

**Zukunftsinvestitionsprogramm des Bundesministeriums
für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit**

SOKRATES-Projekt

Solarthermische Kraftwerkstechnologie für den Schutz des Erdklimas

AP 2: Technologiedatenbank und -modelle

**AP 2.2: Technologievergleich:
Ökobilanzen von SEGS-, FRESNEL- und DSG-Kollektoren**

Projektbericht

Datum: März

Erstellt von: Dr. Peter Viebahn
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Stuttgart

Inhaltsverzeichnis

1	VORGEHENSWEISE	3
1.1	Ziele und Vorgehensweise bei der Bilanzierung	3
1.2	Das Stoffstromnetz der Solarkraftwerke	3
1.3	Rahmen und Annahmen zur Durchführung der Ökobilanz	6
1.3.1	Gegenstand der Modellierung	6
1.3.2	Funktionelle Einheit	6
1.3.3	Bezugsraum und -zeitraum	6
1.3.4	Bilanzierungsumfang und -tiefe	7
1.3.5	Wirkungskategorien und Bilanzparameter	7
1.3.6	Normierung	8
1.4	Datenherkunft und -qualität	9
1.5	Verwendete Prozesse	9
1.6	Einschränkungen	10
2	SEGS-KOLLEKTOR	11
2.1	Bisherige Ökobilanzen	11
2.2	Bilanzierte Anlage	11
2.3	Ergebnisse	12
2.4	Einfluss zukünftiger Entwicklungen	17
3	FRESNEL-KOLLEKTOR	18
3.1	Bisherige Ökobilanzen	18
3.2	Bilanzierte Anlage	18
3.3	Ergebnisse	19
4	DSG-KOLLEKTOR	21
4.1	Bisherige Ökobilanzen	21
4.2	Bilanzierte Anlage	21
4.3	Ergebnisse	22
5	SEGS, FRESNEL UND DSG IM VERGLEICH	24
6	ZUKÜNFTIGER FORSCHUNGSBEDARF	26
7	LITERATUR	27
8	ANHANG	29
8.1	Inventardaten der bilanzierten Anlagen (SEGS, FRESNEL und DSG)	29
8.2	Rechenschema zum Ermitteln der Wirkungskategorien der SEGS-Anlage in Abhängigkeit von der Solarfeldgröße	33

1 Vorgehensweise

1.1 Ziele und Vorgehensweise bei der Bilanzierung

Die Erstellung der Ökobilanz wird mit drei Zielen verfolgt:

1. Zunächst werden für die drei solarthermischen Kollektortypen SEGS, FRESNEL und DSG Einzelanalysen erstellt. Damit ist es möglich, diejenigen Anlagenteile bzw. Lebenswegphasen zu identifizieren, die signifikant zum Gesamtergebnis beitragen. Da sich insbesondere FRESNEL und DSG noch im Entwicklungsstadium befinden, können hiermit Hinweise gegeben werden, wie die Anlagen aus Umweltsicht optimiert werden können.
2. In einem zweiten Schritt werden die drei Kollektoren untereinander verglichen, um Vor- oder Nachteile der jeweiligen Technologien herausstellen zu können.
3. Schließlich werden alle drei Anlagentypen mit zwei fossilen Konkurrenzsystemen verglichen, um die Umweltrelevanz eines Umstiegs von fossilen auf erneuerbare Energien zu verdeutlichen. Zum Vergleich wird der Strommix sowie ein modernes Erdgas-GuD-Kraftwerk gewählt.

Die Ökobilanzierung erfolgt in mehreren Schritten:

- In einem ersten Schritt wird ausgewertet, welche Ökobilanzen es von den drei betrachteten oder von ähnlichen Solarkraftwerken bereits gibt.
- Danach wird die konkrete zu bilanzierende Anlage inklusive der Herkunft der Daten beschrieben.
- Die Ökobilanz wird in Anlehnung an die ISO-Normen 14.040ff erstellt (siehe z.B. Guinée 2002), wobei die Verfahrensschritte wesentlich verkürzt werden. Die Stoff- und Energieflüsse werden mittels der Methodik der Stoffstromnetze modelliert, die in der Ökobilanzsoftware Umberto (IFEU und IFU 2003) implementiert ist; sie sind die Grundlage für die Sach- und Wirkungsbilanz. Die Wirkungsbilanz wird mit Hilfe des UBA-Verfahrens der Wirkungskategorien erstellt, das ebenfalls in Umberto implementiert ist. Als Ergebnis liegen erstmals „komplette“ Ökobilanzen (einschließlich Umweltwirkungsanalysen) für Solarkraftwerke vor.
- Die Ergebnisse der Wirkungsbilanz werden nach den verschiedenen Lebenswegphasen und nach einzelnen Bauteilen getrennt ausgewiesen, um detaillierte weitere Analysen zu ermöglichen.
- Schließlich werden zukünftige Entwicklungen aufgezeigt, die die Ergebnisse der Ökobilanz verändern könnten.

1.2 Das Stoffstromnetz der Solarkraftwerke

Die Ökobilanzierungssoftware Umberto[®] nutzt zur Erstellung von Ökobilanzen die Methodik der Stoffstromnetze, die dafür einen besonders flexiblen und leistungsfähigen Ansatz darstellen. Sie sind geeignet, für einen interessierenden Ausschnitt eines realen Systems Stoff- und Energieströme, die zwischen Systemelementen (z.B. innerhalb eines Produktionsprozesses oder eines Kraftwerks) bestehen, modellhaft nachzubilden. Die entsprechenden Input- und Outputströme bilden damit die Grundlage für die Aufstellung von Ökobilanzen. Abbildung 1.1 zeigt das im folgenden verwendete Modell zur Bilanzierung eines Solarkraftwerkes.

Stoffstromnetze bestehen aus drei Elementen: Transitionen, Stellen und Flüsse. *Transitionen* (dargestellt als Quadrate) geben Material- und Energieprozesse wieder (z.B. *T5:Betrieb_Solar* oder *T6:Dampfturbine/Generator* in Abbildung 1.1). Sie spielen eine zentrale Rolle in den Stoffstromnetzen, da von den in ihnen dargestellten Umwandlungsprozessen alle Stoff- und Energieflüsse abhängen. Ein weiteres Grundelement eines Stoffstromnetzes sind die *Stellen*, dargestellt als Kreise (z.B. *P18:Solarenergie*, *P10:Strom*). Stellen trennen die Transitionen voneinander ab und ermöglichen damit die Analyse der einzelnen Transition. *Flüsse* zeigen schließlich auf, welchen Weg Materialien und Energie zwischen Transitionen und Stellen nehmen. (Möller et al. 2001)

Stoffstromnetz Solarkraftwerke

Erstellt mit Umberto 4.2®

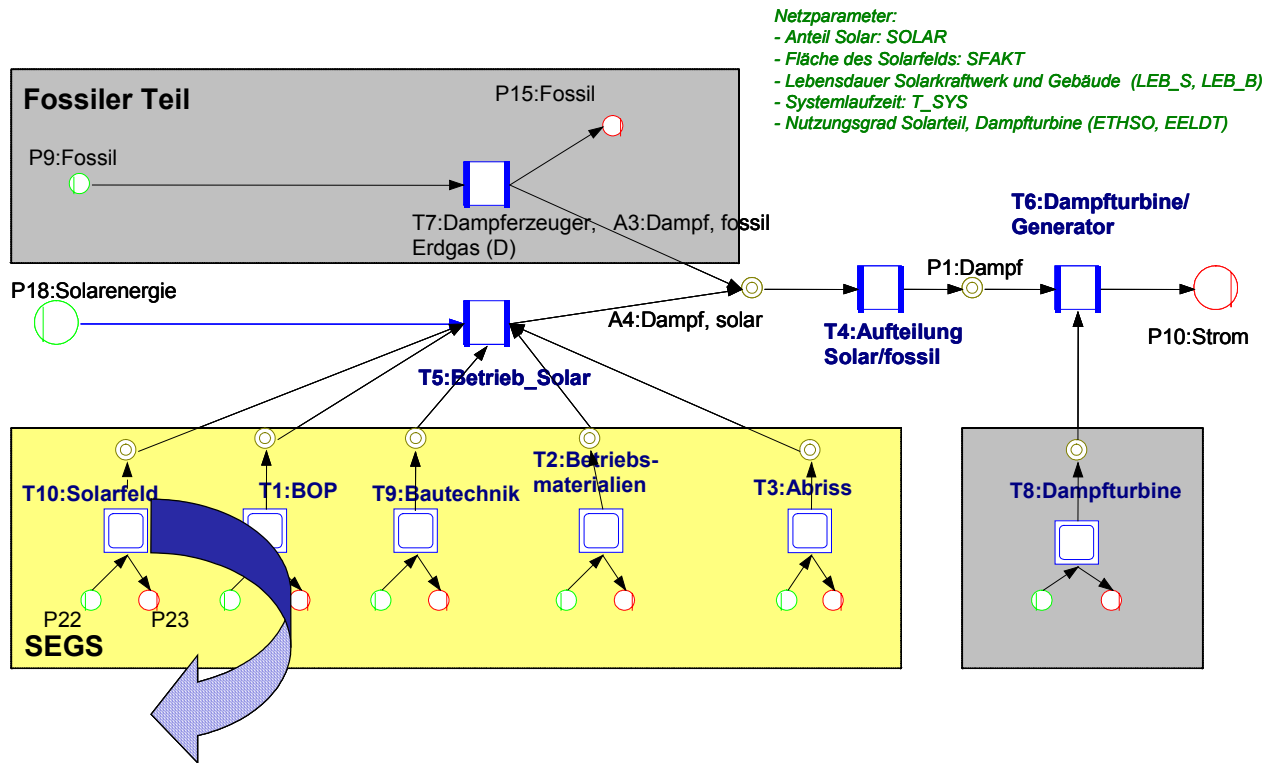


Abbildung 1.1: Modell eines Solarkraftwerkes in der Notation von Umberto®

Das oben dargestellte Modell eines Solarkraftwerkes zeigt den Weg der Stoffflüsse von der Input- zur Outputseite auf: Eine bestimmte Menge an Solarenergie fließt in die Transition *T5:Betrieb_Solar*, die den solaren Teil des Kraftwerks darstellt. Output aus dem Kraftwerksprozess ist Dampf, der von *T5* über die Stellen *P3* und *P1* in die Transition *T6:Dampfturbine/Generator* fließt. Output aus *T6* ist schließlich Strom, der in die Stelle *P10* geleitet wird. Zusätzlich zu diesen Energieflüssen sind jedoch weitere Inputflüsse in die Transitionen *T5* und *T6* dargestellt. Sie stellen die „Infrastruktur“, also die Herstellung der Kraftwerkstechnik dar. Hinter der Transition *T10:Solarfeld* verbergen sich beispielsweise alle Aufwendungen, die zum Bau des Solarfeldes nötig sind. Die benötigten Inputs werden dabei Stelle *P22* entnommen; die Emissionen werden in die Stelle *P23* geleitet. Aufgrund dieses modularen Aufbaus sind detaillierte ökologische Analysen einzelner Kraftwerksteile möglich.

Im oberen Teil des Bildes ist ein fossiler Dampferzeuger (Transition *T7:Dampferzeuger*) zu sehen, der zur Modellierung eines Hybridbetriebes über *T4:Aufteilung_Solar_Fossil* zugeschaltet werden kann. Da in den hier erstellten Bilanzen ein rein solarer Betrieb betrachtet wird, wird diese Möglichkeit hier jedoch nicht benötigt.

Die im unteren Teil des Bildes befindlichen Transitionen mit doppeltem Rand stellen eine weitere Charakteristik von Stoffstromnetzen dar: Jede Transition kann wiederum als eine Verallgemeinerung eines weiteren, detaillierteren Stoffstromnetzes (eines sogenannten *Subnetzes*) fungieren. Auf diese Weise kann eine hierarchische Struktur von beliebig ineinander verschachtelten Netzen entstehen. Die folgende Abbildung 1.2 zeigt beispielsweise die Verfeinerung der Transition *T10:Solarfeld*.

In der Transition *T2:Bau_Solarfeld* werden alle Materialien, die zum Bau des Solarfeldes benötigt werden, definiert. Für alle Materialien befinden sich auf der linken Seite die entsprechenden Vorketten. Sichtbar ist auch die Aufteilung der Materialien nach Herkunftsland. Diejenigen Materialien, die direkt in Marokko hergestellt werden, können mit eigenen Prozessen modelliert werden.

Ebene 2: Solarfeld

Erstellt mit Umberto 4.2®

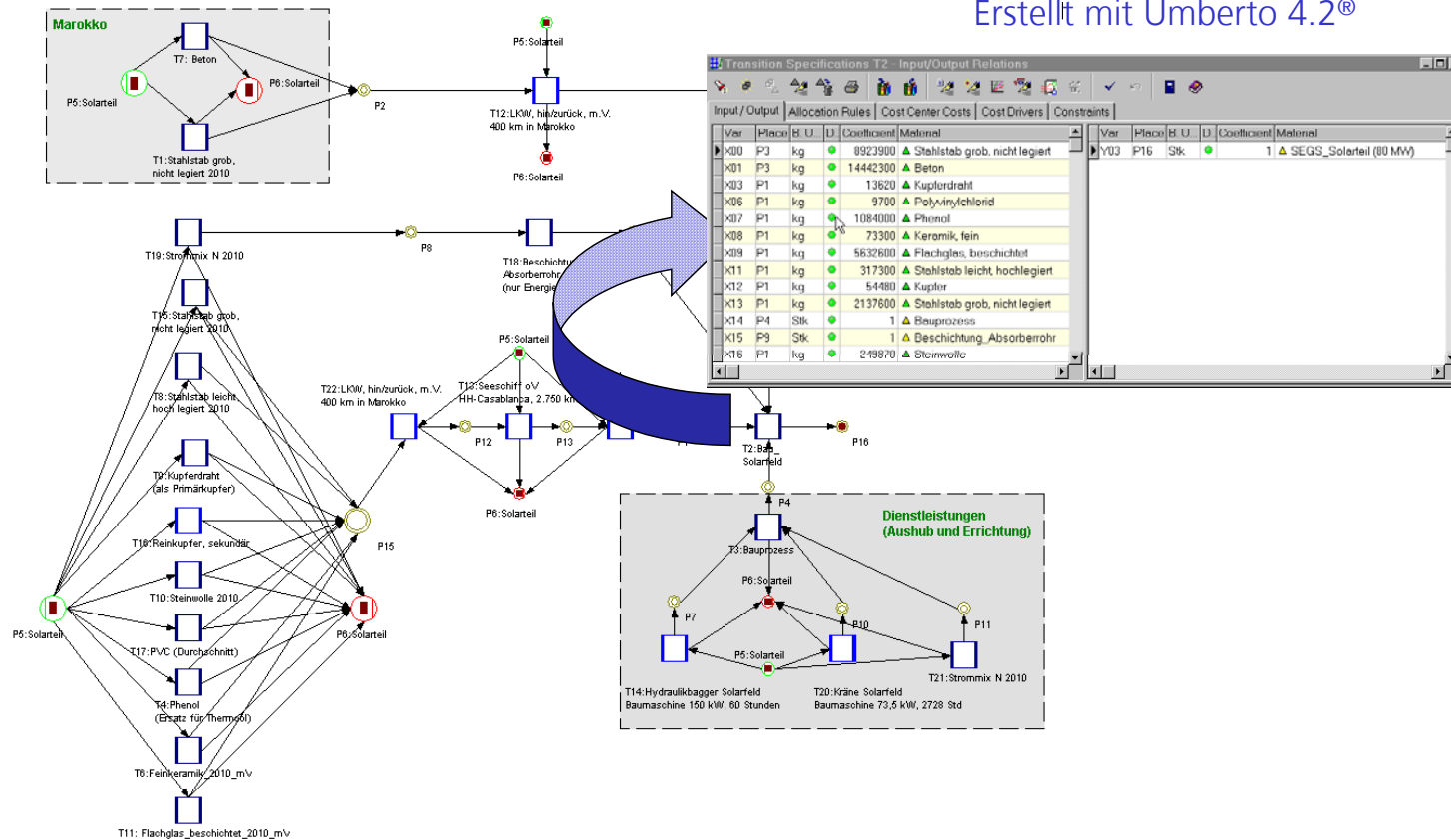


Abbildung 1.2: Zweite Netzwerkebene mit Subnetz T10 (Modellierung des Solarfeldes)

Das Modell ist derzeit auf eine Kraftwerksleistung von 80 MW ausgelegt. Über entsprechende Netzwerkparameter wie Direktnormalstrahlung, Solarfeldgröße oder Nutzungsgrad der Solaranlage können die verschiedensten Zustände modelliert werden. In einer zukünftigen Erweiterung werden auch flexible Leistungsgrößen möglich sein. Über die Parametersteuerung kann das Stoffstrommodell dann mit anderen Modellen wie STEPS gekoppelt werden, um so für beliebige Standorte Ökobilanzen der dort geplanten Kraftwerke ausgeben zu können.

1.3 Rahmen und Annahmen zur Durchführung der Ökobilanz

1.3.1 Gegenstand der Modellierung

Untersucht werden die Umweltwirkungen folgender solarthermischer Kraftwerke:

- SEGS-Parabolrinne mit LS-3 Kollektoren
- FRESNEL-Kollektor
- DSG-Kollektor

Alle Anlagen werden auf eine Leistung von 80 MW ausgelegt. Es ist weder eine fossile Zusatzfeuerung noch eine Speichereinheit vorgesehen; die Kühlung erfolgt mit einem Trockenkühlturm. Als Musterstandort wird Ain Beni Mathar in Marokko (34,17°N, 2,12°W) mit einer Direktnormalstrahlung (DNI) von 2.337 kWh/(m²,a) ausgewählt. Die konkrete Auslegung der Anlage sowie die Berechnung der Volllaststunden erfolgte von DLR Almeria mit dem Programm *greenius* mit der Vorgabe, dass alle Anlagen die gleiche Menge an Solarstrom erzeugen. Der variierende Parameter ist daher die Größe des Solarfeldes. Damit ist die Vergleichsmöglichkeit der Anlagen auch untereinander gewährleistet. Tabelle 1.1 zeigt die entsprechenden Auslegungsdaten¹.

Tabelle 1.1: Auslegungsdaten für die betrachteten Solarkraftwerke für den Standort Ain Beni Mathar (34.17°N, 2.12°W), DNI = 2.337 kWh/(m²,a) (Ergebnisse von *greenius*-Berechnungen)

	Apertur m ²	Leistung MW	Energieertrag MWh/a (netto)	eta _{th} Solarfeld %	eta System %
Fresnel	696.000	80	145.634	30,80%	9,00%
SEGS	469.245	80	145.261	41,90%	13,20%
DSG	412.020	80	145.372	46,90%	15,10%

1.3.2 Funktionelle Einheit

Die funktionelle Einheit beträgt 1 kWh_{el} frei Kraftwerksklemme. Diese Systemgrenze wurde bewusst gewählt, da die Stromverteilung durch erhebliche Datenunsicherheit gekennzeichnet ist. Da alle Anlagen auf den gleichen Standort normiert wurden, beeinträchtigt das Abschneiden an dieser Grenze nicht die Ziele der Ökobilanz.

1.3.3 Bezugsraum und -zeitraum

Bezugszeitraum für die Ökobilanz ist das Jahr 2010. Damit wird berücksichtigt, dass derzeit nur Pilotprojekte oder Projekte in der Entwicklungsphase existieren und eine Serienfertigung erst in einigen Jahren erfolgen wird. Die wichtigsten Prozesse wie Strommix, Stahlherstellung oder Aluminiumherstellung wurden auf dieses Jahr fortgeschrieben. Die Materialien werden getrennt je nach Herstellungsland für Marokko oder für Deutschland ausgewiesen. Tabelle 1.2 zeigt, welche Materialien in Marokko hergestellt werden.

¹ In der Auslegung sind Datenunsicherheiten von ca. 10% enthalten. Bei der FRESNEL- und der DSG-Anlage mussten einige Vereinfachungen getroffen werden. Speziell die höheren Parasitics durch die höhere Durchflussmenge bei DSG konnten nicht berücksichtigt werden, so dass sich der Nettoertrag noch deutlich ändern dürfte. (Quaschning 2003)

Tabelle 1.2: Anlagenteile, die im Standortland (Marokko) hergestellt werden

Anlagenteil	Bauteil	Material	Anteil in %
Solarfeld	Tragestruktur	Stahl, Beton	100
Dampferzeuger (nur SEGS)		Stahl, Keramik	50
Maschinenteknik	ND-Wärmetauscher, Entlüfter	Stahl	50
	Rohrleitungen, Pumpen	Stahl, PVC	50
Bautechnik	Gebäude	Stahl, Beton	100

Als Lebensdauer des Gebäudes wurden 60 Jahre, als Lebensdauer aller anderen Anlagen 30 Jahre angenommen. Als Systemlaufzeit wurden 30 Jahre angesetzt; in eine Bilanz über 30 Jahre gehen also das Gebäude zur Hälfte und alle anderen Anlagen voll ein.

1.3.4 Bilanzierungsumfang und -tiefe

Bilanziert werden die Lebenswegphasen Herstellung, Betrieb und Entsorgung. Innerhalb der *Herstellung* wird unterschieden zwischen dem Solarfeld und dem herkömmlichen Kraftwerksteil (Dampferzeuger, Maschinenteknik, Elektro- und Leittechnik, Bautechnik, Dampfturbine und Generator). Innerhalb des *Betriebes* werden diejenigen Stoffe modelliert, die beim Austausch oder bei der Reinigung anfallen. Die *Entsorgung* beinhaltet den Abriss der Anlage (bis auf den Gebäudeteil) und die Deponierung. Weiterhin sind *Dienstleistungen* wie Schiffs- und LKW-Transport oder Montage- und Demontearbeiten berücksichtigt.

Die *Systemgrenze* der Bilanzierung umfasst die Exploration, Förderung, Aufbereitung und Transport der Brennstoffe (insbesondere für den Strommix) einschließlich der Bereitstellung der hierzu erforderlichen Infrastruktur (Pipelines, Bauwerke usw.), die Herstellung der Solarkraftwerke inklusive der Bereitstellung der erforderlichen Materialien sowie den Energie- und Betriebsmitteleinsatz und die entstehenden Emissionen beim Betrieb und der Entsorgung.

Recycling wird im Sinne der ISO 14.041 bilanziert, d.h. es wird angenommen, dass das zu rezyklierende Material die Verwendung von primärem Material zu einem gewissen Prozentsatz („Recycling-Anteil“) ersetzen kann. Auf der Inputseite wird also ein Mix aus Primär- und Sekundärmaterialien verbucht. Für folgende Prozesse wurden Recycling-Anteile angenommen: Stahl 2010 (46%), Aluminium 2010 (85%) und Kupfer (80%).

1.3.5 Wirkungskategorien und Bilanzparameter

Zur Bewertung der Sachbilanz wird die nach ISO 14.042 vorgeschriebene Vorgehensweise der Wirkungskategorien bzw. ihre konkrete Ausgestaltung innerhalb des „UBA-Verfahrens“ ausgewählt. Das Verfahren ist vom Umweltbundesamt (UBA) entwickelt worden (UBA 1995, UBA 1999) und unter dem Namen „UBA-Methode“ in Umberto® implementiert. Die Auswahl der Sachbilanzparameter orientiert sich an den betrachteten Wirkungskategorien (Pehnt 2002).

Tabelle 1.3: In dieser Studie berücksichtigte Wirkungskategorien und Bilanzparameter

Wirkungskategorie	Bilanzparameter	Aggregierte Wirkungsparameter	Verhältnis
Ressourcenverbrauch	Kumulierter Energieaufwand (KEA)	MJ (Inventory Parameter)	
Treibhauseffekt ^a	CO ₂	g CO ₂ -Äquivalente	1
	CH ₄		21
	N ₂ O		310
Versauerung	SO ₂	mg SO ₂ -Äquivalente	1
	NO _x		0,7
	NH ₃		1,88
	HCl		0,88
Eutrophierung	NO _x	mg PO ₄ ³⁻ -Äquivalente	0,13
	NH ₃		0,33
Sommersmog (Photosmog)	NMHC	mg Ethen-Äquivalente	0,416
	CH ₄		0,007
Kanzerogenität Humantoxizität	Partikel und Staub	mg (Inventory Parameter)	
^a Zeithorizont 100 Jahre			

Zusätzlich zu den Wirkungskategorien wird der Verbrauch folgender nicht-energetischer Ressourcen in die Auswertung mit einbezogen: Eisen, Bauxit und Kupfer ab Entnahme aus der Lagerstätte.

1.3.6 Normierung

Zum Vergleich der Ökobilanzergebnisse mit konventionellen Konkurrenzsystemen wird als Referenz der Strommix 2010 (siehe auch Kapitel 1.5) gewählt. Außerdem wird zusätzlich noch ein modernes Erdgas-GuD-Kraftwerk betrachtet. Hierfür wird das gleiche GuD-Kraftwerk inklusive Vorkette und Infrastruktur ausgewählt, das im Stromnetz 2010 integriert ist (Wirkungsgrad 58%). Diese Technologie stellt zum Betrachtungszeitpunkt in den meisten Wirkungskategorien die umweltverträglichste Technologie der fossilen Stromerzeugung und daher auch die stärkste Konkurrenz dar (Pehnt 2004).

Tabelle 1.4 zeigt die zur Normierung herangezogenen Ergebnisse der Wirkungsabschätzung und der nicht-energetischen Ressourcenverbräuche für den Strommix 2010 und das Erdgas-GuD-Kraftwerk.

Tabelle 1.4: Vergleichswerte von Strommix 2010 und Erdgas-GuD-Kraftwerk (Pehnt 2004)

Wirkungskategorie	Einheit (pro kWh _{el})	Strommix 2010	Erdgas-GuD 2010
KEA erschöpflich	MJ	8,91	7,64
Treibhauseffekt	g CO ₂ -Äq.	565,66	422,4
Versauerung	mg SO ₂ -Äq.	1.083,36	392,2
Eutrophierung	mg PO ₄ ³⁻ -Äq.	59,91	68,17
Sommersmog	mg Et.-Äq.	18,54	21,12
Partikel und Staub	mg	67,23	21,1
nicht-energetische Ressourcenverbräuche	Einheit (pro kWh _{el})	Strommix 2010	Erdgas-GuD 2010
Eisen	g	2,62	1,137
Bauxit	g	0,05	0,0059
Kupfer	g	1,16	0,0129

1.4 Datenherkunft und -qualität

Für die SEGS-Anlage wurde auf Literaturdaten zurückgegriffen. Zur Modellierung der FRESNEL- und DSG-Anlagen wurden die Daten der SEGS-Anlage der jeweiligen Technologie angepasst. Für die FRESNEL-Anlage wurde das gesamte Solarfeld komplett neu bilanziert, wobei auf Primärdaten des Herstellers zurückgegriffen werden konnte. Während die Qualität der Herstellungsdaten als gut eingeschätzt wird, ist sie für die Entsorgungsphase sehr schlecht. Die konkrete Herkunft der Daten wird bei der jeweiligen Technologie beschrieben.

Eine Übersicht aller verwendeten Inventardaten kann Anhang 8.1 entnommen werden.

Grundsätzlich ist die Abschätzung umweltrelevanter Daten für regenerative Energiesysteme mit Unsicherheiten verbunden. Dabei bestehen allgemein folgende Qualitätsgradienten (Pehnt 2002):

- Energieverbrauchsdaten und Faktoren für verbrauchsabhängige Emissionen (insbesondere CO₂) sind belastbarer als Faktoren für verbrauchsunabhängige Emissionen;
- Faktoren für Emissionen aus der Herstellung der Infrastruktur sind weniger belastbar als etwaige Emissionen des Betriebes;
- Daten für die Infrastruktur der eigentlichen Kraftwerke sind belastbarer als die Daten der Infrastruktur vorgelagerter Energieketten (beispielsweise Erdgas-Bereitstellung);
- Daten für die Infrastruktur erneuerbarer Energiesysteme sind – da sie die oftmals einzigen Umweltwirkungen bedingen – belastbarer als für die Infrastruktur der fossilen Vergleichssysteme;
- Faktoren für limitierte Emissionen (z.B. NO_x, CO, Kohlenwasserstoffe) sind belastbarer als Faktoren für nicht limitierte Emissionen.

Die beim Vergleich der verschiedenen Technologien auftretenden Unterschiede in den Wirkungskategorien können als nicht signifikant angesehen werden, solange sie beim Energieverbrauch und beim Treibhauseffekt unter 5%, bei der Versauerung und der Eutrophierung unter 20% und für Partikel und Staub unter 30% bleiben.

1.5 Verwendete Prozesse

Zur Erstellung der Ökobilanzen wurden Prozessdatensätze aus Umberto[®] (IFEU und IFU 2003) sowie einige zusätzliche Prozesse aus der Schweizer Datenbank ecoinvent 2000 (ecoinvent Zentrum 2003) verwendet. Die auf 2010 bezogenen Module wurden in (Pehnt 2002) aus bestehenden Modulen weiterentwickelt; der „Strommix 2010“ wurde in (Pehnt 2004) neu erstellt. Im folgenden werden die für die Bilanzierung wichtigsten Module erläutert:

Strommix 2010

Die Systemgrenze dieses Moduls umfasst die Kraftwerksprozesse zur Stromerzeugung (mit Stein- und Braunkohle, Erd-, Koks- und Hochofengas, Biomasse, Atomkraft, Wasser- und Windkraft), die Brennstoffvorketten (Steinkohle, Braunkohle, Erdgas, Kokerei- und Hochofengas, Kernbrennelemente und Biomasse) sowie die Verteilung des Stroms bis zum Verbraucher mit entsprechenden Leitungs- und Umspannverlusten. Für den Strommix 2010 wurde die Entwicklung des Energieträgermixes und die mittleren Kraftwerksnutzungsgrade aus dem Referenzszenario der Enquete-Kommission „Nachhaltige Energieversorgung“ übernommen (Enquete 2002). Dies Szenario charakterisiert die „Business-as-usual-Entwicklung“ in Deutschland.

Stahl 2010

Die Module für unlegierten, niedrig-legierten und hoch-legierten Stahl wurden aus dem in Umberto[®] vorhandenen Stahlnetz entwickelt, indem Legierungselemente hinzugefügt sowie der Strommix 2010 verwendet wurde. Unabhängig von der Stahlsorte wurde die weltweite Recyclingquote (Schrottanteil) von 46% (BDSV 2002) verwendet.

Aluminium 2010

Als Referenzbilanz wird eine Ökobilanz der Primär- und Sekundäraluminium-Produktion der europäischen Aluminiumindustrie verwendet (Boustead 2000). Diese Studie ist für europäische Verhältnisse repräsentativ und wird hier um die Weiterverarbeitung von Halbzeugen erweitert (Corradini und Köhler 1999). Auf Bauteilebene werden in Deutschland 72% des Verpackungsaluminiums, 85% des Alumin-

ums im Bauwesen und 87% des Aluminiums in der Elektrotechnik recycelt (GDA und Aluminiumindustrie 2002). Für 2010 wird daher ein Recyclinganteil von 85% angesetzt.

Kupfer

Als Referenzbilanz für Primärkupfer wird ein entsprechendes Modul aus der Datenbank der Ökobilanzierungssoftware GaBi (PE und IKP 1998) verwendet. Sekundärkupfer wird aus Umberto[®] bezogen. Das Verhältnis der jährlich eingesetzten Menge an Sekundärkupfer zur gesamten Kupferproduktion liegt in Deutschland bei über 40%. Bauteilbezogen ist die Recyclingrate erheblich höher, da aufgrund wachsenden Kupferbedarfs der Verbrauch der letzten Jahre größer ist als der mögliche Rückfluss an Recyclingmaterial (DKI 1997). Da die konkreten Werte für Deutschland nicht bekannt sind, wird in Anlehnung an Recyclingraten in Japan (Ayres et al. 2000) für 2010 ein Recyclinganteil von 80% angesetzt.

Dienstleistungen

Für die SEGS-Anlage wurden verschiedene Dienstleistungen bilanziert, die auch für die FRESNEL- und die DSG-Anlage übernommen wurden. Dabei handelt es sich um Transporte mit LKW und Schiff und den Einsatz von Kränen und Hydraulikbaggern. Aus den Literaturdaten konnten die Eingabedaten für diese Prozesse nicht rekonstruiert werden, da nur die Enddaten wie die Transportleistung angegeben waren. Es wurde daher folgendermaßen vorgegangen:

- *Transporte:* Für alle aus Deutschland importierten Materialien wird vereinfacht ein Straßentransport über 400 km in Deutschland mit einem LKW größer 32 t angenommen. Ihm folgt ein Schiffs-transport mit einem Stückgutfrachter von Hamburg nach Casablanca (Marokko) über 2.750 km. Für sämtliche Materialien wird zudem ein Straßentransport in Marokko ebenfalls über 400 km und einem LKW größer 32 t angenommen. Der Anteil an Autobahn, Landstraße und Innerortsverkehr wurde für Marokko verändert. Die Transportleistung ergibt sich aus der Entfernung und des Gewichts der verwendeten Materialien. Für den Transport der zu entstehenden Materialien beim Abriss der Anlage wird entsprechend der Literaturdaten eine Entfernung von 100 km zur nächsten Recyclinganlage angenommen. Der Transport erfolgt mit einem LKW größer 32 t. Die zu transportierende Menge ergibt sich aus den Literaturdaten.
- *Kräne und Hydraulikbagger:* Für den Bau der Solaranlage und der Gebäude werden Hydraulikbagger und Kräne benötigt. Anhand des vorgegebenen Aushubs bzw. des veranschlagten Zeitaufwandes der Kräne wurden diese Dienstleistungen über das in Umberto[®] vorhandene Modul „Baumaschine“ modelliert, bei dem verschiedene Leistungsstufen eingestellt werden können. Dabei wurde der am weitesten verbreitete Typ (Direkteinspritzer ohne Aufladung) ausgewählt. Datengrundlage ist 1992.
- *Reinigung der Spiegel:* Für die Reinigung der Spiegel von SEGS- und DSG-Anlage wurde die neueste Technologie laut Literaturangaben verwendet, die mit einem speziellen Reinigungswagen und destilliertem Wasser arbeitet. Der Reinigungswagen wurde wiederum über das Modul „Baumaschine“ modelliert. Für die FRESNEL-Anlage wird der Stromverbrauch implementiert, der durch die Reinigung mittels Bürstenwalzen anfällt.

1.6 Einschränkungen

Die derzeitigen Bilanzen sind durchgehend mit Prozessmodulen berechnet, die die Situation in Deutschland oder in Europa widerspiegeln. Für die in Marokko hergestellten Materialien (siehe Tabelle 1.2) liegen bisher keine entsprechenden Prozessmodule vor. Die Grundtendenz der Aussagen wird sich dadurch jedoch nicht ändern, zumal nur ein Teil der Verbräuche in Marokko stattfindet. Die Umweltwirkungen dürften insgesamt leicht zunehmen.

2 SEGS-Kollektor

2.1 Bisherige Ökobilanzen

Bereits im Jahr 1997 wurden in vier verschiedenen Studien Materialbilanzen oder Ökobilanzen für solarthermische Anlagen erstellt.

Im Auftrag der BMW AG untersuchte das Wuppertal-Institut für Klima, Umwelt und Energie die „ökologischen Chancen und Risiken“ einer 80 MW-SEGS-Parabolrinnenanlage und verglich sie mit einem fossil befeuerten Kraftwerk (Lehmann et al. 1997). Angewendet wurde die im Wuppertal-Institut entwickelte MIPS-Methode (MIPS = Materialintensität pro Serviceeinheit). Mit diesem Verfahren werden sämtliche Materialverbräuche ermittelt, die sich während des Lebensweges einer Anlage ergeben (= Materialintensität) und auf eine funktionelle Einheit, z.B. die Gesamtleistung, bezogen (= Serviceeinheit). Im Unterschied zur Ökobilanz werden hier jedoch nur die Massenströme berechnet und keinerlei Emissions- oder Umweltwirkungsbilanzen erstellt. Die Arbeit basiert auf Originaldaten von Herstellern. Als eine wichtige Schlussfolgerung wurde festgehalten, dass die MIPS-Werte größerer solarthermischer Kraftwerke mit höheren Nennleistungen sich nicht wesentlich von denen der hier untersuchten 80 MW-Anlage unterscheiden, der Verbrauch an Baumaterialien (zumindest für das grundlegende Solarfeld) also proportional mit der Leistung ansteigt.

Kurze Zeit später entstand am Paul Scherrer Institut in der Schweiz eine Untersuchung der „Kosten, Treibhausgasemissionen und Verbräuche ausgewählter Ressourcen für verschiedene regenerative Energiequellen“, die mit entsprechenden Daten nicht-regenerativer Systeme verglichen wurden (Röder 1997). In der Studie wurden u.a. die SEGS-Parabolrinne, der Solarturm und die Dish-Stirling-Anlage betrachtet. Grundlage für die Bilanzierung waren die Ökoinventare (Frischknecht et al. 1996). Während die Datenqualität bei der Bilanzierung von Solarturm und Dish-Stirling-Anlage als ausreichend angesehen wurde, wird die Bilanzierung einer SEGS-Anlage als dürftig angegeben. Neben den Treibhausgasemissionen wurden keine weiteren Wirkungskategorien betrachtet und somit auch keine Ökobilanz erstellt.

Dieser Arbeit folgte eine Studie am Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen der Universität Stuttgart, in der „Materialbilanzen von Solarkraftwerken als Basis zur Lebenszyklusanalyse“ erstellt wurden (Reinhold 1997). Die Arbeit enthält detaillierte Beschreibungen und Zusammenstellungen von Materialverbräuchen, u.a. der drei oben erwähnten solarthermischen Anlagen zur Stromerzeugung. Abschätzungen hinsichtlich Umweltwirkungen sind nicht erstellt wurden. Die Daten basieren auf Herstellerangaben.

Aufbauend auf dieser Studie entstand schließlich am Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) der Universität Stuttgart eine detaillierte Bilanzierung der Stoff- und Energieströme einer 80 MW-SEGS-Parabolrinnenanlage und verschiedener Varianten eines PHOEBUS-Solarturmes (Böhnke 1997). In dieser Arbeit wurden mit Hilfe der am IER entwickelten Software *Balance* (IER 2002) das erste Mal Umweltwirkungsabschätzungen vorgenommen und einige Wirkungskategorien wie Treibhaus-, Versauerungs- und Eutrophierungspotenzial berechnet. Die meisten Daten basieren auf Herstellerangaben aus 1996. Als Ergebnis wurde festgehalten, dass der weitaus größte Teil der Emissionen beim Betrieb der Kraftwerke anfele, was jedoch auf die fossile Zufeuerung mit Erdgas zurückzuführen sei. Ein rein solarer Betrieb wurde nicht betrachtet. Innerhalb der Bauphase wurden die größten Belastungen beim Bau des Solarfeldes ermittelt, das alleine 80 Prozent der Emissionen (aus den Vorketten) verursache.

2.2 Bilanzierte Anlage

In dieser Studie wird eine Anlage vom Typ SEGS modelliert. Die Angaben zu Materialmengen und Dienstleistungen stammen aus (Böhnke 1997) und (Reinhold 1997), die wiederum auf Herstellerangaben aufbauen. Sie wurden aktualisiert und um aktuelle Recherchen wie z.B. zu neueren Techniken der Spiegelreinigung (Cohen et al. 1999) ergänzt. Die Originaldaten beziehen sich auf einen Standort im Südosten Marokkos mit einer Direktnormalstrahlung von $2.564 \text{ kWh}/(\text{m}^2, \text{a})$, einer Laufzeit von 2.340 Volllaststunden/a und einer Spiegelfläche von 495.770 m^2 . Sie wurden für diese Studie auf den „Musterstandort“ (siehe Kapitel 1.3.1) angepasst, indem das Inventar des Solarfeldes linear auf die benötigte Spiegelfläche von 469.245 m^2 skaliert wurde (siehe Kapitel 1.3.1).

2.3 Ergebnisse

Zur Beurteilung der Anlage wird die Verteilung ihrer Ressourcenverbräuche und Umweltwirkungen auf die einzelnen Lebenswegphasen untersucht. Auf der *Inputseite* werden die Verbräuche an Eisen, Bauxit und Kupfer als Rohstoffe in der Lagerstätte sowie der Kumulierte Energieverbrauch (KEA) dargestellt. Die *Outputseite* wird über die Umweltwirkungskategorien beschrieben. Die Lebenswegphasen teilen sich auf in *Herstellung* (Solarfeld, restliche Anlage (Dampferzeuger, Maschinenteknik und Elektro- und Leittechnik), Gebäude, Dampfturbine), *Betrieb* und *Entsorgung*. Die Ergebnisse sind dargestellt in Abbildung 2.1, Abbildung 2.2 (Auszug Solarfeld) und Abbildung 2.3 (Auszug Betrieb).

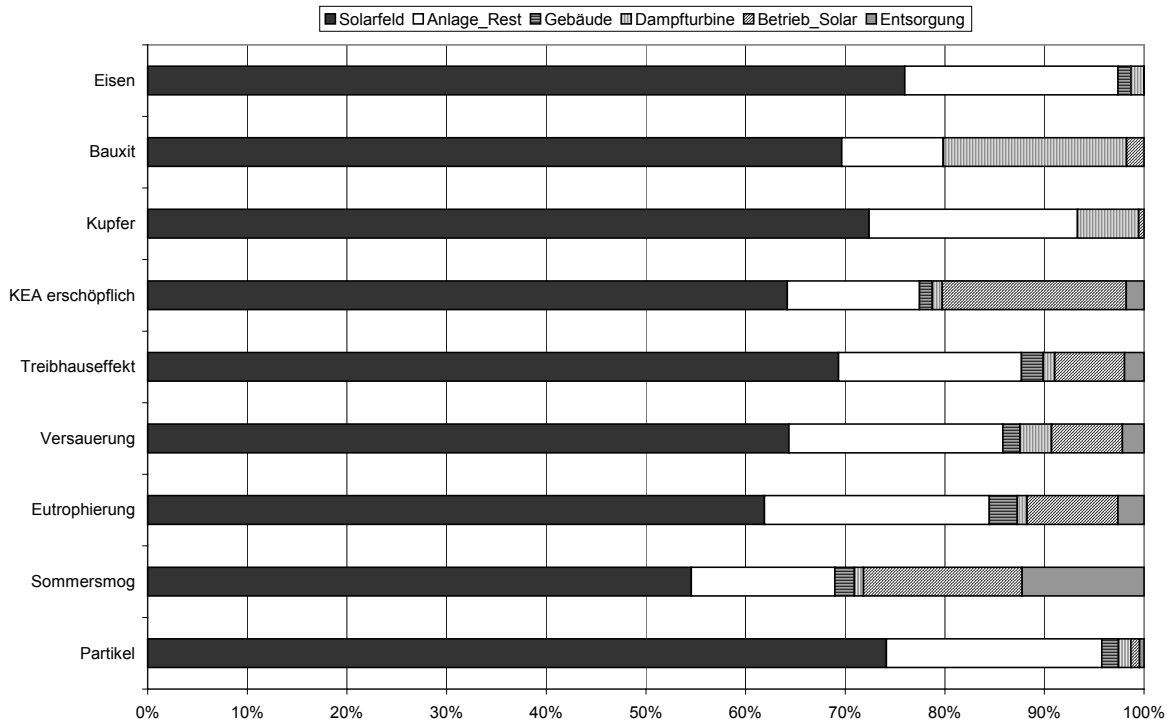


Abbildung 2.1: Zuordnung von Verbräuchen und Umweltwirkungen zu den Lebenswegphasen (SEGS)

Material- und Energieverbräuche

Die betrachteten *Materialinputs* (siehe Abbildung 2.1) fallen alleine beim Bau der Anlage an und betreffen zum überwiegenden Teil (70% bis 76%) die Herstellung des Solarfeldes, also den Aufbau der Tragestruktur, der Spiegel und der Rohrleitungen. Hier schlägt insbesondere der Eisenverbrauch für die Stahlträger, der Bauxitverbrauch für die Legierung von Edelstahl und der Kupferverbrauch für die Pumpen und Steuerleitungen zu Buche. Edelstahl geht zum größten Teil in das Absorberrohr, dem zentralen Element der Anlage, ein, das die reflektierte Sonnenenergie aufnimmt.

Neben dem Solarfeld wird der größte Verbrauch an Eisen und Kupfer beim Bau der restlichen Anlagenteile verbucht (je 21%). Eisen wird zum größten Teil für die Maschinenteknik (HTF-Erhitzer und Kühlturm), Kupfer für die Elektro- und Leittechnik (Transformator) benötigt. Bauxit wiederum hat seinen zweithöchsten Verbrauch bei der Herstellung der Dampfturbine (Legierung von Edelstahl).

Der *Kumulierte Energieaufwand* (KEA) entfällt zu einem großen Teil (64%) auf die Herstellung des Solarfeldes (hierzu tragen wesentlich die Herstellung von Stahl und Kupfer (55%), aber auch die Vorkette des Wärmeträgeröls Phenol mit alleine 24% bei, siehe Abbildung 2.2). Die Verbräuche der restlichen Anlage (13%) entfallen insbesondere auf die Maschinenteknik, verursacht von der Herstellung von Stahl, PVC und Beton. Hinzu kommen 18% aus dem Betrieb der Anlage (zu über 90% verursacht durch die Herstellung des Thermoöls, von dem jährlich 4% ersetzt werden muss, siehe Abbildung 2.3).

Emissionen

Die betrachteten *Emissionen* (siehe Abbildung 2.1) fallen zum großen Teil in der Bauphase an (55% bis 74% für das Solarfeld, zwischen 14% und 23% für „Anlage_Rest“). Ein nicht unerheblicher Teil von 7% bis 18% entfällt auf den Betrieb.

Der *Treibhauseffekt* wird zu 69% vom Bau des Solarfeldes verursacht (darin dominieren die CO₂-Emissionen bei der Herstellung von Stahl (70%) und Flachglas (11%)). 18% entstehen aus „Anlage_Rest“, 7% aus dem Betrieb.

Mit einer ähnlichen Verteilung folgt das *Versauerungspotenzial*, zu dem insbesondere die SO₂- und NO_x-Emissionen beitragen, sowie das *Eutrophierungspotenzial*. Bei beiden entfallen innerhalb des Solarfeldes etwa zwei Drittel auf die Stahlherstellung und zwischen 15% und 22% auf den Transport, insbesondere den Schiffstransport nach Marokko. Innerhalb des Betriebes verlagern sich die Belastungen: Rund 40% entfallen auf Reinigung und Transport, entsprechend weniger auf Phenol.

Die Wirkungskategorie *Sommersmog* wird zu 55% verursacht durch das Solarfeld (darin dominieren die Emissionen der Stahlherstellung zu 50%, des Phenols zu 20% und der Transportprozesse zu 15%). Neben dem Anteil der „Anlage_Rest“ von 14% fällt insbesondere der Anteil des Betriebes von 16% ins Gewicht, verursacht zu 80% durch die Herstellung des Phenols.

Die *Partikelemissionen* entstehen proportional zum Verbrauch an Stahl (74% für das Solarfeld und 22% bei der „Anlage_Rest“).

Thermoöl

Besonderes Augenmerk wurde auf die Umweltwirkungen des *Thermoöls* gelegt. Das verwendete Thermoöl Santotherm VP-1 der Firma Monsanto besteht laut Sicherheitsdatenblatt zu 73,5% aus Diphenyl und zu 26,5% aus Diphenyloxid (Monsanto 1996). Für diese beiden Stoffe lagen keine Ökobilanzen vor. Aufgrund seines ähnlichen Aufbaus wurde stattdessen Phenol verwendet (Böhnke 1997). Die Auswertung der Ökobilanz nach nur diesem Stoff ergab einen Anteil von 32% am Verbrauch erschöpflicher Energieträger (KEA), 24,6% am Sommersmog, 1% an den Partikeln und zwischen 8 und 9,5% bei den anderen Wirkungskategorien. Dabei entfällt etwa je die Hälfte auf die Herstellung des Solarfeldes und den Betrieb. Die Zahlen zeigen, dass das Thermoöl insbesondere hinsichtlich des KEA und des Sommersmogs eine nicht zu unterschätzende Belastung darstellt. Weiterhin sollte berücksichtigt werden, dass die gewählten Wirkungskategorien die Umweltbelastungen durch das Thermoöl nicht vollständig beschreiben, da z.B. die Wassergefährdung durch möglicherweise versickerndes Öl nicht berücksichtigt wird.

Die folgende Abbildung zeigt die Aufteilung innerhalb der Kategorien nur für das *Solarfeld* als Ausschnitt aus obiger Abbildung.

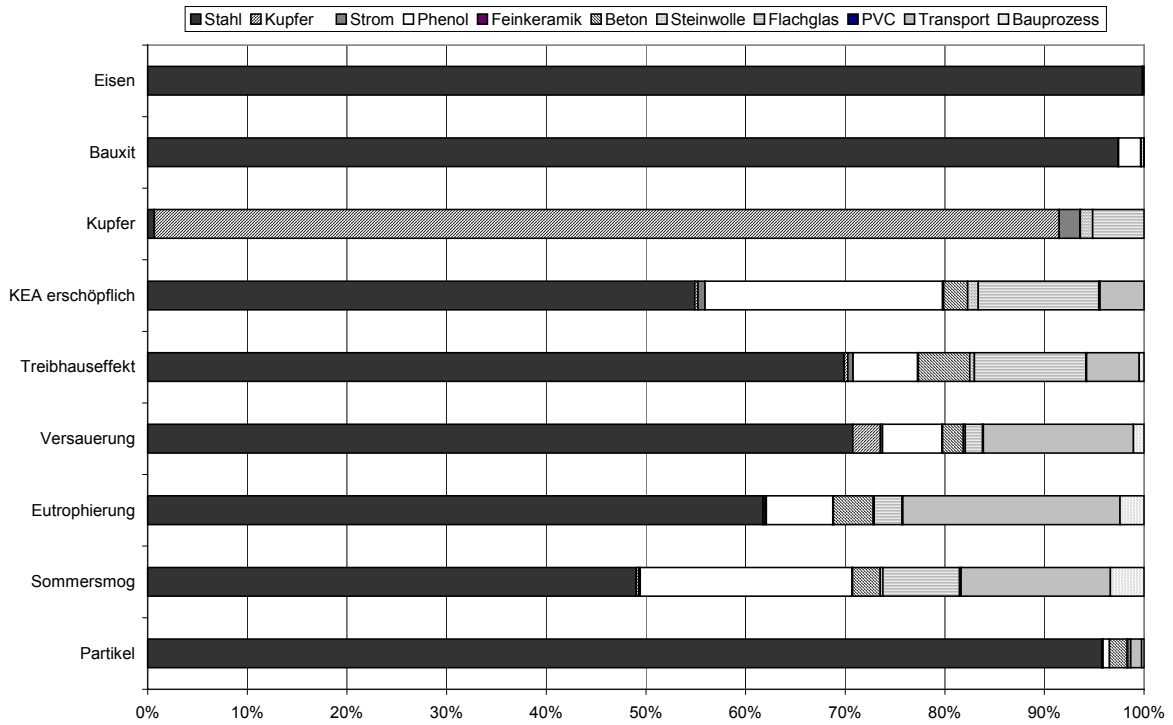


Abbildung 2.2: Zuordnung von Verbräuchen und Umweltwirkungen für das Solarfeld (SEGS)

Ebenso zeigt Abbildung 2.3 die Aufteilung innerhalb der Kategorien nur für den *Betrieb* als Ausschnitt aus Abbildung 2.1.

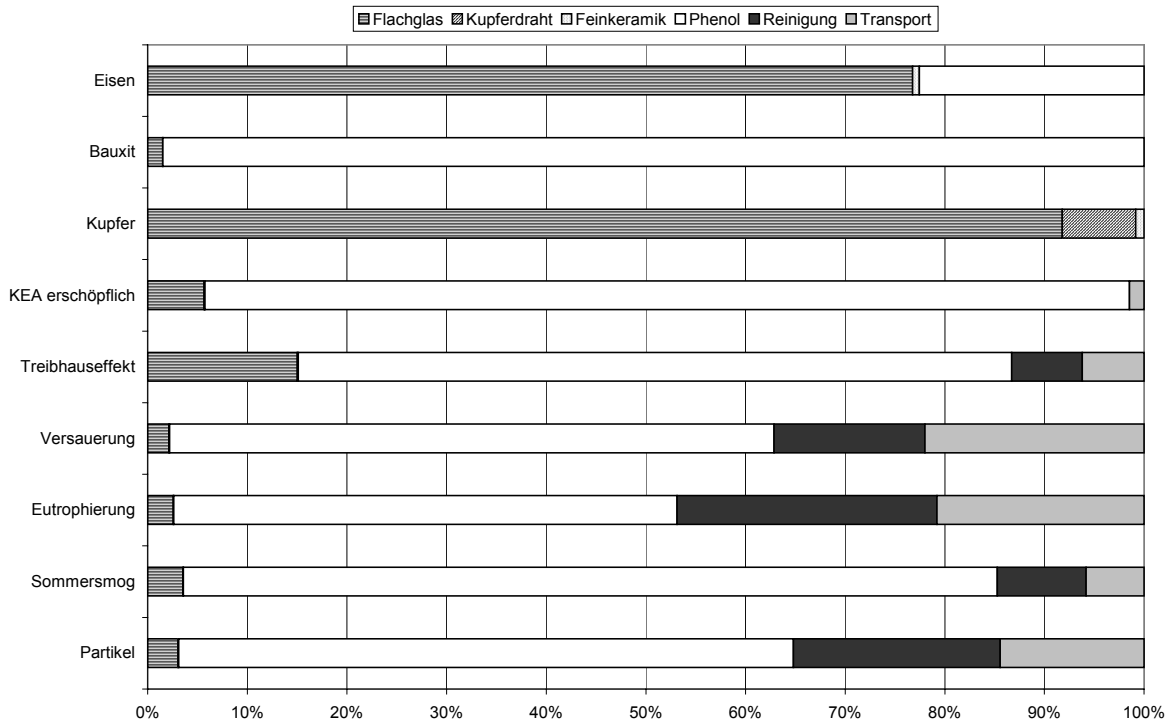


Abbildung 2.3: Zuordnung von Verbräuchen und Umweltwirkungen für den Betrieb (SEGS)

Tabelle 2.1 gibt die auf die an dem ausgewählten Standort erzeugte Strommenge bezogenen Werte wieder. Die drei Kraftwerksteile Dampferzeuger, Maschinentechnik und Elektro-/Leittechnik sind in der vorherigen Abbildung unter „Anlage_Rest“ zusammengefasst worden.

Tabelle 2.1: Verbräuche und Umweltwirkungen der einzelnen Lebenswegphasen pro erzeugte kWh Solarstrom (SEGS), Standort-DNI=2337 kWh/(m₂,a)

	pro kWh _{el}	Solarfeld	Dampf- erzeuger	Maschinen- technik	Elektro- Leittechnik	Gebäude	Dampf- turbine	Betrieb Solar	Entsor- gung	Summe
Eisen	g	2,66	0,18	0,54	0,03	0,05	0,05	0,00	0,00	3,50
Bauxit	g	0,0057	0,0000	0,0001	0,0007	0,0000	0,0015	0,0001	0,0000	0,0082
Kupfer	g	0,0045	0,0000	0,0001	0,0012	0,0000	0,0004	0,0000	0,0000	0,0062
KEA erschöpflich	MJ	0,1034	0,0039	0,0163	0,0011	0,0021	0,0016	0,0297	0,0029	0,16
Treibhauseffekt	g CO ₂ -Äq	8,46	0,41	1,73	0,10	0,27	0,14	0,85	0,24	12,20
Versauerung	mg SO ₂ -Äq	44,58	1,98	11,30	1,60	1,19	2,19	4,93	1,51	69,28
Eutrophierung	mg PO ₄ ³⁻ -Äq	3,52	0,18	1,07	0,04	0,16	0,06	0,52	0,15	5,69
Sommersmog	mg Ethen-Äq	1,19	0,04	0,26	0,02	0,04	0,02	0,35	0,27	2,19
Partikel	mg	29,78	1,96	6,39	0,33	0,67	0,51	0,35	0,18	40,17

Zusammenfassend werden die untersuchten Inputs und Outputs von folgenden Prozessen dominiert:

- Stahlproduktion
- Edelstahl für das Absorberrohr
- Phenolproduktion
- Spiegelreinigung
- Transportprozesse Deutschland/Marokko

Energetische Amortisationszeit

Neben den spezifischen Verbrauchs- und Emissionskennzahlen wird im folgenden auch die energetische Amortisationszeit ausgewiesen. Der auch Energie-Rückzahlzeit genannte Parameter besagt, nach welcher Zeit die in die Herstellung der Anlage eingegangene Primärenergie durch den Betrieb der Anlage wieder herausgeholt wird. Die energetische Amortisationszeit EAT berechnet sich nach folgender Formel:

$$EAT = \frac{KEA_H}{\left(\frac{E_{net}}{g} - KEA_B \right)} \text{ [a]}$$

wobei KEA_H der KEA zur Herstellung der Anlage bedeutet (MJ), E_{net} die jährlich erzeugte Nettoenergie (MJ/a), g der durchschnittliche Nutzungsgrad des bundesdeutschen Kraftwerksmixes (%) und KEA_B der KEA zum Betrieb der Anlage ist (MJ/a). Als Parameter g werden 31,4% verwendet. Dieser Wert wurde in (Gürzenich 2002) für Deutschland in einer Studie angesetzt, in der der KEA von Fotovoltaikanlagen verschiedener europäischer Herkunft verglichen wurde.

Tabelle 2.2 zeigt, dass sich die bei der SEGS-Anlage anfallende Primärenergie nach 4,5 Monaten bereits amortisiert hat.

Tabelle 2.2: Energetische Amortisationszeit der SEGS-Anlage

	Wert	Einheit
KEA _H	570.118.739	MJ
KEA _B	129.065.051	MJ/a
E _{net}	521.116.468	MJ/a
g	31,40%	
EAT	0,37	a
EAT	4,5	mon

Sensitivitätsanalyse über die Strahlungsintensität

Die Bedeutung des Solarfeldes für die ökologische Analyse wird auch durch eine Sensitivitätsanalyse über verschiedene Standorte deutlich. Von DLR Almeria wurden hierfür mit dem Programm *greenius* Standorte mit unterschiedlicher DNI berechnet. Dabei galt wiederum die Vorgabe, dass alle Anlagen die gleiche Menge an Solarstrom erzeugen und die Gesamtleistung von 80 MW_{el} nicht verändert wird. Der variierende Parameter ist damit die Größe des Solarfeldes. Tabelle 2.3 zeigt die entsprechenden Auslegungsdaten.

Tabelle 2.3: Auslegungsdaten für ein SEGS-Solarkraftwerk an Standorten unterschiedlicher Strahlungsintensität (Ergebnisse von *greenius*-Berechnungen)

Standort	DNI kWh/m ² ,a	Apertur m ²	Energieertrag MWh/a (netto)	Nutzungsgrad SF %
Batna, Algeria, 1996, 35.5°N 6.17°E	2.140	629.475	145.815	38,5
Batna, Algeria, 1997, 35.5°N 6.17°E	2.212	572.250	145.971	40,1
Ain Beni Mathar 1996 34.17°N 2.12°W	2.337	469.245	145.261	41,9
El Aricha, Algeria 1996, 34.25°N, 1.17°E	2.401	460.075	145.457	41,9
Ain Beni Mathar 1997 34.17°N 2.12°W	2.453	425.100	145.733	43,0
El Aricha, Algeria 1997, 34.25°N, 1.17°E	2.547	408.750	145.733	43,1
Südosten Marokkos (nach Böhnke 1997)	2.564	495.770	189.783	48,0
Hurgada, Egypt 27.14°N, 33.51°E	2.782	333.540	145.567	48,6
Luxor.Egypt 25.40°N 32.42°E	2.975	302.475	145.402	50,3
Keetmanshoop, Namibia 26.34°S, 18.07°E	3.050	317.190	145.360	46,6

Für diese zehn Standorte wurde mit dem gleichen Modell jeweils eine Ökobilanz berechnet und die Ergebnisse über die Strahlungsintensität aufgetragen. Abbildung 2.4 zeigt dies für zwei Wirkungskategorien, den *Verbrauch erschöpflicher Energieträger* und den *Treibhauseffekt*. Die Abhängigkeit der Ergebnisse von der Strahlungsintensität sind deutlich sichtbar. Da die restlichen Komponenten des Solarkraftwerks unverändert blieben, ergeben sich die unterschiedlichen Daten alleine aufgrund der unterschiedlichen Solarfeldgröße. Einer Variation der DNI zwischen 2.000 und 3.000 kWh/m²,a stehen Veränderungen des „KEA, erschöpflich“ von 0,20 bis 0,12 MJ/kWh_{el} und des Treibhauseffektes von 15 bis 9 g CO₂-Äquivalente pro kWh_{el} gegenüber. Während die DNI also um 50% ansteigt, sinken die Umweltwirkungen um etwa 40%.

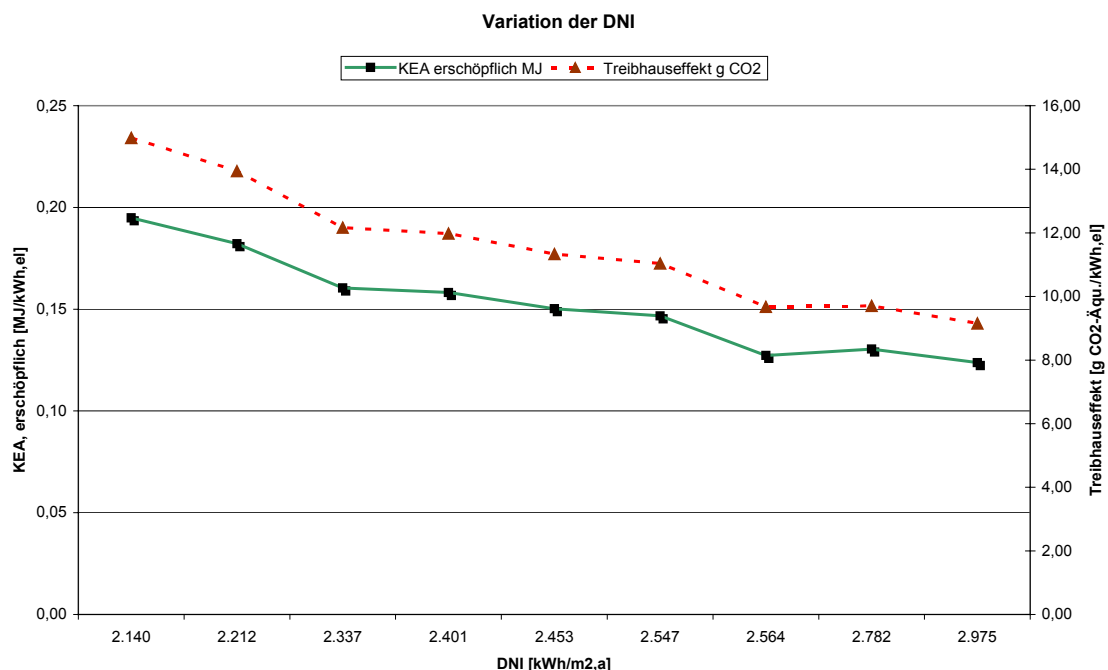


Abbildung 2.4: Wirkungskategorien „KEA, erschöpflich“ und „Treibhauseffekt“ für ein SEGS-Solarkraftwerk an Standorten unterschiedlicher Strahlungsintensität

Variationsrechnungen

Bei den bisherigen Rechnungen wurden die Netto-Leistung des Solarkraftwerks sowie die erzeugte Strommenge konstant gehalten und nur das Solarfeld variiert. Die Berechnung der Wirkungskategorien ist damit relativ einfach, da nur die auf das Solarfeld bezogenen Ergebnisse linear verändert werden müssen. Will man jedoch Variationsrechnungen für komplette Kraftwerke durchführen, müssen unterschiedliche Skalierungsfaktoren (z.B. für die Maschinenteknik, die Gebäude, die Dampfturbine u.s.w.) beachtet werden.

In Anhang 8.2 wird für diese Fälle ein Berechnungsschema zur Verfügung gestellt, mit dem sämtliche Wirkungskategorien für unterschiedliche Kraftwerksauslegungen ermittelt werden können. Sie bauen auf den in Tabelle 2.1 ermittelten Resultaten für den Referenzfall auf. Variiert werden können damit

- die Systemlaufzeit T_{SYS}
- der Gesamtnutzungsgrad η_{sys}
- die Kraftwerksleistung P
- die Solarfeldgröße SF
- die Strahlungsintensität DNI

Tabelle 2.4 zeigt die verwendeten Skalierungsfaktoren (nach Reinhold 1997):

Tabelle 2.4: Skalierungsfaktoren für die Modellierung von Solarkraftwerken

Komponente	Skalierungsfaktor
Solarfeld	1
Dampferzeuger	0,8
Maschinenteknik	0,9
Elektro-/Leittechnik	0,7
Gebäude	0,1
Dampfturbine	0,7
Entsorgung	1

2.4 Einfluss zukünftiger Entwicklungen

Im Hinblick auf die dargestellten Verbräuche und Umweltwirkungen dürfte insbesondere ein verringerter Stahlverbrauch zu einer Verbesserung der Umweltbilanz beitragen: Im EU-Projekt EuroTrough wurde die Tragestruktur des Spiegelfeldes optimiert, so dass der Stahlverbrauch vermindert werden kann (Geyer et al. 2000). Damit verbessern sich der KEA sowie alle Wirkungskategorien, die vom Verbrauch an Stahl beeinflusst werden.

Ein Ersatz des Thermoöls trägt nach den Ergebnissen dieser Ökobilanz insbesondere beim Verbrauch erschöpflicher Energieressourcen und beim Sommersmog zur Umweltverbesserung bei. Da die Umweltwirkungen des Öls (Mischung aus Diphenyl und Diphenyloxid), wenn es in die Umwelt gelangt, erheblich sind („sehr giftig für Wasserorganismen“, „Wassergefährdend WGK 2“, „Anreicherung in der Nahrungskette des Menschen“, „Meeresschadstoff“ laut Rebmann 2004), sollt ein Ersatz schon alleine aus diesen Gründen angestrebt werden.

3 FRESNEL-Kollektor

3.1 Bisherige Ökobilanzen

Für einen FRESNEL-Kollektor liegen bisher keine Ökobilanzen vor. Es kann jedoch auf den bisherigen Berechnungen und Bilanzen für die SEGS-Anlage aufgebaut werden, da die wesentlichen Änderungen nur das Solarfeld betreffen.

3.2 Bilanzierte Anlage

Der eigentliche Unterschied einer FRESNEL- zu einer SEGS-Anlage liegt im Aufbau des Solarfeldes. Daher wurde das Solarfeld für den FRESNEL-Kollektor komplett neu bilanziert. Die Dienstleistungen (Transporte, Aushub, Kranarbeiten) wurden von der SEGS-Anlage übernommen, ebenso wie alle anderen Anlagenteile. Dies betrifft die Maschinenteknik (ohne den HTF-Erhitzer), die Elektro- und Leittechnik, die Gebäude, der Spiegeleratz im laufenden Betrieb und die Entsorgung. Dies ist gerechtfertigt, da es sich bei allen Anlagen um Dampfkraftwerke handelt und sie auf die gleiche Leistung von 80 MW normiert wurden (vergleiche Kapitel 1.3.1).

Die Angaben zum Solarfeld stammen vom Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE) (Morin 2003), die teilweise auf dem Masterplan von Solarmundo für ein Solarfeld der Größe von 304.100 m² aufbauen, teilweise neu recherchiert wurden. Wie bei der SEGS-Anlage wurden die Daten für diese Studie schließlich auf den „Musterstandort“ angepasst, indem das Inventar des Solarfeldes linear auf die benötigte Spiegelfläche von 696.000 m² skaliert wurde (siehe Tabelle 1.1).

Gegenüber der SEGS-Anlage ergeben sich die folgenden Änderungen (die angegebenen Verhältnisse beziehen sich auf die Leistung der Referenzanlage):

Solarfeld

- Der Nutzungsgrad des Solarfeldes verringert sich um etwa 26% gegenüber der SEGS-Anlage, so dass eine erheblich größere Solarfläche benötigt wird, um die gleiche Leistung zu erzeugen (siehe Tabelle 1.1).
- Für den Absorber der FRESNEL-Anlage wird etwa das 12-fache an Stahl wie bei der SEGS-Anlage benötigt. Statt Edelstahl wird jedoch niedrig-legierter Stahl verwendet. An Flachglas wird für den Absorber etwa die 3,5-fache Menge verbucht.
- Für die Tragestruktur benötigt die FRESNEL-Anlage die 2,7-fache Menge an Stahl, wogegen der Bedarf an Beton nur um das 1,3-fache wächst.
- Aufgrund der anderen Konstruktion der FRESNEL-Anlage werden erheblich weniger Rohrleitungen zwischen den einzelnen Spiegelsegmenten benötigt. Statt 100 Meter langen Segmenten müssen hier nur 1.000 Meter lange Segmente verbunden werden. Damit wird der Verbrauch an Stahl und Isoliermaterial um jeweils 80% verringert.
- Der Bodenaushub wird um die Hälfte verringert, da für einen Quadratmeter SEGS-Spiegelfläche das dreifache an Grundfläche benötigt wird. Die FRESNEL-Anlage benötigt etwa die gleiche Fläche Land im Vergleich zur Spiegelfläche, braucht jedoch etwa 70% mehr Kollektorfläche pro erzeugte Leistung). Der verringerte Aushub vermeidet auch 50% der Emissionen, die durch den Hydraulikbagger verursacht werden.
- Statt des Wärmeträgermediums Thermoöl wird Wasser(dampf) verwendet.
- Durch den Entfall des Thermoöls fallen weiterhin die Pumpen für das HTF weg.

Konventioneller Teil

- Statt des Wärmeträgermediums Thermoöl wird Wasser verwendet. Durch die Sonneneinstrahlung entsteht dadurch auf direktem Wege Dampf, so dass kein Dampferzeuger (bei der SEGS-Anlage als Teil der „restlichen Anlage“ modelliert) benötigt wird.

Betrieb

- Für die Reinigung werden statt eines Reinigungsfahrzeuges Bürstenwalzen, ähnlich denen einer Autowaschanlage, angenommen. Diese werden mit Strom betrieben.
- Durch die erheblich höhere Kollektorfläche steigen bei gleicher Austauschrate auch die Anzahl der auszutauschenden Spiegel sowie die Reinigungsmaterialien an.
- Durch den Entfall des Thermoöls brauchen auch die Thermoölverluste von jährlich 4% nicht mehr ausgeglichen werden.

3.3 Ergebnisse

Die im vorherigen Abschnitt dargestellten Änderungen gegenüber der SEGS-Anlage haben entsprechende Auswirkungen auf Verbräuche und Umweltwirkungen der FRESNEL-Anlage. Insbesondere die höheren Verbräuche an Stahl werden in allen Auswertungen sichtbar (Abbildung 3.1 und Tabelle 3.1).

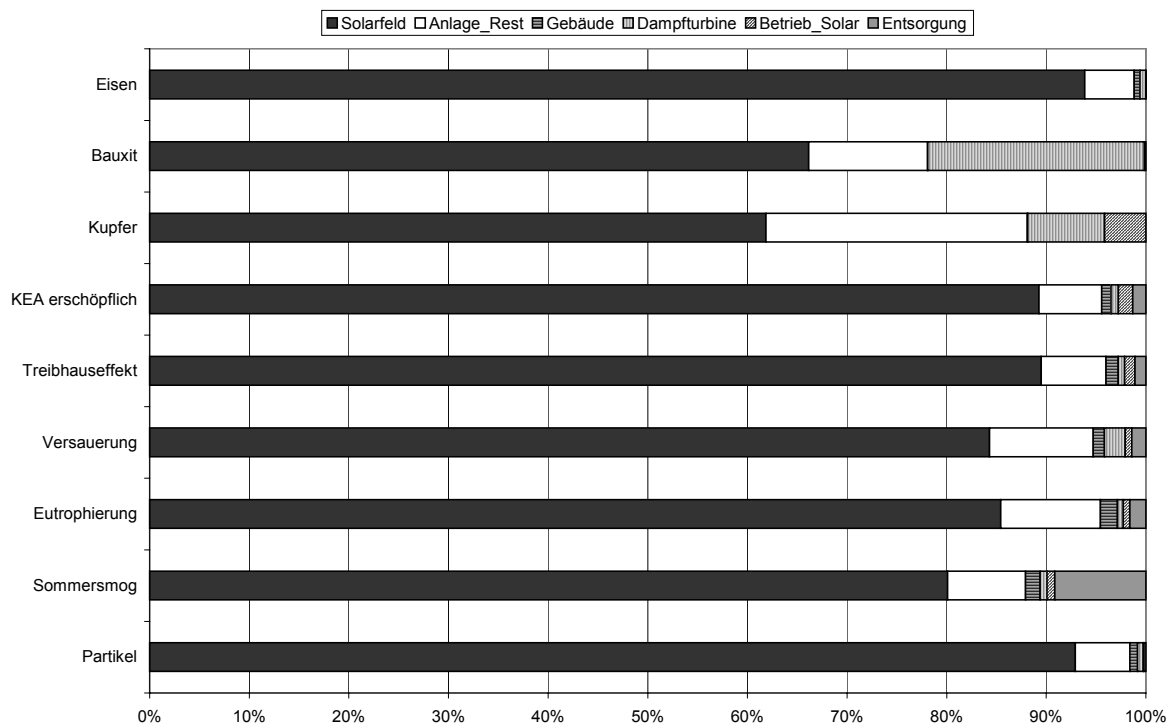


Abbildung 3.1: Zuordnung von Verbräuchen und Umweltwirkungen zu den Lebenswegphasen (FRESNEL)

Material- und Energieverbräuche

Auf der *Inputseite* (siehe Abbildung 3.1) steigen die Anteile des Solarfeldes beim Verbrauch an Eisen auf über 90% sowie beim KEA auf knapp 90% an, verursacht durch den oben beschriebenen höheren Verbrauch an Stahl auf der einen Seite und den Wegfall des Dampferzeugers (unter „Anlage_Rest“ verbucht) auf der anderen Seite. Aber auch die absoluten Werte (siehe Tabelle 3.1) steigen an, beim Eisenverbrauch um mehr als das doppelte und beim KEA um 34%. Der Anteil des Bauxits dagegen geht beim Solarfeld auf 66% zurück, verursacht durch den Ersatz des Edelstahls durch niedriglegierten Stahl. Ebenso geht der Anteil des Kupfers auf 62% zurück, verursacht durch den Wegfall der Kupfer enthaltenen Pumpen für das Thermoöl. Die absoluten Werte von Bauxit und Kupfer sinken um etwa ein Fünftel. Aufgrund der Dominanz des Stahlverbrauchs fällt der Ersatz des Thermoöls beim KEA nicht ins Gewicht.

Emissionen

Bei sämtlichen *Wirkungskategorien* (siehe Abbildung 3.1) steigt der Anteil des Solarfeldes auf 80% – 93% an. Verursacht wird dies einerseits durch den oben beschriebenen zusätzlichen Verbrauch an Stahl für das Solarfeld. Andererseits gehen sowohl die Anteile der restlichen Anlage als auch des Betriebes zurück. Bei ersterer fällt der Dampferzeuger weg. Beim Betrieb nehmen die NO_x-Emissionen ab, da einerseits ein anderes Reinigungskonzept vorliegt, das ohne Diesel betriebenes Fahrzeug auskommt, andererseits das Thermoöl wegfällt, das insbesondere zum Sommersmog beigetragen hat.

Wie Tabelle 3.1 zeigt, steigt der Anteil des Solarfeldes jedoch nicht nur relativ gesehen an, sondern – bis auf den Bauxit- und den Kupferverbrauch – auch absolut. In der Summe hat die FRESNEL-Anlage dadurch zum Teil erheblich schlechtere Werte als die SEGS-Anlage zu verzeichnen.

Tabelle 3.1: Verbräuche und Umweltwirkungen der einzelnen Lebenswegphasen pro erzeugte kWh Solarstrom (FRESNEL), Standort-DNI=2337 kWh/(m₂,a)

		Solarfeld	Anlage_Rest	Gebäude	Dampfturbine pro kWh _{el}	Betrieb_Solar	Entsorgung	Summe	Vergleich mit SEGS
Eisen	g	7,28	0,39	0,05	0,04	0,00	0,00	7,76	222%
Bauxit	g	0,0045	0,0008	0,0000	0,0015	0,0000	0,0000	0,0069	84%
Kupfer	g	0,0030	0,0013	0,0000	0,0004	0,0002	0,0000	0,0049	78%
KEA erschöpflich	MJ	0,19	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,22	134%
Treibhauseffekt	g CO ₂ -Äq	19,39	1,41	0,26	0,14	0,23	0,24	21,66	178%
Versauerung	mg SO ₂ -Äq	87,90	10,84	1,17	2,17	0,68	1,49	104,25	150%
Eutrophierung	mg PO ₄₃ -Äq	7,92	0,93	0,16	0,05	0,06	0,15	9,27	163%
Sommersmog	mg Ethen-Äq	2,32	0,23	0,04	0,02	0,02	0,26	2,90	132%
Partikel	mg	80,58	4,76	0,66	0,50	0,04	0,18	86,73	216%

Energetische Amortisationszeit

In Tabelle 3.2 wird die energetische Amortisationszeit der FRESNEL-Anlage hergeleitet. Sie ist mit 6,7 Monaten etwa 50% länger als bei der SEGS-Anlage, was sich durch den höheren Energieverbrauch, verursacht durch die größere Menge an Stahl, bedingt.

Tabelle 3.2: Energetische Amortisationszeit der FRESNEL-Anlage

	Wert	Einheit
KEA _H	932.800.295	MJ
KEA _B	13.615.990	MJ/a
E _{net}	527.002.848	MJ/a
g	31,40%	
EAT	0,56	a
EAT	6,7	mon

4 DSG-Kollektor

4.1 Bisherige Ökobilanzen

Für einen DSG-Kollektor liegen bisher keine Ökobilanzen vor. Es kann jedoch – wie beim FRESNEL-Kollektor – auf den bisherigen Berechnungen und Bilanzen für die SEGS-Anlage aufgebaut werden, da die wesentlichen Änderungen nur das Solarfeld betreffen.

4.2 Bilanzierte Anlage

Kollektoren vom Typ „DSG“ entsprechen im Prinzip denjenigen einer SEGS-Anlage, nur dass statt dem Wärmeträgermedium Thermoöl (heat transfer fluid, HTF) hier Wasserdampf verwendet wird. Dies hat entsprechende Änderungen des Aufbaus des Solarfelds und der Maschinenteknik zur Folge. Die Dienstleistungen (Transporte, Aushub, Kranarbeiten) wurden von der SEGS-Anlage übernommen, ebenso wie alle anderen Anlagenteile (bis auf die Maschinenteknik). Dies betrifft die Elektro- und Leittechnik, die Gebäude, der Spiegeleratz im laufenden Betrieb und die Entsorgung. Dies ist gerechtfertigt, da es sich bei allen Anlagen um Dampfkraftwerke handelt und sie auf die gleiche Leistung von 80 MW normiert wurden (vergleiche Kapitel 1.3.1).

Die Datengrundlagen für die bei der DSG-Anlage zu berücksichtigenden Änderungen stammen aus Eck 2003 und Zarza 2001. Wie bei der SEGS-Anlage wurden die Daten für diese Studie schließlich auf den „Musterstandort“ angepasst, indem das Inventar des Solarfeldes linear auf die benötigte Spiegelfläche von 412.020 m² skaliert wurde (siehe Tabelle 1.1).

Gegenüber der SEGS-Anlage ergeben sich die folgenden Änderungen (bezogen auf die Leistung der Referenzanlage):

Solarfeld

- Der Nutzungsgrad des Solarfeldes erhöht sich gegenüber der SEGS-Anlage um 5-15%, so dass eine geringere Solarfläche benötigt wird, um die gleiche Leistung zu erzeugen. In der modellierten 80 MW-Anlage steigt der Nutzungsgrad um 12% (siehe Tabelle 1.1).
- Für den Absorber der DSG-Anlage wird aufgrund stärkerer Rohre etwa das 1,8-fache an Stahl als bei der SEGS-Anlage benötigt. Statt hoch-legiertem Stahl wird allerdings niedrig-legierter Stahl eingesetzt, was erhebliche Umweltverbesserungen mit sich bringt. Da sich der Außendurchmesser der Rohre nicht verändert, wird die gleiche Menge an Flachglas verbucht.
- Für die Tragestruktur wurde keine Anpassung vorgenommen, da sie auf Windlasten ausgelegt ist, die weit höher als das stärkere Gewicht der veränderten Absorberstruktur sind.
- Die Rohrleitungen der DSG-Anlage haben ebenfalls eine stärkere Wand als bei der SEGS-Anlage, so dass sich auch hier der Stahlverbrauch um das 1,8-fache erhöht. Da sich der Außendurchmesser der Rohre wiederum nicht verändert, wird die gleiche Menge an Isoliermaterial verbucht.
- Statt des Wärmeträgermediums Thermoöl wird Wasser(dampf) verwendet, so dass ebenfalls die Pumpen für das HTF wegfallen.
- Der Bodenaushub wird in Höhe des verbesserten Nutzungsgrades verringert, da entsprechend weniger Kollektoren und damit weniger Aufstellfläche benötigt wird.

Konventioneller Teil

- Durch die Sonneneinstrahlung wird das verwendete Wasser auf direktem Wege zu Dampf umgewandelt, so dass kein Dampferzeuger (bei der SEGS-Anlage als Teil der „restlichen Anlage“ modelliert) benötigt wird.
- Für die DSG-Anlage wird ein Ausgleichsbehälter benötigt, in dem sich nachts das abgekühlte Wasser sammeln kann. Vereinfacht wurde ein druckloser Behälter mit einem Volumen angenommen, das dem Volumen der Absorberrohre zuzüglich der Verbindungsleitungen entspricht.

Betrieb

- Durch den Entfall des Thermoöls brauchen auch die Thermoölverluste von jährlich 4% nicht mehr ausgeglichen werden. Die Menge des jährlich zu ersetzenden Wassers verdoppelt sich jedoch.
- Durch die geringere Kollektorfläche sinken bei gleicher Austauschrate auch die Anzahl der auszutauschenden Spiegel sowie die Reinigungsmaterialien an.

4.3 Ergebnisse

Die Änderungen gegenüber der SEGS-Anlage haben wiederum entsprechende Auswirkungen auf Verbräuche und Umweltwirkungen der DSG-Anlage. Am nachhaltigsten wirkt sich die Verwendung von niedrig-legiertem Stahl anstatt von Edelstahl zur Herstellung des Absorbers aus (Abbildung 4.1 und Tabelle 4.1).

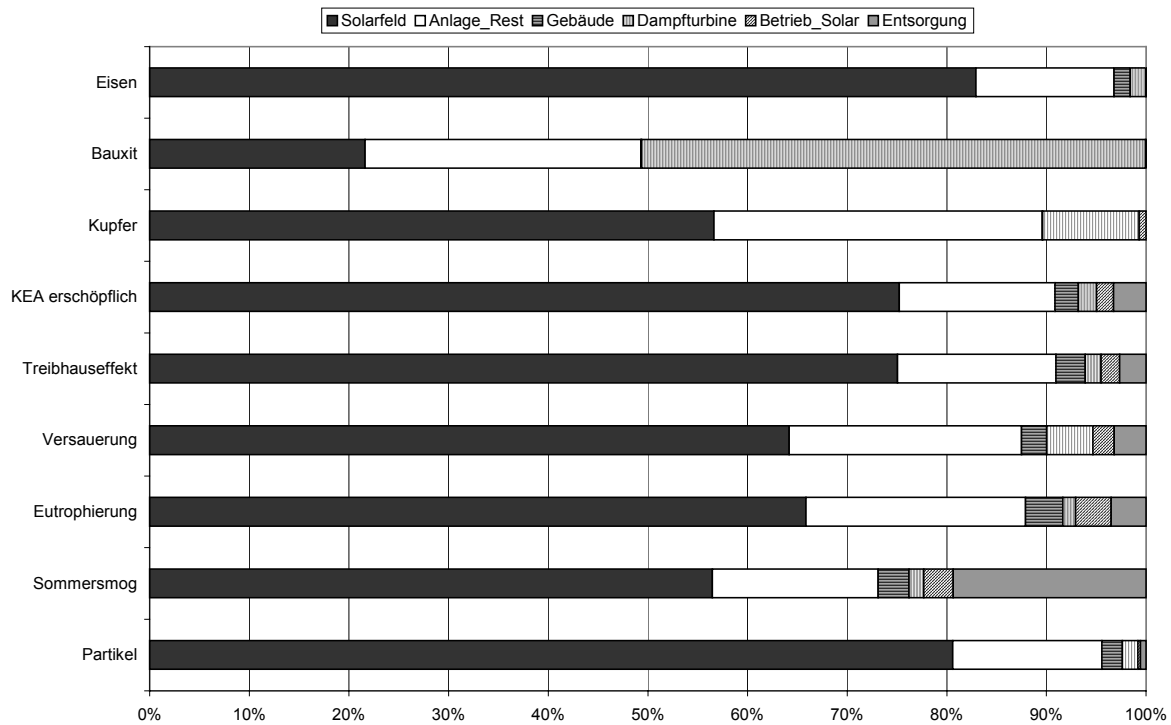


Abbildung 4.1: Zuordnung von Verbräuchen und Umweltwirkungen zu den Lebenswegphasen (DSG)

Material- und Energieverbräuche

Auf der *Inputseite* (siehe Abbildung 4.1) steigen die Anteile des Solarfeldes beim Verbrauch an Eisen und beim KEA im Vergleich zur SEGS-Anlage auf 83% bzw. 75% an (höherer Verbrauch an Stahl). Die Anteile für „Anlage_Rest“ sinken netto – einerseits steigen sie an, da innerhalb der Maschinenteknik der Ausgleichsbehälter neu hinzu kommt, andererseits werden sie durch den Wegfall des Dampferzeugers verringert. Der Anteil des Solarfeldes am Bauxit-Verbrauch geht deutlich zurück, da statt hoch-legiertem Stahl niedrig-legierter Stahl verwendet wird. Der Anteil des Kupfers am Solarfeld geht ebenso wie bei der FRESNEL-Anlage zurück, da die Kupfer enthaltenen Pumpen für das Thermoöl wegfallen. Der vormals mit 18% relativ hohe Anteil des Betriebes am KEA geht durch den Wegfall des Thermoöls auf 1,7% zurück.

Absolut gesehen gehen alle Werte um 19% – 64% zurück, da das Solarfeld aufgrund des höheren Nutzungsgrades kleiner ausfällt.

Emissionen

Bei sämtlichen *Wirkungskategorien* (siehe Abbildung 4.1) steigt der Anteil des Solarfeldes ebenfalls leicht an, verursacht durch den zusätzlichen Verbrauch an Stahl für das Solarfeld. Die Anteile der restlichen Anlage gehen bis auf den Sommersmog leicht zurück, da der Dampferzeuger wegfällt. Der Rückgang der Gesamtaufwendungen wird wiederum durch das insgesamt kleinere Solarfeld verursacht: Die absoluten Werte aller Wirkungskategorien gehen um 20% – 37% im Vergleich zur SEGS-Anlage zurück.

Tabelle 4.1: Verbräuche und Umweltwirkungen der einzelnen Lebenswegphasen pro erzeugte kWh Solarstrom (DSG), Standort-DNI=2337 kWh/(m₂,a)

		Solarfeld	Anlage_Rest	Gebäude	Dampfturbine	Betrieb_Solar	Entsorgung	Summe	Vergleich mit SEGS
		pro kWh _{el}							
Eisen	g	2,35	0,39	0,05	0,05	0,00	0,00	2,83	81%
Bauxit	g	0,0006	0,0008	0,0000	0,0015	0,0000	0,0000	0,0030	36%
Kupfer	g	0,0022	0,0013	0,0000	0,0004	0,0000	0,0000	0,0039	63%
KEA erschöpflich	MJ	0,07	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	54%
Treibhauseffekt	g CO ₂ -Äq	6,73	1,43	0,26	0,14	0,17	0,24	8,97	73%
Versauerung	mg SO ₂ -Äq	30,15	10,95	1,18	2,18	1,01	1,50	46,98	68%
Eutrophierung	mg PO ₄ ³⁻ -Äq	2,80	0,94	0,16	0,06	0,15	0,15	4,25	75%
Sommersmog	mg Ethen-Äq	0,78	0,23	0,04	0,02	0,04	0,27	1,38	63%
Partikel	mg	25,98	4,82	0,66	0,51	0,08	0,18	32,24	80%

Energetische Amortisationszeit

In Tabelle 4.2 wird die energetische Amortisationszeit der DSG-Anlage hergeleitet. Sie ist mit 2,7 Monaten um 40% kleiner als bei der SEGS-Anlage, was sich durch die ähnliche Konstruktion und die erwähnten Verbesserungen (weniger Stahl, kein Thermoöl) erklärt.

Tabelle 4.2: Energetische Amortisationszeit der DSG-Anlage

	Wert	Einheit
KEA _H	375.929.156	MJ
KEA _B	6.497.280	MJ/a
E _{net}	523.427.406	MJ/a
g	31,40%	
EAT	0,23	a
EAT	2,7	mon

5 SEGS, FRESNEL und DSG im Vergleich

Abschließend werden SEGS-, FRESNEL- und DSG-Anlage drei Vergleichen unterzogen:

- Zunächst werden die drei Anlagen untereinander verglichen, um Unterschiede innerhalb der Solarkraftwerks-Technologie darzustellen.
- Anschließend werden die drei Solarkraftwerke einem modernen fossilen Konkurrenzsystem, dem Erdgas-GuD-Kraftwerk gegenüber gestellt.
- Schließlich werden sowohl die solaren als auch das fossile Kraftwerk mit ihrer eigentlichen Konkurrenz, dem bundesdeutschen Strommix, verglichen.

Alle Vergleiche sind in der folgenden Abbildung 5.1 und der Tabelle 5.1 zusammengefasst, dabei sind alle Ergebnisse auf eine erzeugte kWh bezogen.

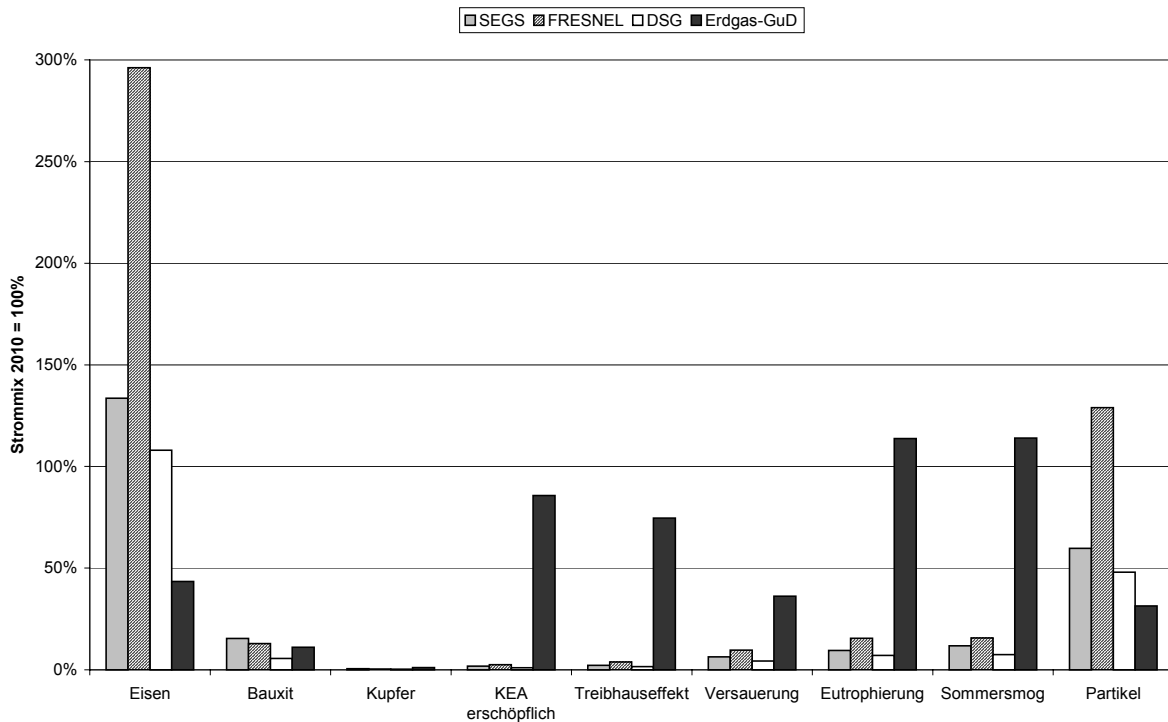


Abbildung 5.1: Normierte Ergebnisse der Verbräuche und Umweltwirkungen von 1 kWh_{el} Solarstrom (SEGS, FRESNEL, DSG und Erdgas-GuD im Vergleich), Bezug: Strommix 2010 = 100%

Vergleich von SEGS, FRESNEL und DSG

Vergleicht man zunächst SEGS-, FRESNEL- und DSG-Anlagen untereinander (erste drei Balken in Abbildung 5.1), zeigt sich, dass die FRESNEL-Anlage 1,3 bis 2,2 mal so hohe Werte wie die SEGS-Anlage aufweist. Ausnahmen sind der Bauxit- und der Kupferverbrauch, die um etwa 20% zurückgehen.

Die DSG-Anlage dagegen hat durchgehend erheblich niedrigere Werte als die SEGS-Anlage zu verzeichnen.

Hauptursachen für diese Ergebnisse sind, wie schon bei den Detailauswertungen erwähnt, der höhere Verbrauch an Stahl bei der FRESNEL-Anlage, der Ersatz von Edelstahl durch niedrig-legierten Stahl bei der DSG-Anlage sowie der Entfall des Dampferzeugers bei FRESNEL und DSG.

Vergleich der Solarkraftwerke mit einem modernen Erdgas-GuD

Den drei Solarkraftwerken wurde nun ein fossiles Konkurrenzsystem, ein modernes Erdgas-GuD-Kraftwerk, gegenüber gestellt (schwarzer Balken in Abbildung 5.1). Auf der *Inputseite* ist ein erheblich geringerer Einsatz an Eisen zu verzeichnen; der Bauxitverbrauch liegt etwa in Höhe des FRESNEL-Kraftwerks; und der Kupferverbrauch liegt zwei- bis dreimal so hoch wie bei den Solarkraftwerken. Als

fossiles Konkurrenzsystem ist entsprechend der Verbrauch erschöpflicher Energieressourcen um das 31- bis 85fache höher als bei den Solarkraftwerken.

Auf *Emissionsseite* ergeben sich ähnlich hohe Werte für das Erdgas-GuD bei allen Wirkungskategorien außer den Partikelemissionen. Letztere sind bei den Solarkraftwerken höher aufgrund des höheren spezifischen Stahleinsatzes.

Vergleich aller Kraftwerke mit dem bundesdeutschen Strommix

Den Solarkraftwerken sowie dem Erdgas-GuD wurde schließlich der bundesdeutsche Strommix 2010 gegenüber gestellt, mit dem alle Kraftwerke konkurrieren müssen. Er ist in Abbildung 5.1 zu erkennen, indem er als Referenzversorgung auf 100% gesetzt und die Solarkraftwerke bzw. das Erdgas-GuD auf diesen Wert normiert wurden.

Auf der *Inputseite* übertrifft der Eisenverbrauch insbesondere der FRESNEL-Anlage die jeweiligen Aufwendungen des Strommixes. Die Verbräuche an Bauxit und Kupfer betragen dagegen nur ein Bruchteil derjenigen des Strommixes. Der Verbrauch erschöpflicher Energieressourcen liegt bei den Solarkraftwerken mit 1 bis 2 Prozent deutlich unter dem Strommix – selbst das Erdgas-GuD hat mit 86% noch bessere Werte zu verzeichnen.

Auf *Emissionsseite* liegen alle Wirkungskategorien der Solarkraftwerke weit unter den Werten für den Strommix. Nur die Partikelemissionen der FRESNEL-Anlage übersteigen diejenigen des Strommixes, bedingt wiederum durch den höheren Stahlverbrauch.

Tabelle 5.1: Verbräuche und Umweltwirkungen von 1 kWh_{el} Solarstrom (SEGS, FRESNEL und DSG) im Vergleich mit 1 kWh_{el} aus dem Strommix 2010 und einem modernen Erdgas-GuD-Kraftwerk

	pro kWh _{el}	SEGS	FRESNEL	DSG	Erdgas-GuD	Strommix 2010
Eisen	g	3,50	7,76	2,83	1,137	2,62
Bauxit	g	0,008	0,007	0,003	0,006	0,053
Kupfer	g	0,006	0,005	0,004	0,013	1,157
KEA erschöpflich	MJ	0,16	0,22	0,09	7,64	8,91
Treibhauseffekt	g CO ₂ -Äq	12,20	21,66	8,97	422,4	565,66
Versauerung	mg SO ₂ -Äq	69,28	104,25	46,98	392,2	1.083,36
Eutrophierung	mg PO ₄ ³⁻ -Äq	5,69	9,27	4,25	68,17	59,91
Sommersmog	mg Ethen-Äq	2,19	2,90	1,38	21,12	18,54
Partikel	mg	40,17	86,73	32,24	21,1	67,23

6 Zukünftiger Forschungsbedarf

Die dargestellten Ökobilanzen beruhen im Prinzip auf den Daten eines SEGS-Solarkraftwerkes, die auf FRESNEL und DSG angepasst wurden. Zur Fortschreibung und Aktualisierung dieser Ökobilanzen besteht folgender Forschungsbedarf:

- Das SEGS-Solarkraftwerk wurde im EU-Projekt EuroTrough optimiert und weiter entwickelt (Geyer et al. 2000). Die veränderten Materialverbräuche dürften die Ökobilanz wesentlich beeinflussen, insb. im Hinblick auf einen verringerten Materialbedarf des Solarfeldes. Hierzu sollte die Ökobilanz auf den EuroTrough angepasst werden. Andere Fortschreibungen auf zukünftige Systeme (wie z.B. Röder 1997) sollten ausgewertet werden.
- Die Materialdaten der bilanzierten FRESNEL- und DSG-Anlage beruhen bisher auf theoretischen Berechnungen. Sobald Prototypen vorliegen, sollte die Materialbilanz aktualisiert werden.
- Auch die Auslegungsdaten für diese beiden Kraftwerke (Tabelle 1.1) beruhen bisher auf vereinfachten Berechnungen mit dem Programm *greenius* und sollten detailliert werden.
- Die derzeitigen Bilanzen sind durchgehend mit Prozessmodulen berechnet, die die Situation in Deutschland oder in Europa widerspiegeln. Da ein Teil der Kraftwerksmodule jedoch in Marokko gefertigt werden (Tabelle 1.2), sollten angepasste Prozessmodule entwickelt werden (dies betrifft insbesondere Stahl, Beton, Keramik, PVC, Transport und den Strommix).
- Einige wenige Materialien konnten bisher nicht bilanziert werden, da keine Prozessmodule vorlagen (dies betrifft Lack, Silber, Öl). Hierfür sollten Ökobilanzen entwickelt werden.
- Der Abriss und die Entsorgung der Solarkraftwerke ist bisher nur sehr vereinfacht modelliert und sollte detaillierter betrachtet werden.
- Der Flächenverbrauch ist in dem verwendeten UBA-Verfahren der Wirkungskategorien nicht enthalten, so dass sein Einfluss auf die Ökobilanz nicht abgeschätzt werden kann. Er sollte mit den anderen Stromerzeugungstechnologien verglichen werden. Zur Bewertung des Flächenbedarfs könnten neuere Ansätze wie z.B. Brentrup et al. 2002 herangezogen werden.

7 Literatur

- Ayres, R.U.; Ayres, L.W.; Rade, I. 2000: The Life Cycle of Copper, its Co-Products and Byproducts. INSEAD. Fontainebleau.
- BDSV (Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen e. V.) 2002: Kennzahlen der deutschen Stahlrecycling-Wirtschaft. Pressemitteilung des BDSV vom 22.2.2002.
- Böhnke, Marc 1997: Bilanzierung der Stoff- und Energieströme von solarthermischen Kraftwerken zur Stromerzeugung. Stuttgart.
- Boustead, I. 2000: Environmental Profil Report for the European Aluminium Industry. EAA (European Aluminium Association). Brüssel.
- Brentrup, Frank; Küsters, Jürgen; Lammel, Joachim; Kuhlmann, Hermann 2002: Life Cycle Impact Assessment of Land Use Based on the Hemeroby Concept. Int J LCA 7 (6) 339 – 348. Landsberg.
- Cohen, G; Kearney, D.; Kolb, G. 1999: Final report on the operation and maintenance improvement program for concentrating solar power plants. Springfield.
- Corradini, Roger; Köhler, D. 1999: Ganzheitliche Bilanzierung von Grundstoffen und Halbzeugen, Teil III Metalle. Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München.
- DKI (Deutsches Kupferinstitut) 1997: Kupfervorkommen – Gewinnung, Eigenschaften, Verarbeitung, Verwendung. Düsseldorf.
- Eck, Markus 2003: Persönliche Mitteilung vom November 2003
- ecoinvent Zentrum 2003: ecoinvent Daten v1.01. CD-ROM des Schweizer Zentrums für Ökoinventare. www.ecoinvent.ch. Dübendorf.
- Enquete (Enquete-Kommission des Deutschen Bundestages) 2002: Endbericht der Enquete-Kommission „Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung“. Bundestags-Drucksache 14/9400 vom 7.7.2002. Berlin.
- Frischknecht, R. et al. 1996: Ökoinventare von Energiesysteme. Bundesamt für Energiewirtschaft, 3. Auflage. Zürich.
- GDA; Aluminiumindustrie 2002: Recycling. www.aluinfo.de
- Geyer, Michael; Lüpfer, Eckhard; Schiel, Wolfgang; Zarza, Eduardo; González-Aguilar, Rafael Osuna; Nava, Paul 2002: Eurotrough – a New Parabolic Trough Collector with Advanced Light Weight Structure. Paper for the Solar Thermal 2000 International Conference, Sydney.
- Gürzenich, Dirk 2002: Methodische Aspekte zu Kumulierten Energieaufwendungen und Emissionen bei Photovoltaikanlagen in der Europäischen Union. Dissertation. Bochum.
- Guinée, Jeroen (Hrsg) 2002: Handbook on Life Cycle Assessment. Operational Guide to the ISO Standards. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London.
- IER (Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung) 2002: Balance 3.5 SPL – Eine Software zur ganzheitlichen Bilanzierung. Stuttgart.
- IFEU (Institut für Energie- und Umweltforschung); IFU (Institut für Umweltinformatik) 2003: Umberto 4.1. Heidelberg/Hamburg.
- Lehmann, Harry; Reetz, Torsten; Roewer, Stefan; Liedtke, Christa 1997: Ökologische Chancen und Risiken großtechnisch angelegter solarthermischer Kraftwerke. Studie im Auftrag der BMW AG.
- Möller, Andreas; Page, Bernd; Rolf, Arno; Wohlgemuth, Volker 2001: Foundations and Applications of computer based Material Flow Networks for Environmental Management. In: Rautenstrauch et al: Environmental information systems in industry and public administration. Magdeburg
- Monsanto 1996: Wassergefährdung durch Santotherm VP-1. Sicherheitsdatenblatt. Düsseldorf.
- Morin, Gabriel 2003: Beschreibung der zu bilanzierenden FRESNEL-Anlage. Freiburg.

- PE (PE Product Engineering); IKP (Institut für Kunststoffkunde und Kunststoffprüfung Universität Stuttgart) 1998: GaBi3. Das Softwaresystem zur Ganzheitlichen Bilanzierung. Stuttgart.
- Pehnt, Martin 2002: Ökobilanzen. In: Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland. 2. Zwischenbericht Juli 2002. Stuttgart, Heidelberg, Wuppertal.
- Pehnt, Martin 2004: Ökologische Bewertung stationärer Brennstoffzellen – Energie- und Ökobilanzen. In: Umweltauswirkungen, Rahmenbedingungen und Marktpotenziale des dezentralen Einsatzes stationärer Brennstoffzellen (Arbeitstitel), E. Schmidt Verlag, erscheint 2004.
- Quaschnig, Volker 2003: Persönliche Mitteilung vom Oktober 2003.
- Rebmann, Ralf 2004: Chemikaliendaten. <http://www.gifte.de/daten.htm> . 17.02.04.
- Reinhold, Roland 1997: Erstellung der Materialbilanz von Solarkraftwerken als Basis zur Lebenszyklusanalyse von Energieaufwendungen und Treibhausgasemissionen. Stuttgart.
- Röder, Alexander 1997: Vergleich regenerativer Energiesysteme bezüglich Kosten, Treibhausgasemissionen, Ressourcenverbrauch. Villigen.
- UBA (Umweltbundesamt) 1995: Ökobilanz für Getränkeverpackungen. UBA-Texte 52/95. Berlin.
- UBA (Umweltbundesamt) 1999: Bewertung in Ökobilanzen. UBA-Texte 92/99. Berlin.
- Zarza, Eduardo 2001: Pre-design of the solar field for the selected ISSCS configuration. Project DISS.

8 Anhang

8.1 Inventardaten der bilanzierten Anlagen (SEGS, FRESNEL und DSG)

Tabelle 8.1: Inventardaten des Solarfeldes

Bauteil	Material/Dienstleistung	Einheit	SEGS	FRESNEL	DSG
Absorber	Stahl, hochlegiert, 2010	t	300.3		
	Stahl, niedrig legiert, 2010	t		3,785.5	493.5
	Flachglas, ETH	t	184.9	441.7	182.4
	Energiebedarf Beschtg. Absorberrohr	kWhel		19,132.3	
	Isolierung (Steinwolle)	t		92.8	
	Sekundärspiegel				
	Energiebedarf Glasvorspannen	kWhel		127,579.3	
	Flachglas	t		240.3	
	Keramik	t		5.1	
	Lack	t		3.9	
	Kupfer	t		0.0	
	Stahl	t		0.4	
Silberbeschichtung	t		0.1		
Reflektor	Flachglas, ETH	t	5,146.4	4,872.7	4,108
	Feinkeramik, ETH	t	69.4	102.9	55.4
	Lack *	t	53.5	79.3	43
	Kupfer , 80% Rec	t	0.3	0.4	0.2
	Stahl, unlegiert, 2010	t	5.4	8.0	4.3
	Silberbeschichtung *	t		1.1	0.3
Tragestruktur	Stahl, unlegiert, 2010	t	8,446	24,336	6,742
	Beton	t	13,670	16,896	10,911
Rohrleitungen	Stahl, unlegiert, 2010	t	788	189	1,295
	Steinwolle	t	237	57	189
Nachführung	Nylon	t		595.1	
Pumpe	Stahl, unlegiert, 2010	t	63.4		
	Kupfer, 80% Rec.	t	27.3		
HTF	Diphenyl	t	754.1		
	Diphenyloxid	t	271.9		
Erdung und Verkabelung	Kupfer, 80% Rec	t	36.9	39.1	29
	Stahl, unlegiert, 2010	t	1,166.1	1,235.3	931
	PVC	t	9.2	9.7	7
Dienstleistungen	Transport LKW>32t, 400 km Marokko	tkm	12,470,546	19,648,661	9,979,671
	Transport LKW>32t, 400 km Dtlid	tkm	3,624,127	3,155,862	2,918,228
	Transport Seeschiff, 2750 km	tkm	24,915,874	21,696,550	20,062,817
	Baumaschine 150kW (für Hydraulikbagger)	kWh	8,518	9,024	8,404
	Baumaschine 73,5 kW(für Kräne)	kWh	189,780	201,052	187,233
	Aushub	m3	386,188	190,936	308,265
	Energiebedarf Errichtung	kWhel	311,769	462,427	248,862
	Energiebedarf, sonstige	kWhel	29,610	43,919	23,636

* Die Herstellung dieser Prozesse konnte bisher nicht abgebildet werden.

Tabelle 8.2: Inventardaten des Dampferzeugers

Bauteil	Material/Dienstleistung	Einheit	SEGS	FRESNEL	DSG
Dampferzeuger	Stahl, unlegiert, 2010	t	731,5		
	Feinkeramik, ETH	t	47,5		
Dienstleistungen	Transport LKW>32t, 400 km Marokko	tkm	311.600		
	Transport LKW>32t, 400 km Dtlid	tkm	155.800		
	Transport Seeschiff, 2750 km	tkm	1.071.125		

Tabelle 8.3: Inventardaten der Maschinentechnik

Bauteil	Material/Dienstleistung	Einheit	SEGS	FRESNEL	DSG
Ausgleichsbehälter	Stahl, unlegiert 2010	t			11,8
Turbine	Stahl, unlegiert, 2010	t	74,0	74,0	74,0
	Stahl, hochlegiert, 2010	t	20,0	20,0	20,0
Generator	Stahl, unlegiert, 2010	t	56,0	56,0	56,0
	Kupfer, 80% Rec.	t	6,0	6,0	6,0
	Stahl, hochlegiert, 2001	t	50,5	50,5	50,5
	Feinkeramik, ETH	t	3,0	3,0	3,0
	Aluminium 2010, 85% Rec.	t	1,5	1,5	1,5
	Öl	* t	9,1	13,0	13,0
ND-WT und Entlüfter	Stahl, unlegiert, 2010	t	110,0	110,0	110,0
Rohrleitungen, Pumpen	Stahl, unlegiert, 2010	t	150,0	150,0	150,0
	PVC	t	150,0	150,0	150,0
Kühlturm	Stahl, unlegiert, 2010	t	478,4	478,4	478,4
	Beton	t	7.009,0	7.009,0	7.009,0
	PVC	t	3,3	3,3	3
	Zink	t	0,1	0,1	0,1
	Getriebe	* t	1,2	1,2	1
	Aluminium 2010, 85% Rec.	t	0,6	0,6	0,6
	Kupfer, 80% Rec.	t	1,4	1,4	1,4
Pipeline	Stahl, unlegiert, 2010	t	720,0	720,0	720,0
Dienstleistungen	Transport LKW>32t, 400 km Marokko	tkm	3.533.508	3.533.508	3.533.508
	Transport LKW>32t, 400 km Dtlid	tkm	3.451.508	3.451.508	3.451.508
	Transport Seeschiff, 2750 km	tkm	23.729.118	23.729.118	23.729.118

* Die Herstellung dieser Prozesse konnte bisher nicht abgebildet werden.

Tabelle 8.4: Inventardaten der Elektro- und Leittechnik

Bauteil	Material/Dienstleistung	Einheit	SEGS	FRESNEL	DSG
Transformator	Stahl, unlegiert, 2010	t	35,0	35,0	35,0
	Stahl, hochlegiert, 2001	t	39,0	39,0	39,0
	Kupfer, 80% Rec.	t	19,0	19,0	19,0
	Öl	* t	13,0	13,0	13,0
Sonstiges	Stahl, unlegiert, 2010	t	50,0	50,0	50,0
	PVC	t	10,0	10,0	10,0
Dienstleistungen	Transport LKW>32t, 400 km Marokko	tkm	61.200	61.200	61.200
	Transport LKW>32t, 400 km Dtlid	tkm	61.200	61.200	61.200
	Transport Seeschiff, 2750 km	tkm	420.750	420.750	420.750

* Die Herstellung dieser Prozesse konnte bisher nicht abgebildet werden.

Tabelle 8.5: Inventardaten der Gebäude

Bauteil	Material/Dienstleistung	Einheit	SEGS	FRESNEL	DSG
Gebäude	Stahl, unlegiert, 2010	t	185,0	185,0	185,0
	Beton	t	3.429,5	3.429,5	3.429,5
	Flachglas, ETH	t	2,0	2,0	2,0
	PVC	t	7,5	7,5	7,5
Dienstleistungen	Transport LKW>32t, 400 km Marokko	tkm	1.449.600	1.449.600	1.449.600
	Baumaschine 150kW (für Hydraulikbagger)	kWh	750	750	750
	Baumaschine 200kW (für Kräne)	kWh	104.000	104.000	104.000

Tabelle 8.6: Inventardaten des Betriebs

Bauteil	Material/Dienstleistung	Einheit	SEGS	FRESNEL	DSG
Spiegeleratz	Flachglas, ETH	t	746.2	666.9	603.8
	Feinkeramik, ETH	t	9.9	13.9	8.0
	Kupfer, 80% Rec.	kg	41.2	57.6	33.3
	Lack	* t	8.0	11.1	8.0
	Transport LKW>32t, 400 km Marokko	tkm	302,480.0	272,358.6	244,732.0
	Transport LKW>32t, 400 km Dtlid	tkm	302,480.0	272,358.6	244,732.0
	Transport Seeschiff, 2750 km	tkm	2,079,550.1	1,872,465.5	1,682,532.5
Reinigung	Wasser	t	262.8	368.0	212.7
	Reinigungsmittel	* t	844.2	1,181.9	683.0
	Baumaschine 200kW (für Reinigungswagen)	kWh	314,995.2		254,857.8
Verluste	Phenol, ETH	t	1,190.1		
	Prozesswasser	t	403,290.5	403,290.5	652,592.5
	Energiebedarf Motoren	kWhel		603,603.1	
	Nylon 66, glasfaserverstärkt	t		1.1	
	Stahl, unlegiert, 2010	t		1.1	
	Transport LKW>32t, 400 km Marokko	tkm	476,048		
	Transport LKW>32t, 400 km Dtlid	tkm	476,048		
	Transport Seeschiff, 2750 km	tkm	3,272,829		

* Die Herstellung dieser Prozesse konnte bisher nicht abgebildet werden.

Tabelle 8.7: Inventardaten der Entsorgung

Bauteil	Material/Dienstleistung	Einheit	SEGS	FRESNEL	DSG
	Baumaschine 200kW (statt Kräne)	kWh	204.000	204.000	204.000
	Transport LKW>32t, 100 km Marokko	tkm	900.600.000	900.600.000	900.600.000

8.2 Rechenschema zum Ermitteln der Wirkungskategorien der SEGS-Anlage in Abhängigkeit von der Solarfeldgröße

Tabelle 8.8: Rechenschema zum Ermitteln der Wirkungskategorien der SEGS-Anlage

pro kWhel		Solarfeld	Dampf- erzeuger	Maschinen- technik	Elektro- Leittechnik	Gebäude	Dampf- turbine	Betrieb Solar	Entsorg- ung
Eisen	g	2.66 *S	0.18 *DE	0.54 *M	0.03 *E	0.05 *G	0.05 *DA	0.00 *B	0.00 *E
Bauxit	g	0.0057 *S	0.0000 *DE	0.0001 *M	0.0007 *E	0.0000 *G	0.0015 *DA	0.0001 *B	0.0000 *E
Kupfer	g	0.0045 *S	0.0000 *DE	0.0001 *M	0.0012 *E	0.0000 *G	0.0004 *DA	0.0000 *B	0.0000 *E
KEA erschöpflich	MJ	0.1034 *S	0.0039 *DE	0.0163 *M	0.0011 *E	0.0021 *G	0.0016 *DA	0.0297 *B	0.0029 *E
Treibhauseffekt	g CO2-Äq	8.46 *S	0.41 *DE	1.73 *M	0.10 *E	0.27 *G	0.14 *DA	0.85 *B	0.24 *E
Versauerung	mg SO2-Äq	44.58 *S	1.98 *DE	11.30 *M	1.60 *E	1.19 *G	2.19 *DA	4.93 *B	1.51 *E
Eutrophierung	mg PO43--Äq	3.52 *S	0.18 *DE	1.07 *M	0.04 *E	0.16 *G	0.06 *DA	0.52 *B	0.15 *E
Sommersmog	mg Ethen-Äq	1.19 *S	0.04 *DE	0.26 *M	0.02 *E	0.04 *G	0.02 *DA	0.35 *B	0.27 *E
Partikel	mg	29.78 *S	1.96 *DE	6.39 *M	0.33 *E	0.67 *G	0.51 *DA	0.35 *B	0.18 *E

Ausgangsgrößen

	Referenz	Neu	Umrechnungsformeln
Systemlaufzeit	T_SYS_REF 30 a	T_SYS_NEU	$Z = T_SYS_NEU / T_SYS_REF$
Gesamtnutzungsgrad	ETA_SYS_REF 13.20% %	ETA_SYS_NEU	$EL_REF = DNI_REF * SF_REF * ETA_SYS_REF * T_SYS_REF$
Strahlungsintensität	DNI_REF 2,337 kWh/m2	DNI_NEU	$EL_NEU = DNI_NEU * SF_NEU * ETA_SYS_NEU * T_SYS_NEU$ $EL = EL_REF / EL_NEU$
Solarfeldgröße	SF_REF 469,245 m2	SF_NEU	$SF = SF_NEU / SF_REF$
Kraftwerksleistung	P_REF 80 MW	P_NEU	$P = P_NEU / P_REF$

Umrechnungsfaktoren für Resultattabelle

Solarfeld	$S = Z * EL * SF$
Dampferzeuger	$DE = Z * EL * P^{0,8}$
Maschinenteknik	$M = Z * EL * P^{0,9}$
Elektro-/Leittechnik	$E = Z * EL * P^{0,7}$
Gebäude	$G = Z * EL * P^{0,1}$
Dampfturbine	$DA = Z * EL * P^{0,7}$
Betrieb_Solar	$B = Z * EL * SF$
Entsorgung	$E = Z * EL * P$

Erläuterung der Umrechnungsfaktoren

Z	Mit Z wird eine Änderung der Systemlaufzeit (z.B. 40 Jahre Betrieb statt T_SYS_REF = 30 Jahre) berücksichtigt.
EL	Mit EL kann eine veränderte Stromproduktion berücksichtigt werden (die abhängig ist von der DNI, der Solarfeldgröße, des Nutzungsgrades und der Systemlaufzeit). Der Parameter ist nötig, da die Tabellenwerte spezifische Werte (pro kWh,el) darstellen.
SF	Mit SF wird eine Änderung der Solarfeldgröße berücksichtigt.
P	Mit P wird eine Änderung der Kraftwerksleistung berücksichtigt.