

Kontaktstudium Energiewirtschaft

Kapitel: Nachhaltige Energiewirtschaft

ZENTRUM FÜR MEDIALES LERNEN (ZML)



Autor

Prof. Dr. Anke Weidlich

Prof. Dr. Anke Weidlich ist seit 2011 Professorin für Energiesystemtechnik und Energiewirtschaft, insbesondere intelligente dezentrale Strukturen zur nachhaltigen Stromversorgung (Smart Grids) an der Hochschule Offenburg. Erfahrungen in der Wirtschaft sammelte Frau Weidlich bis Ende September 2011 als Senior Researcher und Projektleiterin im Bereich Smart Grids bei der SAP AG. Frau Weidlich studierte Wirtschaftsingenieurwesen und absolvierte ein Aufbaustudium in Energiewirtschaft und Energiepolitik in Paris. Sie promovierte an der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften der Universität Karlsruhe (TH) im Bereich Strommarktssimulationen. In der Lehre vertritt Prof. Dr. Weidlich derzeit u. a. die Themen Nachhaltige Energiewirtschaft, Operations Research in der Energiewirtschaft und Smart Grids. In der Forschung beschäftigt Sie sich mit der Bewertung von Flexibilität für ein Energiesystem mit hohen Anteilen erneuerbarer Energien.

LESEPROBE

Impressum

Kapitel: Nachhaltige Energiewirtschaft

© Karlsruher Institut für Technologie – Zentrum für Mediales Lernen (ZML), alle Rechte vorbehalten
Karl-Friedrich-Str. 17 · 76133 Karlsruhe · Tel. 0721 608-48200 · Fax 0721 608-48210

1. Auflage 2015 (20150501)

Satz: Presse, Kommunikation und Marketing

Fernstudiendidaktische Überarbeitung: ZML

Inhaltsverzeichnis

Autor	3
Impressum	3
Abbildungsverzeichnis	7
Tabellen	9
1 Einführung	11
1.1 Nachhaltigkeitsbegriff und Nachhaltigkeitskonzepte	12
1.2 Energieressourcen und -potentiale	15
2 Operationalisierung und Messung von Nachhaltigkeitsdimensionen	19
2.1 Nachhaltigkeitsindikatoren	19
2.2 Lebenszyklusanalyse und CO ₂ -Bilanzierung	21
3 Vergleichende Nachhaltigkeitsbewertung von Energietechnologien	28
3.1 Energetische Amortisationszeit und Erntefaktor	28
3.2 Rohstoffanspruchnahme, Abfälle und Emissionen	31
3.3 Gesundheitsauswirkungen	34
3.4 Ökonomische Charakteristika	36
3.5 Multikriterielle Analyse	39
4 Zusammenfassung	41
Literaturverzeichnis	43
Stichwortverzeichnis	47

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Beispiel für den Nachhaltigkeitsindikator Energieproduktivität und Wirtschaftswachstum der Bundesrepublik Deutschland	20
Abbildung 2:	CO ₂ -Intensitäten alternativer Stromerzeugungstechnologien	23
Abbildung 3:	Wirkungsweise der Pigou-Steuer	25
Abbildung 4:	Anzahl verlorener Lebensjahre durch Stromerzeugungstechnologien	36
Abbildung 5:	Gesamtwirtschaftliche Kosten der Stromerzeugung	38
Abbildung 6:	Gesamtwirtschaftliche Kosten der Stromerzeugung mit Back-up-Kosten	39
Abbildung 7:	Beispielhaftes Ergebnis einer multikriteriellen Analyse mit Sensitivitätsanalyse	40

- LESEPROBE -

Tabellen

Tabelle 1:	Potenzielle Emissionen als Folge der Nutzung der fossilen Reserven und Ressourcen und deren Potenzial, die 2°C-Leitplanke zu gefährden	16
Tabelle 2:	Theoretische, technische und nachhaltig nutzbare Potentiale der erneuerbaren Energien	17
Tabelle 3:	Erntefaktoren und energetische Amortisationszeiten für verschiedene Stromerzeugungstechnologien	31
Tabelle 4:	Material- und Rohstoffaufwand für verschiedene Stromerzeugungstechnologien	32
Tabelle 5:	Schadstoffemissionen verschiedener Stromerzeugungstechnologien	33
Tabelle 6:	Entstehende Abfälle bei verschiedenen Stromerzeugungstechnologien	34

- LESEPROBE -

- LESEPROBE -

1 Einführung

„Das gegenwärtige Energiesystem ist nicht nachhaltig“ – zu dieser einvernehmlichen Feststellung kam 2002 die Enquête-Kommission „Nachhaltige Energieversorgung“ des Deutschen Bundestages in ihrem Endbericht (Enquête-Kommission 2002). Die Einschätzung wird dadurch begründet, „dass die Energiebereitstellung und -nutzung in großem Umfang Umweltkosten negiert, Raubbau an knappen Ressourcen betreibt und Risikoaspekten zu geringe Beachtung schenkt.“

Mehr als ein Jahrzehnt später hat sich zwar in der Energiewirtschaft in Deutschland und in der Welt einiges verändert: Emissionshandelssysteme wurden eingeführt, um Teile der Umweltkosten in die Energiepreise einfließen zu lassen; sowohl in der Europäischen Union als auch in China, dem Land mit dem weltweit größten Energieverbrauch. Mittlerweile übersteigt die jährlich neu installierte Leistung von Erneuerbare-Energien-Anlagen diejenige von Atomkraftwerken und fossilen Kraftwerken, und nicht zuletzt beschloss Deutschland mit der Energiewende, aus der Kernenergie auszusteigen und die erneuerbaren Energien zur wichtigsten Säule der Energieversorgung auszubauen. Dennoch unterscheidet sich die Energiewirtschaft in Deutschland und anderen Ländern nicht grundlegend von der in 2002, sodass die Frage danach, wie eine nachhaltige Energiewirtschaft aussehen kann, weiterhin aktuell ist. Die Bewertung dessen, wann eine Energiewirtschaft als „nachhaltig“ bezeichnet werden kann, lässt sich nicht einfach beantworten. Hierzu sind Fragen nach einem konsistenten und umsetzbaren Nachhaltigkeitskonzept zu betrachten und darüber hinaus Bewertungsgrundlagen zu schaffen, um Energiesysteme anhand der Nachhaltigkeitsdimensionen miteinander vergleichen zu können.

Das vorliegende Kapitel skizziert diese Fragestellungen und stellt einige Forschungsergebnisse aus der vergleichenden Bewertung von Energiesystemen im Kontext der Nachhaltigkeit vor. Im folgenden Abschnitt werden der Begriff der nachhaltigen Entwicklung sowie die Konzepte der sogenannten starken und schwachen Nachhaltigkeit diskutiert. Der für die Energiewirtschaft im Hinblick auf Nachhaltigkeit sehr relevante Blick auf nutzbare Energiereserven und -ressourcen sowie die Potentiale erneuerbarer Energien wird in Abschnitt 1.2 geworfen.

Im weiteren Verlauf wird in Abschnitt 2 darauf eingegangen, wie das abstrakte Konzept der nachhaltigen Entwicklung operationalisiert und damit messbar gemacht werden kann. Hierbei werden allgemeine Nachhaltigkeitsindikatoren sowie Verfahren zur ganzheitlichen Bewertung von Energietechnologien vorgestellt. Im dritten Kapitel werden anhand des Beispiels der Stromerzeugung verschiedene alternative Technologien anhand von messbaren Kriterien der Nachhaltigkeit bewertet und miteinander verglichen.

1.1 Nachhaltigkeitsbegriff und Nachhaltigkeitskonzepte

Ursprünglich aus der Forstwirtschaft stammend als das Prinzip, nach dem nicht mehr Holz gefällt werden darf, als jeweils nachwachsen kann, wurde der Begriff der Nachhaltigkeit insbesondere seit der Arbeit der 1983 von den Vereinten Nationen eingesetzten Weltkommission für Umwelt und Entwicklung (Brundtland-Kommission)¹ umfassender interpretiert und im Kontext der internationalen Entwicklungs- und Umweltpolitik diskutiert. Das Abschlussdokument der Kommission definiert eine nachhaltige Entwicklung als eine solche, die „den Bedürfnissen der heutigen Generation entspricht, ohne die Möglichkeit künftiger Generationen zu gefährden, deren eigenen Bedürfnisse zu befriedigen und ihren Lebensstil zu wählen zu können“ (Übersetzung: Hauff 1987). Der Bericht beschreibt Energie(versorgung) als eine wichtige gemeinsame Herausforderung, vor der die Menschheit steht und für die bisher noch keine nachhaltige Lösung gefunden wurde.

Im Jahr 1992 wurde das Ziel einer nachhaltigen Entwicklung auf der Konferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung in Rio de Janeiro als Leitlinie für die zukünftige Entwicklung der Welt allgemein anerkannt und alle beteiligten Staaten verpflichten sich, auf nationaler, regionaler und lokaler Ebene konkrete Schritte für eine nachhaltige Entwicklung auszuarbeiten.

Da der Energiepolitik eine wichtige Rolle innerhalb der nachhaltigen Entwicklung zukommt, befasste sich auch der Deutsche Bundestag ausführlich mit der Frage, wie eine nachhaltige Energieversorgung realisiert werden kann, um insbesondere die Erreichung von Zielen des Umwelt- und Klimaschutz zu unterstützen. Nachdem sich bereits von 1987 bis 1995 die Enquête-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ mit den Fragen einer klimafreundlichen Energieversorgung beschäftigt hatte, setzte der Bundestag in den Jahren 2000 bis 2002 die bereits im Eingangszitat erwähnte Enquête-Kommission „Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung“ ein, die „für den Zeitraum bis 2050 „robuste“, nachhaltig-zukunftsfähige Entwicklungspfade im Energiesektor und politische Handlungsmöglichkeiten angesichts zunehmender Umwelt- und Entwicklungsprobleme (...)“ aufzeigen sollte (Enquête-Kommission 2002:27). Der Endbericht der Kommission stellt einen Beitrag Deutschlands zur Umsetzung der Nachhaltigkeitsziele der Konferenz in Rio de Janeiro im Energiebereich dar.

Enquête-Kommission

Drei-Säulen-Modell

Zur Beschreibung von Nachhaltigkeit wird häufig das „Drei-Säulen-Modell“ verwendet, nach dem die Zieldimensionen Ökologie, Ökonomie und Soziales gleichermaßen betrachtet werden müssen. Diese drei Säulen der Nachhaltigkeit stehen miteinander in Wechselwirkung und bedürfen langfristig einer ausgewogenen Koordination. Die drei Säulen der Nachhaltigkeit ähneln dem energiepolitischen Zieldreieck, das ebenfalls drei Zieldimensionen formuliert, die gleichzeitig erreicht werden sollen, nämlich hier die Versorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit; teilweise werden zusätzliche Zieldimensionen wie die soziale Akzeptanz als Erweiterung des Zieldreiecks angeführt (z. B. Weidlich et al. 2012). Die Zieldimensionen des Drei-Säulen-Modells ebenso wie des energiepolitischen Zieldreiecks stehen in einem Spannungsverhältnis und können konfliktär

¹ Benannt nach der Vorsitzenden und ehemaligen norwegischen Ministerpräsidentin Gro Harlem Brundtland

sein. Somit bedarf es stets einer ganzheitlichen Betrachtung verschiedener Optionen der Energieversorgung, um deren Nachhaltigkeit zu bewerten.

Nach dem Drei-Säulen-Modell sind alle drei Ziele gleichrangig und gleichwertig. In der Praxis ist jedoch umstritten, wie gleichgewichtet die Säulen tatsächlich sind bzw. sein sollten. Ebenso stellt sich die Frage, ob natürliche Ressourcen mit sozialen und ökonomischen Ressourcen „verrechnet“ bzw. durch sie substituiert werden dürfen, wenn es um die Bewertung der Möglichkeiten geht, die an zukünftige Generationen weitergegeben werden. In diesem Zusammenhang wird das Konzept der sogenannten „starken Nachhaltigkeit“ von dem der „schwachen Nachhaltigkeit“ abgegrenzt, das die Substituierbarkeit von natürlichem und künstlichem (sozialem, ökonomischem) Kapital adressiert². Das natürliche Kapital umfasst Ressourcen wie Luft, Boden, Gewässer, Biodiversität oder Rohstoffe, während das künstliche Kapital menschengemachte Ressourcen wie Maschinen, Gebäude, Wissen oder soziale Strukturen beinhaltet.

Konzept der starken und schwachen Nachhaltigkeit

Die starke Nachhaltigkeit bezeichnet einen Ansatz, in dem die Ökologie über die anderen beiden Dimensionen Ökonomie und Soziales gestellt wird, da erstere die Grundlage für die letzteren beiden ist. Eine Substituierbarkeit von Ressourcen ist somit nur innerhalb verschiedener natürlicher Ressourcen oder zwischen Human- und Sachkapital möglich. Ein Ersatz von natürlichen Ressourcen durch Human- oder Sachkapital wäre nach diesem Ansatz nicht möglich bzw. als nicht nachhaltig anzusehen. Dies wird dadurch begründet, dass natürliche Ressourcen begrenzt sind. Des Weiteren wird berücksichtigt, dass viele Funktionen der Natur nicht substituierbar sind und Auswirkungen auf ökologische Systeme oft irreversibel und nicht immer in allen Einzelheiten bekannt sind. Dem Naturkapital kommt also in der starken Nachhaltigkeit eine Sonderrolle zu. Aufgrund dessen lassen sich einige Regeln zum Umgang mit natürlichen Ressourcen ableiten. Diese beinhalten, dass erneuerbare Ressourcen nur in dem Maße genutzt werden dürfen, in dem sie sich auch regenerieren können. Dementsprechend dürften erschöpfbare Ressourcen, wie beispielsweise fossile Primärenergieträger, gar nicht genutzt werden, denn die Nutzung nicht erneuerbarer Ressourcen hätte zur Folge, dass sich das Naturkapital verringern würde.³ Erschöpfbare Ressourcen dürfen nur soweit genutzt werden, wie andere physisch und funktionell gleichwertige, natürliche, erneuerbare Ressourcen geschaffen werden können. Dieser Ansatz motiviert somit, dass ökologisch notwendige Begrenzungen notwendig sind und Vorrang vor wirtschaftlicher Nutzung haben müssen.

Starke Nachhaltigkeit

Mit schwacher Nachhaltigkeit wird ein Konzept bezeichnet, das davon ausgeht, dass natürliche Ressourcen durch Human- und Sachkapital ersetzt werden können. Demnach gilt ein System als nachhaltig, solange das Gesamtkapital (bestehend aus natürlichen Ressourcen und künstlichem, d. h. Human- und Sachkapital) gleich bleibt oder sogar wächst. Ein Rückgang von Naturkapital, also der Abbau von Rohstoffen oder der Rückgang natürlicher Lebensräume ist also nach diesem Konzept mit einer nachhaltigen Entwicklung vereinbar.

Schwache Nachhaltigkeit

2 Für eine detaillierte Beschreibung der Konzepte der starken und schwachen Nachhaltigkeit siehe z. B. [Grunwald/Kopfmüller 2012:66 ff.].

3 Da die Zeiträume zur Bildung fossiler Energierohstoffe, die in der Größenordnung vieler Millionen Jahre liegt, um ein Vielfaches über der Abbaurate dieser Rohstoffe liegt, kann von einer erschöpfbaren Ressource und mithin bei der Nutzung auch von einem „Abbau“ von Naturkapital gesprochen werden.

Dies ist jedoch nur dann der Fall, wenn er durch steigendes Kapital in den anderen Bereichen ausgeglichen wird. In diesem Ansatz steht, im Gegensatz zur starken Nachhaltigkeit, nicht die Bewahrung der Umwelt im Vordergrund, sondern die Aufrechterhaltung und Steigerung des Gesamtwohlstandes. Man bezeichnet das Konzept daher als anthropozentrisch.

Weder das Konzept der starken noch das der schwachen Nachhaltigkeit liefert in ihren jeweiligen extremen Ausprägungen nutzbare Hinweise dafür, wie ein nachhaltiges Energiesystem gestaltet werden sollte. So ist es beispielsweise auch bei einer ausschließlichen Nutzung erneuerbarer Energiequellen nicht möglich, den Abbau von erschöpflichen Ressourcen zu vermeiden, da z. B. auch zur technischen Nutzung der erneuerbaren Energien nicht-erneuerbare Rohstoffe eingesetzt werden müssen. Auch sind Eingriffe in die Natur nötig, wie Flächenversiegelung oder eine Änderung des Landschaftsbildes, wenn beispielsweise Solar- oder Windparks gebaut werden. Eine vollständige Vermeidung des Abbaus von Naturkapital gemäß der Forderung einer starken Nachhaltigkeit ist somit nach aktuellem Stand der Technik, zumindest bei einer Befriedigung der Bedürfnisse in unseren heutigen Gesellschaften, nicht möglich. Genauso wenig lässt sich aber Naturkapital in allen Aspekten durch künstliches Kapital ersetzen, wie es das Konzept der schwachen Nachhaltigkeit postuliert, da der Wert einzelner natürlicher Ressourcen oder Ökosysteme mit all ihren komplexen Wechselwirkungen in der Regel nicht vollständig bekannt ist und somit im künstlichen Kapital nie vollständig erhalten werden kann.

Fünf Regeln für die
Energiewirtschaft

Um das Konzept einer nachhaltigen Entwicklung konkret nutzbar zu machen, muss es also jenseits der theoretischen Konzepte in nachvollziehbare Handlungsgrundsätze umgesetzt werden. Hierfür wurden vielfältige sogenannte Managementregeln vorgeschlagen, die nachhaltige Verhaltensweisen beschreiben. Dos Santos et al. (2002) beispielsweise formulieren folgende fünf Regeln für die Energiewirtschaft, die frühere traditionelle Leitbilder von Nachhaltigkeit aufgreifen und um spezifische Aspekte der Energiewirtschaft ergänzen:

1. Die Nutzung erneuerbarer Ressourcen darf auf Dauer nicht größer sein als ihre Regenerationsrate.
2. Nicht-erneuerbare Energieträger und Rohstoffe sollen nur in dem Umfang genutzt werden, in dem ein physisch und funktionell gleichwertiger, wirtschaftlich nutzbarer Ersatz verfügbar gemacht wird, in Form neu erschlossener Vorräte, erneuerbarer Ressourcen oder einer höheren Produktivität der Ressourcen.
3. Stoffeinträge in die Umwelt dürfen auf Dauer die Aufnahmekapazität bzw. Assimilationsfähigkeit der natürlichen Umwelt nicht überschreiten.
4. Die Gefahren und Risiken der Bereitstellung von Energiedienstleistungen für die menschliche Gesundheit müssen kleiner sein als die durch sie vermiedenen natürlichen Risiken.
5. Die Bereitstellung von Energiedienstleistungen soll zu möglichst geringen gesamtwirtschaftlichen Kosten (private plus externe Kosten) erfolgen.

Diese vorgeschlagenen Regeln enthalten Elemente der schwachen Nachhaltigkeit, indem die Nutzung nicht-erneuerbarer Energieträger nicht prinzipiell ausgeschlossen wird. Jedoch wird auch dem Erhalt der Umwelt als Senke für Stoffeinträge Rechnung getragen, welche nicht übernutzt werden darf. Zusätzlich werden soziale und ökonomische Aspekte wie vermiedene Risiken und die gesamtwirtschaftlichen Kosten mit betrachtet. Zum verwendeten Begriff der externen Kosten im fünften Punkt sei auf Abschnitt 1.5 verwiesen.

1.2 Energieressourcen und -potentiale

Bei der Diskussion um Nachhaltigkeit ist selbstverständlich auch der Blick auf die heutige und zukünftige Verfügbarkeit von Energiequellen relevant. Bei der Betrachtung fossiler Energieträger wird hierbei nach Reserven und Ressourcen unterschieden, wobei Ressourcen alle nachgewiesenen oder mit gewisser Sicherheit als vorhanden eingeschätzten Vorkommen von Energierohstoffen umfassen, während Reserven als Untermenge nur solche Ressourcen bezeichnen, die mit großer Genauigkeit erfasst und mit heutiger Technologie und unter den heutigen ökonomischen Verhältnissen förderbar sind. Die Unterscheidung zwischen konventionellen und unkonventionellen Reserven unterscheidet zwischen Funden, deren Förderung mit dem heutigen Stand der Technik einfach möglich ist und solchen, deren Förderung technisch aufwändig ist und erst zukünftig potenziell rentabel werden könnte.

Ein Blick auf die Reserven und Ressourcen von fossilen Energierohstoffen zeigt, dass insbesondere die Verfügbarkeit von Kohle auf dem heutigen Förderniveau noch über mehrere Tausende Jahre gesichert werden könnte. Im Fall von Erdöl und Erdgas reicht der Horizont unter Berücksichtigung der unkonventionellen Ressourcen mehrere Hunderte Jahre. Die Verfügbarkeit der Energierohstoffe scheint somit über einen langen Zeitraum keine Knappheit darzustellen. Eine früher wirksame Beschränkung stellt eher die Umwelt als Senke der resultierenden Emissionen dar. Hier sind vor allem die großen Risiken, die mit dem Treibhauseffekt und den daraus resultierenden Klimaveränderungen einhergehen, zu betrachten. Tabelle 1 zeigt in der letzten Spalte auf, mit welchem Faktor die bei vollständiger Nutzung der Reserven und Ressourcen an Kohle, Erdöl und Erdgas jeweils entstehenden CO₂-Emissionen das bis 2050 zulässige Emissionsbudget von 750 Gt CO₂ aus fossilen Quellen überschreiten würden (nur CO₂, keine anderen Treibhausgase). Dieses Budget erlaubt nach aktuellem wissenschaftlichem Konsens die Begrenzung der Klimaerwärmung um 2°C und gilt somit als Leitplanke für die internationale Klimapolitik. Unter Berücksichtigung der Beschränkung durch das 2°C-Ziel kann also nur ein deutlich kleinerer Teil der jeweiligen Ressourcen überhaupt „nachhaltig“ genutzt werden.

Unterscheidung
Reserven & Ressourcen

CO₂-Ziel

	Historische Produktion bis 2008	Produktion im Jahr 2008	Reserven, Ressourcen und weitere Vorkommen	Faktor mit dem allein diese Emissionen das 2°C-Emis- sionsbudget überschreiten
	[Gt CO ₂]	[Gt CO ₂]	[Gt CO ₂]	[Gt CO ₂]
Konventionelles Öl	505	13	879	1
Unkonven- tionelles Öl	39	2	6.584	9
Konventionelles Gas	192	7	794	1
Unkonven- tionelles Gas	9	1	33.325	44
Kohle	666	14	43.247	58
Gesamt: Fossile Energieträger	1.411	36	84.829	113

Tabelle 1: Potenzielle Emissionen als Folge der Nutzung der fossilen Reserven und Ressourcen und deren Potenzial, die 2°C-Leitplanke zu gefährden⁴

Vor dem Hintergrund großer und weltweit recht gleichmäßig verteilter Kohleressourcen liegt es angesichts der Klimadiskussion nahe, zu untersuchen, ob die Abscheidung und anschließende langfristige Einlagerung von CO₂ aus dem Abgas von Kohlekraftwerken⁵ eine klimaschonende und somit nachhaltigere Nutzung der Kohle zur Stromerzeugung ermöglicht. Dies kann jedoch zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht beantwortet werden. Die Technologien sowohl für die Abtrennung des Kohlendioxids als auch für seine sichere Lagerung über lange Zeiträume sind bisher nicht, bzw. nur in kleinem Versuchsmaßstab, erprobt worden. Nach heutigen Erkenntnissen lässt sich jedoch schon sagen, dass die CO₂-Abscheidung einen zusätzlichen Energieaufwand bedeutet und somit die Netowirkungsgrade von Kohlekraftwerken verschlechtert, sodass größere Kohlemengen zur Stromproduktion benötigt werden. Dadurch erhöhen sich auch die Emissionen, die in den Prozessschritten des Kohleabbaus und -transports anfallen. Beim Abbau werden meist Methan, Kohlenmonoxid und Kohlendioxid freigesetzt, sowohl direkt durch die Öffnung von Kohleflözen als auch im weiteren Verlauf aus den abgebauten Schiefen und Tonen. Eine gänzlich emissionsfreie Kohleverstromung ist somit bei einer ganzheitlichen Betrachtung nicht möglich. Dennoch kann der überwiegende Teil der Emissionen eingeschlossen werden, weswegen die Europäische Kommission die CO₂-Sequestrierung als wichtiges Element für eine „nachhaltige Stromerzeugung aus fossilen Brennstoffen“ ansieht.⁶

4 Die letzte Spalte gibt den Faktor an, mit dem die bei vollständiger Nutzung der jeweiligen Reserven und Ressourcen entstehenden CO₂-Emissionen das bis 2050 zulässige Emissionsbudget von 750 Gt CO₂ aus fossilen Quellen überschreiten würden (nur CO₂ und keine anderen Treibhausgase); Quelle: WGBU 2011, S. 122.

5 Auch als CO₂-Sequestrierung oder auf Englisch Carbon Dioxide Capture and Storage (CCS) bezeichnet.

6 Vgl. KOM(2006) 843, Mitteilung der Kommission an den Rat und das Europäische Parlament – Nachhaltige Stromerzeugung aus fossilen Brennstoffen Ziel: Weitgehend emissionsfreie Kohlenutzung nach 2020, <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:52006DC0843>.

Die Ressourcensituation im Bereich der Kernenergie erlaubt einen Abbau von Kernbrennstoffen ebenfalls noch über viele Jahrzehnte. Hinzu kommt die Möglichkeit der Wiederaufbereitung und Nutzung einiger Stoffe aus verbrauchten Brennelementen, auch wenn dies ökonomisch derzeit keine attraktive Option ist. Auch im Bereich der Kernenergie stellen andere Aspekte stärker limitierende Faktoren der Nutzung dar als die Ressourcensituation. Weltweit gibt es bislang kein langfristiges Endlager für hochradioaktive Abfälle. Hohe Kosten für den Kraftwerksneubau und fehlende Akzeptanz in der Bevölkerung in vielen Ländern machen es derzeit unwahrscheinlich, dass die Kernenergie in nennenswertem Umfang ausgebaut wird.

Ressourcensituation
Kernenergie

Bei erneuerbaren Energien gibt es keine Gesamtmenge an Energierohstoffen. Eine Begrenztheit besteht in der potenziellen Verfügbarkeit der Energiequelle in einem bestimmten Zeitintervall. Dieses wird als Potenzial bezeichnet, wobei das theoretische, technische und ökonomische Potential unterschieden wird. Weitergehende Konzepte beschreiben darüber hinaus das „nachhaltig nutzbare Potenzial“, welches alle Dimensionen der Nachhaltigkeit berücksichtigt (z. B. DLR et al. 2004, WGBU 2011). Hierzu müssen verschiedene ökologische und sozioökonomische Aspekte betrachtet und bewertet werden. Die Abgrenzung des nachhaltig nutzbaren Potenzials wird von verschiedenen Autoren unterschiedlich bewertet und ist daher kein fest definierter Begriff.

Theoretisches, technisches und ökonomisches
Potential

	Theoretisches Potential	Technisches Potential	Nachhaltig nutzbares Potential	Produktion 2008
	[EJ/Jahr]	[EJ/Jahr]	[EJ/Jahr]	[EJ/Jahr]
Biomasse	2.400	800	100	50,3
Geothermie	41.700.000	720	22	0,4
Wasserkraft	504.000	160	12	11,6
Solarenergie	3.900.000	280.000	10.000	0,5
Windenergie	110.000	1.700	>1.000	0,8
Gesamt	46.000.000	283.500	>11.000	64

Tabelle 2: Theoretische, technische und nachhaltig nutzbare Potentiale der erneuerbaren Energien⁷

Das Potential der erneuerbaren Energien, insbesondere das unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten langfristig nutzbare Potential, wird in verschiedenen Studien sehr unterschiedlich abgeschätzt. Der Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen WGBU hat das nachhaltig nutzbare Potential weltweit in einer Höhe geschätzt, die mehr als das 22fache des globalen Primärenergieverbrauchs in 2008 beträgt. Dieses Potential beinhaltet als wichtigste Quelle die direkte Nutzung der Solarenergie sowie nennenswerte Beiträge durch Windenergie. Das stark aggregierte Ergebnis gibt noch keine Auskunft darüber, für welche Nutzungspfade die verschiedenen Potentiale genutzt werden können, also welche Quellen für die Stromerzeugung, die Kraftstoffproduktion oder die

Nachhaltig nutzbares
Potential

⁷ Zum Vergleich: der globale Primärenergieverbrauch lag 2008 bei 492 EJ; Quelle: WGBU 2011, S. 127.

Literaturverzeichnis

Agentur für Erneuerbare Energien (2013): Studienvergleich: Entwicklung der Volllaststunden von Kraftwerken in Deutschland – Die Auslastung von Kraftwerken im Zuge der Energiewende, Forschungsradar Erneuerbare Energien, Berlin.

DIN Deutsches Institut für Normung (2006): DIN EN ISO 14044 - Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen, Berlin, Beuth Verlag GmbH.

DIN Deutsches Institut für Normung (2009): DIN EN ISO 14040 - Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen, Berlin, Beuth Verlag GmbH.

DLR, IFEU, Wuppertal Institut (2004): Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland, Bericht zum Forschungsvorhaben im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, FKZ 901 41 803, Stuttgart, Heidelberg, Wuppertal.

Enquête-Kommission 2002: Endbericht der Enquete-Kommission „Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung“, Drucksache 14/9400 Deutscher Bundestag, 14. Wahlperiode, Berlin.

Fargione, J., J. Hill, D. Tilman, S. Polasky und P. Hawthorne (2008): Land Clearing and the Biofuel Carbon Debt, *Science* 319 (5867), S. 1235-1238.

FSC, IFEU (2008): Criteria for sustainable bioenergy use on a global scale, Forschungsprojekt Nr. 206 41 112 im Auftrag des Umweltbundesamtes, Dessau-Roßlau.

Grißhammer, R., C. Hochfeld (2009): Memorandum Product Carbon Footprint – Positionen zur Erfassung und Kommunikation des Product Carbon Footprint für die internationale Standardisierung und Harmonisierung, Studie des Öko-Instituts im Auftrag des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin.

Grunwald, A., J. Kopfmüller (2012): Nachhaltigkeit, Campus Verlag, Frankfurt am Main, 2. Auflage.

Hardes, H.-D., J. Mertes, F. Schmitz (1998): Grundzüge der Volkswirtschaftslehre, 6. Auflage, München/Wien, Oldenbourg.

Hauff, V. (1987): Unsere gemeinsame Zukunft: (der Brundtland-Bericht der) Weltkommission für Umwelt und Entwicklung, deutsche Übersetzung des Berichts „Our Common Future“, Greven, Eggenkamp.

Hirschberg, S., A. Voß (1999): Nachhaltigkeit und Energie: Anforderungen der Umwelt, Fachtagung Nachhaltigkeit und Energie, PSI Proceedings 99-01, Villingen, S. 63-86.

Hsu, D.D., P. O'Donoghue, V. Fthenakis, G.A. Heath, H.C. Kim, P. Sawyer, J.-K. Choi, D.E. Turney (2012): Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Crystalline Silicon Photovoltaic Electricity Generation Systematic Review and Harmonization, *Journal of Industrial Ecology*, 16 (Supplement s1), Special Issue: Meta-Analysis of Life Cycle Assessments, S. S122–S135.

Konstantin, P. (2013): *Praxisbuch Energiewirtschaft – Energieumwandlung, -transport und -beschaffung im liberalisierten Markt*, 3. Auflage, Berlin, Heidelberg, Springer.

Kost, C. et al. (2013): *Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien*, Studie des Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg.

Krewitt, W. (2002): Externe Kosten der Stromerzeugung, in Rebhan, E. (Hrsg.): *Energie – Handbuch für Wissenschaftler, Ingenieure und Entscheidungsträger*, Springer.

Krewitt, W. (2007): Die externen Kosten der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien im Vergleich zur fossilen Stromerzeugung, *UWSV – Zeitschrift Umweltchem Ökotox* 19(3), S. 144-151.

Kruck, C., L. Eltrop (2007): *Perspektiven der Stromerzeugung aus Solar- und Windenergienutzung für eine nachhaltige Energieversorgung in Deutschland*, Bericht für die Stiftung Energieforschung Baden-Württemberg, Stuttgart.

Marheineke, T. (2002): *Lebenszyklusanalyse fossiler, nuklearer und regenerativer Stromerzeugungstechniken*, Fortschrittsbericht Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Band 87, Universität Stuttgart.

Mayer-Spohn, O., S. Wissel, A. Voß, U. Fahl, M. Blesl (2005, aktualisiert 2007): *Lebenszyklusanalyse ausgewählter Stromerzeugungstechniken – Stand 2005 –*, Arbeitsbericht, aktualisiert 2007, Institut für Rationelle Energieanwendung IER, Stuttgart.

Pick, E., H.-J. Wagner (1998): *Beitrag zum kumulierten Energieaufwand ausgewählter Windenergiekonverter*, Arbeitsbericht Universität GH Essen.

dos Santos Bernardes, M., S. Briem, W. Krewitt, M. Nill, S. Rath-Nagel, A. Voß (2002): *Grundlagen zur Beurteilung der Nachhaltigkeit von Energiesystemen in Baden-Württemberg*, Forschungsbericht FZKA-BWPLUS, Stuttgart.

Statistisches Bundesamt (2014): *Nachhaltige Entwicklung in Deutschland – Indikatorenbericht 2014*, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.

Stern, N. (2007): *The Economics of Climate Change - The Stern Review*, Cambridge University Press.

Wagner, H.-J., M. K. Koch, J. Burkhardt, T. Große Böckmann, N. Feck, P. Kruse (2007): *CO₂-Emissionen der Stromerzeugung - Ein ganzheitlicher Vergleich verschiedener Techniken*, *BWK* 59 (10), S. 44-52.

Weidlich, A. et al. (2012): Smart zur Energiewende - fünf Schlüssel zur gesellschaftlichen Akzeptanz von Smart Grids, Policy Brief, stiftung neue verantwortung, http://www.stiftung-nv.de/THINK-TANK/Themenschwerpunkte/Projekte-2011_2012/150868,1031,146951,-1.aspx, Download 1.12.2014.

Weißbach, D., G. Ruprecht, A. Huke, K. Czerski, S. Gottlieb, A. Hussein (2013): Energy intensities, EROIs (energy returned on invested), and energy payback times of electricity generating power plants, *Energy* 52, S. 210-221.

WGBU (2011): Welt im Wandel – Gesellschaftsvertrag für eine Große Transformation, Hauptgutachten des Wissenschaftlichen Beirats der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen, Berlin.

- LESEPROBE -

- LESEPROBE -

Stichwortverzeichnis

C

cap and trade	26
Carbon Dioxide Capture and Storage (CCS)	16
CO ₂ -Bilanzierung	22
CO ₂ -Sequestrierung	16

E

Emissionsrechteteilhandel	26
Energetische Amortisationszeit	28
Energieproduktivität	20
Enquête-Kommission	12
Erntefaktors	28
Externalität	24
Externe Kosten	24

G

GEMIS	24
-------------	----

I

Inerte Abfälle	33
Ionisierende Strahlung	32

K

Kumulierte Energieaufwand (KEA)	28
---------------------------------------	----

L

Lebenszyklusanalyse	19, 21
Life Cycle Assessment (LCA)	21

M

Marktversagen	24
Morbidität	34
Mortalität	34
Multikriterielle Analyse	39

N

Nachhaltigkeitsindikatoren	19
----------------------------------	----

O

Ökobilanzierung	21
-----------------------	----

P

Pigou-Steuer	25
--------------------	----

R

Reserven	15
Ressourcen	15

S

Schwache Nachhaltigkeit	13
Starke Nachhaltigkeit	13

Y

Years of Life Lost (YOLL)	34
---------------------------------	----