersuchung macht deutlich, daß die untersuchten solarthermischen Parabolrinnenanlagen und insbesondere zukünftig ökologisch optimierte Anlagen im Vergleich zu konventionell befeuerten Anlagen eine ressourcenschonendere Methode darstellt elektrischen Strom zu produzieren. Zusätzlich kann durch den Einsatz der Sonnenenergie zur industriellen Stromerzeugung die Emission des klimagefährdenden Gases Kohlendioxid (CO₂) und andere Schadstoffe vermindert werden.

Einleitung

Die mit der heutigen Form der Bereitstellung und dem Verbrauch von Energie verknüpften ökologischen Belastungen (insbesondere in Bezug auf Klimaveränderung), die absehbare Erschöpfung der fossilen Brennstoffe, der steigende Konsum von Gütern und die dramatisch wachsende Weltbevölkerung erfordern neue, umweltverträglichere Wege für die Energiewirtschaft. Neben dem effizienten Umgang und dem bewußten Verzicht (Suffizienz) auf Energie bieten die erneuerbaren Energiequellen die Möglichkeit, die Menschheit langfristig mit Energie zu versorgen¹.

Das größte Potential der erneuerbaren Energien hat hierbei die direkte Nutzung der von der Sonne bereitgestellten Solarenergie. Diese kann zur Wärme- und Stromproduktion oder zur Bereitstellung chemischer Brennstoffe, z.B. Wasserstoff, eingesetzt werden. Beim Aufbau einer ökologischen und solaren Energieversorgung kommt der großtechnischen Nutzung der Sonnenenergie eine wichtige Rolle zu. In diesem Rahmen ist eine der bedeutenden Technologien der Sonnenenergienutzung die solarthermische Stromerzeugung. Diese Technik wird bereits heute in den Vereinigten Staaten kommerziell genutzt und betrieben. Wissenschaftliche Untersuchungen haben das hohe Potential der solarthermischen Stromerzeugung nachgewiesen². Zu einem zukunftsfähigen Energieversorgungskonzept gehört auch, daß die ökologischen Belastungen durch die Bereitstellung und Nutzung der dargebotenen Energie so gering wie möglich gehalten werden. Aus diesem Grund ist es notwendig, eine ökologische Bewertung dieser Anlagenkonzepte vorzunehmen.

In einer von der BMW AG finanzierten Studie ist die ökologische Belastung der großtechnischen Nutzung solarthermischer Parabolrinnenkraftwerke auf der Basis des am Wuppertal Instituts entwickelten MIPS-Konzeptes ermittelt worden. Diese Fragestellung ist mit dem Ziel aufbereitet worden, ökologische Problemfelder schon heute herauszuarbeiten und Entwicklungspfade, die diese Probleme vermeiden, aufzuzeigen. Die gewonnenen Ergebnisse wurden mit fossil befeuerten Kraftwerken verglichen sowie technische Verbesserungspotentiale der solarthermischen Parabolrinnenanlagen (z. B. Direktverdampfung) diskutiert. Eine Sensitivitätsanalyse der verwendeten Daten gibt Aufschluß über die Qualität der verwendeten Daten.

¹ Lehmann, H. und Reetz, T.: Zukunftsenergien - Strategien einer neuen Energiepolitik; Birkhäuser Verlag, Wuppertal, 1995.

² Winter, C.J. und Nitsch, J. (Hrsg.): Wasserstoff als Energieträger; Springer-Verlag 1986 und Klaiß, H. und Staiß, F. (Hrsg.): Solarthermische Kraftwerke für den Mittelmeerraum, Band 2, Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrttechnik, Springer Verlag 1992.

Methodik: MIPS - Ein ökologischer Meßindikator³

Seitdem der Mensch die ökonomischen Vorteile einer industrialisierten Fertigung von Gütern und Produkten erkannt hat, sind die vom Menschen bewegten Stoffströme exponentiell angestiegen. Zu diesen Stoffströmen zählen Erdbewegungen, die zur Exploration von Rohstoffen nötig sind. Weiter muß das Erdreich gepflügt werden, bevor die Saat zur Produktion landwirtschaftlicher Güter ausgebracht werden kann. Dämme, Straßen und Terrassen müssen für die Bereitstellung einer Infrastruktur aufgeschüttet werden, damit der Warenstrom ungehindert fließen kann. Luft und Wasser werden in mannigfaltiger Weise gebraucht und genutzt, um industrielle Prozesse zu betreiben. Schätzungen zeigen auf, daß die Summe all dieser Stoffströme auf den unterschiedlichen Kontinenten die weltweit in der Geosphäre vorhandenen natürlichen Massenverschiebungen um einen Faktor 1,5 bis 2 überschreiten⁴. Hierdurch wird erkennbar, daß die natürliche Stoffstrombalance durch die fortschreitend steigende Entwicklung der Materialverschiebung durch den Menschen verändert wird.

"Daher begrenzt nicht die Verfügbarkeit von natürlichen Ressourcen die wirtschaftliche Entwicklung von morgen, sondern die ökologischen Folgen der gegenwärtigen sehr geringen Ressourcenproduktivität. Oder anders gesagt: Die ökologischen Folgen des sorglosen Umganges mit Stoffströmen limitieren die langfristige Wirtschaftsentwicklung"⁵.

Aus diesem Grund wird eine Halbierung der globalen anthropogenen Stoffströme als zwingend notwendig angesehen, um die Ökosphäre zu restabilisieren. Dadurch, daß in den industrialisierten Ländern wesentlich mehr Material und Energie in der Wirtschaft umgesetzt werden als in Entwicklungsländern, ist eine Reduktion der Stoffströme in den Industrienationen von 80 - 90% notwendig, um die geforderte globale Reduktion einzuhalten. Daher ist eine Reduktion der Materialströme um einen Faktor 10 für das nächste Jahrhundert eine dringende Notwendigkeit⁶.

Zu diesem Zweck schlägt Schmidt-Bleek⁷ vor, Aussagen über die Umweltbelastungsintensität von Gütern und Dienstleistungen, und davon abgeleitet, über vorteilhafte umweltpolitische Maßnahmen an den Ergebnissen einer Ressourcen- und Materialintensitätsanalyse auszurichten. Die Berechnung der Stoffströme von der Gewinnung der Rohstoffe über den Gebrauch und das Recycling (von der Wiege bis zur Wiege) oder der Entsorgung (von der Wiege bis zur Bahre) werden in dieser Veröffentlichung mit dem am Wuppertal Institut in der Abteilung Stoffströme und Strukturwandel entwickelten **MIPS**-Konzept (**M**aterialintensität **p**ro **S**erviceeinheit) vorgenommen.

³ Schmidt-Bleek, F.: *Wieviel Umwelt braucht der Mensch - MIPS das Maß für ökologisches Wirtschaften* -; Birkhäuser Verlag, Basel 1994.

⁴ Brown, L.R.: *State of the world 1992; a Worldwatch Institute Report on progress towards a sustainable society*, 1992 und Schmidt-Bleek, F.: *Wieviel Umwelt braucht der Mensch*; Birkhäuser Verlag, Basel 1994.

⁵ Schmidt-Bleek, F.: *Ohne De-Materialisierung kein ökologischer Strukturwandel*, in *Jahrbuch Ökologie*, 1994.

⁶ Factor 10 Club: *Carnoules Deklaration*; 1995.

⁷ Schmidt-Bleek, F.: *Gedanken über eine Dimension des Umweltschutzes*, Wuppertal Paper Nr. 24, 1994.

Die Berechnung der Materialintensität eines Produktes oder einer Dienstleistung wird im MIPS-Konzept⁸ als **Materialintensitätsanalyse (MIA)** bezeichnet. Mit Hilfe der MIA können die Umweltbelastungsintensitäten verschiedener Werkstoffe oder Produkte miteinander verglichen werden.

Die Methodik der Materialintensitätsanalyse wurde ausführlich in einem Handbuch der Abteilung Stoffströme und Strukturwandel des Wuppertal Institutes dokumentiert. Die wesentlichen Aspekte einer MIA werden im folgenden kurz skizziert⁹:

- In einer MIA nach dem MIPS-Konzept werden alle Inputs von Materialien bzw. Rohstoffen zur Produktion eines Wirtschaftsgutes in kg (oder t) berücksichtigt und aufsummiert, die der Umwelt aktiv entnommen bzw. dort bewegt wurden (Erze, Gesteine, Sand, Kies, etc.). Hinzu kommen alle Materialien, die zur Entnahme von Rohstoffen oder zum Bau von Infrastrukturen bewegt werden müssen. Hierzu zählt anfallender Abraum ebenso wie abgepumptes Grundwasser oder gerodete Bäume.
- Weiterhin werden diejenigen Materialien hinzugerechnet, die indirekt für die Erzeugung, die Verpackung, zum Betrieb oder Gebrauch, zur Wartung bzw. Reparatur sowie zur Wiederverwendung (Recycling) bzw. zur Deponierung des zu bemessenden Wirtschaftsgutes verbraucht werden. Hierzu gehören auch die genutzten oder anteilig in Anspruch genommenen Infrastrukturen wie z.B. Transport-, Förder-, Produktions- und Entsorgungsanlagen einschließlich der für Erstellung, Betrieb, Wartung und Abriß der Infrastrukturen notwendigen Inputs.
- Aus einer solchen Auflistung und Addition aller Materialströme (**Materialinputs, MI**), die hinter einem Endprodukt oder einem Wirtschaftsvorgang stehen, bestimmt sich der "ökologische Rucksack", d.h. die Summe der Materialien, die in dem betrachteten Gut selbst nicht direkt enthalten sind (ökologischer Rucksack = MI minus Eigengewicht).
- Entstehen in einem Prozeß mehrere Hauptprodukte, so werden die systemweiten Materialinputs anteilig im Verhältnis der Produktmassen (oder Serviceeinheiten) den Produkten zugeordnet.

Die ermittelten Materialinputs (MI) werden schließlich nach den fünf Input-Kategorien "Abiotische Rohmaterialien", "Biotische Rohmaterialien", "Bodenbewegungen (Land- und Forstwirtschaft)", "Wasser" und "Luft" getrennt ausgewiesen.

Bei der lebenszyklusweiten Ermittlung von MI-Werten müssen für eine große Zahl von Produkten, Infrastrukturen und Dienstleistungen im Rahmen des MIPS-Konzeptes eine Reihe von Berechnungen immer wieder durchgeführt werden. Berechnungen also, die prinzipiell auch für andere Analysen gebraucht werden. Hierzu zählen u.a. die lebenszyklusweiten

⁸ Lehmann, H. und Schmidt-Bleek, F.: Material flow from a systematical point of view, Fresenius Environmental Bulletin, 1993; Schmidt-Bleek, F.: Wieviel Umwelt braucht der Mensch - MIPS ein ökologischer Meßindikator; Birkhäuser Verlag, Basel 1994; Schmidt-Bleek, F.: Ohne De-Materialisierung kein ökologischer Strukturwandel, in Jahrbuch Ökologie, 1994.

⁹ Schmidt-Bleek, F. (Hrsg.): Handbuch zur Materialintensitätsanalyse nach dem MIPS-Konzept; Wuppertal-Institut für Klima-Umwelt-Energie; Abteilung Stoffströme und Strukturwandel, Wuppertal 1996.

Materialinputs für Transporte (Fracht und Personen), für die Bereitstellung von Elektrizität sowie für die Bereiche Recycling und Entsorgung.

Aus Praktikabilitätsgründen ist es angebracht, für diese Bereiche sogenannte "Module" (Datenbausteine) systemweit zu errechnen, die bei Bedarf lebenszyklusweite Abschätzungen für MI bereithalten. Die Einbeziehung der Module in die jeweiligen Produktlinien erfolgt im MIPS-Konzept über die computergestützte Datenbank CARA (computer-aided resource analysis)¹⁰.

Materialintensitäten eines 80 MWe Parabolrinnenkraftwerks

Um die Materialintensitäten berechnen zu können, müssen die verwendeten Materialien zum Bau, zum Betrieb und zur Wiederverwendung des solarthermischen Kraftwerks ermittelt werden. Aufgrund der noch unvollständigen Datenlage konnte der Bereich Recycling und Entsorgung in dieser Untersuchung nicht betrachtet werden. Hiernach erfolgt die Berechnung des Materialinputs pro geleisteter Serviceeinheit über eine angenommenen Lebensdauer des Kraftwerks von 20 Jahren: eine MWh solarthermisch erzeugter elektrischer Strom. Dabei wird zwischen den drei Input-Kategorien, abiotisches Rohmaterial, Wasser und Luft unterschieden¹¹. Es wurden folgende Parabolrinnenanlagenkonzepte in einer ersten Analyse betrachtet¹²:

- 80 MWe Parabolrinnenkraftwerk mit Zusatzfeuerung (Erdgas) und Naßkühlung (Kraftwerk 1; Betriebsstunden 3.000 h/a),
- 80 MWe Parabolrinnenkraftwerk mit Zusatzfeuerung (Erdgas) und Trockenkühlung (Kraftwerk 2; Betriebsstunden 3.000 h/a),
- 80 MWe Parabolrinnenkraftwerk ohne Zusatzfeuerung und Trockenkühlung (Kraftwerk 3; Betriebsstunden 2.200 h/a).

Zur Analyse der benötigten Baumassen eines 80 MWe Parabolrinnenkraftwerks wurden Herstellerangaben ausgewertet¹³. Hierbei wurde zwischen einem konventionellen Anlagenteil (Generator, Turbine, Kühlturm etc.) und dem Solarfeld unterschieden. Insgesamt werden im Kraftwerk 1 etwa 600 Tonnen Masse pro MWe installierter Leistung verbaut. Hierbei hat der Beton mit 282 t/MWe und Stahl mit 148 t/MWe die größten Anteile. Durch die Berücksichtigung eines Trockenkühlturms erhöhen sich die Baumassen beim Kraftwerk 2 auf 652 t/MWe und bei der Kraftwerksvariante 3 auf 645 t/MWe. Die leichte Verringerung zwischen den Varianten 2 und 3 von 7 t/MWe wird durch die Zusatzfeuerung bewirkt.

Der konventionelle Abschnitt umfaßt bei Kraftwerk 1 ca. 21% des Werkstoffbedarfs, bei Kraftwerk 2 etwa 27% und bei Kraftwerk 3 etwa 26%. Das Ergebnis macht deutlich, warum ein

¹⁰ Brüggemann, U.; Lehmann, H.; Zieschang, H.: CARA-Computer aided resource analysis. Wuppertal Institut für Klima-Umwelt-Energie, Wuppertal Papers (in Vorbereitung), Wuppertal 1997.

¹¹ Die Input-Kategorien „Biotische Rohmaterialien“ und „Bodenbewegungen aus Land- und Forstwirtschaft“ spielen für die in dieser Studie behandelten Kraftwerke keine Rolle bzw. können vernachlässigt werden.

¹² Betriebsstunden nach Aringhoff, R.: Energiepolitik und CO₂-Minderungspotentiale, Flachglas Solartechnik GmbH.

¹³ Die Firma ABB-Baden (Schweiz) sowie die Firma Marley Cooling Tower, Düsseldorf, stellten Daten sowie abschätzende Berechnungen zur Verfügung. Die Firma Pilkington Solar International, Köln stellte Daten zu den Werkstoffbestandteilen des Solarfeldes bereit.

solarthermisches Kraftwerk nur einer geringen Abhängigkeit des Werkstoffbedarfs von der Anlagengröße (Degression) unterliegt. Bei einem Anteil von rund 25 % an der Gesamtmasse des Kraftwerks hat der Degressionsbehaftete konventionelle Abschnitt keinen großen Einfluß. Die zur Erzeugerleistung proportional ansteigende Sammlerfläche des solaren Anlagenabschnitts mit dem größeren Baustoffanteil von bis zu 79% bestimmt den von der Installationsgröße abhängigen Degressionsfaktor.

Materialbedarf in t/MWe	Kraftwerk 1	Kraftwerk 2	Kraftwerk 3
Baustahl	143	145	138
Edelstahl	6	6	6
Kupfer	0,7	0,7	0,7
Aluminium	0,0008	0,0008	0,0008
Titan	0,4	0,4	0,4
Silber	0,005	0,005	0,005
Beton	282	329	329
Glas	67	67	67
PVC	1	3,1	3,1
Mineralwolle	0,03	0,03	0,03
Keramik	0,8	0,8	0,8
Lack	0,7	0,7	0,7
Dämmstoffe	62	62	62
Holz	2,1	2,1	2,1
Papier	0,003	0,003	0,003
Thermoöl	13	13	13
Treibstoff (Erdgas)	7	7	7
Treib- und Brennstoffe (als Heizöl bilanziert)	17	17	17
Summe	602	652	645

Kraftwerk 1: 80 MWe Parabolrinnenkraftwerk mit Zusatzfeuerung und Naßkühlung

Kraftwerk 2: 80 MWe Parabolrinnenkraftwerk mit Zusatzfeuerung und Trockenkühlung

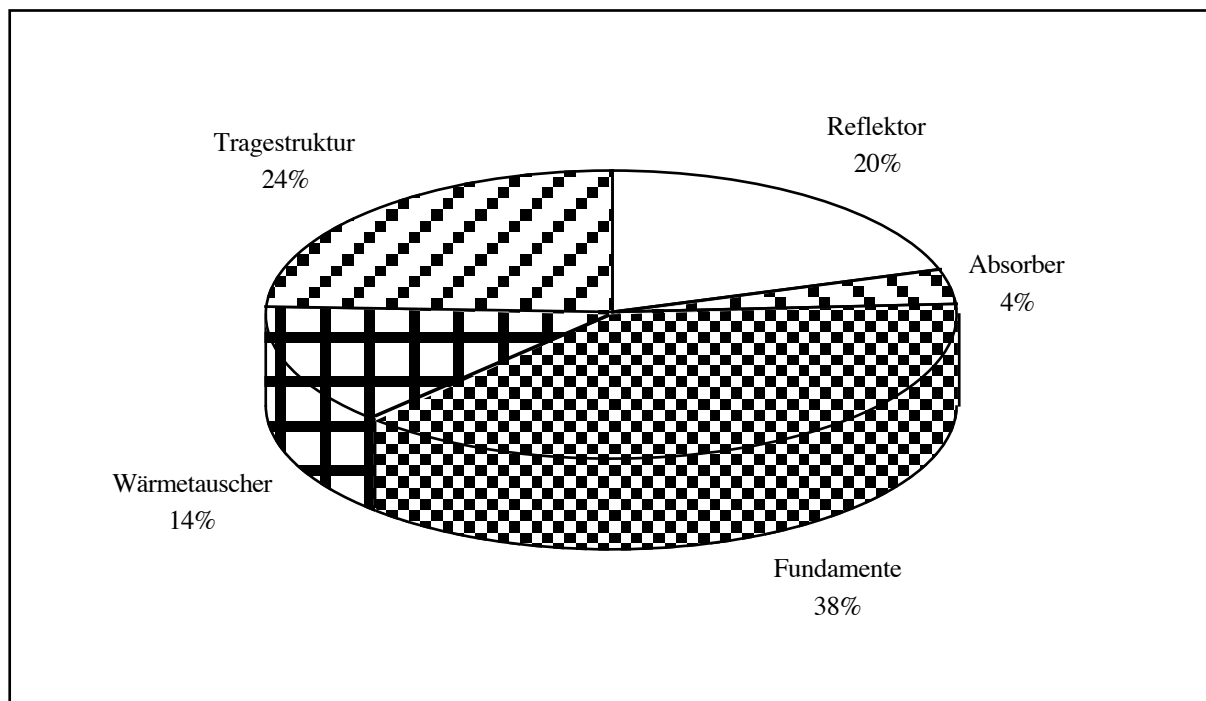
Kraftwerk 3: 80 MWe Parabolrinnenkraftwerk ohne Zusatzfeuerung und Trockenkühlung

Quelle: Eigene Berechnungen nach Pilkington Solar International; Kabelwerk Draka, Wuppertal; Maschinenfabrik Glückauf, Gelsenkirchen; Firma Pütz, Düren; Volvo Hydraulik GmbH & Co, Essen; ABB-Baden, Marley Kühlturm GmbH, Düsseldorf; Holger Braess, BMW AG.

Tabelle 1: Werkstoffbedarf zum Bau eines 80 MWe Parabolrinnenkraftwerks in t/MWe (ohne geplante Erde 8.234 t/MWe)

Die größten Werkstoffverbräuche entfallen mit 171 t/MWe auf die Fundamente (38%) und mit 106 t/MWe (24%) auf die Tragestrukturen der Kollektoren, die hauptsächlich aus Baustahl bestehen. Es folgen die Reflektoren mit 66 t/MWe (20%) und die Wärmetauscher, also Vorwärmer, Erhitzer und Verdampfer, mit 80 t/MWe (14%). Sonstige Anlagenkomponenten wie Pumpen, Nachführung und der Zaun, der das gesamte Parabolrinnenkraftwerk umgibt, haben einen Anteil von weniger als 1%

Im Gegensatz zum Bau der Kraftwerke ist der Massenbedarf während des Betriebs von der Lebenszeit und den Betriebsstunden abhängig. Aus diesem Grund werden die ermittelten Mengen für den Betrieb der Kraftwerke in der Einheit Tonnen bzw. Kilogramm pro erzeugter MWe Strom angegeben. Die Betrachtung erfolgt über eine Lebensdauer von 20 Jahren, da für die später zum Vergleich herangezogenen konventionellen Kraftwerke in der Literatur 20 Jahre angegeben wurden.



Quelle: Eigene Berechnungen nach Pilkington Solar International; Kabelwerk Draka, Wuppertal; Maschinenfabrik Glückauf, Gelsenkirchen; Firma Pütz, Düren; Volvo Hydraulik GmbH & Co, Essen; ABB-Baden, Marley Kühlturm GmbH, Düsseldorf; Holger Braess, BMW AG.

Abbildung 1: Werkstoffanteile einzelner Anlagenkomponenten zum Bau des Solarfeldes eines 80 MWe Parabolrinnenkraftwerks in % (ohne geplante Erde 8.234 t/MWe)

Beim Massenbedarf für den Betrieb der Parabolrinnenkraftwerke wurde zwischen Werkstoffbedarf und Betriebsmittelbedarf unterschieden. Der Werkstoffbedarf wird durch die Austauschrate der Spiegelflächen von 3% pro Jahr hervorgerufen. Die Austauschrate entsteht hauptsächlich durch Bruch der Spiegelflächen z.B. durch Wind oder kraftwerksinterne Unfälle mit Fahrzeugen o.ä., nicht durch technische Ermüdung¹⁴. Unter Betriebsmittel werden das Kühl-, Speise- und Reinigungswasser sowie Thermoölverlust und Brennstoffbedarf der Zusatzfeuerung betrachtet.

Bei einer Betriebsdauer von 20 Jahren wird das Kollektorfeld des 80 MWe Parabolrinnenkraftwerks zu 60 % mit neuen Parabolspiegeln versehen. Durch die geringe

¹⁴ Persönliche Information von Herrn Svoboda, Pilkington Solar International, 1996. Nach einer neueren Information von Herrn Svoboda, Pilkington Solar, vom 11.3.1997 liegt der tatsächliche Bedarf an Ersatzspiegeln zwischen 0,35% und 0,8%.

relative Luftfeuchte von etwa 50% in ariden Gegenden liegt die Lebensdauer von Stahlkomponenten bei 50 - 100 Jahren. Daraus folgt, daß die Stahlkomponenten der Tragestrukturen der Parabolspiegel nicht ausgetauscht zu werden brauchen. Über die Menge der eingesetzten Rostschutzfarben oder anderer Schutzlacke lagen keine Angaben vor, so daß über die Instandhaltung der Tragestrukturen keine Aussage getroffen werden kann. Die Absorberrohre werden nach Angaben der Firma Pilkington Solar International während einer Betriebszeit von 20 Jahren nicht ausgetauscht.

Die Firma Pilkington Solar International gibt für ein Parabolrinnenkraftwerk mit Zusatzfeuerung und Naßkühlung einen mittleren Kühlwasserverbrauch von 256 m³/h an. Die Marley Kühlturm GmbH gibt für den ausgelegten Holzkühlturm einen Wasserverbrauch von 214 m³/h an. Da in Kalifornien ein unterirdisches Wasserreservoir genutzt werden kann, handelt es sich hierbei um eine offene Kreislaufkühlung. Für das betrachtete Kraftwerk mit Zusatzfeuerung und Naßkühlung wird der mittlere Wert der beiden Angaben verrechnet. Es ergibt sich somit ein Wasserverbrauch von 14 Millionen Tonnen Wasser, dies entspricht einem spezifischen Verbrauch von 2938 kg/MWhe_{brutto}.

Nach Angaben von ABB-Baden beträgt der "make up"-Wasserbedarf, d.h. der Wasserbedarf, um die Speisewasserverluste auszugleichen, ca. 1% - 2% der Frischdampfmenge. Bei einem Speisewasserersatz von 1,5 kg pro Sekunde ergibt sich für Kraftwerk 1 und 2 ein Wasserverbrauch von insgesamt 320.000 Tonnen Speisewasser. Der Wasserverbrauch von Kraftwerk 3 wird durch die geringere Betriebsstundenzahl etwas gesenkt. Hierfür liegt der Verbrauch insgesamt bei 240.000 Tonnen. Der spezifische Speisewasserverbrauch liegt für die drei Parabolrinnenkraftwerke bei jeweils 68 kg/MWhe_{brutto}. Zur Spiegelreinigung gibt Pilkington Solar International einen spezifischen Wasserverbrauch von 600 kg/MWhe_{brutto} als Erfahrungswert für einen 80 MW-Block an.

Zum Thermoölverbrauch gibt die Firma Pilkington Solar International 3% - 4% des insgesamt eingesetzten Wärmeträgermediums an. Insgesamt werden für ein Parabolrinnenkraftwerk dieser Größe 1.029 t Thermoöl in dem System eingesetzt. Für diese Studie werden 4% jährlicher Thermoölverlust veranschlagt.

Durch eine Zusatzfeuerung von 25% mittels Erdgas¹⁵ ergibt sich ein Brennstoffbedarf von 58 kg/MWhe_{brutto}. Die Verbrennungsluftmenge¹⁶ beträgt dabei 800 kg/MWhe_{brutto} entsprechend einem reinen Sauerstoffbedarf von 184 kg/MWhe_{brutto}.

Während des Betriebs der Anlagen wird der Einsatz von Werks- und Betriebsstoffen im wesentlichen durch den Wassereinsatz zur Kühlung und Reinigung sowie durch den Verbrauch an Brennstoff und Verbrennungsluft verursacht. Die angenommene Spiegelaustauschrate im Solarfeld von 3% pro Jahr hat nur einen geringen Einfluß auf Materialströme während der Betriebsphase eines Parabolrinnenkraftwerks.

¹⁵Erdgas mit einem Heizwert von 41 MJ/kg, Wirkungsgrad des Kraftwerks: 37,6%.

¹⁶Eigene Berechnung nach Kugeler, K. und Phlippen, P.-W.: Energietechnik - Technische, ökonomische und ökologische Grundlagen, Springer-Verlag.

Werkstoffe	Einheit	Kraftwerk 1	Kraftwerk 2	Kraftwerk 3
Glas	g/MWhe	627	627	855
Keramik	g/MWhe	8	8	11
Kupfer	g/MWhe	0,04	0,04	0,05
Silber	g/MWhe	0,05	0,05	0,07
Lack	g/MWhe	7	7	9
Treib- und Brennstoff (als Heizöl bilanziert) ^{a)}	g/MWhe	170	170	230
Treibstoff (Erdgas) ^{a)}	g/MWhe	70	70	100
Betriebsmittel				
Kühlwasser	kg/MWhe	2938	---	---
Speisewasser	kg/MWhe	68	68	68
Reinigungswasser	kg/MWhe	600	600	818
Thermoöl	kg/MWhe	0,17	0,17	0,23
Brennstoff ^{b)}	kg/MWhe	58	58	---
Verbrennungsluft ^{c)}	kg/MWhe	184	184	---

Kraftwerk 1: 80 MWe Parabolrinnenkraftwerk mit Zusatzfeuerung und Naßkühlung (3000 Betriebsstd./a)

Kraftwerk 2: 80 MWe Parabolrinnenkraftwerk mit Zusatzfeuerung und Trockenkühlung (3000 Betriebsstd./a)

Kraftwerk 3: 80 MWe Parabolrinnenkraftwerk ohne Zusatzfeuerung und Trockenkühlung (2200 Betriebsstd./a)

a) Energiebedarf zur Produktion und zum Transport der Kollektoren - b) Erdgas mit einem Heizwert von 41 MJ/kg - c) Sauerstoffanteil: 23 Gewichtsprozent

Quelle: Eigene Berechnungen nach Pilkington Solar International; Kabelwerk Draka, Wuppertal; Maschinenfabrik Glückauf, Gelsenkirchen; Firma Pütz, Düren; Volvo Hydraulik GmbH & Co, Essen; ABB-Baden, Marley Kühlturm GmbH, Düsseldorf; Holger Braess, BMW AG.

Tabelle 2: Massenbedarf für den Betrieb eines 80 MWe Parabolrinnenkraftwerks in g/MWhe_{brutto} bzw. kg/MWhe_{brutto}

Gesamte Materialintensität für eine MWhe_{netto} Strom

Für die ermittelten Massenanteile und Betriebsstoffe zum Bau und Betrieb der Parabolrinnenkraftwerke werden die mit ihrer Bereitstellung und Herstellung verbundenen Ressourcenverbräuche berechnet. In der folgenden Tabelle werden einige der Rucksackfaktoren, die zur Ermittlung der Materialintensitäten eingesetzt wurden, aufgelistet. Die sich daraus ergebenden Materialintensitäten beinhalten bereits die Eigengewichte der eingesetzten Werkstoffe.

Kategorie abiotisches Rohmaterial: Die Masse des bewegten Erdbodens beträgt 137 kg/MWhe_{netto}. Es ergibt sich für Kraftwerk 1 ein abiotischer Materialverbrauch von 273 kg/MWhe_{netto}. Kraftwerk 2 verbraucht insgesamt 278 kg/MWhe_{netto}. Der Erdboden hat einen Anteil von etwa 50% an den abotischen Rohmaterialien.

Für Kraftwerk 3 ergibt sich ein Verbrauch an abiotischem Material von 260 kg/MWhe_{netto}. Der Anteil des Erdbodens beträgt hierbei 187 kg/MWhe_{netto} und hat somit einen Anteil von 72%, da für Kraftwerk 3 eine Betriebstundenzahl von 2.200 h/a angesetzt wurde.

Es wird deutlich, daß der Einsatz eines werkstoffaufwendigen Trockenkühlturms kaum Einfluß auf den gesamten abiotischen Materialverbrauch hat. Dies ist auf den geringen systemweiten abiotischen Ressourcenverbrauch von Beton, der für den Trockenkühlturm eingesetzt wird, zurückzuführen. Die geringe Masse der Zusatzfeuerung hat keinen Einfluß auf den systemweiten abiotischen Rohmaterialverbrauch. Der durch die Zusatzfeuerung eingesetzte Brennstoff hat hingegen einen Anteil von 25% des abiotischen Rohmaterialverbrauch bei Kraftwerken mit Zusatzfeuerung.

Kategorie Wasser: Der große Unterschied der Wasserverbräuche zwischen den drei Kraftwerksvarianten spiegelt sich auch in der Betrachtung der gesamten Materialintensitäten für Bau und Betrieb wider. Kraftwerk 1 verbraucht insgesamt 4.241 kg Wasser/MWhe_{netto}. Etwa 96% des gesamten Wasserverbrauchs entfallen hierbei auf den Betrieb. Der Kühlwasserverlust hat einen Anteil von 78%, Speise- und Reinigungswasser haben einen Anteil von 17%. Kraftwerk 2 verbraucht insgesamt 1.001 kg Wasser/MWhe_{netto}. Der Wasserverbrauch ist also um etwa einen Faktor 4 gegenüber Kraftwerk 1 geringer. Das Speise- und Reinigungswasser haben einen Anteil von ca. 76%, der übrige Wasserverbrauch entsteht durch die systemweiten Ressourcenverbräuche zur Bereitstellung der zu ersetzenden Werkstoffe (Austauschrate der Reflektoren). Kraftwerk 3 verbraucht insgesamt mit 1.283 kg/MWhe_{netto} geringfügig mehr als Kraftwerk 2. Dies ist durch die geringere Anzahl an Betriebsstunden zu erklären. Die Verteilung der Wasserverbräuche auf die einzelnen Bereiche entspricht der Verteilung von Kraftwerk 2.

Kategorie Luft: Kraftwerk 1 verbraucht insgesamt 216 kg Luft/MWhe_{netto}. Kraftwerk 2 verbraucht mit 221 kg/MWhe_{netto} nur geringfügig mehr als Kraftwerk 1. Den größten Anteil an dem gesamten Luftverbrauch hat mit 184 kg/MWhe_{netto} die Verbrennungsluft. Kraftwerk 3 verbraucht mit 15 kg/MWhe_{netto} nur etwa 7% des Luftverbrauchs von Kraftwerk 1 und 2. Der Luftinput für die Herstellung und den Verbrauch der Werkstoffe bestimmt zu 93% den gesamten Luftverbrauch von Kraftwerk 3. (siehe Tabelle 4 und Abbildung 2)

Angaben	Abiot. Rohmaterial ^{a)} (t/t)	Wasser ^{a)} (t/t)	Luft ^{a)} (t/t)	Strom (kWh _e /t)
Baustahl (83%/17%)	4,1	6,8	0,1	482
Ferronickel ^{b)} (33% Ni) ^{g)}	46,3	62,8	13,5	k.A.
Kupfer (60%/40%)	688,3	89,8	k.A.	4.539
Aluminium (70%/30%)	6,1	20,3	k.A.	11.594
Silber	7.500	k.A.	k.A.	k.A.
Titan ^{c)}	41,7	k.A.	k.A.	k.A.
Beton	1,2	1,6	0,03	22,2
Glas ^{b)}	2,8	16,8	4,1	k.A.
PVC	2,6	21,9	k.A.	1.153
Mineralwolle ^{b)}	4,5	41,4	1,8	k.A.
Keramik ^{c)}	1,8	2,9	0,9	k.A.
Lack ^{c)}	3,63	19	0,06	k.A.
Erdgas	1,2	0,2	k.A.	3,3
Schweres Heizöl	1,2	6,9	k.A.	55,1
Dämmstoffe ^{c),d)}	1	k.A.	k.A.	k.A.
Holz ^{e)}	0,2	0,2	0,03	53,3
Papier	46	857	96	k.A.
Strom (pro MWhe) ^{f)}	4,7	83,4	0,6	0

Klammerwerte: (Primär/Sekundär)

a) Daten inklusive Eigengewicht der Werkstoffe jedoch ohne Transportintensität und Endenergieträger elektrischer Strom.

b) In den Materialintensitäten sind die Ressourcenverbräuche induziert durch Stromverbrauch enthalten. Sie werden hier nicht zusätzlich als Energieeinheiten ausgewiesen.

c) Eigene Berechnungen

d) Aufgrund der Datenlage konnte nur das Eigengewicht der Dämmstoffe berücksichtigt werden.

e) Der abiotische Rucksackfaktor von Holz liegt unter 1, da es sich bei Holz um ein biotischen Stoff handelt. Insgesamt liegt der biotische Rohmaterialverbrauch für die betrachteten Parabolrinnenkraftwerke weit unter 1 kg/MWhe und ist für diese Studie irrelevant.

f) bundesdeutscher Strommix 1991.

g) Der Nickelgehalt in Edelstählen liegt gewöhnlich unter 33%. Da die Materialintensität der Edelstähle das Gesamtergebnis der Materialintensitätsanalyse eines Parabolrinnenkraftwerks nur geringfügig beeinflusst, wurde der vorliegende Wert berücksichtigt. Aufgrund der Aufbauweise der Materialintensitätsanalyse ist eine Anpassung auf andere %-Gehalte möglich.

Quelle: Merten, T.; Liedtke, C.; Schmidt-Bleek, F.: Materialintensitätsanalysen von Grund-, Werk- und Baustoffen (1). Die Werkstoffe Beton und Stahl. Materialintensitäten von Freileitungsmasten. Wuppertal Institut für Klima-Umwelt-Energie, Wuppertal Papers Nr. 27, Wuppertal 1995. Rohn, H.; Manstein, C.; Liedtke, C.: Materialintensitätsanalysen von Grund-, Werk- und Baustoffen (2). Der Werkstoff Aluminium. Materialintensität von Getränkedosen. Wuppertal Institut für Klima-Umwelt-Energie, Wuppertal Papers Nr. 37, Wuppertal 1995.

Tabelle 3: Materialintensitäten / Rucksackfaktoren der eingesetzten Werk- und Betriebsstoffe

Technische Verbesserungen

Eine Möglichkeit, die Ressourcenproduktivität der Parabolrinnenkraftwerke zu erhöhen, besteht in der Direktverdampfung des Wärmeträgers (Wasser) in den Absorberrohren. Dies hätte den Vorteil, daß verschiedene Anlagenteile (Wärmetauscher, Pumpen usw.) eingespart werden könnten und ein höherer Prozeßwirkungsgrad sowie ein geringerer Eigenverbrauch erzielt werden könnte. Nachteilig wirkt sich ein gesteigerter Edelstahlbedarf für die Absorberrohre und der erhöhte Bedarf an Baustahl durch die Neigung der Kollektoren in Nord-Süd-Richtung aus. Folgende Kraftwerksvarianten wurden untersucht:

- 80 MWe Parabolrinnenkraftwerk ohne Zusatzfeuerung und Trockenkühlung (Kollektortyp LS-4 mit Neigungen der Kollektoren um 2°; Betriebsstunden 2.200 h/a).
- 80 MWe Parabolrinnenkraftwerk ohne Zusatzfeuerung und Trockenkühlung (Kollektortyp LS-4 ohne Neigungen der Kollektoren ; Betriebsstunden 2.200 h/a).

Weiterer Vorteil dieser Kraftwerkskonzepte wäre der Ersatz des bisher verwendeten Thermoöls, einem toxikologisch bedenklicher Stoff.

Für die unterschiedenen Kraftwerkskonzeptionen ergibt sich durch die Direktverdampfung eine Reduzierung im Verbrauch an abiotischen Rohmaterialien um etwa 26 kg/MWhe_{netto}. Die Verringerung beträgt damit etwa 10% bei den Anlagen mit Direktverdampfung zu den herkömmlichen Varianten. Diese Reduzierung wird im wesentlichen durch den erhöhten Prozeßwirkungsgrad und die Minimierung des Eigenbedarfs verursacht. Auch die verkleinerte Baugrundstücksfläche, und damit eine geringere Erdbodenbewegung zur Planierung, hat einen nicht unwesentlichen Anteil an dieser Bedarfsreduzierung. Die zusätzliche Einsparung an abiotischem Material durch eine Direktverdampfung ohne Neigung der Kollektoren beträgt 2 kg/MWhe_{netto} und kann nahezu vernachlässigt werden.

Der Verbrauch an Wasser wird durch das neue Konzept ebenfalls um etwa 10% bei allen Kraftwerksvarianten reduziert. Die Einsparungen werden insbesondere durch den verkleinerten Kühlwasserbedarf bei einem Konzept mit Naßkühlung und durch das Speise- und Reinigungswasser bei den Systemen mit Trockenkühlung verursacht. Auch hier ist die Ursache für die Reduktion im wesentlichen in der Erhöhung des Prozeß- und Verringerung des Kraftwerkswirkungsgrades zu finden.

Der Luftbedarf bei den Anlagen mit Direktverdampfung und Zusatzfeuerung (Kraftwerk 1 und 2) wird ebenfalls um 10% gegenüber den gleichen Anlagen ohne Direktverdampfung verringert. Beim Anlagenkonzept ohne Zusatzfeuerung wird durch die Direktverdampfung keine Reduzierung des Luftbedarfs erreicht.

Die größte Ressourcenoptimierung in der Kategorie abiotischen Rohmaterials läßt sich in der Reduzierung von bewegter Erde durch Bodenarbeiten erreichen. Diese ist jedoch nur geringfügig von der Art oder der Größe eines Kraftwerkes abhängig sondern von den örtlichen Gegebenheiten. Weitere Einsparungen könnten durch die Veränderung der Tragestruktur der Kollektoren, der Fundamente und der Reflektoren erfolgen. Ob durch konstruktive

Veränderungen der Tragestruktur oder der Reflektoren eine weitere Minimierung erreicht werden kann, konnte in dieser Studie nicht untersucht werden. Jedoch kann gesagt werden, daß durch den erhöhten Einsatz von Sekundärwerkstoffen eine erhebliche Reduzierung erreicht werden kann. Wird die Austauschrate der Reflektoren (3%) im Betrieb verringert, ergeben sich nur geringfügige Verminderungen (0,8%) im abiotischen Rohmaterialverbrauch.

Der Wasserbedarf kann durch die Reduzierung des Reinigungs- und Speise-wassers Verbrauch verringert werden. In einer Berechnung zu einer ressourcenoptimierten Variante wurde angenommen, daß das Reinigungswasser durch eine Rückgewinnung des bei der Reinigung der Reflektoren abfließenden Wassers um 50% eingespart werden kann. Weiterhin wurde eine Reduktion des Frischwassereinsatzes für den Speisewasserverlust von 75% angenommen. Dabei wurde eine solarthermische Rückgewinnung der zu entsorgenden Abwässer in der Kalkulation berücksichtig. Hierdurch läßt sich der Wasserbedarf in einer ressourcenoptimierten Kraftwerks-variante mit Trockenkühlung auf 731 kg/MWhe_{netto} (um 46%) reduzieren. Wird außerdem eine Direktverdampfung genutzt, stellt sich ein Wasserverbrauch von 658 kg/MWhe_{netto} ein. Der Luftbedarf kann in den betrachteten optimierten Kraftwerksvarianten nur noch geringfügig durch die beschriebenen Maßnahmen eingeschränkt werden. (siehe Tabelle 4 und Abbildung 2)

Differenzierte Betrachtung

Abschreibungszeitraum: Eine wichtige Größe in der Materialintensitätsanalyse ist der Abschreibungszeitraum, d.h. der Lebenszeitraum, des betrachteten Gutes. Mit anwachsendem "Lebensalter" eines Produktes steigt auch die quantitative Menge der produzierten Dienstleistungseinheiten und dadurch eine Reduktion der Materialintensitäten.

Durch die klimatischen Bedingungen in ariden Gegenden ist davon auszugehen, daß die tragenden Elemente, wie die Tragestruktur der Kollektoren und die Fundamente, einen wesentlich längeren Zeitraum überdauern werden als die in der Berechnung gewählte Lebenszeit der Anlagen von 20 Jahren (wg. des Vergleichs mit den Werten fossiler Kraftwerke). Ebenfalls kann die durch die notwendigen Bodenarbeiten bewegte Erde über einen längeren Zeitraum abgeschrieben werden. Für diese Bauteile und Massenbewegungen wird ein Abschreibungszeitraum von 50 Jahren angenommen. Als Basis für diese differenzierte Betrachtung der Abschreibungszeiträume wurde das Kraftwerk 3 ausgewählt.

Kategorie abiotisches Rohmaterial: In dieser Kategorie wird durch die Differenzierung des Abschreibungszeitraums der größte Effekt erreicht. Beim Kraftwerk 3 reduziert sich der systemweite abiotische Rohmaterialbedarf auf 126 kg/MWhe_{netto} (-52%). Wird zusätzlich eine Direktverdampfung und eine Ressourcenoptimierung einbezogen, kann der Bedarf an abiotischem Rohmaterial bis auf 112 kg/MWhe_{netto} gesenkt werden.

Kategorie Wasser: Die Einsparung im Wasserverbrauch beträgt durch einen erhöhten Abschreibungszeitraum der erwähnten Arbeiten und Anlagenteile nur 5% gegenüber dem

ursprünglichen Bedarf von Kraftwerk 3. Wird auch hier die Direktverdampfung und die Verringerungen durch die Ressourcenoptimierung berücksichtigt, kann der Wasserverbrauch auf 567 kg/MWe_{netto} (um 54%) reduziert werden.

Kategorie Luft: Der Luftbedarf wird durch einen differenzierten Abschreibungszeitraum nur geringfügig beeinflusst.

Skalierung: Bei solarthermischen Kraftwerken erhöht sich die Reflektorfläche proportional mit der installierten Leistung. D.h. eine Minderung der Materialintensitäten durch eine Erhöhung der Kraftwerksleistung kann in Bezug auf die solarthermischen Anlagenkomponenten nicht erreicht werden. Der konventionelle Anlagenteil (Turbine, Generator usw.) unterliegt einer Degression mit steigender Kraftwerksleistung. Der konventionelle Anlagenteil hat je nach Kraftwerkstyp mit etwa 125-175 t pro MWe gegenüber dem Solarfeld (465 t Werkstoff/MWe) nur einen Anteil von maximal 27% an der gesamten Baumasse. Daher wird das Reduktionspotential mit steigender installierter Leistung nur gering ausfallen. Zudem bleibt der Werkstoff- und Betriebsmittelbedarf von Parabolrinnenanlagen weitgehend unabhängig von der installierten Leistung.

Schlußfolgernd kann davon ausgegangen werden, daß die Materialintensitäten größerer solarthermischer Kraftwerke mit höheren Nennleistungen sich nicht wesentlich von denen des hier untersuchten 80 MWe unterscheiden und nur schwach in ihrer Materialintensität abfallen werden und die bereits diskutierten Maßnahmen zur Ressourcenminderung einen größeren Einfluß haben. Bei fossil befeuerten Anlagenkonzepten ist die Degression im spezifischen Materialbedarf viel deutlicher ausgeprägt. Dieser Nachteil einer geringeren Sensibilität des Materialbedarfs zur installierten Leistung bei Parabolrinnenanlagen gegenüber fossil befeuerten Kraftwerken kehrt sich um zu einem Vorteil, wenn eine Verkleinerung der installierten Leistung betrachtet wird. Der spezifische Materialverbrauch für das Solarfeld wird auch hier gleich bleiben, während der konventionelle Anlagenteil im Materialbedarf ansteigen wird. In der Summe ergibt sich damit ein schwach ausgeprägter Anstieg des spezifischen Materialbedarfs bei sinkender installierter Anlagenleistung.

Dienstleistungserfüllung: Die erbrachte Dienstleistung der betrachteten solarthermischen Parabolrinnenanlagen ist die produzierte kWh elektrischer Strom. Die Quantität der über die gesamte Lebenszeit erzeugten Menge an elektrischem Strom wirkt auf die Ressourcenproduktivität. Die Kontinuität der Stromproduktion ist ein qualitativer Aspekt, der bei heutigen Energiesystemen eine wichtige Rolle spielt. Solarthermische Kraftwerke zur Produktion von elektrischem Strom haben den Nachteil einer mit der Sonneneinstrahlung schwankenden Stromproduktion. Daher ist unter dem Aspekt einer gleichmäßigen Stromproduktion eine Zusatzfeuerung zu empfehlen. Die Kontinuität der Stromproduktion in solarthermischen Kraftwerken zu erhöhen, kann aber auch durch verschiedene andere Systeme

berücksichtigt werden. Prinzipiell hierzu geeignet wären Speichersysteme (z.B. thermische 3 oder 4 Stunden Speicher oder die Umwandlung von Strom in Wasserstoff) sowie die Kopplung mehrerer über den Breitengrad verteilter solarthermischer Kraftwerke, die Vernetzung verschiedener solarer Energieumwandlungstechniken oder der Verbund einer Parabolrinnenanlage mit einem konventionellen Energieumwandlungstechnik. Diese Systeme werden derzeit erforscht und in Pilotanlagen getestet. Der Einfluß dieser Maßnahmen auf die Materialintensität konnte in dieser Studie nicht quantifiziert werden.

Konventionelle Kraftwerke im Vergleich zu Parabolrinnenkraftwerke

Es werden insgesamt vier Vergleichskraftwerke betrachtet, die in der Literatur bereits auf ihre Baustoffzusammensetzung hin untersucht wurden. Im einzelnen handelt es sich hierbei um zwei Steinkohlekraftwerke mit 745 MWe und 100 MWe Leistung, ein GuD-Kraftwerk mit 620 MWe Leistung und ein Schweröl-Kraftwerk, mit einer Leistung von 400 MWe.

Vergleich der Baumassen:

Vergleich der Materialintensitäten: Bei der Berechnung der Materialintensitäten der betrachteten konventionellen Kraftwerke bleibt zu vermerken, daß hier nicht die gleiche Detailtiefe wie beim untersuchten Parabolrinnenkraftwerk erreicht werden konnte. Der zum Bau der konventionellen Kraftwerke verwendete Stahl konnte z.B. nur als Baustahl aufgenommen werden weil in der Literatur keine genaueren Angaben hierzu gemacht wurden. Weiterhin konnte die Erdbewegung zum Bau und der Speisewasserverlust während des Betriebs nicht berücksichtigt werden. Hieraus folgt, daß die Materialintensitäten in den Kategorien abiotisches Rohmaterial und Wasser bei den betrachteten konventionellen Kraftwerkstypen in der Realität höher ausfällt als hier dargestellt werden konnte. (Ergebnisse siehe Tabelle 4 und Abbildung 2)

Kategorie abiotisches Rohmaterial: Das betrachtete GuD-Kraftwerk mit Abhitzeessel verbraucht mit 229 Kilogramm abiotisches Rohmaterial je MW_{netto} produziertem Strom weniger als die untersuchten Parabolrinnen-kraftwerke. Dabei wurde der Erdboden zum Planieren der Kraftwerksgrundflächen bei GuD-Kraftwerken nicht berücksichtigt. Hinzu kommt, daß für das GuD-Kraftwerk eine reine Erdgasbefuerung angenommen wurde. Der abiotische Materialverbrauch zur Befuerung beschränkt sich dadurch auf den sehr gering ausfallenden systemweiten Ressourcenverbrauch zur Erdgasbereitstellung. Beim Einsatz von Steinkohle für den Dampfkreislauf des GuD-Kraftwerks würde der abiotische Materialverbrauch ansteigen. Bei differenzierter Abschreibung verbraucht das Parabolrinnenkraftwerk um einen Faktor 1,8 weniger abiotisches Material als das GuD-Kraftwerk. Wird im Vergleich zusätzlich die Direktverdampfung und eine Ressourcenoptimierung einberechnet, ist das Parabolrinnenkraftwerk sogar um einen Faktor 2 besser als das GuD-Kraftwerk und um einen Faktor 8 besser als das 100 MWe Steinkohlekraftwerk.

Kategorie Wasser: Im Vergleich mit dem GuD-Kraftwerk liegt der Wasserverbrauch von Kraftwerk 1 nahezu um einen Faktor 2 höher. Der Wasserverbrauch des GuD-Kraftwerks liegt bei 2.021 kg/MWhe_{netto}. Der Speisewasserverlust des GuD-Kraftwerks wurde in der Literatur nicht angegeben und konnte nicht in die Betrachtung einfließen, wodurch der Verbrauch des GuD-Kraftwerks wohl etwas zu niedrig angesetzt sein dürfte. Trotzdem liegt der Wasserverbrauch von Kraftwerk 2 schon deutlich unter dem Wasserverbrauch des GuD-Kraftwerks. Mit 1.001 t/MWhe_{netto} ist der Wasserverbrauch von Kraftwerk 2 und 3 um die Hälfte niedriger als der Wasserverbrauch des GuD-Kraftwerks. Wird die wassersparendste Variante einer Parabolrinnenanlage zum Vergleich herangezogen, ergibt sich eine Differenz zum GuD-Kraftwerk von einem Faktor 3,5 zu Gunsten des Parabolrinnenkraftwerks. Im Vergleich mit einem 100 MWe Steinkohlekraftwerk verbrauchen die Parabolrinnenkraftwerke um einen Faktor 1,6 - 11,5 weniger Wasser.

Kategorie Luft: Der Luftverbrauch des GuD-Kraftwerks liegt mit 573 kg/MWhe_{netto} im Vergleich zu Kraftwerk 1 und 2 um einen Faktor 2,7 höher. Im Vergleich zu Kraftwerk 3 wächst dieser Faktor auf 38 an. Die übrigen konventionellen Kraftwerke verbrauchen zwischen 837 und 881 kg/MWhe_{netto} und liegen damit gegenüber den Parabolrinnenkraftwerken 1 und 2 um bis zu einen Faktor 4 höher. Im Vergleich zu Kraftwerk 3 steigt dieser Faktor sogar auf ungefähr 60 an.

Sensitivitätsanalyse

Verrohrung, Thermoöl und Kühlwasser: Eine Sensitivitätsanalyse der verwendeten Daten zur Berechnung des Ressourcenverbrauchs ergab, daß die Spannbreite der verursachten Fehler durch die erfolgte Abschätzung bei der Verrohrung des konventionellen Kraftwerkareals und der Thermoölverluste minimal ($\pm 0,1\%$) sind. Weiterhin ergibt sich für den Kühlwasserbedarf, bei solarthermischen Kraftwerken mit Naßkühlung (Kraftwerk 1), eine Fehlerbandbreite im Wasserbedarf pro MWhe von $\pm 7\%$.

Erdbewegung zum Bau der konventionellen Kraftwerke: Auf Grund der ungenügenden Datenlage zur Erdmassenbewegung bei fossil befeuerten Kraftwerken wurde bei der Berechnung der Materialintensitäten dieser Kraftwerke auf den Einbezug der Erdbewegung zur Vorbereitung des Baugeländes verzichtet. In der Literatur wird zum Bau eines 600 MW Steinkohlekraftwerk (Reuter West) eine spezifische Erdmassenbewegung von 1.300 Tonnen pro installiertem MWe angegeben. Bezogen auf das in dieser Studie zum Vergleich verwendete 745 MWe Kohlekraftwerk bedeutet dies ein zusätzlicher abiotischer Rohmaterialbedarf von 14 kg pro MWh erzeugtem elektrischen Strom. Der Fehler in der Berechnung des abiotischen Materials zum 745 MWe Steinkohlekraftwerk beträgt danach +1,7%. Verwendet man diese Betrachtung zur Bestimmung des Fehlers beim untersuchten 620 MWe GuD-Kraftwerk beträgt

dieser beim abiotischen Rohmaterialverbrauch +7%. In der Tendenz ergibt sich im Vergleich zu den solarthermischen Kraftwerken keine Verschiebungen.

Transport : Die Berechnung der Auswirkungen des Transports von Anlagenkomponenten auf den Ressourcenverbrauch wurde ebenfalls untersucht. Dabei wurde berücksichtigt, daß alle Werkstoffe zum Bau und Betrieb (mit Ausnahme von Beton) zum Erstellungsort mit Hilfe von Seefrachtschiffen erfolgt. Dabei wurde eine Transportentfernung von 2.600 km angesetzt, die der Entfernung von Deutschland nach Nordafrika entspricht. Danach hat der Transport, in Bezug auf den Ressourcenverbrauch von Wasser und Luft, nur einen minimalen Einfluß. Der abiotische Materialbedarf durch den Transport erhöht sich hingegen um 2% bei einem Kraftwerk mit Zusatzfeuerung. Bei einem Kraftwerk ohne Zusatzfeuerung steigert sich der abiotische Ressourcenverbrauch um 3%.

Bei den Kraftwerksvarianten 1 bis 3 ergibt sich im abiotischen Rohmaterialbedarf eine Fehlerbandbreite von +2% und -0,1%. Dieser Fehler wird im wesentlichen durch den Transport verursacht. Der systemweite Wasserverbrauch schwankt bei Kraftwerken mit Naßkühlung um $\pm 7\%$ und entsteht durch die Spannweite der Herstellerangaben zum Kühlwasserbedarf. Bei Kraftwerken mit Trockenkühlung ergibt sich eine Fehlerbandbreite von +0,5% und -0,17% die zu gleichen Teilen durch die verwendeten Werkstoffe und den Transport verursacht werden. Der Luftbedarf wird mit +1,3% nur beim Kraftwerk 3 durch den Transport angehoben. Bei den untersuchten Kraftwerken 1 und 2 entsteht ein Fehler durch den unberücksichtigten Transport im systemweiten Luftbedarf von +0,07%.

Produktionskapazitäten

Aus Gründen einer offensiven Klimavorsorgepolitik wird der Bau solarthermischer Kraftwerke in vielen Energieszenarien gefordert. In einem "Sustainable Szenario" wird der Ausbau innerhalb der Europäischen Union bis zum Jahr 2050 auf 158 GWe installierter Leistung gefordert¹⁷. Dies bedeutet für den Bau der Kraftwerke z.B. einen Bedarf an 6,7 Millionen Tonnen Zement und 24 Millionen Tonnen Stahl (Bau- und Edelstahl). Ebenfalls werden zum Bau und dem 20jährigen Betrieb der Anlagen 20 Millionen Tonnen Glas, 113.000 Tonnen Kupfer und 1.500 Tonnen Silber eingesetzt. Werden diese Massen gleichmäßig auf den Szenariozeitraum von 50 Jahren verteilt, ergibt sich ein durchschnittlicher Bedarf, der mit den jährlichen Produktionskapazitäten der Werkstoffe in der EU verglichen werden kann. Danach werden 0,07% der EU-weiten jährlichen Zement-, 0,5% der Stahl-, 1,3% der Glas-, 0,1% der Kupfer- und 4,7% der Silberproduktion für den Bau und Betrieb solarthermischer Kraftwerke verbraucht. Bezieht man den Bedarf an Silber auf die jährliche Weltproduktion, ist der Anteil für

¹⁷ Andrew, A., Audinet, P., Bougard, J., Bräuer, W., Connor-Lajambe, H., Drees, B., Groscurth, H.-M., de Gouvello, Ch., Hohmeyer, O., Krüger-Nielsen, S., Kuemmel, B., Kühn, I., Lehmann, H., Matarasso, P., Poppe, M., Reetz, T., Schallaböck, K.O., Sørensen, B. und Weinreich, S.: „Sustainable Szenario“ für das EU-Projekt: Long-term integration of renewable energies into the European energy system and its potential economic and environment impacts, DG XII EU-Kommission RENA-CT94-0041, Brüssel June 1996.

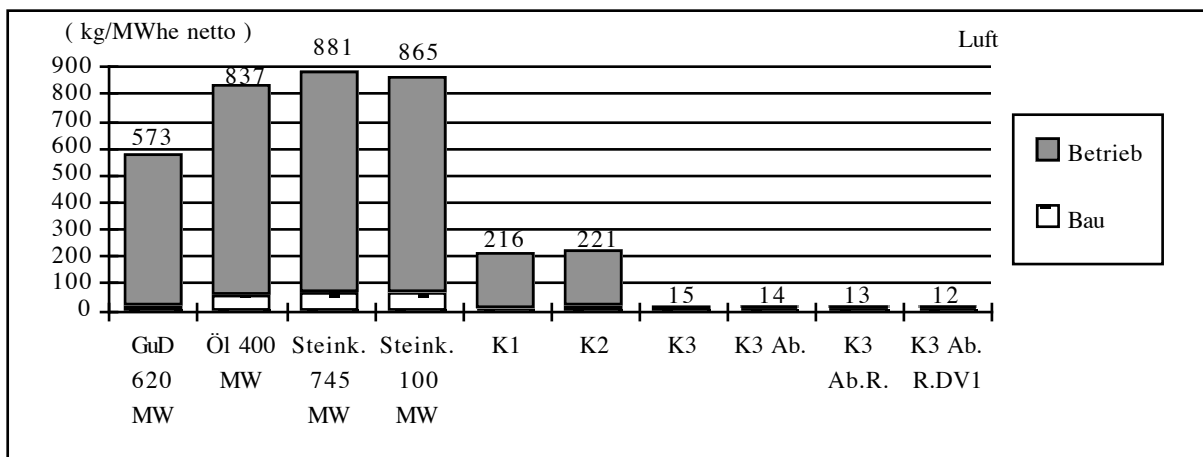
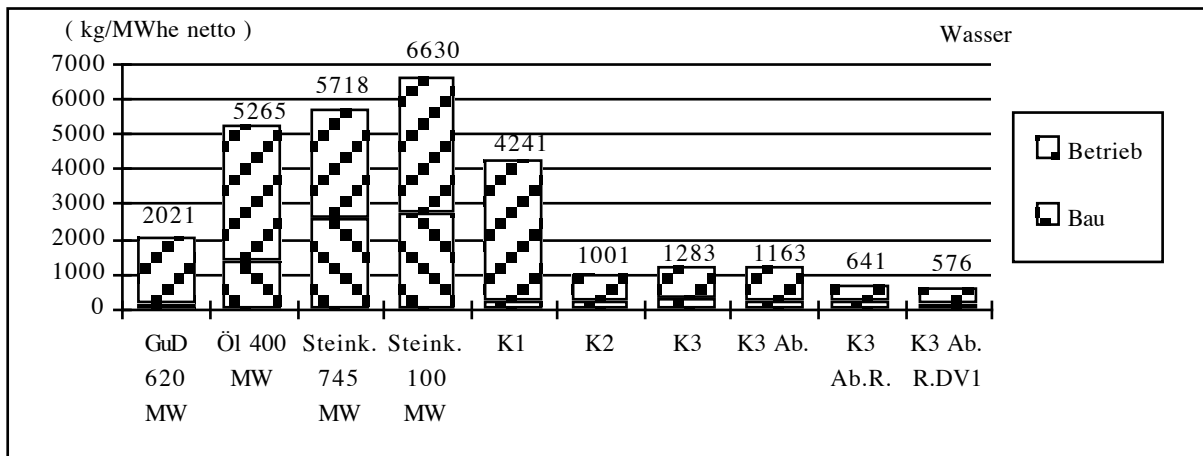
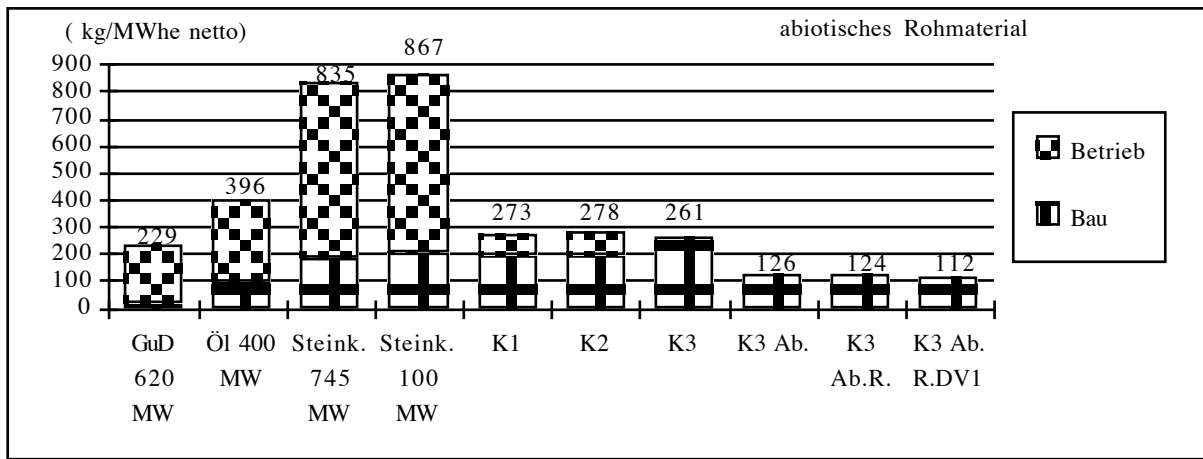
den Bau und Betrieb der betrachteten Anlagen verschwindend gering. Schlußfolgernd kann gesagt werden, daß die Produktionskapazitäten der ausgewählten Stoffe innerhalb der Europäischen Union ausreichen, um den nach dem "Sustainable Szenario" geforderten Ausbau solarthermischer Kraftwerke zu gewährleisten.

Ökologische Chancen und Risiken

Die vorliegende Studie zeigt auf, daß die untersuchten solarthermischen Parabolrinnenanlagen im Gegensatz zu konventionell befeuerten Anlagen eine ressourcenschonendere Methode darstellen, elektrischen Strom zu produzieren. Weiterhin wird aus den Ergebnissen deutlich, daß in solarthermischen Kraftwerken die Wasserversorgung zur Kühlung des thermodynamischen Kreislaufs, zur Reinigung der Spiegelflächen und für den Ersatz des Speisewassers einen erheblichen Standortfaktor darstellt.

In Bezug auf die Zusatzfeuerung mit Erdgas hat die Studie gezeigt, daß die Ressourcenverbräuche der Kraftwerke mit bzw. ohne Zusatzfeuerung und Trockenkühlung ausgewogen ist. Der Verbrauch an abiotischen Rohmaterialien und Wasser ist annähernd gleich. Nur im Luftverbrauch unterscheiden sich die beiden Anlagenkonzepte durch den Luftbedarf des Brennstoffs. Eine Möglichkeit, die Zusatzfeuerung zu umgehen, wäre der Einsatz von thermischen Speichern. Die Wasserstofferzeugung wäre eine weitere Variante zur Überbrückung strahlungsarmer Zeiten. Um jedoch eine präzisere Aussage über die Auswirkungen auf den Ressourcenverbrauch dieser Techniken im Vergleich zu fossilen Zusatzfeuerung treffen zu können, müssen hierzu weitere Untersuchungen unternommen werden. Aus diesen Gründen erscheint insbesondere das Parabolrinnenkraftwerk ohne Zusatzfeuerung und mit Trockenkühlung aus ökologischer Sicht die günstigste Variante der unterschiedenen solarthermischen und konventionellen Kraftwerksvarianten. Aus der Sicht einer ausgeglicheneren Stromproduktion ist, während einer Übergangszeit zu einer CO₂-freien Energiewirtschaft, eine Zusatzfeuerung ökologisch vertretbar.

Die Direktverdampfung von Wasser in den Absorberrohren ermöglicht eine Wirkungsgradsteigerung der Nettostromproduktion, was sich dementsprechend auf die Ressourcenproduktivität auswirkt. Weiterhin ergibt sich der Vorteil, daß das verwendete Thermoöl, ein toxikologisch bedenklicher Stoff, eingespart werden kann und durch Wasser ersetzt wird. Ebenfalls darf in dieser Studie nicht unerwähnt bleiben, daß durch den Einsatz von solarthermischen Kraftwerken zur Stromerzeugung die Emission des klimagefährdenden Gases CO₂ und anderer Schadstoffe vermindert werden kann und damit ein zusätzlicher positiver Beitrag zum Umweltschutz geleistet würde.



a) 620 MWe Gas- und Dampfkraftwerk, Wirkungs.: 48,8 %, Betriebsstd. 5000 h/a; b) 400 MWe Schweröl-Kraftwerk, Wirkungs.: 39 %, Betriebsstd. 5000 h/a; c) 745 MWe Steinkohlekraftwerk, Wirkungs.: 37,5 %, Betriebsstd. 5000 h/a; d) 100 MWe Steinkohlekraftwerk, Wirkungs.: 36 %, Betriebsstd. 4000 h/a; e) K1 - 80 MWe Parabolrinnenkraftwerk (PRKW), Zusatzfeuerung, Naßkühlung, Wirkungsgrad: 37,6, Betriebsstd. 3000 h/a; f) K2 - 80 MWe PRKW, Zusatzfeuerung, Trockenkühlung, Wirkungsgrad: 37,6, Betriebsstd. 3000 h/a; g) K3 - 80 MWe PRKW, Trockenkühlung, Wirkungsgrad: 37,6, Betriebsstd. 2200 h/a; h) K3 Ab. - 80 MWe PRKW, Trockenkühlung, mit differenzierter Abschreibung, Betriebsstd. 2200 h/a; j) K3 Ab.R. - 80 MWe PRKW, Trockenkühlung, mit differenzierter Abschreibung, ressourcenopt., Betriebsstd. 2200 h/a; k) K3 Ab.R.DV1 - 80 MWe PRKW, Trockenkühlung, mit differenzierter Ab., ressourcenopt. Direktverdampfung (2 Grad Neigung der Kollektoren), Betriebsstd. 2200 h/a; Quellen: Parabolrinnenkraftwerke: eigene Berechnung Lehmann, H. et.al. (e,f,g,h,j,k); Manstein, C. (b,c), 1995; Levin, B. (a), 1993; Frischknecht, R. et al. (d), 1994.

Abbildung 2: Ressourcenverbrauch konventioneller Kraftwerke und solarthermischer Parabolrinnenkraftwerke in kg/MWhe_{netto}

Angaben in kg/MWhe _{netto}	abiot. Rohmaterial	Wasser	Luft
GuD ^{a)}	229 (6/94)	2021 (5/95)	573 (2/98)
Schweröl ^{b)}	396 (25/75)	5265 (26/74)	837 (6/94)
Steinkohle ^{c)}	835 (22/78)	5718 (45/55)	881 (8/92)
Steinkohle ^{d)}	867 (223/77)	6630 (40/60)	865 (7/93)
Kraftwerk 1 ^{e)}	273 (70/30)	4241 (4/96)	216 (4/96)
Kraftwerk 2 ^{f)}	278 (70/30)	1001 (20/80)	221 (5/95)
Kraftwerk 3 ^{g)}	261 (99/1)	1283 (20/80)	15 (74/26)
Kraftwerk 3 Ab. ^{h)}	126 (98/2)	1163 (15/85)	14 (72/28)
Kraftwerk 3 Ab. R. ^{j)}	124 (98/2)	641 (26/74)	13 (73/27)
Kraftwerk 3 R. Ab. DV1 ^{k)}	112 (98/2)	576 (26/74)	12 (73/27)

- a) 620 MWe Gas- und Dampfkraftwerk, Wirkungsgrad: 48,8 %, Betriebsstd.: 5000h/a;
 b) 400 MWe Schweröl-Kraftwerk, Wirkungsgrad: 39 %, Betriebsstd.: 5000h/a;
 c) 745 MWe Steinkohlekraftwerk, Wirkungsgrad: 37,5 %, Betriebsstd.: 5000h/a;
 d) 100 MWe Steinkohlekraftwerk, Wirkungsgrad: 36 %, Betriebsstd.: 4000h/a;
 e) 80 MWe Parabolrinnenkraftwerk mit Zusatzfeuerung und Naßkühlung, Wirkungsgrad: 37,6, Betriebsstd.: 3000h/a;
 f) 80 MWe Parabolrinnenkraftwerk mit Zusatzfeuerung und Trockenkühlung, Wirkungsgrad: 37,6, Betriebsstd.: 3000h/a;
 g) 80 MWe Parabolrinnenkraftwerk ohne Zusatzfeuerung und Trockenkühlung, Wirkungsgrad: 37,6, Betriebsstd.: 2200h/a;
 h) 80 MWe Parabolrinnenkraftwerk ohne Zusatzfeuerung und Trockenkühlung, mit differenzierter Abschreibung, Betriebsstd.: 2200h/a;
 j) 80 MWe Parabolrinnenkraftwerk ohne Zusatzfeuerung und Trockenkühlung, mit differenzierter Abschreibung und ressourcenoptimiert, Betriebsstd.: 2200h/a;
 k) 80 MWe Parabolrinnenkraftwerk ohne Zusatzfeuerung und Trockenkühlung, mit differenzierter Abschreibung, ressourcenoptimiert und mit Direktverdampfung (2° Neigung der Kollektoren), Betriebsstd.: 2200h/a;
 Quellen: Parabolrinnenkraftwerke: eigene Berechnung (e,f,g,h,j,k); Manstein, C. (b,c), 1995; Lewin, B. (a), 1993; Frischknecht, R. et al. (d), 1994.¹⁸

Tabelle 4: Ressourcenverbrauch konventioneller Kraftwerke und solarthermischer Parabolrinnenkraftwerke in kg/MWhe_{netto}

¹⁸ Frischknecht, R. et al.: Ökoinventare für Energiesysteme. Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz, im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft und des Nationalen Energie-Forschung-Fonds, ETH Zürich, Zürich 1994. Jensch, W.: Vergleich von Energieversorgungssystemen unterschiedlicher Zentralisierung unter Berücksichtigung von energietechnischen, ökonomischen und ökologischen Parametern, Dissertation an der Technischen Universität München, München 1988. Lewin, B.: CO₂-Emissionen von Energiesystemen zur Stromerzeugung unter Berücksichtigung der Energiewandlungsketten. Dissertation am Fachbereich Bergbau und Geowissenschaften der Technischen Universität Berlin, Berlin 1993. Manstein, C.: Quantifizierung und Zurechnung anthropogener Stoffströme im Energiebereich, Diplomarbeit, Bergische Gesamthochschule Wuppertal/Wuppertal-Institut, Wuppertal, 1995.

Danksagung

Eine große Menge an Daten mußte beschafft, erfragt und zusammengestellt werden, um die vorliegende Studie zu erstellen. Dies konnte nicht ohne die Hilfe vieler engagierter Menschen geschehen. Für die fruchtbare kritische Begleitung und die vielen wichtigen Hinweise möchten wir Herrn Dr. Fröchtenicht und Herrn Holger Braess von BMW, Frau Dr. Zieschang und Herrn Manstein von der Abteilung Stoffströme und Strukturwandel des Wuppertal Instituts danken. Für die Erfassung der Werkstoffe zum Bau und Betrieb der untersuchten 80 MWe solarthermischen Parabolrinnenanlage und der geduldrigen Beantwortung der vielen Fragen danken wir Herrn Aringhoff und Herrn Svoboda von der Firma Pilkington Solar International GmbH, Herrn Lauer von der Firma ABB Baden in der Schweiz, Herrn Dr. Geyer von der Deutschen Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrttechnik e.V. in Almeria (Spanien), Herrn Wolf von der Firma Marley Cooling Tower und Herrn Dr. Lippke vom Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoffforschung. Weiterhin möchten wir uns bei den Mitarbeitern vom Kabelwerk Draka GmbH & Co KG in Wuppertal, Volvo Hydraulik GmbH & Co in Essen, Zylinder Glückauf in Gelsenkirchen und der Firma Püz in Düren bedanken.

weitere der Veröffentlichung zugrunde liegende Literatur:

- Aringhoff, R.: Öffentliche Anhörung zum Thema Erneuerbare Energien: der Weg zu einer nachhaltigen und klimaverträglichen Energieversorgung; Enquête-Kommission des Deutschen Bundestages Schutz der Erdatmosphäre, Oktober 1993.
- Aringhoff, R.: Anforderungen der Märkte an die solarthermische Technikentwicklung und Einführungsstrategien, VDI-Tagung Solarthermische Kraftwerke II, Stuttgart 1995.
- Becker, M. und Meinecke, W.: Solarthermische Anlagentechnologien im Vergleich, Springer Verlag, 1992.
- BMFT: Solare Wasserstoffenergiewirtschaft; Ad-hoc-Ausschuß beim Bundesministerium für Forschung und Technologie, Bonn, April 1988.
- Cohen, G.E.; Kearney, D.W. und Cable, B.G.: Recent improvements and performances experiences - at the Kramer Junction SEGS plants, KJC Operating Company, 1996.
- De Laquil, P., Kearney, D., Geyer, M. und Richard, D.: Solar-thermal electric technology in Johannsson, T.B., Kelly, H., Reddy, A.K.N. und Williams, R.K. (Hrsg.): Renewable Energy - Sources for fuels and electricity, Earthscan Publication, London 1993.
- DLR: Solarer Wasserstoff: Energieträger der Zukunft; Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DLR), Stuttgart 1989.
- Eisenbeiß, G.; Klaiß, H.; Nitsch, J. und Staiß, F.: Solarthermische Kraftwerke für den Mittelmeerraum, DLR-Nachrichten, Heft 71, Mai 1993.
- Energiewirtschaft und Technik Verlagsgesellschaft mbH (Hrsg.): Musteranlagen der Energiewirtschaft, Heizkraftwerk Reuter West, Düsseldorf 1989.
- Enquête-Kommission: Erneuerbare Energien: Solare Großanlagen und Import solarer Energieträger, Band 3; Enquête-Kommission "Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre" des Deutschen Bundestages, Economica Verlag GmbH, Bonn und Verlag C. F. Müller GmbH, Karlsruhe 1990.
- European Commission: Assessment of solar thermal trough power plants technology and its transferability to the Mediterranean region - Final Report -, European Commission Directorate General I, prepared by Pilkington Solar International, June 1994.
- Finker, A., Schmitz-Goeb, M., Streuber, Ch. : Phoebus-Versuche erfolgreich; Energie Spektrum, November 1993.
- Lehmann, H.: Stoffströme und Bauen, Wuppertal-Institut für Klima-Umwelt-Energie, 1996.
- Müller, M. und Hunold, D.: Hochdruck-Wasser/Dampf-Versuchsanlage für Experimente mit Zweiphasenströmungen, BWK Bd. 47, Nr. 6, Juni 1995.
- Nitsch, J. Winter, C.-J. (Hrsg.): Wasserstoff als Energieträger, Technik, Systeme, Wirtschaft; Berlin, 1988.
- Pilkington Solar International: Prefeasibility study of a solar thermal trough power plant for Crete - Finale Report - , December 1994.
- Pilkington Solar International: Status report on solar thermal power plants, 1996
- Rib, D.M.: Environmental aspects of SEGS solar power plants, KJC Operating Company, 1995.