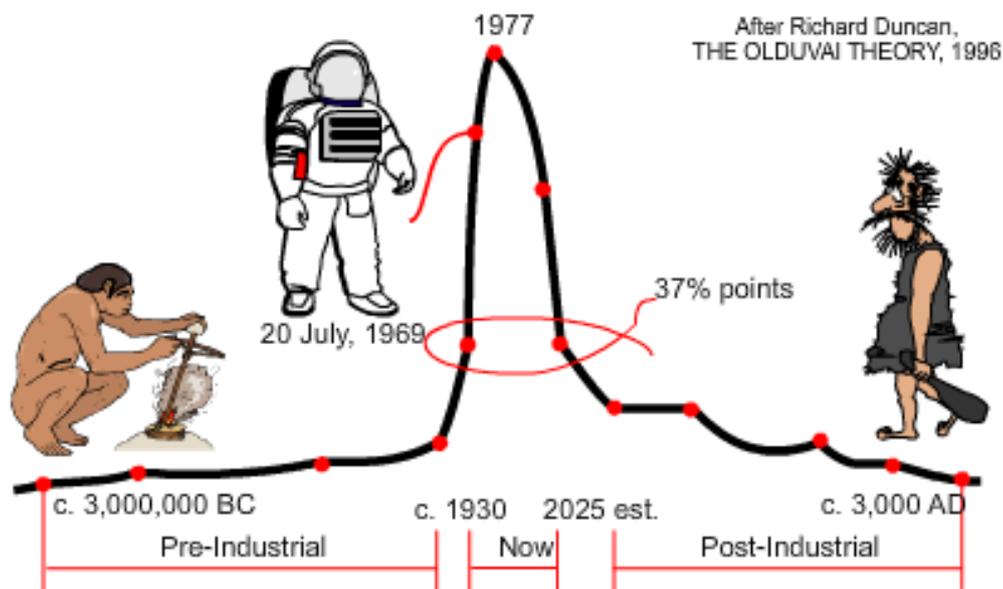


Die neuen Grenzen des Wachstums ODER Ist Photovoltaik umwelt- und klimaverträglich ?

Dr. Annette Schlemm, Jena – Mai 2009 (Version 3.0)



(Abbildung aus Hanson 2001a; 1-2)

Copyright (c) Annette Schlemm

Dieser Text steht unter der Creative Commons "Namensnennung-Weitergabe unter gleichen Bedingungen 3.0"-Lizenz veröffentlicht. Er darf frei verwendet und verändert werden. Bedingungen a) Alle darauf aufbauenden Werke müssen in diesem Sinne frei sein und ebenfalls unter dieser Lizenz veröffentlicht werden. 2) Angabe von Quelle und Autorin. Die Lizenz ist einsehbar unter: <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/>



1 PV – Nein Danke!?	3
1.1 Die Dynamik der PV-Entwicklung	3
1.2 Kritik der KKW-Befürworter	4
1.3 Skepsis von anderer Seite	5
2 Zu den Fakten!	6
2.1 Life Cycle Analyse	6
2.2 Energieverbrauch	7
2.2.1 Vergleich der PV-Technologien	9
2.2.2 Vergleich der Energietechnologien	11
2.2.3 Energiebilanz	12
2.2.4 Energiebilanz	14
2.3 Klima-, Umwelt- und Gesundheitsschäden	15
2.3.1 Klimaschädlichkeit	15
2.3.1.1 Vergleich innerhalb der PV-Technologien	15
2.3.1.2 Vergleich der Energietechnologien	16
2.3.2 Umweltschädlichkeit	17
2.3.4 Gefährliche Materialien	20
Cadmium	21
2.3.5 Gesundheitsgefährdungen	22
2.4 Externe Kosten	23
2.5 Ressourcenverbrauch	24
2.5.1 Grundbegriffe	25
2.5.2 Rohstoffpreisentwicklung	26
2.5.3 Silizium	28
2.5.4 Bauxit/Eisen	29
2.5.5 Graphit	30
2.5.6 Kupfer	31
2.5.7 Glas	32
2.5.8 Besondere Materialien für PV	33
2.5.8.1 Cadmium	33
2.5.8.2 Gallium	33
2.5.8.3 Germanium	34
2.5.8.4 Indium	34
2.5.8.5 Selen	36
2.5.8.6 Tellur	36
2.5.8.7 Ruthenium	36
2.5.8.8 Organische und Nanomaterialien	37
2.5.8.9 Zusammenfassung: Materialbegrenzungen für das PV-Wachstum	37
2.6 Recycling	38
2.7 Gesamtkosten	40
2.8 Flächenverbrauch	41
2.9 Strukturelle Schranken	42
2.10 Die Bilanz	44
3 Die wirklichen Grenzen	46
3.1 Atmosphärenphysik und Biosphäre	46
3.2 Form und Dichte der Energie	47
3.3 Wirtschaftsweise und Gesellschaftsform	49
3.3.1 Erneuerbare Energie für eine Wachstumsgesellschaft?	49
3.3.2 Verzicht auf Wachstum	50
3.3.3 ... gehen, wohin noch niemand war	52
Literatur	53

1 PV – Nein Danke!?

1.1 Die Dynamik der PV-Entwicklung

Während im grün-alternativen Bereich die Photovoltaik (PV), also die Erzeugung von Strom durch die direkte Umwandlung der Energie aus Sonnenstrahlen durch geeignete Materialien, als erneuerbare Energie früher fraglos popularisiert wurde, sind heutzutage öfter kritische bis ablehnende Äußerungen zu vernehmen.¹ Photovoltaik sei, wenn man den gesamten Produktionsprozess der Solarmodule und nicht nur die Funktionsweise während der Arbeitszeit betrachtet, letztlich umwelt- und klimaschädlicher als beispielsweise Kernenergie².



Während das 1000-Dächer-Programm von 1994 in der Bundesrepublik noch keine starken Wirkungen ausübte, war das 100 000-Dächer-Programm und das damit verbundene „Erneuerbare Energiengesetz“ (EEG) so erfolgreich, dass in den ersten Jahren des neuen Jahrtausends eine weltweit führende Solarindustrie entstehen konnte. Seitdem wurden alle Entwicklungsprognosen für PV immer wieder übertroffen. Mit dem EEG war eine Regelung verbunden, die den Betreibern von Solaranlagen so hohe Vergütungen für den von ihnen eingespeisten Strom zusichert, dass sich ihre Investition lohnt. Die Vergütungen sinken zwar, je später die Solaranlage installiert wird – gleichzeitig werden die Solarmodule aber immer günstiger, weil die Herstellungskosten sinken (mit einer Ausnahme von 2004 bis ca. 2008 durch einen Mangel an Silizium für die Solarzellenwafer, der durch den Boom hervorgerufen worden war, siehe 2.5.3).

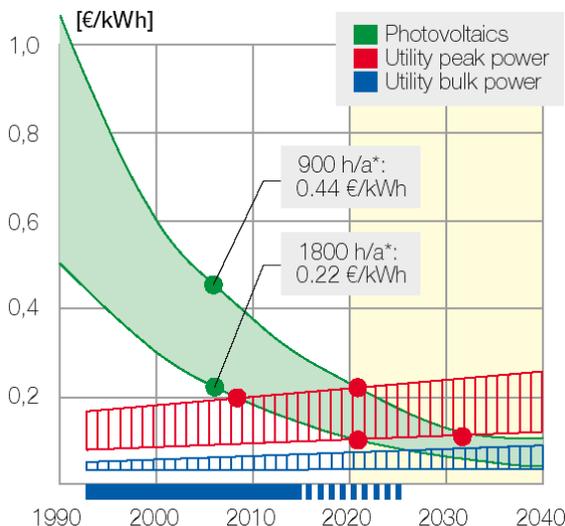


Abb. 1 Preissenkungstendenz in der PV („Lernkurve“) (aus EPIA, Greenpeace 2008: 41)

Die Preise für eine PV-Anlage und Stromerzeugungspreise (grün) sind immer mehr gesunken und nähern sich der Spitzenlast- (rot) und der Grundlastpreisentwicklung (blau) des konventionellen Stroms an. Es gibt einen recht starken Unterschied zwischen einer Sonnennutzungsdauer von 900 Stunden pro Jahr im mittleren und von 1 800 Stunden im Jahr im südlichen Europa. Deshalb wird im südlichen Europa auch schneller ein günstiger Preis³ erreicht, der mit dem Preis des konventionellen Stroms vergleichbar ist (dies wird „Grid-Parität“ genannt).

Sobald die Grid-Parität in den nächsten Jahren erreicht ist, wird ein erneuter Solar-Boom erwartet.

¹ Siehe z.B. Rus (2008), wo ich ein ähnliches Bild wie das hier gezeigte fand.

² Ich verwende den Begriff „Kernenergie“ anstatt der sonst üblichen Redeweise von der „Atomenergie“, weil fachlich tatsächlich Energieumwandlungen im Atomkern betrachtet werden und andere energetische Prozesse im Atom selbst (wie die Erzeugung von Lichtphotonen durch Wechsel der Bewegungsbahnen durch Elektronen) nicht gemeint sind. Mit dieser sachlich richtigen Verwendung der Begriffe folge ich nicht der üblichen Aufteilung, dass „Kernenergie“ eher von Befürwortern gesagt wird und „Atomenergie“ von den Gegnern.

³ Es geht um den Steckdosenpreis, nicht die Herstellungskosten.

In den letzten Jahren stieg die Menge der verkauften PV-Module immer schneller als die Entwicklungsprognosen es voraus sahen.

Deshalb wird von Optimisten erwartet, dass die Photovoltaik in diesem Jahrhundert zur „tragenden Säule der Energieversorgung“ wird (Aulich 2007: 44).

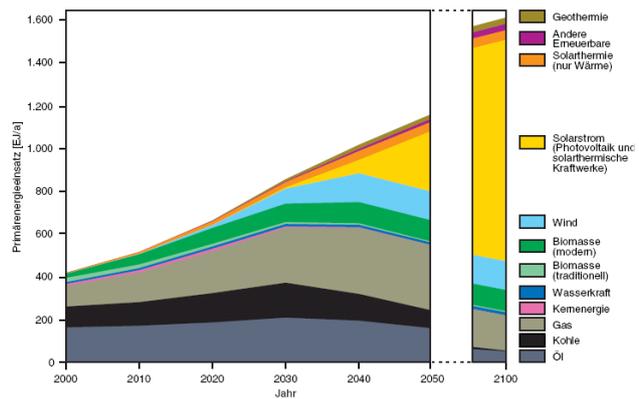


Abbildung 1
Die Veränderung des globalen Energiemix im exemplarischen Pfad bis 2050/2100.
Quelle: WBGU

Abb. 2: Vision: Solarenergie wird in diesem Jahrhundert zur tragenden Säule der Energieversorgung (WBGU 2003: 4, 139)

Wenn sich die optimistischen Prognosen bestätigen, kann also allein der Solarstrom die durch den Ausstieg aus der Kernenergie wegfallenden Strommengen ab ca. 2015 leicht auffangen.

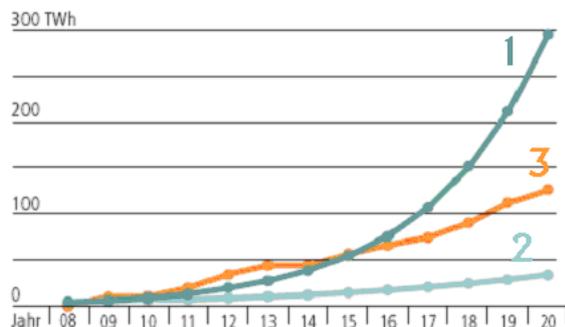


Abb.3: Ersetzen von Kernkraftwerkstrom durch Solarstrom (nach PHOTON August 2008)

- 1: Solarstrom pro Jahr im optimistischen Szenario,
- 2: Solarstrom pro Jahr im pessimistischen Szenario,
- 3: Kernkraftstrom, der pro Jahr durch den Ausstieg aus der Kernenergie wegfällt.

“Mit jährlich 40% Wachstum bei neu installierten Anlagen ist die Photovoltaik in der Lage, bereits ab 2015 mehr Solarstrom zu erzeugen, als Atomstrom kompensiert werden muss.” (Kreutzmann 2008)

Auch mit etwas mehr Vorsicht in den Wachstumsprognosen kommt die Greenpeace-Studie von 2007 zum „Nationales Energiekonzept bis 2020 - Klimaschutz: Plan B“ (EUTech, Greenpeace 2007) zur Schlussfolgerung, dass Erneuerbare Energien (also nicht nur PV) und mehr Verwendung von Erdgas bei etwas verringertem Verbrauch eine Ablösung der Kernenergie möglich machen.⁴

1.2 Kritik der KKW-Befürworter

Seit die Klimaproblematik immer mehr ins öffentliche Bewusstsein dringt und nachdrücklich nach Auswegen gesucht wird, bietet sich die Kernenergielobby als Lösung an. Kernkraft ist – im laufenden Betrieb wenigstens – erstaunlich umwelt- und klimafreundlich (zur Kritik dieser Position siehe u.a. Nebelung 2009). Es ist leicht zu erkennen, dass einerseits Laufzeiten, die über die Abschreibungszeit der alten Anlagen hinausgehen (und auch den beschlossenen „Atomausstieg“ verletzen) Extraprofit versprechen, dass andererseits die KKW-Lobby auch Morgenluft wittert, um massenhaft neue KKW zu bauen. Aus einzelnen Ländern hört man schon von vielen Aufträgen – wenn auch die Finanzierung solch großer und riskanter Anlagen immer schwerer wird.

In einer scheinbaren neutralen vergleichenden Analyse der verschiedenen Energietechniken werden die Energietechniken bezüglich Energieverbrauch, Ressourcenverbrauch, Gesundheits- und Umweltschäden sowie der Emission klimarelevanter Gase untersucht und verschiedene Szenarien zur Reduktion der Klimagase entwickelt. Es ergibt sich folgendes Ergebnis:

⁴ Eine andere, aber nicht zu vernachlässigende Frage ist die nach der Verfügbarkeit geeigneter Verbundnetze und der Umstellung des Lastmanagements. Hier müssen jetzt dringend die richtigen Weichen gestellt werden. (vgl. Werner 2007, Rutschmann 2008)

„In allen Zielszenarien erscheint eine Reduktion der CO₂-Emissionen um 80 Prozent bis 2050 technisch machbar.“ (Voß 2006a: 20)

Allerdings sind die Stromerzeugungskosten mit erneuerbare Energien fast viermal so hoch wie mit der „Effiziente Ressourcennutzung“, die Kernkraft und Kohlekraft massiv einsetzt. Die anscheinend günstigste Lösung ist die Verschiebung des Energiemixes in eine Richtung, die einen Anteil von Kernenergie von 85 % hat!

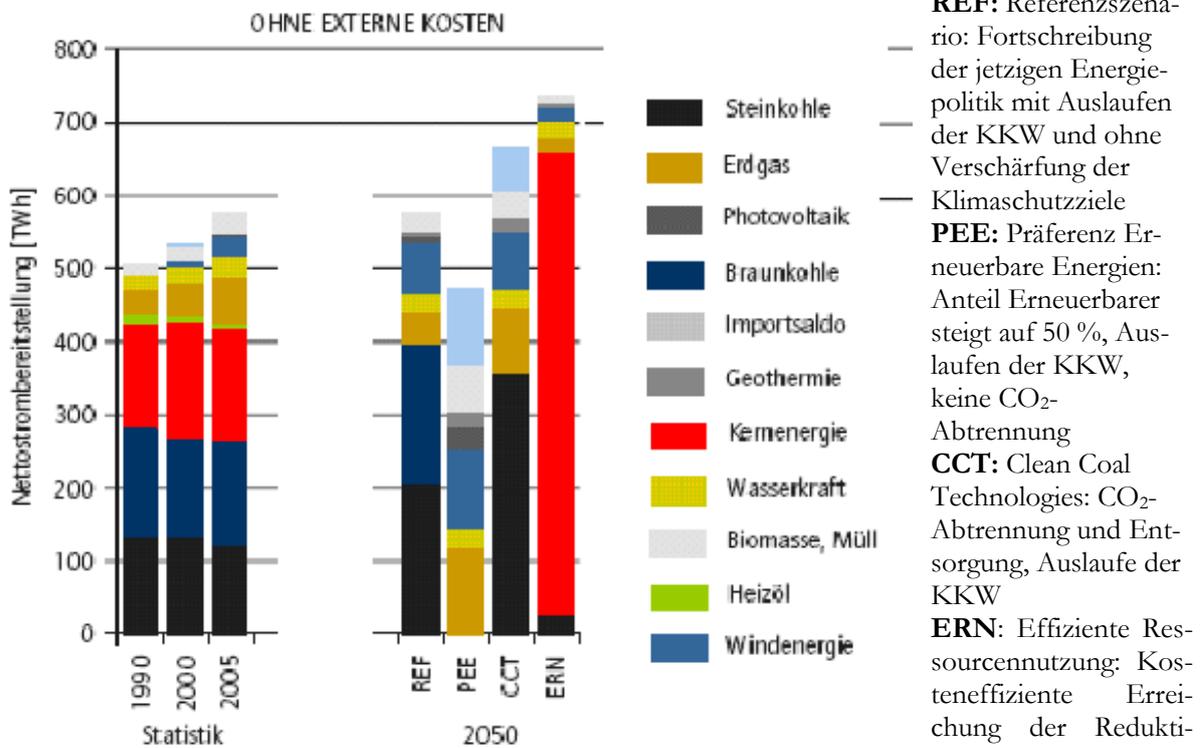


Abb. 4: Vision der KKW-Befürworter in einer Studie, genannt „Wege zur nachhaltigen Energieversorgung“ (leicht verändert nach Voß 2006a: 19)

Für die KKW-Befürworter, aber auch jene, die der Kohle neuen Auftrieb versprechen, indem sie die Abtrennung und Speicherung des CO₂ versprechen (Carbon Capture and Storage, CCS), ist es nicht nur eine Frage des mengenmäßigen Verhältnisses von fossilen Energien, Kernkraft und erneuerbaren Energien. Es geht um die Grundstruktur der Energieversorgung. Es geht darum, wie jetzt die Weichen für die Energieversorgung der nächsten Jahrzehnte (und damit unsere Klimazukunft) gestellt werden. Über die Hälfte der Energieanlagen müssen sowieso erneuert werden, dies betrifft auch viele Netze. Der Übergang zu erneuerbaren Energien würde ein völlig anderes technische Energiemanagement auf Basis völlig anderer „intelligenter“ (Gleichspannungs-)Netze benötigen als diejenigen der traditionellen Energiewirtschaft. Wenn diese Umstellung nicht innerhalb der nächsten zwei Jahrzehnte geschieht, wird es für die Erneuerbaren rein technisch schwer, in die Netze zu kommen; dieser Weg könnte verbaut werden durch eine falsche Energiepolitik jetzt.

1.3 Skepsis von anderer Seite

Und trotzdem kommen skeptische bis kritische Äußerungen auch von anderer Seite. Hier geht es um die Befürchtung, dass eine Umstellung auf erneuerbare Energien nicht mehr gelingen wird, weil diese Umstellung selbst viel Energie und Ressourcen verbraucht, die selbst noch auf nicht erneuerbarer Grundlage zur Verfügung gestellt werden müssen und eventuell nicht mehr bereit gestellt werden können.

„Solange Photovoltaik, Windenergie und Co. nur einen kleinen Teil des weltweiten Energieverbrauchs decken, sind sie auf die fossilen Energien angewiesen. Letztlich muss aber die gesamte Infrastruktur von fossilen auf erneuerbare Systeme umgestellt werden. Dazu braucht man eine Menge erschöpflicher Ressourcen. Tatsächlich sind die wenigen „Erneuerbaren“, die wir haben, mit den „Fossilen“ und der Wirtschaft, die daraus ihre Energie bezieht, bloß mitgewachsen. Allein auf sich gestellt können sie sich bis auf Weiteres nicht tragen.“ (Exner 2008)

„Im Extremfall würde man damit beginnen, auf breiter Front erneuerbare Systeme zu installieren, nur um auf halbem Wege zu erkennen, dass die erschöpflichen Ressourcen, die man für die Fertigstellung braucht, nicht reichen.“ (Exner, Lenk 2008: 9)

Was bedeutet das? Sollten wir auf den Übergang zu erneuerbaren Energien verzichten? Wohl eher nicht. Wichtig ist die Botschaft, dass es gefährlich wäre, auf die Versprechungen einer rein technisch orientierten Energieumstellung zu vertrauen, sondern dass weitere Einflussfaktoren in Betracht gezogen werden müssen. Außerdem muss es darum gehen, die Wachstumstendenz in Frage zu stellen. Es ist bekannt, dass der Energieverbrauch in den Industrieländern viel stärker steigt als die allgemeine Lebenszufriedenheit. Wenn dagegen mehr und mehr Energie verbraucht, also in Form von niederwertiger Wärmeenergie wieder abgegeben wird, wird sich allein dadurch in den nächsten Jahrzehnten die Atmosphäre aufheizen. (siehe Kapitel 3.1)

Im Folgenden soll es nicht um die politökonomischen und anderen gesellschaftlichen Zusammenhänge gehen, sondern um die Sachlage bezüglich Energie- und Ressourcenverbrauch und der Klimaschädlichkeit der erneuerbaren Energien, speziell der Photovoltaik.

2 Zu den Fakten!

2.1 Life Cycle Analyse

Die sog. „Nachhaltigkeit“⁵ ist seit den 90er Jahren ein oft genanntes und ebenso oft vernachlässigtes Kriterium für verantwortbare Entwicklungsziele. Wenn neue Produkte und Technologien entwickelt werden wird deshalb nicht mehr nur auf die Kosten geschaut, sondern für fast alle Dinge gibt es mittlerweile auch Analysen darüber, welche Beeinflussungen das Produkt während seiner Herstellung bzw. seinem Gebrauch und auch nach seiner Lebenszeit mit sich bringt. Solche Analyse werden „Life Cycle“-Analysen (LCA) genannt. Für die PV geht es dabei darum, „im Sinne der Nachhaltigkeit optimierte Solarzellen unter Betrachtung des gesamten Lebensweges von der Rohstoffherstellung bis zum Recycling“ (Springer 2003: 69) zu entwickeln. Verfahren zur Analyse der Nachhaltigkeit sind beispielsweise die Ökobilanz, die Produktlinienanalyse, die Ganzheitliche Betrachtung von Energiesystemen und die Ganzheitliche Bilanzierung.

⁵ Die UN-Weltkommission für Umwelt und Entwicklung veröffentlichte 1987 den als „Brundtland-Report“ bekannt gewordenen Zukunftsbericht „Unsere gemeinsame Zukunft“. In diesem wurde das Leitbild einer „nachhaltigen Entwicklung“ verkündet. Nachhaltig ist demnach eine „Entwicklung, die die Bedürfnisse der Gegenwart befriedigt, ohne zu riskieren, dass künftige Generationen ihre eigenen Bedürfnisse nicht befriedigen können“.

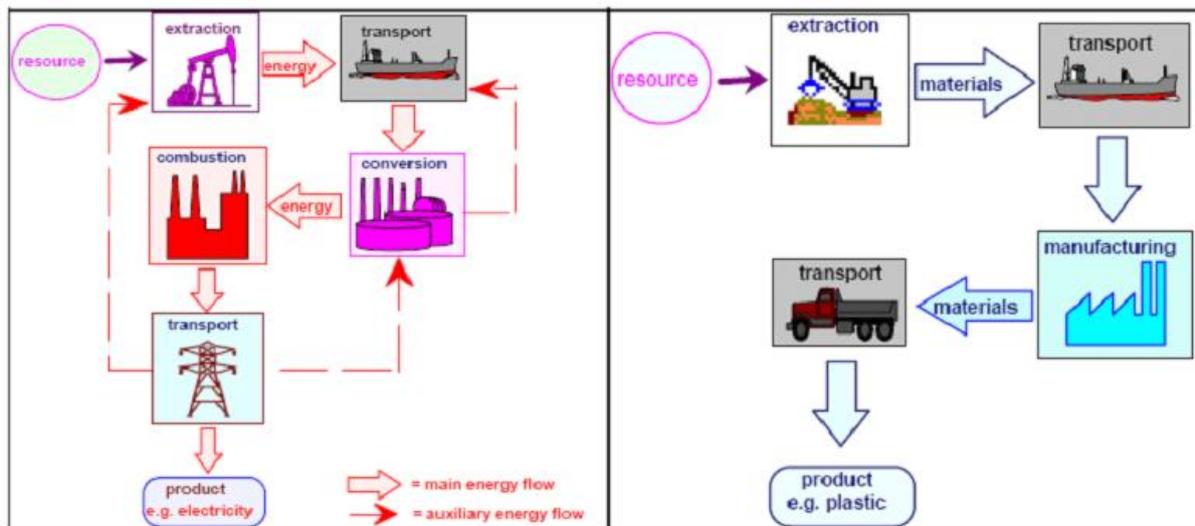


Abb.5: Life-Cycle-Analysen für Energieprodukte (links) und stoffliche Produkte (rechts) (Fritsche 2006: 2)

Ein großes Problem der LCA ist, dass sie der Entwicklung in dynamischen Bereichen hinterherhinken. Die Datenerhebung erfolgt zu einem bestimmten Zeitpunkt, die Auswertung benötigt dann eine gewisse Zeit und die Ergebnisse werden bekannt gegeben, wenn die Entwicklung unter Umständen längst neue Tatsachen geschaffen hat. Besonders für die PV ist zu sagen, dass sie sich nach den Pionierjahren in den 60ern und 70ern, in der es ohne viel Sorgen um Kosten oder Umweltbilanz nur darum ging, sie zum Laufen zu bringen (und z.B. in der Raumfahrt nutzbar zu machen). In den 80ern stagnierte dieser Bereich und erst ab den 90ern begann die industrielle Umsetzung der Prozessschritte, die aber erst seit 2000 wirklich auswertbare Massenproduktionsmaßstäbe entfalten. Mit der Ausweitung der Menge entstanden aber auch immer vielfältigere unterschiedliche Solarzellenkonzepte auf Siliziumwafer-Basis sowie Dünnschicht- und weitere „exotische“ Solarzellen- und Technologiekonzepte. Diese können in den neueren Analysen zur Massenproduktion noch nicht enthalten sein.

Die Problematik dieser Situation zeigt sich ganz deutlich in den immer wieder zitierten Umwelt- und Energiebilanzen für PV, die ihre Quellen in den 1990er Jahren haben und Daten aus den 80er Jahren auswerten. Für gegenwärtige oder zukünftige Entwicklungen sind diese Inhalte fast völlig wertlos. Was sich hier speziell verändert hat, diskutiert z.B. Fthenakis (2005). Er schlägt vor, dass bei LCA jeweils unterschiedliche neue technische Optionen für einen 3-5-Jahreszeitraum untersucht werden, dass Lernkurven⁶ berücksichtigt werden und dass auch die sich durch die Ausweitung der Erneuerbaren Energien veränderte Struktur des in der Produktion verwendeten Energiemixes einbezogen werden muss.

Kommen wir nun zu inhaltlichen Schwerpunkten einer solchen Life Cycle Analyse, die auch den Schwerpunkten der o.g. häufigsten Kritikpunkte entsprechen.

2.2 Energieverbrauch

Natürlich ist eine wichtige Kenngröße die Energiemenge, die bei der Herstellung der Technik für die PV gebraucht wird. Als Kennziffer gibt es die *energetische Amortisationszeit* oder auch die „*Pay-back-Time*“, bei der der energetische Herstellungsaufwand durch die jährliche Energielieferung dividiert wird. Das ist die Zeit, in der die PV-Anlage, die Energie, die zu ihrer Herstellung gebraucht hat, „zurückgezahlt“ hat. Wenn man die gelieferte Energiemenge durch die zur Herstel-

⁶ Es geht hier darum, dass mit der Ausweitung der Produktion zuerst neuer Produkte und der Verwendung neuer Verfahren im Verlaufe der Zeit die Produktivität und die Qualität steigt. Dabei wirken Skaleneffekte (erst mit großen Mengen wird die Produktion effizienter) und Erfahrungs- und Lerneffekte gleichzeitig.

lung verwendete Energie dividiert, erhält den *energetischen Erntefaktor*. Er sagt aus, wieviel mal mehr Energie die Anlage erzeugt, als ihre Herstellung verbraucht hat.

Aktuelle Werte für die verschiedenen Solarzellentypen (VDI 2008) sind in der Tab. 1 dargestellt.

Solarzellentyp	Energetische Amortisationszeit
monokristallines Silizium	4,6 Jahre
multikristallines Silizium	3,2 Jahre
amorphes Si	2,3 Jahre
CIS (Kupfer-Indium-Selenid)	1,3 Jahre

Tab. 1 : Energetische Amortisationszeiten für Solarzellen

Ein weiteres Jahr muss für das Montagesystem und den Wechselrichter ergänzt werden. Einen deutlichen Einfluss hat natürlich auch der Einsatzort der PV; die angegebenen Werte entsprechen i.a. den optimalen Einsatzorten im südlichen Europa, für Mitteleuropa sind diese Werte höher.

Es sollte auch berücksichtigt werden, dass zentralisierte PV-Energieerzeugungsanlagen (wie große „Solarfarmen“) dreimal mehr Energie verbrauchen als dezentralisierte. (Pearce, Lau 2002)

Der höchste Energieaufwand wird bei der Herstellung des Siliziums für Silizium-Solarzellen aufgebracht. Hier gibt es also auch die besten Chancen der Einsparung, die gegenwärtig auch aktiv verfolgt werden.

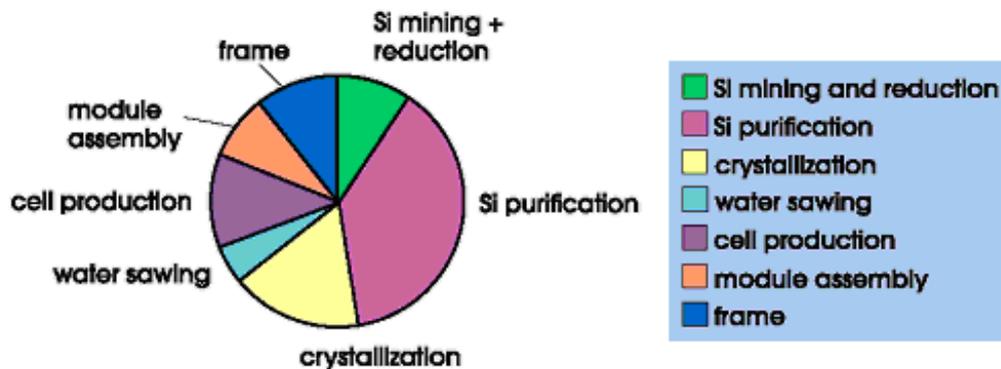


Abb. 6: Verteilung des Energieaufwandes für die einzelnen Herstellungsschritte (CrystalClear : 11)⁷

Die Herstellung von Solarzellen in Großproduktion (30-100 MWp/a) verringert den Energie- und Wasserverbrauch um 10 %. (Alsema, de Witt-Scholten 2004: 2) Energieoptimal wäre also eine Herstellung der Solarzellen in Großproduktion, die Erzeugung des Siliziums auf Kosten von erneuerbarer Energie (beispielsweise unter Nutzung von viel Wasserkraft in Norwegen) und eine dezentrale Nutzungsform der PV.

⁷ Eine etwas andere Darstellung siehe Alsema, de Wild-Scholten 2007a: 2.

Durch die Senkung des Energieverbrauchs bei der Siliziumherstellung, die Senkung Siliziumanteils im Wafer, durch Wirkungsgradsteigerung und verbesserter Energieeffizienz in den Prozessschritten konnte die energetische Amortisationszeit immer weiter gesenkt werden.

Wie wir sehen, verbrauchten die aller ersten Solarzellen tatsächlich mehr Energie, als sie selbst erzeugten. Das lag an der labormäßigen Herstellung und der Verwendung in der Raumfahrt, bei der es nicht um Energieeffizienz gehen konnte, sondern darum, dass überhaupt solare Energie bereitgestellt wird.

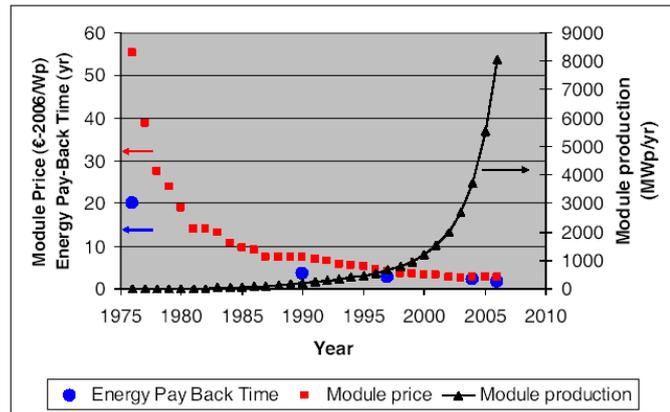


Figure 1: Historical development of module prices (squares, left y-axis, €-2006/Wp), production volumes (triangles, right y-axis: MWp/yr) and Energy Pay-Back Time (circles, left y-axis, yr). Sources: refs. [1-8]

Abb. 7.: Entwicklung der Modulproduktion (schwarz), der energetischen Amortisationszeit (blau) und der Modulpreise (rot) (Alsema, de Wild-Scholten 2007b: 2)

2.2.1 Vergleich der PV-Technologien

Die folgende Abbildung zeigt Energierückgewinnungszeiten für verschiedene Solarzellentypen.

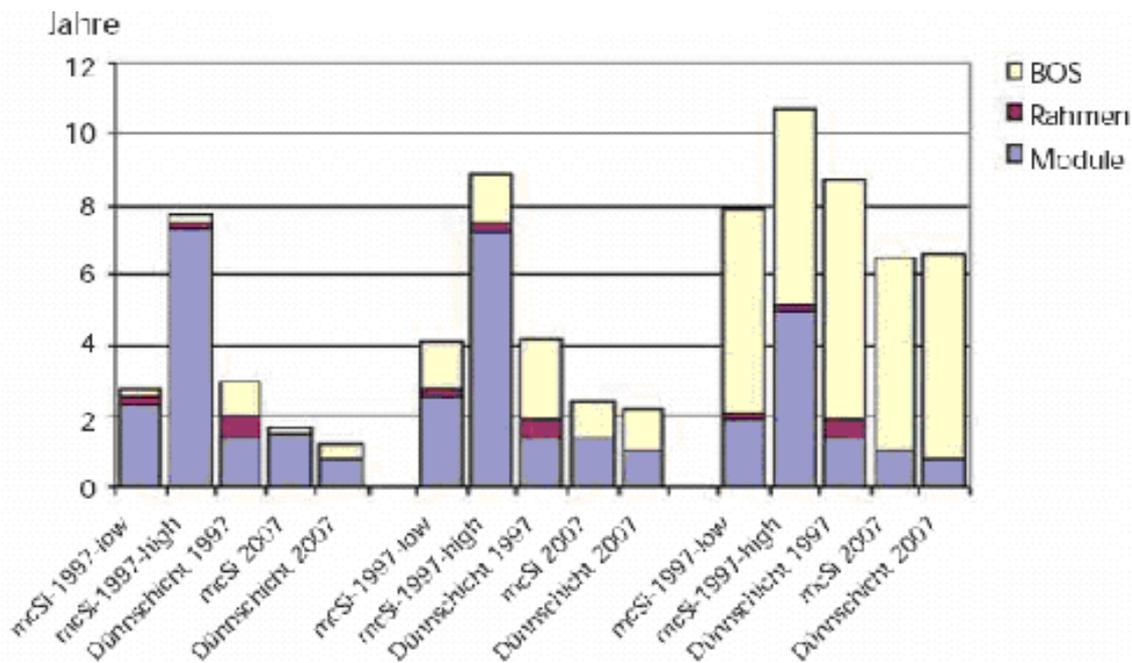


Abb. 8: Energierückgewinnungszeiten für Solarzellentypen (aus Springer 2003: 67) BOS sind die balance-of-system components, d.h. die nicht-photovoltaischen Teile der Solaranlage, wie Wechselrichter und Generatoren sowie bauliche Einrichtungen. „low“ steht für optimistische, „high“ für pessimistische Annahmen.

Wir sehen, dass Dünnschichtzellen weniger Energie zur Erzeugung der Kernkomponenten benötigen als multikristalline Siliziumzellen (mc-Si). Allerdings kompensiert der geringere Wirkungsgrad und die Montagestrukturen diesen Vorteil teilweise. Bei der Herstellung von CIS-Zellen sind hohe Luftreinheitsforderungen zu erfüllen. Die Luftaufbereitung erfordert viel Energie (42 % des Energiebedarfs!), so dass dadurch die Energiebilanz für CIS-Module negativ beeinflusst wird (Nitsch u.a. 2004: 93).

Durch die weiteren technischen Entwicklungen ist jedoch eine weitere Senkung des Energiebedarfs im Verlaufe der Zeit zu erwarten. Es wird erwartet, dass dieser Wert sich in den nächsten 3 bis 5 Jahren noch auf unter 1 Jahr verringert und damit vergleichbar wird mit der Windenergie.

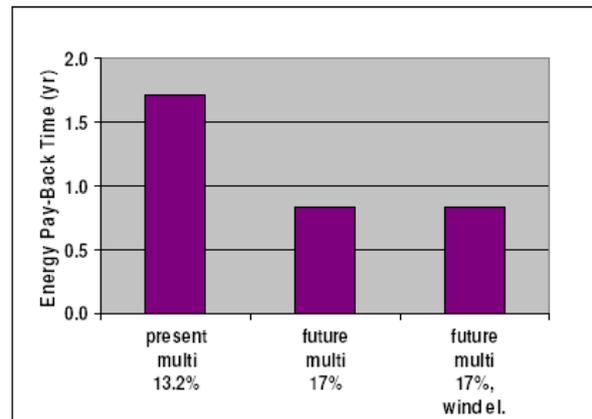


Abb. 9: Mögliche Entwicklung der Energie-Payback-Time (Alsema, de Wild-Scholten 2007a: 7)

Wie die Abbildung 6 zeigt, betrifft ein großer Teil des Energieverbrauchs die Siliziumherstellung. Mit dem Wachstum der Solarindustrie ist es nicht mehr möglich, wie bisher Silizium mit geringeren Reinheitsgraden aus der Elektronik-Siliziumproduktion abzuzweigen, sondern es werden eigene Wege zur Herstellung von Solarsilizium entwickelt (z.B. Aulich, Schulze 2005) und entsprechende Produktionskapazitäten aufgebaut (siehe 2.5.3). Einerseits erfordert Solarsilizium nicht so hohe Reinheitsgrade wie Elektroniksilizium und in den neuen Entwicklungen wird andererseits von vornherein auf energiesparende Technologien Wert gelegt. Dies ist vor allem auch deshalb möglich, weil das Solarsilizium nicht so rein sein braucht wie das Elektroniksilizium. Die energetisch günstigste Variante ist nach einer Analyse von de Wild-Scholten (2008: 2) der von ELKEM in Norwegen entwickelte Prozess (vgl. Glockner u.a. 2008).

Durch den geringeren Energieverbrauch bei der Herstellung des Siliziums kann eine Solarzelle aus diesem Silizium 5% mehr Energieertrag in der gesamten Lebenszeit erbringen. (Peter et al. 2005: 1)

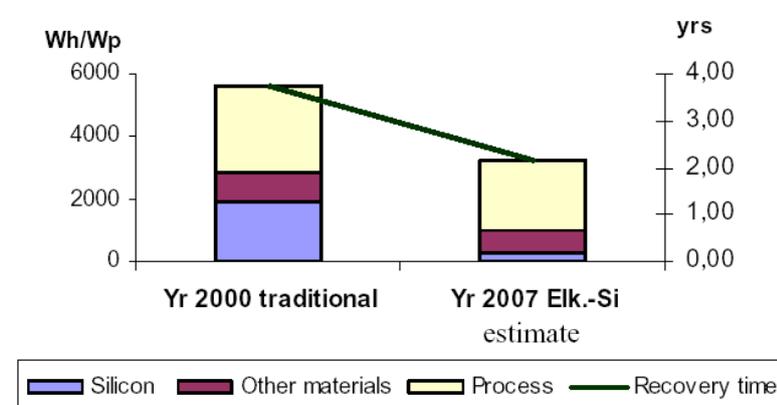


Abb. 10: Energieverbrauch und Paybackzeit bei Elkem-Silizium (Peter et al. 2005: 1)

Der Produktionsstandort Norwegen ist außerdem optimal, weil der norwegische Energiemix aus einem sehr hohen Wasserkraftanteil besteht, was ökologisch und nicht klimabelastend ist.

15 % der im Prozess abfallenden Wärme soll außerdem zurückgewonnen und in die benachbarte Stadt Kristiansand geliefert werden.

In Abb. 26 (siehe unten) wird deutlich, dass durch diese neuen Technologien auch die mit der Herstellung der PV- Anlagen verbundenen Klima- und Umweltschäden ungefähr halbiert werden können.

Ein anderer Vergleich zeigt, dass die CdTe-Solarzellen den niedrigsten Energieverbrauch haben.

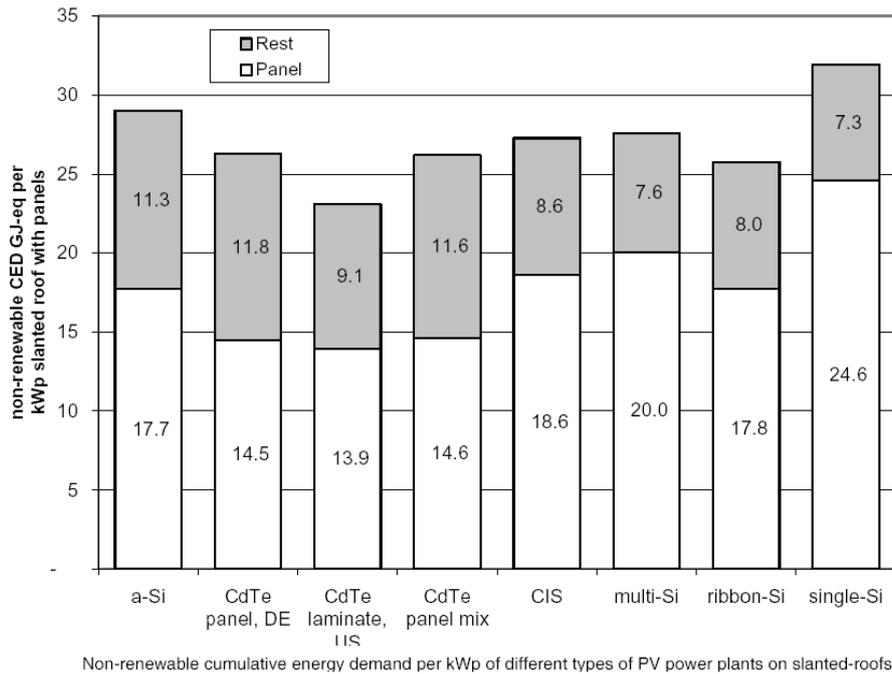


Abb. 11: Kumulativer (nicht erneuerbarer) Energieverbrauch (Jungbluth u.a. 2008: 12)

2.2.2 Vergleich der Energietechnologien

Kommen wir nun zu einem Vergleich der PV mit anderen Energieerzeugungstechniken. Hier sieht es erst einmal für die Photovoltaik sehr negativ aus:

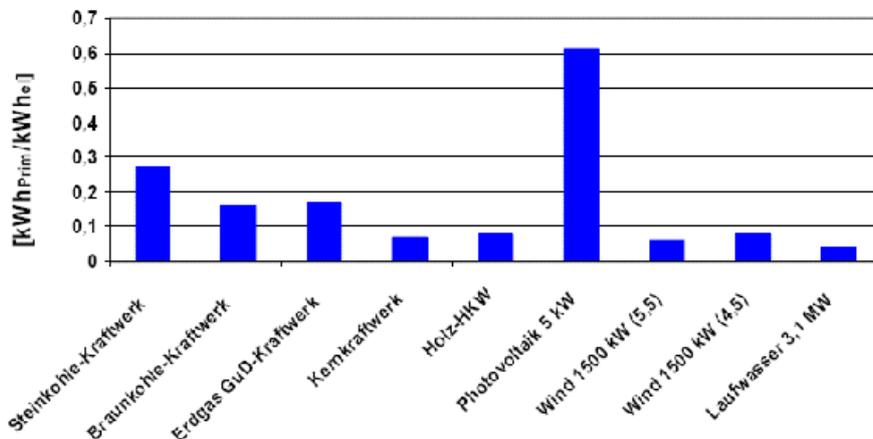


Abb. 12: Spezifischer kumulierter Energieaufwand⁸, ohne Einsatz des Brennstoffs (Voß 2008: 50, vgl. auch Mayer-Spohn u.a. 2006: 4) Wind unterschieden nach onshore (4.5) und offshore (5.5).

Die PV verbraucht pro erzeugter kWh Energie am meisten Energie – verglichen mit konventionellen und auch anderen erneuerbaren Energiequellen. Es wird geschätzt, dass sich dieser Wert für kristalline Si-Module im Jahr 2010 noch bis auf 0,25 kWh_{prim}/kWh_{el} verbessern könnte. (Kruck, Eltrop 2007: 185)

Wenn wir den Brennstoffeinsatz mit berücksichtigen, sieht das Bild schon anders aus:

⁸ Spezifischer kumulierter Energieaufwand der Stromerzeugung: Gesamtheit des primärenergetisch bewerteten Aufwands zur Herstellung, Nutzung und Entsorgung der jeweiligen Anlage in Bezug zur Stromerzeugung.

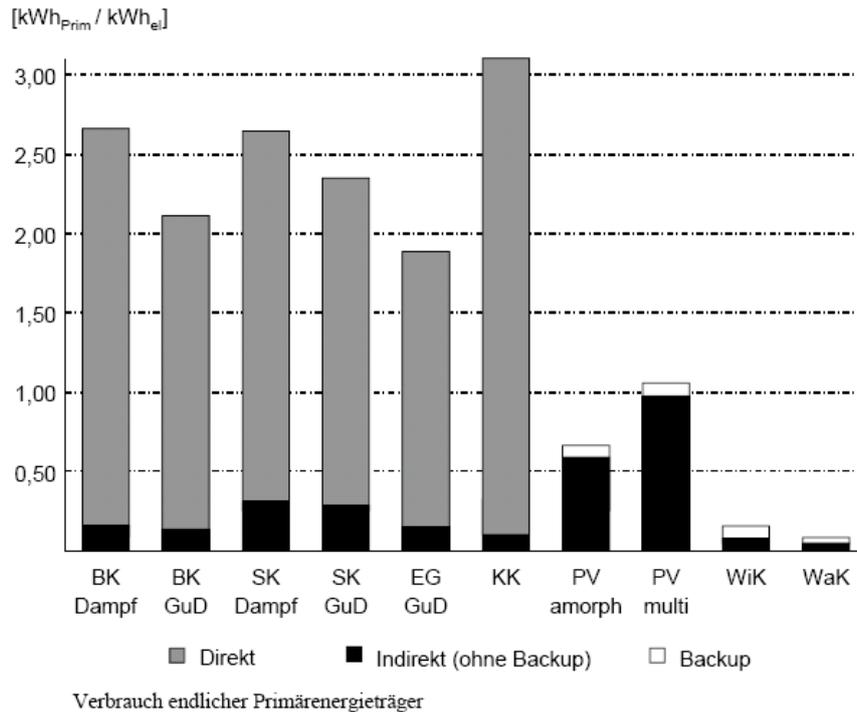


Abb. 13: Verbrauch endlicher Primärenergieträger (Marheineke 2002: 120). Die „direkten“ Anteile (grau) entsprechen dem Brennstoffeinsatz, indirekte Anteile enthalten z.B. auch den Transport der Steinkohle und das Backup bezieht sich auf zusätzliche Einrichtungen zur Speicherung der erneuerbaren Energie. (KK: Kernkraft, WiK: Windkraft, WaK: Wasserkraft)

Es bleibt aber festzuhalten, dass die PV die energieintensivste erneuerbare Energietechnik ist. Dies ist sachlich dadurch begründet, dass die Sonnenenergie zwar letztlich in Überfülle auf unsere Erde strahlt, sie aber im Vergleich zu anderen Energieformen eine geringe Energiedichte hat und der Herstellungsaufwand für PV-Anlagen doch recht hoch ist.

2.2.3 Energiebilanz

Sollte sich die in Abb. 2 gezeigte Entwicklung der PV – auch gegenüber den anderen erneuerbaren Energien – durchsetzen, so ist tatsächlich zu fragen, woher die Energie für die Herstellung der PV kommen soll. Da der massive Ausbau erst nach 2040 erwartet wird, kann davon ausgegangen werden, dass der jeweils erreichte Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien auch den für die Herstellung verwendeten Energiemix so verändert, dass immer mehr erneuerbare Energie selbst dafür verwendet wird. In Ansätzen geschieht dies heute schon, wenn wir uns die Siliziumproduktion in Norwegen ansehen, wo die Wasserkraft genutzt wird. Grundsätzlich ist es also durchaus möglich, in angemessenen Zeiträumen den Energiemix immer mehr in Richtung Erneuerbare zu schieben und davon den PV-Boom auch energetisch „zu bezahlen“.

Zu beachten ist aber, dass dies nicht nur eine Frage globaler Zahlen sein kann, sondern – ganz typisch für erneuerbare Energien – es kommt auf die jeweilige günstige Kombination von Standort, Herstellungstechnologie und Einsatzweise an. Die besonders energieintensiven Technologien müssen an Standorten mit viel erneuerbarer Energie stattfinden (in Norwegen passt es sehr gut, weil es hier auch sehr gute Quarze gibt). Die Produktion muss in energieeffizienter industrieller Großproduktion erfolgen, aber der Einsatz von PV sollte vorwiegend von dezentralen Orten aus, speziell auch für nicht netzangeschlossene Nutzer geplant werden.

Ob der Übergang zu einem akzeptablen Energiemix aus mehrheitlich erneuerbaren Energien gelingt, oder ob vorher bereits die fossilen Ressourcen „ausgehen“, ist eine Frage der Einschät-

zung der Perspektive der fossilen Energieträger. Die Energy Watch Group⁹ erwarteten den Peak Oil (das Ende des globalen Ölfördermaximums) für 2006 und das Erdölgeologen-Netzwerk für 2010 (nach Fell 2007: 145).

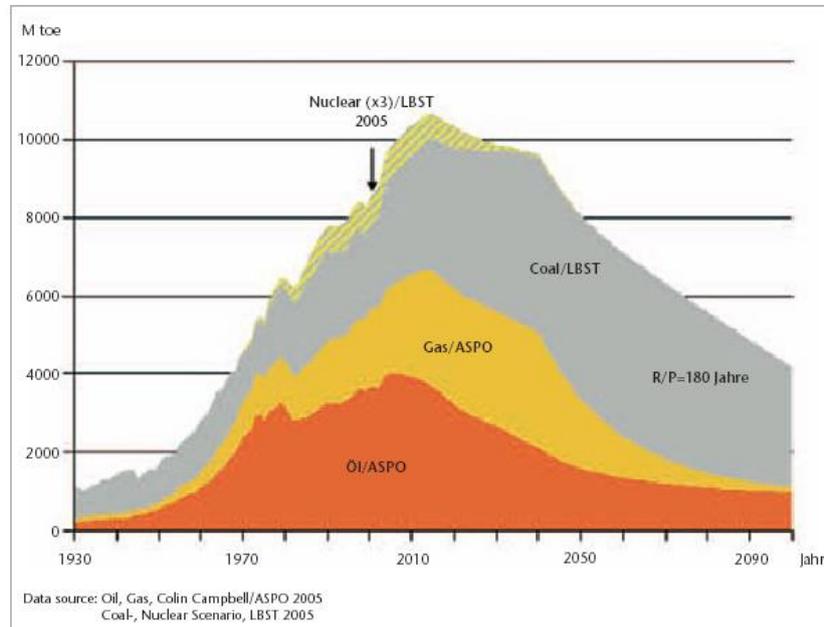


Abb. 14: Peak Oil nach der ASPO (Association for the study of Peak Oil and Gas) (Abb. aus Fell 2007: 149)

Andere betonen, dass bisher die Ressourcen¹⁰ immer angewachsen sind statt gefallen:

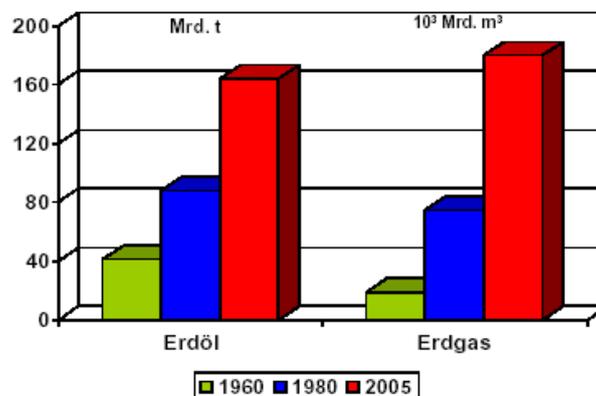


Abb. 15: Entwicklung der sicher gewinnbaren Ressourcen (Voß 2008: 47)

Demnach konnten immer wieder neue Lagerstätten gefunden werden und die vorhandenen Lagerstätten besser ausgebeutet. Die Weltölreserven sollen sich seit 2000 um 25 % erhöht haben und seit 1980 mehr als verdoppelt (Frondel u.a. 2007: 14). Das liegt auch daran, dass beispielsweise in der Nordsee nicht mehr nur in 75 m Tiefe gefördert wird, sondern in 400 m Tiefe und im Golf von Mexiko inzwischen das Öl aus einer Tiefe von 1 400 m geholt wird (ebd.: 16)¹¹. Eine Begründung für die bisher stets mögliche Ausweitung der Ressourcen wird von einigen auch darin gesehen, dass die Theorie von der biogenen Entstehung des Erdöls nicht stimmt. (vgl. Rothe 2009) Es stimmt auch nicht, dass steigende Preise automatisch andeuten, dass das Öl knapper würde, bzw. die Ausbeutung immer kostenintensiver und uneffektiver würde.

⁹ Der Träger der Energy Watch Group ist die Ludwig Bölkow Stiftung.

¹⁰ Ressourcen sind nachgewiesene Lagerstätten und Reserven sind jener Teil, der gegenwärtig wirtschaftlich genutzt werden kann. (mehr dazu siehe Kapitel 2.5.1).

¹¹ Zur Veränderung der Erdölreserven siehe auch Müller 2009.

Bei Rohstoffen gibt es oft jahrzehntlang stabile Tendenzen wie z.B. Preisanstiege, die dann aber „zurückschwingen“, weil in der Rohstoffwirtschaft sehr starke Preisimpulse nötig sind, um neue Fördergebiete zu erschließen, was dann aber aufgrund der enormen Profiterwartungen auch geschieht.

Da ich diesen Text 2009 schreibe, fällt es mir auch leicht, den bisherigen „Beweis“ der anwachsenden Preiskurve für Öl durch den inzwischen begonnenen Fall zu falsifizieren. Aber auch das ist keine Entwarnung, denn die „Talsole“ ist noch viel höher als beispielsweise nach der letzten großen Krise.



Abb. 16 : Aktueller Preisverfall beim Öl (Borbél y 2009)

Sogar wenn wir die pessimistische Peak-Oil-Annahme teilen, befinden wir uns nach 2010 zwar im Bereich abnehmender Fördermengen, jedoch sollten die „Reste“ in den folgenden Jahrzehnten durchaus reichen, um die Umstellung auf erneuerbare Energien zu ermöglichen. Es ist ja nicht von heute auf morgen mit einem völligen Versiegen aller Quellen zu rechnen. Allerdings werden dann Erwartungen auf ein weiteres Wirtschaftswachstum obsolet und ob ein Umschwenken auf erneuerbare Energie eventuell an nicht mehr ausreichenden Ressourcen dafür scheitert, ist Gegenstand dieser Analyse.

2.2.4 Emergiebilanz

Nein, es ist kein Tippfehler, dass hier nicht „Energie“ (im Englischen „energy“) steht, sondern Emergie („emergy“). Dieser Begriff¹² wurde von Odum (1996) eingeführt, und ist ein Maß für die Energie, die bei der Herstellung eines Gegenstands aufgebracht wurde, also quasi ein „Energiegedächtnis“. Als Quellen für Emergie gelten nur die erneuerbaren Energien (Sonne, Gezeiten, Tiefenwärme) (Odum 1998).

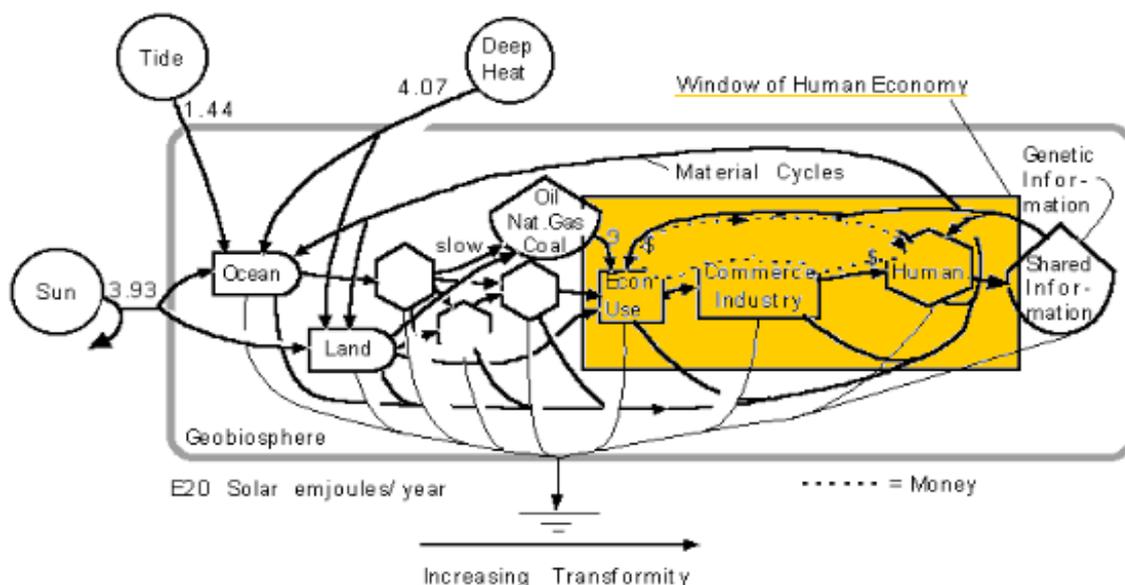


Abb. 17: Emergiebilanz und der darin enthaltene Bereich menschlicher Wirtschaftsrechnung (Odum 1998)

¹² Zur Geschichte dieses Begriffs siehe auch Cleveland 1999.

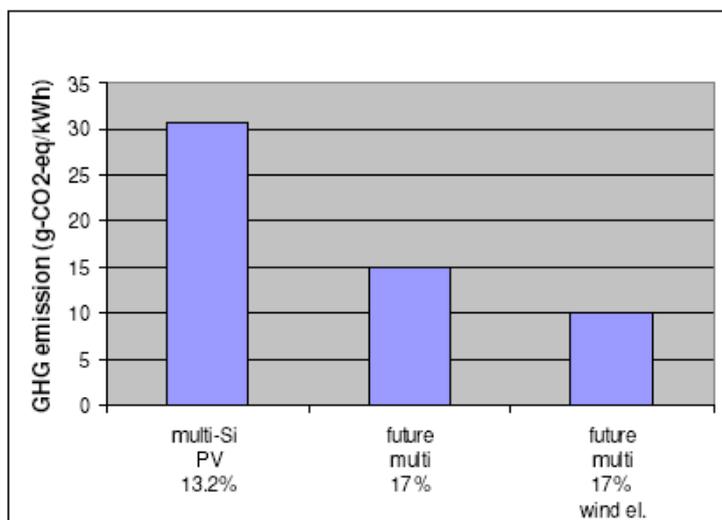
In eine Embodied Energybilanz für PV-Anlagen gehen deshalb auch die Energiekosten für Herstellung der Fabriken, der Ausrüstungen, des Bergbaus für die Rohstoffe und der Instandhaltung und Wartung ein. Mit solch einer Bewertung stellte Trainer (2004) fest, dass ein Solarmodul ein Viertel der Lebenszeit nur für die bei seiner Herstellung verbrauchte Energie arbeitet.

2.3 Klima-, Umwelt- und Gesundheitsschäden

2.3.1 Klimaschädlichkeit

2.3.1.1 Vergleich innerhalb der PV-Technologien

Natürlich muss auch für die PV-Technologie ermittelt werden, welche Einflüsse durch ihre Nutzung bei den Treibhausgasen entstehen. Diese Einflüsse werden immer in CO₂-Äquivalente angegeben. Im Verlaufe der enormen Entwicklungen im Bereich Kostensenkung, Wirkungsgradsteigerung und damit auch Energieeffizienz verbesserte sich auch diese Bilanz in den letzten Jahren und es wird erwartet, dass es noch ein starkes Potential zur Verbesserung gibt.



So können die klimarelevanten Emissionen für multikristalline Siliziumsolarmodulen noch halbiert werden. Emissionen von jetzt 30 kg/kWh können gesenkt werden auf 15 kg/kWh (und bei Verbesserung des Energiemixes auf 10 kg/kWh) (Alsema, de Wild-Scholten 2007a: 6)

Abb. 18: Entwicklung der Treibhausgasemissionen von mc-Siliziummodulen (Alsema, de Wild-Scholten 2007a: 7)

Ein Vergleich zeigt, dass neuere Techniken (Ribbon-basierte Siliziumzellen, Cadmium-Tellurid-Zellen (CdTe) und Konzentratorzellen auf Grundlage GaInP/GaAs noch niedrigere Emissionen haben.

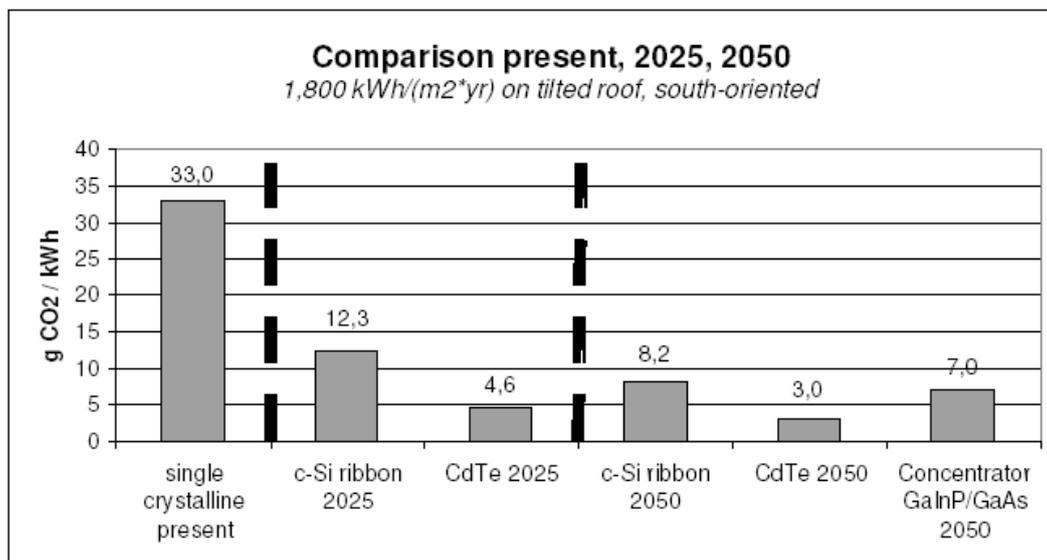
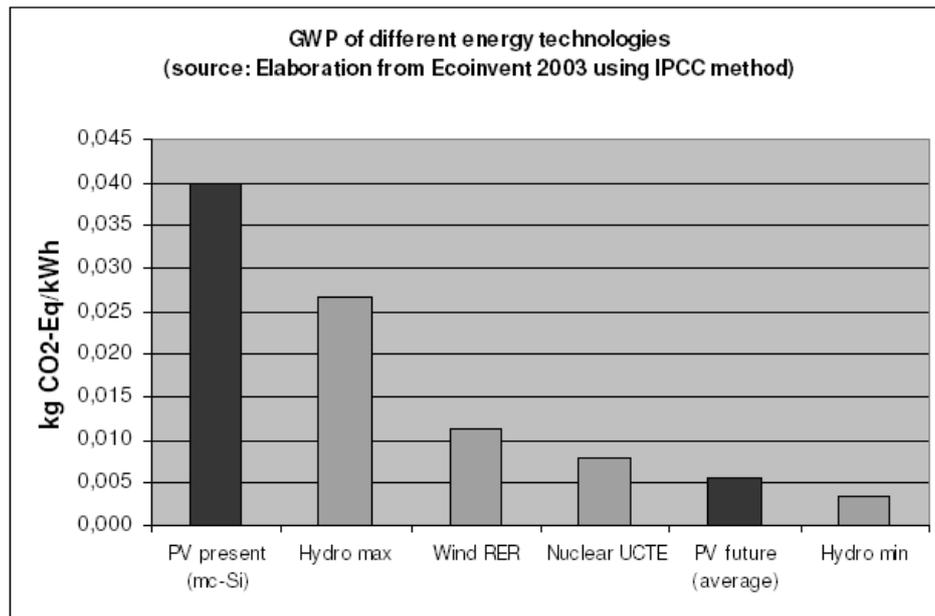


Abb. 19: Treibhausgasemissionen verschiedener Solarzellentypen (Raugei u.a. 2007: 18)

2.3.1.2 Vergleich der Energietechnologien

Wir sehen also, dass die Herstellung der PV-Anlagen durchaus nicht emissionsfrei und völlig klimaunschädlich ist. Deshalb wird sogar kritisch nachgefragt, ob die Photovoltaik eventuell selbst ein „Klimakiller“ ist (Sollmann 2008). „Ausgerechnet bei der Herstellung von Dünnschichtmodulen werden die stärksten Treibhausgase eingesetzt.“ (ebd.) Kritisch sind hier vor allem chemische Verbindungen wie Fluor, SF₆, und NF₃, die giftig oder klimaschädigend sind, die z.B. bei der Reinigung nach Si-Abscheidungen eingesetzt werden.

Vergleichen wir nun wiederum die PV mit anderen Energietechnologien, so sieht das Ergebnis für die gegenwärtige Situation noch negativ für die PV aus, was sich aber für den zukünftigen Standard stark ändern kann.



For comparison (present):

Coal= 750 - 900 g CO₂/kWh; Gas CC = 400 g CO₂/kWh

UCTE mix = 454 g CO₂/kWh

Abb. 20: Vergleich verschiedener Energietechniken bezüglich Treibhausgasemissionen (Raugei u.a. 2007: 19)

Zu den Werten für Kernenergie ist zu ergänzen, dass in verschiedenen Studien die Werte zwischen 0,003 kg/kWh und 0,2 kg/kWh (Sovacool 2008: 7-8) schwanken. Nehmen wir in die Darstellung noch die fossilen Energien hinzu, die in der vorigen Abbildung nur genannt wurden, so sieht das Bild schon wesentlich günstiger für PV aus.

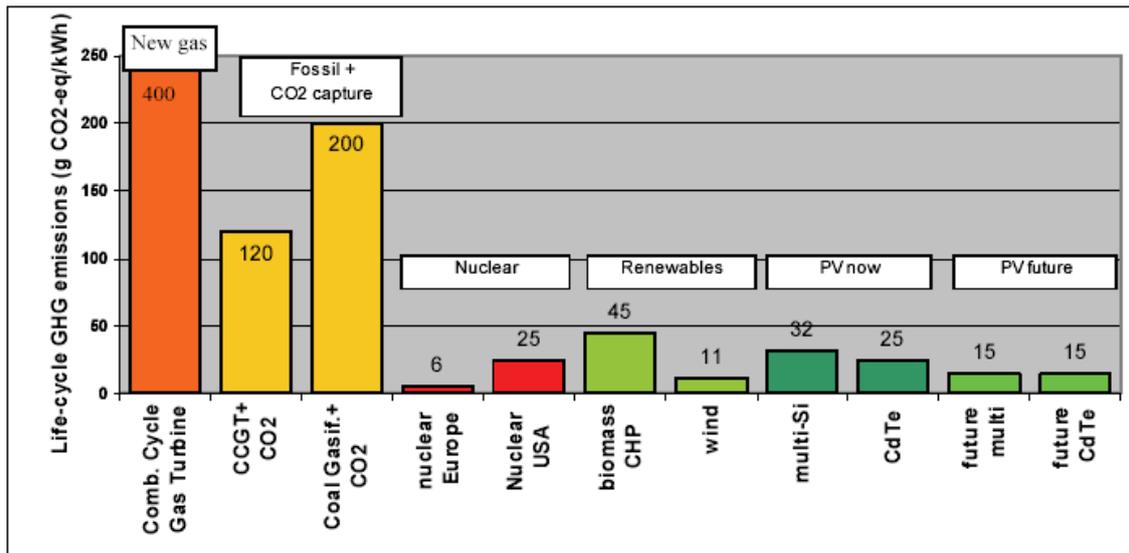


Figure 9: Comparison of GHG emissions of different energy supply options, PV systems installed in S.-Europe (Sources: [12, 13, 14])

Abb. 21: Vergleich verschiedener Energietechniken bezüglich Treibhausgasemissionen (Alsema, de Wild-Scholten, Fthenakis 2006: 6)

Für die entsprechenden Bilanzen für die verwendete Energie wird der im Herstellungsland verwendeter Energiemix berücksichtigt. In der BRD verursacht deshalb der hohe Anteil an fossiler Energie 63 % der gesamten CO₂-Emissionen beim Bau der PV-Anlage. (Marheineke 2002: 113) Die EU setzt sich neuerdings das Ziel, bis zum Jahr 2020 einen Anteil von 20% Erneuerbare Energien zu erreichen (EU 2007)

Mit der Verschiebung des Energiemixes in Richtung erneuerbare Energien verbessert sich diese Situation natürlich nach und nach. Außerdem wirken hier die – primär durch den Kostensenkungsdruck getriebenen – Bemühungen zur Verbesserung der Energieeffizienz im Herstellungsprozess besonders stark.

2.3.2 Umweltschädlichkeit

Es ist offensichtlich, dass eine Energieerzeugungsform, die sich als besonders umweltfreundlich darstellt, größtes Augenmerk auf die tatsächlichen Umweltfolgen ihrer Industrie legen muss. Dies zeigt sich z.B. in der „Clean and Just Solar Industry Initiative“, die durch die Silicon Valley Toxics Coalition 2009 initiiert wurde (SVTC 2009). Skandale, wie die verantwortungslose Entsorgung giftiger Nebenprodukte der Siliziumherstellung, die 2008 in China aufgedeckt wurden (Podewils 2008a) gefährden das Image der Branche.

Zur Umweltschädlichkeit der Prozesse, die bei der Herstellung der Anlagen der Energieerzeugung und ihre Nutzung entstehen, gibt es unterschiedliche Bilder. Eher entwarnend zeigt die folgende Abbildung die „gesamtökologische Belastung“ von Solarstrom im Vergleich zum schweizer und zum europäischen Strommix.

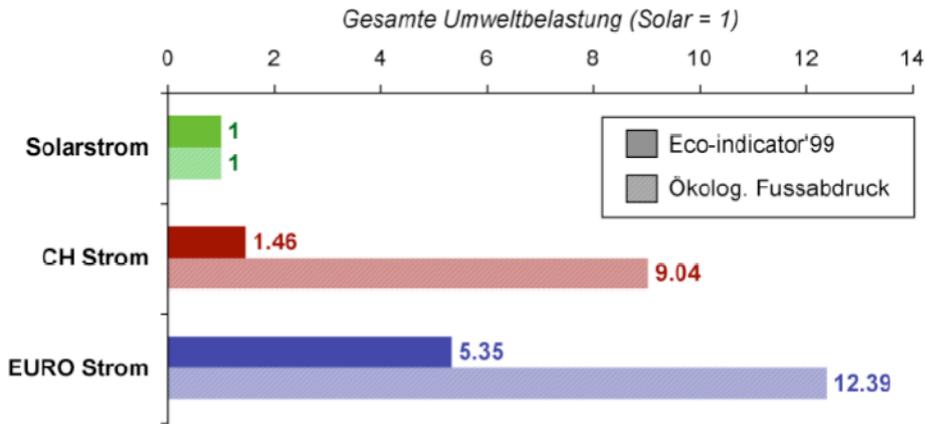


Abb. 3
gesamt-
ökologische
Belastung

Abb. 22: Die Gesamtökologische Belastung von Solarstrom im Vergleich zum gegenwärtigen Energiemix in der Schweiz und in Europa (Swissolar 2008: 2)

Gegenüber dem derzeitigen deutschen Strommix liegt die PV gut, sie führt nur zu Umwelteinwirkungen, die unterhalb des für 2010 zu erwartenden Strommixes liegen (Nitsch u.a. 2004: 91)

Stellen wir die anderen erneuerbaren Energien daneben, so schneidet die Photovoltaik nicht so gut ab.

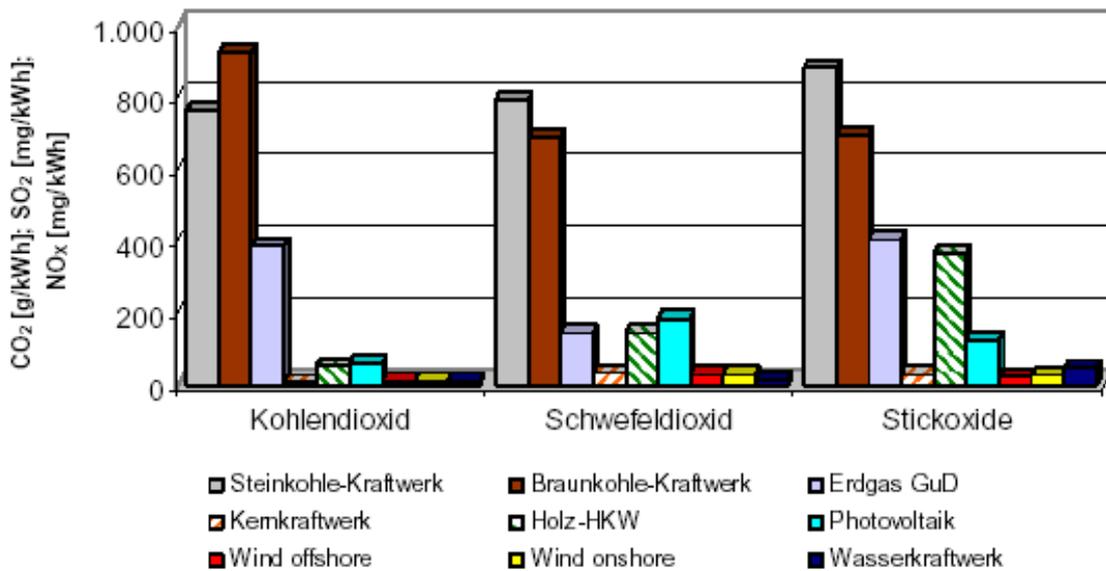
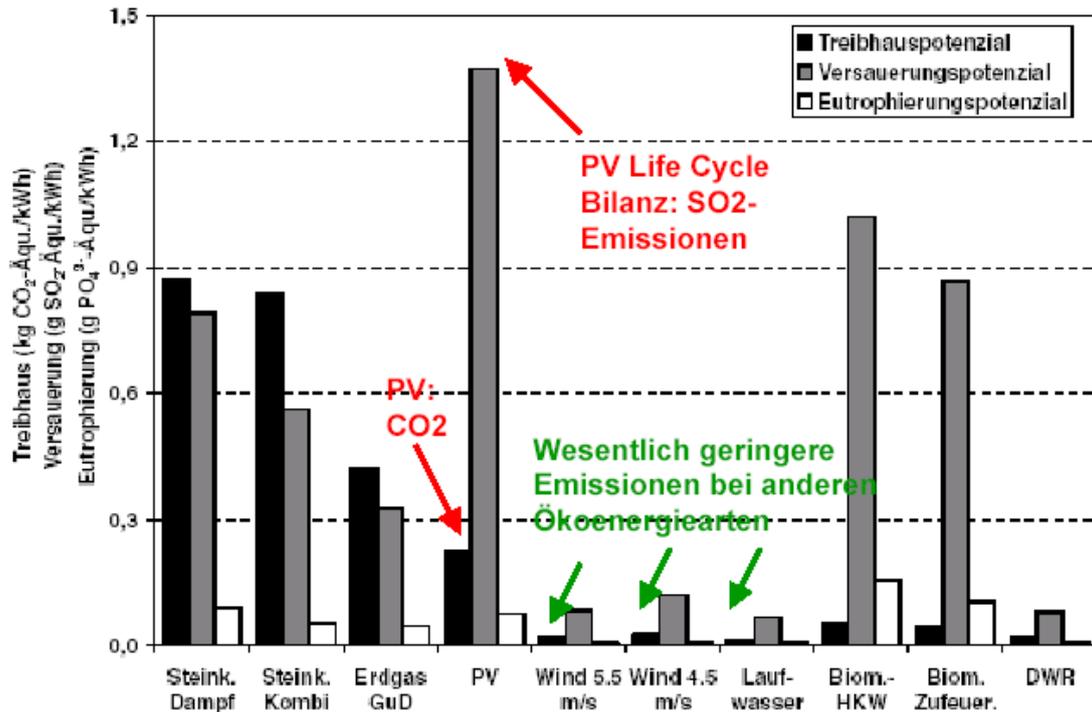


Abb. 23: Kohlendioxid-, Schwefeldioxid- und Stickoxid-Emissionen der Energieerzeugungstechniken (Kruck, Eltrop 2007: 186)

Man kann es auch so darstellen, dass besonders die SO₂-Emissionen der PV heraus stechen.



Quelle: Voß, A. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energienutzung, Universität Stuttgart, Juli 2002
 Abb. 24: Umweltauswirkungen der verschiedenen Energieerzeugungstechniken. (Bolz 2003: 16)

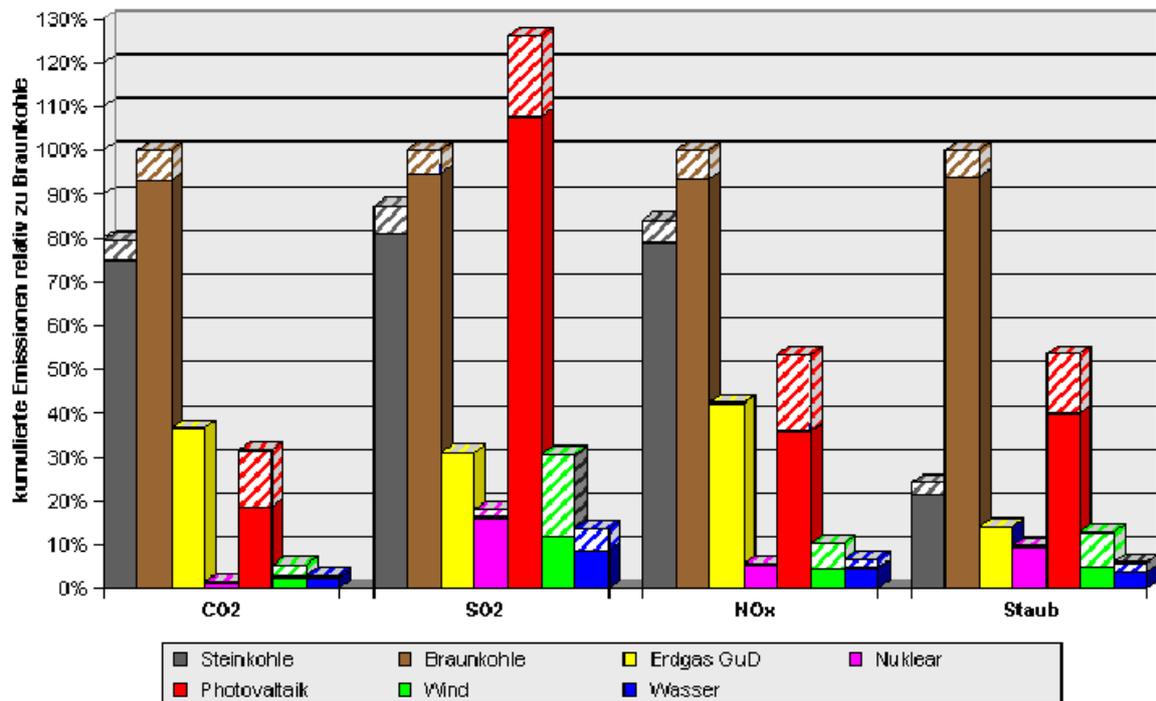


Abb. 25: Kohlendioxid-, Schwefeldioxid- und Stickoxid-Emissionen der Energieerzeugungstechniken der Energieerzeugungstechniken (aus Voß 2002: 16).

Die doch recht hohen Werte für PV-Anlagen sind begründet im hohen spezifischen Energie- und Ressourcenverbrauch der Herstellung der PV-Anlagen. (vgl. auch Kruck, Eltrop 2007: 25) Zur Begründung der besonders hohen Versauerungspotentiale gibt es unterschiedliche Begründungen. Eine Quelle betont die Sulfatfreisetzung beim Abbau der Rohstoffe für den Bau der Anlagen und durch die Stromerzeugung für die Herstellung der Anlagen (Marheineke 2002: 135). Eine andere Analyse geht davon aus, dass die Eutrophierung und Versauerung „weniger von der

Strombereitstellung als vom Stickoxidausstoß bei der Waferherstellung bestimmt [sind], der bei der Oberflächenbehandlung (Reinigungsätzen) von gesägten Wafern auftritt“ (Nitsch u.a. 2004: 92). Die Stromerzeugung hat demnach einen Anteil von 20% an der Versauerung.

Dass die konkreten Werte für die PV noch entschieden verbessert werden können (vor allem, wenn das Si-Techniken verwendet werden, die kein Sägen brauchen), zeigt eine Untersuchung von Alsema und de Wild-Scholten (2004) für die Verwendung von RGS- (Growth on Substrate) und EFG- (Edge-defined-Ribbon-Growth) Siliziumwafern: Die entsprechenden schädlichen Wirkungen halbieren sich ungefähr:

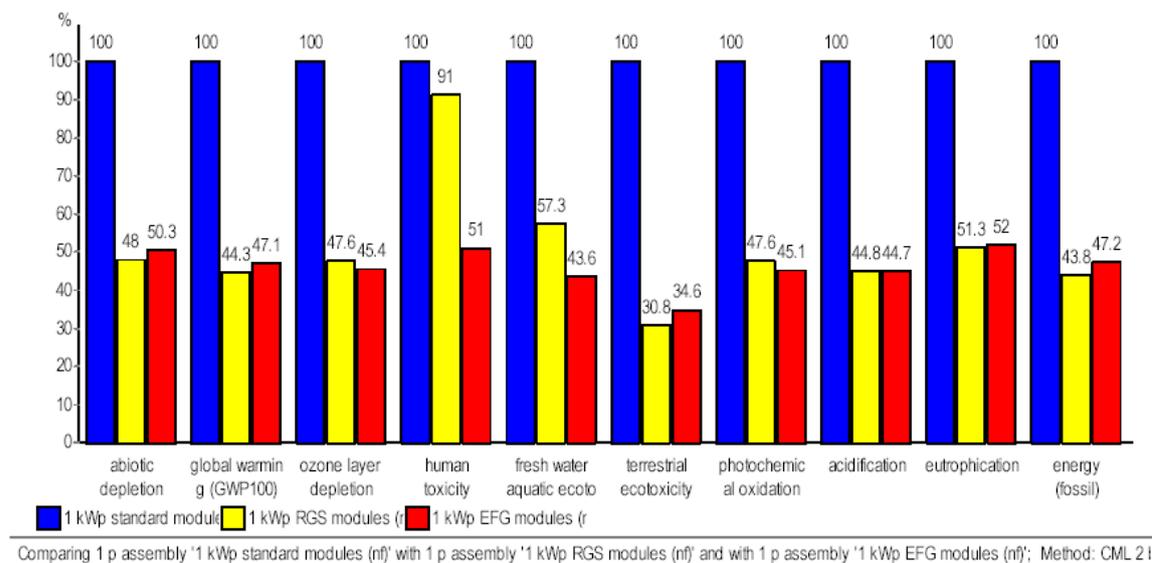


Figure 1: Comparison of LCA results for 1 kWp of PV modules on the basis of three investigated production technologies, namely standard-2000, Solsilc/RGS and Bayer/EFG.

Abb. 26: Veränderung des schädlichen Umweltwirkungen durch neue Silizium-Technologien (Alsema, de Wild-Scholten 2004: 2)

Eine andere Analyse kommt zu ähnlichen Ergebnissen:

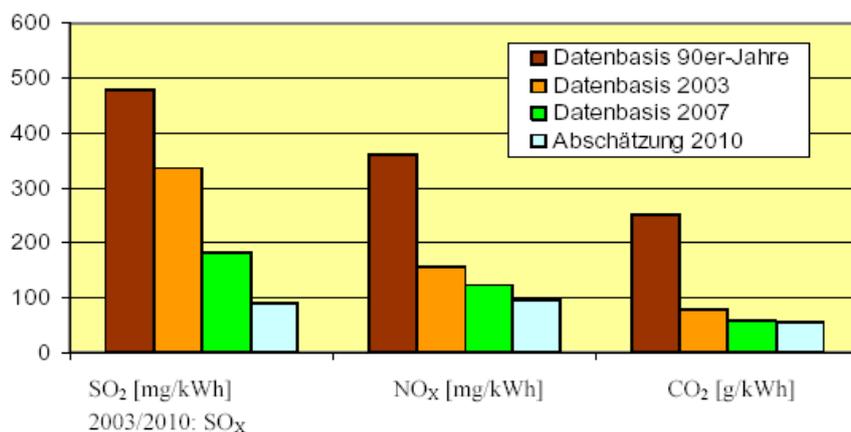


Abb. 27: Veränderungen aufgrund weiterer technischer Entwicklungen (Kruck, Eltrop 2007: 24)

2.3.4 Gefährliche Materialien

In der PV-Industrie wird mit toxischen, krebserregenden oder leicht entzündlichen Stoffen gearbeitet wie Arsen, Cadmium, CCl₄, Silan, Diboran, Wasserstoff-Fluorid, Wasserstoff-Selenid, Wasserstoff-Sulfid, und Phosphaten. Bei der Herstellung des Siliziums entsteht Siliziumtetrachlorid (SiCl₄), das weiter verwertet werden kann, aber in China auch einfach in die Umwelt gekippt wurde. Das dabei ebenfalls verwendete Silan ist explosiv und gefährlich (Fthenakis, Moskowitz 1990).

Beim Sägen der Wafer entsteht Siliziumstaub, der bei Menschen Silikose herbeiführen kann. Auch bei der Herstellung von Dünnschichtzellen wird Silan (explosiv) und Chlorsilan (sehr toxisch und flammbar) verwendet. Bei der Produktion von CIS-Zellen wird giftiges H_2Se als Selenquelle verwendet und bei hohen Temperaturen bildet sich SeO_2 , das so giftig ist wie Arsen. Beim Spülen von beschichteten CdS-Materialien können Cd-Salze ins Spülwasser gelangen. Außerdem gefährden Stäube von Kupfer, Indium, Gallium und Selen die Gesundheit.

Auch bei der a-Si-Dünnschichtzellenproduktion entstehen aus Umweltgründen unerwünschte Emissionen z.B. bei der Silanproduktion (Staub, CO_2 , Clorsilane), der Glasproduktion, der Abscheidung der Transparent conducting oxide-Schicht (TCO, dabei entstehen Zinnemissionen ins Wasser) sowie bei der a-Si-Beschichtung (Abgase) sowie bei der Kontaktierung und Modulverkapselung (Nitsch u.a. 2004: 93).

Cadmium

Ein Quadratmeter CdTe-Solarzellen enthält 7 g Cadmium (Zweibel, Fthenakis 2004: 1). Cadmium ist krebserregend und gesundheitlich „sehr gefährlich“. Umso erstaunlicher mag es erscheinen, dass die Cadmium-Emissionen, die bei den CdTe-Solarzellen gefürchtet werden, gar nicht so hoch sind (wie Abb. 28 zeigt), denn das Cadmium ist in der CdTe-Verbindung chemisch gebunden und außerdem im Modul fest verschlossen, wobei auch bei eventuellen Bränden kein Austritt von Cd zu erwarten ist, weil das CdTe einen sehr hohe Schmelztemperatur hat (1 700 °C). Deshalb begründen sich Cd-Emissionen bei Solarzellen vor allem durch den verwendeten Energiemix. Durch den hohen Energieverbrauch der Siliziumsolarzellen ist der Cadmium-Ausstoß bei ihnen sogar höher als bei CdTe-Zellen. (Alsema, de Wild-Scholten, Fthenakis 2006: 5)

Es gilt: “As far as “typical installation” stand-alone unmounted modules are concerned, the best environmental and thermodynamic performance is invariably that of the CdTe thin film modules, in spite of their lower efficiency. It is important to note that this is also true for the calculated Eco-Toxicity Potential indicator” (PVACCEPT 2005: 72)

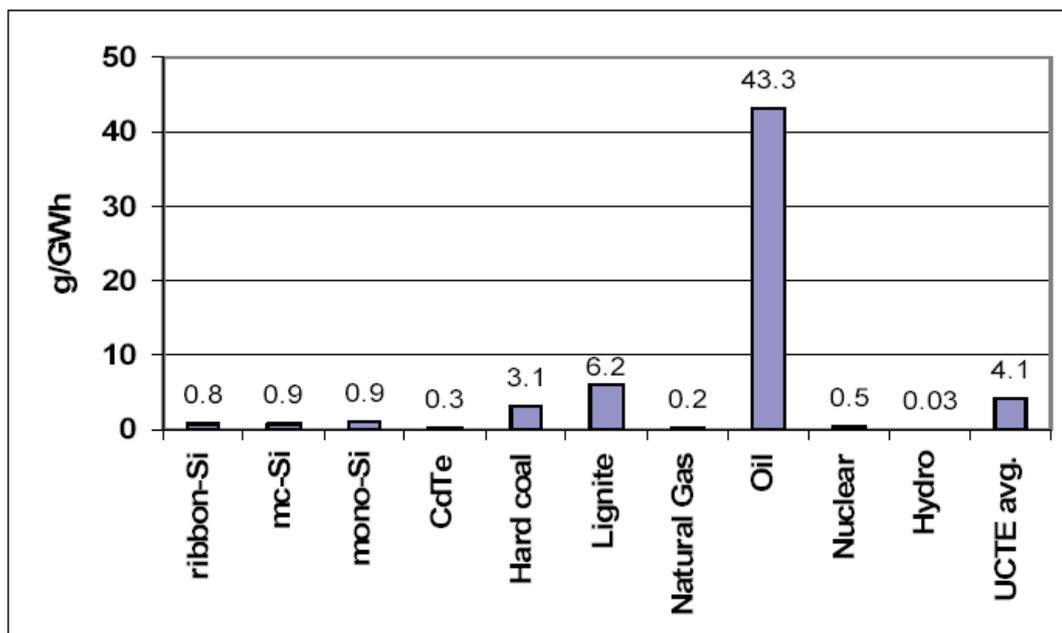


Figure 8: Life-cycle cadmium emissions (in g/kWh) from different energy technologies. PV systems located in S.-Europe, PR=0.80. Non-PV technologies based on Ecoinvent database.

Abb. 28: Cadmium-Emissionen verschiedener Energieerzeugungsmethoden (Alsema, de Wild-Scholten, Fthenakis 2006: 6)

Eine andere Studie nennt für Kohlekraftwerke eine Cd-Abgabe von 0,02 bis 2 g Cd pro Mwh wobei CdTe-Zellen im Routinegebrauch auch nur 0,02 g Cd pro MWh¹³ freisetzen. (Fritsche, Lenz 2000: A-18)

2.3.5 Gesundheitsgefährdungen

Mit den genannten umweltrelevanten Emissionen sowie der Anwendung toxischer bzw. ev. explosiver Stoffe sind auch Gesundheitsgefährdungen für Menschen, vor allem in der Produktion, verbunden. Für die gesundheitlichen Risiken der verschiedenen Energietechniken gibt es ebenfalls vergleichende Analysen.

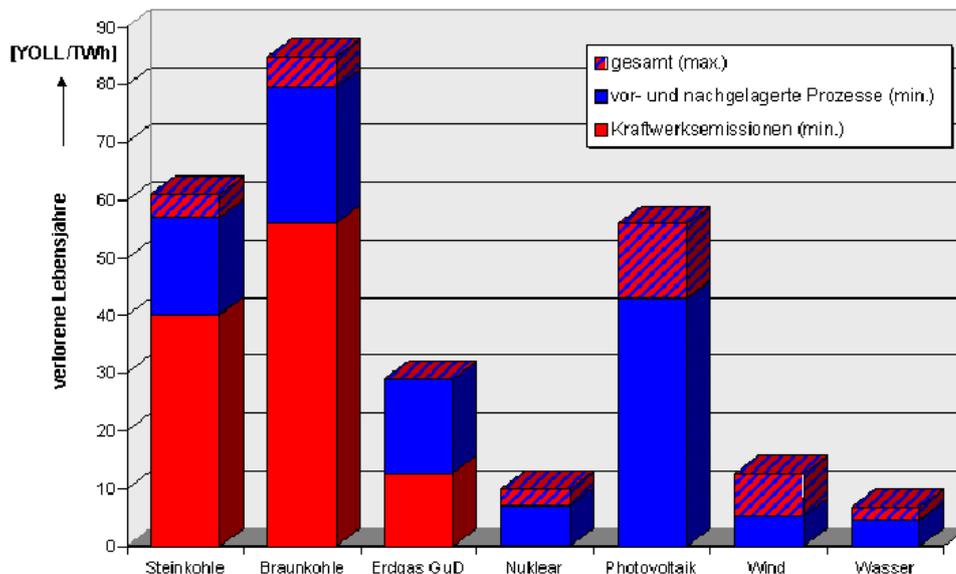


Abb. 29: Gesundheitliche Risiken (Voß 2002: 18)

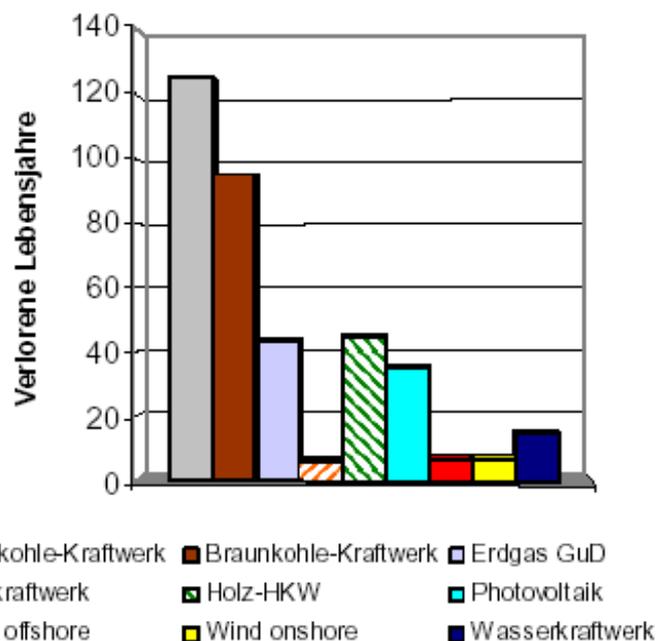


Abb. 30: Gesundheitliche Risiken (Kruck, Eltrop 2007: 187)

¹³ In Zweibel, Fthenakis (2004: 2) wird 1 g Cd /MWh angegeben.

2.4 Externe Kosten

Die schädlichen Auswirkungen wie Treibhausgasemission, Umweltbelastung und Gesundheitsschädigungen können monetär zusammengefasst werden, in dem ihre Beseitigung als Kosten in Anschlag gebracht wird und dies ergibt dann eine Bilanz der sog. externen Kosten. Sie werden „extern“ genannt, weil sie nicht in die Kostenrechnung des Herstellers eingehen. Ein Beispiel für die Ergebnisse solcher Berechnungen wird im Folgenden gezeigt.

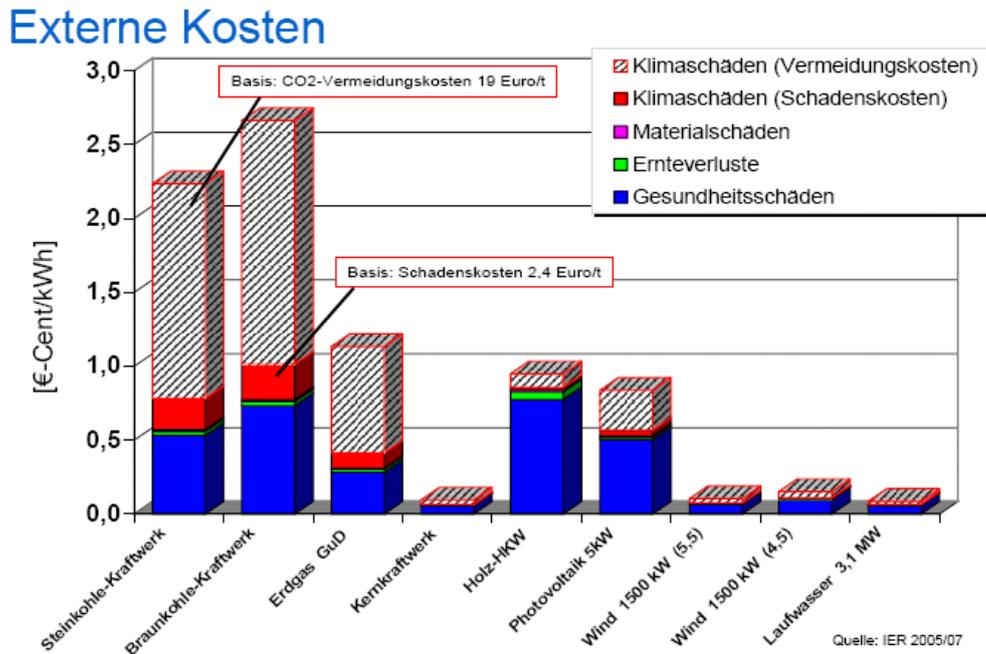


Abb. 31: Quantifizierbare externe Kosten der Stromerzeugung (Voß 2008: 54; vgl. auch Friedrich 2002: 3)

Bei der Kernenergie wurden hier auch die Kosten des Brennstoffkreislaufs und der Endlagerung berücksichtigt sowie auch hypothetische Schäden durch Unfälle. Zwar müssen dort hohe Schadenskosten in Anschlag gebracht werden – allerdings wird dieser Schaden multipliziert mit der Eintrittswahrscheinlichkeit des Schadens, der als sehr gering angenommen wird. Der größte Beitrag der externen Kosten der Kernenergie entsteht dann durch die Freisetzung radioaktiver Stoffe beim Uranbergbau und insgesamt ist die Kernenergie dann nach Wind- und Wasserkraft dann eine der günstigsten Energieformen. Auch andere Studien zeigen dieses Ergebnis:

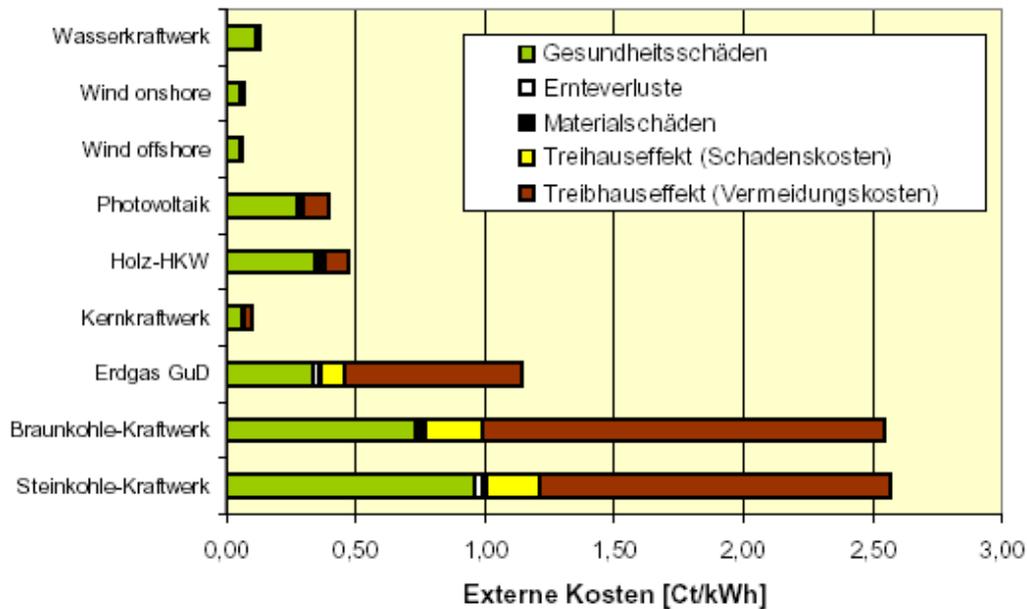


Abb. 32: Externe Kosten verschiedener Energieerzeugungsmethoden (Kruck, Eltrop 2007: 188)

Auch hier schlagen bei der Photovoltaik erstaunlich viele externe Kosten zu Buche.

2.5 Ressourcenverbrauch

Besonders auffallend ist der im Vergleich mit anderen Energieerzeugungstechniken sehr hohe Ressourcenverbrauch der Photovoltaik.

„Es wird deutlich, dass die photovoltaische Stromerzeugung im Vergleich zu Windkraftwerken und Wasserkraftwerken heute noch mit deutlich höheren Stoffströmen sowohl bei den Luftschadstoffen als auch den Ressourcenentnahmen verbunden ist.“ (Marheineke 2002: 113)

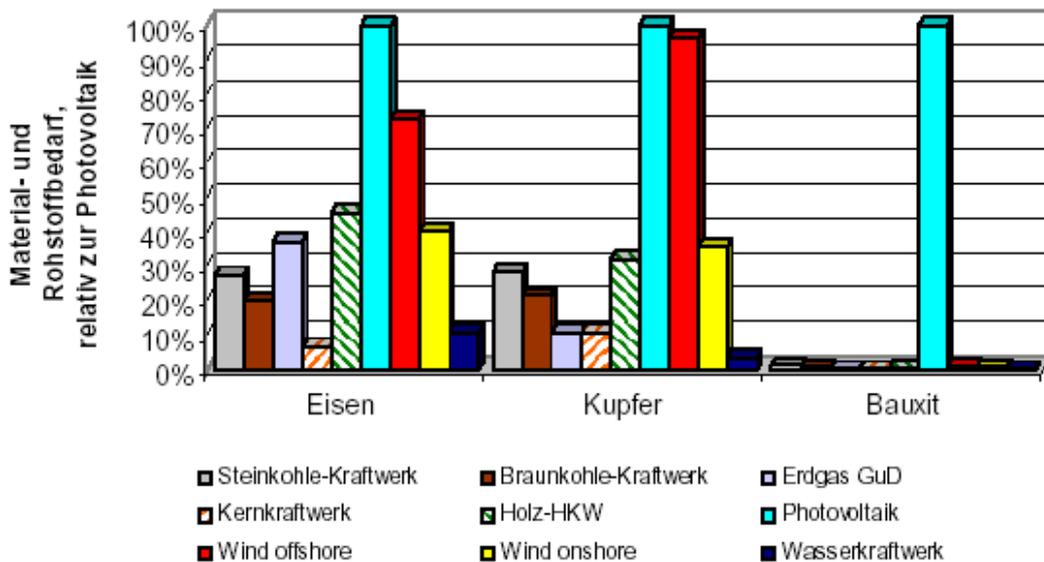


Abb. 33: Ressourcenverbrauch verschiedener Energieerzeugungsmethoden (Kruck, Eltrop 2007: 185)

2.5.1 Grundbegriffe

Bei der Bewertung der Zukunftsaussichten für die Verwendung bestimmter Rohstoffe, besonders angesichts der Befürchtung ihrer Verknappung, ist es wichtig, zwischen verschiedenen Begriffen zu unterscheiden.¹⁴

- Vorkommen

Zuerst einmal kommt ein Rohstoff oder ein Gut vor, unabhängig davon, ob wir es brauchen oder nicht. Dieses „Vorkommen“ (Bärmann u.a. 2005) ist eine natürlich vorgegebene Größe. Der Eisenanteil der Erdkruste beträgt beispielsweise 5,8 %. Aber diese gesamte Menge wird niemals vollständig wirtschaftlich verwertbar sein.

- Ressourcen

Eine weitere Mengeneinschätzung von Rohstoffen bietet der Begriff „Ressource“. Mit ihm werden diejenigen Mengen eines Rohstoffs erfasst die zwar *nachgewiesen* sind, von denen ein großer Teil aber gegenwärtig wirtschaftlich oder technologisch noch nicht sinnvoll extrahiert werden kann. (Frondel u.a. 2007: 12)

- Reserven

Die „Reserven“ sind nur eine Teilmenge der Ressourcen. Es geht um jene Menge an Ressourcen, die *gegenwärtig* bereits wirtschaftlich gewinnbar ist. (ebd.) Die Wirtschaftlichkeit hängt im gegenwärtigen Wirtschaftssystem natürlich von den Preisen ab. Steigen die Preise, steigt das Interesse an neuen Erkundungstätigkeiten und der Umfang an Reserven nimmt wieder zu. Die Weltölreserven haben sich beispielsweise seit 2000 um 25 % erhöht und seit 1980 mehr als verdoppelt (ebd.: 14). Die Vorstellung, eine begrenzte „Reserve“ würde durch wirtschaftlichen Abbau und Nutzung nach und nach „abgebaut“, ist irreführend. Für Kupfer wird in der folgenden Abbildung gezeigt, dass die Weltjahresförderung an Kupfer zwar zunimmt, die Reserven jedoch seit den 70er Jahren nicht stetig abnehmen, sondern sich entsprechend Explorationstätigkeiten (die mit dem Preis korrelieren) eigenständig verändern.

Abbildung 1.2: Reserven und weltweite jährliche Förderung an Kupfer (BGR 2005)

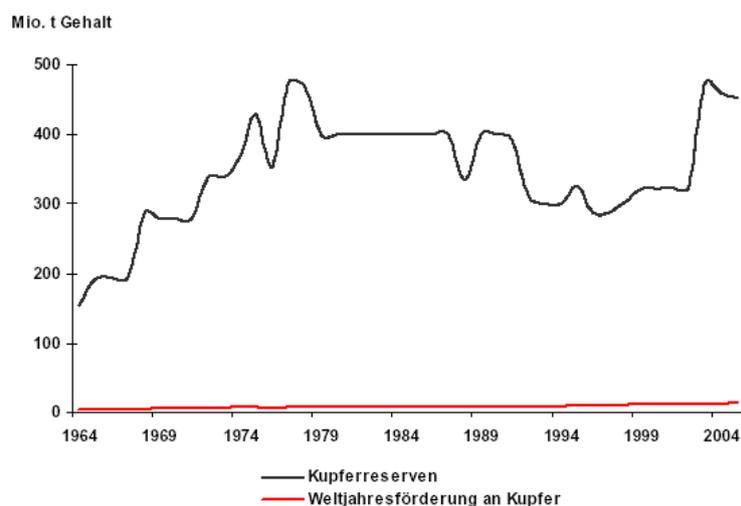


Abb. 34: Zeitliche Veränderung der Reserven und der jährlichen Förderungsmenge an Kupfer (Frondel u.a. 2007: 15)

- Reichweite

Um eine Aussage darüber zu erlangen, wie lange die jeweiligen Rohstoffe noch „ausreichen“, wird oft die Reichweite in Jahren angegeben. Zu beachten ist dabei, dass die Reichweite sich auf

¹⁴ Zum Sprachgebrauch des U.S. Geological Survey siehe USGS 2008: Appendix A.

die Ressourcen beziehen kann aber auch auf die Reserven. Meist bezieht man sich auf die Reserven und nennt das Verhältnis der Reserven zur jährlichen Fördermenge „statistische Reichweite“.

Die Reservenreichweite ist nur eine Momentaufnahme, nicht zukunftsorientiert. Wir hatten festgestellt, dass mit einer Preissteigerung auch die Reserven wieder zunehmen können. Deshalb ist die Reservenreichweite nicht als Früherkennungsmerkmal für eine absolute Begrenztheit des Rohstoffs zu werten, sondern eher als Signalanzeiger für die Notwendigkeit der Wiederaufnahme oder Verstärkung der Explorationstätigkeit (Fronde l u.a. 2007: 9, 13). Tatsächlich sind die statistischen Reichweiten vieler Rohstoffe in den vergangenen Jahrzehnten angestiegen statt gefallen!

Die Ressourcen wie auch die Reserven hängen ab von der menschlichen Wirtschaftstätigkeit und damit auch von den Entscheidungen, welche Bedürfnisse auf welche Weise befriedigt werden. Welche Anteile der Vorkommen gegenwärtig wirtschaftlich verwendet werden können (Reserven), bzw. welche nachgewiesen sind (Ressourcen) hängt vom Interesse der wirtschaftenden Menschen ab und ist deshalb nicht einfach „natürlich vorgegeben“. Natürlich sind die Vorkommen letztlich begrenzt, aber die „Knappheit“ von Ressourcen und Reserven wird letztlich durch gesellschaftliche Entscheidungen bestimmt. (Bärmann u.a. 2005) „Wie weit ein Rohstoff reicht, bestimmt nicht das Schicksal, sondern allein menschliches Handeln.“ (Jung 2006a: 29)

Prognosen für die Entwicklung der Reserven sind deshalb sehr schwer zu erstellen. 1972 machte ein Bericht an den Club of Rome Furore. Meadows u.a. veröffentlichten „Die Grenzen des Wachstums“ (Meadows u.a. 1972). Dabei nahmen sie für die Ressourcenentwicklung noch an, dass die Fördermenge exponentiell ansteigen würde. Dadurch erhielten sie erschreckend kurze Restnutzungszeiten. In der folgenden Tabelle werden die dort angegebenen Reserven mit den heute angenommenen verglichen (nach Fronde l u.a. 2007: 24)

	1972	2004		1972	2004
Bauxit	1 170	23 000	Chrom	775	810
Blei	91	67	Kobalt	2,18	7,00
Eisenerz	100 000	80 000	Mangan	800	380
Kupfer	308	470	Molybdän	4,95	8,60
Zink	123	220	Nickel	66,5	62,0
Zinn	4,35	6,10	Wolfram	1,32	2,90

Tab.2: Geschätzten Reserven in Millionen Tonnen nach Meadows u.a. 1972 und heute (nach Fronde l u.a. 2007: 25)

Für die Photovoltaik bekommt die Frage des Einsatzes von Ressourcen für ihre Herstellung eine besondere Bedeutung, denn hier liegt der Bedarf im Vergleich zum Strommix deutlich höher (Nitsch u.a. 2004: 92) Dies wird mit der geringen Energiedichte pro Fläche und der nicht vollständigen Auslastung der Anlagen begründet.

2.5.2 Rohstoffpreisentwicklung

Ebenso haben sich die Erwartungen (bzw. Befürchtungen), dass mit der jährlichen Fördermenge die Preise ins Unermessliche steigen, nicht erfüllt. Eine weitere 70er-Jahre-Studie, der Bericht „Global 2000“ (1980), hatte erwartet, dass die Rohstoffpreise bis zum Jahr 2000 jährlich um 5 % steigen. Tatsächlich stieg der Preis beispielsweise für Kupfer nicht mit dem steigenden Abbau:

Abbildung 2.4: Realer Kupferpreis pro t, jährliche Kupferproduktion (USGS 2005) und Preisprognose des Berichtes Global 2000

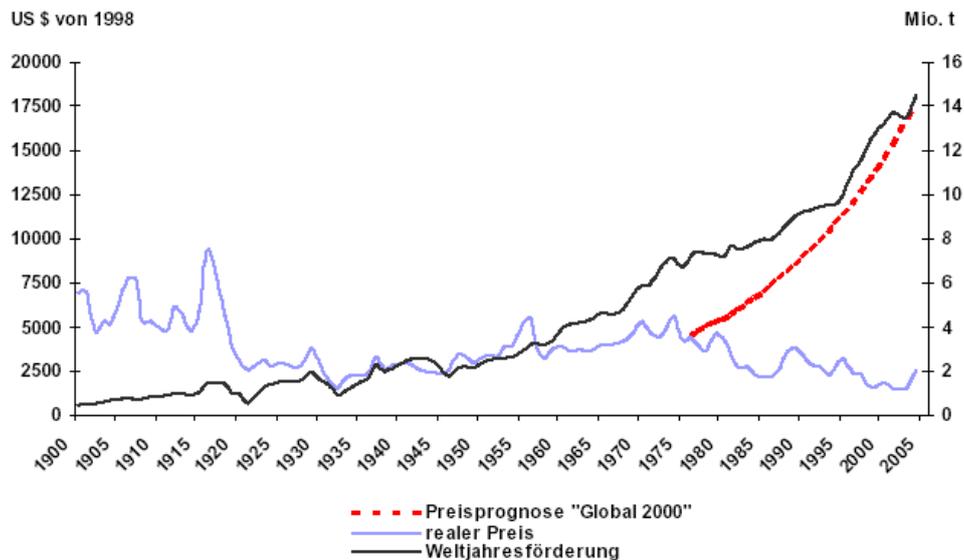


Abb 35: Realer Kupferpreis und Kupferprognose des Berichtes Global 2000 sowie die jährliche Kupferproduktion (Frondele u.a. 2007: 31)

In der jüngsten Gegenwart dagegen schienen die Rohstoffpreise zu explodieren, wie auf Abb. 36 (siehe unten) zu sehen ist. Dies lag aber nicht an einer Verknappung:

„Die seit Beginn dieses Jahrzehnts verstärkt zu beobachtenden Turbulenzen auf den Rohstoffmärkten haben ihre Ursache nicht, wie oft irrtümlich angenommen wird, in der Erschöpfung von Rohstoffvorkommen.“ (Fraunhofer ISI und IZT gGmbH 2009: 349)

Preiserhöhungen sind ein normaler Mechanismus, der es für Bergbauunternehmen erst profitabel macht, neue Ressourcen zu suchen und Reserven zu erschließen. Derzeit braucht die auf sehr wenige Großunternehmen konzentrierte Bergbaubranche starke Preisimpulse, um Lagerstätten zu erschließen. Dabei konzentrieren sie sich aus Effektivitätsgründen auf Großlagerstätten, deshalb reagieren sie auf kleinere Preissignale noch nicht. Das führt auch dazu, dass in dynamischen Branchen nicht bedarfsgerecht genügend geeignete Rohstoffe zur Verfügung stehen, wie es mit dem Silizium-Bottleneck in der Solarindustrie seit 2004 zu spüren war. Dies liegt aber – bei Silizium offensichtlich – nicht an einem zu geringen Vorkommen, sondern an nicht getätigten Investitionen (vgl. dazu auch Jung 2006b). In den letzten Jahren führte außerdem eine große Nachfrage aus China zu Preisverschiebungen, wobei China die Preise seiner eigenen Rohstoffe vor allem politisch bestimmt. Rohstoffpolitisch werden die Probleme bis auf wenige Ausnahmen nicht in zu geringen Vorkommen gesehen, sondern darin, dass nur noch einige wenige Bergbauunternehmen den gesamten Weltmarkt dominieren. Dadurch konnten z.B. die Eisenerzproduzenten im Frühjahr 2005 den Preis um 70-90 % verteuern, obwohl Eisen, wie bereits erwähnt wurde, 5,8 % der Erdkruste ausmacht und rein physisch beim jetzigen Abbautempo für weitere 600 Millionen Jahre ausreichen würde.

Wie wir auf Abb. 37 sehen, begannen die Rohstoffpreise bereits vor der Ende-2008-Krise zu fallen:

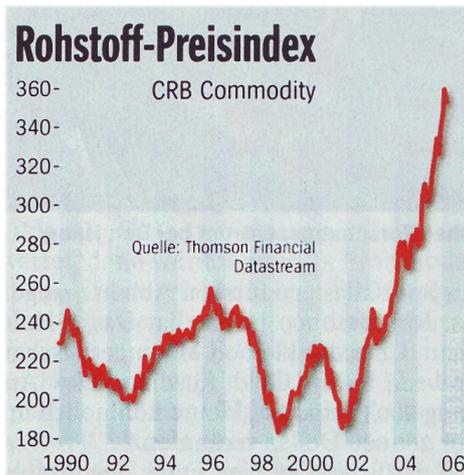


Abb. 36: Rohstoffpreisindex bis 2006 (Jung 2006a: 31)



Abb. 37: Rohstoffpreisindex 2008/2009 (HWWI 2009)

In den letzten 100 Jahren sind die realen Preise der meisten Rohstoffe (mit Ausnahmen wie Graphit und Tantal) gesunken anstatt gestiegen. (Frondel u.a. 2007: 4, 41 f.) Der Anstieg der Preise bis 2007 war „nicht das Resultat von Angebotsschocks, sondern Ergebnis einer großen Nachfrage infolge eines starken weltwirtschaftlichen Wachstums, das 2004 mit 5,3 % so hoch war wie seit 30 Jahren nicht mehr.“ (ebd.: 7) Dass Rohstoffpreise trotz des starken Verbrauchs in unserer industriellen Wachstumswirtschaft eher sinken als steigen, liegt an der Dynamik der technischen Entwicklung.

„Dass dennoch fallende Preistrends bei Rohstoffen zu beobachten sind, liegt vor allem daran, dass die Kosten zum Abbau dieser Ressourcen durch technologische Fortschritte bei den Fördertechnologien immer weiter gesenkt werden konnten und zudem die bekannten Reserven keine festen Größen sind, sondern bei vielen Rohstoffen über die Zeit beständig angestiegen sind. Nur so ist es zu erklären, dass die realen Preise für Aluminium, Kupfer oder Zink trotz eines stark steigenden Bedarfs sogar zum Teil deutlich gefallen anstatt gestiegen sind.“ (Frondel u.a. 2007)

2.5.3 Silizium

Wir beschränken uns im Weiteren auf die für Solarzellen spezifischen Materialien. Gerade bei dem Stoff, von dessen Ausgangsrohstoff mit Recht gesagt werden kann, dass es ihn „wie Sand am Meer“ gibt, dem Quarz – erlebte die Solarindustrie ihr erstes „bottleneck“, das die Modulpreise für einige Jahre sogar nach oben trieb: dem Silizium.

Solarsilizium braucht nur Reinheitsgrade, die um den Faktor 100 bis 1000 geringer sein brauchen als in der Elektronik. Bisher wurde die Solarindustrie quasi aus „Abfällen“ der Elektroniksiliziumproduktion versorgt. Teilweise wurde, um die teuren Anlagen der Si-Hersteller auszulasten, sogar das nach der Elektronik-Silizium-Herstellungstechnologie produzierte Silizium zu günstigeren Preisen an die Solarindustrie abgegeben.

Diese Zeit war ca. 2004 vorbei. Der Kilopreis für Polysilizium stieg von Dezember 2004 bis April 2005 von 32 auf 60 Dollar. Für 2007 werden Preise von 200 USD und für 2008 500 USD genannt. Auch eine der Vorstufen von Polysilizium, das metallurgische Silizium, wird nicht in der Menge produziert, die die wachsende PV-Industrie braucht. (Sollmann 2009)

Viele Solarzellenhersteller konnten sich mit langfristigen Verträgen noch Lieferungen zusichern. Diese wachsende Nachfrage führte nun mit einer Verzögerung zu einer Ausweitung der Produktion bei den Si-Herstellern (vgl. auch Jäger-Waldau 2008: 7).

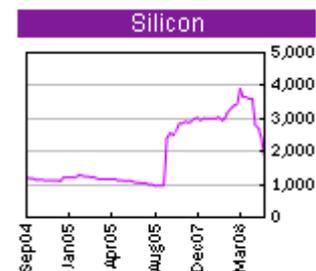


Abb. 38: Preisentwicklung für Silizium (nach Minormetals)

2004 gab es nur 7 Hersteller von hochreinem Silizium, 2008 sind es ca. 72 und 101 sind im Bau bzw. geplant (Kreutzmann 2008b: 3)

Dadurch entspannte sich die Lage 2009 wieder. Außerdem übernehmen Solarzellenhersteller teilweise nun auch die Si-Produktion und es werden neue Technologien zur Herstellung von solarzellen-geeignetem Silizium entwickelt (siehe z.B. Wærnes u.a. 2005). Der Vorteil hierbei ist, dass es nicht so viele komplizierte Reinigungsschritte wie das Elektroniksilizium durchlaufen muss und deshalb kostengünstiger wird und zu seiner Herstellung auch viel weniger Energie braucht (siehe Abb. 9), was die Life-Cycle-Bilanz der siliziumbasierten PV (siehe 2.1) stark verbessern wird. Außerdem werden im Bereich siliziumbasierter Wafer die Wafer immer dünner. So verringert sich die Dicke der verwendeten Wafer von 2004 bis 2010 von 300 μm auf 150 μm , was den Siliziumverbrauch pro Watt(peak) von 12 g auf 7,5 g senkt (EPIA, Greenpeace 2008: 43). Neben der Möglichkeit, auf qualitativ schlechtere Siliziumwafer dünne Siliziumschichten aufzubringen gibt es viele weitere Möglichkeiten, Silizium einzusparen. Die Dünnschichtsolarzellen verwenden ganz andere Strukturen, entweder sehr dünne amorphe Siliziumschichten auf Glas – mit einem um zwei Größenordnungen geringerem Si-Verbrauch – oder andere Materialien (Kupfer-Indium-Selenid oder Cadmiumtellurid mit CdS-Schichten...). Wenn diese Dünnschichtzellen höhere Wirkungsgrade erreichen, werden sie für immer mehr Anwendungsfälle interessant und sie werden ihren Anteil gegenüber den siliziumwaferbasierten Solarzellen vergrößern. Jetzt werden durch die geringen Wirkungsgrade doch noch recht viele Aufwendungen (mehr Fläche, mehr andere Ressourcen gebraucht) benötigt, die die Einsparung noch nicht optimal zur Wirkung bringen. Organische bzw. Nanosolarzellen werden in den nächsten Jahren auch immer interessanter.

Nichtsdestotrotz ist zu erwarten, dass der Bedarf an Silizium wie in der unten angegebenen Abbildung weiter steil ansteigen wird.

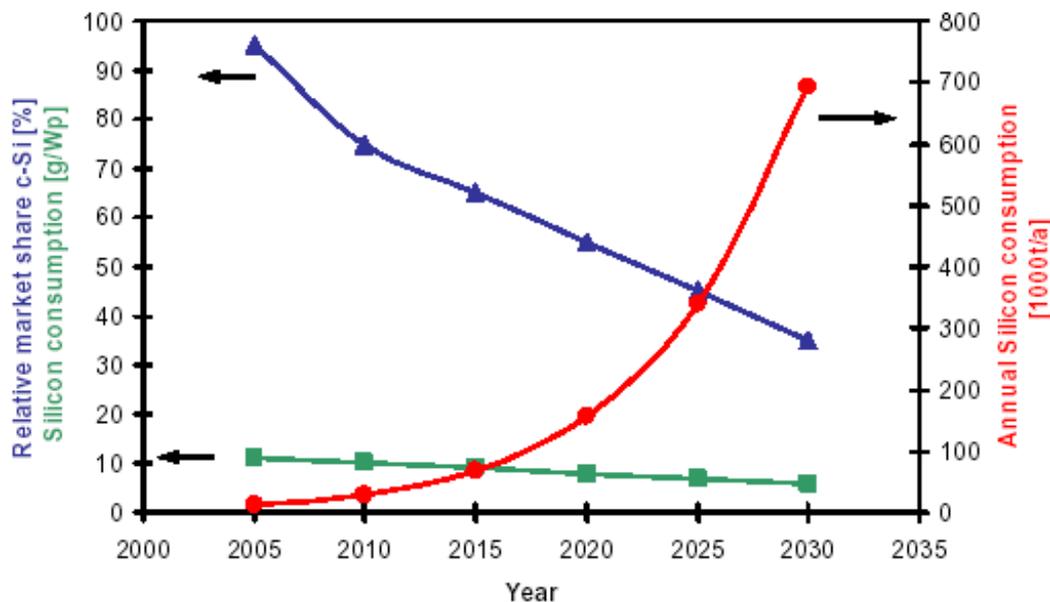


Abb. 39: Entwicklung des jährlichen Siliziumverbrauchs (Waldmann 2006: 27)

Da es hier keine Zweifel an ausreichenden Vorkommen der Ausgangsmaterialien gibt und durch die technologischen Neuerungen sogar günstigere Preise und Energie- sowie Umweltbilanzen zu erwarten sind, ist Silizium mittel- und langfristig nicht als kritischer Rohstoff für die PV-Industrie anzusehen.

2.5.4 Bauxit/Eisen

Bauxit (für die Aluminiumproduktion) und Eisen werden für Solarzellen benötigt, die z.B. auf Dächern oder auf ebener Erde aufgeständert werden müssen. Die gegenwärtigen Reserven wer-

den auf 25 000 Millionen Tonnen geschätzt, wovon 190 Millionen Tonnen pro Jahr abgebaut werden (Wikipedia: Bauxit). Die Reservenreichweite beträgt also 131 Jahre.

2.5.5 Graphit

Nach dem bereits erlebten „bottleneck“ Silizium (siehe 2.5.3) wird für die Solarindustrie auch beim Graphit eine Knappheit voraus gesehen. Graphit wird hier für die Tiegel in der Siliziumschmelze und im Anlagenbau benötigt. Für Graphit werden folgende Ressourcen, Reserven und Reichweiten angegeben:

	Förderung in Mio. t	Reserven in Mio. t	Ressourcen >800 000	Reichweite in Jahren	
				Reserven	Ressourcen
Graphit	985	86 000	>800 000	88	>812

Tab. 3: Ressourcen, Reserven und Reichweiten von Graphit (Frondel u.a. 2007: 23)

Aufgrund der hohen Reichweite sind „Angebotsknappheiten [...] trotz eines bislang begrenzten Graphitrecyclings aus zwei Gründen nicht zu erwarten: Erstens ist die Menge an Reserven so groß, dass die Statische Reichweite bei 87 Jahren liegt. Zweitens kann künstlich hergestellter Graphit in vielen Bereichen natürlichen Graphit ersetzen. Graphit ist daher ein Rohstoff mit praktisch unendlich großer Verfügbarkeit.“ (Frondel u.a. 2007: 89)

Die Preise für Graphit steigen an, was nicht einer grundsätzlichen Verknappung entspricht, sondern einer „zunehmenden Regulierung der Abbauregion China“ (DGAB 2008) zuzurechnen ist.

Reale Graphitpreise in US \$/t und Weltjahresproduktion in Mio. t (USGS 2005)

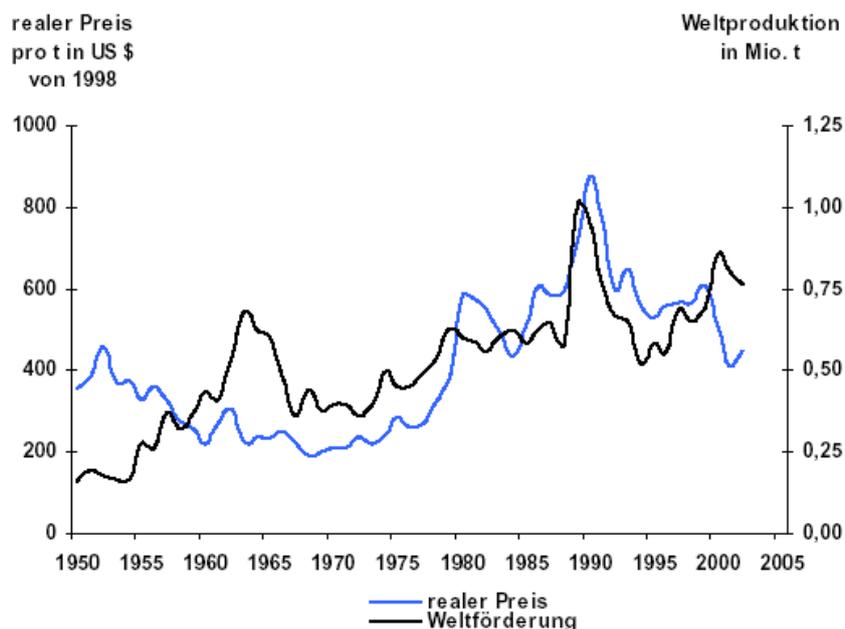


Abb. 40: Reale Graphitpreise in US-Dollar/Tonne und Weltjahresproduktion in Millionen Tonnen (Frondel u.a. 2007: 219)

Für die Solarbranche wird gefürchtet, dass Graphit bald knapp und teuer werden könnte (Cloos 2008). „Wenn die prognostizierten Zuwachsraten für Polysilizium stimmen, könnte es ab 2011 oder 2012 eng werden.“ (Cloos in Sollmann, Bomfleur 2008: 37) für ISO-Graphit, das bei der Herstellung von Polysilizium benötigt wird, wird ebenfalls erwartet, dass bis „2010 [...] eine Steigerung der Produktionskapazität um 50% vonnöten“ (Renz 2008) sein wird. „Allerdings hört man derzeit von den großen Herstellern keine Ankündigungen, daß hier in neue Fabriken investiert wird.“ (ebd.) Wir erleben hier also genau jene Preis- und Angebotspolitik, die in 2.5.2 geschildert wurde:

„Es bleibt also zu befürchten, daß die Hersteller bewußt erst einmal in *einen Mangel* fahren um die Preise anheben zu können. *Anschließend rechnen sich die neuen Fabriken...* Das nennt man Marktwirtschaft...“ (Renz 2008)

2.5.6 Kupfer

Auch beim Kupfer können wir nachweisen, dass trotz steigender Förderung die Reserven nicht etwa weniger werden, sondern ebenfalls mit wachsen.

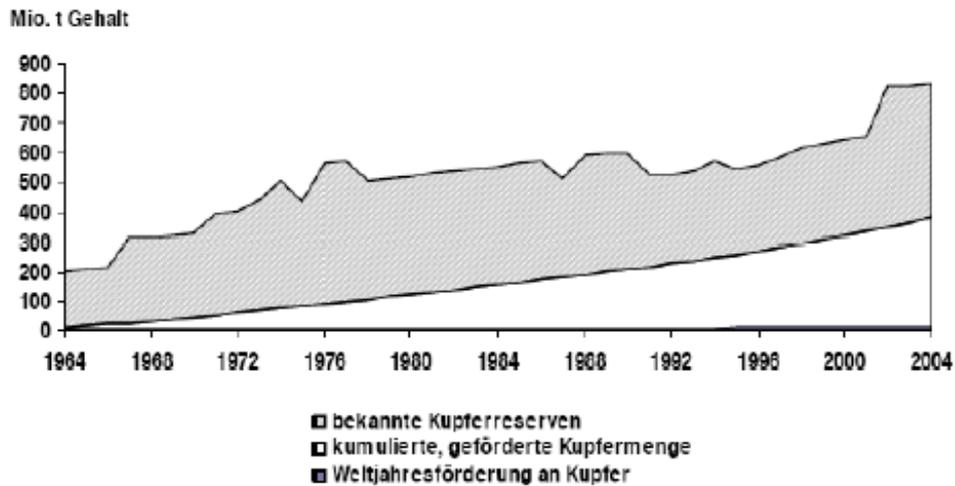


Abb. 41: Weltjahresförderung, Reserven und bisher geförderte Mengen an Kupfer (Lucas u.a. 2007: 5)

Im Langzeitverlauf ist auch keine „Erschöpfung“ der Reserven oder ein grundsätzlicher Preisanstieg zu verzeichnen:

Abbildung 1.1: Statische Reichweite und realer Kupferpreis pro t (BGR 2005)

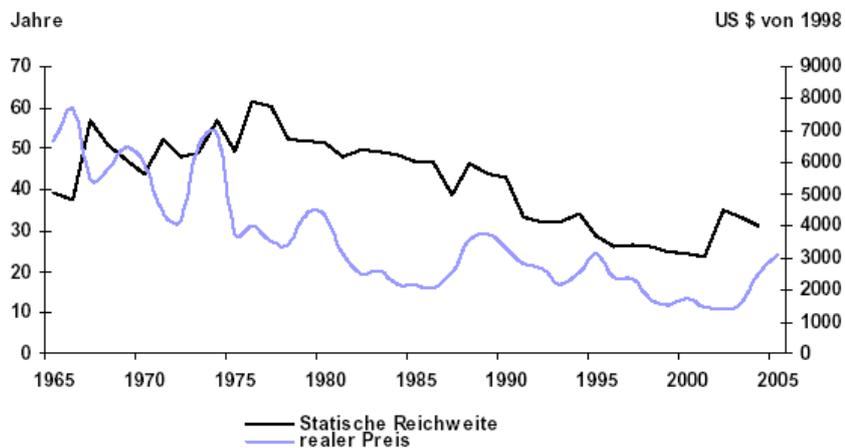


Abb. 42: Statistische Reichweite und realer Kupferpreis pro Tonne (Frondel u.a. 2007: 13)

Seit 2003 stieg der Preis von raffiniertem Kupfer allerdings von rund 1 500 US \$ pro Tonne auf nahezu das Sechsfache im Mai 2006. Dies ist das „Resultat einer zwischen 2000 und 2003 stagnierenden Produktion im weltweiten Kupferbergbau und einer ab 2003 wieder anziehenden globalen Nachfrage nach Kupfer.“ (Frondel u.a. 2007: 71) Derzeit liegt der Kupferpreis bei ca. 4 400 US \$ pro Tonne (finanzen.net), nachdem er auch schon wieder auf 2 500 gefallen war. Insgesamt hat sich die Angebotslage entspannt:

„Der weltweite Kupferverband International Copper Study Group, kurz ICSG, meldet nun, dass die weltweite Produktion an Fertigkupfer im Zeitraum Januar bis Oktober 2008 bei 15,39 Millionen Tonnen lag, während der Verbrauch 15,231 Millionen Tonnen erreichte. Das entspricht einem Angebotsüberschuss von 159,000 Tonnen. Die Kapazitäts-

auslastungsrate der Kupferhersteller lag bei 82,8 Prozent, nach 86 Prozent im entsprechenden Zeitraum des Vorjahres.“ (Stanzl 2008)

Aufgrund von Recycling sind auch 80% der abgebauten Menge noch in Gebrauch (Jung 2006a: 33).

Aufgrund dieser guten Ausgangslage beim Angebot an Kupfer ist es reine Polemik, wenn aus dem hohen Kupferbedarf bei der Photovoltaik die Schlussfolgerung gezogen wird: „Die Kernenergie schont die Rohstoffressourcen der Erde“:

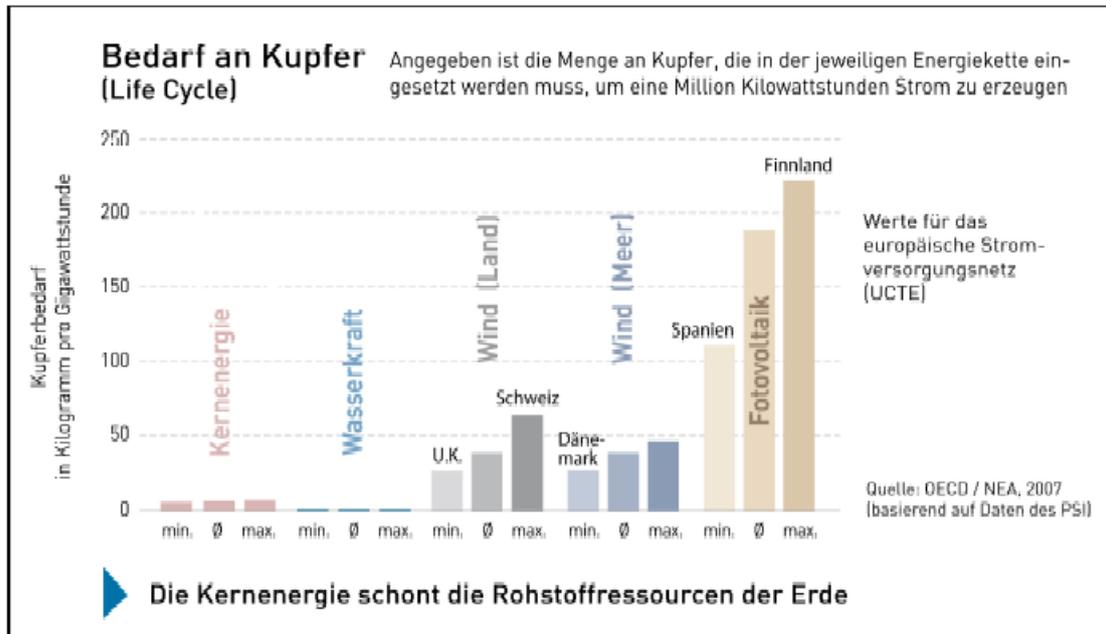


Abb. 43: Bedarf an Kupfer für verschiedene Energiequellen (Moning 2008: 3)

2.5.7 Glas

Die Glasherstellung ist keine grundsätzliche Hürde. Allerdings verschlingt die Herstellung von Glas viel Energie und seine Kosten sind deshalb an die Energiepreise gekoppelt. Auch die Preise für die anderen Rohmaterialien „spielen wie verrückt“ (Bortel in Podewils 2008b: 38). Allein aufgrund steigender Energiepreise wird erwartet, dass sich Glaskostenanteil bei der Solarmodulfertigung von 5 % auf 15 % ansteigen könnte. (Iken 2008)

Auch der Anteil der PV am Bedarf an Glas nimmt mit dem Wachstum der PV deutlich zu. Bisher gingen nur weniger als 1 % in die PV, schon 2012 ist zu erwarten, dass es 5 % sein werden (Podewils 2008b). Das Besondere am Solarglas ist, dass es besonders eisenarm sein muss und seine Grundstoffe (Sand, Dolomit und Feldspat) können knapp und teuer werden. Das Problem der Bereitstellung von ausreichend Glas für die Solarindustrie war auch Gegenstand der PHOTON-Konferenz im Jahre 2008 und die Zeitschrift „PHOTON“ titelte im Februar 2008: „Warum sich die Solarindustrie schleunigst um eine eigene Glasversorgung kümmern muss.“

Es ist auch wichtig, folgende „Glaspolitik“ zu berücksichtigen: Das qualitativ gute Floatglas braucht 80% mehr Energie als einfacheres Walzglas. Beim Walzglas für Solarindustrie, das bereits einen Anteil von 60-70% des Solarglases ausmacht, eilt die Nachfrage dem Angebot ein Jahr voraus. Die Glasindustrie möchte der Solarindustrie am liebsten weiter Floatglas verkaufen, um ihre Anlagen auszulasten und bemüht sich nicht um eine Erweiterung der Kapazitäten für angemessenes Solarglas. Deshalb schafft sich die Solarindustrie eigene Glasproduktionskapazitäten (vgl. auch Podewils 2008c).

2.5.8 Besondere Materialien für PV

Photovoltaik beruht auf physikalischen Effekten, die nur durch besondere Materialien realisierbar sind. Beim Silizium werden diese besonderen Eigenschaften der Materialien durch Dotierungen erreicht, in der Dünnschichttechnik werden bestimmte Kombinationen von dünnen Schichten von Materialien verwendet, die ebenfalls die gewünschten Eigenschaften der Umwandlung von Licht- in elektrische Energie haben. Zwar werden bei Dünnschichtzellen pro Quadratmeter nur geringe Mengen der Materialien benötigt, aber im Fall der massenhaften Anwendung dieser Techniken begrenzen die seltenen Materialien den weiteren Ausbau (siehe z.B. Andersson u.a. 1998). So wird eingeschätzt, dass unter der Bedingung, dass die jeweilige (gegenwärtige) jährliche Materialproduktion ausschließlich für Photovoltaik eingesetzt würde, die jährlich zuzubauende Leistung an Dünnschichtzellen begrenzt wäre auf 5 G Wp pro Jahr für CdTe-Zellen, auf 7 für CIS-Zellen und auf 14 für a-SiGe-Zellen pro Jahr. Das entspricht ungefähr dem 30- bis 90-fachen der Jahresproduktion von 1998 und bei einem Produktionszuwachs von 30 % wäre dieser Wert in 10 bis 15 Jahren erreicht (Nitsch u.a. 2004: 94)

In diesem Fall liegt die Seltenheit in einigen Fällen tatsächlich in begrenzten Vorkommen begründet (so bei Ruthenium für Farbstoffzellen und Tellur für CdTe-Zellen). Aber auch hier wird an Ausweichstrategien gearbeitet. So geht es einerseits um das Ersetzen von Materialien durch andere geeignete (Substitution), die die Verringerung von Prozessverlusten, durch erhöhte Einstrahlung (durch Konzentratorzellen), verringerte Schichtdicken und des Recycling (siehe 2.6).

2.5.8.1 Cadmium

Cadmium ist ein Nebenprodukt aus dem Zink-, Blei und Kupferbergbau. ZnS enthält beispielsweise 0,25 % Cadmium. Bei einer Zn-Produktion von 8 Tonnen (1999) entstand genügend Cadmium.

Es besteht die Ansicht, dass das in CdTe-Solarzellen verwendete Cadmium keine Steigerung des Angebots an Cadmium braucht, sondern dass die Verwendung von Cadmium in diesen Zellen eine Art sichere Entsorgung des ansonsten störenden Cd darstellt, zumal Cd aus diesen Solarzellen zu 100 % recyclebar ist. Cd aus dem Restwasser bei der CdTe-Filmherstellung kann für CdS-Schicht genutzt werden (SVTC 2009:13)

2.5.8.2 Gallium

Gallium ist ein Begleitelement bei der Zink-, Kupfer und Aluminiumgewinnung. In der Photovoltaik wird Gallium bei Konzentratorzellen aus GaAs bzw. in CIGS-Zellen verwendet. Es ist außerdem für einige andere Zukunftstechnologien wichtig, so dass erwartet wird, dass der Bedarf an Ga bis 2030 22 mal höher ausfallen wird als 2006. (Fraunhofer ISI und IZT gGmbH 2009: 347). Ga kann nur eingeschränkt recycled werden.

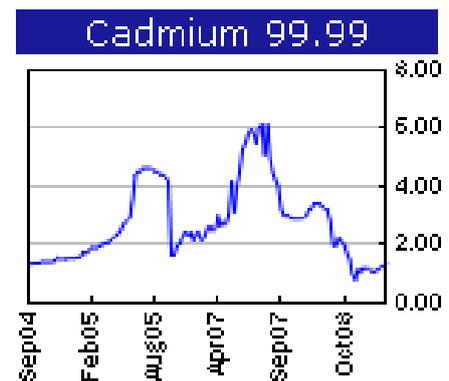


Abb. 44: Preisentwicklung für Cadmium (nach Minormetals)

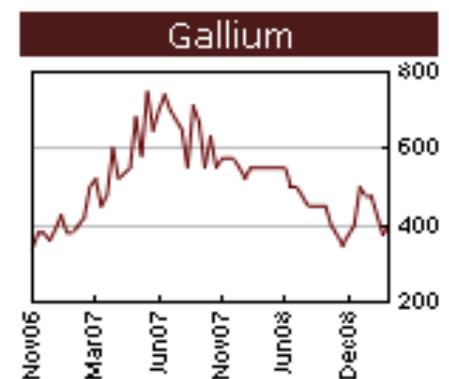


Abb. 45: Preisentwicklung für Gallium (nach Minormetals)

2.5.8.3 Germanium

Für Germanium werden folgende Daten angegeben:

	Förderung in t	Reserven in t	Ressourcen in t	Reichweite in Jahren	
				Reserven	Ressourcen
Germanium	87	450	>500	5	>6

Tab. 4: Förderung, sowie Reserven, Ressourcen und Reichweiten für Germanium (Frondele u.a. 2007: 21) Nach Fraunhofer ISI und IZT gGmbH (2009: 331) bezieht sich die Angabe für die Reserven nur auf die USA und auf die Germaniumgehalte in Zinkerzen.

Es wird als auffällig angesehen, dass die Reservenschätzungen für die USA seit 1997 konstant sind (Fraunhofer ISI und IZT gGmbH 2009: 331). Seit 2003 erhöhte sich die Produktion und der Preis (2003: 44 Tonnen mit 380 US\$/kg auf 100 Tonnen mit 1 240 US\$/kg im Jahr 2007) (ebd.: 332) Die erhöhten Preise werden zur Erschließung neuer Germaniumquellen, beispielsweise aus der Flugasche der Kohleverbrennung, führen.

Verwendet wird Germanium für Infrarotsysteme (Militär, aber auch in Luxusfahrzeugen) und zunehmend für Glasfasern (wegen seinem hohen Reflexionsvermögen). Inzwischen gewinnt Germanium in der Mikroelektronik wieder zunehmende Bedeutung, etwa in Form von Germanium-Silizium-Transistoren (Butterman, Jorgenson 2005: 16). In der Solarzellenindustrie wird Ge vorwiegend für Wafer für GaAs-Dünnschichten verwendet. Insgesamt wird erwartet, dass sich der Bedarf an Ge bis 2030 verachtfacht (Fraunhofer ISI und IZT gGmbH 2009: 340)

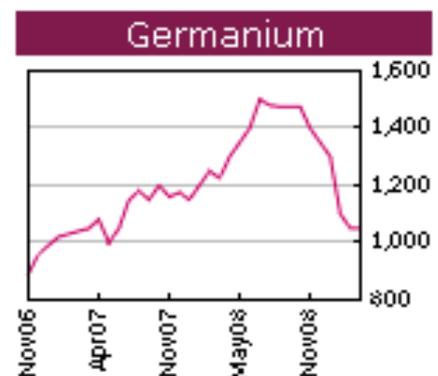


Abb. 46: Preisentwicklung für Germanium (nach Minormetals)

Germanium zählt wegen der Konzentration der Vorkommen auf wenige instabile Länder zu den für Deutschland potentiell kritischen Rohstoffen. (Frondele u.a. 2007: 21)

2.5.8.4 Indium

Ein für die Dünnschichtsolarzellen besonders wichtiger Rohstoff ist Indium. Es entsteht als Nebenprodukt bei der Produktion von Zink oder Blei.

	Förderung in. t	Reserven in t	Ressourcen in t	Reichweite in Jahren	
				Reserven	Ressourcen
Indium	405	2 800	> 6 000	7	> 15

Tab. 5: Förderung, sowie Reserven, Ressourcen und Reichweiten für Indium (Frondele u.a. 2007: 21)

Das Vorkommen (genauer: die Konzentration in der Erdkruste) von Indium ist höher als das von Silber (Phipps u.a. 2007: 1). Trotzdem wird häufig angenommen: „Indium scheint das erste industriell genutzte Metall zu sein, das laut USGS-Daten zur Neige gehen wird.“ (Müller 2005) Für Indium ist eine Korrelation von sinkenden Ressourcen und Reserven und Preissteigerung zu beobachten:

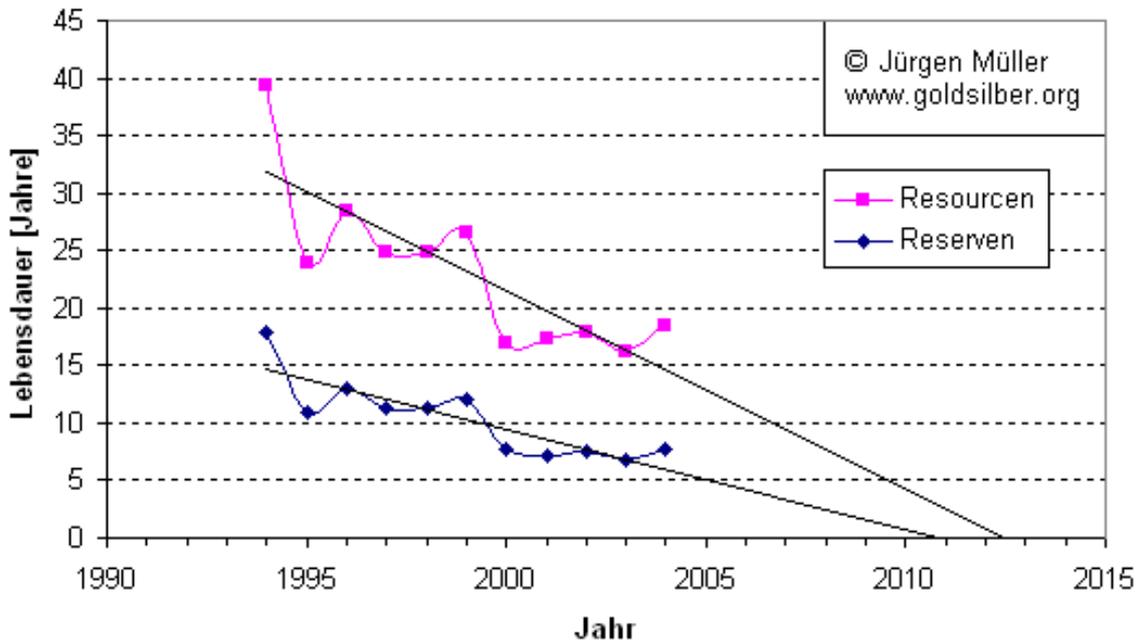


Bild 1: Extrapolierte Lebensdauern von Ressourcen und Reserven von Indium, (Quelle: USGS)

Abb. 47: Ressourcen- und Reservenreichweiten der Indiumquellen (Müller 2005)

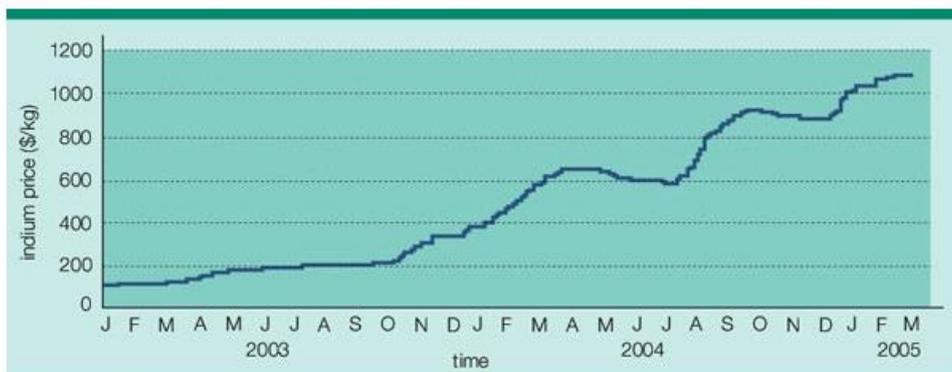


Bild 3: Preis-Chart Indium 01/2003 - 05/2005, (Quelle: www.compoundsemiconductor.net)

Abb. 48: Preisentwicklung von Indium (Müller 2005)

Nach Ressourcen- und Reservenschätzungen, die sich von Tab. 5 unterscheiden, bestehen die weltweiten „theoretischen Reserven“ in 16 000 Tonnen Indium und davon sind 11.000 Tonnen, wirtschaftlich abbaubar. (USGS 2008) Allein 8 000 Tonnen werden für China angegeben (ebd.).

Auch die Preise sind mittlerweile wieder etwas gefallen (400 Dollar pro kg im Januar 2009).

Deshalb gibt es auch entwarnende Stimmen bezüglich der Begrenztheit von Indiumvorkommen: „In den letzten Jahren wurden jedoch vor allem in China größere Mengen nachgewiesen, so dass das manchmal befürchtete schnelle Versiegen der Reserven unwahrscheinlich ist.“ (Wikipedia: Indium) Im Erzgebirge wurden auch 1000 Tonnen nachgewiesen.

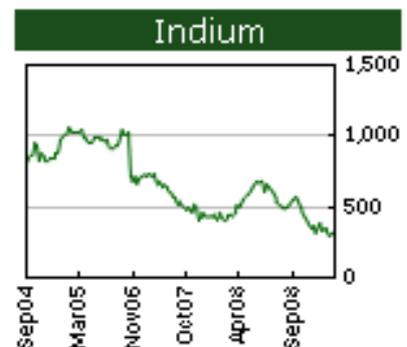


Abb. 49: Preisentwicklung für Indium (Minormetals)

Auch die Rohstoffstudie Frondel u.a. 2007 kommt zu der Schlussfolgerung, dass es bei Indium noch nicht erfasste Ressourcen gibt, die noch weit in die Zukunft reichen. (Frondel u.a. 2007: 20 f.) Indiumhersteller versprochen jedenfalls auf der 22nd EU PV Solar Conference in Mailand (im September 2007) eine ausreichende Langzeitversorgung mit Indium (und Gallium). (Phipps u.a. 2007). Sie gehen vor allem davon aus, dass in der Produktion selbst die Ausbeute wesentlich erhöht werden kann. Gerade in den letzten Jahren sollen einige dieser Methoden die Wirtschaftlichkeit erreicht haben und deshalb besteht Aussicht, dass sie breiter angewandt werden. Auch die Aufbereitung alter Schlacken wird jetzt wirtschaftlich sinnvoll.

Indium wird vor allem in der LCD-Bildschirmproduktion für ITO-Schichten (Indium-tin-oxide) verwendet. Indium kann in vielen Fällen jedoch auch durch andere Materialien substituiert werden (USGS 2008: 2). In der PV-Industrie steigt die Nachfrage nach Indium. Es liegen verschiedene Schätzungen vor:

Fraunhofer ISI und IZT gGmbH (2009: 146) schätzen den Indiumverbrauch durch die Dünnschichtzellen für 2050 auf 580 Tonnen, was ungefähr der Jahresproduktion von 2006 entspricht. Daraus wird geschlossen: „Die Indium-Verteuerung bei hoher Nachfragesteigerung kann die Entwicklung der CIS-Technologie behindern.“ (ebd.: 149) Noch deutlicher formuliert es ein an dieser Studie beteiligter Wissenschaftler (Lorenz Erdmann) in SPIEGEL Online vom 10. April 2009: „Wir rechnen damit, dass Rohstoffengpässe den massenhaften Ausbau der Solarenergie begrenzen werden.“ (Erdmann in End 2009) Zweibel (2006) berechnet, dass bis 2065 maximal 17 TW_{peak} CI(G)S-Zellen hergestellt werden können. Andere sehen nur 3,4 TW CIS als möglich an (Poortmans und Arkhiopov 2006: 457).

2.5.8.5 Selen

Die Reserven von Selen werden auf 82 000 Tonnen geschätzt, was einer Reservenreichweite von 53 Jahren entspricht. (Fraunhofer ISI und IZT gGmbH 2009: 317)

Selen wird zunehmend für CIS-Zellen benötigt werden. Selen wird außerdem in Konstruktionsglas (Färben) und in elektronischen Produkten (z.B. Kopierern) benötigt. Für die PV gilt Selen als „potenziell knapp“ (ebd.: 321).

Der Grund für einen auffallenden Preisanstieg 2004 bestand in großen Einkäufen Chinas, die die Bestände ihrer Raffinerien aufgebraucht hatten und das der Hauptnachfrager nach Selen (als Düngemittel) ist (ebd.: 319, 321).

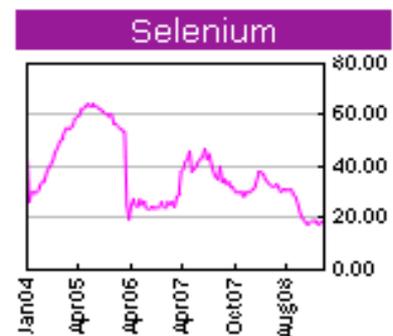


Abb. 50: Preisentwicklung für Selen (nach Minormetals)

2.5.8.6 Tellur

Tellur ist Bestandteil der CdTe-Solarzellen. Es entsteht als Nebenprodukt der großtechnischen elektrolytischen Kupfer- und Nickel-Herstellung. Zweibel (2006: 457) geht davon aus, dass bis 2065 30 TW_{peak} CdTe-Zellen installiert sein können. Auch die Studie von Fraunhofer ISI und IZT gGmbH (2009: 146) geht davon aus, dass allein CIS-Solarzellen im Jahr 2030 mehr als die heutige Jahresproduktion von Tellur benötigen. Deshalb gilt: „Die mittel- und langfristige Verfügbarkeit dürfte damit ernsthaft gefährdet sein, sofern einen merklichen Anteil am Strommarkt und CdTe-Module einen merklichen Anteil am PV-Markt haben.“ (ebd.: 149)

2.5.8.7 Ruthenium

Ruthenium, das in organischen Farbstoffzellen eingesetzt wird, entsteht als Koppelprodukt bei der Platinförderung. Es ist sehr selten und ist deshalb ein wichtiger Kostenfaktor. Als Alternative können zinkbasierte bzw. metallfreie organische Verbindungen verwendet werden, deren Beständigkeit ist aber schlechter. (Fraunhofer ISI und IZT gGmbH 2009: 134) Eventuell ist eine Recyc-

lingquote von 50 % möglich. Es wird erwartet, dass bei einer Weltproduktion von 29 Tonnen Ruthenium im Jahr 2006 der Rutheniumbedarf allein für die Farbstoffsolarzellen im Jahr 2030 1 Tonne beträgt. (ebd.: 135)

2.5.8.8 Organische und Nanomaterialien

Es gibt bisher – außer für das eben erwähnte Ruthenium – keine genauen Analysen der Rohstoffsituation für die innovativen organischen und nanobasierten Solarzellen. Insgesamt wird ausgehend von den Tandemzellen mit hohen Wirkungsgraden eingeschätzt:

„Der Vorteil dieses hohen energetischen Wirkungsgrades wird aber durch einen Materialengpass wieder wettgemacht: Tandemzellen bestehen aus sehr seltenen anorganischen, sich erschöpfenden Rohstoffen. Deswegen sind sie den Pflanzen grundsätzlich unterlegen. Die Menschheit kann nicht mittels Techniken ausreichend lange mit Elektrizität versorgt werden, die seltenste Materialien in hochkomplexer Form miteinander verbinden. Dies setzt auch den modischen „Nanotechnologien“ Grenzen. Zum Teil verbinden sie seltene Materialien in komplexer Weise und behindern dabei deren Wiederverwertung. So könnten sie nicht ausreichend lange Nutzen bringen.“ (Aubauer 2007: 17)

2.5.8.9 Zusammenfassung: Materialbegrenzungen für das PV-Wachstum

Aus der Sicht von 2001 gibt es folgende Zusammenfassung für die Begrenzung des Wachstums der Photovoltaik:

Materialbegrenzte PV-Wachstum (S: Materialbegrenzter Gesamtzubau (gesamte Reserven 1998 werden eingesetzt, um Solarzellen zu produzieren ($\eta = 10\%$, 100 Wp/m^2)))

Solarzelle	Metall	Metall-Bedarf (g/m^2)	Reserven (1998) kt	Reserve/Produktion (a)	S (TWp)	G (GWp/a)	G _{modifiz.} (GWp/a)
m-Si/p-Si	Si	keine Begrenzung					
	Ag	2,5-33	280	17	0,8-12	50-670	
CdTe	Cd	6,3	600	30	9	310	500
	Te	6,5	20	69	0,3	5	20
CIGS	Se	4,8	70	32	1,4	46	300
	Ga	0,53	110	2037	20	10	400
	In	2,9	2,6	9	0,09	7	70
aSiGe	Ge	0,44	2	32	0,5	14	200
Farbstoff	Ru	0,1	6	545	6	11	20

Zum Vergleich: Für Deckung des globalen Stromverbrauchs wären ca. 8 TWp erforderlich. G: Materialbegrenzte Wachstumsrate (jährl. Produktion 1997 wird eingesetzt, um Solarzellen zu produzieren ($\eta = 10\%$, 100 Wp/m^2)). G_{modifiz.}: G unter Berücksichtigung zukünftiger Entwicklungen (siehe Text)). Verändert nach [Andersson 2000], Ag: [Möller 1998] und [USGS 1999])

Tab. 6: Materialbegrenzte PV-Wachstum (Nitsch u.a. 2001: 215)

Im Zusammenhang mit den besonderen Dünnschichtmaterialien gibt es folgende zusammenfassende Hinweise (Fraunhofer ISI und IZT gGmbH 2009: 150):

- Versorgungsengpässe zeichnen sich am ehesten beim **Indium** für CIS ab, dessen Reserven im Besonderen limitiert und dessen Nachfrage auch durch den wachsenden Markt der Flachbildschirme angeheizt wird.
- Problematisch dürfte die mittel- und langfristige Verfügbarkeit auch bei **Tellur** werden, sofern sich CdTe-Zellen am Markt behaupten.
- Sollten sich GaAs-Dünnschichten auf einkristallinen **Germanium**-Wafeln durchsetzen, so könnte auch die Germanium-Verfügbarkeit zum limitierenden Faktor des Dünnschicht-PV-Ausbaus werden.

2.6 Recycling

Die bis Ende 2006 verbauten Solarmodule werden spätestens in 25 Jahren 350 000 Tonnen Abfall sein, das ist ein Drittel der Menge, die heute jährlich als Elektroschrott anfällt (Papathanasiou, Kreuzmann 2008). Solarzellen fallen nicht unter das Elektro- und Elektronikgesetz und die Solarhersteller wollen, dass das so bleibt, weil es sehr bürokratisch und damit auch teuer ist. Deshalb setzen sie sich proaktiv für ein eigenes freiwilliges Rücknahme- und Recycling-System ein und nannten ihre Initiative dazu PV Cycle. Ihr Ziel besteht darin, 75 % des Materials aus den Modulen zurück zu gewinnen. Es ist auch bekannt, dass mindestens 95 % des Beschichtungsmaterials von CdTe-Modulen zurück gewonnen werden können.

Da die Materialien der PV-Anlagen zu einem großen Teil aus gefährlichen Stoffen bestehen, sind die „end-of-life hazards“ auch recht hoch:

„... the toxic materials contained in solar panels will present a serious danger to public health and the environment if they are not disposed of properly when they reach the end of their useful lives.“ (SVTC 2009:25)

Die Komplexität der Materialien ist eine große Herausforderung an Recycling und auch die dabei verwendeten Schmelzprozesse können gesundheitsgefährdend sein.

Bis jetzt wurden verschiedene Recyclingmethoden entwickelt, getestet und es wurde untersucht, bis zu welcher Tiefe sich die Zerlegung von Solarzellen „lohnt“ (wo der „umweltliche Break-Even“ ist). Für Dünnschichtsolarzellen wurde festgestellt, dass wegen der geringen Menge der Materialien eine Kostendeckung kaum zu erreichen ist, weswegen gesetzliche Rahmenbedingungen bzw. ein Druck des Marktes als erforderlich angesehen werden. (Springer 2003: 68)

Es gibt inzwischen Vorschläge für das Recycling der unterschiedlichen Solarzellentypen:

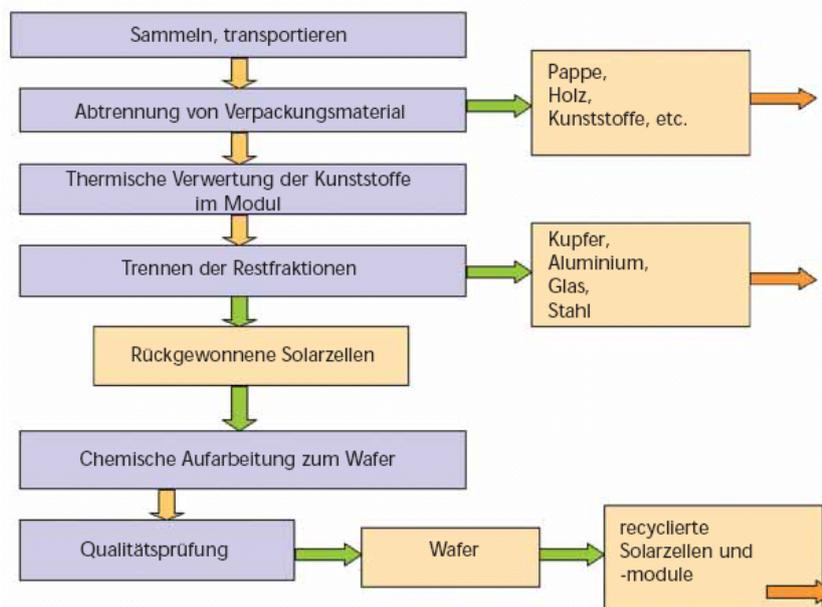


Abb. 51: Silizium-Wafer Solarmodulrecycling bei Solarworld (Springer 2003: 68)

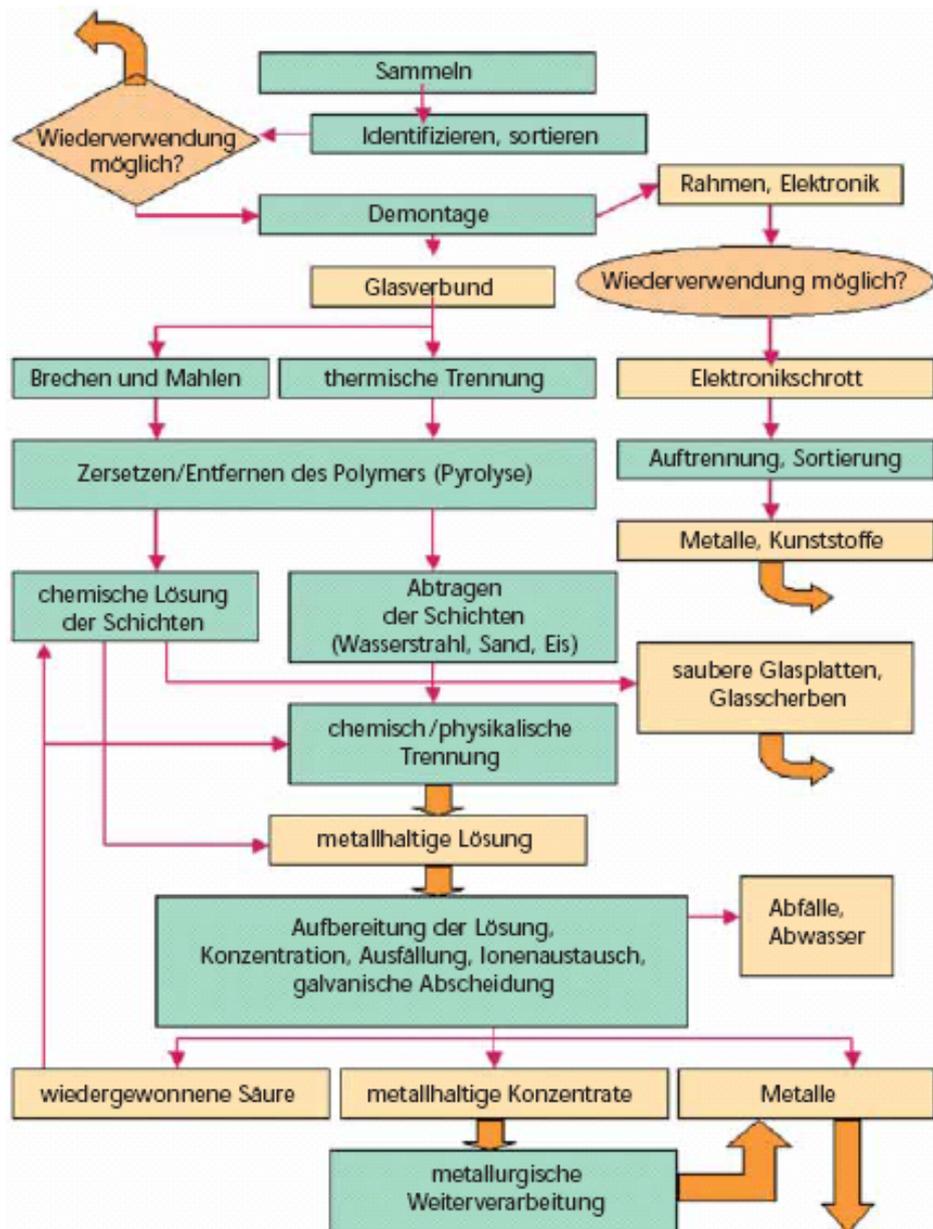


Abb. 52: Dünnschichtmodulrecycling (Springer 2003: 68)

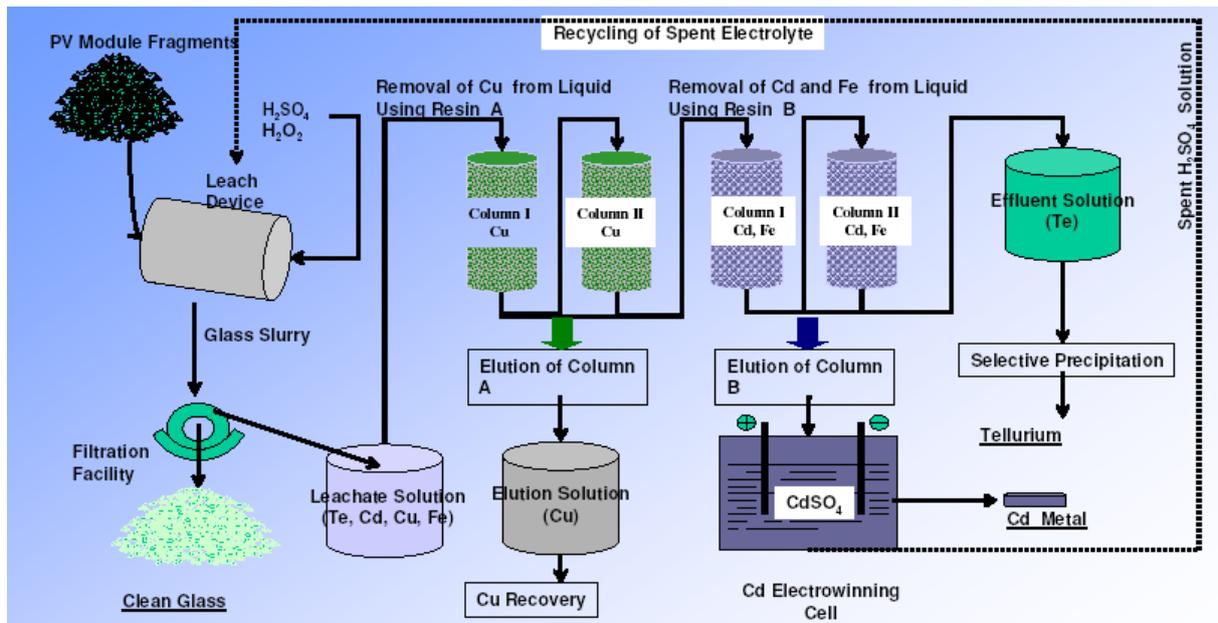


Abb. 53: Recycling von CdTe-Zellen (Alsema, de Wild-Scholten, Wambach 2007: 12)

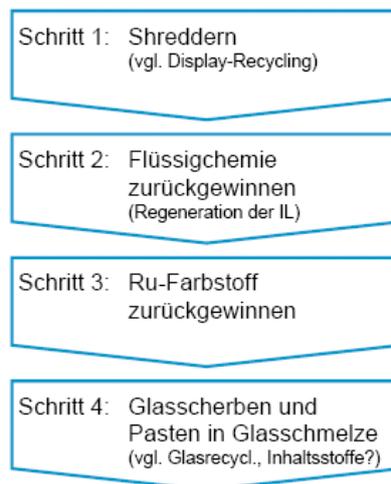


Abb.54: Recycling für Farbstoffsolarzellen ((Heubach 2007: 10)

2.7 Gesamtkosten

Da die Photovoltaik einen großen Ressourceneinsatz und viel Energie bei der Herstellung der PV-Anlagen braucht, wobei ökologische Schäden anfallen, sind die gesamtwirtschaftlichen Kosten der PV recht hoch. Missgünstige Analysen betonen deshalb, dass die PV in den spezifischen Kosten um den Faktor 15 über den fossil-nuklearen Techniken liegt und auch innerhalb der Erneuerbaren die ungünstigsten Werte hat.

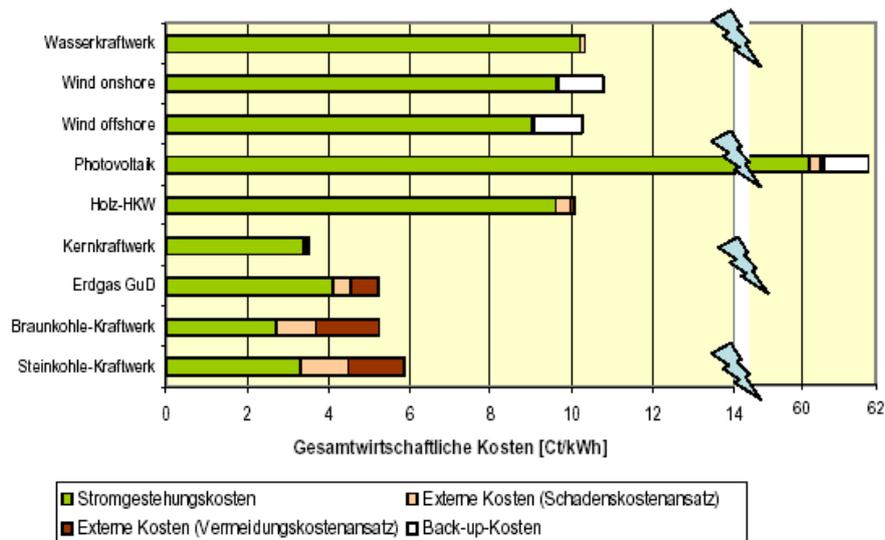


Abb. 55: Gesamtwirtschaftliche Kosten verschiedener Energieerzeugungsmethoden (Kruck, Eltrop 2007: 189)

2.8 Flächenverbrauch

Solarenergie ist in Überfülle vorhanden, aber nur, wenn man die gesamte Erdoberfläche betrachtet. Letztlich bedarf das Aufsammeln der Photonenenergie Flächen, die mit den entsprechenden aktiven Materialien bedeckt sind. Je geringer der Wirkungsgrad (z.B. bei Dünnschichtzellen im Vergleich zu siliziumwaferbasierten Solarzellen), desto mehr Fläche wird benötigt. Für die USA wird unter durchschnittlichen Bedingungen berechnet, dass die USA gerade die Fläche aller asphaltierten Straßen benötigen würde, um ihren gesamten Strombedarf zu produzieren (Luque, Hegedus 2003). Der haushaltsbezogene Strom für einen 4-Personen-Haushalt braucht 50 m^2 . Verwenden wir diese Werte für eine auf die BRD bezogene Berechnung, so würden wir für den gesamten Energiebedarf (nicht nur den hausbezogenen, auch den des Anteils an der Wirtschaft) ca. 0,86 % der Gesamtfläche der Bundesrepublik als Solarzellenfläche benötigen. Nicht berücksichtigt ist dabei natürlich, dass nur ca. 20% des Energieverbrauchs durch Strom gedeckt wird und eventuelle Transport- und Speicherleistungen noch Verluste haben.

Luque und Hegedus geben an, dass im Vergleich mit einem 1000 MW-Kohlekraftwerk genau soviel Landfläche für die gleiche Energie gebraucht (incl. Bergbau für die Kohle!) wird. Für Australien kommt Trainer (2004) unter Berücksichtigung schlechter Bedingungen und aller Verluste auf einen Flächenbedarf von 87 km^2 .

Der für eine vollständige Stromversorgung ausreichende Flächenbedarf lässt sich veranschaulichen:

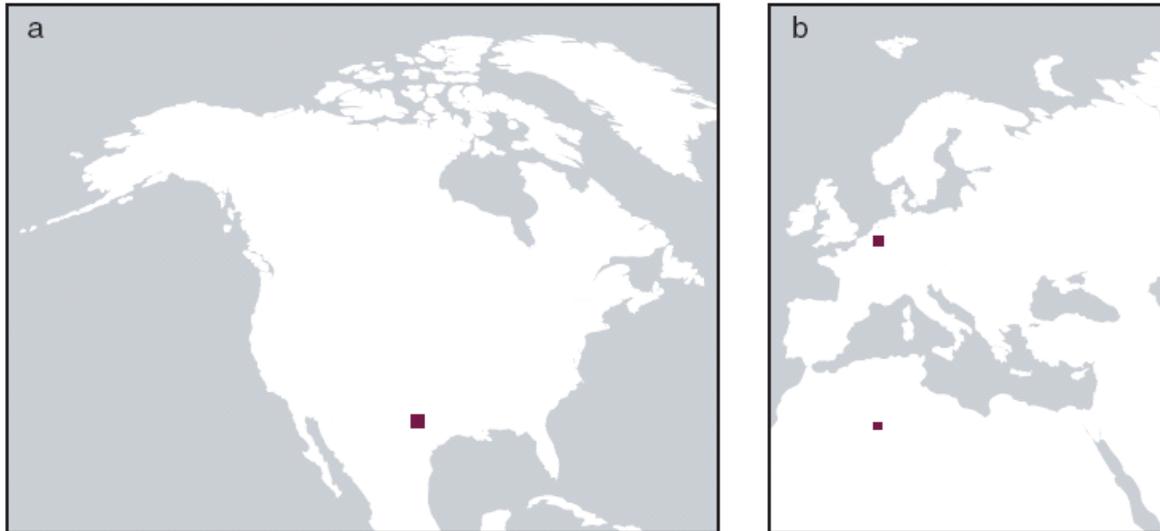


Abbildung 4.4-5

Visualisierung des Flächenbedarfs für Solarstrom. Die Quadrate veranschaulichen die Flächen, die zur Produktion des Solarstroms notwendig wären, der im exemplarischen Pfad für 2050 veranschlagt ist. (a) für Nordamerika benötigte Flächen, bei Erzeugung in Texas (100% Erzeugung in Solarkraftwerken). (b) für Westeuropa benötigte Flächen, wobei zwei Drittel des Solarstroms in Mitteleuropa gewonnen werden (oberes Quadrat; Einstrahlungswerte von Belgien, 25% Erzeugung in Solarkraftwerken, 75% dezentral), ein Drittel in der Sahara (unteres Quadrat; Einstrahlungswerte von Algerien, 100% Erzeugung in Solarkraftwerken). Die Regionen Westeuropa (WEU) und Nordamerika (NAM) sind definiert wie in Nakicenovic et al., 1998. Der Berechnung liegen die technischen Potenziale zugrunde. Die Leitungsverluste wurden pauschal mit 10% berücksichtigt.

Quelle: WBGU

Abb. 56: Flächenbedarf für Solarstrom im Jahr 2050 in Nordamerika (a) und in Westeuropa (b) (WBGU: 140)

Nach eigenen Berechnungen würde die für Photovoltaik mindestens benötigte Fläche für die USA einen Anteil von 0,08 Prozent ausmachen, wenn alle verbrauchte Energie durch PV gewonnen würde, wobei hier Einstrahlungs-, Verfügbarkeits- und Umwandlungsverluste noch nicht eingerechnet sind.

2.9 Strukturelle Schranken

Wenn man sich die Pläne, speziell der Bundesregierung, zur Energiepolitik (z.B. BMU 2007) anschaut, so finden sich die verschiedenen Energiequellen scheinbar widerspruchlos vereint. Der fossile Kraftwerkspark soll modernisiert werden, aber den Erneuerbaren wird großer Raum eingeräumt, ebenfalls der Effizienzsteigerung und dem Sparen. Das Informationszentrum „klimafreundliches Kohlekraftwerk“ (IZ Klima 2008) freut sich darüber, dass auch das umstrittene Carbon Capturing and Storage (CCS) enthalten ist. Noch blieb es beim Ausstieg aus der Kernenergie, aber nicht nur Nicolas Sarkozy ist unzufrieden mit dem deutschen Ausstieg (welt.de 2007), sondern z.B. auch der Vorsitzende des ZVEI¹⁵-Fachverbands Elektrotechnik J. Schneider forderte eine Einbeziehung der Kernenergie in die Energie- und Klimapolitik. Anscheinend passt die Kernenergie ja auch, wie CCS, ganz gut erstens in die Weiterverfolgung der Business-as-usual-Strategie der großen Energieunternehmen und zweitens in das Versprechen eines Umstiegs in eine nachhaltige Energiepolitik:

„Untersucht man die Ressourcen- und Umweltintensität von fossilen, nuklearen und erneuerbaren Stromerzeugungssystemen mittels Material-, Energie- und Stoffbilanzen, die den gesamten Lebensweg erfassen, so stellt sich die Kernenergie als ein sehr ressourceneffizientes Strombereitstellungssystem dar (was sich in den vergleichsweise geringen Gesamterzeugungskosten ausdrückt), das einen bedeutenden Anteil an einer nachhaltigen Energieversorgung haben kann.“ (Voß 2006b: 125)

¹⁵ ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V.

Mit dem Versprechen eines ausreichend umfangreichen „Strommixes“ könnten viele zufrieden sein. Wichtig ist jedoch nicht nur der jeweilige quantitative Anteil der verschiedenen Energiequellen am Mix, sondern es gibt strukturelle Widersprüche. Wenn es dabei bleibt, dass fossile und Kernenergien die „Grundlast“ bedienen, also die Netzbelastung, die während eines Tages in einem Stromnetz nicht unterschritten wird, und die Stromnetze auch auf zentralisierte Energieversorger eingerichtet sind, kann nur eine begrenzte Menge an erneuerbar erzeugter Strom zusätzlich ins Netz aufgenommen werden (ca. 30 MW Solarstrom, Kreuzmann 2008c, Rutschmann 2008). Eine Fortschreibung und „Modernisierung“ der fossilen Energietechnik blockiert also den Übergang zu einem Energieszenario auf Grundlage erneuerbarer Energien. Der Übergang zu einem solchen Szenario, wie in Abb. 2 gezeigt, erfordert erstens den großflächigen Neubau von neuen, auf Dezentralität beruhenden, „intelligenten“ Stromnetzen (wegen der Verlustminderung auf Basis von Gleichstrom und Höchstspannung) und außerdem ein völlig neues Lastmanagement. (vgl. Werner 2007, Kreuzmann 2008c, Rutschmann 2008) Diese Aufgabe wird bisher kaum diskutiert, geschweige denn in Angriff genommen.¹⁶ Dabei wäre die Aufgabe lt. Podewils machbar:

„Doch als vor rund 30 Jahren die Kernkraft Einzug in Deutschland hielt, scheuten sich Konzerne und Regierung auch nicht davor, das Stromnetz umzubauen und Nachtspeicherheizungen einzuführen, um den vielen, zu unpassender Zeit produzierten Strom loszuwerden. Warum sollte das bei der Umstellung auf die solare Stromversorgung anders sein?“ (Podewils: 2008d)

Aber die Zeit drängt. Der von Anne Kreuzmann genannte Wert von 30 GW könnte bereits 2014 erreicht werden.

Das technisch mögliche und wünschbare kann sich allerdings an der ungleichen Verteilung von Gestaltungsmacht brechen. 80 % der Netze gehören den 4 Energiekonzernen (RWE, E.on, EnBW, Vattenfall). Es wird diskutiert, dass ein ev. neu entstehendes „Super-Grid“ von der Europäischen Netzagentur betrieben wird.

Hermann Scheer, ein Pionier und eifriger Befürworter von Solarindustrie ist übrigens gegen ein solches Netz, weil es ebenfalls zu viel Machtfülle beinhaltet. (in Nano 2008)

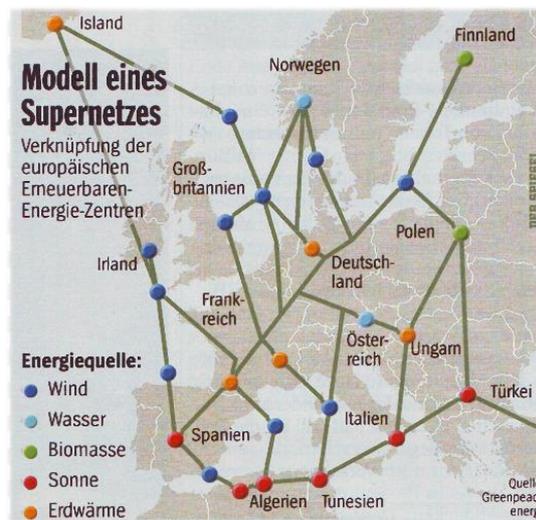


Abb. 57: Super-Grid für Erneuerbare Energien (Werner 2007: 120)

Aus völlig anderen Gründen sind nun mittlerweile auch die großen Stromversorger damit heraus gerückt, dass sie die erneuerbaren Energien als Konkurrenten nicht zulassen wollen, geschweige denn selbst umschwenken. Große Versorger meinen: „Das Regierungsziel von bis zu 35 % Strom aus erneuerbaren Energien gefährde den Betrieb der Atomkraftwerke“ (zitiert in Podewils 2009a). Wind und Solar speisen z.T. so viel ins Netz ein, dass für Strom aus KKWs kein Platz mehr bleibt – diese sind nicht flexibel genug. Außerdem führt ein Überangebot von Strom zu Preissenkungen, was die Rentabilität fossiler Kraftwerke sinken lässt (es gibt zeitweise schon negative Strompreise an der Strombörse). Deshalb will Eon den erneuerbaren Strom politisch auf ein gewisses Maß eingrenzen lassen. Die großen Energiekonzerne haben erkannt.

¹⁶ Dieses sog. „Integrationsproblem“ wird auch von jenen problematisiert, die betonen, dass erneuerbare Energien in einer wachstumsorientierten Industriegesellschaft die fossilen und Kernenergien nicht ersetzen können (siehe z. B. Trainer).

„Strom aus erneuerbaren Energien klaut den konventionellen Stromerzeugern nicht nur Marktanteile – er macht auch deren Kraftwerkspark unbrauchbar. Wenn die in Deutschland installierte Solarleistung in wenigen Jahren auf bis zu 60 oder 70 Gigawatt steigt, lassen sich Grundlastkraftwerke im Sommer kaum noch einsetzen.“ (Podewils 2009b: 68)

Hermann Scheers Konzept sieht anders aus. Er will die gesamte Infrastruktur einsparen:

„Die Energieflüsse der solaren Energien sind, außer im Fall der nahtlos in die etablierten Energieketten integrierten Großkraftpotentiale, völlig andere. [...] keine Bergwerke sind notwendig, kein Primärenergietransport, kein Energielager, keine Entsorgung von atomaren Brennstoffen oder Asche, und unter der Voraussetzung künftig verfügbarer, neuer dezentraler Stromspeicher entfällt auch die Notwendigkeit des Stromtransports. Sie machen die gesamte Primärenergiewirtschaft der Erdöl, Erdgas-, Kohle- und Uranförderer und deren Transporteure tendenziell überflüssig. Mit der Durchsetzung des Solarzeitalters wird atomar/fossile Primärenergie durch Technik ersetzt.“ (Scheer 2008: 57)

Das bedeutet:

„Die Durchsetzung des Solarzeitalters ist also gleichbedeutend mit einer strukturellen Revolutionierung der Energiebereitstellung, die weit über die Transformation der Strukturen von industrieller Produktion und gewerblicher Dienstleistungen durch Mikroelektronik und Digitalisierung hinausgeht.“ (ebd.)

Die strukturellen Widersprüche zwischen zentralisierten fossilen Kraftwerken und der Dezentralität fordernden Solarenergie werden auch von U. Kelber (2008) gesehen. Die Photovoltaik „befreit von der Abhängigkeit von einem zentralen Betreiber“ (ebd.). Er beschreibt ein Szenario, bei dem sich diese Technik quasi von allein durchsetzt und damit „eine zentrale Bedrohung für die Strombelieferung aus Großkraftwerken“ wird, „weil ab dem Zeitpunkt der sogenannten „Grid parity“ der Boom erst richtig losgehen wird.“ (ebd.).

In den USA und auch in der BRD müssen in den nächsten 20 Jahren die Hälfte aller Kraftwerke verschleißbedingt ersetzt werden. Dies öffnet ein „Fenster der Möglichkeiten“, das sich wieder schließt, wenn in den nächsten Jahren entsprechende einseitige Entscheidungen zugunsten der Interessen der großen Energieversorger getroffen werden, was leider zu erwarten ist (vgl. auch Henseling 2008: 834 f.).

Die weitere Entwicklung wird trotzdem interessant: Obwohl auch die Aktien der Unternehmen mit erneuerbarer Energie unter der gegenwärtigen Krise leiden, lassen sich Solaranlagen über kleine und unabhängige Finanzinstitute noch finanzieren (solange die Krise nicht den Lebensalltag der potentiellen Betreiber völlig ruiniert hat). Große Kraftwerksanlagen, wie KKW, lassen sich im sehr unsicher gewordenen liberalisierten Strommarkt viel schlechter finanzieren.

2.10 Die Bilanz

Obwohl die Sonne uns mit den größten Energieströmen umfließt, ist die Photovoltaik nicht unter allen Umständen die günstigste erneuerbare Energiequelle. Sie sollte an Orten mit hoher natürlicher Energiedichte eingesetzt werden – allerdings nicht in zentralisierter Weise, wie es in der Solarvision für die USA vorgesehen ist (Zweibel, Mason, Fhtenakis 2008). Und bei der technischen Weiterentwicklung sollte auf Material- und Energieeffektivität geachtet werden. Im Moment funktioniert die Senkung des Material- und Energieverbrauchs als Synergieeffekt gleichlaufend mit den Bemühungen um Kostensenkungen. In Zukunft wird sollte stärker darum gehen, auch bei der Auswahl der zu favorisierenden Solarzellenkonzepte auf die Ökobilanz zu schauen. Dünnschichtzellen bekommen, wenn ihr Wirkungsgrad noch gesteigert werden kann, hier einen großen Vorteil. Noch besser wären die derzeit eher exotischen „Nano-Zellen“, für die aber eigenständige LCAs, unter Beachtung der potentiellen Umweltproblematik von Nanomaterial, durchgeführt werden müssen.

Dies sind Hinweise, die ernst genommen werden müssen. Gleichzeitig wird auch deutlich, dass einige Analysen, bei denen die PV besonders „schlecht“ wegkommt, auch nicht neutral sind. Es fällt auch auf, dass die graphischen Darstellungen schon durch die Wahl der Skalen durchaus Spielraum lassen und dadurch tendenziöse Aussagen fördern. Deutlich wird das z.B. an den Abbildungen 22 und 25. Es ist nicht zu leugnen, dass nicht nur fachliche Neutralität in die Analysen eingeht, sondern auch Interessen.

So hatte Alfred Voß, der heute als Leiter des Instituts für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) der Universität Stuttgart viele vergleichende Untersuchungen zu Energieerzeugungstechniken leitet (siehe z.B. die Veröffentlichungen von Mayer-Spon, Kruck und Eltrop; auch das EU-Projekt ExternE läuft unter seiner Federführung) und seine Arbeitskarriere am Institut für Reaktorentwicklung der Kernforschungsanlage Jülich begann, noch 1977 in einem Artikel in „Die Zeit“ ausdrücklich festgestellt: „Ohne Nutzung der Atomkraft kann der Hunger nach Energie nicht gestillt werden“ (Voß 1977).

Vasilis Fthenakis dagegen fiel mir schon in den 90er Jahren als einer der wenigen Autoren auf, die sich bereits mit dem Recycling von PV-Anlagen beschäftigten (z.B. in Nieuwlaar, Alsema 1997).. Auch heute stammen die wichtigsten Untersuchungen, z.B. zur Umweltschädlichkeit von CdTe-Solarzellen, von ihm und er ist Autor und Koautor verschiedener LCA-Analysen der PV. Solarforschungsinstitute wie das Energy Research Center of the Netherlands (ECN) haben in den letzten Jahren ebenfalls eine große Kompetenz für PV-LCA entwickelt (ECN-Autorin: de Wild-Scholten), wobei natürlich ein starkes Interesse an einer Verbesserung der Ökobilanz der PV „durchscheint“.

Scheinbar neutral will die Webseite www.energie-fakten.de informieren und sie beantwortet auch direkt die Frage, warum in ihr die Solarenergie so schlecht wegkommt (Grawe 2005). Auch dieser Autor hat an einem Zentrum für Kernforschung in Genf (CERN) gearbeitet und will der Photovoltaik bis ans Ende dieses Jahrhunderts in unseren Breitengraden nur eine „Nische“ neben der weiter betriebenen Kernkraftoption zugestehen. Da die Festlegung auf Kernkraft strukturell die Möglichkeiten der erneuerbaren Energien allein vom Lastmanagement und der Netzgestaltung her blockiert, wäre dies eine sich selbst erfüllende Prophezeiung. Inhaltlich nennt er die starke Subventionierung der Photovoltaik, verschweigt aber jene für die anderen Energietechniken. Vom Bund gingen z.B. über 50 Jahre lang 80 % der Energieforschungsmittel in die Kernenergieforschung!

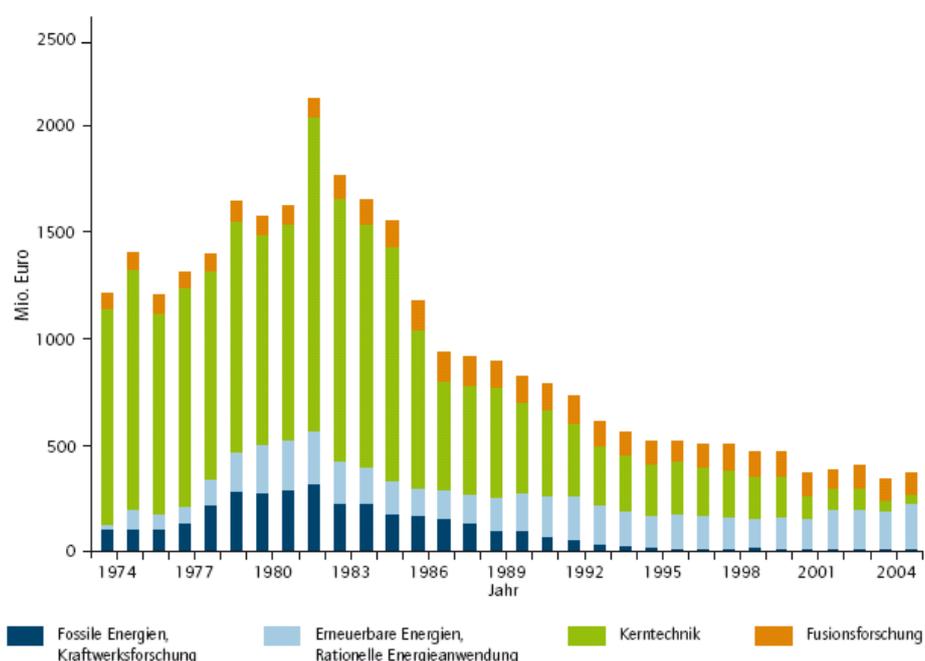


Abb.58: Forschungs- und Entwicklungsausgaben des Bundes (Voß 2006a: 15)

Interessant ist auch noch festzuhalten, dass sich die Förderung der Solarenergie bis in die 90er Jahre bewusst auf die Forschung beschränkte. Jetzt zeigte sich aber, dass erst der großindustrielle Einsatz technologische Durchbrüche ermöglicht, die im Labor gar nicht denkbar sind. Diese Durchbrüche ermöglichen notwendige Energie- und Ressourceneffizienzsteigerungen und Kostensenkungen sowie die zusätzlich energie- und ressourcensparende Diversifizierung der unterschiedlichen Technologien (Wafer-, Dünnschicht-, organische und Nanotechnologien).

Raugei u.a. (2007) nennen wichtige Aufgaben bei der weiteren Entwicklung der PV:

- Reduktion des Energieverbrauchs und der umwelt- und klimarelevanten Emissionen
- Reduzieren der Abhängigkeit von seltenen Metallen (In, Te, Ag)
- Materialflüsse schließen (Recycling)
- Null-Emission-Fabriken.

3 Die wirklichen Grenzen

3.1 Atmosphärenphysik und Biosphäre

Das globale energetische (Fließ-)Gleichgewicht in der Atmosphäre als eine der wichtigen Existenzbedingungen der Menschheit darf sich nicht in kurzer Zeit stark ändern, da damit die Lebensgrundlagen für die Menschen zerstört würden. Zurzeit scheint dieses Gleichgewicht durch die Erhöhung des CO₂-Anteils in der Atmosphäre und den dadurch bedingten verstärkten Treibhauseffekt am meisten bedroht.

Es gibt jedoch eine grundsätzliche Grenze des menschlich verursachten Energieumsatzes, die daraus resultiert, dass letztlich jede energetische Aktivität der Menschen in Form von Wärme an die Umwelt abgegeben wird. Dieser vom Menschen verursachte Beitrag zum energetischen Gleichgewicht der Erde darf das natürliche, durch die Sonneneinstrahlung bedingte Gleichgewicht nicht merklich beeinflussen. (siehe auch Pelte 2002) Als Obergrenze könnte man die Größenordnung von einem Prozent ansetzen. In der Konsequenz bedeutet das, dass die Menschheit ihre Lebensbedürfnisse grundsätzlich mit einem begrenzten Energieumsatz sichern muss, ein beliebiges Wachstum also nicht möglich ist.

“Nach derzeitigem Wissen ist zu erwarten, dass je 1% Änderung der Energiezufuhr an das System Erde + Atmosphäre Temperaturänderungen um 1 bis 1,5°C eintreten und das bereits Änderungen um einige Grad Celsius die Lebensbedingungen der Biosphäre spürbar beeinträchtigen werden. Sowie die künstliche Energieproduktion auf der Erde die Größenordnung einiger Prozent der Sonnenenergiezufuhr erreicht ist also mit voraussichtlich nicht akzeptablen Änderungen der klimatischen Verhältnisse zu rechnen.“ (Meyer-Abich 1972)

Wenn wir außer dem atmosphärischen Energiegleichgewicht noch die viel sensiblere Biosphäre berücksichtigen, so engt sich die Spannbreite der noch tolerablen menschlichen Eingriffe noch stärker ein. Prof. Hans-Peter Dürr (2003) geht davon aus, dass ca. 40-50 TW Energie(leistung), die letztlich von der Sonneneinstrahlung herrühren, in der Biosphäre „umlaufen“. Es wird eingeschätzt, dass durch menschliche Aktivitäten keine Störung in diese Bilanzen hineingebracht werden darf, die ca. 20 % des natürlichen Wertes übersteigen. Das wären dann ca. 9 TW. Umgerechnet auf die Anzahl der Menschen auf der Erde, können auf diese Weise jedem Menschen 1,5 kW Energie zur Verfügung stehen – das entspricht dem Niveau der Energienutzung eines Menschen in der Schweiz um 1969. Gegenwärtig nutzen Mitteleuropäer jedoch 6 kW, US-Amerikaner 11 kW – während die Chinesen ausgehend von 800 W ihren Wert gerade stark erhöhen und die ärmsten Menschen dieser Erde die Bilanz mit nur 80 W pro Person beeinflussen.

Um auf unserer Erde die dynamische Stabilität der Biosphäre nicht dauerhaft zu zerstören, müssen wir Mitteleuropäer unseren Energieumsatz auf ein Viertel, die US-Amerikaner auf ein Siebtel des jetzigen Wertes reduzieren. Hans-Peter Dürr schätzt ein, dass für Europäer ungefähr die

Hälfte der Energieverbrauchssenkung durch technische Mittel erreichbar ist, die andere Hälfte erfordert eine Änderung unseres Lebensstils, was jedoch nicht bedeuten muss, auf Errungenschaften der Zivilisation zu verzichten.

Die Herausforderungen der Zukunft bestehen also überhaupt nicht darin, immer mehr Energie für den materiellen Wachstumshunger der Menschheit bzw. des kapitalistischen Profitsystems bereit zu stellen, sondern neue Lebensstile zu finden, die die Umwelt auch energetisch nicht überbelasten und für Technikfreaks gibt es genug zu tun bei der Entwicklung neuer Energiegewinnungstechniken und anderer energiesparender Techniken, die unser Leben angenehmer machen.

3.2 Form und Dichte der Energie

Aus unserem Energiemix werden nur 20% der Energie als Strom gebraucht. Der Bedarf nach dieser Energieform steigt auch am schnellsten. Die erneuerbaren Energien liefern (außer bei Biomasse) hauptsächlich Strom. Es entsteht die Frage, wie die anderen Energieformen bereit gestellt werden können. Für Raum- und Prozesswärme brauchen wir gegenwärtig mehr als 70% der Energie. Eine Umwandlung aus dem Strom heraus bringt zu große Verluste mit sich. Realistischer, zumindest für mittlere Zeiträume (bis 2020) ist das Energieszenario nach Greenpeace, wo auch für die Stromerzeugung noch ein großer Anteil an fossilen Energieträgern, mit einer starken Ausweitung des umweltverträglicheren Erdgases, vorgesehen wird:

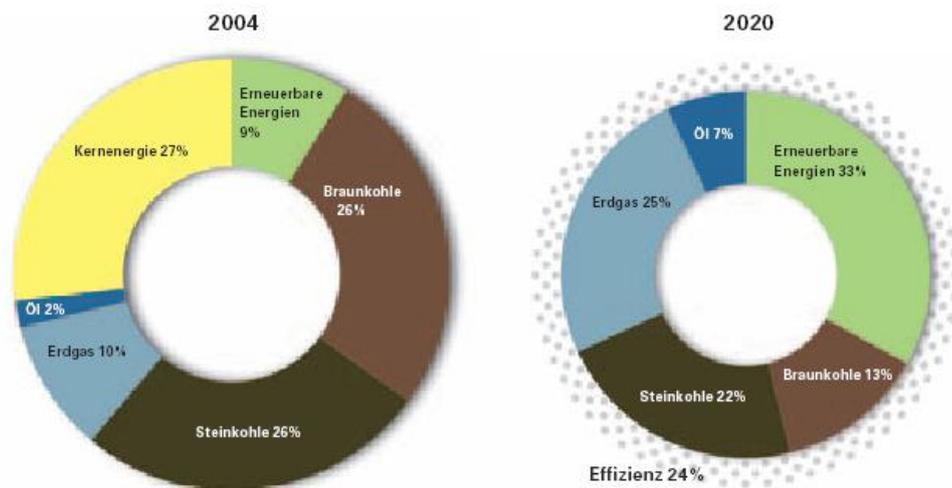


Abb. 59: Bruttostromerzeugung nach Energieträgern nach dem „Plan B“ von Greenpeace bis 2020 (EUTech, Greenpeace 2007 Kurzfassung: 14)

Es ist also äußerst fraglich, ob die erneuerbaren Energien das Potential haben, den gesamten Energieverbrauch, noch dazu bei der Annahme seines weiteren Wachstums (wie in Abb. 2 dargestellt), zu bedienen. Allein aus Gründen der Gerechtigkeit müssten bei einem Beibehalten der jetzigen Konsum-Energieverbrauchsstruktur im Jahr 2070 ca. 9 Milliarde Menschen mit dem Lebensstandard eines heutigen durchschnittlichen Australiers versorgt werden. Bei einem Wachstum von 3 % entsteht bis dahin ein ökonomischer Output, der 60 mal über dem heutigen liegt (Trainer 2009: 24). Allein diese Quantität macht die Hoffnung illusorisch, dass Effizienzsteigerungen das Problem lösen könnten.

Ein anderes Problem ist die viel geringere Energiedichte der erneuerbaren Energien im Vergleich zur fossilen und der Kernenergie. Fossile Energie ist wesentlich verdichteter und erfordert viel weniger Aufwand zu seiner Erschließung als Erneuerbare, die zwar wie die Sonne rein quantitativ unsere Bedürfnisse vielfach befriedigen könnten – aber nur mit recht großem Aufwand „einzufangen“ ist. (vgl. auch Pelte 2002, Cleveland 2000)

Wie in der nebenstehenden Abbildung gezeigt wird, brauchen wir für den Ersatz von 1 Kubikmeile Öl 32 850 Windkraftträder oder 91 250 000 Solarmodule, die jeweils mehrere Jahrzehnte arbeiten.

Ein anderer Vergleich: Für die Energie, die 1 Liter Öl enthält, muss ein handelsübliches 170 kWh-Modul je nach Witterungslage 11 bis 150 Tage lang Strom erzeugen.

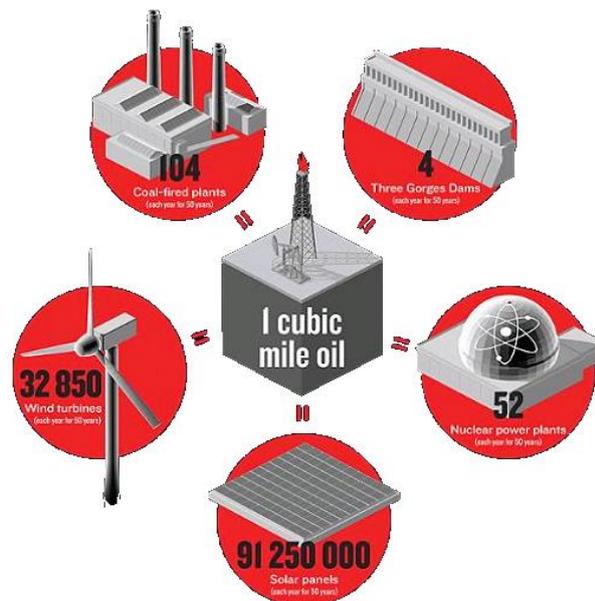


Abb. 60: Ersatz für 1 Kubikmeile Öl (nach Brangwyn 2008: 47)

Deutlicher werden die Probleme, die erneuerbare Energien mit unserem Lebensstandard haben, an einem anderen Beispiel. Das „Bioenergie-dorf Jühnde“ ist für viele ein Vorbild. 70% der Menschen in diesem Dorf versorgen sich mit Strom und Fernwärme aus Biogas und Holzhackschnitzeln selbst. Da nur 12 % aller Menschen auf dem Dorf leben und 70 % der Menschen in Jühnde beteiligt sind, sprechen wir von 8% der Menschen, die es betrifft. Es ist auch bekannt, wieviel Fläche in Jühnde dafür eingesetzt wird. Daraus ergibt sich mit einer einfachen Rechnung:

„Nehmen wir an, jedes deutsche Dorf würde sich entschließen, ebenfalls ein Bioenergie-dorf zu werden. Mit einem Mal würden ein Drittel der deutschen Agrarfläche und ein Fünftel der Gesamtwaldfläche benötigt, um diese gut 8 Prozent der Bevölkerung allein mit Strom und Heizung zu versorgen...!“ (Ohm 2009)



Abb. 61: Einziger Ausweg? (Brook)

Das für Kernkraftgegner erschütternde Ergebnis lautet, dass tatsächlich nur Kernkraft das Potential hat, auf der einen Seite Energie ohne eine hohe Treibhausgasemission zu erzeugen und auf der anderen Seite wachsende Wirtschaftskraft zu ermöglichen. Wenn wir die wachstumsorientierte energieintensive Wirtschaft nicht aufgeben wollen, ohne in einem starken Klimawandel die Grundlagen unserer Lebensweise zu verlieren, erscheint die Kernkraft als Ausweg, wobei dann in einigen Jahrzehnten entweder das Uran ausgeht oder doch eine Art Wiederaufbereitung entwickelt werden muss. Rein technisch mag uns dieser Weg offen stehen, ob wir ihn beschreiten wollen und können, ist keine technische, sondern eine gesellschaftspolitische Frage.

3.3 Wirtschaftsweise und Gesellschaftsform

3.3.1 Erneuerbare Energie für eine Wachstumsgesellschaft?

Das ökonomische Wachstum der industrialisierten kapitalistischen Wirtschaft wurde ganz stark von der fossilen Energie, die menschliche Arbeit ersetzen konnte, getrieben. Was passiert, wenn diese Quelle wegfällt und auf erneuerbare Energien umgestellt wird? Reicht der „Treibstoff“ noch für die Umstellung? Jay Hanson (1999) gibt als Vergleich für unser Energiesystem einen Motorroller an, der noch 5 Gallonen Benzin hat, aber zur nächsten Tankstelle 6 Gallonen Benzin braucht. Er kommt zu dem Schluss:

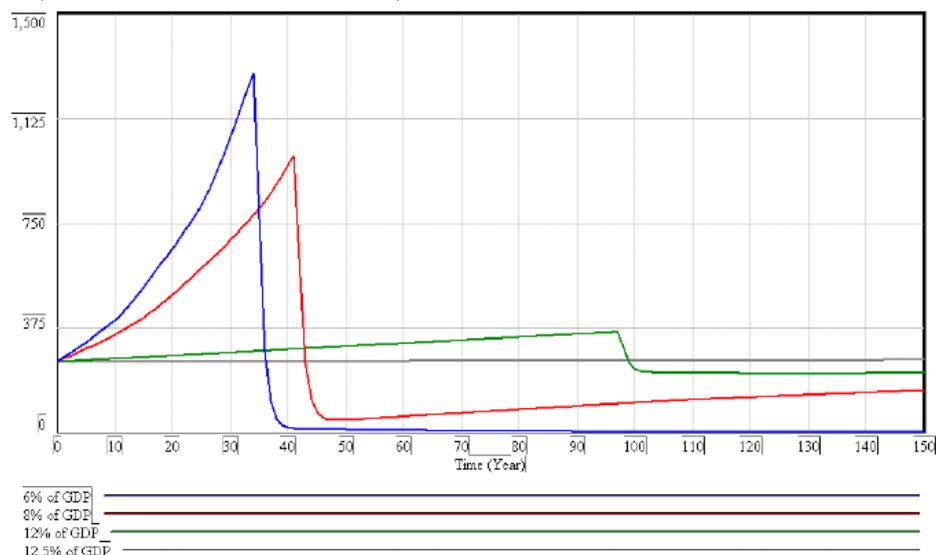
„America’s economic machine is „out of gas“ – forever.“ (ebd.)



Abb. 62: Reicht der Treibstoff noch für eine Wende? (Hanson 2001b: 2-6)

Mit einer Simulation untersuchten d’Alessandro u.a. (2008a und 2008b) die Frage, wie wahrscheinlich es ist, dass bei beibehaltenem Wirtschaftswachstum die fossilen Energien versiegen, bevor genügend Wissen und Produktionskapazität mit erneuerbaren Energien entwickelt wurde, um den Energiebedarf zu liefern. Eine der Voraussetzungen des Modells ist dabei, dass erst mit der Umstellung begonnen wird, wenn die fossilen Energiequellen sich zu erschöpfen beginnen. Das Modell ist nichtlinear, denn jeweils wird das schon erreichte Niveau an Erneuerbaren wieder verwendet, um weiteres Potential für erneuerbare Energien zu entwickeln.

Das Ergebnis zeigt, dass bei einem recht geringen Einsatz des Bruttoeinkommens der Wohlstand noch sehr stark steigt, aber bald an einem gewissen Punkt abrupt abbricht und auf einen sehr tiefen Wert fällt, von dem er sich langsam und stetig erholt, aber in einen niedrigeren Wert als früher einmündet. Je mehr nun investiert wird, desto geringer fällt der vor dem Abfall erreichte Spitzenwert aus und umso höher steigt der Wohlstand nach dem Abfall wieder. Aber er steigt maximal nur bis ungefähr zu dem Wert, der zu Beginn der Erschöpfung der fossilen Reserven erreicht war. (d’Alessandro u.a. 2008a: 136)



Consumption paths for different levels of investment in alternative energy (high initial capital level).

Abb. 63: Simulation der Konsumtion in Abhängigkeit von dem in erneuerbare Energien investierten Aufwand (d'Alessandro u.a. 2008a: 136)

Das „Nachhaltigkeitsfenster“ für die Wirtschaft ist also sehr eng. Genauere Rechnungen (d'Alessandro u.a. 2008b) zeigen, dass ein zu starkes Investment in Erneuerbare und auch ein zu geringes zu einem dramatischen Langzeitabfall des Wohlstandsindikators führen. Etwas drastisch formuliert Jay Hanson (2001c) diese Situation:

„The fact that our society can not survive on alternative energy should come as no surprise, because only an idiot would believe that windmills and solar panels can run bulldozers, elevators, steel mills, glass factories, electric heat, air conditioning, aircraft, automobiles, etc., AND still have enough energy left over to support a corrupt political system, armies, etc.”

Der Weg zur Nachhaltigkeit wird breiter, wenn in einem anderen Szenario nicht angenommen wird, dass die Konsumtion exponentiell steigt, sondern wenn angenommen wird, dass das gesamte Wachstum in Kapitalinvestments und Investments in die Erneuerbaren geht.

3.3.2 Verzicht auf Wachstum

Szenarien, die nicht von einem Wachstum ausgehen, sind von Greenpeace für die Bundesrepublik entwickelt worden und für Frankreich gibt es ebenfalls solch ein Szenarium:

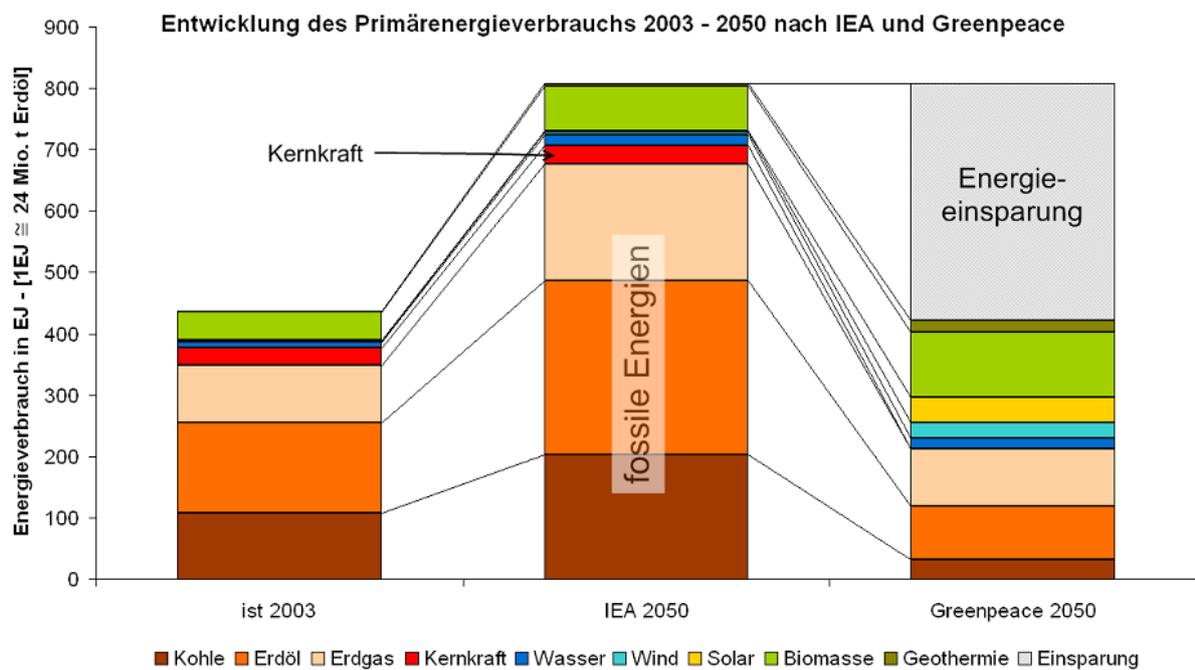


Abb. 64: Vergleich der Szenarien der IEA¹⁷ und von Greenpeace (Quelle der Abbildung unbekannt)

¹⁷ International Energy Agency - Unterorganisation der OECD

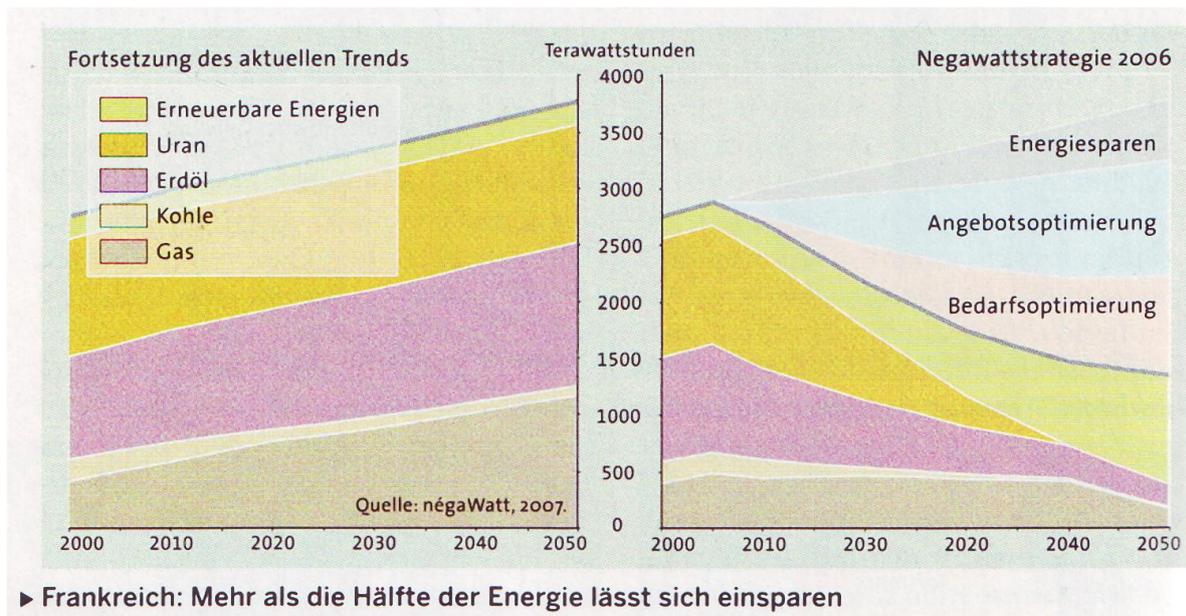


Abb. 65: Die „Negawattstrategie“ für Frankreich (Atlas der Globalisierung: 70)

Im Übrigen hängt weder die Lebenszufriedenheit noch das erreichte Ergebnis auf dem „Human Development Index“ (HDI)¹⁸ ab einem gewissen Maß nicht mehr von einer weiteren Steigerung des Energieverbrauchs ab. Bei einem Maß von ca. 100 GJ/Person steigt trotz höherem Energieverbrauch dieser Index nicht mehr (siehe WBGU 2003: 25 und GNDG: 33).

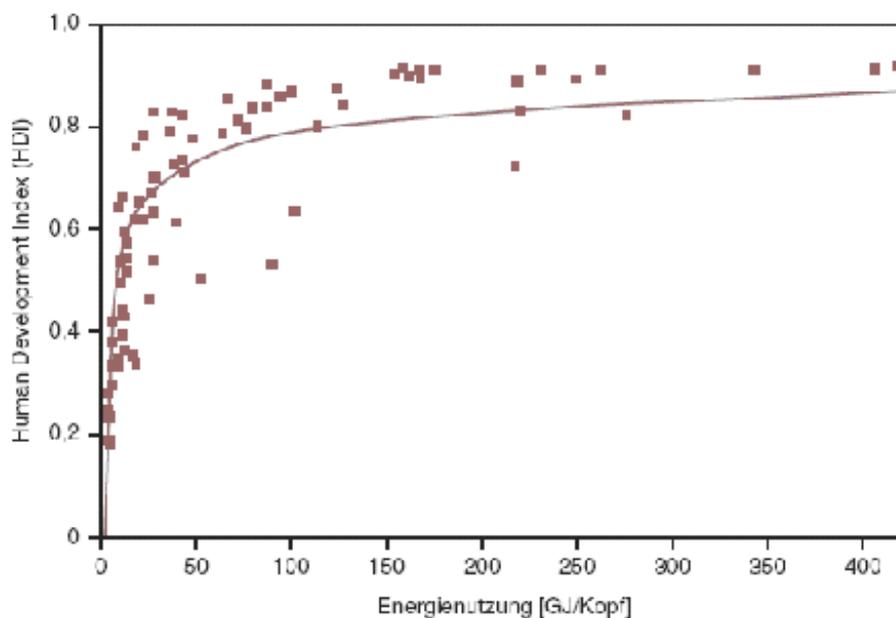


Abb. 66: Pro Kopf Energieeinsatz und der Index menschlicher Entwicklung (HDI) für 1991/1992 (aus WBGU 2003: 25)

Um eine bessere Einordnung zu ermöglichen, sei noch angegeben, dass Nordamerikaner im Jahr 2003 327,6 GJ, Europäer 145,8 GJ und Inder 21,6 GJ Energie verbraucht haben. Der von Hans-Peter Dürr (in 3.1) angegebene akzeptable Verbrauchswert liegt bei nur 1,5 kW, was auf das Jahr berechnet einen Energieverbrauch von 47,3 GJ ergibt. Ökologisch nachhaltig ist demnach nicht einmal das Maximum des in HDI angegebenen „Wohlstands“, das ungefähr beim Doppelten des verträglichen Energiewertes liegt.

¹⁸ Index der menschlichen Entwicklung in den Ländern der Welt. (mehr siehe: http://de.wikipedia.org/wiki/Human_Development_Index)

3.3.3 ... gehen, wohin noch niemand war

Die Abb. 66 zeigt, dass unser Wohlergehen nicht von immer mehr Energieverbrauch abhängt. Zwar erreichen wir mit dem verträglichen Energieverbrauch von 1,5 kW pro Person (Dürr) nicht den maximalen HDI-wert, sondern einem „mittleren Entwicklungsstand“ (Wikipedia: HDI), den längst nicht die Mehrheit der Menschen bisher erreicht hat. Andere Wohlfahrts-Indizes zeigen, dass auch in den hochentwickelten Industrieländern diese Indizes seit Mitte der 70er Jahre nicht mehr steigen, auch wenn das Bruttosozialprodukt weiter gewachsen ist (z.B. Bleys 2008). Nachdem sich der Weg, das Wachstum des Bruttosozialprodukts als „Entwicklung“ zu verstehen, als Sackgasse erweist, müssen wir neu bestimmen, wie und wohin wir uns so entwickeln wollen, dass Entwicklung für alle Menschen dieser Erde und in Zukunft möglich ist (vgl. auch Trainer 2005).¹⁹

Es wird also darum gehen, für alle Menschen dieser Erde eine zufriedenstellende und ökologisch zumindest verträgliche neue Wirtschafts- und Lebensweise zu entwickeln. Wir brauchen dazu natürlich möglichst weit und optimal entwickelte Techniken für erneuerbare Energien, die den dann ausreichenden Energiebedarf sicherstellen und vor allem den jeweiligen regionalen Bedingungen angepasst sind, ohne auf intelligente Vernetzung zu verzichten. Wir brauchen auch neue Produktionstechnologien, mit denen Menschen weiterhin ohne Mühsal und Qual kreativ tätig sein können, um ihre Bedürfnisse zu befriedigen. Aber am dringendsten sind nicht die technischen Erfindungen, sondern die sozialen. Wie können Menschen selbstbestimmt so mit der Befriedigung ihrer eigenen Bedürfnisse umgehen (wozu selbstverständlich auch die Bedürfnisse nach einer lebenswerten Umwelt gehören), dass nicht mehr ökonomische Profitinteressen im Mittelpunkt stehen, sondern die größte Lebensqualität aller Menschen in einer schöpferischen „Allianz mit der Natur“ (Bloch 1985: 813)?

Diese gesellschaftliche Wende steht als neue Entwicklungsaufgabe vor uns. Sie kann nur gelingen, wenn wir die Legitimation zum Handeln nicht an andere abgeben, weder ökodiktatorisch noch „repräsentativ demokratisch“. Die neue Gesellschaftsform entsteht durch uns oder gar nicht.

¹⁹ Zum Zusammenhang von Energieverbrauch und menschlicher Entwicklung siehe z.B. auch Cleveland 2000.

Literatur

- Alsema, E.A., de Wild-Scholten, M.J. (2004) : *Environmental Life Cycle Assessment of Advanced Silicon Solar Cell Technologies*. In Internet: <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2004/rx04060.pdf> (abgerufen 13.05.2009)
- Alsema, E.A., de Wild-Scholten, M.J. (2007a) : *Reduction the Environment Impacts in Crystalline Silicon Module Manufacturing*. In Internet: <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2007/m07027.pdf> (abgerufen 13.05.2009)
- Alsema, E.A., de Wild-Scholten, M.J. (2007b) : *Reduction of Environmental Impacts in Crystalline Silicon Photovoltaics Technology: An Analysis of Driving Forces and Opportunities*. In Internet: <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2007/m07059.pdf> (abgerufen 13.05.2009)
- Alsema, E.A., de Wild-Scholten, M.J., Fthenakis V.M. (2006) : *Environmental Impacts of PV Electricity Generation – a Critical Comparison of Energy Supply Options*. In Internet: <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2006/rx06041.pdf> (abgerufen 13.05.2009)
- Alsema, E.A., de Wild-Scholten, M.J., Wambach K. (2007): *IEA PVPS Task 12. Environment, Health and Safety*. In Internet: http://www.eupvindustryforum.org/Files/PDF/070905_PVIF_4_3_Fthenakis.pdf (abgerufen 16.05.2009)
- Andersson, B.A.; Azar, C., Holmberg, J.; Karlsson, S. (1998): *Material Constraints for Thin-Film Solar Cells*. Energy Vol. 23, No. 5. 1998. pp. 407-411.
- Atlas der Globalisierung: LE MONDE diplomatique: *Atlas der Globalisierung. spezial: Klima*. Paris 2007.
- Aubauer, Hans Peter (2007): „Sanfte“ statt „harten“ Technikpfaden! In Internet: <http://homepage.univie.ac.at/hans.peter.aubauer/dateien/Sanfte%20statt%20harter%20Techniken!.pdf> (abgerufen 13.01.2009)
- Aulich, Hubert A. (2007): *Von der Manufaktur zu Giga-Watt-Anlagen – die Solarenergie auf dem Weg zur Großindustrie*. In: Forschungsverbund Sonnenenergie (FVS) und Bundesverband Solarwirtschaft (BSW) (2007): *Produktionstechnologien für die Solarindustrie*. S. 36-44. In Internet: http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Themenhefte/th2007/th2007_02_04.pdf (abgerufen 03.05.2009)
- Aulich, H.A.;Schulze F., W.: (2005) , Solar Grade Silicon - The view from a major user, **2nd** Solar Silicon Conference. München.
- Bärmann, Benni; Meretz, Stefan; Merten, Stefan; Schlemm, Annette (2005): *Knappheit*. In Internet: <http://www.thur.de/philo/knappheit.htm> (abgerufen 16.05.2009), siehe dazu auch Internet: <http://www.coforum.de/?733> (abgerufen 16.05.2009)
- Bleys, Brent (2008): *A Simplified Index of Sustainable Economic Welfare (SISEW) for France 1980-2006*. In Internet: <http://events.it-sudparis.eu/degrowthconference/themes/3Second%20sessions%20panel/1Indicators/Bleys%20B%20%20Degrowth%20Paris%20april%202008%20presentation.pdf> (abgerufen 19.05.2009)
- Bloch, Ernst (1985): *Das Prinzip Hoffnung*. Werkausgabe Band 5. Frankfurt am Main: Suhrkamp Verlag. 1985.
- BMU (2007): *Das Integrierte Energie- und Klimaprogramm der Bundesregierung*. In Internet: http://www.bmu.de/klimaschutz/nationale_klimapolitik/doc/40550.php#III (abgerufen 17-05.2009)
- Bolz, Walter (2003): *Ökostrom – Innovationsmotor oder Wirtschaftsbremse*. In Internet: http://www.energieinstitut.at/HP/Upload/Dateien/Energischer_Tisch_PV-Vortrag_Bolz.pdf (abgerufen 02.05.2009)
- Borbély, Dora (2009): *Rohstofflager quellen über – Preise fallen weiter (2.3.09)*. In Internet: <http://www.godmode-trader.de/de/boerse-analyse/Rohstofflager-quellen-ueber---Preise-fallen-weiter,a1173843,c44.html> (abgerufen 14.05.2009)
- Branwyn, Ben (2008): *Peak oil, climate change and transition*. In Internet: <http://transitionnetwork.org/Presentations/TransitionNetwork-STANDARD-BenBrangwyn-Oct08.ppt> (abgerufen 18.05.2009)

- Brook, Barry: *Blog BraveNewClimate*. In Internet: <http://bravenewclimate.com/> (abgerufen 19.05.2009)
- Butterman, W.C., Jorgenson, J.D. (2005): *Germanium. Mineral Commodity Profiles*, Open-File Report 2004-1218. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey. Reston, Reston, Va. In Internet: <http://pubs.usgs.gov/of/2004/1218/2004-1218.pdf> (abgerufen 17.05.2009)
- Cleveland, Cutler J. (1999): *Biophysical Economics: From Physiocracy to Ecological Economics and Industrial Ecology*. In Internet: http://www.bu.edu/cees/people/faculty/cutler/articles/Biophysical_Econ.pdf (abgerufen 19.05.2009)
- Cleveland, Cutler J. (2000): *Energy Quality, Net Energy, and the Coming Energy Transition*. In Internet: <http://www.hubbertpeak.com/Cleveland/EnergyQualityNetEnergyComingTransition.pdf> (abgerufen 19.05.2009)
- Cleveland, Cutler J. ; Kaufmann, Robert K.; Stern, David I. (2000): *Aggregation and the role of energy in the economy*. In Internet: <http://dieoff.org/cleveland.pdf> (abgerufen 19.05.2009)
- CRYSTALCLEAR: *The CRYSTALCLEAR Integrated Project: next generation crystalline silicon technology from lab to production*. In Internet: <http://www.ipcrystalclear.info/Shared%20Documents/Project%20publications/CrystalClear%20brochure.pdf> (abgerufen 13.05.2009)
- d'Alessandro, Simone; Luzzati, Tommaso; Morroni, Mario (2008a): *GDP growth, consumption and investment composition: feasible transition paths towards energy sustainability*. First international conference on Economic De-growth for Ecological Sustainability and Social Equity. Paris 2008. In Internet: <http://events.it-sudparis.eu/degrowthconference/en/themes/3Second%20sessions%20panel/2Complementarity%20Steady%20state%20and%20degrowth/Luzzati%20T%20&%20al%20Degrowth%20Paris%20april%202008%20paper.pdf> (abgerufen 17.05.2009)
- d'Alessandro, Simone; Luzzati, Tommaso; Morroni, Mario (2008b): *GDP growth: an inevitable lock-in?* In Internet: <http://events.it-sudparis.eu/degrowthconference/themes/3Second%20sessions%20panel/2Complementarity%20Steady%20state%20and%20degrowth/Luzzati%20T%20Degrowth%20Paris%20april%202008%20presentation.pdf> (abgerufen 17.05.2009)
- de Wilden-Scholten (2008): *LCA Comparison of the ELKEM Solar Metallurgical Route and Conventional Gas Routes to Solar Silicon*. In Internet: <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2006/rx06016.pdf> (abgerufen 13.05.2009)
- DGAP-News: *Graphit Kropfmühl AG* (deutsch) (2008): <http://www.finanznachrichten.de/nachrichten-2008-08/11498275-dgap-news-graphit-kropfmuehl-ag-deutsch-016.htm> (abgerufen 21.01.2009)
- Dürr, Hans-Peter (2003): *Die 1,5 Kilowatt-Gesellschaft. Intelligente Energienutzung als Schlüssel zu einer ökologisch nachhaltigen Wirtschaftsweise*. In Internet: <http://gcn.de/download/D15KW.pdf> (abgerufen 15.05.2009)
- End, Aurelia (2009): *Das neue Gold*. In Internet: <http://www.spiegel.de/netzwelt/tech/0,1518,618346,00.html> (abgerufen 17.05.2009)
- EPIA, Greenpeace (2008): *Solar Generation V – 2008: Solar Electricity for over one billion people and two million jobs by 2020*. In Internet: http://www.epia.org/fileadmin/EPIA_docs/documents/EPIA_SG_V_ENGLISH_FULL_Sept2008.pdf (abgerufen 16.03.2009)
- EU (Commission of the European Communities 2007): *Renewable Energy Road Map. Renewable energies in the 21st century: building a more sustainable future*. Brüssel. In Internet: http://ec.europa.eu/energy/energy_policy/doc/03_renewable_energy_roadmap_en.pdf (abgerufen 16.03.2009)
- EUTech, Greenpeace (2007, Langfassung): *Nationales Energiekonzept bis 2020 Klimaschutz: Plan B*. In Internet: http://www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user_upload/themen/klima/Klimaschutz_PlanB.pdf (abgerufen 29.04.2009)

- EUtech, Greenpeace (2007, Kurzfassung): *Klimaschutz: Plan B. Nationales Energiekonzept bis 2020*. In Internet: http://www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user_upload/themen/klima/Klimaschutz_PlanB_kurz.pdf (abgerufen 11.05.2009)
- Exner, Andreas; Lenk, Christian (2008): *Die ökologische Krise des Kapitals*. In: Streifzüge Nr. 44, November 2008, S. 8-9.
- Fell, Hans-Josef (2007): *Anmerkungen zur weltweiten Verknappung fossiler und atomarer Brennstoffe*. In: Forschungsverbund Sonnenenergie (FVS) und Bundesverband Solarwirtschaft (BSW) (2007): *Produktionstechnologien für die Solarindustrie*. S. 143-148.
- finanzen.net (2009): *Aktueller Kupferpreis in USD je Tonne*. In Internet <http://www.finanzen.net/rohstoffe/kupferpreis> (abgerufen 16.05.2009)
- Fraunhofer ISI und IZT gGmbH (2009): *Rohstoffe für Zukunftstechnologien*. Fraunhofer IRB Verlag.
- Friedrich, Rainer (2002): *Wie hoch sind die "externen Kosten" der verschiedenen Energie-Techniken bei der Stromerzeugung?* In Internet: <http://www.energie-fakten.de/pdf/externe-kosten.pdf> (abgerufen 15.05.2009)
- Fritsche Uwe R. (2006): *Comparison of Greenhouse-Gas Emissions and Abatement Cost of Nuclear and Alternative Energy Options from a Life-Cycle Perspektive*. Darmstadt, Öko-Institut e.V. In Internet: <http://www.oeko.de/oekodoc/315/2006-017-en.pdf>. (abgerufen 04.05.2009)
- Fritsche, Uwe R., Lenz, Volker (2000): *Kurzstudie: Ökobilanz zu PV- und dieselbetriebenen Bewässerungspumpenanlagen in Entwicklungsländern*. In Internet: <http://www.oeko.de/service/gemis/files/doku/pvp-gtz-final.pdf>. (abgerufen 04.05.2009)
- Frondel, M., Grösche, P., Huchtemann, D., Oberheitmann, A., Peters, J. (2007): *Trends der Angebots- und Nachfragesituation bei mineralischen Rohstoffen*. In Internet: http://www.isi.fhg.de/n/Projekte/pdf/Endbericht_Rohstoffe.pdf (abgerufen 13.05.2009)
- Fthenakis, Vasilis; Moskowitz, Paul (1990): *An Assessment of Silane Explosion Hazards*. Solid State Technology 33(1): 81-85, 1990.
- Fthenakis V.M. (2007): *IEA PVPS Task 12 on Environment, Health and Safety*. EPIA European PV Industry Forum 22nd EUPVSEC, Milan, Italy, Sept. 5, 2007. In Internet: http://www.eupvindustryforum.org/Files/PDF/070905_PVIF_4_3_Fthenakis.pdf (abgerufen 15.05.2009)
- Fthenakis V.M., Alsema E.A., de Wild-Scholten M.J. (2005): *Life Cycle Assessment of Photovoltaics: Perceptions, Needs, and Challenges*. 31st IEEE Photovoltaic Specialist Conference, Jan. 3-7, 2005, Orlando. In Internet: http://www.nrel.gov/pv/thin_film/docs/fthenakis_alsema_dewild_ieee_pvsc_2005.pdf (abgerufen 29.04.2009)
- Fthenakis V.M., Alsema E.A., de Wild-Scholten M.J. (2006): *Environmental Impacts of PV Electricity Generation- A Critical Comparison of Energy Supply Options*. In Internet: <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2006/rx06016.pdf> (abgerufen 14.05.2009)
- Global 2000 (1980): *Bericht an den Präsidenten*. Herausgegeben vom Council on Environmental Quality und dem US-Außenministerium. Gerald O. Barney, Study Director. Washington, U. S. Government Printing Office, 1980. Deutsch: Frankfurt am Main, 1980.
- Glockner, R., Odden, J.O., Halvorsen, G.; Tronstad, R. (2008): *Environmental Life Cycle Assessment of Advanced Silicon Solar Cell Technologies*. In Internet: <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2004/rx04060.pdf> (abgerufen 13.05.2009)
- GNDG - Green New Deal Group (2008): *A Green New Deal. The first report of the Green New Deal Group*. In Internet <http://www.neweconomics.org/gen/uploads/2ajogu45c1id4w55tofmpy5520072008172656.pdf> (abgerufen 16.05.2009)
- Grawe, Joachim (2005): *Warum kommt bei Ihnen die Solarenergie so schlecht weg ?* In Internet: <http://www.energie-fakten.de/html/as-pull-down/regenerative-energien/solarstrahlung.html> (abgerufen 14.05.2009)
- Hanson, Jay (1999): *Energetic Limits to Growth*. In Internet <http://www.dieoff.org/page175.htm> (abgerufen 19.05.2009)

- Hanson Jay (2001a). *Limits to Growth: Oil*. In Internet: <http://warsocialism.com/l1.html> (abgerufen 19.05.2009)
- Hanson Jay (2001b). *Limits to Growth: America*. In Internet: <http://warsocialism.com/l2.html> (abgerufen 19.05.2009)
- Hanson Jay (2001c). *Synopsis*. In Internet: <http://www.dieoff.org/synopsis.pdf> oder <http://www.dieoff.org/synopsis.htm> (abgerufen 19.05.2009)
- Henseling, Karl Otto (2008): *Die Große Transformation*. DAS ARGUMENT 279/2008, S. 827-838.
- Heubach, Daniel (2007): *Einbeziehung von Umweltschutzanforderungen in Innovationsprozesse der Solarwirtschaft*. Expertenworkshop nova-net (Entwicklungspfade von Nachhaltigkeitsinnovationen). In Internet: http://www.nova-net.de/Images/nova-net_ExpertenWS_FSZ_Heubach_070213_tcm231-79376.pdf (abgerufen 04.05.2009)
- HWWI (2009): *HWWI-Rohstoffpreisindex 2008 auf Allzeithoch*. In Internet: <http://www.hwwi.org/HWWI-Rohstoffpreisindex.5887.0.html> (abgerufen 16.05.2009)
- Iken, Jörn (2008): *Preissprung beim Solarglas ?? Energie: Experten sind uneinig, ob ein Engpass droht. Alles andere als glasklar*. In Internet <http://www.wallstreet-online.de/diskussion/1134742-601-610/solarworld-vorab-q-zahlen-5-11-gab-es-einen-aktienrueckkauf-im-3-q> (abgerufen 21.01.2009)
- IZ Klima (2008): Informationszentrum klimafreundliches Kohlekraftwerk e.V.. *CCS monitor*. Februar 2008. In Internet: http://www.iz-klima.de/uploads/media/IZ_Klima_CCS_monitor_02_2008_01.pdf (abgerufen 17.05.2009)
- Jäger-Waldau, Arnulf (2008): *PV Status Report 2008*. European Commission, Institute for Energy. In Internet: <http://re.jrc.ec.europa.eu/refsys/pdf/PV%20Report%202008.pdf> (abgerufen 02.05.2009)
- Jung, Alexander (2006a): *Wie lange noch?* In: SPIEGEL 5/2006, S. 26-33.
- Jung, Alexander (2006b): *Die neue Macht der Minenriesen*. In: SPIEGEL 5/2006, S. 90-95.
- Jungbluth, Niels, Tuchschnid Matthias, de Wild-Scholten, Mariska (2008): *Life Cycle Assessment of Photovoltaics: Update ofecoinvent data v2.0. Working Paper*. In Internet: <http://www.esu-services.ch/cms/fileadmin/download/jungbluth-2008-LCA-PV-web.pdf> (abgerufen 05.05.2009)
- Kelber, Ulrich (2008): *Torschlusspanik des Oligopols*. PHOTON Mai 2008, S. 14.
- Kreuzmann, Anne (2008a): *Der Sündenfall*. PHOTON August 2008, S. 3.
- Kreuzmann, Anne (2008b): *Sonnenstrom wird billiger*, PHOTON Mai 2008, S. 3.
- Kreuzmann, Anne (2008c): *30 Gigawatt sind nicht viel*. PHOTON Februar 2008, S. 3.
- Kruck, Christoph; Eltrop, Ludgar (2007): *Perspektiven der Stromerzeugung aus Solar- und Windenergienutzung für eine nachhaltige Energieversorgung in Deutschland. Endbericht FKZ A204/04. Universität Stuttgart Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER)*. In Internet: http://www.ier.uni-stuttgart.de/publikationen/pb_pdf/Endbericht_Projekt_FKZ_A204_04.pdf (abgerufen 04.05.2009)
- Lucas, Reiner; Röhr, Anja; Scharp, Michael (2007): *Das Rohstoffsystem Kupfer – Status Quo, Perspektiven und Handlungsbedarf aus Sicht einer nachhaltigen Ressourcenpolitik*. In Internet http://www.ressourcenproduktivitaet.de/download.php?datei=src/downloads/Kupfer_070705.pdf (abgerufen 13.01.2008)
- Luque, Antonio; Hegedus, Steven (2003): *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. Chichester: Wiley.
- Mayer-Spon, O., Wissel, S.; Voß, A.; Fahl, U.; Blesl, M. (2005): *Lebenszyklusanalyse ausgewählter Stromerzeugungstechniken*. http://www.ier.uni-stuttgart.de/publikationen/arbetsberichte/Arbeitsbericht_01.pdf (abgerufen 04.05.2009)
- Marheineke, Torsten (2002): *Lebenszyklusanalyse fossiler, nuklearer und regenerativer Stromerzeugungstechniken*. In Internet: http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?idn=96558027x&dok_var=d1&dok_ext=pdf&filename=96558027x.pdf (abgerufen 04.05.2009)
- Meadows, Donella; Meadows, Dennis L.; Randers, Jørggen; Behrens III, William W., (1972): *Die Grenzen des Wachstums – Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit*. München: Deutsche Verlags-Anstalt.
- Meyer-Abich, K.M. (1972): *Die ökologische Grenze des Wirtschaftswachstums*. Umschau 72 (1972) Heft 20.
- Minormetals (2009): Internet <http://www.minormetals.com/> (abgerufen 17.05.2009)

- Moning, Hans (2008): BULLETIN Nr. 59 der Aktion für vernünftige Energiepolitik Schweiz (AVES). In Internet: <http://www.aves-zh.ch/images/bullpdf/Bull59.pdf> (abgerufen 13.01.2008)
- Müller, Jürgen (2005): *Indium der Vorbote am silbernen Horizont?* In Internet: <http://www.goldseiten.de/content/diverses/artikel.php?storyid=1308> (abgerufen 13.05.2009)
- Müller, W. (2009) *Energiemythen*. Focus Wissen Online. Im Internet http://www.focus.de/wissen/wissenschaft/klima/tid-14230/energie-mythen-mythos-das-oele-reicht-noch-40-jahre_aid_398164.html (abgerufen 29.05.2009)
- Nano (2008): „*Ein europäisches Stromnetz für regenerative Energie*“. In Internet: <http://www.3sat.de/dynamic/sitegen/bin/sitegen.php?tab=2&source=/nano/news/110403/index.html> (abgerufen 17.05.2009)
- Nebelung, Reiner (2009): *Kernenergie ist keine Lösung...* In Internet: <http://www.zw-jena.de/blog/2009/03/kernenergie-ist-keine-loesung/> (abgerufen 13.05.2009)
- Nieuwlaar, Evert; Alsema, Erik (1997): *Environmental Aspects of PV Power Systems*. In Internet: <http://www.ecotopia.com/apollo2/pvenv1997.pdf> (abgerufen 15.05.2009)
- Nitsch, Joachim; Nast, Michael; Pehnt, Martin; Trieb, Franz; Rösch, Christine; Kopfmüller, Jürgen (2001): *Schlüsseltechnologie Regenerative Energien. Teilbericht im Rahmen des HFG-Projektes „Global zukunftsfähige Entwicklung – Perspektiven für Deutschland.“* Stuttgart, Karlsruhe. S. 214. In Internet: http://www.dlr.de/tt/Portaldata/41/Resources/dokumente/institut/system/publications/HGF-Text_TeilA.pdf (abgerufen 09.12.2008)
- Nitsch, Joachim; Krewitt, Wolfram; Nast, Michael; Viebahn, Peter (2004): *Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland*. In Internet: <http://www.mp.haw-hamburg.de/pers/Watter/PersoelicheWebseite-Dateien/Erneuerbare-Energie.pdf> (abgerufen 16.05.2009)
- Odum, Howard T. (1996): *Environmental Accounting, Energy and Decision Making*. New York: John Wiley.
- Odum, Howard T. (1998): *Emergy Evaluation*. International Workshop on Advances in Energy Studies: Energy flows in ecology and economy, Italy, May 1998. In Internet: <http://www.emergysystems.org/emergy.php> (abgerufen 19.05.2009)
- Ohm, Bernd (2009): *Die Energiewende ist auch eine Kulturwende*. In Internet <http://energiewende.wordpress.com/2009/01/03/die-energiewende-ist-auch-eine-kulturwende/> (abgerufen 17.05.2009)
- Papathanasiou, Olga; Kreutzmann, Anne (2008): *Schrott im grünen Mäntelchen*. PHOTON Februar 2008, S. 52-53.
- Pearce, Joshua; Lau, Andrew (2002): *Net Energy Analysis for Sustainable Energy Production from Silicon based Solar Cells*. Proceedings of Solar 2002 Sunrise of Reliable Energy Economy, June 15-20, 2002, Reno, Nevada. In Internet: http://www.cede.psu.edu/users/alau/ASES02_Net_Energy_PV.pdf (abgerufen 12.05.2009)
- Pelte, Dietrich (2002): *Der Energiehaushalt der Erde*. In Internet http://www.physi.uni-heidelberg.de/~pelte/energie2/data/kap3/ehaush_e.htm (abgerufen 19.05.2009)
- Peter, K., Enebak, E., Friestad, K., Tronstad, R., Dethloff, C. (2005): *Investigation of Multicrystallin Silicon Solar Cells from Solar Grade Silicon Feedstock*. In Internet: http://www.uni-konstanz.de/pv/publikationen/papers/barcelona2005/K_Peter_2AO1.2.pdf (abgerufen 13.05.2008)
- Phipps, Gregory; Mikolajcak, Claire; Guckes, Terry (2007): *Indium and Gallium Supply Sustainability*. http://www.indium.com/_dynamo/download.php?docid=552 (abgerufen 17.05.2009)
- Podewils, Christoph (2008a): *Giftmüllentsorgung wie im Film*. PHOTON April 2008. S. 44.
- Podewils, Christoph (2008b) : *Auf dem Glasweg*. PHOTON Februar 2008. S. 38-43.
- Podewils, Christoph (2008c): *Newcomer geben Gas*. PHOTON Mai 2008. S. 66-68.
- Podewils, Christoph (2008d): *Atomfreunde im Sonnenlager*. PHOTON August 2008, S. 14-15.
- Podewils, Christoph (2009a): *Vorfahrt für Atomkraft*. PHOTON Januar 2009, S.201.
- Podewils, Christoph (2009b): *Schwarze Wolken über RWE und Co*. PHOTON Januar 2009, S. 68-71.
- Poortmans, Jef; Arkhipov Vladimir (2006): *Thin Film Solar Cells. Fabrication, Characterization and Applications*. John Wiley & Sons, Ltd.

- PVACCEPT (2005): *Final Report*. In Internet: http://www.pvaccept.de/PVACCEPT_Final_Report.zip (abgerufen 29.04.2009)
- Renz, Erhard (2008): *ISO-Graphit der nächste Engpass?* In Internet: <http://ralos.de/blog/2008/11/iso-graphit-der-nachste-engpass.html> (abgerufen 21.01.2009)
- Raugei, M., Frankl, P., Alsema, E., de Wild-Scholten, M., Fthenakis, V., Kim, H.C. (2007): *Life Cycle Assessment of Present and Future Photovoltaic Systems*. In Internet: <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2007/m07109.pdf>. (abgerufen 13.05.2009)
- Rothe, Ulrich (2009): *Die Legende von Peak Oil. Warum das Erdöl nicht alle wird*. P.T. Magazin 3/2009. S. 38–43.
- Rus, Timoslav (2008): *Deutschland ist Europameister!* In Blog „Ökologismus“. In Internet: <http://www.oekologismus.de/?p=990> (abgerufen 17.05.2009)
- Rutschmann, Ines (2008): *Platz für 30 Gigawatt*. PHOTON Februar 2008.
- Scheer, Hermann (2008): *Energie – neu denken!* WIDERSPRUCH 54/2008, S. 53-61.
- Schneider, Joachim (2007): *Mission Meseberg: Das integrierte Energie- und Klimaprogramm*. ZVEI-Mitteilungen 9/2007, S. 3. In Internet: https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Fachverbaende/Energietechnik/Heft_16_2007_Editorial.pdf (abgerufen 17.05.2009)
- Sollmann, Dominik (2008): *Klimakiller Photovoltaik?* PHOTON Dezember 2008. S. 56-58.
- Sollmann, Dominik (2009): *Heiß beehrter Rohstoff*. PHOTON Januar 2009, S. 62-66.
- Sollmann, Dominik; Bomfleur Birgit (2008): *Leichtgewicht im Rampenlicht*. PHOTON September 2008. S. -36-39.
- Sovacool, Benjamin K. (2008): *Valuing the greenhouse gas emissions from nuclear power: A critical survey*. In Internet: http://www.nirs.org/climate/background/sovacool_nuclear_ghg.pdf (abgerufen 15.05.2009)
- Springer, Johann: (2003): *Lebenszyklusanalyse und Recyclingkonzepte für Solarmodule*. In: FVS Themen 2003. S. 66-70. In Internet: http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Themenhefte/th2003/th2003_04_02.pdf (abgerufen 04.05.2009)
- Stanzl, Jochen (2008): *Kupfer: Angebotsüberschuss in 2008*. In Internet: <http://www.boerse-go.de/artikel/zeigen/articleId/1111929> (abgerufen 21.01.2009)
- SVTC - Silicon Valley Toxics Coalition (2009): *Towards a Just and Sustainable Solar Energy Industry. White Paper*, January 14, 2009. In: Internet: http://www.etoxics.org/site/DocServer/Silicon_Valley_Toxics_Coalition_-_Toward_a_Just_and_Sust.pdf (abgerufen 02.05.2009)
- Swissolar (2008): *Energie- und Umweltbilanz der Solarenergie*. In Internet: http://www.swissolar.ch/fileadmin/x_lib/download/Solarenergie_Oekologie_rev08_def.pdf (abgerufen 29.04.2009), vgl. auch <http://www.szff.ch/files/content/element/497/ETH%20Bericht.pdf> (abgerufen 14.05.2009)
- Trainer, Ted (2004): *Renewable Energy; What are the Limits? Chapter 2. PV Solar Electricity*. In Internet: <http://ssis.arts.unsw.edu.au/tsw/D87.RE.Ch.2PV.html> (abgerufen 19.05.2009)
- Trainer, Ted (2005): *Development: The radically Alternative View*. In Internet: <http://ssis.arts.unsw.edu.au/tsw/D99.Dev.Rad.View.161005.html> (abgerufen 19.05.2009)
- Trainer, Ted (2009): *Renewable Energy – cannot sustain an energy-intensive society*. In Internet: <http://ssis.arts.unsw.edu.au/tsw/RE.html> (abgerufen am 19.05.2009)
- USGS – U.S. Geological Survey (2008): *Mineral Commodity Summaries: Indium*. Januar 2008. In Internet: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/indium/mcs-2008-indiu.pdf> (abgerufen 17.05.2009)
- VDI Technologiezentrum GmbH (2008): *Innovationen gegen Rohstoffknappheit*. (Autoren: G. Reuscher, C. Ploetz, V. Grimm, A. Zweck). In Internet: http://www.vdi.de/fileadmin/vdi_de/redakteur/dps_bilder/D-PS/2008/Innovationen_gegen_Rohstoffknappheit_Band_74.pdf (abgerufen 12.01.2009)

- Voß, Alfred (1977): *Nach Abwägung aller Möglichkeiten*. Die Zeit Nr. 44, 21.10.1977. In Internet: <http://www.zeit.de/1977/44/Nach-Abwaegung-aller-M-oeglichkeiten-oder> oder <http://pdf.zeit.de/1977/44/Nach-Abwaegung-aller-M-oeglichkeiten.pdf> (abgerufen 14.05.2009)
- Voß, Alfred (2002): *Nachhaltigkeit und Klimaschutz, Wettbewerbsfähigkeit und Versorgungssicherheit: Ohne Kernenergie möglich?* <http://de.scientificcommons.org/2143947> (abgerufen 14.05.2009)
- Voß, Alfred (2006a): *Wege zu einer nachhaltigen Energieversorgung in Deutschland*. In: Die Zukunft der Energieversorgung in Deutschland. acatech Symposium 21. November 2006, S. 11-21. In Internet: http://www.ier.uni-stuttgart.de/publikationen/pb_pdf/Voss_acatech_ENERGIE_FINAL.pdf (abgerufen 04.05.2009)
- Voß, Alfred (2006b): *Nachhaltige Energieversorgung – Was kann die Kernenergie dazu beitragen?* Tagung des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Energiepolitik 20 Jahre nach Tschernobyl. Dokumentation der Tagung. „Tschernobyl 1986-2006: Erfahrungen für die Zukunft“. 24. und 25. April 2006. S. 119-125. In Internet: http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/tagung_20jahre_tschernobyl.pdf (abgerufen 16.05.2009)
- Voß, Alfred (2008): *Was können die erneuerbaren Energien zu unserer Energieversorgung in den nächsten Jahrzehnten leisten?* Senioren Union der CDU, Heilbronn, 9. Januar 2008. In Internet: http://www.ier.uni-stuttgart.de/publikationen/VortragHeilbronn_2008_01/Heilbronn_2008_01_CDU.pdf (abgerufen 04.05.2009)
- Waldmann, Lars (2006): *Industrielle Fertigung hocheffizienter Solarmodule für internationale Märkte*. PV-Solarstrom – Industrie. 01. Juni 2006 in Nürnberg. In Internet: http://www.bayern-innovativ.de/ib/site/documents/media/38dc3160-1cd1-c83e-dc08-2271377d5e6e.pdf/V2_4_Waldmann-neu.pdf (abgerufen 13.01.2008)
- Wærnes, Aud; Raaness, Ola; Øvrelid, Eivind; Geerligs, Bart; Wyers, Paul (2005): *New feedstock materials*. <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2005/rx05022.pdf> (abgerufen 16.05.2009)
- WBGU - Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderung (2003): *Welt im Wandel. Energiewende und Nachhaltigkeit*. In Internet: http://www.wbgu.de/wbgu_jg2003.pdf (abgerufen 11.05.2009)
- Welt.de (2007): *Sarkozy verlangt Abkehr vom Atomausstieg*. In Internet http://www.welt.de/politik/article1172911/Sarkozy_verlangt_Abkehr_vom_Atomausstieg.html (abgerufen 17.05.2009)
- Werner, Robert (2007): *Neue Netze für Europa*. In: SPIEGEL 1/2007, S. 120-121.
- Wikipedia: Bauxit: Internet <http://de.wikipedia.org/wiki/Bauxit> (abgerufen 17.05.2009)
- Wikipedia: HDI: Internet http://de.wikipedia.org/wiki/Human_Development_Index (abgerufen 19.05.2009)
- Wikipedia: Indium: Internet <http://de.wikipedia.org/wiki/Indium> (abgerufen 29.11.2008), zitiert in <http://www.cash.ch/forum/viewtopic.php?p=138287> (abgerufen 17.05.2009)
- Zweibel, Ken (2006): *The Terrawatt Challenge for Thin Film Photovoltaics*. In: Jef Poortmans, Vladimir Arkhipov (Ed.): *Thin Film Solar Cells. Fabrication, Characterization and Applications*. p. 427-458.
- Zweibel, Ken; Fthenakis, Vasilis (2004): *Cadmium Facts and Handy Comparisons*. In Internet http://www.nrel.gov/pv/cdte/pdfs/cdte_factsheet.pdf (abgerufen 16.05.2009)
- Zweibel, Ken; Mason, James; Fthenakis, Vasilis (2008): *A Solar Grand Plan*. Scientific American Magazine. Januar 2008. In Internet: <http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=a-solar-grand-plan> (abgerufen 15.05.1009)