



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Fakultät Wirtschaftswissenschaften

DRESDNER BEITRÄGE ZUR LEHRE DER BETRIEBLICHEN UMWELTÖKONOMIE

Nr. 46/2011

Günther, E. / Günther, T. / Hoppe, H. (Hrsg.)

Environmental Life Cycle Costing (ELCC) für Produkte der
Solarenergie.

Die Verbindung von Life Cycle Assessment (LCA) und Life Cycle
Costing (LCC) - from Cradle to Grave - angewandt auf die Photo-
voltaik

Krause, M.

Herausgeber:



Lehrstuhl für
Betriebswirtschaftslehre
Betriebliche Umweltökonomie

ISSN 1611-9185

Prof. Dr. Edeltraud Günther
Prof. Dr. Thomas Günther
Dipl. Wirt.-Ing. Holger Hoppe
Marcus Krause

Technische Universität Dresden
Fakultät Wirtschaftswissenschaften
Lehrstuhl für Betriebswirtschaftslehre,
insbes. Betriebliche Umweltökonomie
01062 Dresden

Telefon: (0351) 463-3 4313

Telefax: (0351) 463-3 7764

E-Mail: bu@mailbox.tu-dresden.de

www.tu-dresden.de/wwbwlbu

Als wissenschaftliches elektronisches Dokument veröffentlicht auf dem Dokumenten- und Publikationsserver Qucosa der Sächsischen Landesbibliothek – Staats- und Universitätsbibliothek Dresden (SLUB) unter:

<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-96963>

Diplomarbeit eingereicht: 2010

Veröffentlicht: 2011

Vorwort

Die Bedeutung der natürlichen Umwelt in den Wirtschaftswissenschaften hat in den vergangenen Jahren kontinuierlich zugenommen: Durch die zunehmende ökologische Knappheit entwickelt sie sich zu einem ökonomisch knappen und somit entscheidungsrelevanten Parameter. Das Forschungsprogramm des Lehrstuhls für Betriebswirtschaftslehre, insb. Betriebliche Umweltökonomie an der Technischen Universität Dresden spiegelt sich auch im Aufbau der Lehre wider. So fließen die gewonnenen Erkenntnisse aus theoretischer und praktischer Forschung direkt in die einzelnen Lehrveranstaltungen ein. Die vorliegenden „Dresdner Beiträge zur Lehre der Betrieblichen Umweltökonomie“ sollen diesen Prozess der Verzahnung unterstützen. Inhalt der Schriftenreihe sind in erster Linie ausgewählte Abschlussarbeiten des Lehrstuhls für Betriebliche Umweltökonomie, durch die der Leser Einblick in die Arbeitsschwerpunkte und Transparenz über die Arbeitsinhalte gewinnen soll.

Die Gestaltung der Schriftenreihe ist Frau Dr. Susann Silbermann zu verdanken, die Koordination der vorliegenden Schriftenreihe erfolgte durch Dipl.-Kffr. Kristin Stechemesser.

Vor dem Hintergrund der zukünftigen Notwendigkeit einer nachhaltigen Energieversorgung beschäftigt sich die vorliegende Arbeit mit Technologien der regenerativen Energiequelle Solarenergie, insbesondere **Photovoltaik** (PV). Systeme zur Nutzung der unerschöpflich verfügbaren, sauberen und im Prinzip “frei Haus” gelieferten Energie der Sonne können eine bedeutsame Rolle in einer umweltverträglicheren Zukunft spielen. Allerdings ist die Herstellung der erforderlichen Komponenten heute i.d.R. noch energie- und kostenintensiv, weshalb für eine korrekte Bewertung dieser Technologien der gesamte Lebenszyklus betrachtet werden muss.

Zur tieferen Analyse der PV wird die Methodik des **Environmental Life Cycle Costing** (ELCC) auf der Grundlage von drei Grundideen eingeführt. Konkret sind dies die Ausgangspunkte: *Nachhaltigkeit*, *Lebenszyklusdenken* und die *Drei-Dimensionalität* dieses Instrumentes durch die gemeinsame Betrachtung ökologischer, ökonomischer und technischer Aspekte in ihrem Zusammenspiel. Ausgehend von theoretischen Elementen der Ökobilanzierung (Life Cycle Assessment) und des Life Cycle Costings, verbunden mit den technischen Eigenschaften der Photovoltaik werden wichtigste Anforderungen und Schritte für die Durchführung eines ELCC für PV beschrieben.

Mittels einer softwaregestützten Inhaltsanalyse wird im Anschluss der definierte *Rahmen für ein ELCC für PV* getestet (und modifiziert) gegen eine Auswahl von *135 bereits existierender Studien*, die sich mit dem Lebenszyklus von PV-Technologien aus ökologischer und ökonomischer Sicht beschäftigen. Im Ergebnis hieraus können die wichtigsten Elemente eines ELCC für PV, wie beispielsweise ökologische Wirkungskategorien oder ökonomische Indikatoren, identifiziert werden (methodisches Feedback).

In einem nächsten Schritt werden die Studien hinsichtlich ihrer “Qualität” bezogen auf ökologische, ökonomische und übergreifende Inhalte eines ELCC für PV bewertet. Auf diese Weise kann ein *Inventar* von Lebenszyklusanalysen für PV erstellt werden, das nach den Technologien und der inhaltlichen Qualität bezüglich eines ELCC strukturiert ist und für weitere Analysen als Grundlage dienen kann.

Aus den bisherigen Ergebnissen kann eine erste Einschätzung zum aktuellen Stand des ELCC für PV in der Literatur vorgenommen werden: Es existiert bereits ein großer Pool von Studien, die sich mit dem Lebenszyklus der PV beschäftigen. Mit Blick auf die Anforderungen eines ELCC für PV besteht jedoch Nachholbedarf in der Verbindung und gemeinsamen Betrachtung von hot spots und trade offs aus ökologischer und ökonomischer Perspektive.

Der definierte theoretische Rahmen für ein ELCC für PV, die kodierte Studien sowie das erstellte Inventar von Lebenszyklusanalysen der PV können nun als Grundlage für weitere Analysen dienen. Insbesondere eine inhaltliche Auswertung der konkreten Ergebnisse von Studien kann so einen Benchmark und Orientierung für neue Lebenszyklusanalysen für PV-Technologien liefern.

Edeltraud Günther

Die wissenschaftliche Fundierung der Arbeit basiert auf den Ergebnissen der gleichnamigen Diplomarbeit von Herrn Marcus Krause an der TU Dresden, Lehrstuhl für Betriebswirtschaftslehre, insbesondere Betriebliche Umweltökonomie, sowie am Lehrstuhl für Betriebswirtschaftslehre, insbesondere Betriebliches Rechnungswesen. Hochschullehrer: Prof. Dr. Edeltraud Günther sowie Prof. Dr. Thomas Günther/ Betreuer: Dipl. Wirt.-Ing. Holger Hoppe. Für den Inhalt dieses Beitrages ist selbstverständlich allein der Autor verantwortlich.

Vorwort des Autors

Seit Menschengedenken ist das Thema *Energie* mit der *Lebensqualität*, ja sogar mit der Existenz aller Lebewesen sehr eng verknüpft. Damit soll nicht nur die Tatsache angesprochen sein, dass alle Prozesse des Lebens auf der Erde auf der Basis von Energie und Energieumwandlung beruhen: unsere Sonne als Existenzgrundlage sämtlicher Individuen, die Photosynthese oder gar die tägliche Nahrungsaufnahme sollen in diesem Zusammenhang nur kurz exemplarisch erwähnt werden.

Die enorme Bedeutung der Energie zeigt sich unter anderem auch darin, dass die Möglichkeit der kontrollierten Nutzung des Feuers vor mehreren hunderttausend Jahren zu einem großen Sprung in der Entwicklung der Menschheit geführt hat.

Zu den ursprünglichen Grundbedürfnissen nach Licht und Wärme hat sich bis in die heutige Zeit, verbunden mit einer gigantischen technologischen Entwicklung, eine ganze Reihe anderer Bedürfnisse hinzu addiert, die – zumindest für einen privilegierten Teil der Menschheit – durch eine sehr bequeme Energienutzung scheinbar aufwandsfrei befriedigt werden können.¹

Gleichzeitig wurden die Möglichkeiten der Energie“-erzeugung“ fortschreitend weiter entwickelt, um dem immer wachsenden Energiebedarf zu begegnen. Nicht für alle Technologien gilt, dass dies einen tatsächlichen Fortschritt bedeutet, da mit ihrer Nutzung starke Umweltbelastungen und Sicherheitsrisiken einhergehen.

Das Ziel, dass Energie rund um die Uhr und in nahezu jedem Winkel der Welt verfügbar ist, geht jedoch einher mit einer -im Prinzip- totalen Abhängigkeit von einer gesicherten Energieversorgung, wodurch sich Energie zu einem sehr begehrten und auf stark ausgeprägten Märkten intensiv gehandelten Gut entwickelt hat.

Doch neben der Frage der Verfügbarkeit und Versorgungssicherheit, der Lieferengpässe, endlichen Ressourcen und Preisschwankungen hat in den Energiedebatten der letzten Jahrzehnte ein weiteres Thema eine große Bedeutung erlangt: der Klimawandel.

Der überwiegende Teil der Wissenschaft ist sich inzwischen einig, dass vor allem die Emission von Treibhausgasen, darunter insbesondere CO₂, zumindest für eine Verstärkung der Klimaerwärmung ursächlich ist. Die Energieversorgung spielt in diesem Zusammenhang eine bedeutende Rolle, da sie für einen großen Teil der klimaschädlichen Emissionen verantwortlich ist. Bei Umwandlungsprozessen zur Energiegewinnung, wie zum Beispiel der Verbrennung fossiler Brennstoffe, werden erhebliche Mengen klimaschädlicher Gase freigesetzt.

In der Phase der Fertigstellung dieser Arbeit findet eine sogenannte Weltklimakonferenz in Kopenhagen statt (Dezember 2009), auf der Reduktionsziele für Treibhausgase festgesetzt werden sollen. Industrie-, Schwellen- und Entwicklungsländer sitzen hierzu an einem Tisch und werden über die gegebenen Optionen und entsprechenden Möglichkeiten dem Klimawandel weltweit zu begegnen, verhandeln. Bei den Überlegungen der Verhandlungsteilnehmer wird auch das Potential erneuerbarer Energien eine wichtige Rolle spielen, da ihre Nutzung zumeist als umweltfreundlich, ja zum Teil als CO₂-frei angesehen wird.

¹ Über die Sinnhaftigkeit einiger Ausprägungen lässt sich in diesem Zusammenhang selbstverständlich streiten.

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine der Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energien Untersuchungsgegenstand sein: die Photovoltaik. Sie wird oft als CO₂-freie und damit saubere Technologie für eine klimafreundliche Zukunft beschrieben, da ihr „Kraftstoff“ das frei verfügbare Sonnenlicht ist. Kritiker halten dem jedoch eine energieintensive, und damit keineswegs CO₂-freie Herstellung der Module sowie die hohen Kosten im Vergleich zu anderen Formen der Energiegewinnung entgegen.

Wie „CO₂-frei“ die Photovoltaik in Wirklichkeit sein kann und wie die Umweltauswirkungen dieser Technologie zusammen mit den tatsächlichen Kosten in einem ganzheitlichen Instrumentarium, das ökologische und ökonomische Kriterien ansetzt, dem Environmental Life Cycle Costing, näher untersucht werden können, soll Gegenstand dieser Arbeit sein. Die vorliegende Arbeit verfolgt damit das Ziel, einen kleinen Beitrag auf dem Weg zu einer zukünftig saubereren Energieversorgung zu leisten.

Ein Sonnenstrahl reicht hin, um viel Dunkel zu erhellen.

Franz von Assisi

Inhalt

Vorwort des Autors	I
Inhalt	I
Abbildungsverzeichnis.....	V
Tabellenverzeichnis	VIII
Symbolverzeichnis	X
Abkürzungsverzeichnis	X
1 Einführung	1
1.1 Untersuchung einer „feinen Sache“, Fragen und Ziele	1
1.2 Struktur der Arbeit und wissenschaftlich-methodisches Vorgehen	2
1.2.1 Vorgehen zur Erschließung des Themas.....	3
1.2.2 Was diese Arbeit nicht beinhaltet	4
2 Instrument Environmental Life Cycle Costing.....	5
2.1 Ausgangspunkte	5
2.1.1 Ausgangspunkt 1: Nachhaltigkeit	5
2.1.2 Ausgangspunkt 2: Lebenszyklusdenken - From cradle to grave	7
2.1.3 Ausgangspunkt 3: Zusammenspiel der drei Dimensionen Ökologie, Ökonomie und Technologie.....	13
2.2 Definition und Einordnung des ELCC in Lebenszyklusbetrachtungen	16
2.2.1 Lebenszyklusbetrachtungen.....	16
2.2.2 Gemeinsame Bezeichnung als Lebenszyklusanalysen	18
2.2.3 Definition ELCC	18
2.2.4 Ziele, Anwendungsbereiche und Ansätze der Lebenszyklusanalysen...20	
2.2.4.1 Ziele und Anwendungsbereiche	20
2.2.4.2 Zeitpunkt der Durchführung und Ansätze	21
2.3 Schritte zur Durchführung eines ELCC	24
2.3.1 Stand der Normierung.....	24
2.3.2 Schrittfolgen für Lebenszyklusanalysen	24
2.4 Akteure, Perspektiven und unterschiedliche Schwerpunktsetzungen	26
3 Untersuchungsgegenstand Technologie Photovoltaik	29
3.1 Technologien zur Nutzung der Sonnenenergie	29
3.1.1 Solarthermie (Solar Thermal Power, STP)	30
3.1.2 Photovoltaik (Solar Photovoltaic Power, SPV)	31
3.1.3 Eingrenzung	31
3.2 Entwicklung der Photovoltaik	32

3.3	Vor- und Nachteile der Photovoltaik.....	33
3.4	PV System	34
3.4.1	PV-Modul und Technologien	34
3.4.1.1	Dickschicht-Technologien (Generation 1.0)	35
3.4.1.2	Dünnschicht-Technologien (Generation 2.0)	36
3.4.1.3	Generation 3.0	37
3.4.1.4	Potential-Vergleich der Zelltechnologien.....	37
3.5	Wichtigste technische Parameter und Komponenten	38
3.5.1	Spitzenleistung (Peak-Leistung)	38
3.5.2	Wirkungsgrad und Flächenbedarf.....	39
3.5.3	Performance Ratio	44
3.5.4	Lebensdauer	44
3.5.5	Leistungsabbau über die Zeit (Degradation)	45
3.5.6	Sonneneinstrahlung.....	45
3.5.7	Installation/System.....	46
3.5.8	Balance of the System (BOS)	48
4	Environmental Life Cycle Costing für Die Photovoltaik	49
4.1	Warum ELCC für PV?	49
4.2	Lebenszyklusmodell	51
4.2.1	Zugrundegelegter Lebenszyklus	51
4.2.2	Besonderheit der End of Life Phase in der Photovoltaik.....	53
4.3	Schrittfolge ELCC für PV	55
4.3.1	Schritt 1: Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen.....	56
4.3.1.1	Ziel, Anlass, Zielgruppe und Vorgehen.....	56
4.3.1.2	Alternativenidentifikation, Untersuchungsgegenstand, Systemgrenzen 1	57
4.3.1.3	Funktionelle Einheit und Referenzfluss	60
4.3.1.4	Prozessbeschreibung und Systemgrenze 2	61
4.3.1.5	Cost Breakdown Structure, Kostenmodell	63
4.3.2	Schritt 2: Informationsbeschaffung	65
4.3.2.1	Sachbilanz.....	65
4.3.2.2	Kosten- und Erlösermittlung, Schätzung und Kostenprofile	66
4.3.2.3	Anforderungen an die Daten-Qualität	67
4.4	Interpretation und Identifizierung von Hot Spots.....	69
4.5	Auswertung, Sensitivitätsanalysen und Handlungsempfehlung	70

4.6	Zusammenfassende Übersicht	70
5	Recherche bestehender Lebenszyklusanalysen der Solarindustrie	72
5.1	Ziel der Recherche	72
5.2	Recherchestrategie	72
5.2.1	Concept Map und Suchbegriffskombinationen	73
5.2.2	Relevante Suchorte	74
5.2.3	Erwartungshaltung	74
5.2.4	Kriterien zur Auswahl der Dokumente	75
5.3	Rechercheergebnis	75
5.3.1	Filterung und Sortierung	75
5.3.2	Kritik Recherchevorgehen und -ergebnis	76
6	Inhaltsanalyse von Lebenszyklusanalysen für Photovoltaik-Produkte	78
6.1	Vorgehen bei der Inhaltsanalyse	78
6.1.1	Charakterisierung der Methode Inhaltsanalyse	78
6.1.2	Zielperspektiven	79
6.1.3	Ablaufstrategie der Inhaltsanalyse	80
6.1.4	Softwaregestützte Ausführung mit ATLAS.TI	81
6.1.5	Auswahlkriterien für relevante Studien	82
6.2	Kategorienschema für die Kodierung während der Inhaltsanalyse	83
7	Auswertung der Inhaltsanalyse vorhandener Lebenszyklusanalysen von Produkten der Photovoltaik Und Methodische Erkenntnisse	84
7.1	Analysierte und ausgeschlossene Dokumente	84
7.2	Charakterisierung der eingeschlossenen Studien hinsichtlich allgemeiner Angaben	85
7.2.1	Zeitliche Einordnung	85
7.2.2	Regionale Charakterisierung	88
7.3	Untersuchungsgegenstand	89
7.3.1	Technologien	89
7.3.2	Alternativenvergleiche	90
7.4	Methodische Erkenntnisse aus der Inhaltsanalyse	91
7.4.1	Wahl der Funktionellen Einheit	91
7.4.2	Beschreibung des Produktsystems: Einbezogene Parameter	92
7.4.3	Angesetzte Lebensdauern	93
7.5	Ökologischer Teil	94
7.5.1	Wichtigste Sachbilanzgrößen, Wirkungskategorien und Methoden	94
7.5.2	Auswertung Ökologisch	96

7.6	Ökonomischer Teil	98
7.6.1	Wichtigste Kostenkategorien	98
7.6.2	Ergebnisbewertung und Auswertung	99
7.6.3	Weitere Erkenntnisse für den Bereich Ökonomie	99
7.7	Sensitivitätsanalysen	100
7.8	Lebenszyklus	101
7.8.1	Phasenabdeckung allgemein	101
7.8.2	Einbezug EoL	103
7.8.3	Transport	104
7.9	Daten	104
7.10	Bewertung der Auswertung der Inhaltsanalyse	107
8	Inventar von Lebenszyklusanalysen zur Photovoltaik.....	109
8.1	Vorgehen zur Erstellung des Inventars von LZA zur PV	109
8.2	Wichtigste Ergebnisse des Inventars	110
8.2.1	TOP 5 gesamt sc-Si.....	111
8.2.2	TOP 5 pc-Si	112
8.2.3	TOP 5 a-Si	113
8.2.4	TOP 5 CdTe	114
8.3	Ergänzungsmöglichkeiten	114
8.4	Weitere Verwendungsmöglichkeiten	115
8.5	Kritik	115
9	Aktueller Stand des ELCC für PV, Zusammenfassung und Ausblick.....	117
9.1	Aktueller Stand.....	117
9.1.1	Verbindung von LCA und LCC einem ELCC für PV	117
9.1.2	Phasenabdeckung.....	118
9.1.3	EoL - Cradle to Retirement.....	118
9.2	Zusammenfassung	118
9.3	Grenzen der Arbeit, folgende Schritte und weiterer Forschungsbedarf	119
	Anhang.....	122
	Literatur	181
	Abstract	192

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Arbeitsschritte zur Erschließung des Themas Environmental Life Cycle Costing für die Photovoltaik.....	3
Abb. 3:	Die drei Säulen der Nachhaltigkeit	6
Abb. 4:	Allgemeiner Lebenszyklus von Systemen/Produkten	9
Abb. 5:	Trade off zwischen Lebenszyklusphasen anhand des Lebenszykluskostenprofils für ein fiktives Beispiel zweier Investitionsalternativen.....	12
Abb. 6:	Möglicher Trade off zwischen Kosten und Umweltauswirkungen	12
Abb. 7:	Zusammenspiel der drei Dimensionen Ökonomie, Ökologie und Technologie	15
Abb. 8:	Einordnung des ELCC in die Lebenszyklusbetrachtungen	16
Abb. 9:	Lebenszyklusanalysen in dieser Arbeit.....	18
Abb. 10:	Definition des ELCC für diese Arbeit	19
Abb. 11:	LZA-Zeitpunkt Planung und Analyse.....	22
Abb. 12:	Perspektiven, Akteure und Schwerpunktsetzungen in LZA (Beispiele)	28
Abb. 13:	Technologien zur Nutzung der Solarenergie	30
Abb. 14:	Geschichte der Photovoltaik	32
Abb. 15:	Vor- und Nachteile der Photovoltaik	34
Abb. 16:	Marktanteile der Zelltechnologien der Photovoltaik (nach Verkaufsmenge, 2008)	35
Abb. 17:	Potentialabschätzung bzgl. Wirkungsgrad und Kosten Trade off für die drei Generationen der Zelltechnologien.....	38
Abb. 18:	Definitionen für den Wirkungsgrad von Solarzellen	39
Abb. 19:	Wirkungsgrad der Photovoltaik im Vergleich	42
Abb. 20:	Theoretischer Wirkungsgrad einfacher (single-junction) Solarzellen (Standard-Testbedingungen).....	43
Abb. 21:	Erreichte Wirkungsgrade unter Laborbedingungen.....	44
Abb. 22:	Durchschnittliche jährlich auf das Festland treffende Strahlungsenergie (Juli 1983 – Juni 2005).....	46
Abb. 23:	Entwicklung Installierte Photovoltaik Kapazität 1992-2008, nach Spitzenleistung	47
Abb. 24:	Lebenszyklusmodell für das ELCC einer PV-Installation.....	52
Abb. 25:	Systemgrenze 1: Einbezogene Komponenten.....	58
Abb. 26:	Beispiel für Prozessbeschreibungen	63
Abb. 27:	Beispiele für Elemente einer CBS	64

Abb. 28:	Bsp. Sachbilanz: Teilbilanz ribbon Si Wafer.....	65
Abb. 29:	Mögliche Kostenanteile der Anfangsinvestition und deren Veränderung über den Lebenszyklus	66
Abb. 30:	Recherche nach Mind Map, Concept Map und Suchanfragen	73
Abb. 31:	Recherchefilter und Sortierung	76
Abb. 32:	Ablaufschema Inhaltsanalyse	81
Abb. 33:	Filterung Inhaltsanalyse auf Basis der recherchierten Dokumente, vgl. auch Abb. 30	85
Abb. 34:	In der Inhaltsanalyse untersuchte Lebenszyklusanalysen zur Photovoltaik nach Jahr der Veröffentlichung	85
Abb. 35:	Trend der Veröffentlichungen PV gesamt	86
Abb. 36:	Inhaltsanalyse - zeitliche Einordnung der LCI Daten, wenn angegeben	87
Abb. 37:	Herkunft der Autoren/Institutionen der analysierten Lebenszyklusanalysen	88
Abb. 38:	Inhaltsanalyse - Standorte der analysierten Produktsysteme	89
Abb. 39:	Inhaltsanalyse - Analyisierte Zelltechnologien.....	90
Abb. 40:	Inhaltsanalyse: Funktionelle Einheiten	91
Abb. 41:	Inhaltsanalyse: Verwendung technischer Parameter	92
Abb. 42:	Inhaltsanalyse: Lebensdauern	93
Abb. 43:	Inhaltsanalyse: Sachbilanzgrößen.....	95
Abb. 44:	Inhaltsanalyse: Wirkungsabschätzung	96
Abb. 45:	Inhaltsanalyse - Auswertung ökologisch	97
Abb. 46:	Inhaltsanalyse – Kosten	98
Abb. 47:	Inhaltsanalyse - Auswertung ökonomisch	99
Abb. 48:	Erfahrungskurve.....	100
Abb. 49:	Inhaltsanalyse – Sensitivitätsanalysen	100
Abb. 50:	Inhaltsanalyse - Lebenszyklusphasen	101
Abb. 51:	Inhaltsanalyse – Phasenabdeckung	102
Abb. 52:	Inhaltsanalyse – Prozessmodule	103
Abb. 53:	Inhaltsanalyse EoL-Kategorien.....	104
Abb. 54:	Inhaltsanalyse – Transport.....	104
Abb. 55:	Inhaltsanalyse - Datenquellen und Unternehmensbezug	105
Abb. 56:	Inhaltsanalyse - Qualitätsziele für Daten	105
Abb. 57:	Inhaltsanalyse - Kritischer Umgang mit Daten.....	106

Abb. 58: Stand des ELCC für PV117

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Vorteile Lebenszyklusorientierung.....	13
Tab. 2:	Beispiele für Ziele und Anwendungsbereiche von LCA, LCC und ELCC	21
Tab. 3:	Ansätze der Lebenszyklusanalysen nach Zielsetzung und Verwendung.....	23
Tab. 4:	Stand der Normierung LCA, LCC und ELCC	24
Tab. 5:	Schritte zur Durchführung von LCA, LCC und ELCC	25
Tab. 6:	Wirkungsgrad Zelle, Modul, System	40
Tab. 7:	Wirkungsgrad und Flächenbedarf der wichtigsten Zelltechnologien	41
Tab. 8:	Installation/Anwendung PV.....	47
Tab. 9:	Balance of System	48
Tab. 10:	Faktoren, die hinsichtlich der End of Life Phase von PV-Installationen zu bedenken sind (nicht erschöpfend)	54
Tab. 11:	Beispiele für Ziel, Zielgruppe und Anlass einer LZA PV	57
Tab. 12:	Alternativenidentifikation.....	58
Tab. 13:	ELCC PV - Technische Parameter	59
Tab. 14:	Funktionelle Einheiten für PV	60
Tab. 15:	Prozessmodule	62
Tab. 16:	Pedigree Matrix.....	68
Tab. 17:	Zielperspektiven der Inhaltsanalyse.....	80
Tab. 18:	Kriterien für die Studienauswahl zur Inhaltsanalyse	82
Tab. 19:	angegebenes Datenalter (LCI) in Zahlen	87
Tab. 20:	Erkenntnisbereiche der Inhaltsanalyse.....	107
Tab. 21:	Inventar - Ober- und Unterkategorien	109
Tab. 22:	Inventar Erläuterung	110
Tab. 23:	Inventar Top 5 sc-Si.....	111
Tab. 24:	Inventar Top 5 pc-Si	112
Tab. 25:	Inventar - Top 5 a-Si	113
Tab. 26:	Inventar - Top 5 CdTe	114
Tab. 27:	Anhang: Recherche Datenbankauswahl	122
Tab. 28:	Anhang: Concept Map	123
Tab. 29:	Suchbegriffskombinationen Life Cycle Assessment	124
Tab. 30:	Suchbegriffskombinationen Life Cycle Costing.....	125

Tab. 31:	Suchbegriffskombinationen End of Life.....	126
Tab. 32:	Verkürztes Kategorienschema - Übergreifend.....	127
Tab. 33:	Vereinfachtes Kategorienschema - LCA	128
Tab. 34:	Vereinfachtes Kategorienschema - LCC	130
Tab. 35:	Vereinfachtes Kategorienschema EoL.....	132
Tab. 36:	Vereinfachtes Kategorienschema: Lebenszyklus	132
Tab. 37:	Kategorienschema vereinfacht: Daten	133
Tab. 38:	Einfacher Vergleich konventionelle vs. computergestützte Inhaltsanalyse.....	158

Symbolverzeichnis

AZ	Fläche einer Solarzelle
η	allgemeiner Wirkungsgrad (Solarzelle) [%]
η_{PV}	praktischer Wirkungsgrad (Solarzelle) [%]
η_T	theoretischer Wirkungsgrad (Solarzelle) [%]
EG	Bandlückenenergie [eV]
Pmax	Maximale Leistung [WP]
G	Globale Bestrahlungsstärke (Leistung/Fläche) [W/m ²]

Abkürzungsverzeichnis

a-Si	amorphes Silizium
BOS	Balance of System (Peripherie von Photovoltaiksystemen)
bspw.	beispielsweise
CBS	Cost Breakdown Structure
CdTe	Kadmium-Tellurid
CSP	Concentrated (-ing) Solar Power
EEE	Elektroenergieerzeugung
ELCC	Environmental Life Cycle Costing
EoL	End of Life
FU	Funktionelle Einheit (Functional Unit)
i.d.R.	in der Regel
i.w.S.	im weiteren Sinne
LCA	Life Cycle Assessment
LCC	Life Cycle Costing
LCI	Life Cycle Inventory
LCIA	Life Cycle Impact Assessment
LZA	Lebenszyklusanalyse(n)
MPP	Maximum Power Point (Punkt maximaler Leistungsabgabe)
NRO	Nicht-Regierungsorganisation
pc-Si	polykristallines Silizium
PR	Performance Ratio
PV	Photovoltaik
RHB	Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe

sc-Si	single-kristallines Silizium
SLUB	SÄCHSISCHE LANDESBIBLIOTHEK – STAATS- UND UNIVERSITÄTSBIBLIOTHEK DRESDEN
sog.	sogenannt(e)
SPV	Solar Photovoltaic Power
SRC	Standard Reporting Conditions (siehe STC)
STC	Standard Test Conditions (Standardbedingungen für das Testen von Solarmodulen; auch Standard Reporting Conditions))
STP	Solar Thermal Power (Nutzung der thermischen Komponenten der Sonnenenergie, z.B. Sonnenkollektoren, CSP)
vs.	versus

1 Einführung

1.1 Untersuchung einer „feinen Sache“, Fragen und Ziele

„Sonnenenergie ist eine feine Sache.

Für die Basisversorgung ist sie allerdings etwas zu ineffektiv. Obwohl man sie mit jährlich einer Milliarde Euro subventioniert, macht Photovoltaik nur 0,1 Prozent des Primärenergieverbrauches aus. Rein von der Ökobilanz wäre es also effektiver, Langzeitarbeitslosen 100.000 Euro pro Jahr zu zahlen, damit sie ein, zwei Stündchen am Tag auf Ergometern für den deutschen Energiehaushalt strampeln.

Deshalb heißt Solarenergie ja auch so. Weil sie so lala funktioniert. Wenn Sie ein mittleres Kohlekraftwerk durch Sonnenkollektoren ersetzen wollen, brauchen Sie dafür etwa die Fläche von ganz Offenbach. Gut, der Frankfurter würde sagen: „Das ist es mir wert ...“²

Vince Ebert

In seinem Buch „Denken Sie selbst! Sonst tun es andere für Sie“³, das sicherlich nicht im Rahmen einer Fachrecherche zum Thema dieser Arbeit aufgetaucht wäre, spricht EBERT mit der zitierten Textpassage eine ganze Reihe von Begriffen an, um die es in dieser Arbeit gehen soll:

- Sonnenenergie und ihre Rolle im gesamten Energiemix (Energieversorgung)
- Effektivität der Sonnenenergie (Technik)
- Kosten sowie Subventionierung (Ökonomie)
- die Ökobilanz der Sonnenenergie (Ökologie)
- mögliche Alternativen (Energieversorgung)
- negative Konsequenzen, z.B. Flächenbedarf und Akzeptanz (Gesellschaft).

Aus diesem Grund sei bitte der kurze Exkurs entschuldigt, bevor im Folgenden die Fachliteratur zu Rate gezogen wird. Mit dieser, nach Verständnis des Autors dieser Arbeit, humorvoll ausgedrückten, kritischen Meinung wird jedoch eine Reihe von ernst zu nehmenden Bedenken gegenüber der Sonnenenergie angesprochen, die allgemein vorherrschend sind.

Die schlichte Frage, die sich aus **Kritikpunkten** wie:

- zu hohe Kosten,
- geringer Wirkungsgrad und
- schlechte Ökobilanz

ergibt: *Ist dies tatsächlich so?*

Der (wirtschafts-)wissenschaftliche Anspruch dieser Arbeit führt nicht direkt zu einer Antwort, sondern eher zu der Frage, wie dies zunächst mit einem geeigneten Instrumentarium untersucht werden kann. Erst im Anschluss kann auf einer ausreichenden Grundlage basierend eine plausible Antwort gegeben werden.

² EBERT, V. (2009), S. 88.

³ Vgl. EBERT, V. (2009).

Im Falle dieser Arbeit soll das Instrument des Environmental Life Cycle Costing für die Beantwortung einer solchen Fragestellung eingeführt werden. Mit ihm können unter Betrachtung des gesamten Lebenszyklus:

- auf Basis ökonomischer (z.B. *Kosten*) und
- ökologischer Kenngrößen (z.B. *Ökobilanzgrößen*),
- bei zugrunde liegenden technischen Parametern (z.B. *Wirkungsgrad*)

Aussagen zu Vor- und Nachteilen von Technologien der Sonnenenergie getroffen werden.

Dabei wird jedoch nicht das Environmental Life Cycle Costing als Instrument untersucht, sondern seine Anwendung auf die Produkte der Solarenergie sowie Erkenntnisse aus bereits durchgeführten Untersuchungen dieser Art.

Für die Arbeit ergeben sich aus diesem Vorhaben folgende **Fragen** zur Klärung:

- Was ist Environmental Life Cycle Costing?
- Welche besonderen Anforderungen ergeben sich bei dessen Anwendung auf Produkte der Solarenergie?
- Gibt es solche Untersuchungen bereits für Solarprodukte?
- Wenn ja:
 - wie gut entsprechen diese den theoretischen Anforderungen?
 - lassen sich weitere Anforderungen für die Anwendung des Instrumentes ableiten?
 - zu welchen Ergebnissen kommen diese Untersuchungen?

Aus diesen Fragen lassen sich formal die folgenden **Ziele** für diese Arbeit ableiten:

- Erstellung eines Anforderungsschemas zur Durchführung eines Environmental Life Cycle Costings für Produkte der Solarindustrie. (Ziel 1)
- Ermittlung des aktuellen Stands des Environmental Life Cycle Costings auf Basis bestehender Untersuchungen. (Ziel 2)
- Identifikation, Strukturierung und Bewertung der wichtigsten Ergebnisse bestehender Untersuchungen des Environmental Life Cycle Costings für Produkte der Solarindustrie. (Ziel 3)

Aus diesen Oberzielen ergeben sich für die thematische Behandlung Subziele, auf die jedoch an den entsprechenden Stellen eingegangen werden soll.

Wie zur Erreichung der gerade definierten Ziele vorgegangen werden soll, wird im folgenden Abschnitt näher erläutert.

1.2 Struktur der Arbeit und wissenschaftlich-methodisches Vorgehen

Zur effektiven Bearbeitung des Themas „Environmental Life Cycle Costing für Produkte der Solarindustrie“ und unter Berücksichtigung der in Kap.1.1 definierten Ziele, soll das Thema in einzelnen Arbeitsschritten sukzessive erschlossen werden. Die Inhalte dieser Schritte und verwendeten wissenschaftlichen Methoden werden im kommenden Abschnitt festgelegt.

1.2.1 Vorgehen zur Erschließung des Themas

Zunächst soll auf Basis vorhandener Fachliteratur geklärt werden, was Environmental Life Cycle Costing ist, welche Schritte vollzogen werden und wie das Instrument im Allgemeinen angewendet werden kann. (Kap.2)

In einem nächsten Schritt werden dann die wichtigsten theoretischen Grundlagen zu Technologien zur Nutzung der Solarenergie ermittelt. Es sollen die wichtigsten technischen Kenngrößen herausgestellt werden, die als Eingangsgrößen für Environmental Life Cycle Costing zur Charakterisierung der Technologien geeignet sind. Das Maß der Detailtiefe soll dabei so gehalten werden, dass die Anforderungen aus den theoretischen Erkenntnissen des vorhergehenden Schrittes erfüllt werden können. Für tiefere Betrachtungen zur Technologie wird an den entsprechenden Stellen auf die Fachliteratur verwiesen. (Kap.3)

Anschließend findet die Zusammenführung aller bisher gewonnenen Informationen in ein Gesamtschema statt. Es werden die methodischen und technischen Hintergründe aus der Fachliteratur verwendet, um theoriegeleitet die Anforderungen und notwendigen Schritte zur Durchführung eines Environmental Life Cycle Costings für Produkte der Solarindustrie zu definieren. (Kap.4)

Mit diesen drei ersten Arbeitsschritten werden die ersten zwei Fragen und das erste Ziel aus Abschnitt 1.1 adressiert.

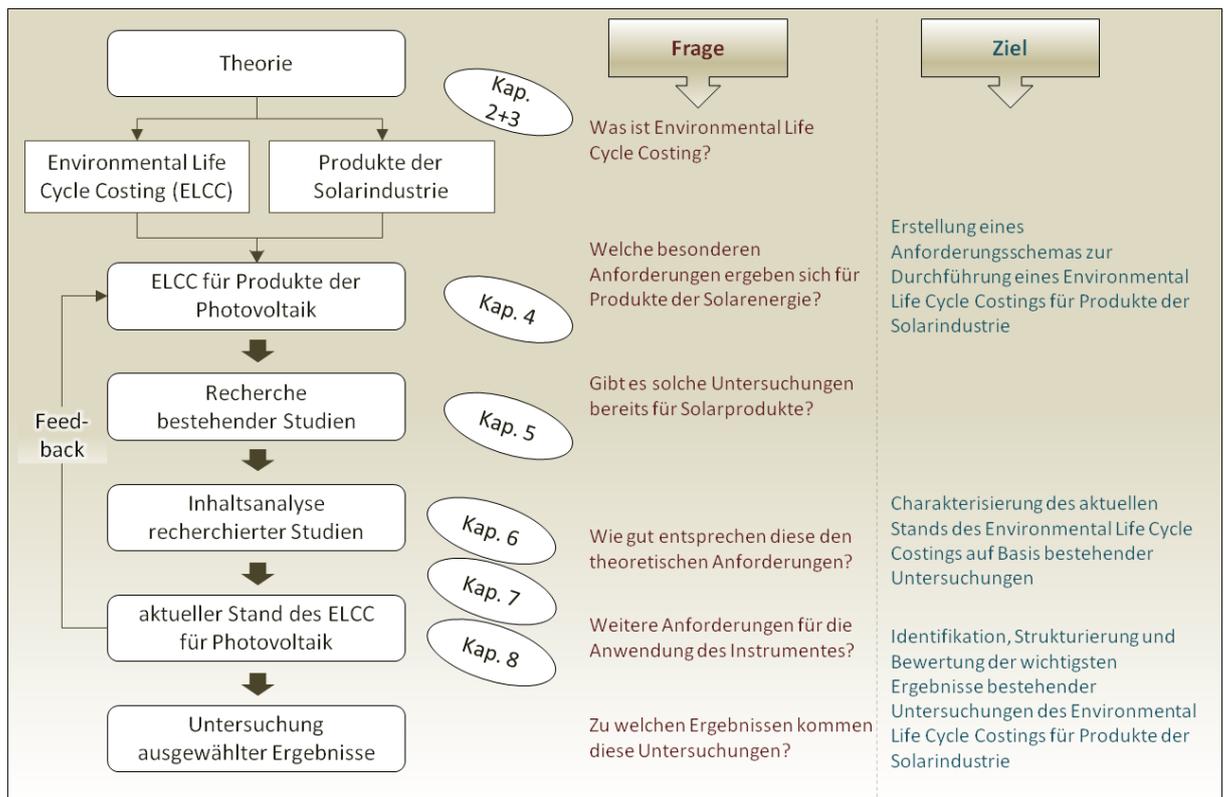


Abb. 1: Arbeitsschritte zur Erschließung des Themas Environmental Life Cycle Costing für die Photovoltaik
(Eigene Darstellung)

Nach den theoretischen Überlegungen der vorherigen Schritte erfolgt nun die Ermittlung des aktuellen Standes bestehender Studien zu diesem Thema. Hierzu wird zunächst in einer strategiegeleiteten Recherche versucht, möglichst vollständig die bisherigen Veröffentlichungen

zu identifizieren und zu beschaffen, die sich in der zuvor definierten Art mit Solarprodukten beschäftigen. (Kap.5)

Im Anschluss an die Sichtung des vorhandenen Materials werden die bestehenden Studien mit Hilfe einer Inhaltsanalyse strukturiert und charakterisiert. Dies erfolgt in der Form, dass einerseits geprüft werden kann, inwieweit das Instrumentarium des Environmental Life Cycle Costings angewendet wurde und andererseits auch inhaltliche Erkenntnisse zu Ergebnissen der Studien gewonnen werden können. Ein Inventar bestehender Untersuchungen dokumentiert das Ergebnis. (Kap.6 bis 8)

Mit Vollendung dieses Schrittes sind die Fragen nach der Existenz bestehender Studien und deren theoretischer Qualität geklärt. Gleichzeitig ist das Ziel der Charakterisierung bestehender Studien erreicht.

Sich eventuell aus den Studien ergebende methodische Erkenntnisse für die Durchführung eines Environmental Life Cycle Costings für Produkte der Solarindustrie können nun ebenfalls in das theoriegeleitete Schema einfließen.

Eine Auswertung einzelner Ergebnisse mit Hilfe einer Meta-Untersuchung ausgewählter Studien komplettiert die Beantwortung der Fragen sowie die Erreichung des dritten Ziels. Der Umfang der möglichen Ergebnisauswertung wird sich dabei aus den erforderlichen Vorarbeiten zur Bearbeitung des Themas ergeben.

Eine Behandlung des Themas nach den soeben definierten Arbeitsschritten sollte also zur Klärung der aufgeworfenen Fragen, zur Erreichung der Oberziele führen und damit zur planmäßigen Durchdringung des Environmental Life Cycle Costing für Produkte der Solarindustrie führen.

1.2.2 Was diese Arbeit nicht beinhaltet

Im Rahmen dieser Arbeit wird zwar das Thema Environmental Life Cycle Costing genauer untersucht, es wird jedoch kein vollständiges Environmental Life Cycle Costing mit konkreten, neu ermittelten Daten für eine reale oder fiktive Solar-Installation durchgeführt. Es werden Anforderungen für eine Durchführung und bestehende Analysen zur Solartechnologie näher beleuchtet.

Für den Ersteller einer Lebenszyklusanalyse von Solarprodukten kann diese Arbeit mit ihren Ergebnissen einen Anhaltspunkt für das Vorgehen bei einer solchen Analyse, einen strukturierten Pool an Praxisbeispielen zur Orientierung und Datengewinnung sowie eine Auswahl von konkreten Richtwerten zur Einschätzung der eigenen Resultate bieten.

Gemäß der vorgestellten Reihenfolge des Vorgehens soll nun im nächsten Kapitel mittels Fachliteratur geklärt werden: Was ist Environmental Life Cycle Costing?

2 Instrument Environmental Life Cycle Costing

In Kap.2 soll das Instrument Environmental Life Cycle Costing (im Folgenden verkürzt als ELCC bezeichnet) in einem allgemeinen Rahmen vorgestellt werden. Die Hinführung erfolgt über sog. *Ausgangspunkte*, die als Denkrichtungen oder Grundideen zu verstehen sind, und von denen ausgehend die Logik des ELCC in dieser Arbeit nachvollzogen werden kann.

Im Anschluss an die Ausgangspunkte werden anhand der Definition des ELCC und seiner Einordnung im Vergleich zu verwandten/komplementären Methoden die wichtigsten Eigenschaften, Ziele und Schritte für eine Anwendung dieses Instrumentes ermittelt. Mit diesem methodischen Hintergrund kann im späteren Verlauf in Kap.4 ein konkreter Kriterienkatalog und Ablaufplan für ein ELCC für Produkte der Solarenergie erstellt werden.

2.1 Ausgangspunkte

2.1.1 Ausgangspunkt 1: Nachhaltigkeit

Mit ihrer Definition einer Nachhaltigen Entwicklung gab die UNITED NATIONS WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT 1987 in ihrem BRUNDTLAND BERICHT „Our Common Future“⁴ eine wichtige Devise, unter anderem auch wirtschaftswissenschaftlichen Handelns, vor:⁵

“Sustainable development is development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs”⁶

Die VEREINTEN NATIONEN erklären folgerichtig auf ihrer Weltkonferenz in Rio de Janeiro im Jahre 1992 Nachhaltigkeit als *das* Leitprinzip für die Entwicklung des Menschen im 21. Jahrhundert.⁷ Insbesondere der Langfristigkeit des Denkens und von Entscheidungen soll mit einem nachhaltigen Verständnis Ausdruck verliehen werden. Die Ereignisse in Zusammenhang mit der aktuellen Weltwirtschaftskrise (2008 bis ?) haben die Notwendigkeit einer langfristigen Orientierung erneut ins Bewusstsein gerufen.⁸

Eine nachhaltige Entwicklung wird üblicherweise auf die drei Säulen *Ökologie*, *Ökonomie* und *Gesellschaft* gestützt⁹ (vgl. Abb. 2).¹⁰ Deren Zusammenspiel ist die Grundvoraussetzung auf dem Weg in eine nachhaltige Zukunft.¹¹

⁴ Vgl. UNITED NATIONS WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT (UN WCED) (1987).

⁵ Zur genaueren Beschreibung des Begriffs der Nachhaltigkeit vgl. bspw. GÜNTHER, E. (2008), S. 44 ff. Auf eine tiefere Definition soll an dieser Stelle verzichtet werden, da der Begriff lediglich als Ausgangspunkt bzw. Denkrichtung dienen soll.

⁶ UNITED NATIONS WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT (UN WCED) (1987), S. I.

⁷ Vgl. UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP) (1992a); UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP) (1992b).

⁸ So wird vor allem die kurzfristige Orientierung im Finanzsektor in Kombination mit einem wenig ausgeprägten Risikomanagement als ursächlich für die Situation im Herbst 2008 (Konkurse von Großbanken, Notwendigkeit staatlicher Rettungsmaßnahmen unter gravierendem Haushaltseinsatz) angesehen.

⁹ SCHUBERT, U.; STÖRMER, E. (2007), S. 3 ff.; UNITED NATIONS WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT (UN WCED) (1987), S. I ff.; KLÖPFER, W. (2008), S. 257.

¹⁰ Teilweise werden als vierte Säule *Institutionen* in das Modell einbezogen, vgl. UNITED NATIONS (HRSG.) (1996), S. 11. Für den Ausgangspunkt des ELCC ist dies jedoch nicht von Relevanz, weshalb das Drei-Säulen Modell zugrundegelegt wird.

Der Ursprung dieses Verständnisses ist die oft herrschende Konfliktsituation zwischen ökologischen und ökonomischen Kriterien unter der Annahme, dass Wechselbeziehungen zwischen beiden bestehen (sog. Trade offs). Andererseits können auch gleiche Zielrichtungen vorhanden sein, so dass Win-Win-Situationen¹² durch gemeinsame Betrachtung der ökonomischen und ökologischen Dimension entstehen können.¹³

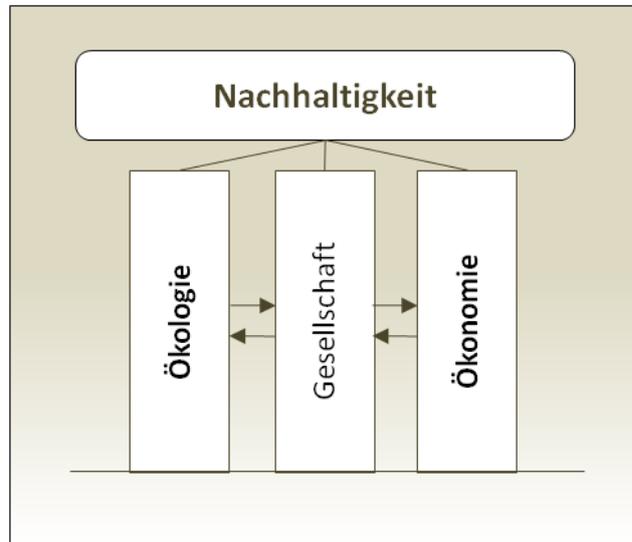


Abb. 2: Die drei Säulen der Nachhaltigkeit

(Eigene Darstellung, in Anlehnung an UNITED NATIONS WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT (UN WCED) (1987))

Mit einem erneuten Blick zurück in Abschnitt 1.1 wird ersichtlich, dass sich die in dem Zitat von EBERT angesprochenen Themen, die sich, wie bereits erwähnt, in der Arbeit wieder finden werden, den drei Säulen der Nachhaltigkeit sinngemäß zuordnen lassen.¹⁴

Noch einmal kurz vergegenwärtigt:

- Kosten (Ökonomie)
- Ökobilanz (Ökologie)
- Akzeptanz (Gesellschaft).

Dieses einfache Beispiel zeigt, dass Menschen offensichtlich in ihrer Beurteilung von Problemen oder Systemen unter anderem diese drei Pfeiler der Nachhaltigkeit als Kriterien ansetzen, wenn auch unbewusst. EBERT sei hierbei unterstellt, dass er in seinem Buch in erster Linie nicht den BRUNDTLAND BERICHT und die Nachhaltigkeit im Sinne hatte.

Es erscheint also sinnvoll, teilweise sogar erforderlich, sich bei Untersuchungen nicht nur auf einen der drei Pfeiler zu konzentrieren, sondern stattdessen interdisziplinär¹⁵ vorzugehen und mehrere Sichtweisen gleichermaßen zu berücksichtigen.

¹¹ Auf Unternehmensebene existiert inzwischen eine Reihe von Ansätzen und Richtlinien, wie das Thema Nachhaltigkeit in Unternehmenshandeln eingebunden werden kann und soll. Vgl. z.B. GLOBAL REPORTING INITIATIVE, CSR EUROPE, ICC CHARTA (GLOBAL REPORTING INITIATIVE (GRI) (2009); CORPORATE SOCIAL RESPONSIBILITY EUROPE (CSR EUROPE) (2009); ICC'S COMMISSION ON ENVIRONMENT & ENERGY; INTERNATIONAL CHAMBER OF COMMERCE (ICC) (2009)).

¹² Also Situationen/Konstellationen, die für beide Seiten vorteilhaft sind.

¹³ SCHUBERT, U.; STÖRMER, E. (2007), S. 3.

¹⁴ Vgl. Begriffe Ökologie, Ökonomie und Gesellschaft in Klammern in der Auflistung der durch EBERT in seinem Zitat angesprochenen Themen.

Zur Herstellung einer Beziehung zwischen Nachhaltigkeit und dem eigentlichen Thema dieses Kapitels, dem Environmental Life Cycle Costing (ELCC), reicht schon ein Blick auf die Bestandteile des Titels dieses Instrumentes:

- Environmental (Ökologie)
- Life Cycle (Lebenszyklusansatz, dazu mehr im nächsten Abschnitt)¹⁶
- Costing (Ökonomie).

So stellt schon die Bezeichnung des ELCC einen Bezug zu mindestens zwei Säulen der Nachhaltigkeit her. Offensichtlich sollen ökonomische und ökologische Kriterien in einer Methodik vereint analysiert werden.

In dem Standardwerk zur Methodik des ELCC, herausgegeben von HUNKELER, LICHTENVORT und REBITZER 2008¹⁷, aus dem die folgenden theoretischen Grundlagen in großen Teilen bezogen werden, stellen die Autoren ebenfalls diesen Bezug zwischen ELCC und dem Konzept der Nachhaltigkeit her.¹⁸ Vor allem wird die Rolle des ELCC in der Frage der Bewertung von Nachhaltigkeit (Sustainability Assessment)¹⁹, also der Messung, Operationalisierung und damit Konkretisierung der Nachhaltigkeit näher beleuchtet.²⁰

Für den weiteren Verlauf bleibt Folgendes festzuhalten: Das ELCC beschäftigt sich mit ökonomischen und ökologischen Kriterien und befindet sich damit in einer Linie mit dem Nachhaltigkeitsdenken. Dies lässt sich aus den Begriffen *Environmental* und *Costing* in ELCC ableiten.

2.1.2 Ausgangspunkt 2: Lebenszyklusdenken - From cradle to grave

Nachdem aus den Bestandteilen *Environmental* und *Costing* bereits Schlüsse über den Nachhaltigkeitsbezug des ELCC gezogen wurden, soll nun geklärt werden, wofür die Phrase *Life Cycle* in Environmental Life Cycle Costing steht.

Entsprechend der wörtlichen Übersetzung steht bei dieser Herangehensweise der *Lebenszyklus* im Mittelpunkt. In Anlehnung an die Biologie wird so die Vorstellung beschrieben, dass nicht-natürliche Systeme genauso wie natürliche Organismen dem „Gesetz des Werdens und Vergehens“ unterliegen, also in einem Zyklus²¹ zwischen Werden=Geburt („Wiege“=engl. cradle) und dem Vergehen=Tod („Bahre“=engl. grave) existieren. Innerhalb der Zeit dazwischen durchlaufen sie verschiedene Entwicklungsstadien, sog. Lebenszyklusphasen, die durch unterschiedliche Merkmale geprägt sind und miteinander in Wechselwirkung stehen.²²

Den Lebenszyklusphasen können

¹⁵ Damit unter Berücksichtigung von Wechselbeziehungen und unter Ausnutzung des Vorteils eines anderen Betrachtungswinkels.

¹⁶ Vgl. Ausgangspunkt 2: From cradle to grave, Kap.2.1.2.

¹⁷ HUNKELER, D.J.; LICHTENVORT, K.; REBITZER, G. (2008).

¹⁸ Vgl. KLÖPFER, W. (2008), S. 157 ff.; REBITZER, G.; NAKAMURA, S. (2008), S. 36 f.

¹⁹ Vgl. z.B. UNITED NATIONS (HRSG.) (1996); GIBSON, R.B.; HASSAN, S. (2005); DEWULF, J.; VAN LANGENHOVE, H. (2007).

²⁰ Vgl. KLÖPFER, W. (2008), S. 157-162.

²¹ In diesem Zusammenhang wird also dem Verständnis gefolgt, dass ein Zyklus einmalig ist und eingebettet in einen Ausgangs- und einen Endpunkt seinen Verlauf nimmt. Eine andere Sichtweise, die dieser Arbeit jedoch nicht zugrunde liegt, wäre das Verständnis von Zyklen als sich periodisch wiederholende Verläufe wie Konjunktur oder Planetenbewegung, vgl. SIEGWART, H.; SENTI, R. (1995), S. 3.

²² Vgl. WÜBBENHORST, K.L. (1984), S. 49 f.; SIEGWART, H.; SENTI, R. (1995), S. 3.

- technisch relevante Parameter eines Systems (z.B. Durchlaufzeit, Nutzungsdauer)
- Aktivitäten der Akteure (z.B. Herstellung, Wartungsdienst)
- Kosten und Erlöse (z.B. Herstellungskosten, Restwerterlöse), sowie
- Umweltauswirkungen (z.B. Emissionen in die Luft durch Transporte, Abwasser zur Behandlung während der Produktion)

zugeordnet werden, wodurch vor allem eine sinnvolle Strukturierung dieser Größen erreicht wird.

Ganz allgemein können die Lebenszyklusphasen *Forschung&Entwicklung*, *Herstellung*, *Nutzung* und *End of Life* unterschieden werden (vgl. Abb. 3).²³

In der Forschungs- und Entwicklungsphase wird zunächst der Bedarf für ein Produkt erkannt und konkretisiert. Anschließend wird dieses in den Schritten Konzeption, Design und Konstruktion geplant und in einen Realisierungsstatus entwickelt.

Anschließend kann dieses Produkt hergestellt werden. Hierfür sind zunächst Vorschnitte wie z.B. Rohstoffgewinnung und –bearbeitung erforderlich, bevor in mehreren Prozessschritten die eigentliche Produktion erfolgen kann. In der Regel fallen auch Transportprozesse an.

Das hergestellte Produkt kann nun verwendet werden. Während der Nutzung bzw. des Betriebes müssen Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten ausgeführt werden. Für den Fall einer Weiternutzung nach der ursprünglich vorgesehenen Nutzungsdauer, evt. mit einem anderen Einsatzbereich, kann von einer Re-Nutzung gesprochen werden.

Ist das Lebensende des Systems oder Produktes erreicht, wird es stillgelegt und zurückgebaut. Wiederverwendbare Materialien können mittels Recycling als Rohstoff einer erneuten Herstellung zugeführt werden, während restliche Stoffe einer Aufbereitung und endgültigen Entsorgung zugehen.

²³ Das hier verwendete Lebenszyklusmodell ist in das erweiterte Modell des Produktlebenszyklus einzuordnen, vgl. WILDEMANN, H. (1982), S. 39 ff.; BAUM, H.; COENENBERG, A.G.; GÜNTHER, T. (2004), S. 85; PFEIFFER, W.; BISCHOF, P. (1981), S. 133 ff. Es folgt damit nicht dem bekanntesten Konzept des „Marketing Life Cycle“ (vgl. z.B. BAUM, H.; COENENBERG, A.G.; GÜNTHER, T. (2004), S. 83) bestehend aus Einführungsphase, Wachstumsphase, Reifephase und Sättigungsphase, das sich eher auf Produktgruppen und weniger auf ein konkretes, gegenständliches Produkt bezieht. Mit diesem Lebenszyklusmodell für Solarmodule befassen sich bspw. CHAUREY u.a. (vgl. CHAUREY, A.; GUEYE, M.K.; BABU, N.Y. (2003), S. 249-263).

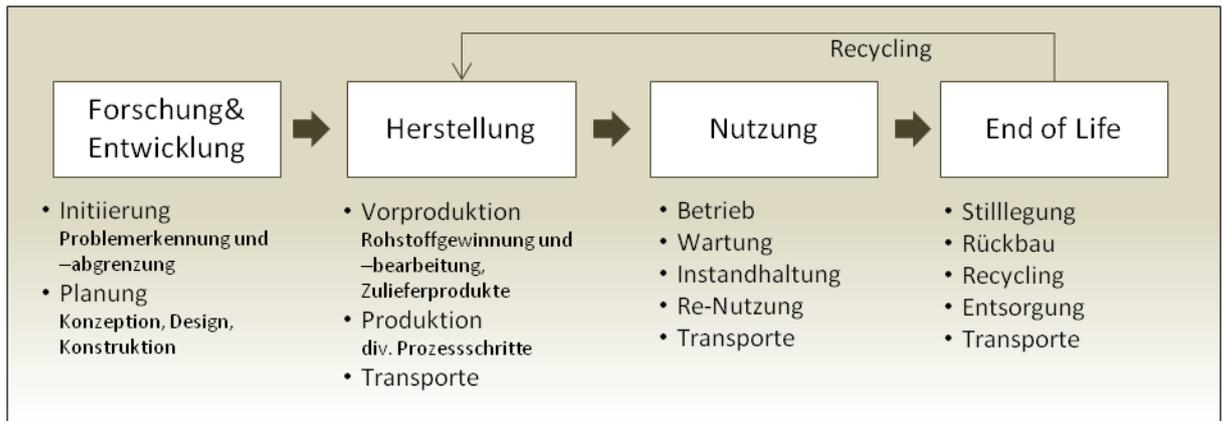


Abb. 3: Allgemeiner Lebenszyklus von Systemen/Produkten

(Eigene Darstellung in Anlehnung an BAUM, H.; COENENBERG, A.G.; GÜNTHER, T. (2007), S. 85; BLANCHARD, B.S. (1978), S. 7 f.; BOGUSKI, T.K. u.a. (1996), S. 2.5; SIEGWART, H.; SENTI, R. (1995), S. 17, 20; WÜBBENHORST, K.L. (1984), S.55)

Dieser Phasenaufbau ist zunächst sehr allgemein und kann individuell an das System angepasst anders gestaltet und weiter detailliert werden. In Kap. 3 wird ein Lebenszyklusmodell für Produkte der Photovoltaik vorgeschlagen, das eine sinnvolle Phaseneinteilung für diese Technologie vorgibt.

Ein fiktives und bewusst überspitztes Beispiel soll nochmals die Idee des Lebenszyklusdenkens vermitteln.

Beispiel: Lebenszyklus

Schnäppchenjäger Johann und Rechenass Rolf haben beide ein großes Tagesziel: jeder möchte einen Flatscreen Fernseher im neuen, viel beworbenen Format „XXXL“ kaufen. Beide haben ähnliche Größenvorstellungen und gehen in den örtlichen Fachmarkt für Elektrogeräte.

Nach einer gewissen Zeit finden beide jeweils ein Gerät nach ihren Vorstellungen. Wie zu erwarten, spiegelt sich in ihrer Auswahl auch ihr Name wider.

Anschaffung

Schnäppchenjäger Johann hat sich das günstigste Modell (A) in seiner Klasse ausgesucht:

- preisgesenkt EUR 1.000
- der Hersteller ist Johann unbekannt
- Angaben zu Energieverbräuchen sind nicht zu finden
- die Garantiezeit von 2 Jahren und die nach guter Ausstattung klingenden technischen Merkmale liest ihm der Verkäufer in kompetenter Form vom Typenschild vor und schließt mit der Bemerkung: „ (...) 'nen günstigeren Fernseher als den, finden Sie weder hier noch sonst wo. Ich hab den auch zu Hause.“
- für Johann steht nun endgültig fest: da die Marke egal, das Gerät groß und der Preis fantastisch ist: Wird gekauft!

Rechenass Rolf hat sich hingegen die gesamte Reihe der Fernsehgeräte genauer angesehen, mehrere Merkmale miteinander verglichen und sich für seinen Favoriten (B) entschieden:

- der Preis liegt 30% über dem von (A)
- Rolf ist nicht sehr markenbewusst, kennt aber den Hersteller, der als sehr solide und kundenfreundlich gilt, die Herstellergarantie beträgt hier 3 Jahre

- das Gerät wird u.a. mit seinem vergleichsweise geringen Energieverbrauch beworben, was für Rolf ein wichtiges Kriterium ist, da die letzte Abschlagserhöhung hoch war und er als Rechenass natürlich immer auch die laufenden Kosten im Auge behält
- trotz kompetenter Beratung vor Ort entscheidet sich Rolf nicht für das günstige und zudem empfohlene Modell (A), sondern für seinen Favoriten (B).

Nutzung

Beide Geräte funktionieren sehr gut und versprechen schöne Fernsehabende. Lediglich Johann wundert sich über die gestiegenen Stromkosten, seit der neue Fernseher da ist.

Wartung und Reparatur

Wie der Zufall es möchte, fallen die Fernseher noch kurz vor Ablauf der Garantiezeit aus.

- Johann ärgert sich schon seit zwei Stunden mit einer Hotline herum, in der er nach jeweils 15 Minuten Wartezeit immer wieder weiter verbunden wird, da die Person am anderen Ende nur für Störungen der Bildqualität im Videokanal, aber nicht für Totalausfälle des Fernsehgerätes zuständig ist. Nach 6 Wochen, davon 4 ohne Fernsehgerät, hat Johann das Problem gelöst. Kosten: 50 EUR Telefonhotline, EUR 40 An- und Abtransport und EUR 28 für 2 Kinoabende mit seiner Freundin.
- Rolf klärt das Problem mit dem gut organisierten Kundenservice seines Herstellers, der den Ausfall so kurz vor Garantieende natürlich sehr bedauert und sich entschuldigt. Mit Reparatur und Leihgerät ist das Problem innerhalb von zwei Wochen gelöst. Kosten: EUR 5 Trinkgeld für das An- und Abholen.

End of Life

Beide Geräte erreichen das natürliche Lebensende.

- Gerät A (Johann) nach 5 Jahren
- Gerät B (Rolf) nach 8 Jahren

Entsorgung

- Johann muss feststellen, dass der Hersteller seines Gerätes bei der Produktion Stoffe verwendet hat, die gesondert zu aufzuarbeiten sind. Der Entsorger verlangt deshalb EUR 30.
- Rolf schafft seinen Fernseher zum örtlichen Entsorgungsunternehmen, das solchen Elektroschrott kostenlos zurück nimmt und teilweise recycled

Fazit 1: Kosten

Der Vergleich zeigt, dass Johann zunächst durch die geringeren Anschaffungskosten scheinbar ein besseres Geschäft als Rolf gemacht hat. Durch die höheren Kosten während der Nutzung für Strom und Reparatur etc. sowie die Entsorgungskosten und die kürzere Nutzungsdauer ist dieser Vorteil jedoch schnell nachbezahlt²⁴. Es kann also in diesem überspitzten Beispiel nachvollzogen werden, dass Entscheidungen einerseits Auswirkungen auf spätere Phasen in einem Lebenszyklus haben können. Andererseits kann eine zunächst vorteilhaft scheinende Lösung über den gesamten Lebenszyklus betrachtet ungünstiger sein, was sich im Beispiel durch höhere Gesamtkosten äußert.

²⁴ In dieser einfachen Betrachtung ohne den Zeitwert des Geldes oder Anlagealternativen mittels Diskontierung zu berücksichtigen.

Abb. 4 zeigt diesen Zusammenhang, ohne einen genauen Maßstab einzuhalten, sowie den möglichen Trade off, der zwischen Lebenszyklusphasen bzw. zwischen Anfangs- und Folgekosten²⁵ bestehen kann. Eine Betrachtung des kompletten Lebenszyklus führt folglich zu einer langfristig günstigeren Entscheidung.

Fazit 2: Umweltauswirkungen

Bezüglich möglicher Umweltauswirkungen ist folgender Fall denkbar. Bereits bei der Produktion des Fernsehgerätes von Johann entstehen deutlich höhere Umweltauswirkungen, da die Umweltauflagen für den unbekanntem Hersteller in der Ferne wenig strikt sind. Des Weiteren verursacht der höhere Stromverbrauch des Gerätes während der Nutzung höhere Umweltauswirkungen durch die Stromerzeugung (Nutzungsphase). Bei der Entsorgung entstehen vermutlich ebenfalls höhere Auswirkungen durch die verwendeten Sondermaterialien und den zusätzlichen Aufwand bei der Aufbereitung. Auch hinsichtlich der Umweltauswirkungen muss also der gesamte Lebenszyklus betrachtet werden, um alle entstehenden Effekte in die Bewertung mit einzubeziehen. In diesem Zusammenhang ist denkbar, dass sich eine Beziehung zwischen den Anschaffungskosten und den Umweltauswirkungen herstellen lässt. In diesem Beispiel bedeutet dies, dass die höheren Anschaffungskosten eine umweltfreundlichere Technologie liefern und somit ebenfalls eine Austauschbeziehung zwischen ökonomischen und ökologischen Größen bestehen könnte (vgl. Abb. 5).

Fazit 3: Internalisierung externer Kosten

Der Zusammenhang zwischen Kosten und Umweltauswirkungen ist für Rolf und Johann zunächst belanglos, da sie wahrscheinlich nur nach eigenen kurzfristigen monetären Gesichtspunkten entscheiden und die Kosten, die durch die Umwelteffekte verursacht werden, durch die Gesellschaft getragen werden (externe Kosten). Was aber passiert, wenn diese Kosten durch Gesetzgebung o.ä. in die Preise für die Fernsehgeräte einfließen? Die externen Kosten würden also auf die Verursacher übertragen (Internalisierung), womit ein direkter Zusammenhang zwischen Kostenkomponenten und Umwelteffekten hergestellt werden kann. In einer solchen Situation würden die Umwelteffekte auch bei rein monetären Entscheidungskriterien indirekt in die Bewertung einbezogen und somit auch für Johann und Rolf eine Bedeutung bekommen. Dieser Logik folgend würde eine Bewertung über den gesamten Lebenszyklus einen noch deutlicheren Unterschied zwischen den beiden Fernsehgeräten jenseits der Anschaffungskosten herausstellen.

Das Beispiel zeigt, weshalb eine Betrachtung von Systemen oder Produkten über den gesamten Lebenszyklus zu führen ist. Nur so werden Bewertungen oder Entscheidungen über Vorteilhaftigkeit unter Berücksichtigung aller zu erwartenden Größen geführt.

Die einzelnen Lebenszyklusphasen stehen in Beziehung zueinander. Entscheidungen, die in einer früheren Phase getroffen werden, wirken sich auf spätere aus und umgekehrt sollten Entscheidungen in späteren Phasen vorherige Kennwerte einbeziehen (Entscheidungsinterdependenzen).

Neben den betrachteten Kosten zeigt die Erweiterung auf Umweltauswirkungen, dass hier ebenfalls Wechselwirkungen bestehen können, einerseits zwischen ökonomischen und ökologischen Kriterien (z.B. höhere Investitionskosten in umweltfreundlichere Technologien, weniger Schadenskosten durch umweltfreundlichere Technologien), andererseits zwischen

²⁵ Vgl. BACK-HOCK, A. (1988), S. 6 f.; WÜBBENHORST, K.L. (1984), S. 70.

den Phasen (eine umweltfreundliche Produktion kann zu einer umweltfreundlicheren Entsorgung führen).

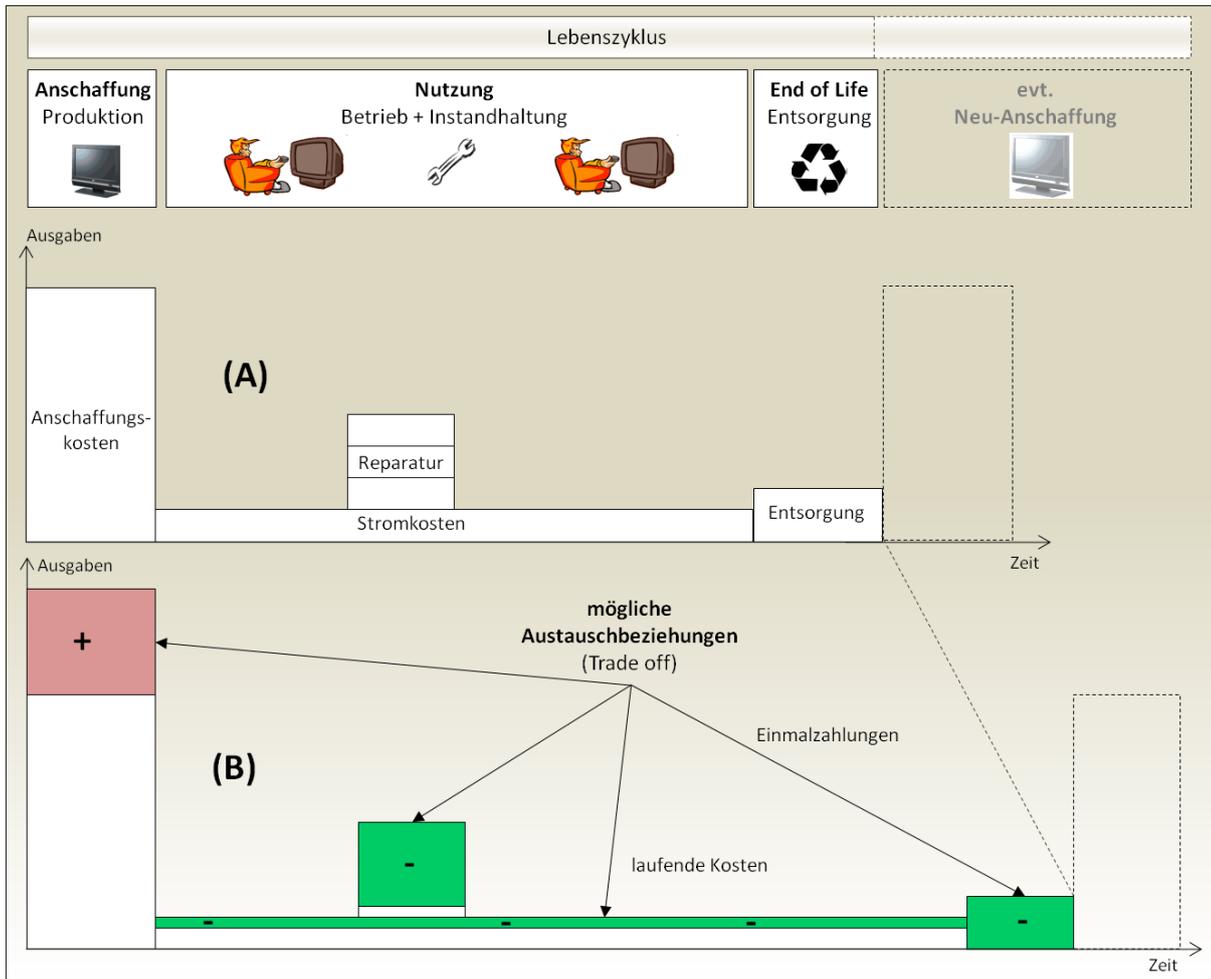


Abb. 4: Trade off zwischen Lebenszyklusphasen anhand des Lebenszykluskostenprofils für ein fiktives Beispiel zweier Investitionsalternativen

(Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an BURSTEIN, M. (1988), S. 257; GÜNTHER, E. (2008), S. 259)

Wird zusätzlich bedacht, dass es sich nicht nur um reine Kostenbetrachtungen handeln muss, sondern auch Produkte analysiert werden können, die mit ihrer Nutzung zu monetären Rückflüssen führen bzw. Kosten vermeiden (wie das im Bsp. der Solarindustrie z.B. durch eine Einspeisevergütung der Fall sein wird), kann sich die Bewertung über die gesamte Lebenszeit eines Systems erneut verändern. Unter solchen Rahmenbedingungen ist eine lebenszyklusorientierte Herangehensweise ebenfalls am besten geeignet, um Wechselwirkungen darzustellen.

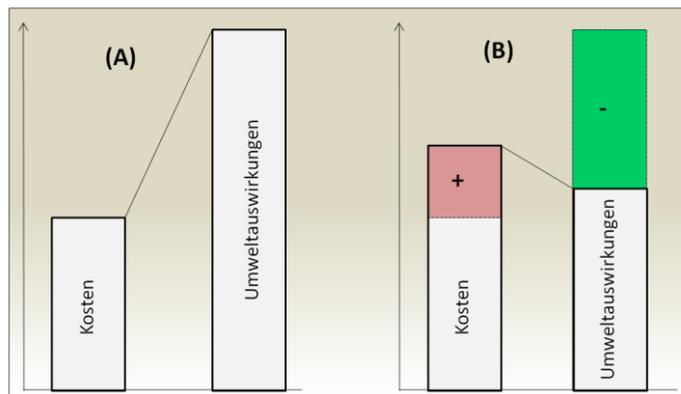


Abb. 5: Möglicher Trade off zwischen Kosten und Umweltauswirkungen (Eigene Darstellung)

Der cradle to grave Ansatz ist also umfassender als der an den Werkstoren des Nutzers endende Ansatz cradle to gate (gate=Tor), nach dem aus Herstellersicht die Betrachtung mit Auslieferung seines Produktes enden würde und der weitere Lebensweg nicht einbezogen wird.²⁶ Für eine umfassende Sichtweise greift diese Betrachtung jedoch zu kurz. Insbesondere hinsichtlich der Umweltauswirkungen sind alle Lebensphasen in eine Analyse einzubeziehen.

Die Lebenszyklusorientierung liefert also einen zweiten Ausgangspunkt für das Grundverständnis des ELCC. Zusammengefasst sind nochmals die Vorteile dieser Herangehensweise in Tab. 1 dargestellt.²⁷

Tab. 1: Vorteile Lebenszyklusorientierung

(Quelle: BACK-HOCK, A. (1988), S. 7; WÜBBENHORST, K.L. (1984), S. 50 ff.)

Vorteil	Beschreibung
(1) Ganzheitliche dynamische Sichtweise	<ul style="list-style-type: none"> • in Entscheidungen werden Konsequenzen für alle Elemente des Systems einbezogen (ganzheitlich) • System in seinem Zeitverlauf, Verringerung von Unsicherheiten (dynamisch)
(2) Berücksichtigung von Entscheidungsinterdependenzen	<ul style="list-style-type: none"> • Folgewirkungen von Entscheidungen für spätere Phasen hinsichtlich Kosten, Leistung und Zeit werden sichtbar gemacht • Einbezug der Tatsache, dass die Freiheitsgrade von Entscheidungen im Zeitverlauf abnehmen
(3) Strukturierung	<ul style="list-style-type: none"> • Systematisierung von Größen und des Vorgehens nach Lebenszyklusphasen • Risikominderung und Erhöhung der Flexibilität, da Risikozerteilung in einzelne Komponenten

Die Vorteile der Lebenszyklusorientierung Ganzheitlichkeit (1) und die Berücksichtigung von Entscheidungsinterdependenzen (2) entsprechen ebenfalls einer nachhaltigen Entwicklung (vgl. erster Ausgangspunkt, Kap.2.1.1) bestehend aus mehreren Pfeilern und deren Zusammenwirken.

Der dritte Ausgangspunkt im nächsten Abschnitt folgt ebenso dieser Logik.

2.1.3 Ausgangspunkt 3: Zusammenspiel der drei Dimensionen Ökologie, Ökonomie und Technologie

In Kap.1.1 wurden bereits die drei Dimensionen angesprochen, die für die Analyse eines technischen Systems eine Rolle spielen. Anhand der Kritik EBERTS wurden

- *ökonomische* (z.B. *Kosten*) und
- *ökologische* Kenngrößen (z.B. *Ökobilanzgrößen*) sowie
- zugrunde liegende *technische Parameter* (z.B. *Wirkungsgrad*)

²⁶ Zu diesen und weiteren Lebensphasenkonzepten und „cradle-to...“-Ansätzen vgl. z.B. HERRMANN, C. (2009), S. 63 ff.

²⁷ Vgl. BACK-HOCK, A. (1988), S. 7; WÜBBENHORST, K.L. (1984), S. 50 ff.

als Kriterien zur Beurteilung der Sonnenenergie identifiziert. Nach dem Verständnis eines Environmental Life Cycle Costings im Rahmen dieser Arbeit stellt das Zusammenspiel der drei Dimensionen Ökonomie, Ökologie und Technologie einen weiteren Denkansatz für das ELCC dar.

Eine ökonomische und ökologische Bewertung kann nur dann sinnvoll ausgeführt werden, wenn das System mit seinen technischen Parametern (Technologie) eindeutig charakterisiert ist. Werden bspw. zwei Technologien der Photovoltaik von gleicher Fläche miteinander verglichen, von denen die preiswertere auch die geringeren Umweltauswirkungen aufweist, erscheint die Vorteilhaftigkeit zunächst klar. Wird aber in die Rechnung einbezogen, dass die preiswertere Technologie einen deutlich geringeren Wirkungsgrad aufweist, also entweder eine größere Fläche erforderlich wäre oder mit dieser Lösung weniger Energie gewonnen werden kann, verschiebt sich eventuell das Ergebnis der Bewertung.²⁸

In der Regel bedingen sich die drei Dimensionen untereinander. So wird eine Technologie stets mit bestimmten Kosten (oder Erlösmöglichkeiten) verbunden sein und gleichzeitig gewisse Umwelteffekte verursachen. Genauso bedeutet ein festgelegtes Budget in der Regel den Ausschluss von technischen Lösungen, die dieses Budget überschreiten. Werden bzgl. der Umweltauswirkungen feste Anforderungen gestellt, schließen sich ebenfalls einige Technologien von vornherein aus, wenn sie diesen nicht gerecht werden.

Je nach den Anforderungen, die gestellt werden bzw. Restriktionen, denen ein System unterlegen ist, werden die einzelnen Dimensionen also individuell ausgeprägt sein. In Abb. 6 ist dieser Zusammenhang schematisch dargestellt. In Diagramm (2) auf der rechten Seite zeigen die unterschiedlichen Flächen (braun und grün) mit den Ausprägungen der einzelnen Dimensionen (Achsenabschnitte) den bildhaften Gesamtwert eines Systems (Fläche = Gesamtbewertung des Systems)²⁹ und wie dieser sich mit Veränderungen in den ökologischen, ökonomischen und technischen Eigenschaften ändern kann.

In der Regel sind vor allem die technischen Parameter jedoch nicht direkt beeinflussbar. Dennoch müssen diese zumindest eindeutig charakterisiert werden. Ein ELCC betrachtet also neben den ökologischen und ökonomischen Kriterien immer auch die Dimension Technologie mit.

Mit der Berücksichtigung von ökonomischen und ökologischen Ausprägungen findet sich einerseits der Nachhaltigkeitsgedanke wieder (Ausgangspunkt 1), andererseits kann durch die gemeinsame Betrachtung der drei Dimensionen über den gesamten Lebenszyklus (Ausgangspunkt 2) ebenso ein Trade off zwischen den drei Dimensionen (Ausgangspunkt 3) über die Phasen des Lebenszyklus hinweg ermittelt werden.

Das Ziel ist letztlich eine Optimierung in allen drei Dimensionen zu erreichen, d.h. einen technologischen Fortschritt, der einher geht mit geringeren Umweltauswirkungen und der Nutzung von Kostensenkungspotentialen. Die Ausprägung dieser drei Dimensionen entscheidet schließlich über die Güte des Bewertungsobjektes (vgl. Abb. 6).

²⁸ Dieser Zusammenhang wird in einem ELCC über die Wahl einer geeigneten funktionalen Einheit berücksichtigt, vgl. Kap.4.3.1.3 sowie 7.4.1.

²⁹ In der hier gewählten Logik zur Veranschaulichung würde also eine größere Fläche mit einem größeren Gesamtnutzen gleichgestellt.

Das Zusammenspiel von Ökonomie, Ökologie und Technologie stellt somit ebenfalls einen Baustein zu einer möglichst ganzheitlichen Betrachtungsweise, nicht nur über den gesamten Lebensweg, sondern auch durch die Vereinigung mehrerer Perspektiven, dar.

Dieses interdisziplinäre Vorgehen führt jedoch zu einer komplexen Struktur in der Analyse, bedarf einer Fachkompetenz in allen drei Dimensionen und einer zielgerichteten Systembeschreibung, um Fehlansagen zu vermeiden.

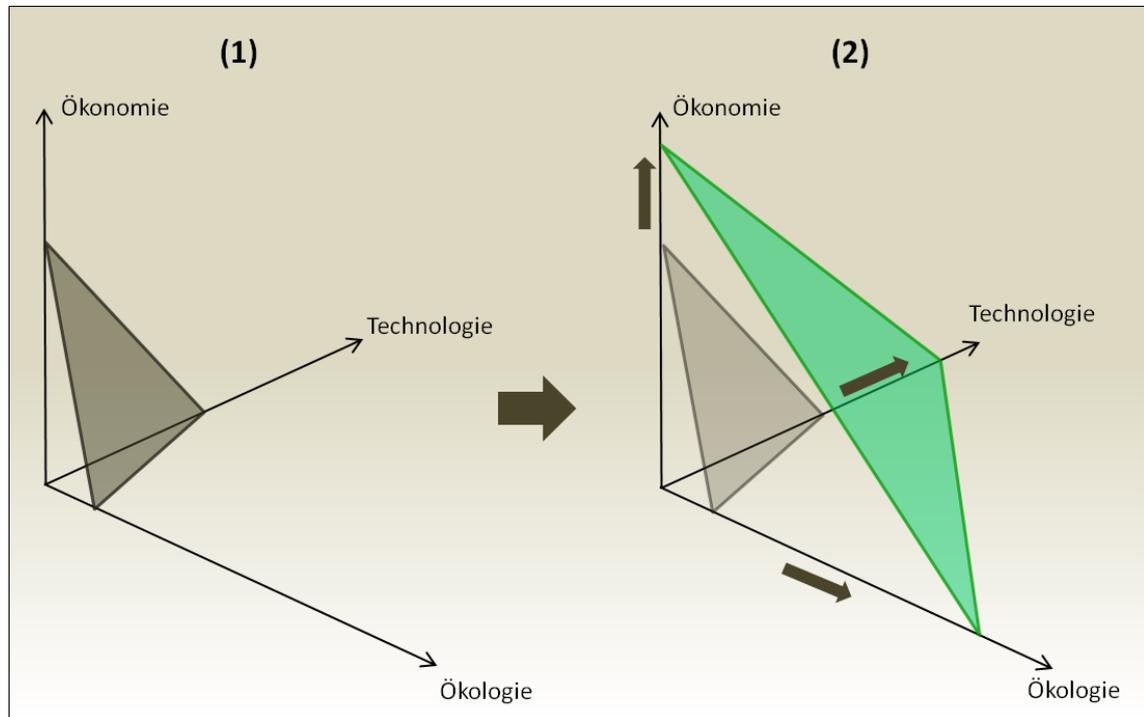


Abb. 6: Zusammenspiel der drei Dimensionen Ökonomie, Ökologie und Technologie
(Eigene Darstellung)

Gleichzeitig bedeutet dies auch, dass im Rahmen dieser Arbeit bedauerlicherweise nicht jeder der drei Bereiche (Technik, Ökonomie, Ökologie) bis ins kleinste Detail untersucht werden kann. Aus diesem Grund wird eine Reduktion auf die wesentlichsten Punkte³⁰ vorgenommen, um vergleichende Schlussfolgerungen treffen und Parallelitäten, Gemeinsamkeiten und Unterschiede identifizieren zu können, wenn sich die Ausprägungen der drei Dimensionen verschieben. Bei Bedarf können dann tiefergehende Einzeluntersuchungen in den drei Bereichen getrennt zu Verbesserungen führen (z.B. rein technische Optimierungen, unabhängig von Kostenentwicklungen und Umweltauswirkungen, auf deren Basis in einem nächsten Schritt weitere Kriterien einbezogen werden).

Ausgehend von den drei Ausgangspunkten Nachhaltigkeit, Lebenszyklusdenken und Dreidimensionalität als Denkrichtungen für ein Environmental Life Cycle Costing sollen im Folgenden die wichtigsten Schritte und Anforderungen für ein ELCC aufgezeigt werden. Dabei werden Lebenszyklusbetrachtungen, die sich rein mit ökologischen oder ökonomischen Kriterien befassen, als Grundlage dienen.

³⁰ Wesentliche Anforderungen zur Durchführung eines ELCC, vgl. Kap.4.

2.2 Definition und Einordnung des ELCC in Lebenszyklusbetrachtungen

2.2.1 Lebenszyklusbetrachtungen

Lebenszyklusbetrachtungen können je nach Zielstellung auf unterschiedliche Art differenziert werden. Abb. 7 zeigt die wichtigsten Unterscheidungsmerkmale für die weitere Einordnung des ELCC in dieser Arbeit.

Zunächst ist entscheidend, welches Bezugsobjekt (Untersuchungsgegenstand) im Mittelpunkt der Betrachtung stehen soll. Wie den bisherigen Ausführungen bereits entnommen werden kann, stehen in dieser Arbeit *Produkte*, im Speziellen Produkte der Solarenergie, im Vordergrund. Weitere Bezugsobjekte von Lebenszyklusbetrachtungen können Organisationen und Potentialfaktoren sein³¹, wofür sich jeweils veränderte Lebenszyklen und Schwerpunktsetzungen ergeben können.

Eine weitere Unterscheidung von Lebenszyklusbetrachtungen ergibt sich aus den einbezogenen Kriterien. So können diese einerseits rein *monetär* (z.B. Kostenbetrachtungen) sein oder andererseits sich ausschließlich auf *nicht-monetäre Größen* (z.B. Energiebilanzierung) beziehen. Genauso kann entsprechend dem Bewertungsinteresse zwischen *ökologischen* und *ökonomischen* Lebenszyklusanalysen unterschieden werden.

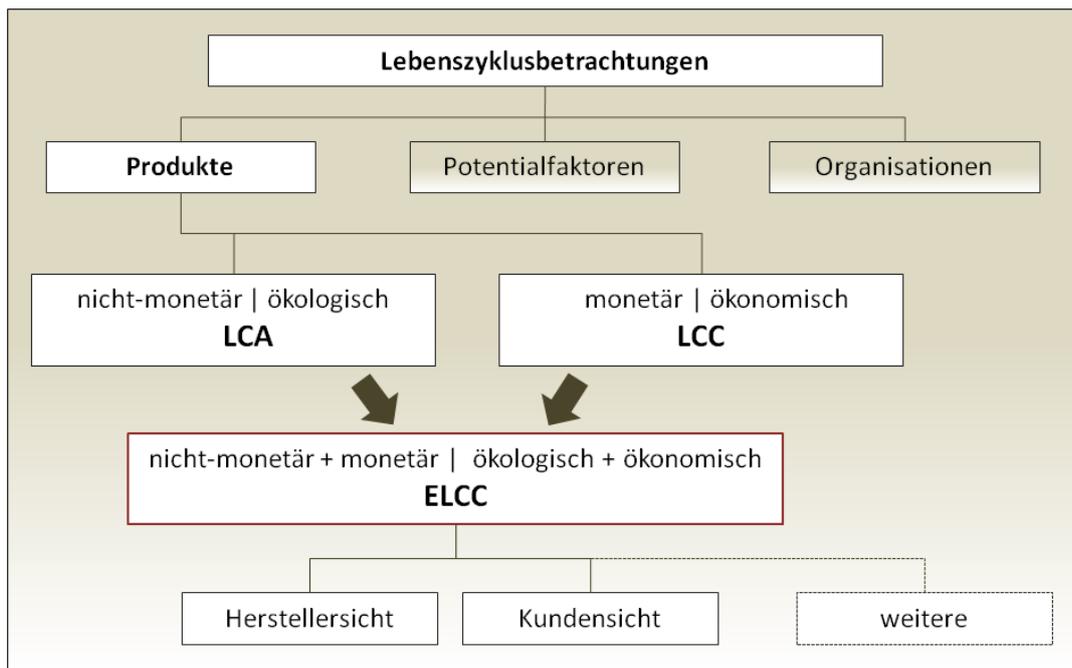


Abb. 7: Einordnung des ELCC in die Lebenszyklusbetrachtungen

(Eigene Darstellung, in Anlehnung an GÜNTHER, E. u.a. (2005), S. 49; ZEHBOLD, C. (1996))

Für das Environmental Life Cycle Costing in dieser Arbeit werden Life Cycle Assessment (LCA) und Life Cycle Costing (LCC) als Basis für die theoretischen Anforderungen an ein ELCC verwendet. Beide Lebenszyklusanalysen sollen in diesem Zusammenhang *Produkte* untersuchen. Während jedoch LCA nicht-monetäre Größen aus einer ökologischen Sicht betrachtet, beleuchtet ein LCC als ökonomische Lebenszyklusanalyse rein monetäre Grö-

³¹ Vgl. ZEHBOLD, C. (1996), S. 16 ff.

ßen.³² Die Zusammenführung beider Analysen führt zu einem Environmental Life Cycle Costing (ELCC), das nicht-monetäre und monetäre Größen gleichermaßen analysiert und entsprechend den Ausführungen des vorherigen Abschnitts 2.1 als ökonomisch-ökologische Lebenszyklusbetrachtung verstanden werden soll (vgl. Abb. 7).

Ein ELCC kann wie LCA³³ und LCC³⁴ ebenfalls aus unterschiedlichen Sichtweisen der Akteure eines Lebenszyklus durchgeführt werden. Gemäß dem Verständnis einer ganzheitlichen Betrachtungsweise sollten zwar unabhängig von der Perspektive sämtliche Lebenszyklusphasen und damit verbundene Auswirkungen (Umwelt- und Kostengrößen) einbezogen werden. Allerdings können je nach Objekt des Interesses Schwerpunkte unterschiedlich gesetzt und z.B. einzelne Lebensphasen oder Untersuchungsgrößen mal stärker und mal weniger detailliert in die Untersuchung eingehen. Der Aspekt der unterschiedlichen Betrachtungsperspektiven wird in Abschnitt 2.4 und Kap.4 für Produkte der Photovoltaik nochmals aufgegriffen.

³² Die Trennung ist in der Realität nicht völlig scharf, da sich die gesellschaftlichen, politischen und ökonomischen Anforderungen zunehmend hin zu einer gemeinsamen Betrachtung wie in einem ELCC entwickelt haben.

³³ Zur Vermeidung einer missverständlichen Nomenklatur soll im Verlauf dieser Arbeit nicht der Begriff „Ökobilanz“ verwendet werden. Zwar benutzen die ISO Normen in der deutschen Version diese Übersetzung für „Life Cycle Assessment“ (vgl. DIN EN ISO 14040:2006; DIN EN ISO 14044:2006), doch weder die Betrachtung über den gesamten Lebenszyklus noch der klare Produktbezug gehen aus diesem Begriff hervor. Vielmehr werden im deutschen Sprachraum unter Ökobilanz auch andere Formen von Umweltbilanzen verstanden. So z.B. Standort-, Betriebs-, Prozess- oder Produktbilanz, vgl. z.B. HALLAY, H.; PFRIEM, R. (1992), S. 72 ff.; KREEB, M. (2001), S. 468; BURSCHEL, C.; LOSEN, D.; WIENDL, A. (2004), S. 382 f.; GÜNTHER, E. (1994), S. 269 ff.. Systemgrenze stellt hierbei z.B. das Unternehmen dar, weshalb bspw. auch der Begriff der Produktbilanz nicht einem Life Cycle Assessment entspricht. Ähnliches gilt auch für produktbezogene oder produktorientierte Ökobilanzen. Diese unterscheiden sich bspw. durch abweichende Systemgrenzen stark von einem LCA. Im Folgenden wird also die englische Bezeichnung Life Cycle Assessment (auch mit diesem Begriff wird der Produktbezug nicht klar hergestellt, konkreter wäre z.B. Product Life Cycle Assessment, worauf jedoch der Einfachheit wegen verzichtet werden soll) bzw. LCA verwendet.

³⁴ LCC kennzeichnet genau genommen das Conventional Life Cycle Costing, also eine reine Kostenbetrachtung über den Lebenszyklus. Environmental LCC bezieht darüber hinaus ökologische Aspekte ein, ohne diese zu monetarisieren (in monetäre Größen übertragen), wenn sie nicht internalisiert werden (sollen). Damit ist gemeint, dass die einem Produkt oder Unternehmen zuzurechnenden verursachten ökologischen Kosten, die bislang aber nicht durch dieses sondern die Gesellschaft getragen werden (externe Kosten), per Steuer, Zertifikat o.ä. auf das Unternehmen übertragen oder einem Produkt zugerechnet werden (Internalisierung externer Kosten). Der am weitesten gehende Ansatz des Societal LCC schließt sämtliche entstehenden Kosten aller Externalitäten (externer Effekte, externe Kosten) mit in die Lebenszykluskosten ein (vgl. LICHTENVORT, K. u.a. (2008), S. 4 ff.

2.2.2 Gemeinsame Bezeichnung als Lebenszyklusanalysen³⁵

Für die spätere Untersuchung (insbes. Kap.5 und 6) soll an dieser Stelle hinsichtlich der Lebenszyklusbetrachtungen bzw. –analysen die folgende Festlegung getroffen werden.

Eine genaue Trennschärfe zwischen LCA, LCC und ELCC wird bei der Untersuchung bestehender Lebenszyklusanalysen teilweise nur bedingt möglich sein, da die Übergänge sehr fließend verlaufen und der Grad der Einbeziehung von ökonomischen und ökologischen Kriterien stark variieren wird (vgl. auch Kap.7).

Allgemein soll immer dann von Lebenszyklusanalysen (LZA) gesprochen werden, wenn alle drei Instrumente gleichermaßen angesprochen sind (vgl. Abb. 8).

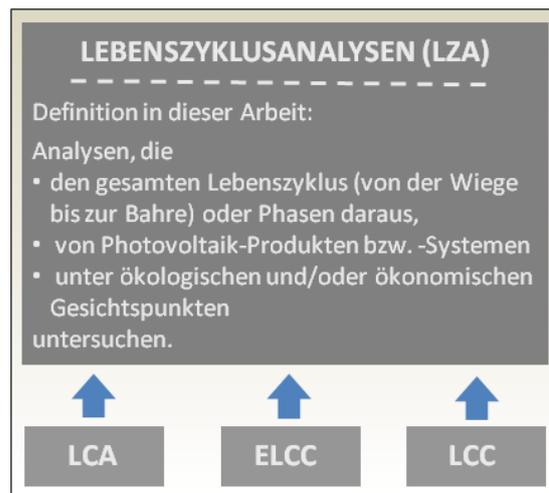


Abb. 8: Lebenszyklusanalysen in dieser Arbeit³⁶
(Eigene Darstellung)

Unabhängig von dem Schwerpunkt ökonomischer und/oder ökologischer Sichtweise wird so das Lebenszyklusdenken bei der Untersuchung von Produkten der Solarenergie hervorgehoben, was der gemeinsame Ansatz der drei Lebenszyklusanalysen ist.

2.2.3 Definition ELCC

Ausgehend von den bisherigen Ausführungen zu Ausgangspunkten des ELCC, der Einordnung von Lebenszyklusanalysen sowie den Definitionen von Life Cycle Assessment und Life Cycle Costing wird ELCC für das weitere Vorgehen wie folgt definiert:³⁷

Environmental Life Cycle Costing (ELCC) ist ein

- ökologisch & ökonomisch orientiertes Informations- und Entscheidungsinstrument
- zur lebenszyklusorientierten Bewertung von Produktsystemen.

Dabei sollen die Systemgrenzen und der gesamte Untersuchungsrahmen so gewählt werden, dass die Verfahrenslogiken von LCA und LCC für eine integrierte Bewertung eines Produktsystems zusammengeführt werden können. Einerseits werden so ökologische nicht-monetäre

³⁵ Der Begriff Lebenszyklusanalyse ist zum Teil unterschiedlich belegt (z.B. Produktlinienanalyse, i.d.R. ökologisch orientiert, vgl. hierzu z.B. MARHEINEKE, T. (2002), S. 9 ff.), soll in dieser Arbeit jedoch ganz allgemein als eine Analyse des Lebenszyklus von Produkten oder Systemen mit der Konkretisierung in Abb. 8 verstanden werden.

³⁶ Mit der Einschränkung auf Produkte der Photovoltaik wird bereits der Eingrenzung in Kap.3.1.3 vorgegriffen.

³⁷ Vgl. GÜNTHER, E. (2008), S. 258 u. S. 287; REBITZER, G.; NAKAMURA, S. (2008), S. 35 ff.; LICHTENVORT, K. u.a. (2008), S. 4 f.

sowie ökonomische monetäre Aspekte eines Produktsystems über den gesamten Lebenszyklus beurteilt. Insbesondere die Ermittlung von ökologischen und ökonomischen Treibern und Austauschbeziehungen (Trade offs) zwischen ökonomischen und ökologischen Größen, technischen Parametern und Komponenten (vgl. Drei-Dimensionalität, Kap.2.1.3), Lebenszyklusphasen sowie Akteuren soll damit erzielt werden. In Abb. 9 sind die beschriebenen Kernpunkte nochmals zusammengefasst.

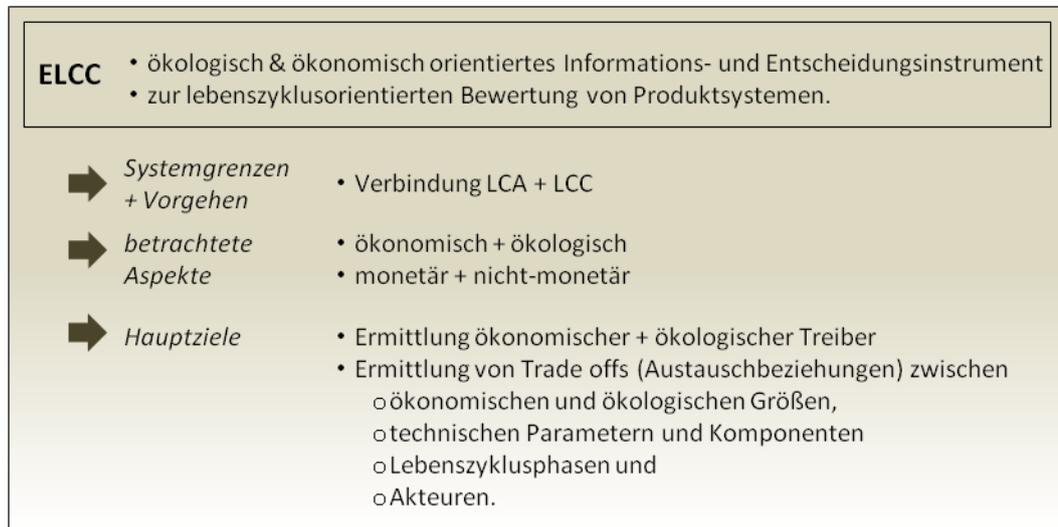


Abb. 9: Definition des ELCC für diese Arbeit

(Eigene Darstellung, angelehnt an GÜNTHER, E. (2008), S. 258 u. S. 287; LICHTENVORT, K. u.a. (2008), S. 4 f.; REBITZER, G.; NAKAMURA, S. (2008), S. 35 ff.)

Das in dieser Arbeit zugrunde gelegte Verständnis von ELCC weicht somit - entsprechend den bisherigen Ausführungen - von dem in HUNKELER; LICHTENVORT; REBITZER 2008 definierten ELCC insofern etwas ab, als dass die Autoren ELCC eher als ökonomisches Instrument mit Einbezug der ökonomisch relevanten ökologischen Kriterien betrachten. In der vorliegenden Arbeit soll diesbezüglich jedoch keine Priorisierung bestehen. Ökonomische und ökologische (unabhängig von ihrer ökonomischen Relevanz) Aspekte werden gleichwertig analysiert.

Die Hauptunterscheidung der Formen des Life Cycle Costings conventional, environmental und societal nach dem Grad des Einbezugs externer Kosten³⁸ in HUNKELER; LICHTENVORT; REBITZER 2008 soll nicht Kernelement des Verständnisses eines ELCC in dieser Arbeit sein, da dieser überwiegend kostenbezogene Ansatz die LCA-Ergebnisse nicht ausreichend in den Mittelpunkt neben die LCC-Ergebnisse stellen würde. Damit würde überwiegend nur eine der drei Säulen der Nachhaltigkeit berücksichtigt.³⁹ In dieser Arbeit sollen jedoch Ökonomie und Ökologie (sowie Technologie), wie bereits ausgeführt, gleichwertig nebeneinander stehen und den gemeinsamen Untersuchungsrahmen angeben.

³⁸ Vgl. LICHTENVORT, K. u.a. (2008), S. 5.

³⁹ Vgl. REBITZER, G.; NAKAMURA, S. (2008), S. 35 und 40.

2.2.4 Ziele, Anwendungsbereiche und Ansätze der Lebenszyklusanalysen

2.2.4.1 Ziele und Anwendungsbereiche

Anhand der Zielstellungen und Anwendungsbereiche von LCA, LCC und ELCC können ebenfalls die wichtigsten Gemeinsamkeiten und Unterschiede der drei Lebenszyklusbetrachtungen veranschaulicht werden, die ebenfalls in die Definition des ELCC in dieser Arbeit einfließen. In Tab. 2 sind die wichtigsten Ziele und Anwendungen dargestellt.

Gemeinsames Merkmal und die grundlegende Zielstellung aller drei LZA sind Ganzheitlichkeit und das Ziel der Identifizierung von Austauschbeziehungen und Treibern zwischen Systemgrößen und Elementen (z.B. Lebenszyklusphasen).

Auf eine tiefere Untersuchung oder ein Literature Review zur Theorie der Verfahren ELCC, LCC, LCA wird an dieser Stelle verzichtet, da die theoretischen Feinheiten des ELCC nicht im Vordergrund stehen sollen.⁴⁰ Vielmehr sollen die Verbindung ökologischer und ökonomischer Lebenszyklusanalysen, Vor- und eventuelle Nachteile untersucht und wichtigste Erkenntnisse daraus für die Anwendung auf die Solarenergie (Kap.4) gewonnen werden.

⁴⁰ Vgl. hierzu z.B. LICHTENVORT, K. u.a. (2008), S. 1 ff.; HÖHNE, C. (2009), S. 18 ff.

Tab. 2: Beispiele für Ziele und Anwendungsbereiche von LCA, LCC und ELCC

(Quelle: Eigene Zusammenstellung in Anlehnung an GUINÉE, J.B. (2002), S. 6; REBITZER, G.; NAKAMURA, S. (2008), S. 36; BACK-HOCK, A. (1992), S. 704; GÜNTHER, T.; KRIEGBAUM, C. (1999), S. 234)

LCA ⁴¹ <i>ökologisch</i>	ELCC ⁴² <i>ökonomisch+ökologisch</i>	LCC ⁴³ <i>ökonomisch</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Vergleich von mehreren Produktalternativen über den Lebenszyklus hinsichtlich ökologischer Auswirkungen • Ermittlung von Quellen und Zusammenhängen ökologischer Auswirkungen innerhalb des Lebenszyklus eines Produktes • Bewertung und Beurteilung von ökologischen Verbesserungsvarianten für ein bestimmtes Produkt • Analyse des Umweltprofils von Produkten • Marketing • Dokumentation, Monitoring • strategische Planung • politische Entscheidungsprozesse 	<ul style="list-style-type: none"> • Vergleich der Lebenszykluskosten von Alternativen • gemeinsame Betrachtung der Kosten in Kombination mit ökologischem Profil über den Lebenszyklus • Ermittlung von direkten und indirekten (versteckten) Kostentreibern sowie ökologischen Treibergrößen • Identifikation der wichtigsten Hebel zur Beeinflussung von ökonomischen und ökologischen Kenngrößen • Dokumentation von Verbesserungen und Entwicklungen (Reporting) • Folgeabschätzung von technologischen Entwicklungen innerhalb eines Lebenszyklus oder von Produktinnovationen • Identifikation von Win-Win-Situationen und Trade offs in Produktlebenszyklen in Kombination von conventional LCC, LCA und societal LCC (drei Säulen der Nachhaltigkeit) 	<ul style="list-style-type: none"> • Optimierung der Gesamtkosten eines Systems über den Lebenszyklus • dabei Einbezug von Folgekosten, die mit Anfangskosten verbunden sind • Untersuchung von Kostensenkungs- und Erlössteigerungspotentialen • Identifikation von Treibern in Kostenstruktur und Lebensphasen • Ermittlung wichtigster ökonomischer Treiber • Berücksichtigung von Austauschbeziehungen (Trade offs) über den Lebenszyklus • neben Kostenbetrachtungen aktive Gestaltung der Variablen Leistung und Zeit

2.2.4.2 Zeitpunkt der Durchführung und Ansätze

Für die Durchführung einer LZA können im Lebenszyklus eines Produktsystems unterschiedliche Zeitpunkte gewählt werden, aus denen sich Unterschiede in der Einordnung gemäß Zielstellung und in der Herangehensweise ergeben.

⁴¹ Vgl. insbes. GUINÉE, J.B. (2002), S. 6; DIN EN ISO 14040:2006, S. 16.

⁴² Vgl. insbes. REBITZER, G.; NAKAMURA, S. (2008), S. 36.

⁴³ Vgl. insbes. GÜNTHER, T.; KRIEGBAUM, C. (1999), S. 234; BACK-HOCK, A. (1992), S. 704.

Ganz allgemein kann eine LZA nach ihrem Einsatz eher für die **Planung** oder eher für die **Analyse** vorgesehen sein. Die Verwendung für die Planung findet in der Forschungs- und Entwicklungsphase statt, kann aber auch parallel zu einem bestehenden Lebenszyklus zur Neu-Planung (F&E neu) durchgeführt werden unter Nutzung von Analyseerkenntnissen der bestehenden Technologie. Eine Lebenszyklusbetrachtung dieser bestehenden Technologie während den Phasen nach der F&E kann als Analysis-LCA, -LCC oder -ELCC bezeichnet werden. Abb. 10 zeigt den dargestellten Zusammenhang aus Planung, Analyse und Lebenszyklusphase auf.

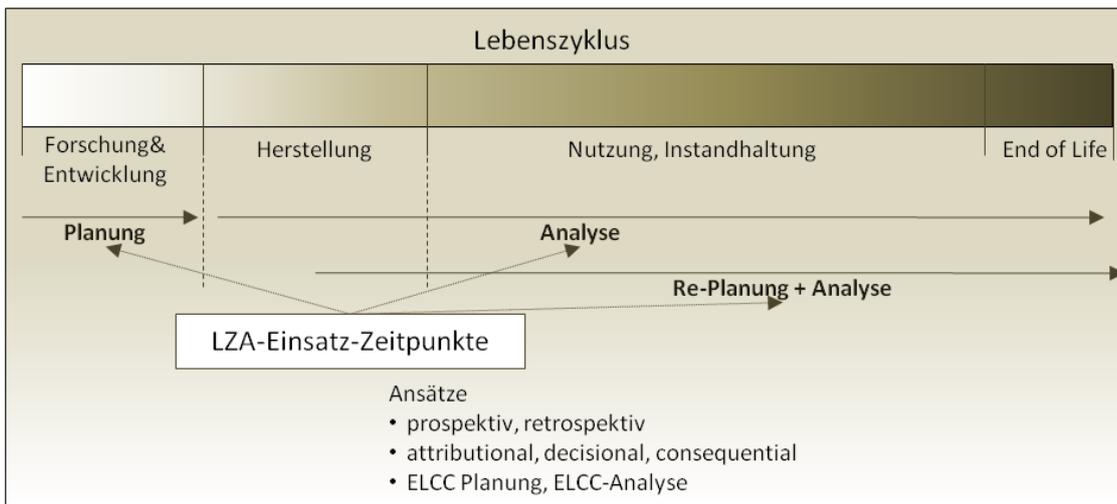


Abb. 10: LZA-Zeitpunkt Planung und Analyse

(Eigene Darstellung in Anlehnung an LICHTENVORT, K. u.a. (2008), S. 12)

Eine weitere Möglichkeit der Einteilung besteht nach dem Umfang der Zukunftsorientierung in:

- **retrospektiv** (rückblickend)
- kurzfristig **prospektiv** (kurzfristig bis mittelfristig zukunftsorientiert)
- langfristig **prospektiv**⁴⁴ (langfristige Zukunftsorientierung).

Je nach Zielstellung unterscheiden sich die zu sammelnden Daten und einzusetzende Verfahren innerhalb der LZA (z.B. Annahmen, Schätzverfahren, Szenarien).

Darüber hinaus können LZA nach ihrer Verwendung und Zielstellung als **attributional** (Attribut, den Lebenszyklus lediglich beschreibend), **decisional** (konkret entscheidungsbezogen) oder **consequential** (veränderungs-, auswirkungsbezogen bei Systemvariation) eingeteilt werden. In Tab. 3 werden die drei Ansätze näher charakterisiert. Die ursprüngliche Logik dieser Einteilung ist aus dem LCA⁴⁵ übernommen und soll für die Einordnung des ELCC allgemein auf alle drei Lebenszyklusanalysen übertragen werden.

Wie in Tab. 3 ersichtlich, können die Ansätze (attributional, decisional und consequential), die Unterteilung nach Zukunftsorientierung (retrospektiv, prospektiv) sowie Analyse- und Planungs-LZA ebenfalls einander grob zugeordnet werden.

⁴⁴ Vgl. ALSEMA, E. u.a. (2009), S. 4; LICHTENVORT, K. u.a. (2008), S. 12.

⁴⁵ Vgl. z.B. EKVALL, T. (2002); FRISCHKNECHT, R.; STUCKI, M. (2009); REBITZER, G. u.a. (2004), S. 705; EKVALL, T.; WEIDEMA, B.P. (2004), S. 161-171.

Spricht ein ELCC in dieser Logik nicht nur, aber insbesondere die Planung an (Lebenszyklus-Planung, zukunftsorientiert), folgt es damit einem consequential oder decisional Approach^{46,47}. Es kann jedoch auch für die tieferegehende Analyse bestehender Lebenszyklen eingesetzt werden (Reporting, Lernen, Prozessverbesserung), was eher dem attributional Approach entsprechen würde.

Tab. 3: Ansätze der Lebenszyklusanalysen nach Zielsetzung und Verwendung⁴⁸

(Quelle: In Anlehnung an ALSEMA, E. u.a. (2009a), S. 4 f.; EKVALL, T. (2002); EKVALL, T.; WEIDEMA, B.P. (2004), S. 161-171; FRISCHKNECHT, R.; STUCKI, M. (2009); LICHTENVORT, K. u.a. (2008), S. 12; REBITZER, G. u.a. (2004), S. 705)

Approach	Attributional beschreibend retrospektiv <i>Analyse</i>	Decisional entscheidungsvorbereitend kurzfristig prospektiv <i>eher Planung</i>	Consequential veränderungsorientiert langfristig prospektiv <i>Planung</i>
Charakterisierung	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung der ökologischen und ökonomischen Eigenschaften eines Produktsystems, seines Lebenszyklus und seiner Subsysteme • Bewertungen auf Basis von Durchschnittswerten einer bestimmten Periode 	<ul style="list-style-type: none"> • Technologiebewertung (vorhanden oder geplant) zu finanzwirtschaftlichen, ökologischen und rechtlichen Anforderungen • Vergleich von Alternativen • Erstellung mit dem Ziel einer Entscheidungsfindung 	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibung der Effekte von Veränderungen innerhalb des Lebenszyklus bzw. an Eigenschaften eines Produktsystems • Identifikation von Technologien zur Nachfragebefriedigung in der Zukunft unter gegebenen Rahmenbedingungen
Verwendung	<ul style="list-style-type: none"> • Berichtswesen, Produktbeschreibung, Deklarationen • z.B. Entscheidungen im kleineren Rahmen; Konsum- oder Beschaffungsentscheidungen 	<ul style="list-style-type: none"> • kurz- bis mittelfristige Entscheidungen mittlerem Umfangs, z.B. strategische Entscheidungen größerer Unternehmen hinsichtlich Produktportfolio, Verfahrenswahl etc. 	<ul style="list-style-type: none"> • langfristige Entscheidungen großem Umfangs, z.B. internationale Politik, Abkommen (bspw. gesamtes Energiesystem, Energiemix)

Die Unterscheidung der Ansätze in Tab. 3 wirkt sich auch auf die Anforderungen an die Durchführung einer LZA aus. So sollte sich z.B. die Modellierung des Produktsystems daran

⁴⁶ Vgl. REBITZER, G.; NAKAMURA, S. (2008), S. 36.

⁴⁷ Eine genaue Trennung ist auch hier aufgrund der Vermischung von Merkmalen i.d.R. nicht möglich.

⁴⁸ Die in Tab. 3 vorgenommene Zuordnung der Unterteilung nach Zeitpunkt der Durchführung (retrospektiv, kurz-, mittel- und langfristig prospektiv) zu den Approaches (attributional, decisional, consequential) muss nicht trennscharf so erfolgen. Eine LZA kann Veränderungen im Produktsystem untersuchen (consequential) und damit mittelfristige Entscheidungen wie bspw. die Wahl des Produktionsprogramms vorbereiten.

orientieren, ob es Ziel der Analyse ist, das System detailliert zu beschreiben (attributorial) oder ob Auswirkungen durch Veränderungen dieses Systems (consequential) untersucht werden sollen (z.B. bei der Wahl der funktionalen Einheit).⁴⁹

2.3 Schritte zur Durchführung eines ELCC

Nachdem das Verständnis eines ELCC für diese Arbeit definiert ist, sollen nun die wichtigsten Schritte für eine allgemeine Durchführung ermittelt werden. Hierfür wird auf die verfügbare Standardisierung und die Fachliteratur zu LCA, LCC und ELCC zurückgegriffen. Es zeigt sich, dass die drei LZA in sehr ähnlicher Form vorgehen. Die in diesem Abschnitt ermittelte allgemeine Schrittfolge wird dann im weiteren Verlauf dieser Arbeit für die Photovoltaik in Kap.4 angewendet und tiefergehend definiert.

2.3.1 Stand der Normierung

Der aktuelle Stand der Standardisierung liefert nur zum Teil Anhaltspunkte für eine einheitliche Durchführung eines ELCC. Der Stand der Normierung ist in Tab. 4 aufgezeigt. Vor allem sind die ISO Normen 14040 und 14044⁵⁰ für LCA und ELCC grundlegend, während für das konventionelle LCC kein einheitlicher Standard existiert. Für die Photovoltaik können Anforderungen an ein LCA, und damit auch zu einem Großteil für ein ELCC, den aktuellen Richtlinien einer Expertengruppe für Life Cycle Assessment von PV-Produkten und der INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA)⁵¹ zum methodischen Vorgehen entnommen werden.

Tab. 4: Stand der Normierung LCA, LCC und ELCC

(Eigene Erstellung unter Verwendung von LICHTENVORT, K. u.a. (2008), S. 6)

LCA	ELCC	LCC
<ul style="list-style-type: none"> • ISO 14044, 14040 • SETAC Empfehlungen • speziell für Photovoltaik methodische Richtlinien in ALSEMA, E. u.a. (2009a) 	<ul style="list-style-type: none"> • kein Standard vorhanden • große Teile angelehnt an LCA ISO 14044, 14040, SETAC • Zusammenstellung wichtigster Beiträge zum vergleichsweise neuen Instrument in HUNKELER, D.J.; LICHTENVORT, K.; REBITZER, G. (2008) 	<ul style="list-style-type: none"> • verschiedene branchenbezogene Standards ISO, IEC, SAE, AS/NZS, VDI etc. • SETAC • jedoch kein einheitlicher Standard wie für LCA

2.3.2 Schrittfolgen für Lebenszyklusanalysen

Die drei Lebenszyklusanalysen LCC, LCA und ELCC werden nach mehr oder weniger einheitlichen Schrittfolgen durchgeführt. Zur Ermittlung eines Vorgehens bei der Durchführung eines ELCC für die Solarenergie werden zunächst die wichtigsten Schritte der drei LZA einander grob zugeordnet, um Gemeinsamkeiten und Unterschiede zu identifizieren. Im Fol-

⁴⁹ Vgl. REBITZER, G. u.a. (2004), S. 705.

⁵⁰ DIN EN ISO 14040:2006; DIN EN ISO 14044:2006.

⁵¹ ALSEMA, E. u.a. (2009), Konkretisierung in Kap.4.

genden soll dann eine Schrittfolge für ein ELCC im Rahmen dieser Arbeit konkretisiert werden. Um eine doppelte Betrachtung zu vermeiden, wird diese Konkretisierung der einzelnen Schritte jedoch direkt für die Photovoltaik in Kap.4.3 vorgenommen. Neu eingeführte Begriffe wie z.B. Wirkungsabschätzung werden dementsprechend im späteren Verlauf näher erläutert.

In Tab. 5 sind die wichtigsten Schritte von LCA, LCC und ELCC, wie sie in Standards und Fachliteratur vorgeschlagen werden, einander grob zugeordnet.

Tab. 5: Schritte zur Durchführung von LCA, LCC und ELCC

(Eigene Zusammenstellung unter Verwendung von DIN EN ISO 14040:2006, S. 15 ff.; LICHTENVORT, K. u.a. (2008), S. 12 ff.; FABRYCKY, W.J.; BLANCHARD, B.S. (1991), S. 122 ff.; GÜNTHER, T.; KRIEGBAUM, C. (1999), S. 257 ff.; GÜNTHER, E. (2008), S. 258 f.)

Nr.	LCA ⁵²	ELCC ⁵³	LCC ⁵⁴
1	<ul style="list-style-type: none"> • Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen 	<ul style="list-style-type: none"> • Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen 	<ul style="list-style-type: none"> • Problemidentifikation und Zielfestlegung • Identifikation möglicher Alternativen
2	<ul style="list-style-type: none"> • Aufstellen der Sachbilanz 	<ul style="list-style-type: none"> • Informationsbeschaffung 	<ul style="list-style-type: none"> • Erfassung der notwendigen Informationen • Kosten- und Erlösschätzungen
3	<ul style="list-style-type: none"> • Durchführung der Wirkungsabschätzung 	<ul style="list-style-type: none"> • Interpretation und Identifizierung sog. „hot spots“ 	<ul style="list-style-type: none"> • Erstellung von Kostenprofilen • ökonomische Ergebnisuntersuchung
4	<ul style="list-style-type: none"> • Auswertung 	<ul style="list-style-type: none"> • Sensitivitätsanalyse • Diskussion 	<ul style="list-style-type: none"> • Sensitivitäts- und Risikoanalyse • Entscheidungsfindung bzw. Handlungsempfehlungen

Der Vergleich der Vorgehensweisen zeigt, dass zunächst in einem **ersten Schritt** der Rahmen einer LZA festgelegt werden muss. Dies bedeutet die genaue Beschreibung der Problemstellung, des Ziels der Untersuchung und die Festlegung von Systemgrenzen, also des Untersuchungsobjektes (Produktsystem und mögliche Alternativen), einer Bezugsgröße (funktionale Einheit) und zugehöriger Prozessschritte (z.B. bei der Herstellung) sowie Lebensphasen (z.B. Herstellung, Nutzung und End of Life).

⁵² Vgl. DIN EN ISO 14040:2006, S. 15 ff.

⁵³ Vgl. LICHTENVORT, K. u.a. (2008), S. 12 ff.

⁵⁴ Vgl. GÜNTHER, E. (2008), S. 258 f.; GÜNTHER, T.; KRIEGBAUM, C. (1999), S. 257 ff.; FABRYCKY, W.J.; BLANCHARD, B.S. (1991), S. 122 ff.

Sind Rahmen und Zielstellung festgelegt, können im **nächsten Schritt** die erforderlichen Informationen beschafft werden. In einem LCA wird hierfür eine Sachbilanz aufgestellt, die die mit dem Produktsystem verbundenen Stoff- und Energieflüsse erfasst. In einem LCC liefern Verfahren der Kosten- und Erlösschätzung⁵⁵ die erforderlichen ökonomischen Informationen.

Die so ermittelten Daten können nun in einem **dritten Schritt** näher analysiert werden. Für den ökologischen Teil wird hierfür eine Wirkungsabschätzung vorgenommen, d.h. eine Beurteilung potentieller Umweltwirkungen des Produktsystems über den Lebenszyklus. Die Ergebnisse der Kosten- und Erlösschätzungen können mit Hilfe verschiedenster ökonomischer Verfahren⁵⁶ untersucht und bewertet werden. In einer gemeinsamen Betrachtung der ermittelten ökonomischen und ökologischen Auswirkungen in einem ELCC können nun sog. Hot Spots, also besonders relevante Parameter (ökonomisch, ökologisch und technisch) identifiziert und interpretiert werden.

In einem **vierten und letzten Schritt** quantifizieren Sensitivitäts- und Risikoanalysen die identifizierten Hot Spots, wichtigste ökonomische und ökologische Treiber werden näher ausgewertet und Handlungsempfehlungen abgeleitet. Im Falle eines Alternativenvergleiches kann nun eine Entscheidung getroffen werden.⁵⁷

2.4 Akteure, Perspektiven und unterschiedliche Schwerpunktsetzungen⁵⁸

Für den Aufbau einer LZA ist gemäß dem ersten Schritt (Zieldefinition und Untersuchungsrahmen) der im vorherigen Abschnitt ermittelten Schrittfolge entscheidend, **wer** eine Analyse durchführt und welches Ziel damit verfolgt wird.

Während des Lebenszyklus eines Produktsystems agieren mehrere **Akteure** in den einzelnen Phasen, für die sich aus ihren Rollen unterschiedliche Beiträge zum Gesamtlebenszyklus (z.B. Umweltauswirkungen) ergeben. Im Beispiel in Abb. 11 sind dies z.B. die Unternehmen, die Rohstoffe gewinnen, die Zulieferer des Herstellers, der Hersteller selbst, der Nutzer und Akteure in der End of Life Phase, wie bspw. Entsorger.

Für diese Akteure ergeben sich mit ihren Beiträgen unterschiedliche Interessen, wenn eine Analyse des Lebenszyklus durchgeführt wird. So ist es für einen Hersteller häufig nicht relevant, welche Kosten oder Umweltauswirkungen dem Nutzer seines Produktes während der Nutzung entstehen, da dies keinen Einfluss auf seine Prozesse haben wird. Ebenso kann ein Hersteller teilweise gar nicht bewerten, unter welchen Bedingungen die Nutzungs- und Endphase ablaufen werden, da die Parameter von lokalen Gegebenheiten abhängen (für die Photovoltaik ist dies z.B. die Sonneneinstrahlung, die unabhängig von allen vorgelagerten Aktivitäten die mögliche Stromerzeugung und damit die ökologische und ökonomische Be-

⁵⁵ Vgl. hierzu eine Auswahl sowie die Verweise auf die Fachliteratur in Kap.4.

⁵⁶ Vgl. hierzu eine Auswahl sowie die Verweise auf die Fachliteratur in Kap.4.

⁵⁷ Die Zuordnung der Schrittfolgen der LZA in Tab. 5 kann nur als *grob* verstanden werden, da die Grenzen zwischen Schritten z.T. fließend sind und jeweils die vier Schritte der einzelnen LZA nicht eindeutig parallel einander zuordenbar sind. So ist z.B. die Interpretation von Hot Spots nicht vor, sondern in Kombination mit einer Sensitivitätsanalyse durchzuführen, bzw. teilw. können diese auch erst nach einer solchen Analyse identifiziert werden (vgl. LICHTENVORT, K. u.a. (2008), S. 15). Ebenso werden z.B. die wichtigsten ökologischen Treibergrößen in einem LCA erst in der Auswertung ermittelt (vgl. DIN EN ISO 14044:2006, S. 45 ff.), sind jedoch im Vergleich in Tab. 5 bereits Basis für die Hot Spot Betrachtung, also einem Schritt davor. Im Vordergrund stehen sollte für diesen Vergleich der sehr ähnliche Ablauf aller drei Analysen, weshalb diese Vereinfachung vorgenommen wurde.

⁵⁸ Vgl. im Folgenden LICHTENVORT, K. u.a. (2008), S. 9 ff.

wertung stark beeinflusst, vgl. Kap.3.5.6). Für den Hersteller wäre also eine Beurteilung bis zum Werkstor (cradle to gate, vgl. Abschnitt 2.1.2) ausreichend.

Im Mittelpunkt des ELCC mit seinem ganzheitlichen Anspruch steht jedoch das *Produkt* und *alle* mit seinem Lebenszyklus verbundenen Größen, gleich durch welchen Akteur verursacht oder wo und wann Auswirkungen auftreten. Einen Unterschied macht in dieser Methodik jedoch der Grad der Detaillierung von den Einzelaktivitäten.

So können bei der Durchführung aus Herstellersicht die einzelnen Prozessschritte bei der Herstellung eines Produktes und damit verbundene Auswirkungen (ökonomisch+ökologisch) sehr tief gehend beleuchtet werden und gleichzeitig die unterschiedlichen Charakteristika während der Nutzungsphase, die ebenfalls in einzelne Elemente unterteilt werden können, nur grob einbezogen werden. Für alle der Herstellung nachfolgenden Prozesse (downstream Aktivitäten) sind dann aggregierte Daten bzw. Annahmen absolut ausreichend. Gleiches kann für alle vorgelagerten Aktivitäten von Zulieferern gelten. Die nicht zu detaillierenden Aktivitäten/Phasen werden also als „Black Box“ (bzw. in Abb. 11 als *grey box*) angesehen.

Für die Ersteller eines ELCC ergeben sich demnach mit der **Perspektive**, z.B. Hersteller-Perspektive vs. Kunden- oder Nutzer-Perspektive, auch unterschiedliche **Schwerpunktsetzungen**, einerseits in der Detaillierung von Phasen und Prozessen, andererseits in dem Einbezug von einzelnen ökonomischen, ökologischen und technischen Größen. Diese Schwerpunktsetzungen und die Perspektive sollten bei der Gestaltung von Systemgrenzen und dem gesamten Untersuchungsrahmen definiert und berücksichtigt werden.

Abb. 11 stellt den Sachverhalt zu Perspektiven und Schwerpunktsetzungen nochmals bildlich an einem fiktiven Beispiel von Hersteller- und Nutzer-Perspektive dar. Die Erkenntnis sollte sein, dass in der jeweiligen Perspektive die einzelnen Prozesse und zugehörige Eingangs- und Ausgangsgrößen detailliert betrachtet werden, während die vor- und nachgelagerten Aktivitäten als Black Box eingehen.

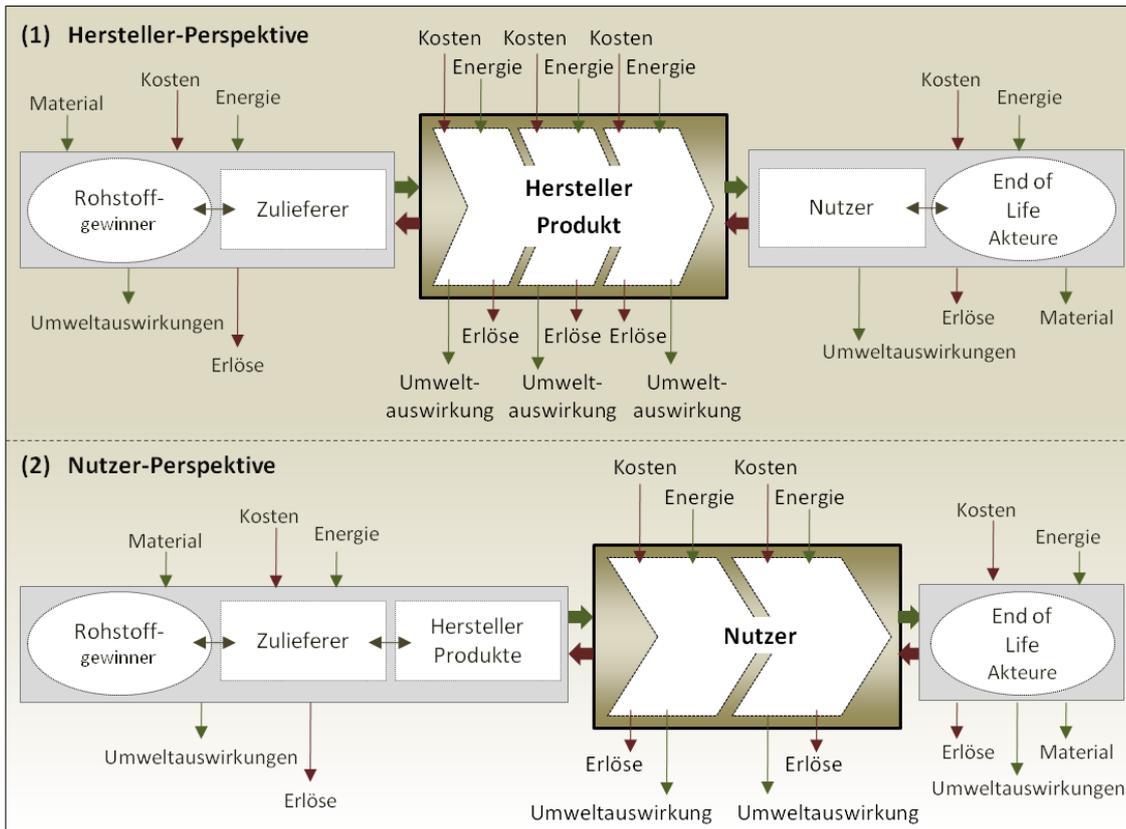


Abb. 11: Perspektiven, Akteure und Schwerpunktsetzungen in LZA (Beispiele)

(Eigene Darstellung in Anlehnung an BOGUSKI, T.K. u.a. (1996), S. 2.5; LICHTENVORT, K. u.a. (2008), S. 11)

Im idealen Fall eines ELCC sollten natürlich alle Phasen, Prozesse, alle Ein- und Ausgangsgrößen und alle möglichen Perspektiven bis ins Detail einbezogen werden. Der häufig hohe Aufwand zur Datenermittlung sowie die Nicht-Verfügbarkeit von Informationen (z.B. zukünftige Sonneneinstrahlung am Standort einer Photovoltaikanlage bereits bei der Herstellung) erfordern demzufolge nicht selten eine Selektion bzw. Konzentration auf die wesentlichen Punkte um die gesetzten Ziele der jeweiligen LZA zu erreichen.

Mit einer Hinführung über die drei Ausgangspunkte Nachhaltigkeit, Lebenszyklusorientierung und Drei-Dimensionalität, der allgemeinen Definition des Instrumentes ELCC und der Kennzeichnung der wichtigsten Schritte und Perspektiven sind die wesentlichen theoretischen Grundlagen für die instrumentalen Anforderungen an ein ELCC für Solarprodukte gelegt.

Das nun folgende Kapitel soll die technologisch-theoretischen Grundlagen für ein ELCC für Produkte der Solarenergie erörtern, bevor schließlich die bisherigen Informationen zu einem konkreten Anforderungsschema zusammengeführt werden können.

3 Untersuchungsgegenstand Technologie Photovoltaik

Die in Kap.2 beschriebene allgemeine Schrittfolge für die Durchführung eines ELCC erfordert eine eindeutige Charakterisierung des Untersuchungsgegenstandes für die weitere Analyse. In diesem ersten Schritt muss unter anderem definiert werden, welche Funktion das Objekt der Analyse ausübt und welche technischen Spezifikationen es hinreichend genau beschreiben, um eine umfassende Untersuchung darüber zu erstellen. Des Weiteren muss festgelegt werden, welche Komponenten in die Analyse eingeschlossen werden und inwieweit es Wechselwirkungen mit anderen Systemelementen oder Elementen außerhalb der Systemgrenze gibt. Hierfür ist eine Grundkenntnis des zu untersuchenden Systems erforderlich.

Das nun folgende Kap.3 soll die wichtigsten Grundlagen zur Charakterisierung des Untersuchungsgegenstandes „Produkte der Sonnenenergie, insbesondere der Photovoltaik“ liefern.

Neben den einzelnen Technologiezweigen, die existieren, um die Sonnenenergie für die menschlichen Bedürfnisse zu nutzen, sollen auch die wichtigsten technischen Eigenschaften ermittelt werden. Eine Übersicht der Anwendungsmöglichkeiten und Komponenten für die Installation und den Betrieb von Solaranlagen soll das Bild vervollständigen. Die theoretischen Grundlagen aus diesem Abschnitt (Technologie) und Kap.2 (Instrument ELCC) bilden dann die Basis für die Erstellung eines Grundplanes für die Durchführung eines ELCC für Produkte der Solarindustrie, insbesondere der Photovoltaik in Kap.4.

3.1 Technologien zur Nutzung der Sonnenenergie

Wie bereits im Vorwort dieser Arbeit erwähnt, stellt die Sonne eine wichtige Existenzgrundlage für die Menschen dar. Die Energie, die sie uns tagtäglich liefert, ist Treibstoff und Katalysator zugleich für den überwiegenden Teil natürlicher Prozesse auf der Welt. Erwähnt seien z.B. Klima, der Wasserkreislauf und Pflanzenwachstum.

Die Energiezufuhr durch die Sonne ist für das menschliche Verständnis als unerschöpflich anzusehen.⁵⁹ Sie steht im Prinzip jederzeit (global gesehen)⁶⁰, wenn auch mit Unterschieden in der Intensität⁶¹ zur Verfügung. Auch die gelieferte Menge an Energie ist enorm. So könnte bereits mit der Sonnenenergie, die innerhalb einer Stunde auf die Erde trifft, der gesamte Jahresbedarf der Menschheit gedeckt werden.⁶²

Doch wenn dieses groß dimensionierte „Kraftwerk“ *Sonne* sozusagen vor der Haustür steht, warum wird der größte Teil des ständig wachsenden Energiebedarfs aus fossilen Brennstoffen gewonnen? Trotz des Wissens, dass die Vorräte davon endlich sind und ihre Verwertung mit zahlreichen Umweltauswirkungen verbunden ist?

Es bedarf einer Technologie, die die Nutzung der Sonnenenergie in großem Umfang ermöglicht.

⁵⁹ Die Zeit bis zum Ende der Wasserstoff Kernfusion im Zentrum der Sonne beträgt ca. 4,5 bis 5 Milliarden Jahre, vgl. STEIN, M. (2002).

⁶⁰ Bei Berücksichtigung von unterschiedlichen Tages- und Nachtzeiten auf den Erdteilen.

⁶¹ Die Intensität schwankt einerseits in Abhängigkeit des Ortes auf der Erde und andererseits bei terrestrischer Installation in Abhängigkeit der gerade herrschenden klimatischen Bedingungen (vgl. die Ausführungen zur Sonneneinstrahlung in Kap.3.5.6).

⁶² Vgl. FARDO, S.W.; PATRICK, D.R. (2008), S. 120.

Die von der Sonne zur Erde transportierte Energie kann vereinfacht in die zwei Bestandteile *Licht* und *Wärme* unterteilt werden. Zum aktuellen Entwicklungsstand existieren grundsätzlich zwei verschiedene Arten der Nutzung dieser Sonnenenergie: Solar Photovoltaic Power (SPV) und Solar Thermal Power (STP) (vgl. Abb. 12). Beide Technologiezweige nutzen unterschiedliche physikalische Prinzipien aus, um die Energie, die in den sog. Sonnenstrahlen enthalten ist, in eine für den Menschen nutzbare Form umzuwandeln.

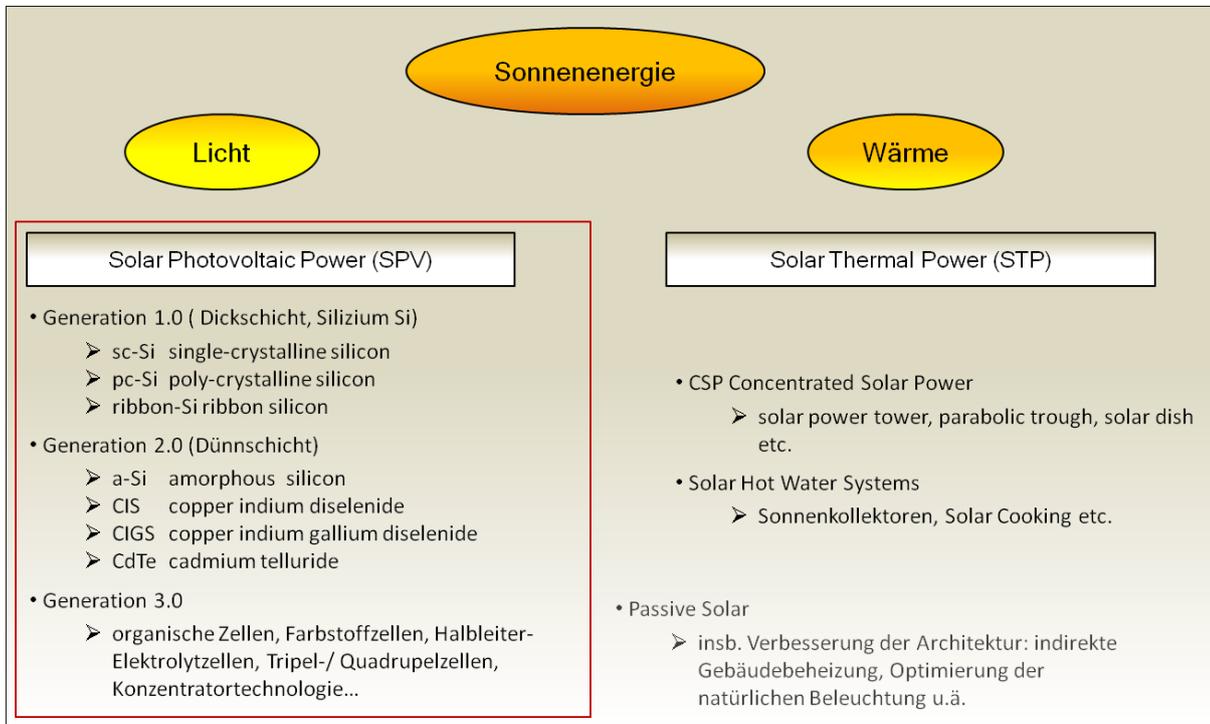


Abb. 12: Technologien zur Nutzung der Solarenergie

(Eigene Darstellung, in Anlehnung an *Solar Thermal Power Generation Technology*, (2005); *SPV 2006 Solar Photovoltaic Report*, (2006), S. 1-128; *NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (NREL) (USA) (2009b)*)

3.1.1 Solarthermie (Solar Thermal Power, STP)⁶³

Die Solarthermie nutzt den Bestandteil *Wärme* der Sonnenenergie. Dies kann grundsätzlich auf zwei Arten geschehen, die sich in ihrem Ausgangsprodukt unterscheiden: (1) Concentrated Solar Power und (2) Solar Hot Water Systems.

Bei **Concentrated (-ing) Solar Power (CSP)**⁶⁴ wird die Wärmeenergie so konzentriert (Sonnenstrahlen werden mittels Spiegeln/Linsen auf einen bestimmten Punkt fokussiert), so dass sich damit ein Medium derart erhitzen/umwandeln⁶⁵ lässt, dass ein herkömmlicher Kraftwerksprozess⁶⁶, wie er bspw. in einem Kohlekraftwerk abläuft, betrieben werden kann. Die Sonnenenergie ersetzt im Prinzip den fossilen Kraftstoff. Die Konzentration kann mittels

⁶³ Vgl. im Folgenden *Solar Thermal Power Generation Technology*, (2005).

⁶⁴ Konzentratortechnologien der Photovoltaik gehören nicht zu der Gruppe der Concentrating Solar Power (CSP), wie fälschlicherweise aufgrund der allgemeinen Bezeichnung „Solar“ zu vermuten wäre. Vgl. z.B. FlatconTM, SolFocusTM, PEHARZ, G.; DIMROTH, F. (2005), S. 627-634; MCCONNELL, R. (2005), S. 35-39; HAKENJOS, A. (2008), S. 1-53; REICH-WEISER, C.; DORNFELD, D.; HORNE, S. (2008); DER MINASSIANS, A. u.a. (2006).

⁶⁵ Teilweise werden chemische Prozesse mittels Hitze in Gang gesetzt.

⁶⁶ Gemeint ist in diesem Zusammenhang ein Kraftwerksprozess mit Dampferzeuger, Turbine und Generator (vereinfacht), vgl. z.B. DITTMANN, A. u.a. (1998), S. 257 ff.

unterschiedlicher Konstruktionen erfolgen, wie bspw. Parabolrinnen oder Solartürmen.⁶⁷ Das Endprodukt der CSP ist Elektroenergie.

Bei der zweiten Form der Solarthermie wird die Wärme der Sonne genutzt, um Warmwasser zu erzeugen (**Solar Hot Water Systems**). Dieses kann zum Heizen oder für den herkömmlichen Heizbedarf genutzt werden. Sonnenkollektoren sind die am meisten verbreitete Ausführung dieser Form der Solarthermie. Das Ausgangsprodukt ist hierbei Warmwasser.

Eine Zwischenform zwischen SPV und STP ist die **Passive Solar**. Unter Passiver Solarenergie können in diesem Zusammenhang vor allem Architekturmaßnahmen verstanden werden, die versuchen, die vorhandene Sonnenenergie möglichst optimal indirekt zu nutzen. So können durch intelligente Werkstoffe und Designs Heizaufwand und künstliche Beleuchtung minimiert werden, wenn die zur Verfügung stehende Wärme und das Licht (z.B. Lichteinfall zu bestimmten Tageszeiten) in die Planung einbezogen werden. Passive Solar nutzt also sowohl Licht als auch Wärme, gehört jedoch nicht zu STP oder SPV, da sie keine eigene Technologie im Sinne der beiden anderen darstellt.

3.1.2 Photovoltaik (Solar Photovoltaic Power, SPV)⁶⁸

Die Photovoltaik (PV) funktioniert nach einem völlig anderen Prinzip: dem Photoeffekt. Dieser beschreibt die Eigenschaft bestimmter Stoffe, Sonnenlicht direkt in Strom umwandeln zu können.⁶⁹ Auf diese Art nutzt die PV also den Bestandteil *Licht* der Sonnenenergie.

Für die hierfür eingesetzten Solarzellen existiert inzwischen eine Reihe verschiedenster Technologien auf Basis von unterschiedlichen Materialien und mit entsprechenden Wirkungsgraden (vgl. Tab. 7).

Das Endprodukt der Photovoltaik ist wie bei der CSP Elektroenergie.

Nach einer technologischen Eingrenzung wird eine tiefergehende Charakterisierung der Photovoltaik in den folgenden Abschnitten dieses Kapitels vorgenommen.

3.1.3 Eingrenzung

Für die weitere Untersuchung soll zunächst eingegrenzt werden, dass nur Technologien betrachtet werden sollen, die Elektroenergie erzeugen. Eine Mischung der unterschiedlichen Ausgangsprodukte Warmwasser und Elektroenergie wäre nicht zielführend, da durch den unterschiedlichen Endnutzen die Ergebnisse eines ELCC nicht vergleichbar wären und sich mögliche Anwendungen in ihren Funktionsprinzipien zu sehr unterscheiden.

Darüber hinaus wird CSP ebenfalls nicht in die folgenden Betrachtungen eingeschlossen, da durch das völlig andere Wirkprinzip und die damit verbundenen unterschiedlichen Verfahrensabläufe eine gemeinsame Bewertung nicht zielführend wäre.

⁶⁷ Für eine weiterführende Behandlung der CSP vgl. z.B. MASTERS, G.M. (2004), S. 183 ff.

⁶⁸ Vgl. im Folgenden SPV 2006 Solar Photovoltaic Report, (2006), S. 1-128.

⁶⁹ Für tiefergehende Betrachtungen zum Photoeffekt vgl. z.B. HÄBERLIN, H. (2007), S. 75 ff. Für die Belange dieser Arbeit ist es ausreichend festzustellen, dass aufgrund dieses Effektes die direkte Umwandlung von Sonnenlicht in Elektroenergie möglich ist.

Von den beschriebenen Technologien soll also nur noch die Photovoltaik und damit Technologien, die Sonnenlicht direkt in Elektroenergie, d.h. ohne zwischengeschaltete Generatoren, umwandeln, genauer beleuchtet werden.

Bevor die Photovoltaik jedoch konkreter beschrieben wird, soll ein kurzer Blick auf die historische Entwicklung dieser Technologie einen Einstieg in die Charakterisierung liefern.

3.2 Entwicklung der Photovoltaik

Ausgangspunkte für die Entwicklung der Solarzellen waren die Entdeckung des Photoeffektes durch BECUEREL⁷⁰ und die weiteren Arbeiten auf diesem Gebiet durch EINSTEIN⁷¹, der heute zwar vor allem bekannt für seine Relativitätstheorie ist, 1923 jedoch den Nobel-Preis für seine Arbeiten zum Photoelektrischen Effekt erhielt.⁷² Die Bedeutung dieses Effektes wurde also bereits in der damaligen Zeit als sehr hoch eingeschätzt.

Zur Geschichte der Photovoltaik

1839: Entdeckung des Photoeffektes von dem Halbleitermaterial Silizium durch E. Becquerel
 1923: Albert Einstein erhält den Nobel-Preis für seine Beschreibung des Photoeffektes
 1954: Single crystalline silicon solar cells (sc-Si) mit einem Wirkungsgrad von 6%
 1956: Erste Solarzelle aus Gallium Arsenide (GaAs)
 1958: NASA-Satellit „Vanguard“ wird mit sc-Si Solarzellen mit unter 1 kWp Leistung versorgt
 1962: sc-Si Solar Radio
 1972: Silizium-Solarzellen hergestellt aus poly-kristallinen Wafern (pc-Si).
 1976: Solarzellen aus amorphem Silizium (a-Si)
 1978: sc-Si Taschenrechner
 1979: a-Si Taschenrechner
 1981: 350 kWp- Kraftwerk Soleras/Hysolar zur Produktion von Wasserstoff in Riad, Saudi Arabien
 1983: 6400 kWp Solarkraftwerk Carissa Plains in California, USA
 1984: Erstes Rennen von Solarmobilen (Tour de Sol) in der Schweiz
 1986: Erstes Kraftwerk mit a-Si Technologie, 75 kWp in Birmingham, Alabama
 1988: Wirkungsgrade von mehr als 30% werden unter Laborbedingungen erreicht (GaAs / sc-Si)
 1989: 219 netzgekoppelte Solaranlagen in den USA haben eine Anschlussleistung von 11 MW
 1989: Erstes Kraftwerk in der Schweiz, 100kWp
 1990: Transkontinentalflug mit einem solar betriebenen Flugzeug über die USA
 seit 1990: Installation von Großkraftwerken, erstes Solarboot, verbreiteter Einsatz von Klein- und Großanlagen als Insellösungen und netzgekoppelte Anwendungen

Abb. 13: Geschichte der Photovoltaik

(Eigene Darstellung unter Verwendung von ARCHER, M.D. (2001), S. 1 ff.; CHIRAS, D.; ARAM, R.C.O.N.; NELSON, K. (2009), S. 39 ff.; JUNGBLUTH, N.; STUCKI, M.; FRISCHKNECHT, R. (2009), S. 2 f.; PACCA, S.; SIVARAMAN, D.; KEOLEIAN, G.A. (2006), S. 87)

Bereits im Jahre 1958 folgten die ersten Anwendungen für Solarzellen - zunächst jedoch für weniger irdische Einsatzorte wie den NASA Satelliten „Vangard“ - bevor sie über die Versorgung von Kleingeräten wie Radio und Taschenrechner stetig weiter entwickelt wurden bis

⁷⁰ A.H. BECQUEREL, 1852-1908.

⁷¹ A. EINSTEIN, 1879-1955.

⁷² Vgl. PACCA, S.; SIVARAMAN, D.; KEOLEIAN, G.A. (2006), S. 87.

hin zum Einsatz in Großkraftwerken oder auf Hausdächern. Für die Zukunft ist mit einer noch breiteren Anwendung zu rechnen, da die Photovoltaik noch über ein großes Potential verfügt.

Der weitere geschichtliche Verlauf ist in Abb. 13 kurz aufskizziert.

Die mit der Geschichte einher gehende technische Entwicklung kann ebenfalls in Abb. 20 anhand der stetigen Steigerung der Forschungswirkungsgrade und Entwicklung neuer Technologiezweige nachvollzogen werden.

3.3 Vor- und Nachteile der Photovoltaik⁷³

Im Vergleich mit anderen Stromerzeugungstechnologien bietet die Photovoltaik diverse Vor- aber auch einige Nachteile, von denen die wichtigsten in Abb. 14 gegenübergestellt sind.

Der wohl wichtigste Vorteil der PV liegt in einer emissionsfreien Elektroenergiegewinnung aus einem praktisch unendlich vorhandenen Treibstoff während der Nutzung. Damit ist diese Technologie zunächst sehr gut geeignet, um dem im Vorwort bereits angesprochenen wachsenden Energiebedarf zu begegnen und dabei Emissionen und den Klimawandel zu berücksichtigen. Neben der emissionsfreien Stromerzeugung kann die Photovoltaik ebenfalls dadurch entscheidend zu einer Reduktion von Umweltbelastungen beitragen, dass sie einen Teil der konventionellen und damit zum Großteil klimaschädlichen Energieerzeugung ersetzen kann. Eine hohe Flexibilität bei der Dimensionierung ermöglicht ein großes Anwendungsportfolio von verteilten Kleinanlagen bis hin zum Großkraftwerk. Darüber hinaus ist der Treibstoff Sonnenenergie kostengünstig und für jedermann frei verfügbar. Er muss nicht technisch und ökologisch aufwendig z.B. in Minen oder mittels Bohrtürmen gefördert und anschließend über weite Strecken transportiert werden.

Auf der anderen Seite wird kritisiert, dass die mögliche Energiegewinnung unregelmäßig und eingeschränkt erscheint. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass die Sonnenenergie bspw. durch Wettereinflüsse nicht stets in gleicher Intensität verfügbar ist sowie vergleichsweise geringe Wirkungsgrade aufweist. Die Herstellung von Solarmodulen ist darüber hinaus derzeit noch kosten- und energieintensiv.

Die ökonomischen und ökologischen Kriterien spielen bei der Einschätzung von Vor- und Nachteilen der Photovoltaik die größte Rolle. Je nach Technologie und konkreter Anwendung sind diese unterschiedlich ausgeprägt und können durch ein ELCC bewertet werden.

Eine Auswahl weiterer Vor- und Nachteile der Photovoltaik kann Abb. 14 entnommen werden.

⁷³ Vgl. JUNGBLUTH, N.; STUCKI, M.; FRISCHKNECHT, R. (2009), S. 3 f.; TRIEB, F.; LANGNISS, O.; KLAISS, H. (1997), S. 95 f.; OLIVER, M.; JACKSON, T. (2000), S. 1013.

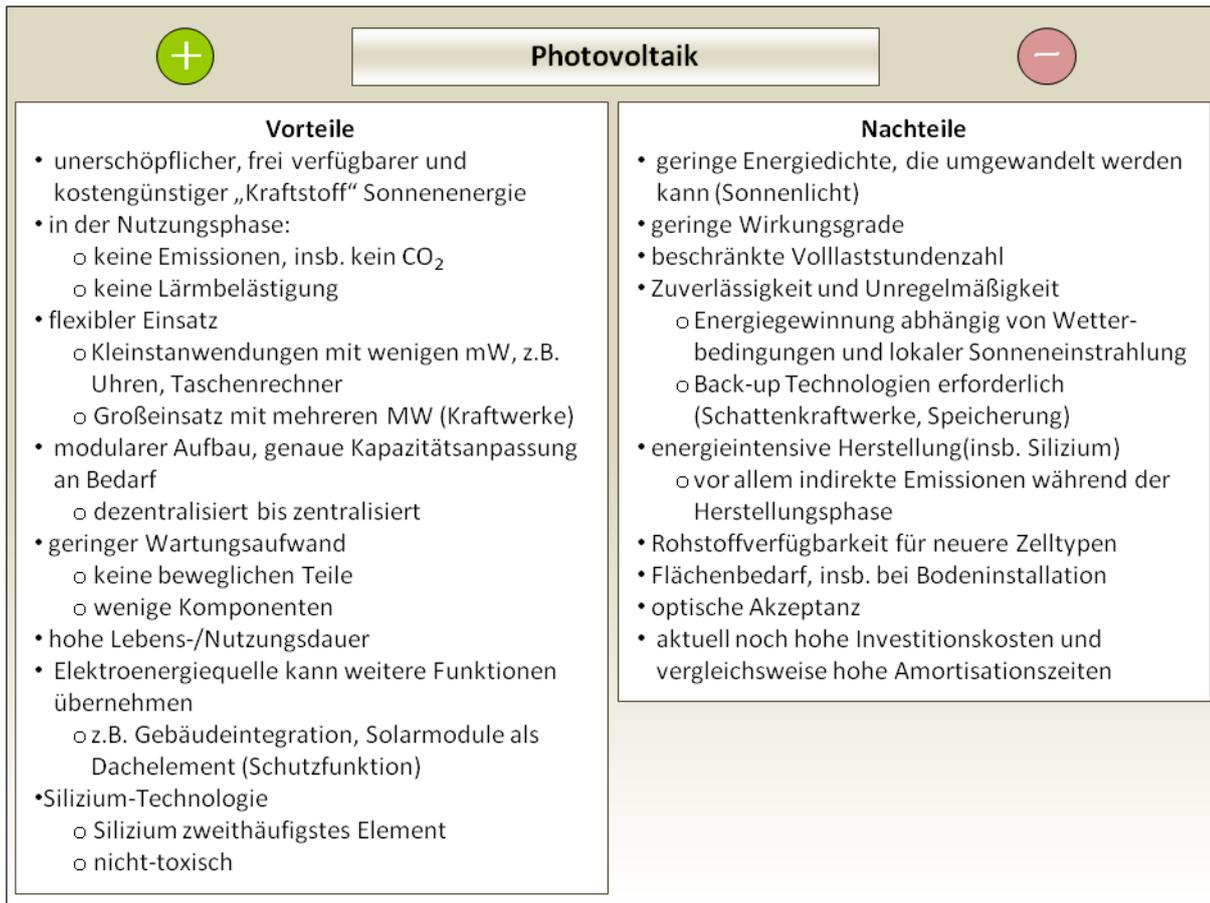


Abb. 14: Vor- und Nachteile der Photovoltaik

(Quelle: Eigene Darstellung, unter Verwendung von JUNGBLUTH, N.; STUCKI, M.; FRISCHKNECHT, R. (2009), S. 3 f.; OLIVER, M.; JACKSON, T. (2000), S. 1013; TRIEB, F.; LANGNISS, O.; KLAISS, H. (1997), S. 95 f.)

3.4 PV System

Zur näheren Charakterisierung eines PV-Systems als Untersuchungsgegenstand sollen im Folgenden die wichtigsten Komponenten und technischen Parameter definiert werden.

3.4.1 PV-Modul und Technologien

In der Untersuchung des ELCC für Solarprodukte werden unterschiedliche Technologien von Zelltypen der Photovoltaik eine Rolle spielen, weshalb an dieser Stelle eine Systematisierung erfolgen soll. Die Einteilung folgt der Logik der Abb. 12 (Technologien zur Nutzung der Sonnenenergie), wonach drei Generationen von Zelltypen unterschieden werden, die auf unterschiedlichen Technologien basieren: Generation 1 (Dickschicht), Generation 2 (Dünnschicht) und Generation 3 (diverse neue Zelltypen).

Die Kriterien für die Charakterisierung der Technologien sind neben den unterschiedlichen verwendeten Materialien vor allem auch technische Parameter wie Wirkungsgrad und Flächenbedarf⁷⁴, aus ökologischer Sicht zunächst vereinfacht der Energiebedarf bei der Herstellung, sowie aus ökonomischer Sicht die spezifischen Kosten für die einzelnen Technologien.

⁷⁴ Effizienz bei der Umwandlung von Sonnenenergie in Elektroenergie und benötigte Fläche zur Erzeugung einer bestimmten Leistung, vgl. Kap.3.5.

Abb. 15 zeigt die unterschiedlichen Zelltechnologien, auf die im Folgenden eingegangen werden soll, sowie deren Marktanteile. Im Kuchendiagramm der Marktanteile kann sofort erkannt werden, dass noch immer die zwei Zelltypen aus single- und polykristallinem Silizium mit einem Marktanteil von knapp 90% den Markt dominieren. Mit 5,2% Marktanteil ist die nächstgrößere Konkurrenztechnologie aus amorphem Silizium (Dünnschicht) bedeutend weniger auf dem Markt verbreitet.

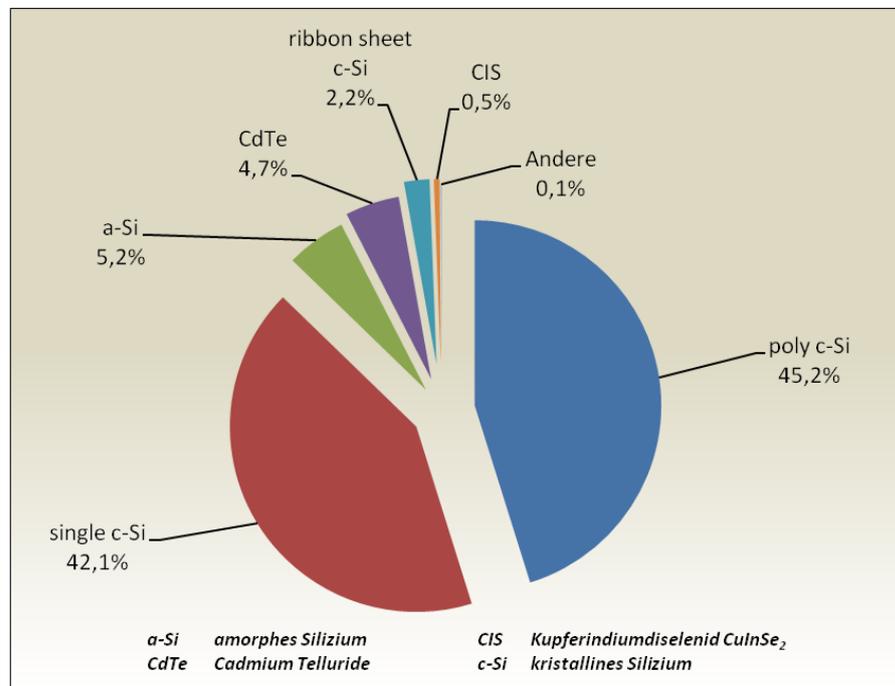


Abb. 15: Marktanteile der Zelltechnologien der Photovoltaik (nach Verkaufsmenge, 2008)
(Eigene Darstellung unter Verwendung von Solar generation V (2008), S. 16)

Die weitere Verteilung kann Abb. 15 entnommen werden und kann der Einordnung der drei Technologie-Generationen herangezogen werden, die im Folgenden kurz charakterisiert werden sollen.

3.4.1.1 Dickschicht-Technologien (Generation 1.0)⁷⁵

Die breite Entwicklung der Solarzellen ging zunächst von Zelltypen aus kristallinem Silizium als Halbleitermaterial aus. Ausgangsmaterial für die Herstellung von Silizium ist Siliziumdioxid (SiO_2), eine in Form von Quarzsand oder Bergkristallen sehr reichlich vorkommende Verbindung⁷⁶. Dies bedeutet, dass für die Zellproduktion - abgesehen von temporären Lieferengpässen durch Kapazitätsdisparitäten- ausreichend Rohstoff verfügbar ist.

Die drei Dickschicht-Technologien auf Silizium-Basis sind:

- sc-Si single-kristalline Siliziumzellen
- pc-Si poly-kristalline Siliziumzellen
- ribbon Si ribbon sheet kristalline Siliziumzellen.

Kristalline Siliziumtechnologien unterscheiden sich in der Herstellung des Siliziums als Ausgangsstoff. Während für sc-Si nach dem Schmelzen von Quarzsand und einer Reinigung ein

⁷⁵ Vgl. HÄBERLIN, H. (2007), S. 104 ff.; ZAHORANSKY, R. (2008), S. 286 ff.

⁷⁶ Vgl. HÄBERLIN, H. (2007), S. 104.

Einkristall gezogen werden muss, ist für pc-Si das Gießen eines Blocks *polykristallinem* Siliziums ausreichend. Die Herstellung des Einkristalls ist aufwendiger und damit vor allem energie- und kostenintensiver. Dafür bietet die sc-Si Technologie aufgrund der geringeren Verunreinigung des Siliziums einen höheren Wirkungsgrad (vgl. Tab. 7). Aus den Rohlingen (Einkristall bzw. pc-Block) werden schließlich ca. 200-500 µm dünne Scheiben⁷⁷ (meist) gesägt (sog. Wafer, wie sie auch aus der Halbleiterindustrie für Computerchips bekannt sind). Die Oberflächen der Wafer müssen anschließend gereinigt werden. Der Prozess der Waferherstellung ist jedoch sehr verlustreich, da durch das Trennverfahren (z.B. Sägen) wertvolles Zellmaterial zunächst zerstört wird.

Die ribbon-Technologie basiert auf einem abweichenden Produktionsverfahren. Anstatt einen Einkristall oder pc-Block herzustellen und diesen anschließend wieder in Wafer zu sägen, wird aus der Si-Schmelze ein Band (ribbon sheet, string ribbon) von ca. 300 µm gezogen, auf dessen Grundlage anschließend die Zellen gefertigt werden können. Der aufwendige und energieintensive Schritt der Bearbeitung und des Zuschneidens von Siliziumblöcken entfällt also für die ribbon-Technologie.⁷⁸

Auf eine ausführlichere Betrachtung der Herstellungsverfahren soll an dieser Stelle mit dem Verweis auf die Fachliteratur allerdings verzichtet werden.⁷⁹

Trotz der aufwendigen Herstellung sind zurzeit single- und polykristalline Siliziumzellen (sc-Si, pc-Si)⁸⁰ weltweit am weitesten verbreitet. Knapp 90% aller verkauften Solarzellen werden auf Basis kristallinen Siliziums hergestellt (vgl. Abb. 15), weshalb die c-Si Technologie (kristallines Silizium) noch immer die dominierende ist. Die Wirkungsgrade der kristallinen Siliziumtechnologien sind mit ca. 14-22% die höchsten, der vorherrschenden Serientechnologien.

3.4.1.2 Dünnschicht-Technologien (Generation 2.0)

Die Dünnschicht-Technologien ermöglichen im Gegensatz zu kristallinem Silizium eine direkte Absorption des Sonnenlichts, weshalb deutlich dünnere Schichten des Halbleitermaterials für die Herstellung der Solarzellen verwendet werden können. So sind bereits 0,5 - max.10 µm ausreichend, um die nötigen Halbleitereigenschaften zu realisieren. Der Material- und Energieaufwand, sowie die Kosten sinken hierdurch gewaltig. Gleichzeitig sinkt jedoch auch der Wirkungsgrad auf 5-11%.

Die wichtigsten Technologien der zweiten Generationen sind:

- a-Si amorphes Silizium
- CIS Kupfer Indium Diselenid (copper indium diselenide)
- CIGS Kupfer Indium Gallium Diselenid (copper indium gallium diselenide)
- CdTe Kadmium Tellurid (cadmium telluride).

⁷⁷ Je dünner die Scheiben, desto besser die Materialausnutzung. Durch die sinkende Belastbarkeit der Waferscheiben und damit auch der Solarzellen sind der Optimierung jedoch Grenzen gesetzt.

⁷⁸ Vgl. MARKVART, T.; BOGUS, K. (2000), S. 53 f.

⁷⁹ An Stellen dieser Arbeit, an denen ein detaillierteres Prozessverständnis erforderlich ist, werden die wichtigsten Informationen gegeben.

⁸⁰ Weitere mögliche Bezeichnungen sind mono und multikristallin. Aufgrund der Nichteindeutigkeit bei der Verkürzung „mc-Si“ werden in dieser Arbeit jedoch nur single- oder polykristallin (sc-Si, pc-Si) verwendet. In der Literatur sind beide Möglichkeiten sowie Mischformen (mono- und polykristalline) häufig vertreten. Hinweise zu einer möglichen Bezeichnungskonvention geben JUNGBLUTH u.a. (JUNGBLUTH, N.; STUCKI, M.; FRISCHKNECHT, R. (2009), S. ii, 11), welcher in diesem Zusammenhang jedoch aufgrund des angesprochenen Verwechslungsrisikos nicht gefolgt werden soll.

Unter den Dünnschicht-Technologien sind a-Si Zellen mit 5,2% als weltweit in der Verkaufsliste auf Rang drei nach den kristallinen Siliziumzellen der am meisten verbreitete Dünnschicht-Zelltyp.

Hinsichtlich der Herstellung ergibt sich für Dünnschicht-Zellen ein anderer Verfahrensablauf als bei den kristallinen Silizium-Zelltypen. Es werden nur hauchdünne Schichten des Halbleiter-Materials auf ein preiswertes Trägermaterial (Substrat, z.B. Glas, Keramik, Kunststoff) aufgedampft. Die Kosten und der Energieaufwand können hierdurch im Vergleich zur kristallinen Siliziumtechnik stark gesenkt werden. Der Prozess der Rohling- und Waferherstellung entfällt also.

3.4.1.3 Generation 3.0

Zur dritten Generation der Zelltypen gehört eine ganze Reihe unterschiedlichster Technologien, von denen nur eine Auswahl genannt werden soll: organische Zellen, Farbstoffzellen, Halbleiter-Elektrolytzellen, Tripel-/ Quadrupelzellen, Konzentrator-technologie usw. (vgl. auch Abb. 12).

Die Eigenschaften und Produktionsverfahren sowie Kosten sind sehr unterschiedlich für jeden Zelltyp, weshalb an dieser Stelle nicht weiter darauf eingegangen werden soll. Die Produktion der Technologien liegt zum Großteil im Pilotstadium und auch die Zelleigenschaften wie Lebensdauer bzw. Standfestigkeit liegen noch von einem breiten Praxiseinsatz entfernt.

Entsprechend dem Entwicklungsstadium haben diese Zellen bislang einen Marktanteil unter 0,1% (vgl. Abb. 15). Das Potential kann jedoch als hoch eingeschätzt werden, wie aus dem Vergleich in Abb. 16 im folgenden Abschnitt hervorgeht.

3.4.1.4 Potential-Vergleich der Zelltechnologien

Eine Entwicklungspotential-Abschätzung sowie der Trade-off zwischen Wirkungsgrad und Kosten der drei Technologie-Generationen können Abb. 16 entnommen werden. Zugrundegelegt sind Lebensdauern von 30 Jahren und serienreife Produktionsprozesse, die zum derzeitigen Stand, wie bereits erwähnt, nur zum Teil erreicht werden. Insbesondere für die dritte Generation kann hinsichtlich der spezifischen Kosten in Abb. 16 nur von einer Potentialabschätzung gesprochen werden.

Es wird im Zellvergleich ersichtlich, welche Möglichkeiten die einzelnen Technologien bieten können. Während die erste Generation von kristallinen Siliziumzellen die höchsten Investitionskosten, aber auch höhere Wirkungsgrade aufweist, konnten mit der zweiten Generation der Dünnschicht-technologie die Investitionskosten zwar gesenkt werden, die erreichbaren Wirkungsgrade sind jedoch aufgrund der dünneren Schichten und geringeren Reinheit niedriger.

Das Potential der dritten Generation ist hoch, da insbesondere hohe Wirkungsgrade möglich werden und durch einen optimierten Materialeinsatz (geringere Schichtdicken, preiswertere Materialien, Ersatz von teurem Halbleitermaterial durch optische Installationen in der Konzentrator-technologie etc.) die Produktionskosten gesenkt werden könnten. Viele der neuen Zelltechnologien sind jedoch noch im Pilotstatus und die Lebensdauern im Praxiseinsatz liegen teilweise unter einem Jahr, woraus sich noch ein erheblicher Entwicklungsbedarf ergibt.

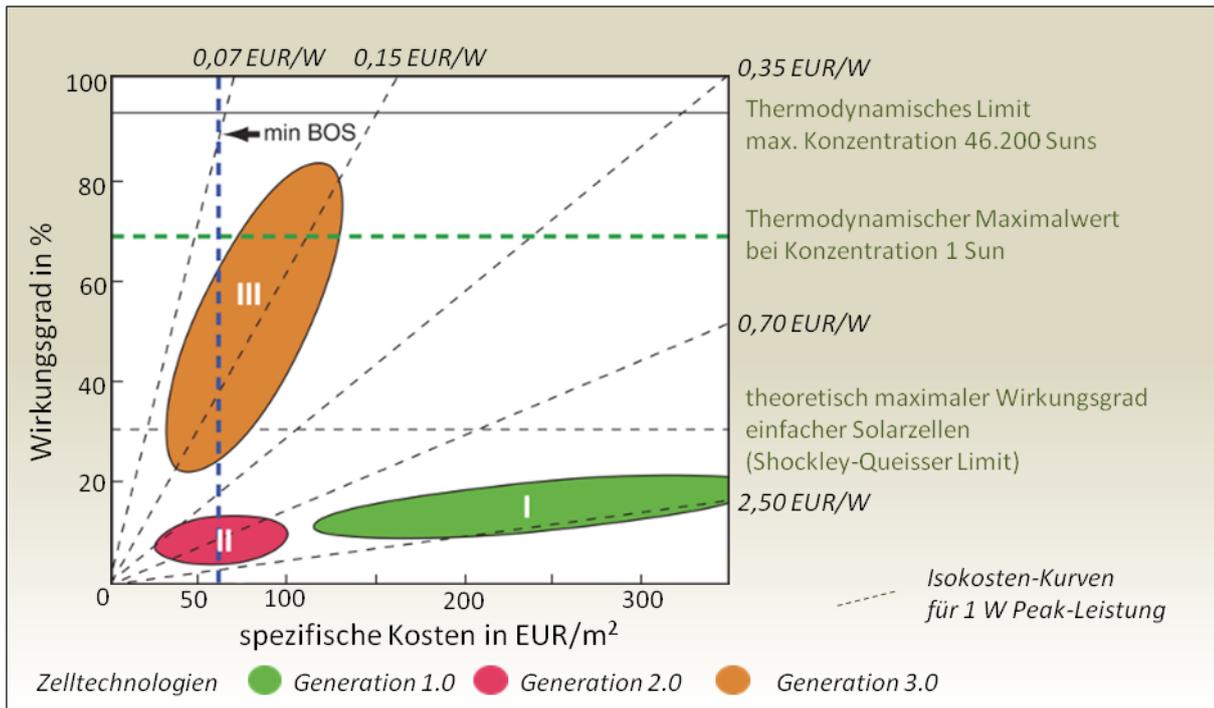


Abb. 16: Potentialabschätzung bzgl. Wirkungsgrad und Kosten Trade off für die drei Generationen der Zelltechnologien
(Quelle: unter Bearbeitung, GREEN, M.A. (2006), S. 3; LEWIS, N.S. (2007), S. 799)

Nach diesem kurzen Einblick in die Generationen von Zelltechnologien soll im Folgenden eine Auswahl der wichtigsten Parameter zur Charakterisierung von PV-Modulen und -Systemen vorgestellt werden.

3.5 Wichtigste technische Parameter und Komponenten

Zur Bestimmung von Parametern und konkreten Anforderungen existiert eine Reihe von internationalen Standards, auf die jedoch nicht im Einzelnen eingegangen werden soll. Zu den wichtigsten gehören die Normen der INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION⁸¹ sowie des INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC)⁸². Eine Auflistung von relevanten Standards für die PV-Industrie und Betreiber von Anlagen z.B. Leistungsmessung, -beschreibung kann bspw. den Internetseiten von PVRESOURCES⁸³ entnommen werden.

3.5.1 Spitzenleistung (Peak-Leistung)

Die installierte Spitzenleistung ist ein Maß für die Leistungsfähigkeit eines Solarsystems und gibt somit Auskunft über die Größe und die mögliche Verwendung einer Anlage. Durch den in Abschnitt 3.3 bereits erwähnten Vorteil eines modularen und damit flexiblen Aufbaus von Photovoltaik-Anlagen, kann die installierte Spitzenleistung sehr genau an den lokalen Bedarf der Endnutzer bzw. die lokalen Bedingungen angepasst werden.

Im Gegensatz zu anderen Stromerzeugungstechnologien ist die abgegebene elektrische Leistung einer Solarinstallation nicht konstant. Sie verändert sich mit den äußeren Rahmenbedingungen wie Sonneneinstrahlung und Zelltemperatur, weshalb die Peak-Leistung eine

⁸¹ Vgl. z.B. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO) (1992).

⁸² Vgl. z.B. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC) (2006); INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC) (2007); INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC) (2008).

⁸³ Vgl. PHOTOVOLTAIC RESOURCES (PVRESOURCES.COM) (2007).

Maximalangabe für festgelegte Bedingungen ist. Die maximal mögliche Leistung P_{\max} wird im Punkt maximaler Leistungsabgabe (Maximum Power Point, MPP)⁸⁴ unter Standardbedingungen⁸⁵ gemessen und in W_p (Watt Peak, Spitzenleistung) angegeben.

Der starke Anstieg der installierten Spitzenleistung in MW_p seit 1992 kann in Abb. 22 nachvollzogen werden. In 2008 waren demnach 13.425 MW_p installiert. Trend stark wachsend.

3.5.2 Wirkungsgrad und Flächenbedarf

Der bereits mehrfach angesprochene Wirkungsgrad ist der entscheidende Parameter für die Charakterisierung von Solarsystemen, weshalb in diesem Abschnitt ausführlicher darauf eingegangen werden soll.

Es existieren verschiedene Wirkungsgrade zur Beschreibung von Solarzellen⁸⁶, von denen eine Auswahl in Abb. 17 definiert ist. Allgemein gibt der Wirkungsgrad das Verhältnis von nutzbarer Leistung (abgegebene elektrische Leistung) zu der verfügbaren Leistung (solare Einstrahlung) an.

Allgemeiner Wirkungsgrad	$\eta = \frac{\text{Output}}{\text{Input}} = \frac{\text{maximal mögliche Umwandlung in Elektroenergie}}{\text{verfügbare Strahlungsenergie}}$	
Theoretischer Wirkungsgrad	$\eta_T = \frac{P_{\max}}{G \cdot A_Z}$	P_{\max} maximal abgegebene Leistung G Bestrahlungsstärke (Leistung/Fläche) A_Z Zellfläche
Praktischer Wirkungsgrad	$\eta_{PV} = \eta_T - \text{Verluste}$	z.B. <ul style="list-style-type: none"> • Reflexionsverluste an der Oberfläche der Solarzelle • Selbstbeschattung • ohmsche Verluste im Halbleitermaterial • Temperaturverluste usw.

Abb. 17: Definitionen für den Wirkungsgrad von Solarzellen
(Eigene Darstellung unter Verwendung von HÄBERLIN, H. (2007), S. 89 ff.)

Für den weiteren Verlauf soll der praktische Wirkungsgrad verwendet werden, der i.d.R. durch Messung ermittelt wird.

Eine ebenfalls wichtige Unterscheidung bei Wirkungsgraden in der Photovoltaik ergibt sich in Zell-, Modul- und Systemwirkungsgrad (vgl. Tab. 6). Mit steigendem Einbezug von Elementen sinkt der Wirkungsgrad (Zellwirkungsgrad > Modulwirkungsgrad > Systemwirkungsgrad).

⁸⁴ Vgl. I-U-Kennlinien von Solarzellen (Stromstärke über Spannung), z.B. in HÄBERLIN, H. (2007), S. 85 f.

⁸⁵ Vgl. konkrete Angaben zu Standard-Testbedingungen im folgenden Abschnitt.

⁸⁶ Vgl. HÄBERLIN, H. (2007), S. 89 ff.

Tab. 6: Wirkungsgrad Zelle, Modul, System
(Eigene Erstellung)

Wirkungsgrad	Charakterisierung
Zellwirkungsgrad	<ul style="list-style-type: none"> • höchster Wirkungsgrad, da nur bezogen auf verwendete Solarzellen • vgl. praktischer Wirkungsgrad in Abb. 17
Modulwirkungsgrad	<ul style="list-style-type: none"> • Zellwirkungsgrad verringert um Verluste durch <ul style="list-style-type: none"> ○ Zwischenräume zwischen aneinandergereihten Zellen im Modul ○ Rahmenfläche
Systemwirkungsgrad	<ul style="list-style-type: none"> • Modulwirkungsgrad verringert um Verluste durch BOS-Komponenten wie Verkabelung oder Wechselrichter

Die Wirkungsgrade für die in Kap.3.4.1 vorgestellten wichtigsten Zelltechnologien sind in Tab. 7 als Übersicht zusammengetragen. Wie bereits angegeben, erreichen die kristallinen Siliziumzellen von den breit eingesetzten Technologien mit 14-22% die höchsten Zellwirkungsgrade, während die Dünnschicht-Technologien i.d.R. unter 10% Umwandlungseffizienz erreichen. Optische Maßnahmen durch installierte Spiegel führen bei Konzentratorzellen zu einer vielfachen Konzentration eingehenden Sonnenlichtes auf kleinste Zellflächen, weshalb diese Technologie höhere Wirkungsgrade von über 30% erreichen kann.

Mit unterschiedlichen Wirkungsgraden ergibt sich auch ein abweichender Flächenbedarf für die Technologien, der erforderlich ist, um ein kW Spitzenleistung zu liefern (vgl. Tab. 7). Für die Dünnschicht-Technologien ist dieser mit 12-15 m² deutlich höher als der von kristallinen Silizium Zellen mit 7-8 m². Der deutlich höhere Wirkungsgrad von Konzentratorzellen führt bezogen auf die Zellfläche zum geringsten Flächenbedarf unter 4 m². Die typische Modulfläche liegt zwischen 1-2 m².⁸⁷

⁸⁷ Vgl. JUNGBLUTH, N.; STUCKI, M.; FRISCHKNECHT, R. (2009), S. 12.

Tab. 7: Wirkungsgrad und Flächenbedarf der wichtigsten Zelltechnologien

(Quelle: Eigene Darstellung, unter Verwendung von Solar generation V (2008), S. 17; JUNGBLUTH, N.; STUCKI, M.; FRISCHKNECHT, R. (2009), S. 1 f.; QUASCHNING, V. (2008), S. 106)

Technologie	Dünnschicht-Technologien				Kristalline Silizium Wafer		Konzentratorzellen
	a-Si	CdTe	CI(G)S	a-Si/s-Si	sc-Si	pc-Si	
Wirkungsgrad STC (Zelle)	5-7%	8-11%	7-11%	8 %	16- 22%	14- 15%	28-35%
Modul- Wirkungsgrad					13- 15%	12- 14%	
Flächenbedarf pro kW _p	15 m ²	11 m ²	10 m ²	12 m ²	ca. 7 m ²	ca. 8 m ²	3,6 m ²

Legende

STC Standard Testing
Conditions⁸⁸

CdTe Cadmium Telluride

sc-Si single kristallines Silizium

CIS Kupferindiumdiselenid CuInSe₂

pc-Si poly kristallines Silizium

a-Si amorphes Silizium

CIGS Kupferindiumgalliumdiseleni
Cu(In,Ga)Se₂

a-Si/s-Si Tandemzellen mikrokrystallines und
amorphes Silizium

Der mit durchschnittlich ca. 5-22%⁸⁹ vergleichsweise geringe Wirkungsgrad bei der Umwandlung der Sonnenenergie in elektrische Energie ist ein häufiger Kritikpunkt der Photovoltaik. Andere Technologien können deutlich höhere Umwandlungseffizienz-Werte von bis zu 50% und mehr erreichen (vgl. Abb. 18).

Im Vergleich ist jedoch zu beachten, dass ein Großteil der Alternativen während der Nutzung den beständigen Input fossiler Brennstoffe benötigt, also nicht erneuerbar und damit hinsichtlich der Zukunftsfähigkeit zumindest kritisch zu bewerten ist.

⁸⁸ Zu Standardtestbedingungen vgl. die Ausführungen im weiteren Verlauf dieses Abschnittes.

⁸⁹ Unter Berücksichtigung realer Bedingungen entsteht eine Abweichung von den Min./Maximalwerten in Tab. 7.

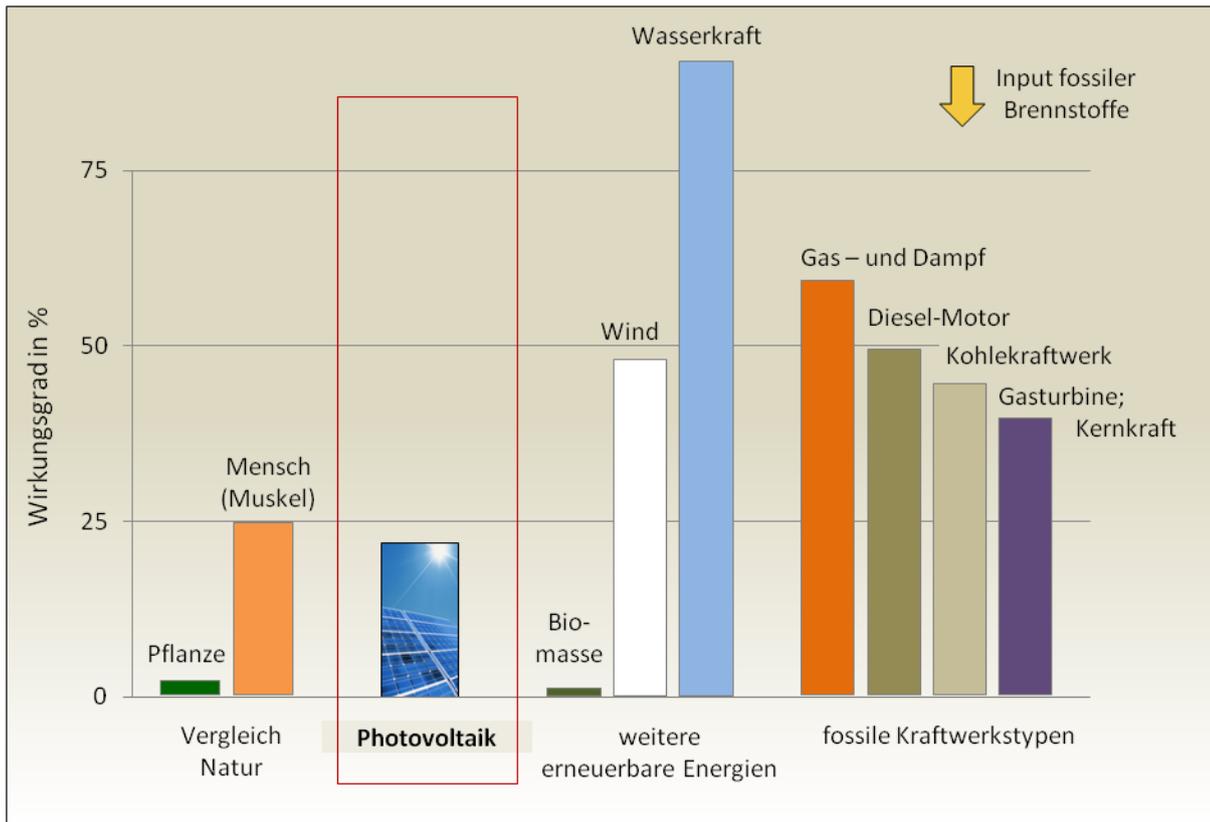


Abb. 18: Wirkungsgrad der Photovoltaik im Vergleich⁹⁰

(Eigene Darstellung, unter Verwendung von DITTMANN, A. u.a. (1998), S. 30; GRASSMANN, P. (1987), S. 67; KÄMPFE, L.; BERNHARDT, D. (1985), S. 154; ZAHORANSKY, R. (2008), S. 195)

Die Effizienz der regenerativen Energien Wind und Wasser kann mit bis zu 45% bzw. über 85% ebenfalls deutlich höher als bei der Photovoltaik liegen. Doch der technischen Nutzung sind auch hier natürliche Grenzen gesetzt, so dass es nicht *die eine* Zukunftslösung geben kann, sondern stets eine Kombination aus verschiedenen Technologien zur Bedarfsdeckung führen wird; im Idealfall rein aus regenerativen Energien.

Im Vergleich mit der Natur ist die PV deutlich positiver einzuordnen. Ein allein aufgrund seines Alters⁹¹ sowie seiner weltweiten Verbreitung als „ausgereift“ und extrem erfolgreich anzusehendes Verfahren, mit ähnlichen Eingangsparametern (Sonnenlicht), weist lediglich Wirkungsgrade von 0,5 - 2%⁹² auf: die Photosynthese. Demgegenüber erscheinen die Wirkungsgrade eines Zehnfachen bei der PV hoch.

Rein physikalisch sind dem Wirkungsgrad der Photovoltaik allerdings Grenzen gesetzt, so dass auch für ideale Solarzellen 100% Energieumwandlung theoretisch nicht erreicht werden können (vgl. Shockley-Queisser-Limit und thermodynamische Maximalwerte in Abb. 16). Wie in Abb. 19 erkennbar, sind je nach Material für die herkömmlichen Zelltechnologien der ersten und zweiten Generation maximal 30% theoretischer Wirkungsgrad unter Standardbedingungen möglich.

⁹⁰ Der Wirkungsgrad für Biomasse bezieht den gesamten Kreislauf ein (z.B. auch Pflanzenwachstum). Die reine Verbrennung von Biomasse z.B. zur Dampferzeugung in einem herkömmlichen Turbinenprozess erreicht einen Wirkungsgrad von ca. 15-18% (vgl. z.B. PEHNT, M. (2006), S. 64).

⁹¹ Geschätztes Alter: $3,5 \cdot 10^9$ Jahre (vgl. KÄMPFE, L.; BERNHARDT, D. (1985), S. 154), damit eine der ältesten organischen Synthesen, von der „...nahezu alles irdische Leben abhängt...“ (GRASSMANN, P. (1987), S. 67).

⁹² Vgl. GRASSMANN, P. (1987), S. 67.

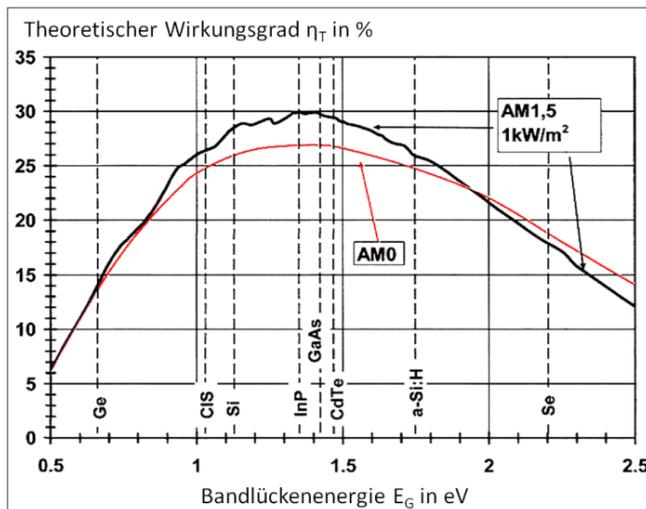


Abb. 19: Theoretischer Wirkungsgrad einfacher (single-junction) Solarzellen (Standard-Testbedingungen)
(Quelle: HÄBERLIN, H. (2007), S. 95)

Diese Standardbedingungen, für die der Wirkungsgrad angegeben wird, sind für zentraleuropäische Bedingungen (Standard Test Conditions, STC)⁹³:

- Sonneneinstrahlung=1.000 W/m²
- Zellen-Temperatur=25°C (nicht Umgebungstemperatur)
- Air Mass ratio⁹⁴ AM=1,5.

Doch auch wenn der Wirkungsgrad der Photovoltaik im Vergleich zu anderen Technologien keine Bestwerte erreicht und rein physikalisch theoretische Grenzwerte weit unter 100% Umwandlungseffizienz gegeben sind, konnte durch verbesserte Technologien bzw.

Stoffkombinationen eine kontinuierliche Steigerung der Wirkungsgrade erreicht werden. Neuere Technologien wie bspw. Konzentratorzellen erreichen bereits Wirkungsgrade über 40%.

Gemäß dem Verständnis:

„Es ist nichts Großartiges daran, besser zu sein als jemand anderes. Wahre Größe zeigt sich darin, besser zu sein, als man selbst vorher war.“

Unbekannt

kann der Erfolg der technischen Entwicklung in der Zelltechnologie anhand der kontinuierlich wachsenden erreichten Wirkungsgrade in der Forschung in Abb. 20 nachvollzogen werden.

Neben den regelmäßig aktualisierten Übersichten des NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (NREL)⁹⁵ (Abb. 20) zeigen die ebenfalls regelmäßig herausgegebenen SOLAR CELL EFFICIENCY TABLES⁹⁶ die gleiche Entwicklung. Bei der beständigen Wirkungsgradsteigerung in allen Technologietypen spiegeln sich auch in den Bestwerten unter Laborbedingungen die in Tab. 7 gegebenen Wertebereiche für die Wirkungsgrade der unterschiedlichen Generationen von Zelltypen (blau, grün, rot, lila) wider.

⁹³ Auch Standard Reporting Conditions (SRC), vgl. z.B. MARKVART, T.; CASTANER, L. (2003), S. 668; MASTERS, G.M. (2004), S. 475. Die unter diesen Bedingungen getesteten Kennwerte wie z.B. Wirkungsgrad werden als Nominalwerte in Datenblättern von Solaranlagen angegeben. Durch die lokalen Bedingungen wie Temperatur, Sonneneinstrahlung, Verschattungen und Installationswinkel können die realen Werte deutlich davon abweichen.

⁹⁴ Air Mass ist das Maß für die Weglänge der Sonnenstrahlung durch die Atmosphäre. Je länger dieser Weg, desto größer die Schwächung der Strahlung. AM=1,5 bedeutet einen Zenitwinkel von ca. 48° und damit die 1,5 fache Weglänge der Strahlung im Vergleich zur kürzesten Weglänge von AM=1, was einem Zenitwinkel von 0° und damit einem Standort am Äquator entspricht. Vgl. z.B. ZAHORANSKY, R. (2008), S. 268 f.

⁹⁵ NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (NREL) (USA) (2009).

⁹⁶ Vgl. GREEN, M.A. u.a. (2009), S. 85–94; GREEN, M.A. u.a. (2009); GREEN, M.A. u.a. (2008), S. 435–440 und die Vorgängerversionen.

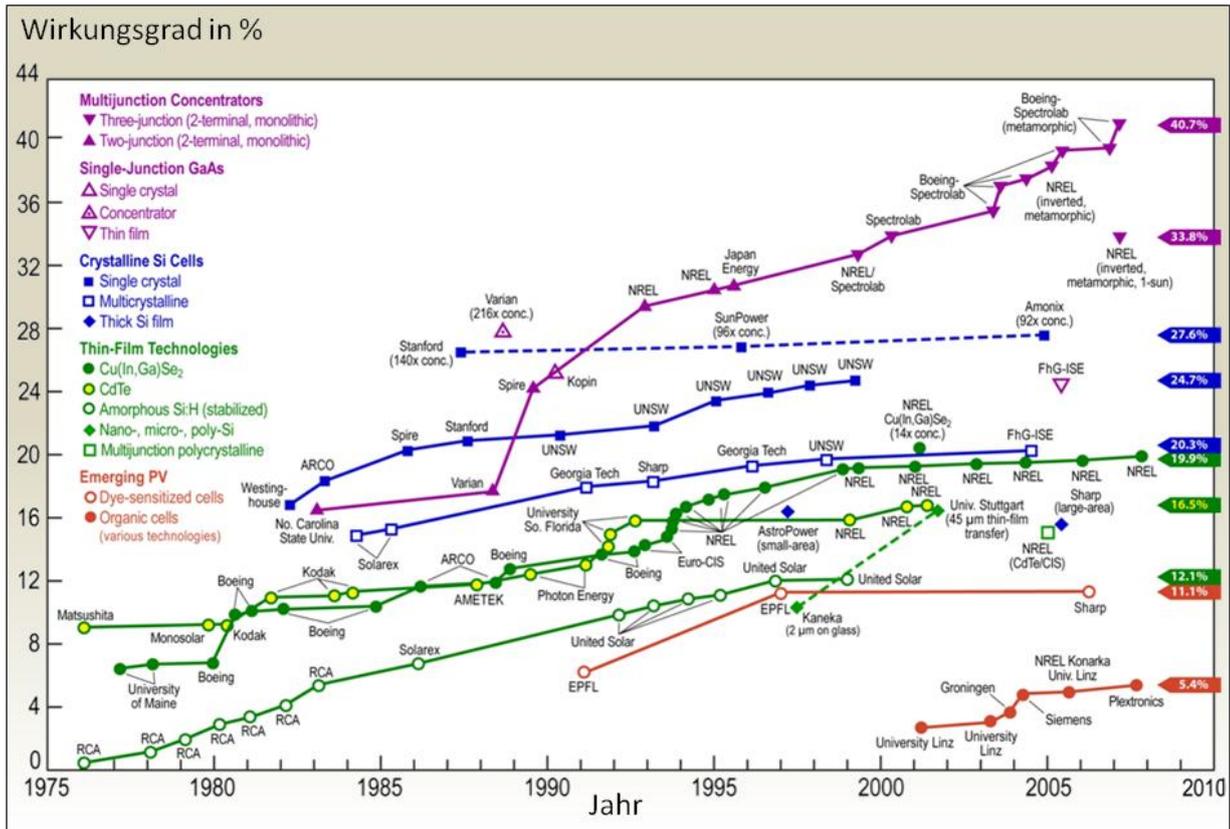


Abb. 20: Erreichte Wirkungsgrade unter Laborbedingungen

(Quelle: VON ROEDERN, B. (2008))

3.5.3 Performance Ratio

Eine weitere wichtige Angabe zur Charakterisierung der Effizienz eines PV-Systems ist die Performance Ratio (PR). Sie ist definiert als das Verhältnis aus Soll- und Nutzertrag:

$$PR = \frac{\text{Nutzertrag}}{\text{Sollertrag}} = \frac{\text{Wechselstromertrag (real zur Verfügung stehend)}}{\text{nominaler Ertrag an Generator – Gleichstrom}}$$

Die PR ist unabhängig vom Standort und der Systemgröße und gibt Aufschluss über die Abweichungen von der Nominalpower der PV-Module durch Temperatur, unvollständige Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Sonnenenergie und Verlusten bzw. Ausfällen von Systemkomponenten.⁹⁷

Über die letzten 10-15 Jahre ist bei der Auswertung von vorhandenen Anlagen eine Verbesserung der gemessenen PR festgestellt worden und es können Werte zwischen 0,65-0,8 als typische Annahme verwendet werden.⁹⁸

3.5.4 Lebensdauer

Die Lebens- bzw. Nutzungsdauer von PV-Systemen ist ebenfalls ein wichtiger Parameter zur Charakterisierung dieser Systeme, da mit ihr kalkuliert werden kann, wie lang mit einer PV-Installation Sonnenenergie umgewandelt werden kann.

⁹⁷ Vgl. MARKVART, T.; CASTANER, L. (2003), S. 750.

⁹⁸ Vgl. MARKVART, T.; CASTANER, L. (2003), S. 752 ff.; ALSEMA, E. u.a. (2009), S. 4; CLAVADETSCHER, L.; NORDMANN, T.; INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA) (HRSG.) (2007), S. 14 ff.

Genaue Werte können naturgemäß nicht angegeben werden. Die typischen Schätzungen hierfür liegen für die ausgereiften Technologien zwischen 20 und 30 Jahren. Hersteller geben durchschnittlich eine Garantie von 20-25 Jahren für 80% der Leistung⁹⁹, wobei in der Regel mit einer Lebensdauer von 30 Jahren gerechnet werden kann.¹⁰⁰

3.5.5 Leistungsabbau über die Zeit (Degradation)

Über die Lebenszeit erleben Solarmodule einen geringen Leistungsabbau, sog. Degradation. Dies kann einerseits durch Verunreinigungen der Modulfläche bedingt sein, die sich jedoch durch regelmäßige Reinigung entfernen lassen (eine der wenigen Instandhaltungsarbeiten). Andererseits führen Abbauprozesse innerhalb des Halbleitermaterials, an Zellverbindungen usw. zu einem leichten aber irreversiblen Leistungsverlust über die Zeit. Ein weiterer Leistungsabfall wird durch das Sonnenlicht selbst verursacht (Staebler-Wronski Effekt). Besonders a-Si Zellen erleben kurz nach der Installation zunächst einen stärkeren Leistungsabfall, bis sich eine Art Gleichgewicht unter den Standortbedingungen einstellt.¹⁰¹

Insgesamt kann von einer Degradation von ca. 0,5 - 2% pro Jahr ausgegangen werden.¹⁰²

3.5.6 Sonneneinstrahlung

Unabhängig von den Leistungsparametern einer PV-Anlage spielt die verfügbare Sonnenenergie eine entscheidende Rolle für die Menge der möglichen Stromerzeugung. Dabei hängt die auftreffende Sonneneinstrahlung vor allem von der geographischen Länge und Breite ab, in der eine Anlage betrieben werden soll. Des Weiteren haben das Klima/Wetter und lokale Installationsbedingungen wie Abschattungsbereiche, Installationswinkel, Vorhandensein von Nachführungssystemen usw. einen Einfluss.

Durch atmosphärische Gegebenheiten und die Abhängigkeit der auftreffenden Strahlungsenergie vom Zenitwinkel der Sonne¹⁰³ ergibt sich die in Abb. 21 dargestellte Weltkarte der durchschnittlich verfügbaren Strahlungsenergie pro Jahr auf dem Festland.

⁹⁹ Vgl. nächster Abschnitt 3.5.5 zu Degradation.

¹⁰⁰ Vgl. GOETZBERGER, A.; HOFFMANN, V.U. (2005), S. 141 f., S. 155.

¹⁰¹ Vgl. GOETZBERGER, A.; HOFFMANN, V.U. (2005), S. 64 f. Dieser Effekt ist jedoch in Leistungsangaben der Hersteller einberechnet, da er zelltyp-bedingt immer auftritt.

¹⁰² GOETZBERGER, A.; HOFFMANN, V.U. (2005), S. 155 ff.

¹⁰³ Vgl. Hinweise zu Air Mass ratio in Abschnitt 3.5.2.

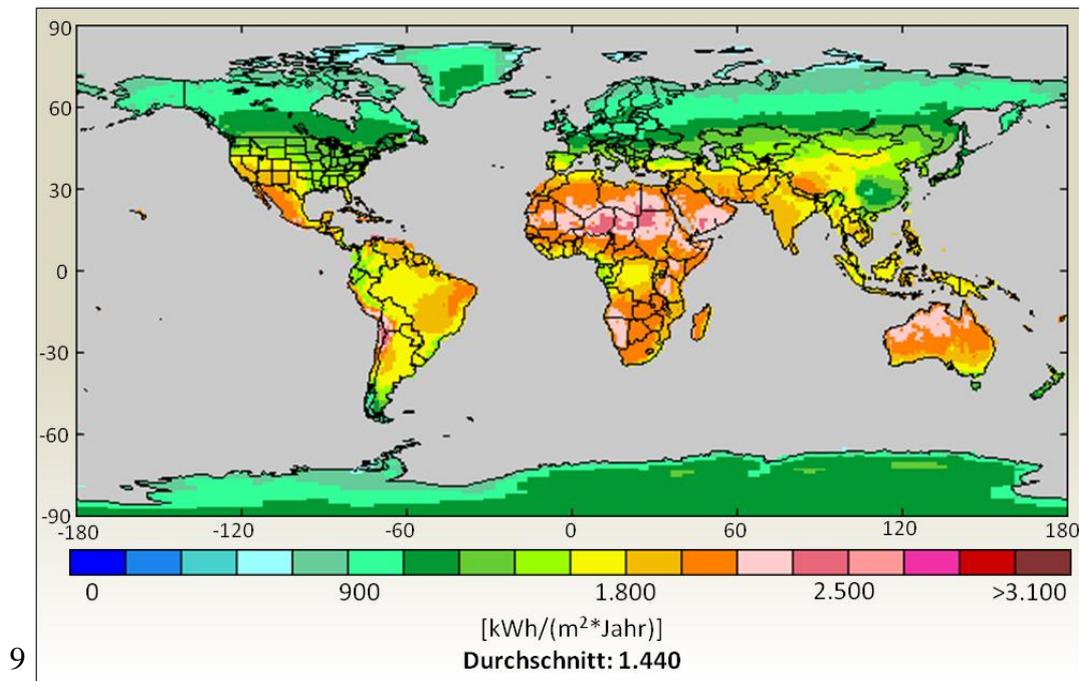


Abb. 21: Durchschnittliche jährlich auf das Festland treffende Strahlungsenergie (Juli 1983 – Juni 2005)

(Quelle: unter Bearbeitung NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA) (2009); ATMOSPHERIC SCIENCE DATA CENTER (2009))

Gerade um den Äquator¹⁰⁴ ist unabhängig von lokalen Installationsbedingungen die größte Strahlungsmenge pro Jahr vorhanden. Auf Basis der Weltkarte können die theoretisch größten Potentiale der Nutzung der Sonnenenergie ohne Berücksichtigung lokaler politischer, wirtschaftlicher und technischer Möglichkeiten ermittelt werden.

Daten zur Sonneneinstrahlung können bspw. dem PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM (PVGIS) des JOINT RESEARCH CENTERS der EUROPÄISCHEN KOMMISSION¹⁰⁵ oder den NASA-Seiten¹⁰⁶ entnommen werden.

3.5.7 Installation/System

Für die Installation eines Solarsystems stehen je nach Anwendungsziel und Standort mehrere Möglichkeiten zur Verfügung. So wird unterschieden, ob die Anlage in ein öffentliches Versorgungsnetz einspeist oder als alleinstehende Insellösung zur Versorgung direkt angebundener Verbraucher betrieben wird. Aus den verschiedenen Installationen ergeben sich einerseits unterschiedliche benötigte Komponenten, die in eine Lebenszyklusanalyse entweder ein- oder ausgeschlossen werden können. Andererseits beeinflusst die Installation wesentlich die reale Performance eines Systems (Lastprofile, Installationswinkel usw.).

¹⁰⁴ Genau genommen liegt der ideale Gürtel leicht südlicher durch die Neigung der Erdoberfläche.

¹⁰⁵ EUROPEAN COMMISSION JOINT RESEARCH CENTER (EC JRC) (2009).

¹⁰⁶ NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA) (2009); ATMOSPHERIC SCIENCE DATA CENTER (2009).

Tab. 8: Installation/Anwendung PV

(Eigene Erstellung unter Verwendung von HÄBERLIN, H. (2007), S. 157 ff., 197 ff.; JUNGBLUTH, N.; STUCKI, M.; FRISCHKNECHT, R. (2009), S. 12)

Netzkopplung	Bsp. für Montagearten	Speicherung
<ul style="list-style-type: none"> zentrale netzgekoppelte Anlagen dezentrale, verteilte netzgekoppelte Anlagen Inselanlagen ohne Netzkopplung (stand alone) 	<ul style="list-style-type: none"> Freifeldaufbau mit Aufständering Flachdachaufbau mit Aufständering Schrägdach mit separatem Aufbau Schrägdach integriert in Dachfläche Fassadenmontage und Fassadenintegration 	<ul style="list-style-type: none"> mit Speicherung (insb. Inselsysteme) und Unterscheidung verschiedener Speichermöglichkeiten ohne Speicherung (i.d.R. netzgekoppelte Anlagen)

Der Trend geht wie in Abb. 22 ersichtlich stark zu netzgekoppelten Anlagen. Waren 1992 noch mehr als 70% der installierten Leistung Inselsysteme, waren es in 2008 nur noch 6%.¹⁰⁷

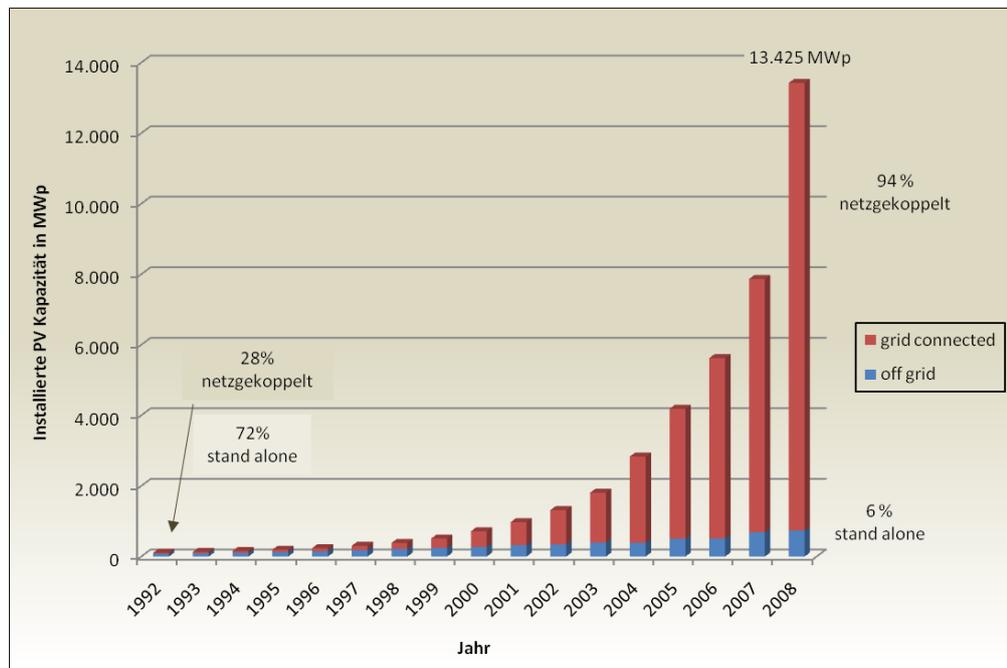


Abb. 22: Entwicklung Installierte Photovoltaik Kapazität¹⁰⁸ 1992-2008, nach Spitzenleistung

(Eigene Darstellung unter Verwendung von INTERNATIONAL ENERGY AGENCY PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS PROGRAMME (IEA PVPS) (2004 - 2009))

¹⁰⁷ Insbesondere für die vorhandenen Energienetze ergeben sich hieraus jedoch spezielle Anforderungen durch die breite Integration einer nicht konstant liefernden Energiequelle.

¹⁰⁸ Berücksichtigung nur der Länder, die an das International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme (IEA PVPS) berichten, vgl. Quellenangaben Abb. 22.

3.5.8 Balance of the System (BOS)

Für den Betrieb einer PV-Anlage werden neben den Modulen, dem String (mehrere Module in Reihe) oder Solarfeld (eine große Zahl von Modulen verbunden zu einem Generator) weitere Komponenten benötigt, die ganz pauschal unter dem Begriff der Balance of System (BOS) zusammengefasst werden.

Unter BOS ist die gesamte Peripherie einer PV-Installation zu verstehen, die die Nutzung unterstützt bzw. ermöglicht.

Die Balance of System wird gemäß ihrer Teilsysteme in mechanische und elektronische Elemente unterteilt,

deren wichtigste Komponenten in Tab. 9 aufgelistet sind. Auf eine Detaillierung der einzelnen Funktionen, z.B. eines Wechselrichters, soll für den Rahmen des ELCC verzichtet werden.

Sollte eine Speichereinheit Teil der Anlage sein, so wird diese i.d.R. auch der BOS zugeordnet.

Mit der Identifizierung der wichtigsten Eigenschaften der Photovoltaik, einer Unterteilung der Zelltechnologien sowie der Beschreibung der wichtigsten Parameter sind hinsichtlich des Untersuchungsgegenstandes die theoretischen Grundlagen gelegt. Die Zusammenführung der Erkenntnisse zum Instrument ELCC und dem Untersuchungsgegenstand PV im folgenden Kapitel soll nun das Ziel der Erstellung eines Anforderungsschemas für die Durchführung eines ELCC für PV-Produkte erfüllen.

Tab. 9: Balance of System

(Eigene Erstellung unter Verwendung von LUQUE, A.; HEGEDUS, S. (2003), S. 33 f.)

BOS-Teil	Komponenten
Mechanisch	<ul style="list-style-type: none"> • tragende Konstruktion je nach Installationstyp
Elektronisch	<ul style="list-style-type: none"> • Wechselrichter • Steuergerät • Verkabelung und weitere elektrotechnische Elemente wie Sicherungen, Schalter usw.
(Speicherung)	<ul style="list-style-type: none"> • Batterie

4 Environmental Life Cycle Costing für Die Photovoltaik

“Consumers are increasingly interested in the world behind the product they buy. Life cycle thinking implies that everyone in the whole chain of a product’s life cycle, from cradle to grave, has a responsibility and a role to play, taking into account all the relevant external effects. The impacts of all life cycle stages need to be considered comprehensively when taking informed decisions on production and consumption patterns, policies and management strategies.”

Klaus Toepfer, Executive Director 1998-2006, UNEP¹⁰⁹

Die häufig zitierte Äußerung des ehemaligen deutschen Bundesumweltministers und ehemaligen Vorsitzenden des Umweltprogramms der VEREINTEN NATIONEN (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, UNEP) soll nochmals die generelle Bedeutung der Anwendung eines ELCC hervorheben.

NIEUWLAAR und ALSEMA, zwei Experten auf dem Gebiet der Photovoltaik und dem Life Cycle Assessment¹¹⁰ stellen mit folgenden Worten die Forderung nach einer Analyse des gesamten Lebenszyklus von Photovoltaik-Produkten:

“A life cycle approach is needed for the assessment of environmental aspects of PV power systems because they mostly occur at life cycle stages other than the operation of the PV power system itself (i.e. manufacturing, end-of-life waste management).”

Evert Nieuwlaar; Erik Alsema 1997¹¹¹

Der Gedanke der besonderen Relevanz einer Untersuchung aller Phasen des Lebenszyklus von PV-Anlagen aufgrund der **Asymmetrie** zwischen *Entstehung* von Umweltauswirkungen und der *Nutzung* dieser Technologie wird im Folgenden nochmals aufgegriffen.

Nach den bisherigen theoretischen Überlegungen zum Instrument ELCC und der Technologie Photovoltaik soll in diesem Kap.4 eine Zusammenführung der gewonnenen Informationen stattfinden. Als Ergebnis werden ein Anforderungskatalog und eine Handlungsanleitung für die Durchführung den Rahmen für ein ELCC und seine Anwendung auf Produkte der Photovoltaik bilden.

Zunächst soll jedoch kurz dargestellt werden, warum ein ELCC gerade für die Analyse von PV-Systemen geeignet ist.

4.1 Warum ELCC für PV?

Es sind vor allem die typischen Kritikpunkte an dieser Technologie, die die Antwort auf die Frage liefern: Warum sollte ein ELCC für Produkte der PV durchgeführt werden?

Hierzu sei nochmals an das Eingangszitat dieser Arbeit von EBERT erinnert, der sinngemäß die Kritik aussprach:

- zu hohe Kosten (Ökonomie),
- schlechte Ökobilanz (Ökologie).¹¹²

¹⁰⁹ UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP); SOCIETY FOR ENVIRONMENTAL TOXICOLOGY AND CHEMISTRY (SETAC); LIFE CYCLE INITIATIVE (2005).

¹¹⁰ Vgl. allein die Anzahl der Veröffentlichungen zum Thema in den Anhängen A 10, A 11, A 12, A 13 sowie die Ausführungen zur Auswertung der Inhaltsanalyse in Kap.7 und 8.

¹¹¹ NIEUWLAAR, E.; ALSEMA, E. , S. 2.

Die Eignung des Instrumentes ELCC für die Beantwortung solcher Kritikpunkte wurde bereits mit den Ausführungen in Kap.2 festgestellt. Mit dem Ausgangspunkt der Nachhaltigkeit und der Definition als ein „ökonomisch-ökologisch orientiertes Entscheidungs- und Informationsinstrument“¹¹³ untersucht das ELCC nicht nur die beiden Dimensionen Ökonomie und Ökologie im Einzelnen, sondern versucht auch die Zusammenhänge und Austauschbeziehungen zwischen beiden zu identifizieren und zu interpretieren. Mit anderen Worten: ELCC prüft nicht nur, ob die Kosten der PV tatsächlich zu hoch sind, und ob die Ökobilanz tatsächlich schlecht ist. Es prüft darüber hinaus, ob diese beiden Punkte miteinander zusammenhängen und welche Treiber die möglichen hohen Kosten und die eventuell schlechte Ökobilanz vor allem verursachen könnten. Vielleicht hat sogar ein Treiber auf beide Kritikpunkte den größten Einfluss und kann somit Ansatzpunkt von Systemverbesserungen sein?

Für eine Technologie der Energieversorgung sind Kosten und Ökologie die entscheidenden Kriterien für ihre zukünftige Rolle im Energiemix, sowohl für einzelne Verbraucher bei ihrer Entscheidung, ob sie ihre Dachfläche mit Solarmodulen besser nutzen möchten, als auch für die Politik bei ihrer Entscheidung der Förderung von erneuerbaren Energien und der Frage weiterer Subventionen für nicht-umweltfreundliche Technologien.

Angesichts knapper Ressourcen muss eine Technologie in beiden Fragen (Kosten und Umweltauswirkungen) schlagkräftige *Antworten* liefern, da sich ökonomische und ökologische Zwänge eher verschärfen. Diese Antworten müssen jedoch auch „der Wahrheit entsprechen“, was bedeutet, dass alle Lebensphasen, alle Akteure und alle relevanten Größen (Ganzheitlichkeit) in einem Lebenszyklus eingeschlossen werden müssen. Nur mit tatsächlichen Kosten und tatsächlichen Umweltauswirkungen kann ein sinnvoller Vergleich vorgenommen werden.

Folgende Besonderheiten machen die Anwendung eines ELCC in der Photovoltaik ebenfalls außerordentlich wirkungsvoll:

- Es existiert eine zeitliche Asymmetrie zwischen der Entstehung von Umweltauswirkungen (Herstellung) und der Nutzung (Energiegewinnung, Substitution) der Photovoltaik und damit auch für die Akteure innerhalb des Lebenszyklus. (Ökologie+Lebenszyklus)
- Hohe Investitionskosten stehen nicht-konstanten Rückflüssen über eine lange Nutzungsdauer entgegen (Amortisation?). (Ökonomie+Lebenszyklus)
- Die Frage der Zahlungsbereitschaft für die Photovoltaik ist teilweise an die Umweltfreundlichkeit gekoppelt. (Ökonomie+Ökologie)
- Der Nutzen einer „sauberen“ und regenerativen Energiegewinnung kann mit unterschiedlichen Technologien der Photovoltaik erzielt werden, die nicht die gleichen Kosten und Umweltauswirkungen haben.¹¹⁴ (Alternativenvergleich, Ökonomie, Ökologie und Technologie)

Die drei Ausgangspunkte für ein ELCC (Nachhaltigkeit, Lebenszyklusdenken und Dreidimensionalität (Ökonomie, Ökologie und Technik))¹¹⁵ spiegeln sich auch in diesem Zusammenhang wider.

¹¹² Vgl. Kap.1.1.

¹¹³ Vgl. Kap.2.1.1 und 2.2.3.

¹¹⁴ Vgl. Ausführungen zu Technologien der Photovoltaik in Kap.3.4.1.

¹¹⁵ Vgl. Kap.2.1.

Das Instrument ELCC, das auf Basis integrierter ökonomischer und ökologischer Analyse (Ökonomie+Ökologie, Nachhaltigkeit) über den gesamten Lebenszyklus (Lebenszyklusdenken) die verschiedenen Alternativen (Technologie) miteinander vergleicht, ist also sehr gut geeignet, um die PV und ihre Zukunftsfähigkeit

- sowohl im kleinen Rahmen (Kaufentscheidung Einzelverbraucher),
- mittleren Rahmen (Produkt- und Produktionsportfolio von Herstellern) sowie
- im weiten Rahmen (Politik und Energieversorgung)¹¹⁶

zu bewerten.

Nachdem die Eignung des ELCC auch für die PV festgestellt ist, sollen nun die wichtigsten Anforderungen und Schritte für die Durchführung näher erläutert werden. Zunächst wird jedoch ein Lebenszyklus-Modell für PV-Produkte definiert.

4.2 Lebenszyklusmodell

4.2.1 Zugrundegelegter Lebenszyklus

In der Hinführung zum Verständnis des Instrumentes Environmental Life Cycle Costing wurde mit dem zweiten Ausgangspunkt **Lebenszyklusdenken** (Denkrichtung) bereits ein allgemeines Lebenszyklusmodell eingeführt. Dieses bestand aus den vier Phasen *Forschung&Entwicklung, Herstellung, Nutzung* und *End of Life* (vgl. Abschnitt 2.1.2 bzw. Abb. 3). Dieser allgemeine Lebenszyklus wird nun für eine typische Photovoltaik-Anlage konkretisiert und erweitert. Im Ergebnis wird ein Lebenszyklusmodell für Produkte der Photovoltaik vorgestellt, das Grundlage für die weitere Untersuchung ist und auf dessen Basis ein ELCC für Produkte der PV durchgeführt werden kann.

Im Folgenden sollen kurz die wesentlichen Punkte der einzelnen Phasen näher erläutert werden. Zur Orientierung veranschaulicht Abb. 23 den PV-Lebenszyklus, als Vorlage dient der mögliche Lebenszyklus von kristallinen Si-Zellen.

Forschung & Entwicklung

Während der Phase der Forschung&Entwicklung (F&E) wird das gesamte Produkt geplant und entwickelt. Ausgehend von der Erkenntnis eines Problems oder Bedarfes (Initiierung) werden die Schritte Konzeption, Design und Konstruktion durchlaufen.

Die Relevanz dieser Phase ist vor allem für die Festsetzung (Beeinflussung) von zukünftigen Kosten und ökologischen Eigenschaften sehr hoch, da die hier festgelegten Produkteigenschaften und Materialien i.d.R. nicht mehr verändert werden können.

Bei der Ermittlung von ökonomischen und ökologischen Auswirkungen eines Produktes wird die F&E-Phase jedoch häufig vernachlässigt, da hierbei entstandene Belastungen im Vergleich zum restlichen Lebenszyklus gering sind.

¹¹⁶ Vgl. auch die Ausführungen zu den Ansätzen des ELCC (attributonal, decisional, consequential) in Kap.2.2.4.2, die den Bezug des ELCC zum Umfang einer Entscheidung (kleiner, mittlerer und weiter Entscheidungsrahmen) herstellen.

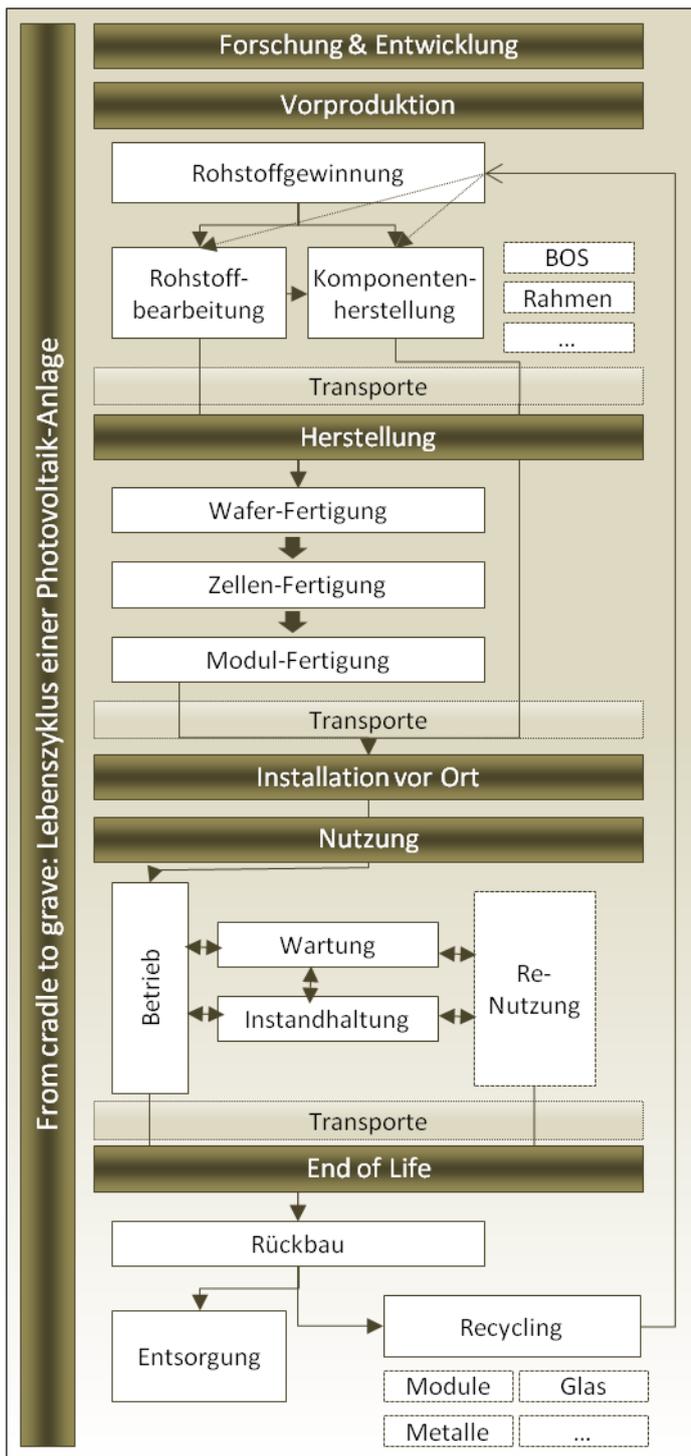


Abb. 23: Lebenszyklusmodell für das ELCC einer PV-Installation
(Eigene Darstellung)

Vorproduktion

In dieser Phase beginnt der Lebenszyklus eines Produktes (im engeren Sinne) mit den ersten Schritten, die zur Herstellung erforderlich sind. Rohstoffe wie z.B. Silizium müssen gewonnen (z.B. in Form von SiO_2) und bearbeitet (Veredelung zu reinem Si) werden.

Die Herstellung von Komponenten wie dem Rahmen eines Moduls, Junction Box und auch späteren Installationselementen (BOS, z.B. Wechselrichter, Tragkonstruktion) wird im vorliegenden Modell ebenfalls der Vorproduktion zugerechnet.

Herstellung

In der Herstellungsphase wird das eigentliche Produkt, also ein PV-Modul gefertigt. Die weitere Unterteilung dieser Phase kann sich nach einzelnen Prozessschritten (Unterphasen) richten und wird für den hier angenommenen Lebenszyklus von kristallinen Siliziumzellen in die Teilphasen Wafer, Zell- und Modul-Fertigung untergliedert. Für andere Technologien werden entsprechende Anpassungen vorgenommen.

Die Herstellungsphase ist für PV-Produkte nicht nur die kostenintensivste Phase im Lebenszyklus, sondern verursacht hinsichtlich der ökologischen Auswirkungen auch den größten Anteil im Lebenszyklus.

Installation vor Ort

Sind die PV-Module und alle zugehörigen Komponenten produziert, kann das System an seinem Nutzungsort installiert werden. Je nach den in Kap.3.5.7 beschriebenen Montagearten (z.B. Freifeldinstallation mit Aufständigung, Flachdach mit Integration) sind hierfür unter-

schiedliche Komponenten und Prozessschritte erforderlich, so dass der Einfluss dieser Phase variieren kann.

Nutzung

Mit Nutzungsdauern von 30 Jahren und mehr (vgl. Kap.3.5) hat die Nutzungsphase den größten zeitlichen Anteil im Lebenszyklus einer PV-Installation. Die ökologisch und ökonomisch negativen Auswirkungen (z.B. Kosten und Emissionen) dieser Phase sind jedoch vergleichsweise gering. So ist der Aufwand für Betrieb, Wartung und Instandhaltung als sehr gering einzuschätzen. Hinsichtlich der positiven Auswirkungen ist die Nutzungsphase allerdings die entscheidende. Monetäre Rückflüsse wie z.B. Einspeisevergütung und ökologisch positive Effekte wie z.B. CO₂-Reduktion durch Substitution fallen während dieser Phase an.

Ist der ursprüngliche Nutzungszeitraum abgelaufen, kann eine Re-Nutzung z.B. an anderer Stelle die Nutzungsphase verlängern, was jedoch bei Solarinstallationen bislang als unüblich eingeschätzt werden kann.

End of Life (EoL)

Mit dem endgültigen Nutzungsende, also der Stilllegung einer PV-Anlage, wird diese zunächst zurückgebaut. Stoffe, die recycled werden können, werden nach einer Aufbereitung wieder dem Lebenszyklus (Rohstoffbearbeitung, Komponentenherstellung etc.) zugeführt, womit der Zyklus zumindest teilweise wieder von Neuem beginnen kann. Die restlichen Stoffe, die nicht verwertet werden können, gehen in die Entsorgung (Verbrennung bzw. Deponie).

Transporte

Innerhalb von Lebenszyklusphasen sowie zwischen einzelnen Phasen finden Transportprozesse statt, die je nach Transportmittel und Entfernung einen größeren Einfluss auf die Ergebnisse eines ELCC haben können. Transporte können dabei den einzelnen Phasen zugeordnet werden und an dieser Stelle in die Bewertung einfließen, oder als ein Prozess-Block (Phase) einzeln bewertet werden. In jedem Falle sollten Transporte nachvollziehbar in ein ELCC einbezogen werden.

From cradle to grave. Der Lebenszyklus einer PV-Anlage ist somit von ihrer Entstehung über die Nutzung bis zur endgültigen Entsorgung durchlaufen.

4.2.2 Besonderheit der End of Life Phase in der Photovoltaik

Von den beschriebenen Lebenszyklusphasen, die durch ein ELCC abgedeckt werden sollten, nimmt die letzte Phase des EoL eine gewisse Sonderrolle ein. Es stellt sich die Frage, was nach der eigentlichen Nutzung bspw. mit Solarmodulen passieren soll. Aufgrund des vergleichsweise jungen flächendeckenden Einsatzes dieser Technologie und Lebensdauern von mehr als 20 Jahren existiert nur ein geringer Erfahrungsschatz¹¹⁷ über den Umgang mit ausgedienten PV-Produkten.

Allerdings mit dem Lebensende wachsender Anlagenzahlen in den letzten und nächsten Jahren gewinnt das Thema Entsorgung bzw. des Recyclings immer mehr an Bedeutung und wird

¹¹⁷ Die Auswertung bisheriger Lebenszyklusanalysen wird dies bestätigen. Vgl. 7.8.2.

auch ausführlicher untersucht. Die Zeitverschiebung aufgrund der hohen Lebensdauern lässt größere Mengen an PV-Anlagen zur Entsorgung bzw. Aufbereitung für 2030 und später erwarten.¹¹⁸

Grundsätzlich stehen Hersteller und Kunden am Anfang des Lebenszyklus vor dem Problem einer Folgenabschätzung über einen sehr langen Zeitraum der Nutzung, so dass vor allem die EoL-Phase mit vielen Unsicherheiten belastet ist.

In Tab. 10 sind einige Faktoren aufgelistet, die bei der Einbeziehung der EoL-Phase zu bedenken sind. Dementsprechend sind durch die unsichere Lage (zeitlich, technisch, ökonomisch, regulativ) in der Zukunft die ökonomischen und ökologischen Folgen schwer einzuschätzen.

Tab. 10: Faktoren, die hinsichtlich der End of Life Phase von PV-Installationen zu bedenken sind (nicht erschöpfend)
(Eigene Darstellung)

EoL-Faktor	Beschreibung
EoL-Zeitpunkt	<ul style="list-style-type: none"> • das Nutzungsende einer PV-Anlage kann nicht klar vorausgesagt werden • unklar, für wann sind Kosten, Umweltauswirkungen usw. anzusetzen
EoL-Kosten bzw – Erlöse	<ul style="list-style-type: none"> • die Kosten für eine Aufbereitung bzw. endgültige Entsorgung können nur grob geschätzt werden (Unsicherheiten hinsichtlich Zeitwert und tatsächlicher Kostenhöhe) • gleiches gilt für den Restwert: fraglich ist, ob dieser überhaupt und wenn ja wie hoch angesetzt werden
EoL-Umweltauswirkungen	<ul style="list-style-type: none"> • Energieaufwand zur Aufbereitung, Recycling-Quoten u.ä. beeinflussen die Ökobilanz • Unsicherheiten der technischen Rahmenbedingungen in der Zukunft erschweren eine korrekte Abschätzung
Technische Rahmenbedingungen	<ul style="list-style-type: none"> • neue technische Verfahren können höhere Recycling-Quoten ermöglichen • der Aufwand für die Aufbereitung bspw. von Alt-Modulen kann durch verbesserte Verfahren minimiert werden (Kostensenkung oder steigende Restwerte, veränderte Umweltbelastungen)
Gesetzliche Anforderungen	<ul style="list-style-type: none"> • gesetzliche Regelungen zu Entsorgung und Aufbereitung von Solarinstallationen sowie verwendeter Materialien können sich im Nutzungszeitraum ändern, wodurch ebenfalls die Kosten beeinflusst werden können
Marktsituation	<ul style="list-style-type: none"> • Rohstoffknappheit, Überkapazitäten auf dem Markt für PV u.ä. verändern die Kosten und die Nachfrage nach Altanlagen und -material

¹¹⁸ GOETZBERGER, A.; HOFFMANN, V.U. (2005), S. 141 ff.

EoL-Faktor	Beschreibung
EoL-Verantwortlicher	<ul style="list-style-type: none"> • je nach Modell trägt die Kosten und weiteren Belastungen der Kunde, der Hersteller oder ein Dienstleister: • der Kunde übernimmt mit dem Kauf der Anlage die Verantwortung • durch Herstellerverpflichtung oder als angebotene Zusatzleistung gegen Aufpreis (→Rücknahmesysteme) ist der Hersteller in der Verantwortung • ein spezialisierter Dienstleister übernimmt die Rücknahme und Aufbereitung bzw. Entsorgung gegen Entgelt

Im Rahmen einer LZA ist die EoL-Phase also zum gegenwärtigen Stand aufgrund mehrerer Unsicherheiten zwar schwer einzubinden. Aufgrund ihrer ökologischen und ökonomischen Relevanz, die auch aus den genannten Faktoren hervorgeht, sollten EoL, die verantwortlichen Akteure, entstehende Kosten und Erlöse sowie Umweltauswirkungen (negativer Art, z.B. Emissionen und positiver Art, z.B. Recycling) jedoch trotzdem in die Analyse integriert werden.

Inwieweit EoL bereits in bestehenden LZA eingebunden wird, wird deshalb in der späteren Untersuchung von besonderem Interesse sein.¹¹⁹

Nach der Definition des zugrundeliegenden Lebenszyklusmodells und einzelner Phasen soll im Folgenden die Schrittfolge zur Durchführung des ELCC für Produkte der PV dargestellt werden.

4.3 Schrittfolge ELCC für PV

Die Zusammenstellung der Schrittfolge für ein ELCC für PV orientiert sich an den vier groben Schritten, die allgemein bei Lebenszyklusanalysen (LZA) durchlaufen werden und bereits in Kap.2.3 aufgezeigt wurden. Diese waren:

- Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen
- Informationsbeschaffung
- Wirkungsabschätzung, Ergebnisuntersuchung, Identifizierung und Interpretation von Hot Spots
- Sensitivitätsanalyse, Auswertung und Diskussion.

Bei der Konkretisierung der einzelnen Schritte werden die Abläufe und Anforderungen aus LCA, LCC und ELCC so miteinander verknüpft, dass sie als eine gemeinsame LZA verstanden werden können.

Die Zusammenstellung der Schritte orientiert sich an den in Kap.2 und 3 gegebenen Informationen zu ELCC und PV sowie an den Anforderungen der ISO Standards 14040/14044¹²⁰, den Richtlinien und Empfehlungen der INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA) 2009¹²¹ und der angegebenen Fachliteratur.

¹¹⁹ Vgl. Kap.7.8.2.

¹²⁰ DIN EN ISO 14040:2006; DIN EN ISO 14044:2006.

¹²¹ ALSEMA, E. u.a. (2009a).

4.3.1 Schritt 1: Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen

Kernanforderung für die Verbindung von LCA und LCC in einem ELCC ist die eindeutige Definition geeigneter Systemgrenzen und einer geeigneten funktionalen Einheit für die LCA und LCC Elemente.¹²² Diese müssen so definiert sein, dass eine gemeinsame Bewertung ökonomischer und ökologischer Größen sinnvoll durchgeführt werden kann. Dieser erste Schritt legt deshalb bereits die Grundlagen für den Erfolg bzw. Nutzen einer LZA.

4.3.1.1 Ziel, Anlass, Zielgruppe und Vorgehen

Mit der Vorgabe von Ziel und Zielgruppe ergeben sich Konsequenzen für die Gestaltung des Untersuchungsrahmens einer LZA, denn in Abhängigkeit davon, wer eine LZA ausführt und warum dies getan wird, müssen die Systemgrenzen gestaltet und der Detaillierungsgrad definiert werden. Es stellt sich weiterhin die Frage nach der Perspektive, aus der die Analyse durchgeführt wird (z.B. Hersteller, Kunde, Gesellschaft, vgl. Kap.2.4), wovon wiederum die zu setzenden Schwerpunkte abhängen. Eine Einordnung nach den unterschiedlichen Ansätzen von LZA (z.B. attributional vs. consequential, prospektiv vs. retrospektiv, vgl. Tab. 3) und dem Zeitpunkt der Durchführung nimmt ebenfalls Einfluss auf den weiteren Verlauf der Untersuchung.

Die Angabe von Ziel, Zielgruppe und Anlass für die Durchführung im ersten Schritt ist aus diesem Grund unerlässlich.

Mögliche allgemeine Ziele sind bereits in den Abschnitten 2.2.4.1 und 2.2.4.2 angesprochen worden. Bei PV-Produkten kann z.B. ein Staat vor der Entscheidung stehen, sehr abgelegene Inselgebiete weiter mit Diesel-Aggregaten zu versorgen, eine sehr aufwendige Netzanbindung vorzunehmen oder mit Hybridsystemen aus Diesel und PV einen dritten Weg zu gehen (Anlass: Investitionsentscheidung, Ziel: Alternativenbewertung) und das Ziel haben, dabei eine ökonomisch und ökologisch ausgewogene Lösung zu finden. Weitere Beispiele für Ziel, Zielgruppe und Anlass können Tab. 11 entnommen werden.

¹²² Vgl. LICHTENVORT, K. u.a. (2008), S. 12.

Tab. 11: Beispiele für Ziel, Zielgruppe und Anlass einer LZA PV
(Eigene Erstellung)

Parameter	Beispiel
Ziel	<ul style="list-style-type: none"> • Entscheidung hinsichtlich unterschiedlicher Alternativen (z.B. 2 Energieversorgungssysteme, Produktportfolio eines Herstellers – Investition in Technologien) • Beschreibung der ökonomischen und ökologischen Eigenschaften eines Produktes/eines PV-Systems (Deklarationen, Reporting) • Bewertung von Verbesserungsvarianten (ökonomisch, ökologisch) (Planung) • Optimierung der Gesamtperformance eines PV-Systems (ökonomisch, ökologisch, technisch), z.B. Dimensionierung
Anlass	<ul style="list-style-type: none"> • Investitionsentscheidung • Kundenforderung • Forschung • gesetzliche Anforderung • Marketingmaßnahmen
Zielgruppe	<ul style="list-style-type: none"> • Kunden • unternehmensinterne Gruppen • Gesetzgeber/internationale Organisationen • Forschungsgruppen

Eine Beschreibung des Vorgehens bei der gesamten Analyse gibt dem Prozess eine Struktur und macht ihn für Dritte nachvollziehbar und transparent. Wird ein standardisierter Verfahrensablauf gewählt, wie z.B. LCA nach ISO 14040/14044 oder ein verbreiteter Ansatz zugrunde gelegt (z.B. nach SETAC), sollten die verwendeten Regelwerke angegeben und beschrieben werden.

4.3.1.2 Alternativenidentifikation, Untersuchungsgegenstand, Systemgrenzen 1

Eine LZA kann zur Beurteilung *eines* Systems oder mehrerer Alternativen eingesetzt werden. Ist es das Ziel der Untersuchung, eine Entscheidung hinsichtlich mehrerer **Alternativen** zu treffen, müssen diese ausgehend von der zu erfüllenden **Funktion** zunächst identifiziert und charakterisiert werden. Neben der Möglichkeit, z.B. eine Investition zu unterlassen (Unterlassensalternative), die ebenfalls in die Betrachtung eingeschlossen werden kann, können bspw. die in Tab. 12 gegebenen Alternativen zur Auswahl stehen. Diese sind weitere PV-Technologien, andere Systeme zur Energiegewinnung oder Hybridsysteme als Kombination beider.

Tab. 12: Alternativenidentifikation
(Eigene Erstellung)

PV-Technologien	Hybrid-Systeme	weitere Technologien
<ul style="list-style-type: none"> • sc-Si, pc-Si • a-Si, Cd-Te • CIS, CIGS • InGa • hcPV • etc. 	<ul style="list-style-type: none"> • Diesel-PV • PV-Wind-Diesel • PV mit Warmwassersystem (Hot Water) • etc. 	<ul style="list-style-type: none"> • Diesel • Netzversorgung • Windkraftanlage • CSP • Kohle, Gas, Atomenergie etc.

Der Umfang des Alternativenpools ist wie bereits erwähnt vielfältig. Führt bspw. eine staatliche Organisation zur Planung der zukünftigen Energieversorgung ein ELCC durch, können auch alle anderen Energieversorgungstechnologien wie z.B. Kohle und Gas in die Bewertung einbezogen werden.

Unabhängig vom Einbezug von Alternativen in die Untersuchung ist eine **eindeutige Beschreibung** des zu analysierenden Produktsystems notwendig. Zunächst sollten hierfür die einbezogenen Komponenten, wie bspw. Wechselrichter und Steuergerät aufgezeigt werden, wodurch eine erste Systemgrenze gekennzeichnet wird (vgl. Abb. 24).

Ebenso kann der Umfang des zu analysierenden Untersuchungsgegenstandes definiert werden nach Zelle, Modul oder System.

Dementsprechend kann die Beurteilung z.B. auf System- oder Modulniveau vorgenommen werden.¹²³

Zur weiteren technischen Charakterisierung eines PV-Systems können die bereits in Kap.3.5 definierten Parameter wie Wirkungsgrad oder Sonneneinstrahlung verwendet werden. Die wichtigsten Parameter und mögliche Ausprägungen sind in Tab. 13 angegeben.

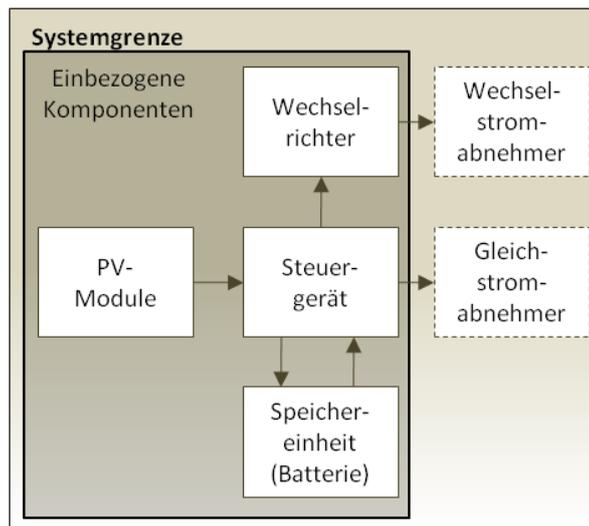


Abb. 24: Systemgrenze 1: Einbezogene Komponenten

(Eigene Darstellung unter Verwendung von CELIK, A.N.; MUNEER, T.; CLARKE, P. (2008), S. 71)

¹²³ Vgl. ALSEMA, E.A.; DE WILD-SCHOLTEN, M.; MOLENBROECK, E. (2003), S. 5.

Tab. 13: ELCC PV - Technische Parameter
(Eigene Erstellung in Verbindung mit ALSEMA, E. u.a. (2009a))

technische Parameter	Konkretisierung, z.B. ¹²⁴
Wirkungsgrad und Performance Ratio	<ul style="list-style-type: none"> • Wirkungsgrad entsprechend Datenblatt, Hersteller bzw. Durchschnittsannahmen für die Technologien, vgl. auch Tab. 7 • Performance Ratio in Abhängigkeit der Installationsart (z.B. 0,75 für roof-top Installationen; 0,80 für Bodeninstallationen) • Nominalangaben können im tatsächlichen Betrieb z.T. bis zu 20% unterschritten werden¹²⁵
Lebensdauer	<p><i>Module</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • 30 Jahre für ausgereifte Technologien <p><i>Komponenten</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Wechselrichter 10-15 Jahre • Montagekonstruktion, Verkabelung, Produktionsanlagen etc. 30 Jahre und mehr
Sonneneinstrahlung	<ul style="list-style-type: none"> • in Verbindung mit der konkreten Installationsart • falls bekannt: Angabe des Standortes des (geplanten) Produktsystems • Ermittlung der lokalen Bedingungen¹²⁶ • falls unbekannt: Durchschnittsannahmen hinsichtlich Installation und Einstrahlung (z.B. Mitteleuropa)
Degradation	<ul style="list-style-type: none"> • gemäß Herstellerangaben • linearer Abfall des Wirkungsgrades auf 80% nach 30 Jahren
weitere Parameter	<p>z.B.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fläche, Stromerzeugung, installierte Leistung • Installationsart • Volllaststundenzahl, Ausfallzeiten, Transmissionsverluste, Abschattung • Produktionsvolumen (für Kostenschätzung)
Back-up Systeme ¹²⁷	<ul style="list-style-type: none"> • Speicherung • Einbezug von Schattentechnologien

¹²⁴ Vgl. zu überwiegenden Teilen ALSEMA, E. u.a. (2009a), S. 3 f.

¹²⁵ Vgl. CLAVADETSCHER, L.; NORDMANN, T.; INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA) (HRSG.) (2007), S. 17.

¹²⁶ Zur Ermittlung siehe z.B. PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM (PVGIS) des JOINT RESEARCH CENTERS der EUROPÄISCHEN KOMMISSION (vgl. EUROPEAN COMMISSION JOINT RESEARCH CENTER (EC JRC) (2009)) oder die Geo-Informationen der NASA (vgl. NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA); ATMOSPHERIC SCIENCE DATA CENTER (2009)) sowie HELIOCLIM (HRSG.) (2009)).

¹²⁷ Mit Schatten- oder Back-up Technologien (vgl. z.B. UNGER, J. (2009), S. 195) wird der nicht-konstanten und nicht 24 Stunden verfügbaren Energieversorgung durch die Photovoltaik Rechnung getragen. So muss entweder eine Speichermöglichkeit vorgesehen werden, um die über dem Bedarf liegende gewonnene Energie für den Fall zu speichern, wenn durch die Module keine Sonnenenergie gewonnen werden kann (z.B. Tag und Nacht). Oder die Differenzen zwischen Angebot und Nachfrage werden durch eine Netzanbindung ausgeglichen. In beiden Fällen entstehen ökonomische (z.B. Kosten für Akkumulatoren, Ausgaben für bezogenen Strom) und ökologische Auswirkungen (z.B. Emissionen bei der Herstellung von Akkumulatoren oder durch Energiegewinnung in fossilen Kraftwerken), weshalb angegeben werden muss, ob diese „Absicherung“ bzw. der Ausgleich in die Analyse einbezogen werden. Bei Speichersystemen ist dies i.d.R. leicht der Fall, während die Quantifizierung von Schattenkraftwerken nur schwer in einem angemessenen Maße möglich ist. Der Einbezug von Back-up Technologien ist jedoch zur Vollständigkeit wünschenswert.

4.3.1.3 Funktionelle Einheit und Referenzfluss

Die **Funktionelle Einheit** (Functional Unit, FU) muss so definiert sein, dass sie dem Ziel der Untersuchung und den gesetzten Systemgrenzen entspricht. Sie richtet sich nach der *Funktion* (Leistungsmerkmale) des Produktsystems bzw. der Systeme und ist zusammen mit einem geeigneten Referenzfluss¹²⁸ als Bezugsgröße zu verstehen, auf die sich später ermittelte Größen wie In- und Outputdaten, aber auch Kosten- und Erlösgrößen beziehen (mathematisch normieren) lassen können.¹²⁹

Tab. 14: Funktionelle Einheiten für PV¹³⁰

(Eigene Erstellung, Verwendung von ALSEMA, E. u.a. (2009a), S. 6 f.)

Bezug	Einheit	häufige Verwendung ¹³¹
Fläche <ul style="list-style-type: none"> • Wafer • Zelle • Modul 	1 m ²	<ul style="list-style-type: none"> • Sachbilanzdaten • Wirkungsabschätzung • nicht empfohlen für den Vergleich von PV-Technologien aufgrund der Einflüsse von Wechselrichter und Performance Ratio
Stückzahl <ul style="list-style-type: none"> • Wafer • Zelle • Modul • PV-System 	1 [Stk]	<ul style="list-style-type: none"> • ökonomischer und ökologischer Bezug
Masse	kg, t	<ul style="list-style-type: none"> • Sachbilanzdaten von Teilprozessen
Stromgewinnung	1 kWh _{el}	<ul style="list-style-type: none"> • Erzeugungskosten • technologieübergreifende Vergleiche • Wirkungsabschätzung
installierte Spitzenleistung	1 W _p	<ul style="list-style-type: none"> • Investitionskosten • nicht für den Vergleich von Umweltauswirkungen geeignet, aufgrund unterschiedlicher erzeugter kWh

Für die Wahl der FU bei der Untersuchung von PV-Systemen stehen mehrere Möglichkeiten zur Verfügung, von denen die wichtigsten in Tab. 14 aufgelistet sind.

Im Verlauf einer LZA kann die Verwendung mehrere Bezugsgrößen (FU) erforderlich sein, da z.B. Produktionsgrößen und Verkaufsgrößen nicht miteinander übereinstimmen oder Teilbilanzen sinnvoller mit den jeweiligen Produktionsgrößen erstellt werden können.

Für die reine Untersuchung von Produktionsprozessen sind Bezüge wie [1 m² Modul- oder Zellfläche] oder [1 Modul], [1 Zelle] gut geeignet, da hierauf Prozesskalkulationen (z.B. Beschaffung) ausgeführt werden. Sachbilanzgrößen werden deshalb häufig auf die jeweilige Fläche des (Zwischen)Produktes (Wafer, Zelle Modul) bezogen.

Investitionskosten hingegen werden i.d.R. auf die Peak-Leistung [EUR/W_p] normiert,

¹²⁸ Vgl. DIN EN ISO 14044:2006, S. 20.

¹²⁹ Unter Anpassung vgl. DIN EN ISO 14044:2006, S. 17.

¹³⁰ Empfehlungen zur Wahl der FU können ALSEMA, E. u.a. (2009), S. 6 f. entnommen werden.

¹³¹ Vgl. hierfür auch Abschnitt 7.

da die Spitzenleistung, wie bereits in Kap.3.5.1 erwähnt, ein wichtiger Parameter zur Dimensionierung von PV-Systemen ist. Die resultierenden Erzeugungskosten wiederum werden i.d.R. auf [1 kWh] bezogen angegeben. Diese FU eignet sich darüber hinaus am besten für den Vergleich mit anderen Energiesystemen, da die Stromerzeugung die gemeinsame Funktion möglicher Alternativtechnologien wie z.B. einem Diesel-Generator und einem PV-System ist.

4.3.1.4 Prozessbeschreibung und Systemgrenze 2

In einem nächsten Teilschritt wird das zu untersuchende System in sog. **Prozessmodule** zerlegt, abgrenzbare Prozesseinheiten im Lebenszyklus des Produktsystems, für die die zugehörigen Stoff- und Energieflüsse gekennzeichnet werden können.¹³² Eine Prozessbeschreibung ist eine wichtige Grundlage für die weitere Analyse, da sie klar definiert, welche Prozesse durchlaufen werden und mit der Abgrenzung ein- und ausgeschlossener Prozessschritte eine zweite Systemgrenze gekennzeichnet wird.

Die Prozessbeschreibung dient darüber hinaus der Strukturierung der LZA. Für die PV kann für die Erstellung der Prozessbeschreibung der Verfahrensablauf zur Herstellung von Solarmodulen und für den Betrieb von PV-Anlagen als Anlehnung dienen. Die Prozessmodule können jedoch auch neben ihrer natürlichen Reihenfolge nach der Möglichkeit der Einflussnahme durch die Entscheidungsträger in Vorder- und Hintergrundprozesse¹³³, oder einer anderen Rangordnung (z.B. Prozesse dritter Ordnung Kapitalgüter, Gebäude etc.¹³⁴) strukturiert werden.

¹³² Vgl. DIN EN ISO 14040:2006, S. 20 ff.

¹³³ Vgl. ALSEMA, E. u.a. (2009), S. 5.

¹³⁴ Vgl. z.B. MEIJER, A. u.a. (2003), S. 279.

Tab. 15: Prozessmodule

(Eigene Erstellung in Anlehnung an BRIEM, S. u.a. (2004), S. 104 ff.; JUNGBLUTH, N.; STUCKI, M.; FRISCHKNECHT, R. (2009), S. 14 ff.)

Prozessmodul	Umfang
Rohstoffgewinnung	<ul style="list-style-type: none"> • alle Prozesse zur Gewinnung der Rohstoffe, insbesondere Rohstoff-Förderung u.ä. • Ergebnis, z.B. Metallurgical Grade Silizium (unterschiedliche Gütegrade des Siliziums)
Rohstoffbearbeitung	<ul style="list-style-type: none"> • Purifikation und Veränderung der Rohstoffe auf die erforderliche Zusammensetzung/Qualität • z.B. electronical, off grade, solar grade Silizium
Wafer-Fertigung/Beschichtung	<ul style="list-style-type: none"> • Teilschritte von Schmelzen, Blockguss bzw. Kristallwachstum/-ziehen über Trennverfahren und Reinigung bis hin zu fertigen Wafern (Silizium) • Substratvorbereitung und Beschichtungsschritte (Dünnschichttechnologie)
Zellen-Fertigung	<ul style="list-style-type: none"> • Oberflächenaufbereitung • p-n-Übergang • Kontaktierung, Strukturierung • Passivierung
Modul-Fertigung	<ul style="list-style-type: none"> • Zellverschachtelung • Verkapselung • Versiegelung • Anschlüsse etc. • (Rahmung)
Herstellung von Zuliefererteilen, insbesondere BOS-Komponenten	<ul style="list-style-type: none"> • i.d.R. sind die BOS-Komponenten Zulieferteile • Herstellung aller mechanischen und elektronischen Systemelemente neben dem PV-Generator
Installation vor Ort	<ul style="list-style-type: none"> • mechanische Installation • elektronische Installation
Betrieb	<ul style="list-style-type: none"> • Reinigung, Wartung, Reparatur
End of Life	<ul style="list-style-type: none"> • Rückbau, Aufbereitung, Entsorgung
Transporte	<ul style="list-style-type: none"> • entweder Teil der Prozessmodule oder als eigenes Prozessmodul • Unterteilung in Vorkette, Produktion, Distribution, EoL

Für die weitere Betrachtung des ELCC werden vereinfacht, ohne technisch eine zu große Detaillierung vorzunehmen, die in Tab. 15 aufgelisteten Prozessmodule von der Rohstoffgewinnung über die Herstellungsprozesse bis hin zu End of Life unterschieden.

Eine detaillierte Darstellung der Prozessschritte für Silizium- und Dünnschicht-Technologien sowie die unterschiedlichen Verfahren können bspw. BRIEM u.a. 2004¹³⁵ oder JUNGBLUTH u.a. 2009¹³⁶ entnommen werden.

Abb. 25 zeigt ein Beispiel einer detaillierten Prozessbeschreibung mit Kennzeichnung der zweiten Systemgrenze (eingeschlossene Prozesse) und der Zuordnung der in Tab. 15 definierten Prozessmodule für die Untersuchung des ELCC in dieser Arbeit.

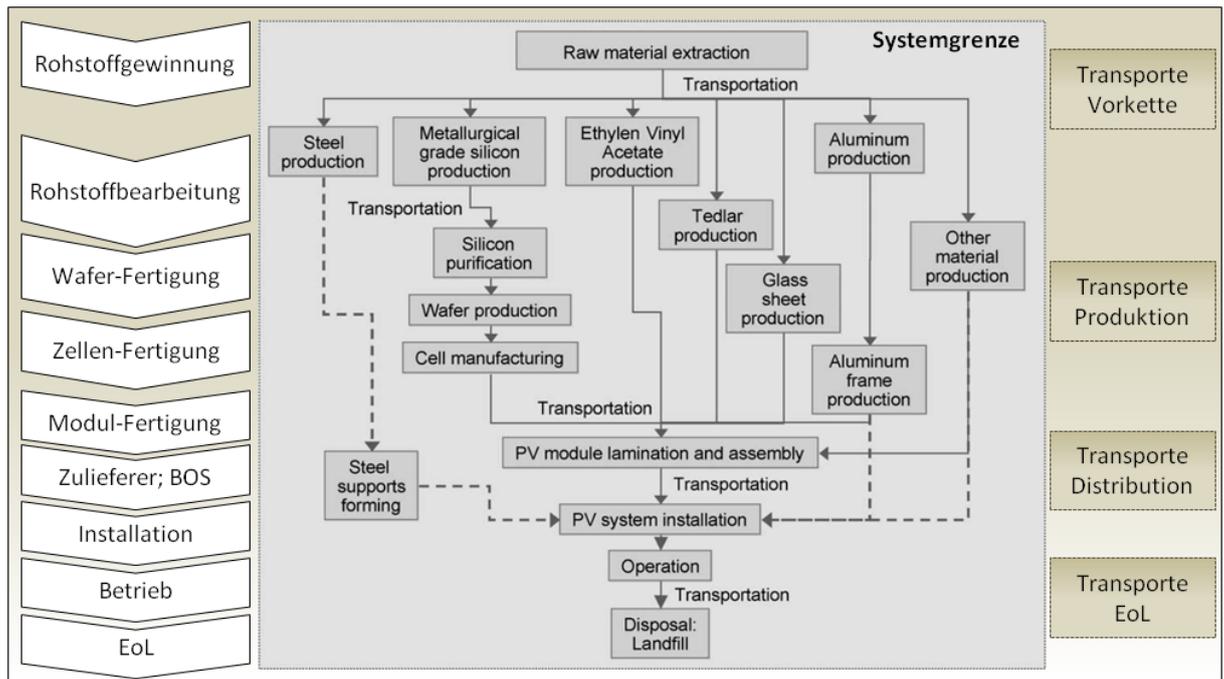


Abb. 25: Beispiel für Prozessbeschreibungen

(Eigene Darstellung unter Verwendung von BATTISTI, R.; CORRADO, A. (2005), S. 955)

4.3.1.5 Cost Breakdown Structure, Kostenmodell¹³⁷

Mit der detaillierten Systembeschreibung ist der Rahmen gegeben, um eine Kosten- und Erlösstruktur für den ökonomischen Teil der Analyse zu erstellen. Die sog. **Cost Breakdown Structure (CBS)**¹³⁸ kann sich z.B. an einen Projektstrukturplan anlehnen und bietet eine systematische Übersicht aller anfallenden Ein- und Auszahlungskategorien¹³⁹.

Die Gestaltung der CBS ist die wichtigste Grundlage für die Ermittlung der Kosten und Erlöse, die mit dem Produktsystem innerhalb eines Lebenszyklus verbunden sind und sollte stets in Abstimmung mit den zuvor definierten Zielen der LZA und dem Untersuchungsrahmen

¹³⁵ Vgl. BRIEM, S. u.a. (2004), S. 104 ff.

¹³⁶ Vgl. JUNGBLUTH, N.; STUCKI, M.; FRISCHKNECHT, R. (2009), S. 14 ff.

¹³⁷ Die Zuordnung des Teilschrittes der Erstellung einer Cost Breakdown Structure könnte gleichermaßen zur Informationsbeschaffung (Schritt 2 der Schrittfolge für ELCC) erfolgen. Aufgrund der Eigenschaft des „Strukturierens“ der Kosten und Erlöse ist jedoch die Einordnung in die Systembeschreibung aus Sicht des Autors zweckmäßig.

¹³⁸ Vgl. hierzu insbes. FABRYCKY, W.J.; BLANCHARD, B.S. (1991), S. 28 ff.

¹³⁹ Vgl. GÜNTHER, E. (2008), S. 259

durchgeführt werden. Möglichkeiten zur Kostenstrukturierung können z.B. in FABRYCKY; BLANCHARD 1991¹⁴⁰ ermittelt werden.

Für ein ELCC sollten die Kosten- und Erlöskategorien vor allem so gestaltet sein, dass möglichst ausführlich Zielkonflikte zwischen Anfangs- und Folgekosten beschrieben werden können¹⁴¹, aber auch im späteren Vergleich mit ökologischen Größen die wichtigsten Treiber und Trade offs ermittelt werden können.¹⁴²

Beispiele für Haupt-Elemente einer CBS für Systeme der PV sind in Abb. 26 aufgelistet.

Der Aufbau orientiert sich an den zuvor genannten Zielen (Zielverfolgung, Trade off zwischen Anfangs- und Folgekosten) sowie den Lebenszyklusphasen (F&E, Herstellung, Nutzung, EoL) und wichtigsten Perspektiven (Hersteller, Nutzer, EoL-Akteur).

Eine Detaillierung bis in tieferliegende Ebenen (z.B. Prozessschritte) ist ebenfalls denkbar. Aufwand und Nutzen bei der Informationsbeschaffung (Schritt 2) sind jedoch abzuwägen und der Grad der Aggregation ist entsprechend anzupassen.

Herstellung	Nutzung	EoL
<i>Hersteller</i>	<i>Kunde, Nutzer</i>	<i>Hersteller, Nutzer, EoL-Akteur</i>
<ul style="list-style-type: none"> • F&E • Anlagen, Maschinen, Gebäude • Wartung, Instandhaltung • Kapital • Verwaltung • Steuern, Subventionen etc. • Material • Zuliefererteile • Energie • Lohn • Herstellungskosten gesamt • Einnahmen (Modulpreis) • Transport • Installation • Umwelt (externe, internalisierte) • etc. 	<ul style="list-style-type: none"> • Anfangsinvestition PV-Anlage • Anfangsinvestition Komponenten • Transport • Installation • Kapitalkosten • Betrieb, Netzanbindung, Versicherung, Back up • Lohn • Wartung, Instandhaltung, Austausch • Steuern, Abschreibung, Subventionen, Anreize • Einnahmen, Einspeisevergütung • Restwert • Energie, Erzeugungskosten • Schadenskosten vermieden • etc. 	<ul style="list-style-type: none"> • Rückbau • Transport • Recycling • Entsorgung, Lagerung • etc.

Abb. 26: Beispiele für Elemente einer CBS (Eigene Darstellung)

Aufgrund der unterschiedlichen Möglichkeiten von PV-Installationen soll an dieser Stelle kein Standardschema für eine CBS vorgegeben werden. Aus Nutzerperspektive seien die wichtigsten Kostenkategorien die Investitions-, Installations-, Wartungs- und Betriebskosten, sowie Erlöse aus Einspeisevergütung und dem Restwert. Aus Herstellersicht sind die Herstellungskosten mit den Elementen Lohn, Material und Energie am bedeutendsten.¹⁴³

Mit der Definition der Ziele und des Untersuchungsrahmens aus technischer, ökologischer und ökonomischer Sicht können nun auf dieser Grundlage die notwendigen Informationen für die weitere Analyse beschafft werden (Schritt 2).

¹⁴⁰ Vgl. FABRYCKY, W.J.; BLANCHARD, B.S. (1991), S. 15 ff.

¹⁴¹ Vgl. BACK-HOCK, A. (1992), S. 704.

¹⁴² Vgl. Kap.2.1.

¹⁴³ Vgl. hierzu auch Kap.7.6.

4.3.2 Schritt 2: Informationsbeschaffung

4.3.2.1 Sachbilanz

Als erster Schritt zur Informationsbeschaffung kann die Darstellung der mit dem System verbundenen Stoff- und Energieflüsse in einem Flussdiagramm den Ausgangspunkt für die Erstellung einer Sachbilanz (Life Cycle Inventory, LCI) bilden.

Die Sachbilanz erfasst die **Massen- und Energieströme**, die dem Produktsystem zugeordnet werden können.¹⁴⁴

In Abb. 27 ist ein Beispiel einer Sachbilanz eines Teilprozesses in der ribbon Si Herstellung dargestellt. Neben der Abgabe des Produktes werden die wichtigsten **In- und Outputs** mit den zugehörigen Stoff- bzw. Energiemengen charakterisiert. Zusatzinformationen, wie z.B. getroffene Annahmen vervollständigen die Sachbilanz als ein transparentes Instrument, auf dessen Basis spätere Abschätzungen durchgeführt werden können.

Produkt (Output)	Products	Unit	Amount	Comment
	ribbon Si wafer	m ²	1	
Inputs	Materials/fuels			
	SOLIDS			
	poly-Si	kg	0,74	polycrystalline silicon of semiconductor or solar grade quality. This value is the total silicon needed minus internally recycled silicon from broken wafers.
	graphite	kg	0,0066	
	GASES			
	argon (Ar)	kg	5,21	
	factory area	m ²		same as for multi-Si wafer; assuming 25 years life of factory
			4,30E-04	
	Electricity/fuel			
	electricity, medium voltage, total	kWh	42,3	
Outputs	Emissions to air			
	argon	kg	5,21	
	Waste to treatment			
	graphite crucibles	kg	0,007	

Abb. 27: Bsp. Sachbilanz: Teilbilanz ribbon Si Wafer

(Eigene Darstellung unter Verwendung von DE WILD-SCHOLTEN, M.J.; ALSEMA, E. (2007), S. 59)

Unter den Eingangsgrößen sind neben den Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffen (RHB) vor allem auch die Energie-Inputs zu erfassen (Strom, Gas, Kohle, Öl etc.). Eine sehr wichtige Anforderung in diesem Zusammenhang ist die **Angabe des verwendeten Energiemixes**. Mit der bezogenen Elektroenergie entstehen durch deren Gewinnung indirekte Emissionen (z.B. CO₂-Ausstoß des örtlichen Kraftwerks). Also Emissionen, die nicht direkt bei der Produktion der PV-Technologie frei gesetzt werden (Prozessemissionen, direkte Emissionen), aber dennoch dem Produktsystem zuzurechnen in einem ELCC zuzurechnen sind. Der Energiemix gibt dabei Aufschluss über die Höhe dieser Emissionen (in

¹⁴⁴ Vgl. GÜNTHER, E. (2008), S. 289; DIN EN ISO 14044:2006, S. 23 ff.

Abhängigkeit des Anteils fossiler Energieträger etc.) sowie die Umwandlungseffizienz (Wirkungsgrad der bezogenen Energie).¹⁴⁵

Bei den Ausgangsgrößen sind vor allem Emissionen in die Luft (CO₂, NO_x, SO_x etc.), Abfälle (Rest-, Sonder-, Gefahrabfälle) und Abwasser (unbehandelt, behandelt) relevant.

Bei Eingabe der In- und Outputs ist auf Vollständigkeit bzw. ausgeglichene Bilanzen zu achten. Eine mögliche Quelle von Ungenauigkeiten können vorgenommene **Allokationen** bei Prozessen mit mehreren Produkten (Kuppelprozess) sein. Zur Zuordnung von Sachbilanzgrößen bei Mehr-Produkt-Prozessen kann auf unterschiedliche Allokationsverfahren zurückgegriffen werden.¹⁴⁶ In jedem Falle ist das Vorgehen der Allokation zu dokumentieren.¹⁴⁷

4.3.2.2 Kosten- und Erlösermittlung, Schätzung und Kostenprofile

Für eine Kosten- und Erlösermittlung, insbesondere Kostenschätzverfahren soll an dieser Stelle auf die Hinweise in der Fachliteratur verwiesen werden.¹⁴⁸

Ein Beispiel für mögliche Kostenanteile und deren Veränderung über den Lebenszyklus ist in Abb. 28 dargestellt.

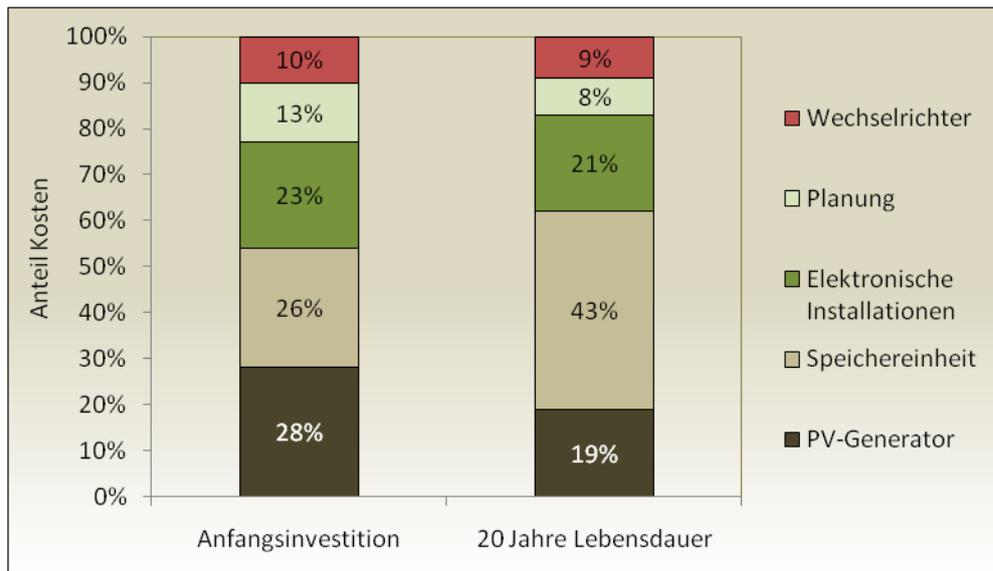


Abb. 28: Mögliche Kostenanteile der Anfangsinvestition und deren Veränderung über den Lebenszyklus (Eigene Darstellung in Anlehnung an LUQUE, A.; HEGEDUS, S. (2003), S. 33)

Zu erkennen ist der wachsende Einfluss der Speichereinheit, der in einer deutlichen kürzeren Lebensdauer und damit in Ersatzinvestitionen über den Lebenszyklus begründet liegt.

¹⁴⁵ Aufgrund der energieintensiven Herstellung von PV-Modulen ist diese Angabe also besonders bedeutend, vgl. auch Kap. 7.5.1.

¹⁴⁶ Vgl. hierzu z.B. die standardisierten Empfehlungen DIN EN ISO 14044:2006, S. 28 f.

¹⁴⁷ Speziell für die PV ergeben sich besondere Anforderungen bspw. durch das eingesetzte Silizium. Der Gütegrad und die Bezugsquellen können für eine Produktion unterschiedlich sein. So werden z.B. solar grade Silizium und Ausschüsse der Halbleiterindustrie der Elektroindustrie (z.B. Chiptechnologie mit höheren Reinheitsanforderungen) gekoppelt verwendet. Die Allokation dieses eigentlichen Abfallproduktes einer anderen Industrie ist also wohl abzuwägen. Vgl.z.B. SHERWANI, A.; USMANI, J. (2010), S. 540-544.

¹⁴⁸ Vgl. z.B. HUPPES, G. u.a. (2008), S. 17-34; FABRYCKY, W.J.; BLANCHARD, B.S. (1991), S. 15ff, 144 ff.

4.3.2.3 Anforderungen an die Daten-Qualität

Bei der Ermittlung der erforderlichen Informationen sind der Umgang und die kritische Beurteilung von Daten eine wichtige Grundlage für die Qualität der LZA. Dies gilt für alle gesammelten Daten, also für alle ökonomischen, ökologischen und technischen Größen.

Der Hauptgrund dafür, dass die Daten-Qualität eine so große Relevanz hat, kann treffend einfach formuliert werden:

„*Garbage in=garbage out*“.

Auch das beste Denkmodell benötigt qualifizierte Eingangsparameter¹⁴⁹, so auch ein ELCC. Die Ergebnisse einer LZA können nur so gut sein wie ihre Datenbasis, woraus sich hohe Anforderungen an diese ergeben.

Zur Sicherung einer guten Datengrundlage und vor allem zur transparenten Beschreibung dieser ist die Vorgabe von Qualitätszielen und –Indikatoren ein geeignetes Vorgehen.

Die wichtigsten Anforderungen an die Daten-Qualität eines LCA, die die ISO Norm 14044 stellt, können allgemein auf LZA übertragen werden. Folgende **Kriterien** werden angesetzt:¹⁵⁰

- zeitlicher und geographischer Erfassungsbereich
- technologischer Erfassungsbereich (Übertragbarkeit der Daten auf das zu analysierende System)
- Präzision (Schwankungsbreiten)
- Vollständigkeit (Datenlücken)
- Repräsentativität
- Konsistenz und Vergleichspräzision (einheitliche Anwendung von Methoden)
- Einschätzung von Datenquellen und Unsicherheiten.

Mit Berücksichtigung dieser Kriterien bei der Datensammlung und Beurteilung kann die Qualität der Datenbasis in die Systembewertung eingehen.

Eine Möglichkeit der Operationalisierung der wichtigsten Qualitätsindikatoren für Daten bietet die sog. **Pedigree-Matrix**¹⁵¹. Mittels dieser können die Daten nach den sechs Indikatoren *Reliabilität, Vollständigkeit, zeitliche Korrelation, geographische Korrelation* und *technische Korrelation* und deren fünf Ausprägungen (Indikatorwerte) bewertet werden. Die konkrete Charakterisierung der Ausprägungen kann in Tab. 16 nachvollzogen werden.

¹⁴⁹ Vgl. z.B. Handbook on life cycle assessment: operational guide to the ISO standards, (2002), S. 491 ff.; EMBLEMSVÅG, J. (2003), S. 291.

¹⁵⁰ Vgl. DIN EN ISO 14044:2006, S. 21.

¹⁵¹ Vgl. FUNTOWICZ, S.O.; RAVETZ, J.R. (1990), S. 139 ff.

Tab. 16: Pedigree Matrix

(Eigene Erstellung in Anlehnung an WEIDEMA, B.P.; WESNÆS, M.S. (1996), S. 167-174)

Indikator	Indikatorwert				
	1	2	3	4	5
Reliabilität	verifizierte Daten auf der Grundlage von Messungen	verifizierte Daten, teilw. auf Basis von Annahmen oder nicht-verifiziert auf Grundlage von Messungen	nicht-verifiziert, teilw. auf Grundlage von Annahmen	qualifizierte Schätzung (z.B. Branchen-experte)	nicht-qualifizierte Schätzung
Vollständigkeit	repräsentative Daten aus einer ausreichend großen Stichprobe von Systemen oder über eine adäquate Periode zum Schwankungsausgleich	repräsentative Daten von einer kleineren Zahl von Systemen aber über adäquaten Zeitraum	repräsentative Daten von einer adäquaten Zahl von Systemen aber über kürzere Zeiträume	repräsentative Daten von einer kleineren Zahl von Systemen, kürzeren Zeitraum oder unvollständige Daten einer adäquaten Zahl und über adäquaten Zeitraum	unbekannte Repräsentativität oder unvollständige Daten einer kleineren Zahl von Systemen und/oder kürzere Zeiträume
zeitliche Korrelation	unter 3 Jahren Datenalter	weniger als 6 Jahre Datenalter	weniger als 10 Jahre Datenalter	weniger als 15 Jahre Datenalter	Datenalter unbekannt oder mehr als 15 Jahre Datenalter
geographische Korrelation	geographische Übereinstimmung von Systemstandort	Durchschnittswerte einer größeren Region, in der das	Daten einer Region mit gleichen Bedingungen	Daten einer Region mit fast gleichen Bedingungen	Datenherkunft unbekannt oder Daten

Indikator	Indikatorwert				
		und Datenmaterial	System gelegen ist		
technische Korrelation	konkrete Daten für das zu untersuchende System	konkrete Daten für ein anderes System gleicher Technologie	konkrete Daten für ein ähnliches System anderer Technologie	Daten umgerechnet auf ein ähnliches System gleicher Technologie	Daten umgerechnet auf ein ähnliches System abweichender Technologie

4.4 Interpretation und Identifizierung von Hot Spots

In diesem Schritt werden die beschafften Informationen weiter untersucht und strukturiert.

Für den ökologischen Teil bedeutet dies die Durchführung einer Wirkungsabschätzung (Life Cycle Impact Assessment) nach ISO 14040/14044¹⁵². Die wichtigsten Indikatoren mit den entsprechenden Wirkungskategorien hierfür sind:

- Treibhausgas-Emissionen
- Kumulierter Energieaufwand (KEA)
- Human und Eco Toxizität
- weitere Emissionen (in Luft und Wasser)
- Abfall.¹⁵³

Vor allem das Global Warming ist als Wirkungskategorie mit dem Bezug zur Klimarelevanz aktueller Energiedebatten¹⁵⁴ zu ermitteln.¹⁵⁵

Aus ökonomischer Sicht stehen für die weitere Untersuchung mehrere Verfahren zur Verfügung. Aufgrund der Tatsache, dass das LCC keine eigenständige Methode ist, sondern vielmehr aus einer Vielzahl von Methoden besteht, die insbesondere aus der Investitionsrechnung und dem Controlling stammen, kann bspw. auf folgendes Bereiche zurückgegriffen werden:¹⁵⁶

- Systembewertung (Nutzwertanalyse, Vergleichsrechnungen/Trade off Studien)
- Verfahren zur Kostenprognose und -steuerung (Kostenstruktur, Kostenbeziehungen, Kostentreiber, Prozesskostenrechnung),
- Berücksichtigung von Risiko, Inflation und Zeit/Diskontierung (Risikoanalyse, Amortisationsrechnung, Sensitivitätsanalyse).

¹⁵² DIN EN ISO 14040:2006; DIN EN ISO 14044:2006.

¹⁵³ ALSEMA, E. u.a. (2009), S. 7 f.

¹⁵⁴ Vgl. Einführung und Vorwort dieser Arbeit.

¹⁵⁵ Für weitere Wirkungskategorien und zur Durchführung der Wirkungsabschätzung siehe Kap.7.5.1 sowie ALSEMA, E. u.a. (2009); DIN EN ISO 14040:2006; DIN EN ISO 14044:2006.

¹⁵⁶ Vgl. BAUM, H.; COENENBERG, A.G.; GÜNTHER, T. (2004), S. 88; BACK-HOCK, A. (1988), S. 8 f.; TAYLOR, W. (1981), S. 34; GÜNTHER, T.; KRIEGBAUM, C. (1999), S. 234.

Eine Übersicht für Methoden mit Bezug zur Photovoltaik geben TALAVERA u.a.¹⁵⁷

Insofern werden auch in der späteren Untersuchung vorhandener Lebenszyklusanalysen verschiedene Methoden eine Rolle spielen, teilweise ohne dass eindeutig *Lebenszykluskosten* benannt werden.

Mit den vorgenommenen ökonomischen und ökologischen Untersuchungen können nun jeweils die wichtigsten Treiber bzw. sog. Hot Spots ermittelt werden. Diese sind die Ansatzpunkte für weitere Systemverbesserungen und führen zu einem besseren Systemverständnis. Insbesondere in diesem Schritt können die Parallelen der ökologischen und ökonomischen Betrachtungen identifiziert und genutzt werden.

4.5 Auswertung, Sensitivitätsanalysen und Handlungsempfehlung

In der Auswertung werden die wichtigsten Geamtergebnisse eingeschätzt, Feststellungen getroffen und Empfehlungen gegeben.

Zur Auswertung der bisherigen Daten und Informationen können Indikatoren verwendet werden. Vor allem Amortisationszeiten spielen in LZA eine große Rolle. So wird gibt z.B. die Energy Payback Time, also die Zeit, die ein PV-System benötigt, um die für seine Herstellung erforderliche Energie während der Nutzung wieder umzuwandeln (zu erzeugen). In ähnlicher Form existieren ökonomische Amortisationsziten, bis eine Investition sich durch Rückflüsse amortisiert hat.

Sensitivitätsanalysen untersuchen durch Variation der wichtigsten Einflussgrößen (i.d.R. die ermittelten Treiber) die Höhe des Einflusses dieser. Gleichzeitig wird die Belastbarkeit der ermittelten Ergebnisse geprüft.

Nach Auswertung aller gewonnenen Informationen und durchgeführten Analysen kann schließlich eine Aussage getroffen werden, bspw. hinsichtlich der Vorteilhaftigkeit eines PV-Systems und es können Entscheidungen getroffen werden.

4.6 Zusammenfassende Übersicht

Das Instrument des Environmental Life Cycle Costings bietet eine ganze Reihe von wichtigen Stärken:

- gemeinsame Betrachtung ökonomischer und ökologischer Kriterien zur Bewertung eines Systems unter Berücksichtigung der technischen Dimension
- Ganzheitlichkeit durch Lebenszyklusorientierung
- strukturierende und Transparenz schaffende Analyse von Produktsystemen, nach Lebensphasen und den Dimensionen Technik, Ökologie und Ökonomie
- individuelle Gestaltungsmöglichkeit des Untersuchungsrahmens auf die gesetzte Zielstellung
- Verbindung mehrerer Perspektiven in Abhängigkeit des Detaillierungsgrades der Analyse und dadurch geeignet zur Anwendung für alle Akteure eines Lebenszyklus
- Fokussierung auf Austauschbeziehungen zwischen den verschiedenen Analyseelementen wie Phasen, Kosten, Umweltaspekten und Akteuren.

¹⁵⁷ TALAVERA, D.; NOFUENTES, G.; AGUILERA, J. (2010), S. 101-111; TALAVERA, D.L. u.a. (2007), S. 447-466.

Aus diesen Vorteilen ergeben sich folgende Chancen:

- Identifizierung und Quantifizierung des Einflusses einzelner Systemparameter auf die ökonomische und ökologische Performance (Treiber)
- Aufdeckung und Berücksichtigung von Interdependenzen zwischen diesen Treibern
- zielgerichtete Beschreibung des Systems
- Optimierung der Gesamtleistung des Systems durch Veränderungen der drei Dimensionen Technik, Ökologie und Ökonomie auf Basis der Analyseergebnisse.

Das Verfahren des ELCC birgt jedoch aufgrund seiner Eigenschaften Schwächen:

- eingeschränkte Vergleichbarkeit von unterschiedlichen ELCC-Ergebnissen aufgrund der freien Gestaltung des Untersuchungsrahmens
- hoher Aufwand der Datenermittlung
- Notwendigkeit einer (gewissen) Expertise in den drei Dimensionen Technik, Ökonomie und Ökologie hinsichtlich des Produktsystems
- die Qualität der Ergebnisse ist stark abhängig von der Daten-Qualität.

Insbesondere ergibt sich hieraus das Risiko der Ableitung von Falschaussagen auf der Grundlage nicht-korrektur Annahmen.

Nach der Definition und Beschreibung des Vorgehens und der wichtigsten Anforderungen an die Durchführung eines ELCC für die PV aus der Theorie sollen die folgenden Kapitel den aktuellen Stand in der Praxis näher beleuchten.

Hierfür wird zunächst eine ausführliche Recherche zur notwendigen Grundlage an vorhandenen LZA für die PV führen. Als Ergebnis kann im Anschluss auf einen Studienpool für die weitere Analyse zurückgegriffen werden. Mit einer Inhaltsanalyse soll das Studienmaterial strukturiert und hinsichtlich seiner Deckung mit den bisher definierten Anforderungen eines ELCC geprüft werden. Die eventuell sich ergebenden methodischen Erkenntnisse werden für die Einbindung in das Anforderungsschema aufgenommen und der Studienpool wird nach seiner methodischen Güte sowie der Ausrichtung (eher LCA, eher LCC, ELCC) als Inventar bestehender LZA strukturiert.

Die wichtigsten inhaltlichen Erkenntnisse wie wesentliche Ergebnisse der Studien können darauf aufbauend ausgewertet werden.

5 Recherche bestehender Lebenszyklusanalysen der Solarindustrie

Nach den theoretischen Überlegungen zur Durchführung eines ELCC für Produkte der Solarindustrie in den vorherigen Abschnitten 2 bis 4, soll im Folgenden das Bewertungsschema um Erkenntnisse aus praktischen Ansätzen/Studien ergänzt werden. Hierzu wird zunächst eine umfangreiche Recherche bestehender Studien, die sich mit entsprechenden Lebenszyklusanalysen beschäftigen, die Grundlage liefern. Das Vorgehen und die Ergebnisse dieser Recherche sollen in Kap.5 kurz dargelegt werden.

5.1 Ziel der Recherche

Mit der Recherche bestehender Lebenszyklusanalysen der Solarindustrie werden folgende Ziele verfolgt:

- umfassende Sichtung durchgeführter Lebenszyklusanalysen (einerseits für die einzelnen Technologien der Photovoltaik¹⁵⁸, andererseits für unterschiedliche Analysemethoden)
- Verschaffung eines Überblicks über den aktuellen Stand bei Lebenszyklusanalysen in der Solarindustrie (sowohl quantitativ als auch qualitativ)
- Bildung eines **Studienpools** zur weiteren Analyse aus methodischer und inhaltlicher Sicht (vgl. Kap.6 bis 8).

Sehr gute und zielgerichtete Rechercheergebnisse sind eine wichtige Grundlage für die später folgenden Schritte dieser Arbeit. Dabei ist ein Kompromiss aus Detailtiefe bzw. Vollständigkeit des Rechercheergebnisses und dem erforderlichen Suchaufwand zu finden¹⁵⁹. Konkret bedeutet dies, dass die insbesondere durch die Angebote des Internets ständig wachsende Zahl an Veröffentlichungen und Suchorten¹⁶⁰ nicht vollständig bearbeitet werden kann, sondern eine Vorauswahl getroffen werden muss. Im Rahmen einer Recherchestrategie werden die wichtigsten Bedingungen für die Recherche festgelegt.

5.2 Recherchestrategie

Um ein möglichst effizientes und effektives Vorgehen zu gewährleisten, wird die Suche mit Hilfe einer Recherchestrategie durchgeführt. Diese ist unter Berücksichtigung der Hinweise von DEPPE, HAPKE sowie der UNIVERSITÄT VON MÜNSTER und UNIVERSITÄT VON KOBLENZ¹⁶¹ überwiegend an die Empfehlungen der UNIVERSITY OF WATERLOO¹⁶² angelehnt. Demnach wird zunächst eine **systematische Suche** an vorher definierten Suchorten mit festen Begriffskombinationen einen sog. Grundstock schaffen. Anschließend wird das **Verfolgen von Ver-**

¹⁵⁸ Der ursprüngliche Recherche-Ansatz schloss auch die Untersuchung von STP-Produkten ein. Eine Studienauswahl für diesen Produkt-Bereich ist als Ergebnis einer ersten systematischen Suche in Anhang 0 aufgelistet. Aufgrund des späteren Ausschlusses der STP aus dem Untersuchungsdesign dieser Arbeit ist diese Liste jedoch nur als Grundlage für weitere Recherchen (z.B. Verfolgung von Querverweisen) zu verstehen, da diese Technologien nicht weiter verfolgt wurden.

¹⁵⁹ HAPKE bezeichnet dies treffend als „Gratwanderung zwischen Zu-Viel- und Zu-Wenig-Finden“, vgl. HAPKE, T. (1999), S. 3.

¹⁶⁰ Mit der stark steigenden Zahl an Suchmöglichkeiten durch das Internet wird zwar eine vollständige Themenererschließung (wie es vor dem Internet-Zeitalter nach Erschließung der Bibliothekskataloge weitestgehend möglich war) unwahrscheinlich. Die starke Aufwandsverringerung bei der Suche mittels Internet-Fachdatenbanken durch i.d.R. sofortige, weltweite Verfügbarkeit der Dokumente, den direkten Import von Literaturangaben in individuelle Referenzverwaltungstools u.ä. eröffnen dabei allerdings eine viel größere Zahl an Nutzungsmöglichkeiten dieses Potentials.

¹⁶¹ Vgl. DEPPE, J. (1997), S. 24-25; DEPPE, J. (1997), S. 108-110; HAPKE, T. (1999), S. 1113-1129; UNIVERSITÄT KOBLENZ; PROJEKT INFORMATIONSKOMPETENZ (2005); UNIVERSITÄT MÜNSTER.

¹⁶² Vgl. UNIVERSITY OF WATERLOO (2009).

weisen (weiterführende Recherche) innerhalb der Fachbeiträge das Bild der vorhandenen Literatur vervollständigen. Zuvor müssen jedoch die *Suchbegriffe* festgelegt werden.

5.2.1 Concept Map und Suchbegriffskombinationen

Ausgehend von einer sog. Mindmap¹⁶³, bei deren Erstellung das Themengebiet mit Hilfe von Assoziationen visuell erschlossen werden soll, wird eine Concept Map¹⁶⁴ erstellt, in der die wichtigsten Grundbegriffe nebeneinander gestellt und mit Unterbegriffen sowie Synonymen unterfüttert werden. Diese werden dann so kombiniert, dass eine Auflistung sinnvoller konkreter Suchanfragen entsteht, die möglichst Dopplungen ausschließt. Das beschriebene Vorgehen ist auszugsweise in Abb. 29 dargestellt.¹⁶⁵

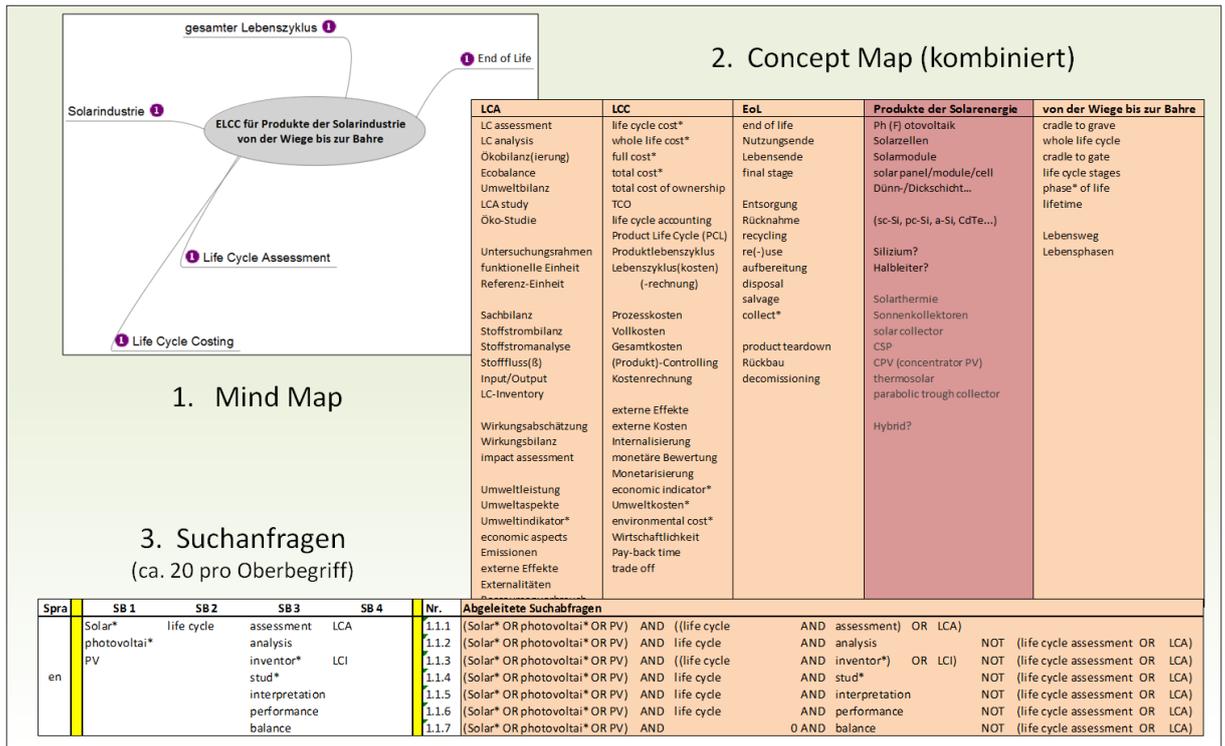


Abb. 29: Recherche nach Mind Map, Concept Map und Suchanfragen (Eigene Darstellung)

¹⁶³ Zur kognitiven Technik des Mind Mapping vgl. z.B. BUZAN, T.; BUZAN, B. (2006).

¹⁶⁴ Vgl. UNIVERSITY OF WATERLOO (2009).

¹⁶⁵ Die ausführliche Darstellung der Suchanfragen für alle Themenbereiche befindet sich in Anhang A 2. Die in A 2 aufgelisteten Begriffe in den Sprachen Spanisch und Französisch werden aufgrund des Rechercheergebnisses für Deutsch und Englisch nicht weiter verfolgt.

5.2.2 Relevante Suchorte

Aus der über die SÄCHSISCHE LANDESBIBLIOTHEK - STAATS- UND UNIVERSITÄTSBIBLIOTHEK DRESDEN (SLUB) bereitgestellten Auswahl an Datenbanken¹⁶⁶ wird aus den Fachgebieten

- *Wirtschaftswissenschaften,*
- *Energie und Umweltschutz und Kerntechnik, sowie*
- *Allgemein/Fachübergreifend*

eine engere Vorauswahl identifiziert, die aufgrund ihrer thematischen Ausrichtung eine gute Trefferquote bei verhältnismäßigem Aufwand erwarten lässt. Diese Liste wird durch einen Vortest weiter eingeschränkt, so dass systematisch die in Kap.5.2.1 festgelegten Suchbegriffskombinationen in sechs reinen **Fachdatenbanken**¹⁶⁷ (Veröffentlichungen in Fachzeitschriften etc.) sowie einem wissenschaftlich orientierten Angebot¹⁶⁸ einer der herkömmlichen Internetsuchmaschinen angewendet wird.

Weiterführende, freie Suchen, die nicht einer starren Systematik folgen, erschließen die Inhalte der wichtigsten Portale des LCA, LCC und der Solarindustrie, Forschungsinstituten, staatlichen Behörden, Nichtregierungsorganisationen (NROs) sowie Unternehmensseiten, auf denen ebenfalls wertvolle Verlinkungen zu relevanten Dokumenten zu finden sind. Darüber hinaus werden Projektseiten der EUROPÄISCHEN UNION¹⁶⁹, die wichtigsten Datenbanken für LCA-Daten¹⁷⁰ sowie die konventionellen Bibliothekskataloge in die Suche einbezogen.

Aufgrund der Erwartungshaltung über das vorhandene Material wird die Recherche zunächst nicht weiter eingeschränkt.

5.2.3 Erwartungshaltung

Die noch recht junge Methodik des ELCC lässt eine geringe Zahl der Ansätze vermuten, die sich gleichermaßen ausführlich mit ökonomischen und ökologischen Aspekten über den gesamten Lebenszyklus beschäftigen.

Stattdessen sind eher Lebenszyklusanalysen im rein ökologischen Bereich (LCA) zu erwarten, da eine energieintensive Herstellungsphase einer ökologisch sehr sauberen Stromerzeugung während der Nutzung entgegensteht.¹⁷¹

In ähnlicher Form werden Kostenanalysen zu finden sein, die der Tatsache Rechnung tragen, dass diese noch immer zu Beginn investitionsintensive Technologie während der Nutzung unter anderem den Vorteil eines frei verfügbaren¹⁷² „Treibstoffs“ bietet. Aus diesem Grund ist eine Betrachtung über den gesamten Lebenszyklus notwendig. Die generelle Verfügbarkeit von konkreten Kostengrößen ist aus Wettbewerbsgründen voraussichtlich als gering einzuschätzen.

¹⁶⁶ Vgl. SÄCHSISCHE LANDESBIBLIOTHEK - STAATS- UND UNIVERSITÄTSBIBLIOTHEK DRESDEN (2009).

¹⁶⁷ Zur Auflistung der genutzten Datenbanken vgl. Anhang A 1.

¹⁶⁸ GOOGLE SCHOLARTM, vgl. Anhang A 1.

¹⁶⁹ Vgl. die wichtigsten darunter bspw. Sustainability Evaluation of Solar Energy Systems (SENSE). ; ECLIPSE. ; New Energy Externalities Development for Sustainability (NEEDS). ; Improving PV Acceptability through Innovative Architectural Design (PVACCEPT). ; CRYSTALCLEAR.

¹⁷⁰ Vgl. EUROPEAN COMMISSION.

¹⁷¹ Vgl. auch Kap.3.

¹⁷² Damit ein vergleichsweise preiswerter Treibstoff.

Für die EoL-Phase ist aufgrund der in Kap. 4.2.2 beschriebenen Punkte mit einer eher geringen Zahl an Analysen zu rechnen.

5.2.4 Kriterien zur Auswahl der Dokumente

Für die Auswahl der relevanten Literatur werden zunächst nur Informationen aus Titel und Abstract herangezogen. Es werden solche Studien, Studienberichte und ähnliche Dokumente ausgewählt, die sich in einer geeigneten Form:

- mit dem **Lebenszyklus** von Produkten der **Photovoltaik** beschäftigen,
- sowohl aus **ökonomischer, ökologischer** als auch **technischer** Sicht, sowie
- Studien/Berichte zum Thema **End of Life**, Recycling etc.

Hinsichtlich des Alters von Dokumenten soll an dieser Stelle zunächst keine Einschränkung vorgenommen werden.¹⁷³

5.3 Rechercheergebnis

5.3.1 Filterung und Sortierung

Aus der stetig wachsenden, großen Menge zur Verfügung stehender Dokumente werden durch die systematische Recherche mit ca. 20.000 Treffern, das Verfolgen von Verweisen und die freie Suche auf Unternehmens- und Projektseiten sowie Fachportalen u.ä. ca. 1.100 Dokumente als „relevant“ aufgenommen und weiter sortiert. Als Ergebnis der Recherche stehen ca. 400 Studien, Projektberichte, Hochschulschriften etc. aus den drei Hauptuntersuchungsbereichen LCA, LCC und EoL mit folgender Verteilung zur Verfügung:

- Lebenszyklusanalysen mit dem Schwerpunkt Life Cycle Assessment (ca. 60%)¹⁷⁴
- Lebenszyklusanalysen mit dem Schwerpunkt Life Cycle Costing (ca. 30%)
- Beiträge¹⁷⁵ zu End of Life (ca. 10%).

Die anderen ca. 700¹⁷⁶ Dokumente beinhalten unter anderem Hintergrundinformationen zu Kosten im Allgemeinen, Umweltaspekten, Solarthermischen Produkten, technischen Fragen und weiteren Themen von Relevanz.

Das Recherchevorgehen mit Filterung und Sortierung ist schematisch nochmals in Abb. 30 dargestellt.

¹⁷³ Für die sich an die Recherche anschließenden Schritte Inhaltsanalyse und Meta-Untersuchung wird eine Einschränkung vorgenommen werden, vgl. Kap.6 bis 8.

¹⁷⁴ Lebenszyklusanalysen, die sich mit ökonomischen und ökologischen Kriterien gleichermaßen beschäftigen, fallen ebenfalls in diese Gruppe.

¹⁷⁵ Ein Teil der Lebenszyklusanalysen (LCA, LCC) enthält nähere Informationen zur End of Life Phase. In diese Gruppe fallen darüber hinaus gehende Beiträge.

¹⁷⁶ Die Mengenverhältnisse dienen eher der Vermittlung eines Eindrucks, in welchen Dimensionen Dokumente berücksichtigt und weiter sortiert wurden, als einer genauen Aufschlüsselung.

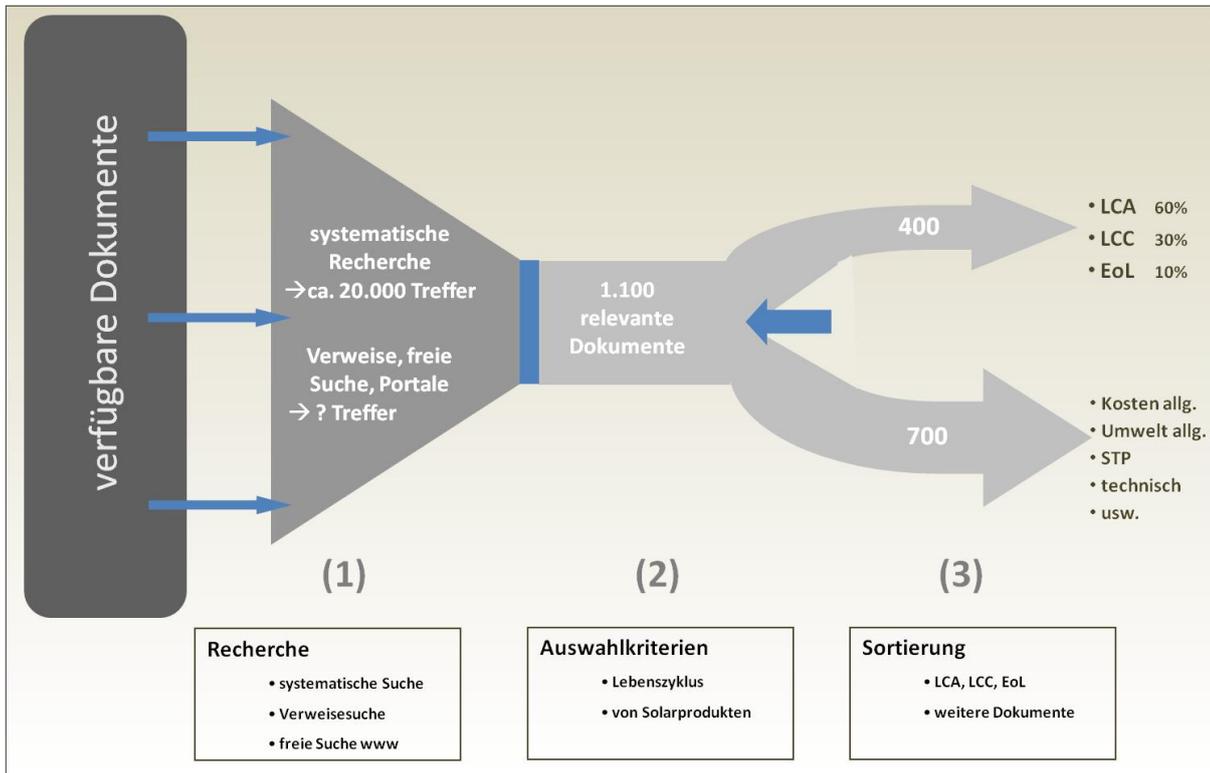


Abb. 30: Recherchefilter und Sortierung
(Eigene Darstellung)

5.3.2 Kritik Recherchevorgehen und -ergebnis

Erfüllung der Erwartungshaltung

Insbesondere die Zahl der gefundenen Lebenszyklusanalysen zeigt, dass die Erwartungshaltung übertroffen wurde, weshalb für weitere Analysen die Studienzahl weiter eingegrenzt werden muss.¹⁷⁷

Vollständigkeit

Eine vollständige Erschließung der gesamten Literatur eines Fachgebietes ist trotz starker Spezialisierung bei der sich exponentiell entwickelnden Zahl von Veröffentlichungen kaum mehr möglich. Gerade die Bereiche Nachhaltigkeit, Kosten und End of Life der Photovoltaik sind wichtiger Gegenstand der aktuellen Diskussion. So sind auch im Laufe der späteren Analyse immer wieder aktuelle relevante Dokumente (z.B. Kongressschriften) eingegangen, die nur zum Teil berücksichtigt werden konnten.

Auch wenn weder alle Suchorte, noch alle Medien durchsucht werden konnten, stellen die recherchierten Studien, Reports und weiteren Dokumentarten aus Sicht des Autors rein quantitativ und qualitativ eine solide Basis für die weitere Analyse dar.

Systematische Recherche vs. Verweisverfolgung

Eine systematische Recherche in Datenbanken mit festen Suchbegriffen (bzw. Kombinationen) bietet den Vorteil, dass über bereits bekannte und etablierte Studien hinaus insbesondere neue, noch nicht breit in der Fachliteratur diskutierte Veröffentlichungen gefunden werden

¹⁷⁷ Vgl. Abschnitt 6.1.5.

können. Gleichzeitig ist der Suchfokus breiter gefasst und nicht beschränkt auf bspw. bestimmte Autorengruppen. Nachteilig ist die weitaus größere Zahl an Treffern¹⁷⁸ und der damit erhöhte Sichtung- und Auswahlaufwand für die Studien.

Im Vergleich hierzu kann das Nachgehen nach Querverweisen in einzelnen Dokumenten (z.B. zitierte Studien) nach dem sog. Schneeballprinzip¹⁷⁹ ein zielgerichtetes Recherchieren erleichtern, da viele Autoren in ihren Studien das bereits vorhandene Material bzgl. ihres Themas sichten und z.T. ausführliche Reviews geben. Hierfür müssen jedoch die Texte einzeln durchgegangen werden, was den Aufwand wiederum erhöht.

Im konkreten Falle der in dieser Arbeit durchgeführten Recherche ist festzustellen, dass die im Anschluss an die systematische Suche durchgeführte Verweisverfolgung zusätzlich eine große Zahl¹⁸⁰ an relevanten Studien liefern konnte. D.h. der Umfang der systematischen Suche¹⁸¹ hätte geringer gehalten werden können.

Zusammengefasst konnte in Kap.5 mittels systematischer und weiterführender Recherche trotz einer moderaten Erwartungshaltung ein geeigneter Literaturpool erschlossen werden, der im Folgenden eingehend charakterisiert und untersucht werden soll.

¹⁷⁸ Diese ist abhängig von der Zielgenauigkeit der Suchanfragen, der zu Beginn einer Recherche und damit vor der Analyse Grenzen gesetzt sind.

¹⁷⁹ Vgl. DEPPE, J. (1997), S. 25.

¹⁸⁰ Mehr als ein Drittel der später analysierten Studien konnte so gefunden werden.

¹⁸¹ Insbesondere ist hiermit die Zahl der Suchbegriffskombinationen gemeint, vgl. Anhang A 2.

6 Inhaltsanalyse von Lebenszyklusanalysen für Photovoltaik-Produkte

Für eine tiefergehende Analyse des recherchierten Studienpools aus fachbezogenen Lebenszyklusanalysen, soll dieser nun aus inhaltlicher und methodischer Sichtweise mittels der Methode der Inhaltsanalyse näher untersucht und beschrieben werden. Zunächst wird kurz das Vorgehen bei der Inhaltsanalyse erläutert, bevor im Anschluss die wichtigsten Ergebnisse dargelegt und Schlussfolgerungen gezogen werden.

6.1 Vorgehen bei der Inhaltsanalyse

6.1.1 Charakterisierung der Methode Inhaltsanalyse

Ausgangspunkt: Eine größere Zahl an Texten zu einem Thema soll anhand relevanter Eigenschaften zunächst strukturiert und charakterisiert werden. Als Ergebnis soll ein nach objektiven Kriterien geordnetes Inventar¹⁸² dieser Texte einen Überblick über den aktuellen Stand zu diesem Thema (im vorliegenden Fall ELCC für PV-Produkte) geben. Im Anschluss sollen Erkenntnisse aus inhaltlichen Merkmalen der Texte für allgemeingültige Aussagen gewonnen werden. Die gesuchte Methode für das weitere Vorgehen muss also die objektiven Kerninformationen einer größeren Zahl von Einzeldokumenten operationalisierbar erschließen und zusammenfassen können.

Werner FRÜH definiert die Inhaltsanalyse, in Anlehnung an die mehr als 50 Jahre gültige Deutung BERELSONS¹⁸³, als eine „...empirische Methode zur systematischen, intersubjektiv nachvollziehbaren Beschreibung inhaltlicher und formaler Merkmale von Mitteilungen...“¹⁸⁴.

Aus der Definition geht hervor, weshalb die Inhaltsanalyse anderen Textanalysemethoden für die vorliegende Aufgabe vorzuziehen ist, da sie per definitionem sehr gut für die *systematische* Untersuchung des in Kap.5 recherchierten Studienpools nach *inhaltlichen* und *formalen* Gesichtspunkten geeignet ist.

Die *Mitteilungen* sind in diesem Falle also Lebenszyklusanalysen für Produkte der Solarindustrie und das erzielte Inventar kann als *intersubjektiv nachvollziehbare Beschreibung* der Merkmale dieser Mitteilungen verstanden werden.

Die Beschreibung der Merkmale der Texte erfolgt im Rahmen der Inhaltsanalyse mit Hilfe eines vorher klar definierten (Objektivierung) und hierarchisch geordneten Kategorienschemas, das aus den deskriptiven bzw. strukturierenden Merkmalsvariablen von Interesse erstellt wird. Im Anschluss werden die Texte sukzessive anhand dieses Schemas durchgegangen und das Vorkommen der Merkmalsvariablen innerhalb des jeweiligen Textes unter Kennzeichnung der konkreten Fundstelle erfasst. Auf diese Weise werden die Informationen der Texte auf das Wesentliche reduziert, dem subjektiven Interpretationsraum werden Grenzen gesetzt

¹⁸² Inventar (latainisch *invenire*= vorfinden) ist in Zusammenhang mit dieser Arbeit – im Unterschied zum betriebswirtschaftlichen Begriff der Inventur nach §241 HGB, vgl. z.B. GABELE, E.; MAYER, H. (2003), S. 51 ff.; JUNG, H. (2006), S. 1040 ff.; HÄRDLER, J.; BRENZKE, D. (2006), S. 422 - i.w.S. zu verstehen als ein Verzeichnis der vorhandenen Texte (Bestände) zu einem Thema innerhalb eines bestimmten Zeitraums. Das Inventar bietet in diesem Sinne die Möglichkeit der Sortierung nach definierten Merkmalen.

¹⁸³ Vgl. BERELSON, B. (1952), S. 18.

¹⁸⁴ FRÜH, W. (2007), S. 27.

und für Auswertungen bzw. tiefer gehende Analysen liegen besser operationalisierbare Datensets zur Weiterbearbeitung vor.¹⁸⁵

Bevor in Kap.6.2 das Kategorienschema für die Inhaltsanalyse zum ELCC für Produkte der Photovoltaik aufgestellt wird, muss im Folgenden zunächst ausgehend von den mit der Untersuchung verfolgten Zielen eine geeignete Ablaufstrategie festgesetzt werden.

6.1.2 Zielperspektiven

Mit der Anwendung der Methode Inhaltsanalyse auf die recherchierten Studien sollen mehrere Ziele erreicht werden. Diese ergeben sich aus unterschiedlichen Perspektiven, aus denen im Rahmen dieser Arbeit Erkenntnisse für das ELCC gewonnen werden sollen.

Zunächst soll eine Gesamtübersicht über die Studien gewonnen werden. Hierzu wird eine Strukturierung der Dokumente nach allgemeinen Merkmalen wie z.B. zeitlicher und geographischer Ursprung der Dokumente erfolgen. Auf dieser Basis kann eine schlichte formale Übersicht der Texte erfolgen.

Aus methodischer Sicht ist dann von Interesse, inwieweit eine vorliegende Studie bereits ein vollständiges Environmental Life Cycle Costing oder Teilanalysen (in den Dimensionen [1] Ökonomie, [2] Ökologie bzw. LCC, LCA) beinhaltet und wie ausführlich der Untersuchungsgegenstand (Produkte der Photovoltaik) charakterisiert wird (Dimension [3] Technik).

Eine möglichst umfangreiche Abdeckung aller Lebenszyklusphasen ist das Ziel des in Kap.2.1.2 beschriebenen cradle-to-grave-Ansatzes bzw. des Ausgangspunktes zwei: Lebenszyklusorientierung. Dementsprechend sollte der gesamte Verlauf im Leben des untersuchten Systems von der Rohstoffgewinnung bis zur Entsorgung betrachtet werden.

Eine komplexe Lebenszyklusbetrachtung aller Phasen kollidiert jedoch möglicherweise mit dem Ziel eines hohen Detaillierungsgrades der gegebenen Informationen für einzelne Phasen, was wiederum aus inhaltlicher Perspektive – einer weiteren Zielperspektive der Inhaltsanalyse - von Relevanz ist. Denn die Angabe von aggregierten Daten oder qualitativen Beschreibungen aus Gründen der Komplexität reduziert den möglichen Erkenntnisgewinn.

Zu guter Letzt stellt in Lebenszyklusbetrachtungen der Umgang mit den verwendeten und ermittelten Daten einen wichtigen Erfolgsfaktor dar. Zur Rolle von Eingangsdaten, dem Umgang mit Unsicherheiten und wie die Datenqualität beurteilt werden kann existiert eine Reihe von Anforderungen.¹⁸⁶

Dabei können nicht die Daten als solche beurteilt werden, sondern lediglich der Umgang mit diesen. Das bedeutet, dass es von Bedeutung ist, ob von Autoren Angaben gemacht werden, woher die verwendeten Daten stammen, ob sie kritisch geprüft¹⁸⁷ wurden, ihre Qualität bewertet wurde etc.^{188,189} Eine inhaltliche Prüfung kann jedoch nicht erfolgen.

In Tab. 17 sind die Zielperspektiven für die Durchführung der Inhaltsanalyse aufgelistet.

¹⁸⁵ Zur ausführlichen Beschreibung der Methodik der hier angewandten zum Teil deduktiven, zum Teil induktiven, strukturierenden, qualitativ-quantitativen Inhaltsanalyse vgl. bspw. FRÜH, W. (2007); BOS, W.; TARNAI, C. (1996), S. 107 ff.; BERLSON, B. (1952); KUCKARTZ, U. (2007); MAYRING, P. (2008); ATTESLANDER, P.; CROMM, J. (2003), S. 215 ff.

¹⁸⁶ Vgl. Kap.4.3.2.3.

¹⁸⁷ Vgl. DIN EN ISO 14044:2006.

¹⁸⁸ Wie bspw. anhand einer Pedigree-Matrix, vgl. Kap.4.3.2.3.

¹⁸⁹ Vgl. „garbage in = garbage out“ Problematik in Kap.4.3.2.3.

Tab. 17: Zielperspektiven der Inhaltsanalyse
(Eigene Erstellung)

Perspektive	Ziel
Gesamtsicht	<ul style="list-style-type: none"> • Strukturierung nach allgemeinen Inhalten und Umfängen (geografische Herkunft, Technologien, Ziel der Studie etc.) • Erstellung eines Inventars bestehender Lebenszyklusanalysen <ul style="list-style-type: none"> ○ aktueller Stand des ELCC für Produkte der Photovoltaik
Methodik	<ul style="list-style-type: none"> • Aufschluss über die methodische Qualität der Lebenszyklusanalysen <ul style="list-style-type: none"> ○ Bezug zu den drei Dimensionen Wirtschaft, Ökologie, Technik ○ Werden die Anforderungen an ELCC erfüllt und in welchem Maße? ○ durchgeführte Schritte innerhalb LCA, LCC, ELCC ○ Angabe wichtigster Parameter zur Beschreibung des Untersuchungsgegenstandes
Lebenszyklus	<ul style="list-style-type: none"> • Abdeckung der gesamten Lebenszyklusphasen (Angaben zu End of Life?)
Inhalt	<ul style="list-style-type: none"> • Charakterisierung der Detailtiefe der enthaltenen Informationen <ul style="list-style-type: none"> ○ Einzelangaben vs. Aggregation ○ qualitative Aussagen, grafische Auswertung • Identifizierung der Ergebnisse
Daten	<ul style="list-style-type: none"> • Einschätzung des Umgangs mit Daten und Unsicherheiten

6.1.3 Ablaufstrategie der Inhaltsanalyse

In Anlehnung an das von MAYRING¹⁹⁰ empfohlene Ablaufschema soll die Inhaltsanalyse nach der in Abb. 31 dargestellten Strategie durchgeführt werden.

Orientiert an den Zielen aus Kap.6.1.2 und den theoretischen Betrachtungen in Kap.2 und 3 wird also zunächst ein theoriegeleitetes¹⁹¹ Kategorienschema entwickelt, dessen Ober- und Unterbegriffe genau definiert werden. Anschließend wird mit diesem Schema eine zufällig ausgewählte Stichprobe¹⁹² in einem Pre-Test analysiert. Erforderliche Anpassungen des Kategorienschemas werden vorgenommen¹⁹³ und der gesamte Studienpool wird anhand des modifizierten Schemas kodiert¹⁹⁴. Durch den Softwareinsatz bei der Analyse (vgl. nächsten Abschnitt) kann das Kodierschema im Bedarfsfall durch neue Kategorien, die sich aus der Textanalyse ergeben¹⁹⁵, ergänzt werden. Auf diese Art soll der mögliche Erkenntnisgewinn erhöht werden.

¹⁹⁰ Vgl. MAYRING, P. (2008), S. 11.

¹⁹¹ Deduktives Vorgehen, vgl. MAYRING, P. (2008), S. 17 f.

¹⁹² Im konkreten Falle wird es eine Stichprobe von 5% der gesamten analysierten Studienmenge sein.

¹⁹³ Die Einschätzung über erforderliche Anpassungen erfolgt qualitativ und nicht auf Basis von statistischen Maßen.

¹⁹⁴ Die Inhaltsanalyse der Texte anhand eines definierten Kategorienschemas wird auch als Kodieren bezeichnet. Die Merkmalsvariablen des Kategorienschemas können entsprechend auch als Codes benannt werden.

¹⁹⁵ Induktives Vorgehen, vgl. MAYRING, P. (2008), S. 17 f.

Nachdem das vorliegende und nach noch zu definierenden Kriterien¹⁹⁶ ausgewählte Studienmaterial analysiert wurde, können themenbezogene Auswertungen (z.B. nach Zielperspektiven wie Methodik, vgl. Kap.7.4) vorgenommen werden. Des Weiteren steht das kodierte Studienmaterial auch für spätere Analysen¹⁹⁷ zur Verfügung.

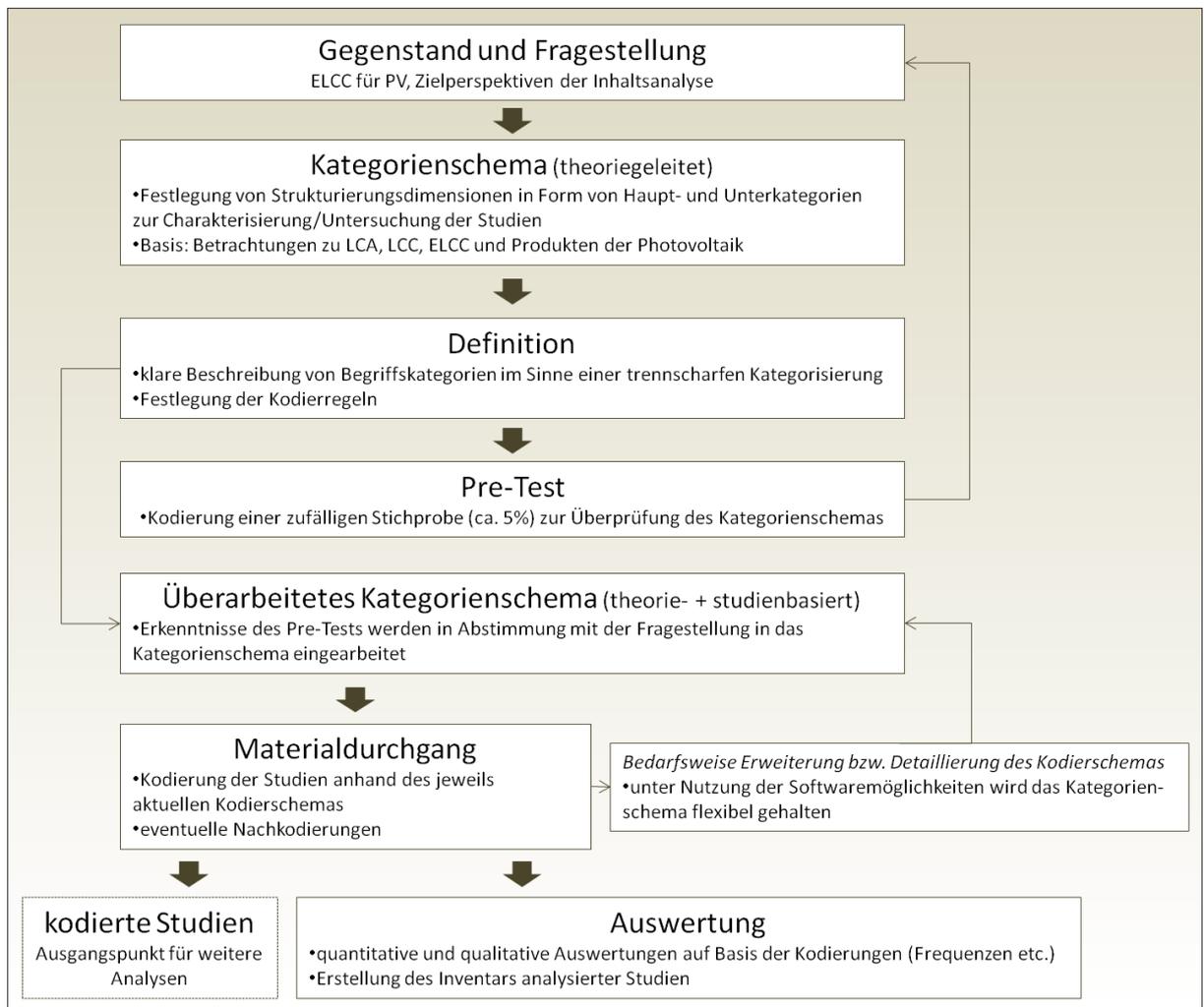


Abb. 31: Ablaufschema Inhaltsanalyse

(Eigene Darstellung. In Anlehnung an MAYRING, P. (2008), S. 11)

6.1.4 Softwaregestützte Ausführung mit ATLAS.TI

Mit dem breiten Einsatz von Computern in allen Lebensbereichen bietet sich auch für die Inhaltsanalyse die Möglichkeit, auf Softwareunterstützung zurückzugreifen.

Insbesondere aufgrund des Vorteils des schnellen Zugriffs auf einzelne Texte und Zitatstellen sowie der einfachen Nachvollziehbarkeit der Kodierungen innerhalb der Dokumente¹⁹⁸ wird

¹⁹⁶ Vgl. Kap.6.1.5.

¹⁹⁷ Bspw. könnten im Nachhinein Zitierungen einzelner Codes eingehender beleuchtet oder detailliert werden. Mit der Weiterverwendungsmöglichkeit des kodierten Studienmaterials kann dies als Ausgangspunkt für weitere Analysen genutzt werden.

¹⁹⁸ Eine konventionell (händisch) durchgeführte Inhaltsanalyse kann diese Nachvollziehbarkeit durch Markierungen an den entsprechenden Stellen zwar auch bieten. Hierzu müssen allerdings die Originaldokumente in Printform (bzw. gescannt) vorliegen. Bei Kennzeichnungen von PDF-Dateien (Portable Document Formate) ist der spätere Zugang zwar leichter möglich, es bleibt jedoch der doppelte Erfassungsaufwand: zunächst Kennzeichnung der relevanten Stelle, anschließend Aufnahme in ein Kodierschema.

die Inhaltsanalyse im vollen Umfang softwaregestützt durchgeführt. Dadurch kann eine insgesamt effizientere Bearbeitung einer großen Dokumentenzahl realisiert werden. Unter Verwendung der Hinweise aus der Fachliteratur¹⁹⁹ und den Herstellerinformationen von zwei Softwareprodukten²⁰⁰ wird nach einem vereinfachten Vergleich²⁰¹ auf Basis qualitativer Kriterien die Software ATLAS.TITM für die weitere Analyse gewählt.

6.1.5 Auswahlkriterien für relevante Studien

Wie bereits in Kap.5.3.2 erwähnt, übertraf das Rechercheergebnis rein quantitativ die Erwartungshaltung über vorhandene Lebenszyklusanalysen, weshalb die Studienzahl für die Inhaltsanalyse nach den in Tab. 18 aufgelisteten Kriterien weiter eingeschränkt werden soll. Die Anzahl soll damit auf ein praktikables²⁰² Maß von ca. 130 Studien gebracht werden.

Tab. 18: Kriterien für die Studienauswahl zur Inhaltsanalyse
(Eigene Erstellung)

Kriterium	Einschränkung	Erläuterung
Veröffentlichungszeitraum	ab 1995 und später	<ul style="list-style-type: none"> • technologische Entwicklung • veraltetes Datenmaterial nicht repräsentativ
Zugang	Dokumente müssen zum Analysezeitpunkt in Dateiform vorliegen ²⁰³	Priorität der Bearbeitung: (1) sofort frei zugängliche Dokumente, bereits in Dateiform (inkl. Möglichkeiten über die SLUB) (2) Fernleihen und andere Printmaterialien, die zunächst eingescannt und per Texterkennung bzw. Optical Character Recognition (OCR)-Software in ein weiterverarbeitbares Format gebracht werden müssen (3) kostenpflichtige Dokumente
Untersuchungsgegenstand (Installation)	terrestrisch	<ul style="list-style-type: none"> • Solarsysteme für den Einsatz in der Raumfahrt o.ä. werden nicht untersucht
Untersuchungsgegenstand (Technologie)	keine	<ul style="list-style-type: none"> • Berücksichtigung aller in Kap.3 beschriebenen Technologien der Photovoltaik

¹⁹⁹ Vgl. ATTESLANDER, P.; CROMM, J. (2003), S. 241-246; KUCKARTZ, U. (2007), S. 12 ff.

²⁰⁰ MAXQDA, ATLAS.TI.

²⁰¹ Der vollständige einfache Vergleich ist in Anhang A 14 nachzulesen.

²⁰² Die Entscheidung, was als praktikabel anzusehen ist, erfolgt nach Durchführung des Pretests entsprechend der subjektiven Einschätzung des Autors über den erforderlichen Aufwand in Konkurrenz zu dem Anspruch, ein möglichst umfangreiches Bild vorhandener Studien abzudecken.

²⁰³ Neben Zeitbeschränkungen bezieht sich dieses Kriterium auf die Zugangsmöglichkeiten zu den Studien. Bearbeitung in der Reihenfolge (1)>(2)>(3). Die Auswahl der einbezogenen Dokumente aus (2) und (3) erfolgt nach subjektiver Einschätzung durch den Autoren unter Berücksichtigung der bereits vorhandenen Anzahl analysierter Dokumente und des informativen Mehrwertes der potentiell zu analysierenden Studien.

Kriterium	Einschränkung	Erläuterung
Inhalt	Studien mit eigenen/neuen Untersuchungsergebnissen	<ul style="list-style-type: none"> • Vermeidung von Dopplungen²⁰⁴ • Inputdaten können aus anderen Untersuchungen übernommen sein²⁰⁵, wenn unter Veränderung von Annahmen oder Anwendung neuer Verfahren neue Ergebnisse ermittelt werden
„objektive“ Qualität	keine	<ul style="list-style-type: none"> • kein weiterer Ausschluss nach Rankings von Fachzeitschriften o.ä. (z.B. Impact Factor)²⁰⁶

6.2 Kategorienschema für die Kodierung während der Inhaltsanalyse

Aufbauend auf den Anforderungen an die Durchführung eines ELCC für PV-Produkte in Kap.4 werden die Ober- und Unterkategorien für die Kodierung in der Inhaltsanalyse festgelegt. Das Kategorienschema ist dabei so gestaltet, dass es gemäß den beschriebenen Zielperspektiven *Gesamtsicht*, *Methodik*, *Lebenszyklus* und *Inhalt* die Struktur für die Analyse des Studienpools stellt.

Auf eine vollständige Darstellung des Kodierschemas wird an dieser Stelle aufgrund des Umfangs verzichtet. Die wichtigsten Kategorien für die Inhaltsanalyse sind in den Anhängen A 3 bis 0 aufgelistet. Eine Beschreibung der Inhalte der Kategorien kann den Ausführungen zur Durchführung eines ELCC für PV in Kap.4, sowie den theoretischen Hintergründen der Kap.2 und 3 und der dort benannten Fachliteratur entnommen werden.

Eine vollständige Liste der ca. 500 Codes, die zur Analyse mit ATLAS.TI verwendet wurden, ist in Anhang A 17 enthalten.

Die wichtigsten Erkenntnisse aus der Analyse des Studienpools sollen nun im Folgenden aufgezeigt werden.

²⁰⁴ Bezieht sich auf Konferenzberichte, die teilweise das gleiche Datenset beschreiben.

²⁰⁵ Der Großteil von Lebenszyklusbetrachtungen bezieht zumindest Teile der Sachbilanzdaten aus anderen Studien, vgl. Kap.7.9.

²⁰⁶ Solche Rangfolgen von Fachzeitschriften bzw. Veröffentlichungsorten geben durch Bestimmung von Indikatoren Aufschluss über die objektive Bedeutung in der Fachwelt, bspw. (Journal) Impact Factor (vgl. z.B. THOMSON REUTERS (HRSG.) (2009); GARFIELD, E. (2006), S. 90). Die tatsächliche Objektivität wird jedoch durch mögliche Einflussnahme in Frage gestellt, vgl. z.B. SEGLEN, P.O. (1997), S. 497; AMIN, M.; MABE, M.A. (2003), S. 347-354; GARFIELD, E. (1996), S. 411.

7 Auswertung der Inhaltsanalyse vorhandener Lebenszyklusanalysen von Produkten der Photovoltaik Und Methodische Erkenntnisse

In dem folgenden Abschnitt werden die wichtigsten Ergebnisse der Inhaltsanalyse in graphischer und verbaler Form vorgestellt. Zugrundeliegende Tabellen, Diagramme und Exportübersichten aus der Inhaltsanalyse können ebenfalls in der beigelegten Excel-Datei Nr.1²⁰⁷ in ausführlicherer Form nachvollzogen werden.

In der Auswertung werden die wichtigsten Punkte aus den in Kap.4.3 ermittelten Schritten für ein ELCC für Produkte der PV behandelt:

- Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen
- Informationsbeschaffung
- Wirkungsabschätzung, Ergebnisuntersuchung, Identifizierung und Interpretation von Hot Spots
- Sensitivitätsanalyse, Auswertung und Diskussion.

Die Reihenfolge der Ergebnisdarstellung wird sich dabei allerdings nicht an dieser Schrittfolge sondern vielmehr an der thematischen Logik orientieren. So werden zunächst die Studien allgemein nach ihrem Ursprung eingeordnet. Anschließend werden die wichtigsten Aussagen zu den analysierten Untersuchungsgegenständen und deren Charakterisierung getroffen. Darauf folgend werden die wichtigsten Erkenntnisse für die ökonomischen und ökologischen Elemente eines ELCC für PV getrennt behandelt bevor schließlich das Vorgehen zur Auswertung und durchgeführte Sensitivitätsanalysen ausgewertet werden. Auf der Grundlage der Auswertung der Inhaltsanalyse und den in diesem Kap.7 dargestellten Statistiken kann dann ein Inventar für Lebenszyklusanalysen zur PV erstellt und eine Einschätzung des aktuellen Standes des ELCC für PV vorgenommen werden.

Zunächst sollen jedoch die in die Inhaltsanalyse ein- und ausgeschlossenen erläutert werden.

7.1 Analyisierte und ausgeschlossene Dokumente

Aus der Zahl verfügbarer möglicher Dokumente wurden mittels Recherche und Sortierung ca. 400 Referenzen als besonders relevant für die weitere Untersuchung herausgefiltert (vgl. Abschnitt 5.3.1 sowie Abb. 30). Davon wiederum kamen ca. 360 Dokumente aus den Bereichen LCA und LCC (bzw. ELCC) für die Inhaltsanalyse in Frage (40 der 400 recherchierten Dokumente waren dem Bereich EoL und nicht den LZA zugeordnet).

Insgesamt wurden unter Berücksichtigung der in Kap.6.1.5 festgesetzten Auswahlkriterien und der Priorisierung bei der Abarbeitung **135 Dokumente** in die Inhaltsanalyse einbezogen (vgl. Abb. 32). Eine vollständige Auflistung der Literaturangaben zu den analysierten Dokumenten befindet sich in Anhang A 10. Studien, Berichte Artikel u.ä., die nicht direkt in die Analyse eingeflossen sind, da sie entweder eine Untersuchung beschreiben, die in einem anderem Dokument ausführlicher dargestellt wird (z.B. Konferenzbeiträge zu einem Projekt und der Projektbericht) oder durch die Auswahlkriterien bzw. Priorisierung nicht einbezogen wurden, sind in Anhang A 12 aufgelistet.

²⁰⁷ Vgl. Datei DA_MK_1_IA_Auswertung.

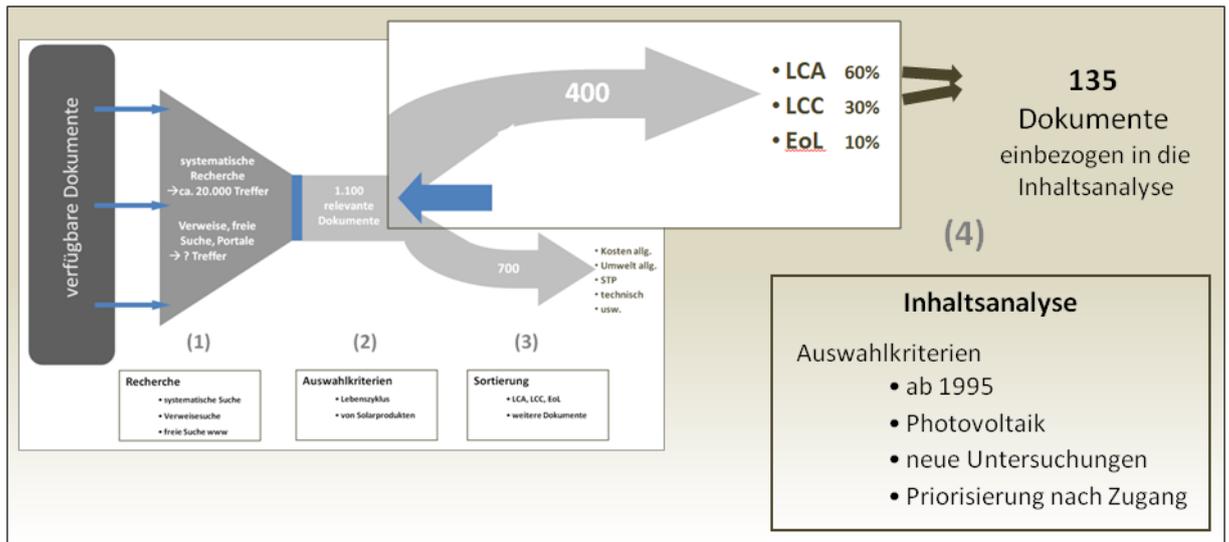


Abb. 32: Filterung Inhaltsanalyse auf Basis der recherchierten Dokumente, vgl. auch Abb. 30
(Eigene Darstellung)

7.2 Charakterisierung der eingeschlossenen Studien hinsichtlich allgemeiner Angaben

7.2.1 Zeitliche Einordnung

Gemäß den Einschränkungen aus Kap.6.1.5 hinsichtlich des Veröffentlichungsjahres von eingeschlossenen Studien ergibt sich die in Abb. 33 dargestellte Übersicht der analysierten Dokumente nach ihrer Veröffentlichung ab 1995.

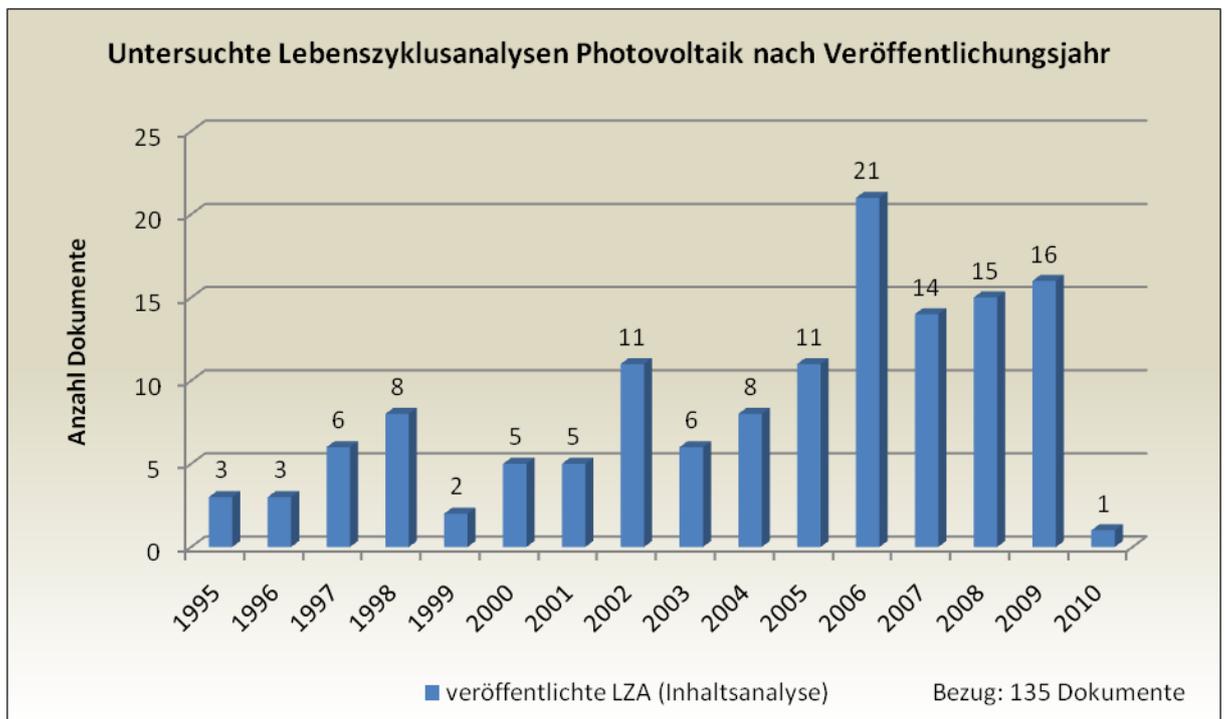


Abb. 33: In der Inhaltsanalyse untersuchte Lebenszyklusanalysen zur Photovoltaik nach Jahr der Veröffentlichung
(Eigene Darstellung)

Insgesamt ist ein leicht steigender Trend in der Aktualität der Zahl der Veröffentlichungen, die analysiert wurden, zu sehen. Aufgrund des Ausschlusses eines Teils der recherchierten

Dokumente nach den in Kap.6.1.5 definierten Kriterien²⁰⁸ ist ein Rückschluss auf die Gesamtheit nur mit großer Unsicherheit möglich.

Der Gesamtverlauf der recherchierten Dokumente (inkl. nicht in die Inhaltsanalyse einbezogener Dokumente) in Abb. 34 zeigt jedoch ebenfalls einen steigenden Verlauf seit 1994, mit einem Höhepunkt im Jahr 2006.

Wäre die Stichprobe der analysierten Studien hinsichtlich der Veröffentlichungszeitpunkte als repräsentativ anzusehen, könnte ein steigender Trend von Veröffentlichungen von LZA über die PV als ein Zeichen für die wachsende Bedeutung der PV und ihrer Analyse über den gesamten Lebenszyklus gewertet werden.

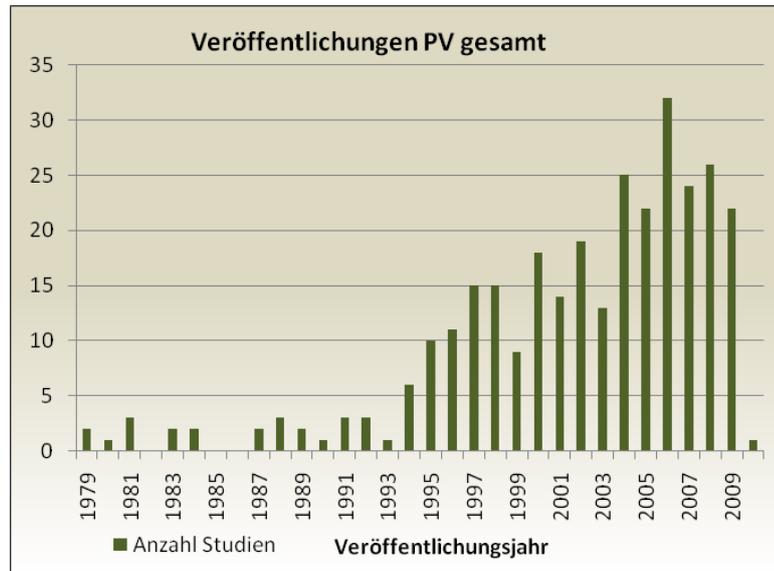


Abb. 34: Trend der Veröffentlichungen PV gesamt
(Eigene Darstellung)

Die geringen Zahlen an Dokumenten pro Jahr lassen jedoch insgesamt nur eine grobe Einschätzung zu, da bereits hinzu gezogene Einzeldokumente das Bild verschieben können. So haben z.B. auch besondere Bedingungen wie die Zusammenstellung von Sonderausgaben von Fachzeitschriften (Sammlung und Veröffentlichung mehrerer Analysen in einer Ausgabe) einen Einfluss auf das Jahr der Veröffentlichung und damit auf die Verteilung in Abb. 33.

Die leichten Peaks der Jahre 1998, 2002 und 2006 in Abb. 33 (Repräsentativität der Stichprobe vorausgesetzt), lassen sich vermutlich durch Projektphasen bzw. Forschungsvorhaben von Institutionen und damit verbundene Veröffentlichungen erklären (z.B. für 2006: Endbericht Projekt NEEDS, IEA PVPS Task 10 Report)²⁰⁹.

Hinsichtlich der Angaben zu Datenherkunft und -qualität, die in Studien die Bewertung eingehen, wird an späterer Stelle eine Konkretisierung vorgenommen werden.

²⁰⁸ Insbesondere die Priorisierung bei der Bearbeitung nach dem Kriterium der Zugänglichkeit schränkt die Repräsentativität zumindest teilweise ein, da unabhängig von Umfang, Qualität oder anderen inhaltlichen Merkmalen Studien nicht in die Analyse einbezogen werden. Aufwand und Nutzen müssen jedoch bei der Studienbeschaffung gut abgewogen werden, wodurch die Priorisierung aus Sicht des Autors gerechtfertigt ist.

²⁰⁹ FRANKL, P. u.a. (2006); GAIDDON, B.; JEDLICZKA, M. (2006).

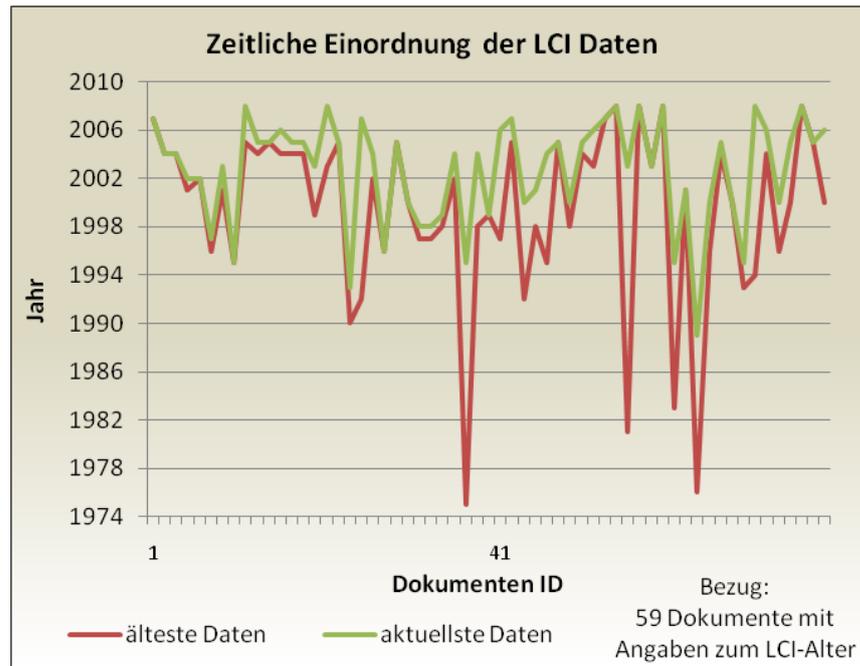


Abb. 35: Inhaltsanalyse - zeitliche Einordnung der LCI Daten, wenn angegeben (Eigene Darstellung)

Für die zeitliche Einordnung der in die Inhaltsanalyse einbezogenen Studien soll ebenfalls die Aktualität der verwendeten Daten Aufschluss geben.

Es werden nur zum Teil konkrete Angaben zum Datenalter in den Studien gemacht, weshalb diese zeitliche Einordnung nur ein grobes Bild liefern kann. Abb. 35 zeigt den Verlauf der Bezugsjahre von Life Cycle Inventory (LCI) Daten. Einbezogen sind die Angaben aus 59 Studien, die konkrete Jahreszahlen angegeben haben. Oftmals ist nicht ein einzelnes Basisjahr sondern vielmehr Zeiträume angegeben, in denen Daten ermittelt wurden. Hieraus ergeben sich zwei Verläufe für das minimale und maximale Alter (grün bzw. rot). Wurde nur ein Wert angegeben, ging dieser in die aktuellsten Daten ein.

Das Bild zeigt, dass der Großteil der Sachbilanzen auf Basis von Daten zwischen 1996 und 2007 erstellt wurde, was erwartungsgemäß mit dem Veröffentlichungszeitraum korrespondiert. Mehr als 80% der ältesten und knapp 90% der aktuellsten Daten sind von 1996 oder aktueller (vgl. Tab. 19).

In der Regel versuchen die Autoren, den aktuellsten Stand der Technik wiederzugeben, was i.d.R. mit einem Nachlauf von 1-5 Jahren realisiert wird. Die Ausreißer bis 1975 resultieren aus detaillierten Sachbilanzangaben und Umrechnungsfaktoren etablierter Prozesse (z.B.

Tab. 19: angegebenes Datenalter (LCI) in Zahlen (Eigene Erstellung)

LCI Datenalter, angegeben in 59 Studien				
nach Jahr	kumuliert absolut		kumuliert prozentual	
	älteste	aktuellste	älteste	aktuellste
2005	13	27	22,0%	45,8%
2000	35	47	59,3%	79,7%
1996	48	53	81,4%	89,8%
1990	55	58	93,2%	98,3%
1974	59	59	100,0%	100,0%

Stahlbearbeitung für BOS-Komponenten). So verwenden auch die Autoren des aktuellen ECOINVENT-Berichtes zur Photovoltaik von 2009²¹⁰ sowie die Autoren der Life Cycle Inventories des CRYSTALCLEAR Projektes²¹¹ (ausführlichste öffentlich verfügbare Sachbilanzen zur Photovoltaik²¹²) nicht nur die aktuell ermittelten Daten, sondern für einige Teilprozesse z.T. auch Annahmen aus 15-20 Jahre alten Studien²¹³, da die dort aufgenommenen Daten noch immer als beste Schätzungen angesehen werden können.

7.2.2 Regionale Charakterisierung

Zur regionalen Charakterisierung des analysierten Studienpools gibt zunächst die regionale Herkunft der Ersteller (Autoren und Institutionen) Auskunft. Diese ist bildlich in Abb. 36 dargestellt. Es soll ein grober Eindruck²¹⁴ vermittelt werden, wo auf der Welt Lebenszyklusanalysen zur Photovoltaik durchgeführt werden. Die Verteilung folgt erwartungsgemäß der weltweiten wirtschaftlichen Entwicklung von Staaten und Regionen. Insbesondere aus Mittel- und West-Europa, den USA und Japan stammen die meisten der Lebenszyklusanalysen. In Südamerika, Afrika, Osteuropa und großen Teilen Asiens hingegen wurden nahezu keine Untersuchungen hierzu durchgeführt.²¹⁵



Abb. 36: Herkunft der Autoren/Institutionen der analysierten Lebenszyklusanalysen²¹⁶
(Eigene Darstellung)

²¹⁰ JUNGBLUTH, N.; STUCKI, M.; FRISCHKNECHT, R. (2009).

²¹¹ DE WILD-SCHOLTEN, M.J.; ALSEMA, E.A. (2007).

²¹² Vgl. Excel-Auswertung in beigefügter Datei Nr.1.

²¹³ Vgl. z.B. HAGEDORN, G. u.a. (1992); HAGEDORN, G. (1989), S. 542-545; PALZ, W.; ZIBETTA, H. (1991), S. 211-216.

²¹⁴ In Abb. 36 ist nicht jeder einzelne Autor erfasst, sondern der Ursprung der Autoren/Institutionen pro Dokument. Kamen die Autoren aus unterschiedlichen Regionen, wurde dies ebenfalls aufgenommen, weshalb sich Anzahl der Markierungen, Anzahl der analysierten Dokumente und Anzahl der Autoren unterscheiden.

²¹⁵ Der Einfluss der Recherchekriterien *Sprache* und *Suchorte* muss natürlich berücksichtigt werden. So würde eine Recherche in weiteren Sprachen und den entsprechenden Datenbanken evt. weitere Studien aus anderen Regionen ermitteln. Wie jedoch in Kap.5.3.2 bereits festgestellt, kann der ermittelte Studienpool, und damit auch die regionale Verteilung der Autoren, als repräsentativ angesehen werden.

²¹⁶ Markierungen ohne konkrete Angabe der Anzahl kennzeichnen 1-3 Autoren bzw. Dokumente.

Die zweite Möglichkeit der regionalen Charakterisierung der analysierten Studien richtet sich nach den geplanten oder bereits existierenden Solaranlagen, die bewertet werden (Standort des Produktsystems). Das Bild der Produktsysteme in Abb. 37 ist erwartungsgemäß differenzierter als die Ursprünge der Autoren. Zur Einordnung der Energiegewinnungspotentiale ist die vorhandene Sonneneinstrahlung über die Weltkarte gelegt (vgl. auch Abb. 21).

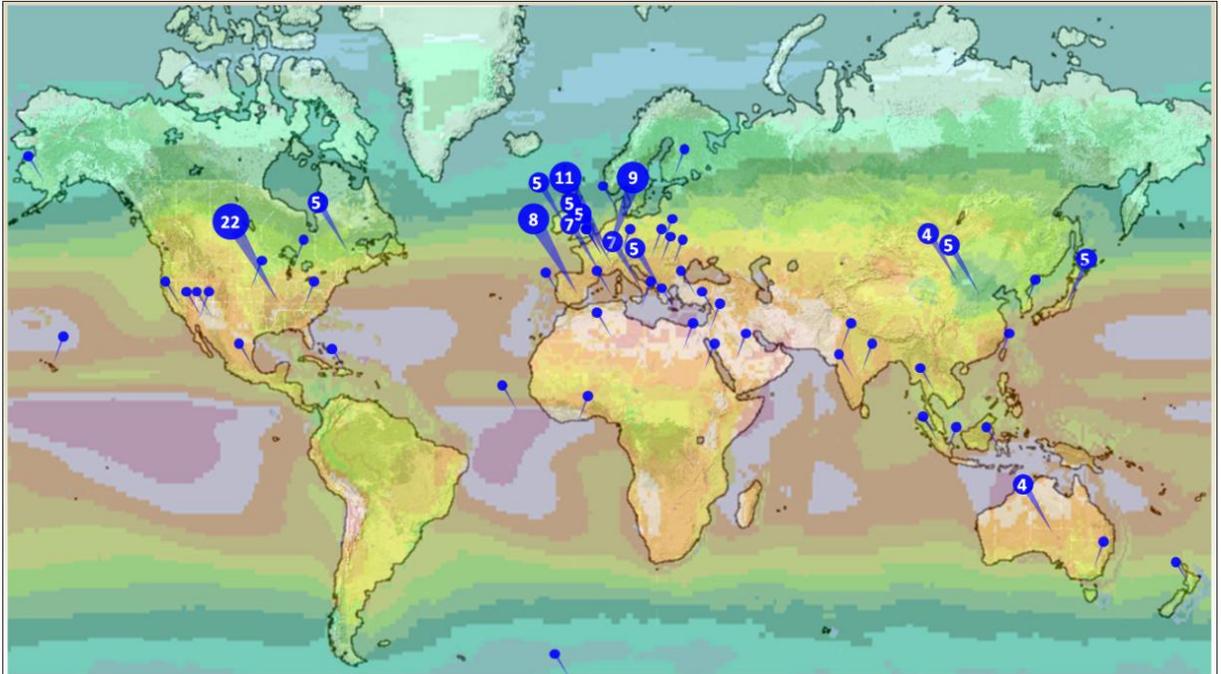


Abb. 37: Inhaltsanalyse - Standorte der analysierten Produktsysteme
(Eigene Darstellung)

Es lässt sich kein eindeutiger Trend zur Planung/Bewertung von Anlagen entlang des Sonnengürtels um den Äquator feststellen, der das größte Potential zur Stromerzeugung bieten würde. In den meisten Studien verwenden Autoren die lokalen Bedingungen ihres eigenen Standortes (bzw. Standardbedingungen für z.B. Mitteleuropa).

Einen kleinen Ausreißer in die strahlungsarmen absolut nördlichsten bzw. südlichsten Regionen der Erde stellt die Planung einer PV Installation an der südafrikanischen Antarktisstation SANAE IV dar.²¹⁷

7.3 Untersuchungsgegenstand

7.3.1 Technologien

Die Verteilung der in den Studien analysierten Zelltechnologien zeigt ein ähnliches Bild wie die weltweite Verbreitung der Zelltypen, gemessen an ihren Marktanteilen (vgl. Abb. 15).

Die meisten LZA beschäftigen sich mit pc-Si und sc-Si Zellen. Auf Rang drei und vier liegen wie auch in der Verkaufsstatistik a-Si und CdTe. Diese Verteilung liefert also ein gutes repräsentatives Bild aller LZA für die reale Verbreitung dieser Zelltypen.

²¹⁷ Vgl. OLIVIER, J.R.; HARMS, T.M.; ESTERHUYSE, D.J. (2008), S. 1073-1084.

Alle weiteren Zelltypen gehen mit 20% etwas überbewertet in die Auswertung mit ein, was jedoch aufgrund der Gesamtzahl von 135 Dokumenten und der großen Zahl an weiteren Zelltypen nicht zu vermeiden ist.

Schließlich sei erwähnt, dass ein Teil der Dokumente lediglich Photovoltaik allgemein untersucht, ohne die Zelltechnologie genau anzugeben. Dies ist insbesondere bei Technologievergleichen mit anderen Stromerzeugungstechnologien oder Hybrid-Systemen zu beobachten.

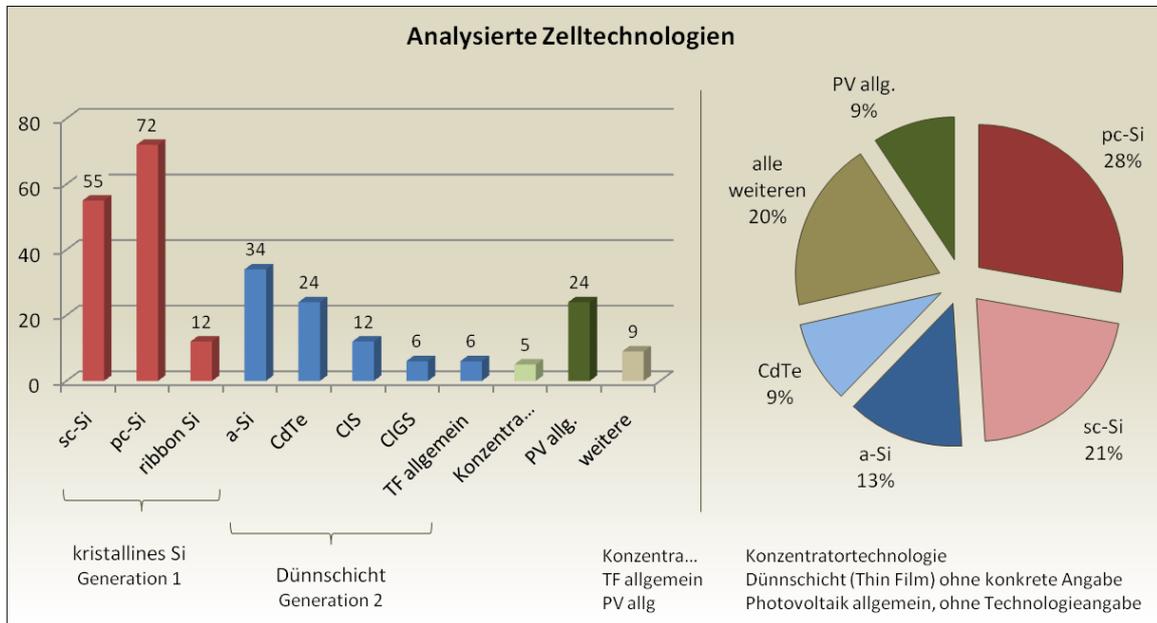


Abb. 38: Inhaltsanalyse - Analysierte Zelltechnologien
(Eigene Darstellung)

7.3.2 Alternativenvergleiche

Optional kann eine Lebenszyklusanalyse als Vergleich von mehreren Alternativlösungen durchgeführt werden.

In den 135 Dokumenten, die in die Inhaltsanalyse einbezogen wurden, wurden in 65 Dokumenten (45,9%) Alternativen zum Untersuchungsgegenstand identifiziert und bewertet.

Unter den analysierten Alternativen waren alle der in Kap.4.3.1.2 definierten Kategorien vertreten (intra-technologisch mit weiteren PV-Technologien, Hybrid-Systeme aus mehreren Energieerzeugungstechnologien und weitere Stromgewinnungstechnologien wie Diesel, Kohle und Gas).²¹⁸

²¹⁸ Eine quantitative Bewertung der unterschiedlichen Alternativ-Kategorien (wie oft wurde womit verglichen) wäre ein Ansatzpunkt für eine Code-Detaillierung, die jedoch mit Rücksicht auf andere Auswertungsschwerpunkte nicht verfolgt werden kann.

7.4 Methodische Erkenntnisse aus der Inhaltsanalyse

7.4.1 Wahl der Funktionellen Einheit

Für die in Kap.4.3.1.3 vorgestellten möglichen Funktionellen Einheiten (FU) [1 kWh], [1 W_p], [1 m²], [1 Modul] etc. ergibt sich die in Abb. 39 dargestellte Häufigkeitsverteilung der Verwendung in den recherchierten und für die Untersuchung ausgewählten, vorhandenen LZA.²¹⁹

Am häufigsten wurde demnach mit einer Verwendung in 65,2% der Studien die erzeugte Elektroenergie als Bezug gewählt. Die Spitzenleistung in Watt-Peak [1 W_p] ist mit 43,7% die zweithäufigste Bezugsgröße in den Studien.

Dieses Ergebnis entspricht den Erwartungen, da sich beide Größen für ökonomische und ökologische Bezüge gleichermaßen eignen.

So werden die Erzeugungskosten, gemessen in [EUR/kWh_{el}] als Alternativenvergleichsgröße genutzt, aber auch ökologische Wirkungsindikatoren in der Regel auf 1 kWh bezogen (z.B. GWP in [kg CO_{2eq}/kWh_{el}]). Die Peak-Leistung wird vor allem als Bezug für Investitionen und Beschaffungspreise [1 EUR/W_p] verwendet.

Der Bezug auf die Zell- oder Modulfläche ist eher in ökologischen Elementen (z.B. Sachbilanzen) vertreten, womit sich eine Verwendungshäufigkeit von 28,9% ergibt. Ein Modul bzw. das gesamte PV-System werden in 21,5% der Studien als Bezug genutzt und alle weiteren angegebenen Bezüge wie [1 Wafer], [1 Zelle], [1 kg] usw. werden mit zusammen 15,6% eher seltener verwendet.

Wie bereits in Kap.4.3.1.3 angesprochen, ist im Verlauf einer LZA aus Praktikabilitätsgründen häufig die Verwendung mehrerer Bezugsgrößen bzw. FU erforderlich, was sich auch in der Praxis durch die Angabe mehrerer FU innerhalb einer Studie in 52,6% der Dokumente bestätigt.

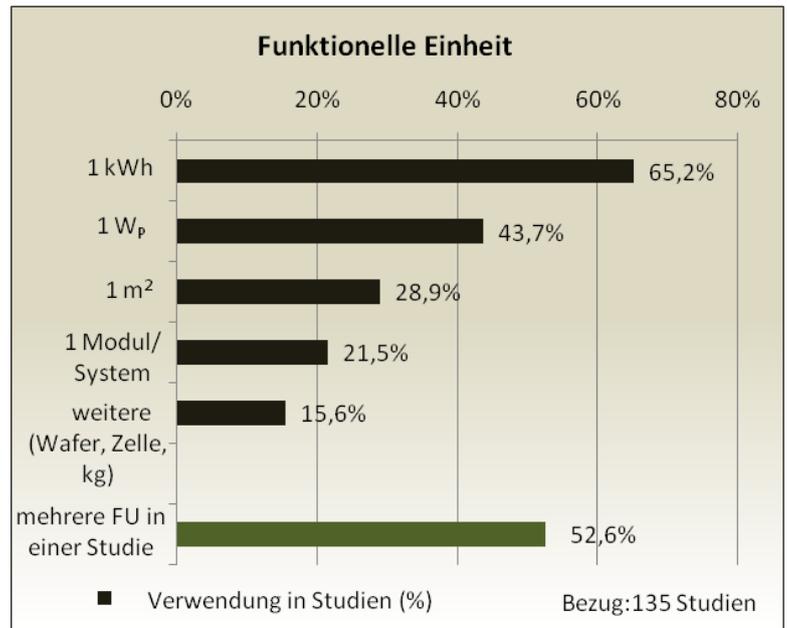


Abb. 39: Inhaltsanalyse: Funktionelle Einheiten
(Eigene Darstellung)

²¹⁹ Da insbesondere rein ökonomische Betrachtungen (konventionelles LCC) den Begriff der Funktionellen Einheit nicht verwenden und nicht in jeder LCA-Studie der Untersuchungsrahmen klar definiert wird, konnte nicht in jeder Studie von der explizit angegebenen FU ausgegangen werden. Aus diesem Grund wurden jeweils die Bezugsgrößen bzw. –wenn angegeben– die angegebene FU erfasst.

7.4.2 Beschreibung des Produktsystems: Einbezogene Parameter

Die Auswertung der Systemparameter, die die größte Rolle in vorhandenen LZA zur PV spielen, ergibt sich die in Abb. 40 dargestellte Verteilung. Erfasst wurde für diese Statistik, ob ein Parameter in einer Studie angegeben wurde, *nicht* die Häufigkeit des Vorkommens eines Parameters innerhalb *eines* Dokumentes.²²⁰

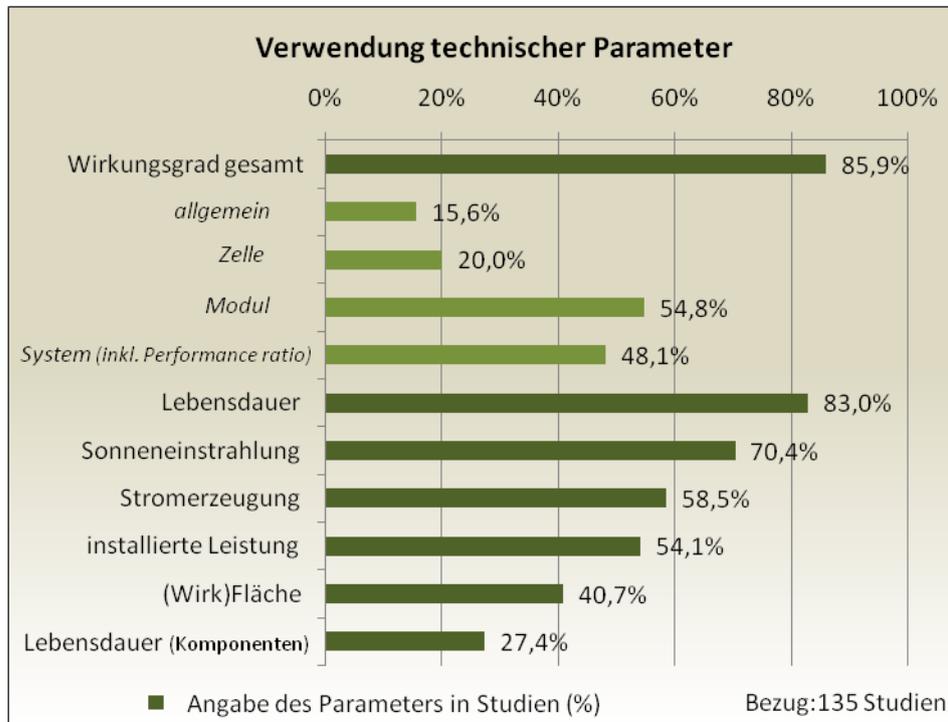


Abb. 40: Inhaltsanalyse: Verwendung technischer Parameter
(Eigene Darstellung)

Entsprechend den theoretischen Anforderungen an ein ELCC für PV-Anlagen aus Kap.4 sind auch in den bereits vorhandenen praktischen Studien die wichtigsten Parameter zur Untersuchung und Beschreibung eines PV-Systems gemäß den Erwartungen. Die häufigste Verwendung finden der Wirkungsgrad (85,9%), die Lebensdauer (83,0%) und die verfügbare Sonneneinstrahlung (70,4%). Unter den Wirkungsgraden wird der Modulwirkungsgrad am meisten verwendet. Auf dessen Basis kann i.d.R. unter Einbezug der Verluste durch weitere Systemkomponenten (z.B. mittels Performance Ratio) das Gesamtsystem bestimmt werden.²²¹

Weiterhin wichtige Parameter mit einer häufigen Verwendung in den analysierten Dokumenten sind die mögliche Stromerzeugung (58,5%), die installierte Leistung (54%) und die Modul-, Zell- oder effektive Wirkfläche (40,7%). Die erzeugte Strommenge (z.B. jährlich) wird

²²⁰ Die Häufigkeit der Nennungen innerhalb einer Studie oder eine Abschätzung der Einbeziehung in Berechnungen geht zwar aus der Frequenzanalyse hervor, soll jedoch nicht für Einschätzung der Bedeutung eines Parameters in die Auswertung einbezogen werden, da die Aussagekraft dieser Information aus Sicht des Autors begrenzt ist und darüber hinaus ein falsches Bild liefern könnte. So würden Studien, in denen Berechnungen ausführlich dargelegt werden, automatisch eine höhere Bedeutung einzelner Parameter ausweisen, ohne dass dies tatsächlich der Fall sein muss.

²²¹ Studien, die den Wirkungsgrad nicht in die Bewertung einbeziehen, beschäftigen sich bspw. mit Teilbilanzen, in denen dieser Parameter keine Rolle spielt (vgl. z.B. FTHENAKIS, V.; WANG, W.; KIM, H.C. (2009), S. 493-517). Auch bei rein ökonomischen Vergleichen mit anderen Stromerzeugungsformen wird als sinnvoller Bezug eher die erzeugte Strommenge gewählt, da im Gegensatz zu den fossilen Energieumwandlungen der Brennstoffeinsatz und damit dessen Umwandlungseffizienz bei Sonnenlicht keinen Kostenfaktor darstellt (vgl. z.B. EL-KORDY, M.N. u.a. (2002), S. 317-328).

teilweise nicht als Parameter für ein System vorgegeben, sondern in der Auswertung in Studien als Indikator ermittelt. So ist dieser Parameter z.B. auch in der energetischen Ausbeute (Energy yield) enthalten, womit sich seine Bedeutung leicht auf 64% erhöht.

Einzelnen untersuchte Parameter, die jedoch insgesamt aufgrund ihrer Häufigkeit eher von geringerer Bedeutung sind, sind die Lebensdauer von Komponenten (27,4%), das anliegende Lastprofil (Load) (16%), das Produktionsvolumen (8,1%) sowie Netzverluste, Abschattung, die Volllaststundenzahl, Degradation und weitere Parameter. Diese Parameter werden i.d.R. nur dann eingesetzt, wenn sie einer spezifischen Zielstellung der Studie dienen.

7.4.3 Angesetzte Lebensdauern

Für die Lebensdauer von Modulen und PV-Systemen werden für den heutigen Stand der Technik (ausgereifte Technologien) ca. 30 Jahre als realistische Annahme angegeben.²²²

Die Untersuchung vorhandener LZA zeigt, dass in Studien zumeist Werte zwischen 20 und 30 Jahren für PV-Installationen angesetzt werden (vgl. Abb. 41).

Insgesamt wurden in 109 Dokumenten hierzu Angaben gemacht. Der Mittelwert über alle Technologien liegt bei 25,03 Jahren. Die Differenz der angesetzten Lebensdauern zwischen einzelnen Technologien ist in dieser Auswertung vernachlässigbar gering.

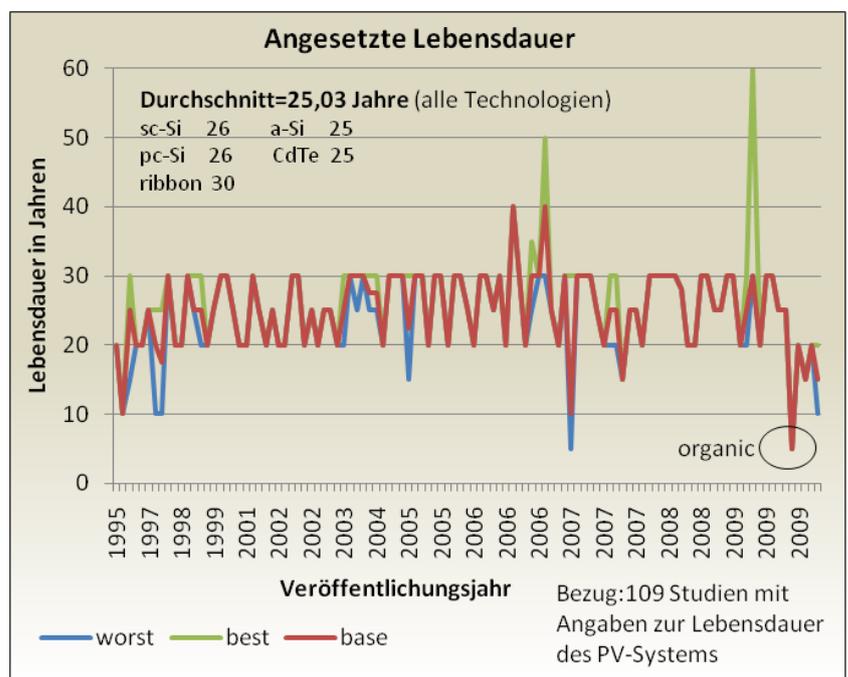


Abb. 41: Inhaltsanalyse: Lebensdauern
(Eigene Darstellung)

Ein Ausreißer bei den Annahmen für den base case (Basisbedingungen) ist mit einer Lebensdauer von nur 5 Jahren eine Untersuchung von organischen Zelltypen²²³, welche sich jedoch noch im Pilotstadium befinden (vgl. Kennzeichnung in Abb. 41). Über den zeitlichen Verlauf lässt sich kein genereller Trend, wie z.B. eine Zu- oder Abnahme der Lebensdauern über alle Technologien ermitteln.

²²² Vgl. Kap.3.5.4.

²²³ Vgl. KALOWEKAMO, J.; BAKER, E. (2009), S. 1224-1231.

7.5 Ökologischer Teil

Dem ökologischen Teil werden die Elemente eines ELCC zugeordnet, die überwiegend dem LCA entnommen sind. Konkret sind dies Sachbilanz, Wirkungsabschätzung und die Auswertung aus ökologischer Sicht. Mit der Untersuchung der einzelnen Elemente, die bereits in Kap.4 beschrieben wurden, sollen erneut Rückschlüsse auf die Bedeutung im Rahmen eines ELCC für PV gezogen werden.

7.5.1 Wichtigste Sachbilanzgrößen, Wirkungskategorien und Methoden

Zur Untersuchung der wichtigsten Sachbilanzgrößen wurden 113 Dokumente analysiert, die Sachbilanzen für PV-Produkte beinhalten.

Die Ersteller konzentrieren sich dabei überwiegend auf die erforderlichen Energieinputs und den CO₂-Ausstoß über den Lebenszyklus. In 14,6% der Studien (16 Dokumente) werden nur verkürzte Bilanzen bestehend aus Energieinputs und CO₂-Emissionen angegeben.

Es zeigt sich, dass die Photovoltaik, zwar eine Technologie zur Energiegewinnung darstellt, jedoch in der Herstellung selbst energieintensiv²²⁴ ist und dass sie insbesondere an ihrer tatsächlichen Energiebilanz und den aus dem Energieaufwand entstehenden indirekten Emissionen gemessen wird.²²⁵

Die Häufigkeiten der verwendeten Sachbilanzgrößen sind in Abb. 42 aufgelistet. Mit einer Verwendung in 79,6%²²⁶ der Sachbilanzen sind demnach Energieinputs gesamt (Elektroenergie, Prozessenergie etc.) die häufigste Eingangsgröße. Die Forderung nach einer genauen Angabe des Energiemixes erfüllen 70 der 90 Studien, die Energieangaben machen (77,8%).

Roh- Hilfs- und Betriebsstoffe werden in 54,0% der Bilanzen angegeben.²²⁷ Weitere Inputs von Relevanz sind Wasser (11,5%) und der Flächenbedarf bzw. die allgemeine Infrastruktur wie Gebäude, Anlagen etc. (7,1% Verwendung in Sachbilanzen).

Die Forderung nach der Angabe des angesetzten Energiemixes zur Quantifizierung indirekter Emissionen²²⁸ wird in 70 der 113 Studien mit Sachbilanzen (62,0%) erfüllt.

Weitere Informationen bzgl. der Sachbilanzen sind die Häufigkeit der Angabe von Allokationen mit 42,5% sowie die Quantifizierung von Ausschuss bzw. Materialverlusten in Prozessschritten in 22,1% der 113 Dokumente mit Sachbilanzen. Als Verlustgröße werden am häufigsten Materialverluste bei der Waferherstellung (Trennverfahren) benannt.

²²⁴ Dies gilt insbesondere für kristalline Silizium-Zelltypen.

²²⁵ Vgl. z.B. ALSEMA, E.A.; DE WILD-SCHOLTEN, M.J. (2005), S. 2.

²²⁶ Die Abweichungen von 100% bei Energie und CO₂ sind überwiegend durch die Nicht-Verwendung dieser Sachbilanzgrößen in einigen Teilbilanzen begründet, die ebenfalls in die Analyse einbezogen wurden (z.B. reine Betrachtung der Kadmium-Emissionen bei der CdTe-Technologie, vgl. FTHENAKIS-VASILIS, M. (2004), S. 2166-2169).

²²⁷ Für eine detaillierte Untersuchung einzelner Rohstoffinputs (z.B. Anteile der Siliziuminputs nach Güte Metallurgical, Electronical, Off-grade Silicon, vgl. z.B. TAKIGUCHI, H.; MORITA, K. (2009), S. 120 ff.) wäre hier ein Ansatzpunkt. Im Rahmen dieser Arbeit soll jedoch aufgrund des Umfangs nicht weiter darauf eingegangen werden.

²²⁸ Vgl. Kap.4.3.2.1.

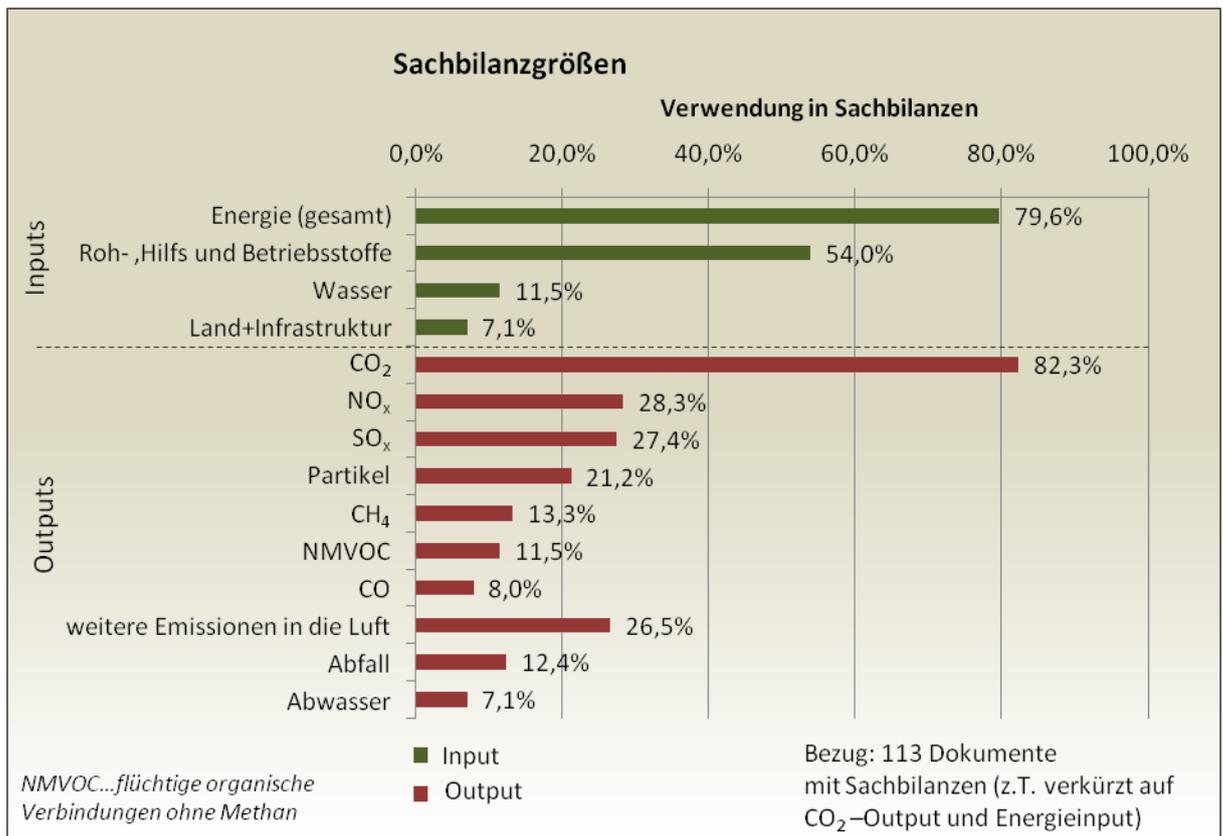


Abb. 42: Inhaltsanalyse: Sachbilanzgrößen
(Eigene Darstellung)

Bei den Outputs dominieren die Emissionen in die Luft, insbesondere CO₂ mit 82,3%, Stickoxide und Schwefeloxide (28,3% bzw. 27,4%) sowie Feinstaub mit Angaben hierzu in 21,2% der Sachbilanzen. Abfall und Abwasser werden eher seltener mit 12,4% bzw. 7,1% angegeben.

Die Analyse der durchgeführten Wirkungsabschätzungen in 108 Dokumenten ergibt ein ähnliches Bild wie die Sachbilanzen (vgl. Abb. 43). Der Einfluss auf den Treibhauseffekt (Global Warming, i.d.R. Wirkungsindikator Global Warming Potential in t CO_{2eq}/FU) ist die mit Abstand wichtigste Wirkungskategorie mit einer Verwendung in 85,2% der Studien mit Wirkungsabschätzung, während die zweit-häufigste Kategorie, Versauerung, nur noch in 22,2% der Studien angegeben wird. Die Untersuchung hinsichtlich weiterer Wirkungskategorien in den analysierten Wirkungsabschätzungen kann Abb. 43 entnommen werden.

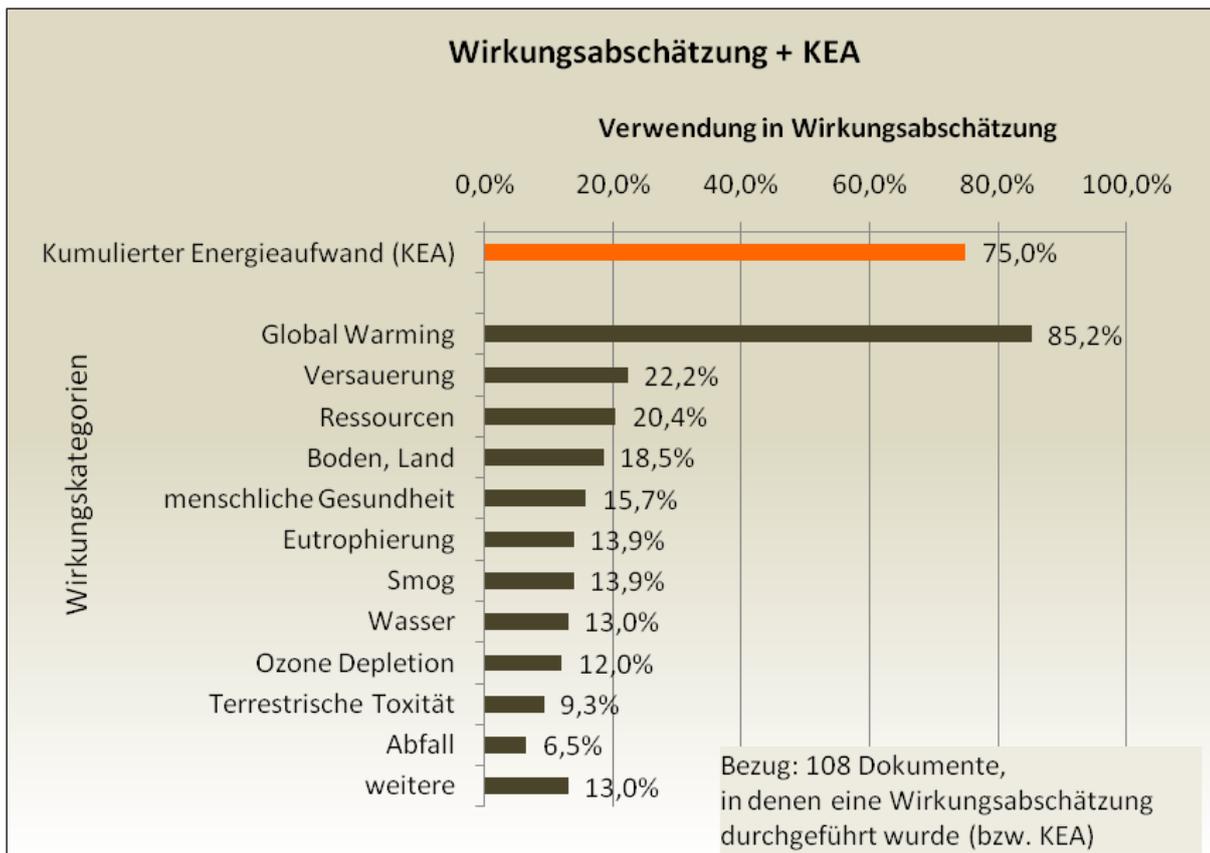


Abb. 43: Inhaltsanalyse: Wirkungsabschätzung
(Eigene Darstellung)

Hinsichtlich der genutzten Methoden ist der Kumulierte Energieaufwand (KEA) mit einer Anwendung in 75% der Studien am bedeutendsten. In 29 Studien wurden darüber hinaus Angaben zur verwendeten Methode der Wirkungsabschätzung gemacht, darunter z.B. CML baseline 2000 (38%) und Eco-Indicator 95; 99 (24%).

Insgesamt lässt sich also für den ökologischen Teil der Schritte Informationsbeschaffung und Bewertung (vgl. ELCC für PV in Kap.4) eine starke Betonung von *Energie* und *CO₂-Ausstoß* als Bewertungsgrößen feststellen, was den Erwartungen der Haupteinflüsse auf die Ökobilanz von PV-Anlagen entspricht.

7.5.2 Auswertung Ökologisch

Für die Auswertung des ökologischen Teils von LZA wurden die in Abb. 44 dargestellten Indikatoren verwendet. Gemäß dem bisherigen Vorgehen sind auch in der Auswertung die Energiekennzahlen und der CO₂-Ausstoß am meisten relevant. Global Warming Potential und KEA sind nochmals zur Orientierung in die Auswertung aufgenommen. Am häufigsten Verwendung findet die Energy Payback Time (EPBT) (63,5%) vor anderen Energiekennzahlen, wie bspw. der energetischen Ausbeute (Energy Yield). Die Ausbeute wird jedoch teilweise als Parameter (also im Vorfeld gegeben) für Kalkulationen verwendet. Unter den Emissionen wurden neben dem Global Warming Potential (GWP) (80% bezogen auf die Auswertung) vor allem die vermiedenen Emissionen (17,4%) als Indikator ermittelt. Die Dauer, bis das „investierte“ CO₂ durch eine PV-Installation wieder eingespart wurde (CO₂-Payback-Time), wird nur in 8,7% der Studien mit ökologischer Auswertung berechnet.

Für die Ermittlung der vermiedenen Emissionen und der CO₂-Payback-Time spielt der verwendete Energiemix eine doppelt bedeutsame Rolle. So wird zunächst das bei der Herstellung ausgestoßene CO₂ (bzw. alle weiteren Emissionen) auf Basis des bezogenen Energiemix bei der Herstellung ermittelt (je schlechter²²⁹ der Energiemix bei der Herstellung, desto höher die Herstellungsemissionen=rechte Seite der Bilanz, SOLL). Für die vermiedenen Emissionen (an CO₂) wird der Energiemix der substituierten Energieformen angesetzt (je schlechter dieser ist, desto größer der Nutzen der PV=linke Seite der Bilanz, HABEN). Sehr vereinfacht geschlussfolgert:

- ohne Berücksichtigung von Transporten oder Standortbedingungen ist die Produktion von PV-Systemen an Standorten mit einem sehr „sauberen“ Energiemix (z.B. mit sehr viel Wasserkraftanteil) gekoppelt mit einem Betrieb an einem Standort mit einem sehr „schmutzigen“ Energiemix (z.B. hoher Anteil an Kohlekraft) für kurze Emissions-Amortisationszeiten am besten geeignet.

Reale Bedingungen wie Produktionsmöglichkeiten, Transportaufwand und Finanzierungsmöglichkeiten etc. lassen solche Überlegungen jedoch sehr theoretischer Natur bleiben.

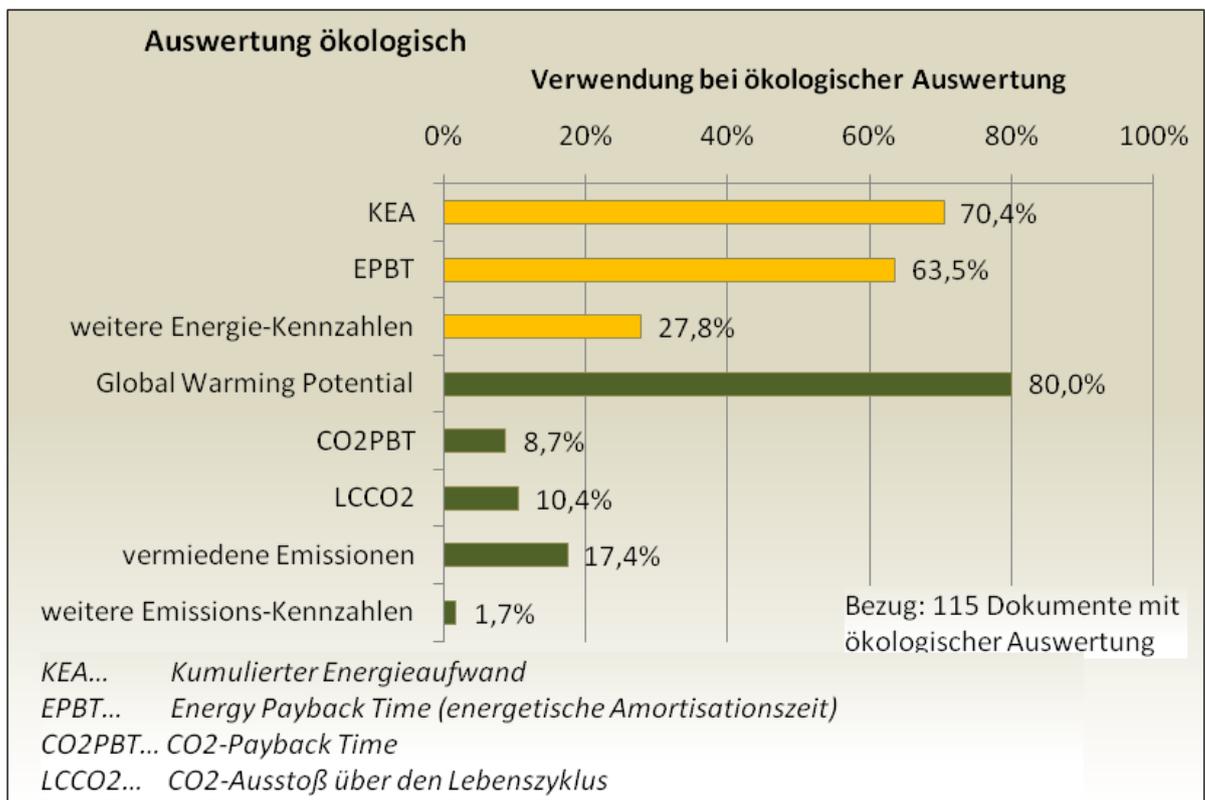


Abb. 44: Inhaltsanalyse - Auswertung ökologisch
(Eigene Darstellung)

²²⁹ Im Sinne von Emissionen.

7.6 Ökonomischer Teil

Die Auswertung des ökonomischen Teils gibt Informationen zu den verwendeten Kostenkategorien. Diese sind zunächst nach den Akteuren im Lebenszyklus eines PV-Produktes unterteilt in:

- Herstellerkosten
- Nutzerkosten
- Kosten für EoL-Akteure.

Die Kosten für die Akteure (Perspektiven) können schließlich in Unterkategorien weiter detailliert werden, von denen die häufigsten in Kap.7.6.1 aufgezeigt sind. Weiterhin spielen im ökonomischen Teil der LZA die Methoden zur Ergebnisbewertung und Auswertung eine Rolle (Kap.7.6.2) sowie speziell herausgegriffen das Konzept der Erfahrungskurve für die PV-Industrie (Kap.7.6.3).

7.6.1 Wichtigste Kostenkategorien

Unter den Kostenkategorien spielt die Nutzerperspektive die größte Rolle. Der Großteil der Kostenbetrachtungen (65 der 135 Dokumente bzw. 48,1%, vgl. auch Kap.8) betrachtet die Nutzerkosten und darunter vor allem das Gesamtinvestment für eine PV-Installation (93% der 57 Dokumente mit Nutzerkosten).

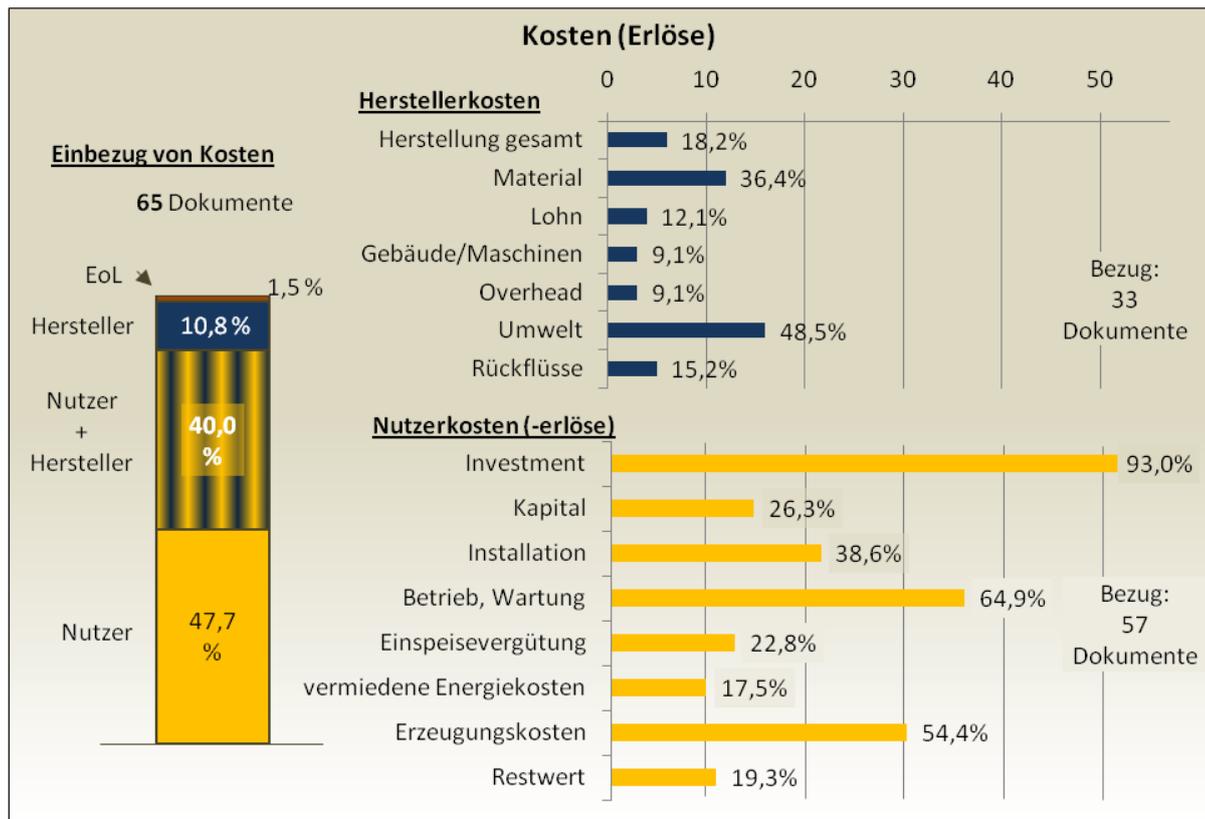


Abb. 45: Inhaltsanalyse – Kosten
(Eigene Darstellung)

Unter den Herstellerkosten werden vor allem Material und Umweltkosten verwendet (36,4% bzw. 48,5%). Umweltkosten sind dabei überwiegend ganz allgemein externe Kosten. Die weitere Kostenverwendung kann Abb. 45 entnommen werden.

7.6.2 Ergebnisbewertung und Auswertung

Bei der Auswertung des ökonomischen Teils steht ebenfalls die Nutzerperspektive im Vordergrund. So werden hauptsächlich die gesamten Erzeugungskosten (51,7%) und die Lebenszykluskosten (LCC, 50%) zur Auswertung verwendet.

Die weiteren Häufigkeiten des Vorgehens bei der ökonomischen Auswertung sind in Abb. 46 dargestellt.

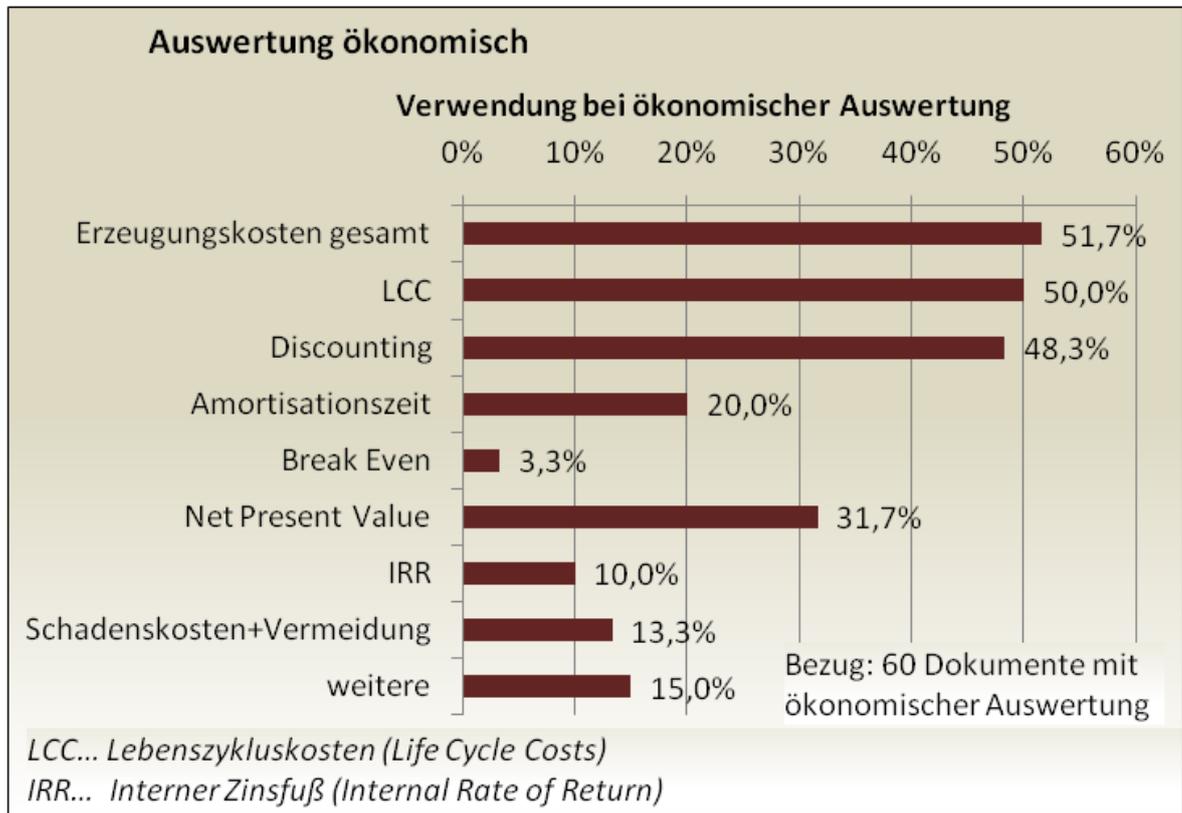


Abb. 46: Inhaltsanalyse - Auswertung ökonomisch
(Eigene Darstellung)

7.6.3 Weitere Erkenntnisse für den Bereich Ökonomie

Ein ebenfalls häufig eingesetztes Instrument für die Kostenbewertung von PV-Installation ist das Erfahrungskurven-Konzept. 16 der 33 LZA (48,5%), die Herstellerkosten betrachten, verwenden die Erfahrungskurve, sowie das Produktionsvolumen zur Kostenermittlung.

Im Laufe der Recherche ist eine ganze Reihe von Dokumenten diesbezüglich erfasst worden. Eine Auflistung kann in Anhang 0 nachvollzogen werden. Die üblichen Lernraten liegen zwischen 0,2 und 0,3. Ein Beispiel mit mehreren Szenarien des NEEDS-Projektes²³⁰ ist in Abb. 47 dargestellt.

²³⁰ Vgl. FRANKL, P. u.a. (2006).

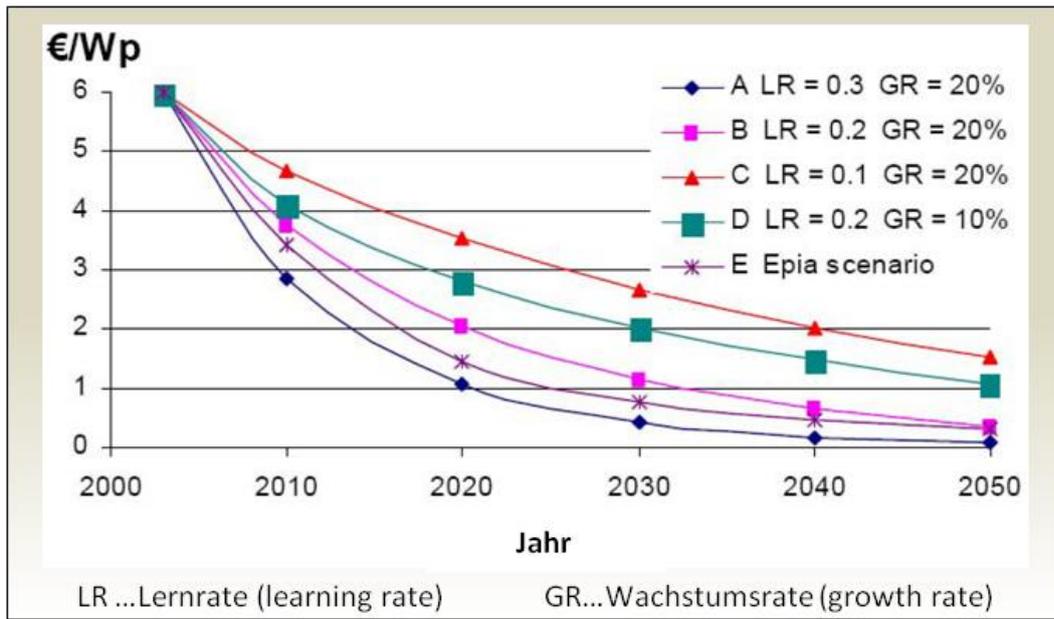


Abb. 47: Erfahrungskurve

(Quelle: unter Bearbeitung: FRANKL, P. u.a. (2006), S. 24)

Aufgrund des Umfangs bietet das Thema der Erfahrungskurven von Energiesystemen, insbesondere der PV, Stoff für eine weitere Arbeit dieser Art, weshalb leider mit dem Verweis auf die Literaturliste keine Vertiefung vorgenommen werden kann.²³¹

7.7 Sensitivitätsanalysen

Die Durchführung einer Sensitivitätsanalyse wird für alle drei Formen der LZA empfohlen.

Innerhalb des untersuchten Studienpools führten in knapp 50% der Studien (61 von 135 Dokumenten) die Autoren eine Sensitivitätsanalyse durch (vgl. Abb. 48).

Die wichtigsten Faktoren, deren Auswirkungen auf das Gesamtergebnis untersucht wurden, waren dabei der Standort (bzw. die Sonneneinstrahlung) und die Lebensdauer (jeweils 29,5% der Sensitivitätsanalysen) sowie der Wirkungsgrad und der Modul-Preis (23,0 und 19,7%).

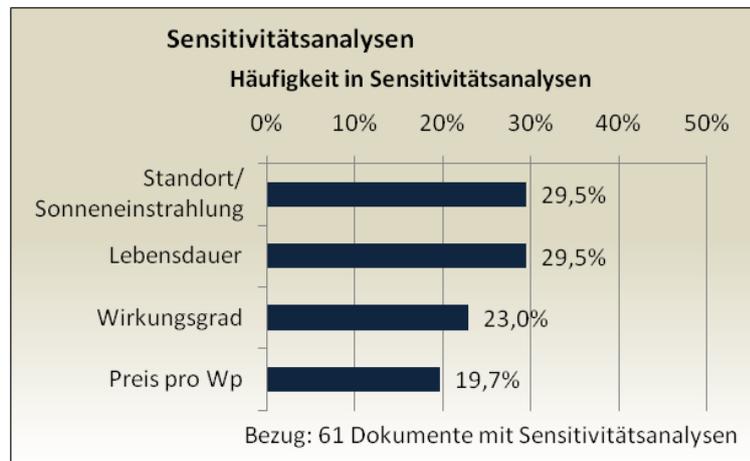


Abb. 48: Inhaltsanalyse – Sensitivitätsanalysen

(Eigene Darstellung)

²³¹ Eine solche Arbeit ist z.B. erst kürzlich veröffentlicht worden, vgl. ANSELM, V. (2008).

7.8 Lebenszyklus

Für eine LZA stellen das zugrundegelegte Lebenszyklusmodell und der Einbezug von Phasen eine wichtige Grundlage für die Bewertung dar. In Kap.4.2 wurde ein Lebenszyklusmodell für Produkte der PV vorgestellt. Dieses besteht aus den Phasen:²³²

- Forschung&Entwicklung (F&E),
- Vorproduktion,
- Herstellung,
- Installation,
- Nutzung,
- End of Life (EoL) sowie
- Transporte allgemein.

Auf den Einbezug dieser Phasen wurden die Studien im Rahmen der Inhaltsanalyse untersucht um einerseits eine Übersicht über die Phasenabdeckung zu erhalten, andererseits können Rückschlüsse auf die Bedeutung einzelner Phasen gezogen werden. Unter besonderem Interesse steht hierbei das Nutzungsende der EoL-Phase. Zunächst wird jedoch die allgemeine Phasenabdeckung eingeschätzt.

7.8.1 Phasenabdeckung allgemein

Mit der Lebenszyklusorientierung als Ausgangspunkt des ELCC (vgl. Ausgangspunkt 2, Kap.2.1.2) ist die Forderung nach einer möglichst vollständigen Betrachtung mit allen Lebensphasen verbunden. In Abb. 49 ist der Einbezug der einzelnen Phasen in den Studien dargestellt.

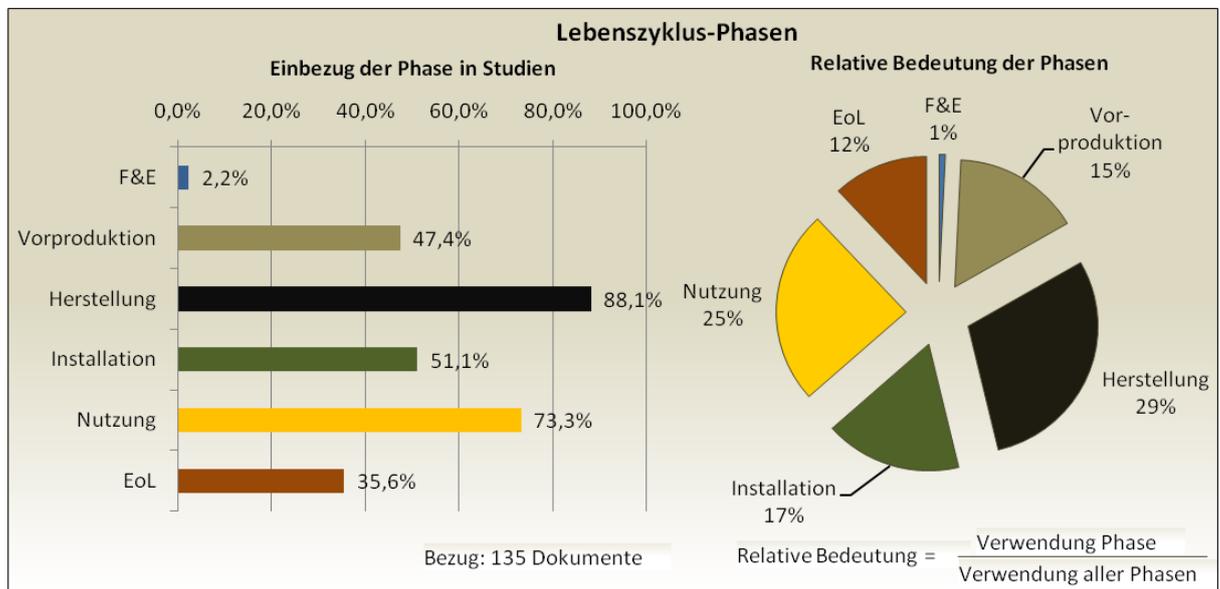


Abb. 49: Inhaltsanalyse - Lebenszyklusphasen
(Eigene Darstellung)

Zunächst kann bei der Auswertung der analysierten vorhandenen LZA bzgl. der Lebensphasen die *Herstellungsphase* als die bedeutsamste mit einer Verwendung in 88,1% der 135

²³² Vgl. Abb. 23.

Dokumente identifiziert werden. Aufgrund der Entstehung des größten Teils der Kosten und der Umweltauswirkungen während dieser Phase entspricht dies den Erwartungen.

Mit einer Verwendung in 73,3% der Studien ist jedoch die *Nutzungsphase* ebenso wichtig in den LZA. Insbesondere die ökonomischen Betrachtungen konzentrieren sich auf diese Phase²³³.

Vorproduktion, Installation werden nur in rund der Hälfte (47,4% bzw. 51,1%) näher beleuchtet. Zum Teil wird dies auch durch eine fehlende Trennschärfe in einigen Untersuchungen verursacht. Wird nur ein vereinfachtes Lebenszyklusmodell zugrundegelegt, werden Vorproduktion und Installation der Produktion bzw. Nutzung zugerechnet.²³⁴

Die End of Life Phase wird nur in knapp einem Drittel der LZA eingeschlossen. I.d.R. wird eine noch nicht belastbare Datenbasis (geringer Erfahrungsschatz) als Ausschlussgrund hierfür angegeben. Damit werden die Ausführungen aus Kap.4.2.2 hinsichtlich der durch die hohe Lebensdauer erst zeitverzögert ansteigenden Relevanz der EoL-Thematik bestätigt. Auf die EoL-Erkenntnisse soll jedoch erst im nächsten Abschnitt 7.8.2 näher eingegangen werden.

Die Zurechnung von Forschungs- und Entwicklungsaufwendungen bzw. Umweltaspekten erfolgt erwartungsgemäß sehr selten. Einerseits ist die Quantifizierung aufwendig und andererseits wird der Beitrag als vernachlässigbar gering eingeschätzt.

Das Diagramm der relativen Bedeutung von Phasen²³⁵ in Abb. 49 zeigt den Häufigkeiten entsprechend Herstellung und Nutzung mit 29% bzw. 25% als am bedeutendsten auf, während EoL nur zu 12% Anteil hat.

Hinsichtlich der Phasenabdeckung innerhalb einer Studie ergibt sich das in Abb. 50 abgebildete Profil.

Der Großteil der Dokumente hat eine Abdeckung von zwei oder drei Phasen (mit 37 und 38 Dokumenten ungefähr gleichverteilt). 45 Dokumente berücksichtigen mehr als drei Lebensphasen in ihrer Analyse, was insgesamt eine phasenübergreifende Untersuchung in 120 von 135 Dokumenten oder 88,9% bedeutet.

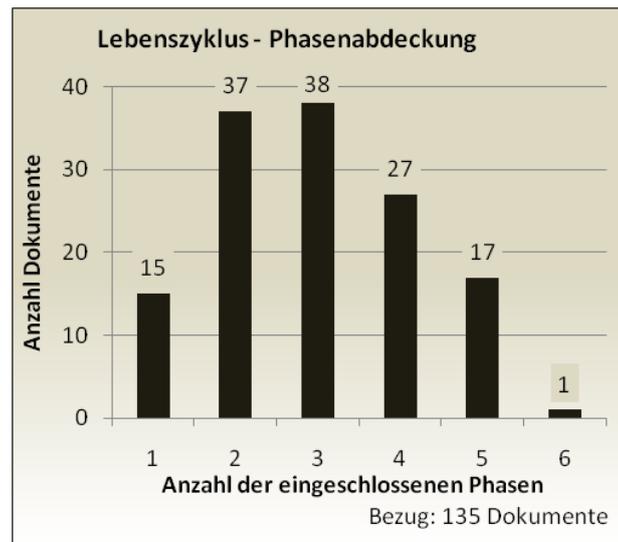


Abb. 50: Inhaltsanalyse – Phasenabdeckung
(Eigene Darstellung)

²³³ Vgl. Abschnitt 7.6.1.

²³⁴ Dies kann auch an den Lebenszyklusmodellen in dieser Arbeit nachvollzogen werden. So wurde zunächst in Kap.2 ein allgemeines Modell vorgestellt (vgl. Abb. 3) (bestehend aus den Phasen F&E, Herstellung, Nutzung, EoL), das erst später in Kap.4 detailliert wurde (vgl. Abb. 23). Das detaillierte Modell unterscheidet nun zwischen Vorproduktion und Herstellung. Ebenso wird die Installation vor Ort als eigene Phase berücksichtigt.

²³⁵ Die relative Bedeutung bemisst sich in dem Verhältnis der Häufigkeit des Einbezugs der jeweiligen Phase zum gesamten Einbezug aller Phasen (Summe der Häufigkeiten).

Dieser Wert war ebenfalls zu erwarten: die Kriterien bei der Recherche und anschließenden Filterung sollten einen Studienpool dieser Art (mit dem Ziel der Untersuchung eines Instrumentes zur Identifizierung von Austauschbeziehungen zwischen Phasen) generieren.

Die einbezogenen Prozessmodule nach der in Kap.4.3.1.4 eingeführten Einteilung liefern das zu erwartende Bild, dass die Herstellungsprozesse mit ca. 70-80% Abdeckung die größte Bedeutung haben. Die Verteilung der verwendeten Prozessmodule ist in Abb. 51 dargestellt.

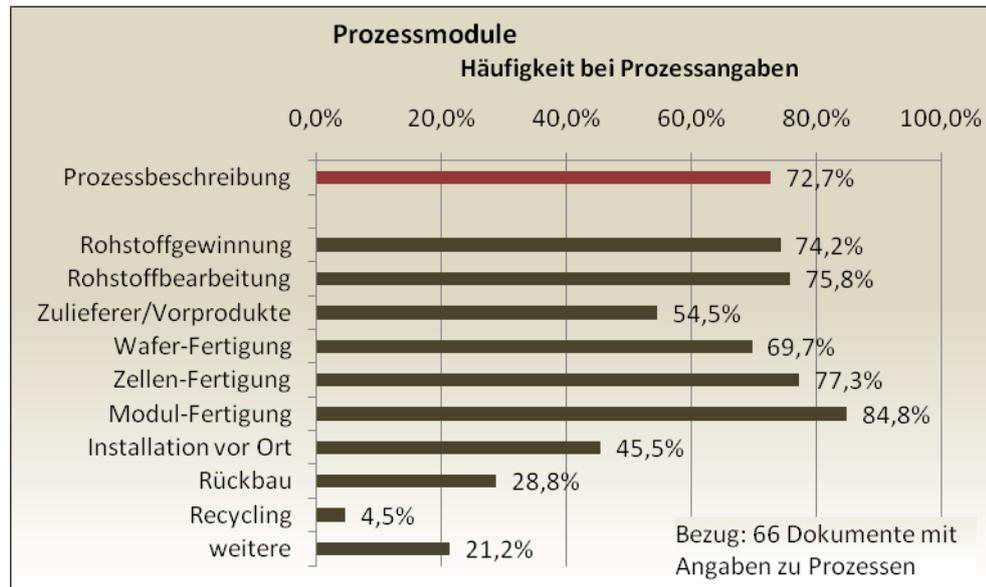


Abb. 51: Inhaltsanalyse – Prozessmodule
(Eigene Darstellung)

7.8.2 Einbezug EoL

Die Vermutung einer geringen Berücksichtigung der End of Life Phase, trotz ihrer wachsenden Bedeutung hat sich, wie bereits ausgeführt, mit einer Verwendung in ca. 36% der Studien bestätigt. Der andere Teil der Studien bezieht EoL nicht ein bzw. schließt diese Phase explizit aus. Teilweise werden EoL-Einflüsse als vernachlässigbar gering eingeschätzt²³⁶, doch zum überwiegenden Teil liegt die Ursache für einen Ausschluss in der fehlenden Datengrundlage.

Für die Phase des EoL wurde aufgrund des besonderen Interesses²³⁷ eine detailliertere Phasenuntersuchung durchgeführt. Hierfür wurden konkrete Unterkategorien zu EoL bei der Kodierung aufgenommen.

Die Häufigkeiten der wichtigsten EoL-Kategorien können in Abb. 52 nachvollzogen werden.

Es zeigt sich, dass obwohl Recycling unter den EoL-Kategorien am häufigsten in den 48 Dokumenten mit EoL innerhalb der Systemgrenzen einbezogen wird (47,9%), dass die Aufbereitung von Modulen noch kein breites Thema ist (8% Einbezug).

²³⁶ Sofern kein klarer Anhaltspunkt für diese Einschätzung gegeben wird, ist dieses Argument aus Sicht des Autors dieser Arbeit ebenfalls auf fehlende Erfahrungswerte zurückzuführen. Mit der Einordnung als *vernachlässigbar* wird in Untersuchungen eine schlichte Vereinfachung vorgenommen.

²³⁷ Vgl. Kap.4.2.2.

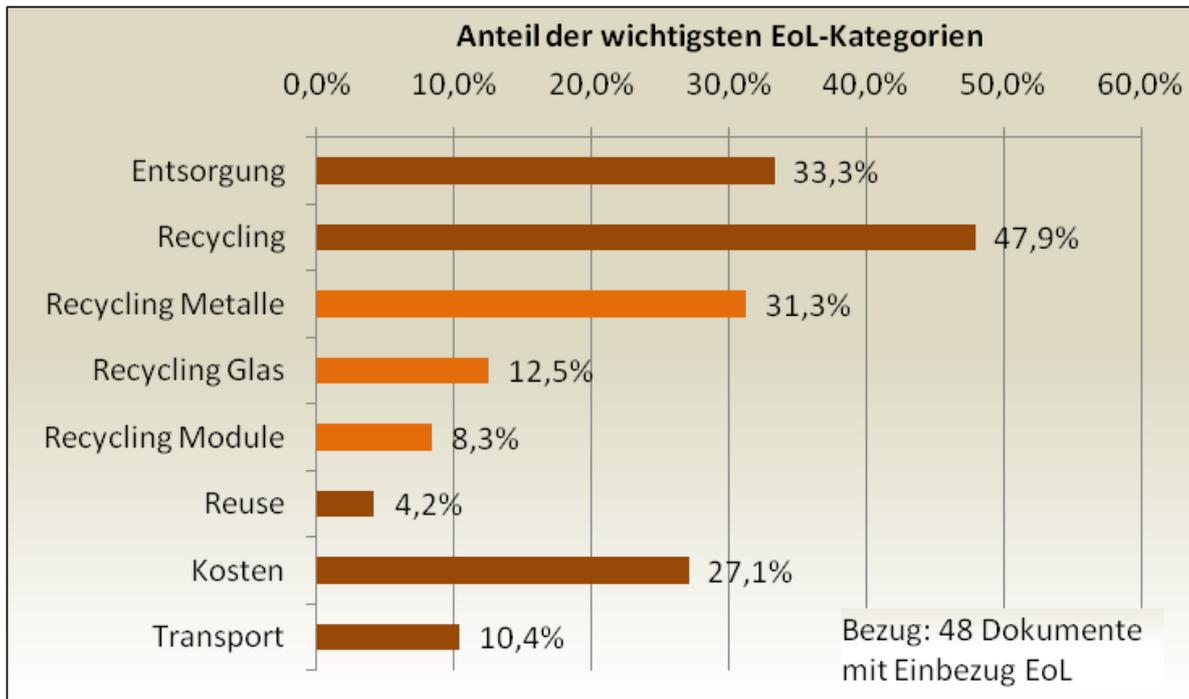


Abb. 52: Inhaltsanalyse EoL-Kategorien
(Eigene Darstellung)

7.8.3 Transport

Transportprozesse spielen keine Hauptrolle in der Analyse des Lebenszyklus von PV-Anlagen. In 30,4% der 135 analysierten Dokumente waren sie im Untersuchungsrahmen enthalten.

Dabei werden die Teilkategorien Vorkette, Produktion und Distribution in ähnlichem Umfang einbezogen (17-20%). Dies kann damit begründet werden, dass im Falle der Berücksichtigung von Transportprozessen, auch alle entstehenden Transporte über den Lebenszyklus quantifiziert werden.

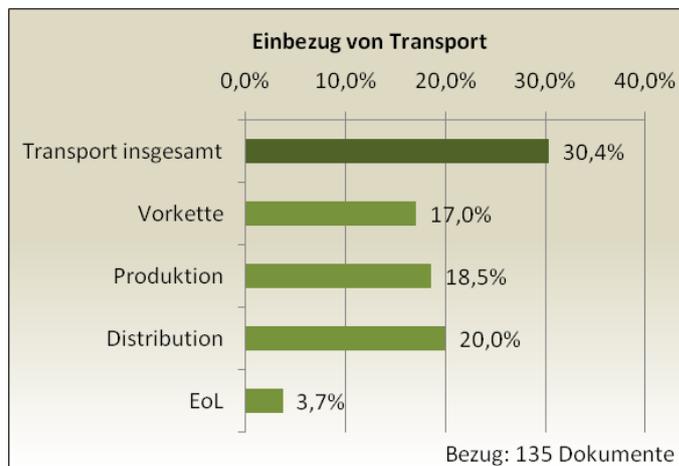


Abb. 53: Inhaltsanalyse – Transport
(Eigene Darstellung)

EoL-Transporte spielen nur eine geringe Rolle, woraus aufgrund des geringen Einbezugs der EoL-Phase insgesamt jedoch nicht eine geringe Bedeutung von EoL-Transporten geschlossen werden kann.

7.9 Daten

Mit der Untersuchung hinsichtlich der Angaben zu Daten in den Studien soll zunächst nicht die Datenqualität als solche beurteilt werden, sondern der **Umgang mit Daten**. Dies bedeutet, es wird untersucht, wie transparent Autoren Einschätzungen zu ihren Daten und Datenquellen

abgeben und wie ausführlich sie diese beschreiben. Die Anforderungen und Möglichkeiten zur Bewertung der Datenqualität in Kap.4.3.2.3 dienen als Grundlage der Einschätzung.

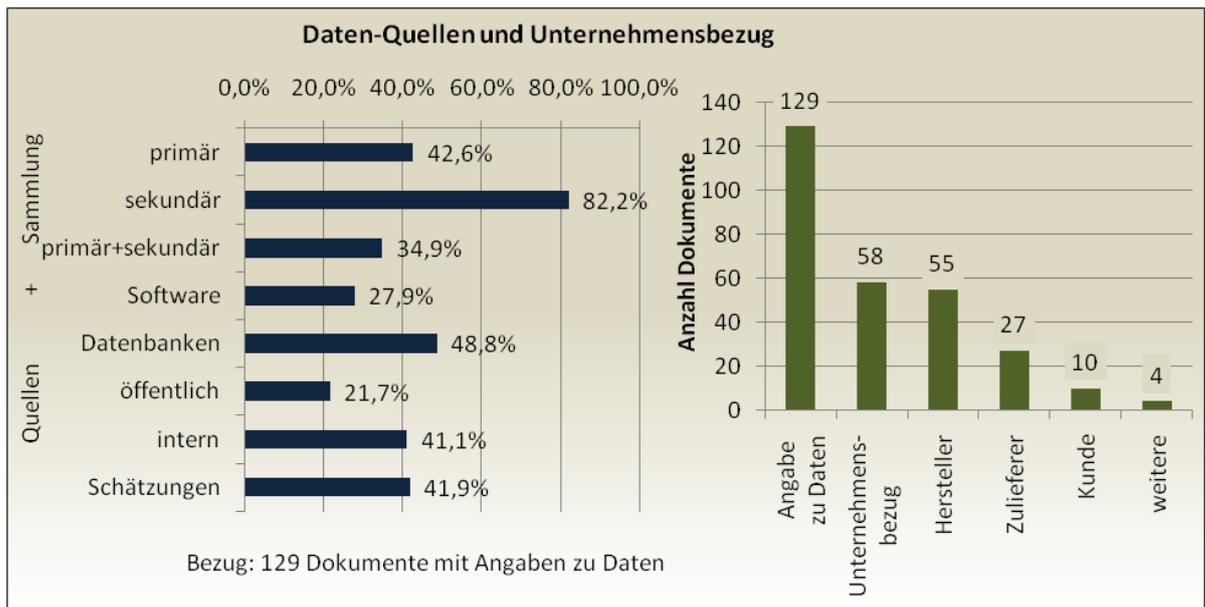


Abb. 54: Inhaltsanalyse - Datenquellen und Unternehmensbezug (Eigene Darstellung)

In 129 Dokumenten wurden Angaben zu Daten gemacht. Hinsichtlich der Datensammlung wird überwiegend auf Sekundärquellen zurückgegriffen (82,2%), teilweise werden diese jedoch lediglich als Ergänzung der primären Daten (42,6%) genutzt (vgl. Abb. 54). Datenbanken (48,8%) und Schätzungen (41,9%) sind weitere Datenquellen, die angegeben wurden.

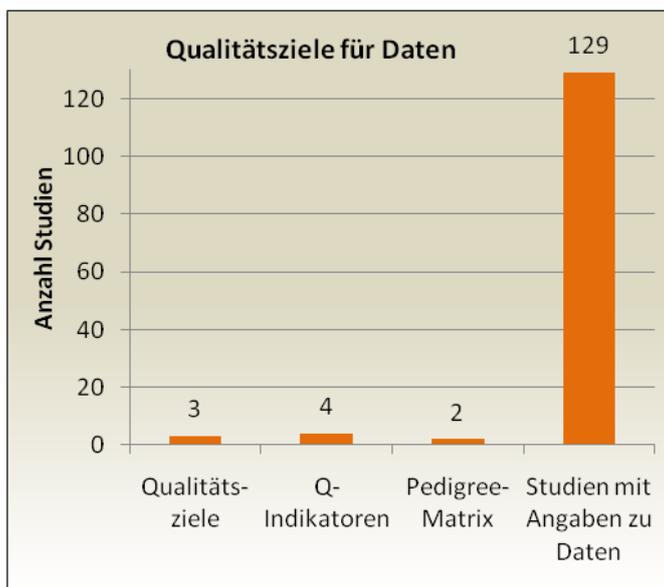


Abb. 55: Inhaltsanalyse - Qualitätsziele für Daten (Eigene Darstellung)

In 58 Studien wird ein direkter Bezug zu einem oder mehreren Unternehmen hergestellt, wobei dies i.d.R. Hersteller-Unternehmen sind.

Die Anforderung und Empfehlung der Verwendung von Qualitätszielen und Indikatoren zur Datenbewertung wird lediglich von drei bzw. vier Studien erfüllt. In zwei Fällen wurde ein Bezug zu der in Kap.4.3.2.3 vorgestellten Pedigree-Matrix hergestellt (vgl. Abb. 55).

Die Einschätzungen zum Datenalter wurden bereits in Kap.7.2.1 zur zeitlichen Einordnung der untersuchten Studien vorgenommen.

Bezüglich des kritischen Umgangs mit Daten wurde in 24% der Dokumente eine kritische Prüfung durch Experten durchgeführt²³⁸. Schwankungen, Ungenauigkeiten und Messfehler sowie Datenlücken werden in 31,0% bzw. 31,8% kritisch betrachtet (vgl. Abb. 56).

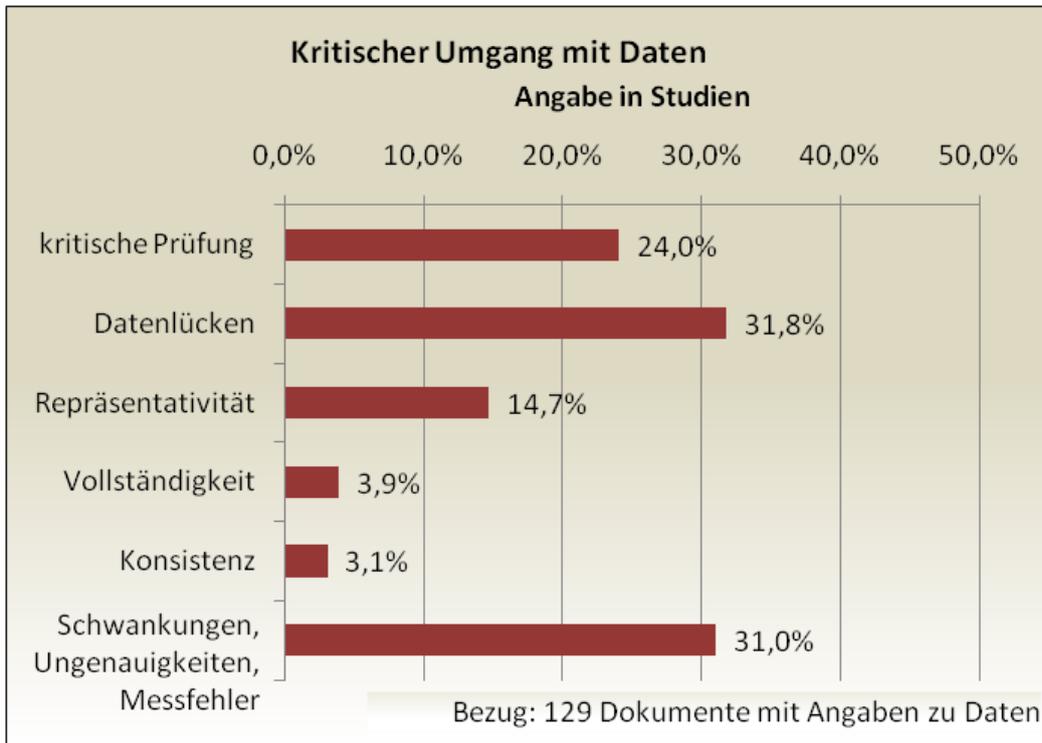


Abb. 56: Inhaltsanalyse - Kritischer Umgang mit Daten
(Eigene Darstellung)

²³⁸ Vgl. DIN EN ISO 14044:2006.

7.10 Bewertung der Auswertung der Inhaltsanalyse

Mit Hilfe der Inhaltsanalyse und einer Auswertung der Studien anhand der Kriterien des in Kap.6.2 eingeführten Kategorienschemas konnten Erkenntnisse in den folgenden Bereichen für die Durchführung eines ELCC für PV gewonnen werden: (vgl. Tab. 20)

Tab. 20: Erkenntnisbereiche der Inhaltsanalyse
(Eigene Erstellung)

Erkenntnisbereich	Erkenntnisse
Untersuchungsgegenstand	<ul style="list-style-type: none"> • wichtigste Parameter zur Charakterisierung • Wahl der funktionellen Einheit • Wahl der Lebensdauer
Ökologischer Teil	<ul style="list-style-type: none"> • wichtigste Sachbilanzgrößen • Hauptelemente der Wirkungsabschätzung • Indikatoren zur Auswertung des ökologischen Teils einer LZA
Ökonomischer Teil	<ul style="list-style-type: none"> • mögliche Kostenkategorien gemäß Nutzer- und Hersteller-Perspektive • Ergebnisbewertung und Auswertung des ökonomischen Teils
Sensitivitätsanalysen, (als weiteres Element der Auswertung des ökonomischen und des ökologischen Teils)	<ul style="list-style-type: none"> • wichtigste Parameter, deren Einfluss untersucht wird.
Lebenszyklus	<ul style="list-style-type: none"> • Phasenabdeckung und relative Bedeutung der Phasen • einbezogene Prozessmodule • Einbezug von EoL • Berücksichtigung von Transportprozessen.
Daten	<ul style="list-style-type: none"> • Einschätzung von Datenquellen und Verfahren zur Datensammlung • kritische Beurteilung der verwendeten Daten innerhalb von Studien

Die mit der Inhaltsanalyse ermittelten Häufigkeiten in der Verwendung von Kategorien u.ä. lassen einerseits Rückschlüsse auf die Gestaltung des Anforderungsschemas aus Kap.4 zu (Feedback).

Andererseits sollen im folgenden Kap.8 die häufigsten Unterkategorien den Rahmen für die Erstellung eines Inventars von LZA liefern, das sich an den Kategorien LCA (ökologischer

Teil), *LCC* (ökonomischer Teil) und *Übergreifend* (Daten, Lebenszyklus, Sensitivitätsanalysen und Untersuchungsgegenstand) orientieren wird.

8 Inventar von Lebenszyklusanalysen zur Photovoltaik

8.1 Vorgehen zur Erstellung des Inventars von LZA zur PV

Mit der Erstellung eines Inventars der LZA wird das in Kap.1.2.1 formulierte Ziel der Strukturierung der bereits bestehenden Lebenszyklusbetrachtungen zur Solarenergie erfüllt. Zwei Einschränkungen müssen diesbezüglich jedoch gemacht werden:

- das Inventar umfasst fast ausschließlich Studien zur Photovoltaik (gemäß der Eingrenzung aus Kap.3.1.3)
- es werden nur Studien erfasst, die in die Inhaltsanalyse eingeschlossen wurden (nur diese sind, als wichtigste Grundlage für die weitere Strukturierung, mittels der Inhaltsanalyse kodiert).

Ähnlich dem Kategorienschema, anhand dessen die Studien in der Inhaltsanalyse kodiert wurden, werden die Studien nun gemäß ihrer Verwendung bzw. Ausfüllung der in Kap.7 ermittelten wichtigsten Unterkategorien eingeordnet.

Das konkrete Vorgehen zur Bewertung, Normierung und Gewichtung kann der angehängten Datei Nr.1²³⁹ entnommen werden.

Verkürzt erklärt werden die **Ausprägungen** der einzelnen Studien in den Unterkategorien, die in der Auswertung²⁴⁰ untersucht wurden, als Bewertungsgrundlage verwendet. Für jede Unterkategorie wird jeweils unter Berücksichtigung der Breite²⁴¹ ein Teilwert ermittelt²⁴². Die Teilwerte werden addiert²⁴³ und den Oberkategorien *LCA*, *LCC* und *Übergreifend* zugeordnet. Der Bestwert innerhalb einer Oberkategorie wird zur **Normierung** innerhalb der Kategorie verwendet²⁴⁴.

Tab. 21: Inventar - Ober- und Unterkategorien
(Eigene Erstellung)

Oberkategorie	Unterkategorien	Gewichtung
LCA	<ul style="list-style-type: none"> • Sachbilanz • Wirkungsabschätzung • Auswertung 	0,35
LCC	<ul style="list-style-type: none"> • Herstellerkosten • Nutzerkosten • Auswertung 	0,35
Übergreifend	<ul style="list-style-type: none"> • Prozessschritte • Phasen • Transport • Sensitivitätsanalysen • Daten • Parameter • Technologien 	0,3

Die Erfüllung der Oberkategorien, gemessen am „Klassenbesten“ kann nun zur Einschätzung einer Qualität bzw. Detaillierung in diesem Bereich verwendet werden.

²³⁹ Datei DA_MK_1_IA_Auswertung.

²⁴⁰ Vgl. Kap.7.

²⁴¹ Z.B. Unterkategorie Phasen: sechs Phasen: Breite = 6.

²⁴² Wurden 3 von 6 Phasen abgedeckt: Teilwert = 0,5.

²⁴³ Vereinfachende Annahme der Gleichwertigkeit der Unterkategorien.

²⁴⁴ Damit wird nicht ein Zielwert vorgegeben, sondern eine relative Ausprägung innerhalb des Studienpools ermittelt: so wird z.B. die beste LCA-Studie gemäß den o.g. Kriterien mit 100% für die Oberkategorie LCA angesetzt.

Für die Gesamteinschätzung der Studie bzw. des Dokumentes können alle Kriterien unter einer **Gewichtung** zu einer Gesamterfüllung verrechnet werden.

Im später vorgestellten Inventar betragen die Gewichtungsfaktoren für LCA und LCC jeweils 0,35 (Gleichwertigkeit im ELCC dieser Arbeit, ökonomische und ökologische Kriterien sollen gleichermaßen betrachtet werden²⁴⁵). Die Oberkategorie Übergreifend geht zu 30% in die Gesamtbewertung ein. Insbesondere die Phasenabdeckung und der Untersuchungsgegenstand (Angabe von Parametern) sollen so hinreichend berücksichtigt werden.

8.2 Wichtigste Ergebnisse des Inventars

Aufgelistet werden als wichtigstes Ergebnis die fünf Studien, die insgesamt (d.h. nach ökologischen, ökonomischen und übergreifenden Kriterien) am besten abschneiden, geordnet nach den Technologien **sc-Si**, **pc-Si**, **a-Si** und **CdTe** als am häufigsten verbreitete Zelltechnologien.

Das vollständige Schema kann in der Datei Nr.1²⁴⁶ sowie in Anhang A 16 nachvollzogen werden.

Tab. 22: Inventar Erläuterung
(Eigene Erstellung)

Oberkategorie	Erfüllungsgrad		
	0 – 50%	50 - 75%	75 – 100%
LCA: Bereich Ökologie			
LCC: Bereich Ökonomie			
Ü: Übergreifend			
Gesamt			

²⁴⁵ Vgl. Kap.2.2.3.

²⁴⁶ Datei DA_MK_1_IA_Auswertung, Erläuterungen zur Navigation siehe erstes Tabellenblatt.

8.2.1 TOP 5 gesamt sc-Si

Tab. 23: Inventar Top 5 sc-Si
(Eigene Darstellung)

Referenz	LCA	LCC	Ü	gew. Summe
JUNGBLUTH, N.; STUCKI, M.; FRISCHKNECHT, R. (2009): Photovoltaics. In: Dones, R.u.a. (Hrsg.): Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Swiss 2009.	100,0%	16,7%	100,0%	70,8%
KANNAN, R. u.a. (2006): Life cycle assessment study of solar PV systems: An example of a 2.7kW(ind p) distributed solar PV system in Singapore, in: Solar Energy, Jg. 80 (2006), 2006, Heft 5, S. 555-563.	46,8%	58,3%	81,2%	61,2%
SENG, L.Y.; LALCHAND, G.; SOW LIN, G.M. (2008): Economical, environmental and technical analysis of building integrated photovoltaic systems in Malaysia, in: Energy Policy, Jg. 36, 2008, Heft 6, S. 2130-2142.	61,4%	58,3%	57,6%	59,2%
CELIK, A.N.; MUNEEER, T.; CLARKE, P. (2008): Optimal sizing and life cycle assessment of residential photovoltaic energy systems with battery storage. Optimale Auslegung und Lebenszyklusbewertung von Haus-Photovoltaikanlagen mit Batteriespeicherung, in: Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Jg. 16 (2008), 2008, Heft 1, S. 69-85.	43,2%	83,3%	40,7%	56,5%
FRANKL, P.; CORRADO, A.; LOMBARDELLI, S. (2004): Environmental and ecological life cycle inventories of present and future PV systems in europe for sustainability policies(ECLIPSE). final report. incl. dataset. Roma, Italia, 2004.	79,1%	0,0%	92,5%	55,4%

8.2.2 TOP 5 pc-Si

Tab. 24: Inventar Top 5 pc-Si
(Eigene Darstellung)

Referenz	LCA	LCC	Ü	gew. Summe
PACCA, S.; SIVARAMAN, D.; KEOLEIAN, G.A.(2006): Life Cycle Assessment of the 33 kW Photovoltaic System on the Dana Building at the University of Michigan: Thin Film Laminates, Multi-crystalline Modules, and Balance of System Components. 2006, University of Michigan, Michigan 2006.	96,6%	50,0%	85,4%	76,9%
JUNGBLUTH, N.; STUCKI, M.; FRISCHKNECHT, R.(2009): Photovoltaics. In: Dones, R.u.a. (Hrsg.): Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Swiss 2009.	100,0%	16,7%	100,0%	70,8%
MASON, J. u.a. (2006): Energy payback and life-cycle CO2 emissions of the BOS in an optimized 3- 5 MW PV installation, in: Prog.Photovolt: Res.Appl, Jg. 14, 2006, S. 179–190.	65,0%	41,7%	94,3%	65,6%
ITO, M. u.a. (2008): A comparative study on cost and life-cycle analysis for 100 MW very large-scale PV (VLS-PV) systems in deserts using m-Si, a-Si, CdTe, and CIS modules, in: Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Jg. 16, 2008, Heft 1, S. 17-30.	50,5%	75,0%	69,3%	64,7%
BERNAL-AGUSTÍN, J.L.; DUFO-LÓPEZ, R. (2006): Economical and environmental analysis of grid connected photovoltaic systems in Spain, in: Renewable Energy: An International Journal, Jg. 31, 2006, Heft 8, S. 1107-1128.	57,8%	66,7%	52,2%	59,2%

8.2.3 TOP 5 a-Si

Tab. 25: Inventar - Top 5 a-Si
(Eigene Erstellung)

Referenz	LCA	LCC	Ü	gew. Summe
LEWIS, G. u.a. (1999): PV-BILD: A life cycle environmental and economic assessment tool for building-integrated photovoltaic installations, in: National Science Foundation/Lucent Technologies Industrial Ecology Grant BES-9727268, 1999,	93,2%	66,7%	71,4%	77,4%
JUNGBLUTH, N.; STUCKI, M.; FRISCHKNECHT, R.(2009): Photovoltaics. In: Dones, R.u.a. (Hrsg.): Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Swiss 2009.	100,0%	16,7%	100,0%	70,8%
SALVE, J.L.(2008): Dealing with uncertainties in Life Cycle Assessment for emerging technologies. Test case: LCA of Silicon Thin-film PV, Master's thesis in Environmental Sciences, School of Science, Open University of the Netherlands, 2008.	88,3%	33,3%	86,1%	68,4%
ITO, M. u.a. (2008): A comparative study on cost and life-cycle analysis for 100 MW very large-scale PV (VLS-PV) systems in deserts using m-Si, a-Si, CdTe, and CIS modules, in: Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Jg. 16, 2008, Heft 1, S. 17-30.	50,5%	75,0%	69,3%	64,7%
MEIER, P.J.(2002): Life-cycle assessment of electricity generation systems and applications for climate change policy analysis, Dissertation, UMI Dissertation Services, Ann Arbor, Mich., Ann Arbor, Mich. 2002.	54,1%	33,3%	96,8%	59,6%

8.2.4 TOP 5 CdTe

Tab. 26: Inventar - Top 5 CdTe
(Eigene Darstellung)

Referenz	LCA	LCC	Ü	gew. Summe
JUNGBLUTH, N.; STUCKI, M.; FRISCHKNECHT, R.(2009): Photovoltaics. In: Dones, R.u.a. (Hrsg.): Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Swiss 2009.	100,0%	16,7%	100,0%	70,8%
ITO, M. u.a. (2008): A comparative study on cost and life-cycle analysis for 100 MW very large-scale PV (VLS-PV) systems in deserts using m-Si, a-Si, CdTe, and CIS modules, in: Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Jg. 16, 2008, Heft 1, S. 17-30.	50,5%	75,0%	69,3%	64,7%
ROES, A. u.a. (2009): Ex-ante environmental and economic evaluation of polymer photovoltaics, in: Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Jg. 17, 2009, Heft 6,	71,1%	16,7%	75,3%	53,3%
ITO, M. u.a. (2005): Comparative Study of m-Si, a-Si and CdTe System of Very Large-Scale PV (VLS-PV) Systems in Desert, in: Proceedings of 20th EU-PVSEC, S. 2178-2181.	43,2%	41,7%	74,0%	51,9%
JUNGBLUTH, N.; TUCHSCHMID, M.; DE WILD-SCHOLTEN, M. (2008): Life Cycle Assessment of Photovoltaics: Update of ecoinvent data v2.0, 2008. Online im Internet: http://www.ipcrystalclear.info/data/pdf/SP6-%20ECN,%20M.de%20Wild%20et%20al,%20report%20by%20ESU%20Services,%20Life%20Cycle%20Assessment%20of%20Photovoltaics%20Update%20of%20ecoinvent%20data%20v20.pdf , Abruf: 04.11.2009, 9.15 Uhr.	82,3%	0,0%	70,6%	50,0%

8.3 Ergänzungsmöglichkeiten

Mit dem erstellten Inventar ist die Grundlage für eine Sortierung und Klassifizierung des Studienpools gegeben. Die bisher einbezogenen Kriterien können jedoch auch – je nach Verwendungszweck - erweitert werden um folgende **Ergänzungen**:

- Alter der Studien²⁴⁷
- Einbezug der Schritte des ELCC weiter detailliert (vgl. Kap.4), z.B. Ziel und Anlass der Studie²⁴⁸
- Variation der Gewichtungsfaktoren, Prüfung der Veränderungen der Gesamtqualität im Sinne einer Sensitivitätsanalyse
- Einbezug der Tiefe innerhalb einer Oberkategorie, (bislang ist die Breite das Hauptkriterium, d.h. ob z.B. eine Wirkungskategorie in einer Studie genannt wird [max. Merkmalsausprägung=1]), also die Häufigkeit der Verwendung innerhalb einer Studie (z.B.

²⁴⁷ Bislang lediglich über die allgemeine Einschränkung des Studienpools gegeben. Aufgrund des methodischen Interesses der ersten Abschnitte ist es auch sinnvoll, das Kriterium Alter zunächst nicht weiter hinzuzuziehen. Für eine inhaltliche Auswertung konkreter Daten, z.B. Vergleiche von EPBT, ist das Alter jedoch in jedem Falle einzubeziehen.

²⁴⁸ Die Excel-Exporte und Atlas.ti Daten können hierfür als Grundlage verwendet werden.

Rückschlüsse auf eine detaillierte Behandlung einer Wirkungskategorie, wenn diese sechs Mal in einer Studie behandelt wird [Merkmalsausprägung=6]²⁴⁹²⁵⁰

- Umfang der Dokumente (dieser variiert von wenigen Seiten hin zu mehreren hundert Seiten)²⁵¹
- regelmäßige Aktualisierung²⁵²
- weitere Detaillierung der einbezogenen Technologien²⁵³
- Strukturierung gemäß weiterer Parameter des Untersuchungsgegenstandes, z.B. nach Installationsarten grid connected, stand alone etc.
- usw.

Mit den Ergänzungen kann das Inventar somit an die individuellen Ziele angepasst werden.

8.4 Weitere Verwendungsmöglichkeiten

Neben der Filterung nach einzelnen Technologien ist in dem vorgestellten Inventar eine Reihung nach den Oberkategorien LCA, LCC und ELCC möglich. Dieser Aggregationsgrad ist jedoch bereits hoch und kann für ein tiefergehendes Interesse wieder aufgeschlüsselt werden. So können bspw. die stärksten Sachbilanzen oder stärksten Wirkungsabschätzungen gemäß den Kriterien mittels Sortierung in geringeren Aggregationsstufen²⁵⁴ ermittelt werden. Gleiches gilt für andere Teilbereiche, die in der Auswertung der Inhaltsanalyse näher betrachtet wurden.

8.5 Kritik

Die Liste der Ergänzungsmöglichkeiten gibt bereits Aufschluss darüber, dass mit dem vorgestellten Inventar **nur die wichtigsten Kriterien** einbezogen wurden, was für eine Grobstrukturierung als ausreichend einzuschätzen ist.

Der zweite Kritikpunkt folgt aus der **Grundlage des Studienpools**: der Einsatz der Ausschlusskriterien und der Priorisierung bei der Bearbeitung in der Inhaltsanalyse schließt einen Teil der existierenden LZA zur PV aus, wodurch stets eine Einschränkung diesbezüglich gemacht werden muss.

²⁴⁹ Die Urlisten der Inhaltsanalyse geben diese Tiefe wieder und könnten für die Auswertung solcher Kriterien verwendet werden.

²⁵⁰ Aufgrund des eher methodischen Interesses wurde für das hier vorgestellte Inventar die Tiefe einer Kategorie nicht einbezogen, dies ist für inhaltliche Untersuchungen eher von Interesse. Gleichzeitig wird jedoch auf eine gewisse Unsicherheit der Auswertung von Häufigkeiten der Nennung innerhalb einer Studie verwiesen, da so schlichte Dinge wie Seitenumbrüche innerhalb der Studie bereits Einfluss nehmen (wird ein Thema über zwei oder mehr Seiten behandelt, weil der Textfluss dies erforderlich macht, so erhöht sich automatisch die Zahl der Vorkommen (softwarebedingt). So ergeben sich dadurch zwar wieder Rückschlüsse auf den Umfang eines Vorkommens, jedoch insgesamt ist eine Auswertung der Tiefe, nach Meinung des Autors, nicht als völlig eindeutig anzusehen.

²⁵¹ Genau genommen müsste eine Abgrenzung der relevanten inhaltlichen Teile stattfinden, um den Umfang tatsächlich einschätzen zu können. So ist bspw. eine Abhandlung von 20 Seiten über die Photovoltaik im Sinne dieser Arbeit als umfangreicher anzusehen als ein Technologievergleich zwischen sechs verschiedenen Stromerzeugungsmöglichkeiten auf 50 Seiten. Gleiches gilt z.B. für Dokumente, die zunächst ausführlich die Geschichte der Photovoltaik beleuchten im Vergleich zu rein themenbezogenen Abhandlungen usw.

²⁵² Mit der bereits angesprochenen stetig steigenden Zahl von Veröffentlichungen ist eine regelmäßige Aktualisierung dringend erforderlich.

²⁵³ Der aktuelle Detaillierungsgrad des Inventars ist auf die beiden ersten Generationen von Zelltechnologien beschränkt. Alle weiteren Technologien gehen gesammelt ein. Die Urlisten der Inhaltsanalyse bieten jedoch diese Detaillierung.

²⁵⁴ Siehe hierfür die Excel-Version des Inventars in Datei Nr.1 dieser Arbeit.

Neben diesen Einschränkungen und in Verbindung mit den Erweiterungs- und weiteren Verwendungsmöglichkeiten stellt das Inventar jedoch eine **Basis für weitere Auswertungen** und die Auswahl von Studien zur Datengewinnung und für Vergleiche dar.

9 Aktueller Stand des ELCC für PV, Zusammenfassung und Ausblick

9.1 Aktueller Stand

9.1.1 Verbindung von LCA und LCC einem ELCC für PV

Zu Beginn dieser Arbeit wurde die Charakterisierung des aktuellen Standes des ELCC für PV als eines der Ziele der folgenden Schritte definiert. Zum jetzigen Stand, nach den bisherigen Schritten:

- Definition der Anforderungen an ein ELCC für PV,
- Recherche von Lebenszyklusanalysen zur PV,
- Inhaltsanalyse,
- Auswertung und Rückschlüsse auf Inhalte einer LZA, sowie
- Strukturierung der untersuchten LZA für PV in einem Inventar,

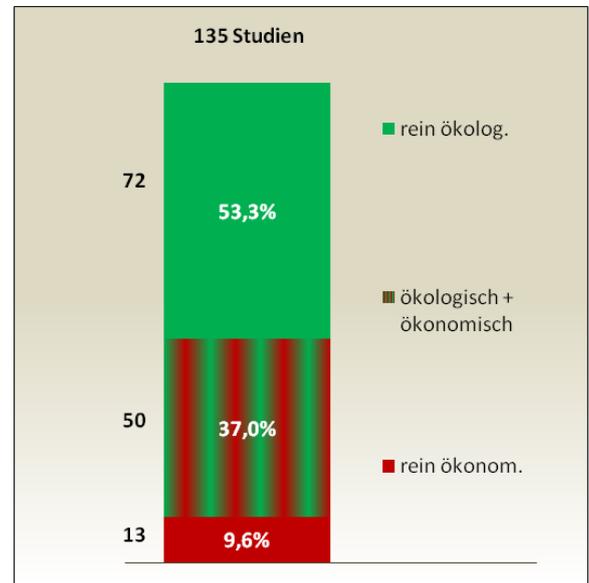


Abb. 57: Stand des ELCC für PV
(Eigene Darstellung)

können folgende Aussagen hierzu getroffen werden:

- Es existiert bereits eine Vielzahl bestehender Analysen unterschiedlicher Umfänge, die sich allgemein mit dem Lebenszyklus von PV-Systemen befassen. (360 LZA wurden ermittelt)
- Eine grobe Strukturierung einer Auswahl der bestehenden Analysen nach aus den Inhalten eines ELCC abgeleiteten Kategorien ergibt, dass 53,3% davon sich ausschließlich mit ökologischen Gesichtspunkten beschäftigen, 9,6% rein mit ökonomischen Fragestellungen und 37,0% beleuchten sowohl ökonomische als auch ökologische Kriterien (vgl. Abb. 57). (135 LZA wurden strukturiert).

Dies zeigt, dass einerseits rein quantitativ eine als solide einzuschätzende Studiengrundlage in der Praxis vorhanden ist. Andererseits beleuchtet die Mehrzahl dieser Dokumente (63%) nicht im Sinne eines ELCC ökonomische und ökologische Aspekte gemeinsam.

In 37% der Studien werden ökonomische und ökologische Kriterien gemeinsam untersucht, jedoch in unterschiedlicher Ausprägung. Dabei erfolgt die Analyse der Art der gemeinsamen Untersuchung, d.h. ob ökonomische und ökologische Aspekte parallel betrachtet werden oder eine Verbindung zwischen beiden hergestellt wird, Trade offs ermittelt werden etc., erst in einem nächsten Schritt, der jedoch nicht mehr Bestandteil dieser Auswertung sein kann²⁵⁵.

Die recherchierten Dokumente weisen in ihrer Untersuchung ein LCA, LCC o.ä. aus. Konkret benennt keines, auch keines der 37% gemeinsamer Untersuchungen, die Durchführung eines ELCC. Dies ist jedoch aufgrund der bereits erwähnten eher jungen Methodik, der fehlenden

²⁵⁵ Vgl. Abschnitt 9.3.

Standardisierung und der damit verbundenen fehlenden Trennschärfe der Instrumente²⁵⁶ zu erwarten gewesen.

Insgesamt kann jedoch eingeschätzt werden, dass sich die drei Ausgangspunkte eines ELCC²⁵⁷ - *Nachhaltigkeit, Lebenszyklusorientierung* und *Drei-Dimensionalität* – bereits gut in bestehenden LZA widerspiegeln. Insbesondere die Verbindung der einzelnen Elemente mittels geeigneter Instrumente sollte jedoch im Sinne einer ganzheitlichen Analyse von Systemen weiter ausgebaut werden.²⁵⁸

9.1.2 Phasenabdeckung

Die Phasenabdeckung wurde bereits in der Auswertung der Inhaltsanalyse eingeschätzt. Der größte Teil der untersuchten LZA betrachtet drei Phasen und mehr, womit die Phasenabdeckung als gut eingeschätzt werden kann.

9.1.3 EoL - Cradle to Retirement

Insgesamt muss hinsichtlich des Einbezugs der EoL-Phase festgestellt werden, dass der mit der Lebenszyklusorientierung verfolgte *cradle-to-grave* Ansatz in einem großen Teil vorhandener LZA nicht völlig erfüllt wird.

Anstelle einer Betrachtung von der Wiege bis zur Bahre, also über den gesamten Lebenszyklus des Produktsystems, kann häufig nur von einem *cradle-to-retirement*²⁵⁹ gesprochen werden. Alle Aspekte nach der Nutzung werden oftmals mit Verweis auf die Datenlage ausgeblendet. Ähnlich der Analogie zum menschlichen Lebenszyklus ergeben sich jedoch auch nach dem Ende der Nutzungsdauer (z.B. Arbeitsleben) bedeutsame Verwendungsmöglichkeiten (insbesondere Recycling, um die Analogie wieder zu verlassen), deren Auswirkungen nicht vernachlässigbar gering sind und deshalb in eine LZA einzuschließen sind.

Wie bereits in den Ausführungen zur besonderen Rolle der EoL-Phase angemerkt²⁶⁰, ist jedoch mit zunehmenden Alt-Anlagen eine wachsende Durchdringung und eine verbesserte Datenlage zu End of Life Aspekten von PV-Anlagen in den nächsten 10-15 Jahren zu erwarten. Darüber hinaus kann eine Auswertung der in Kap.5 dem Bereich EoL zugeordneten, aber in die Inhaltsanalyse nicht einbezogenen Dokumente²⁶¹.

9.2 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Thema Environmental Life Cycle Costing für Photovoltaik-Produkte mit dem Ziel der Definition von Anforderungen und der Charakterisierung des aktuellen Standes in Forschung und Praxis bearbeitet.

Hierfür wurden zunächst die theoretischen Grundlagen für das Environmental Life Cycle Costing in Ergänzung durch die Theorie zu Life Cycle Assessment und Life Cycle Costing ermittelt.

²⁵⁶ So weicht die Definition eines ELCC in dieser Arbeit von der anderer Autoren ab, vgl. Kap.2.2.3.

²⁵⁷ Vgl. Kap.2.1.

²⁵⁸ Diese Aussage stützt sich allerdings nur auf eine persönliche Einschätzung des Autors aus einer ersten Analyse der Dokumente, da die hierfür erforderliche Auswertung nicht mehr Bestandteil dieser Arbeit sein kann.

²⁵⁹ Um der Analogie weiter zu folgen.

²⁶⁰ Vgl. Kap.4.2.2.

²⁶¹ Dies erfolgte, da diese Betrachtungen keine LZA nach der Definition aus Kap.2.2.2 sind.

Im Anschluss wurden die wichtigsten technologischen Hintergründe zur Solarenergie, insbesondere der Photovoltaik betrachtet.

Aufbauend auf diesen Grundlagen konnten die wichtigsten Anforderungen für ein ELCC für PV-Produkte definiert werden.

Zur Ermittlung des aktuellen Standes in Forschung und Praxis wurde im Folgenden eine Recherche durchgeführt, die einen Studienpool von Lebenszyklusanalysen sowie Ergänzungsdokumente erschlossen hat.

Zur Analyse dieses Studienpools wurde ein Kategorienschema aufbauend auf den theoretischen Anforderungen an ein ELCC für PV-Produkte erstellt, das zur Durchführung einer Inhaltsanalyse der einzelnen Studien diene. Einerseits wurde damit die Grundlage zur methodischen Auswertung gelegt, andererseits können die kodierten Studien in späteren Schritten weiter ausgewertet werden (insbesondere die inhaltliche Auswertung von Ergebnissen der Studien wird auf dieser Grundlage erfolgen).

Die Auswertung der Inhaltsanalyse erbrachte methodische Erkenntnisse zu wichtigsten Kriterien und Kategorien, die in einem ELCC eine Rolle spielen, abgeleitet aus der Verwendung in vorhandenen Lebenszyklusanalysen.

Mit Hilfe der methodischen Erkenntnisse und aufbauend auf dem Anforderungsschema des ELCC für PV-Systeme wurde im Anschluss ein Inventar des Studienpools nach den drei Oberkategorien ökologischer, ökonomischer und übergreifender Informationen erstellt.

Die bisherigen Schritte ermöglichten eine allgemeine Einschätzung des aktuellen Standes des ELCC für PV-Produkte, jedoch mit der Einschränkung einer erforderlichen weiteren Detaillierung, die auf den bisherigen Betrachtungen und Vorarbeiten aufsetzen kann, jedoch aufgrund der umfangreichen Vorarbeit nicht im Rahmen dieser Arbeit fertiggestellt werden kann.

Mit Empfehlungen zu Möglichkeiten der weiteren Verwendung der Ergebnisse dieser Arbeit und dem weiteren Forschungsbedarf im Bereich Environmental Life Cycle Costing für Produkte der PV-Industrie wird diese Arbeit nun abschließen.

9.3 Grenzen der Arbeit, folgende Schritte und weiterer Forschungsbedarf

“You will, I am sure, agree with me that... if page 534 only finds us in the second chapter, the length of the first one must have been really intolerable.”

Sir Arthur Conan Doyle

Die Einschätzung von Sir CONAN DOYLE soll etwas humoristisch auf den Arbeitsumfang der bisherigen Teile dieser Arbeit verweisen, die letztlich eine wichtige Vorarbeit für weitere Auswertungen des Studienpools und dem ELCC für PV-Systeme darstellen wird.

Mit Erstellung des Anforderungssystems, dem Studienpool, aber insbesondere auf Basis der kodierten Studien kann nun eine Reihe weiterer Untersuchungen stattfinden:

- methodisches Vorgehen bei der gemeinsamen Analyse von ökonomischen und ökologischen Kriterien
- Ermittlung der wichtigsten Treiber in PV-Systemen aus ökologischer und ökonomischer Sicht

- Ergebnisanalyse der Studien – konkrete Daten und Benchmarks für die einzelnen Technologien in Ökonomie und Ökologie
- Potentialabschätzungen durch Ergebnisveränderungen über die Zeit
- Eignung von Indikatoren wie bspw. der EPBT zur Beurteilung von PV-Systemen
- Ermittlung einer gemeinsamen Kennzahl zur Gesamtbeurteilung ökonomischer, ökologischer und technischer Qualität
- usw.

Es existiert also eine Vielzahl von Einzelauswertungen und relevanten Aspekten, die bei der Analyse der Studien in den Fokus gerückt sind und weiter untersucht werden (sollten).

Im Rahmen dieser Arbeit mussten diese jedoch zunächst ausgeschlossen werden, weshalb festgestellt werden muss:

- Nicht-Erreichung Ziel 3.

Von der Ergebnisanalyse abgesehen, konnte jedoch mit der Generierung des Kategorienschemas für ein ELCC für PV-Systeme, dem ermittelten Studienpool, den daraus abgeleiteten methodischen Erkenntnissen sowie dem Inventar von Lebenszyklusanalysen zur Photovoltaik bereits ein geeigneter Anhaltspunkt für den aktuellen Stand des ELCC für PV-Produkte gegeben werden.

Insbesondere auf Basis der recherchierten und kodierten Studien in Verbindung mit den methodischen Erkenntnissen daraus ist nun der Grundstein für eine weitere ökonomische und ökologische Untersuchung der Photovoltaik mit der Anwendung des Environmental Life Cycle Costing gelegt, auf dem weiter aufgebaut werden kann, um die in der Einführung von EBERT aufgeworfene Frage zu klären:

[Sonnenenergie]:

- zu hohe Kosten,
- geringer Wirkungsgrad und
- schlechte Ökobilanz:

Ist dies tatsächlich so?

Es ist viel schönes Licht in dieser Welt.

Wilhelm Raabe

Machen wir es uns möglichst gut zu Nutze!

Anhang

A 1 Recherche: Datenbankauswahl

Tab. 27: Anhang: Recherche Datenbankauswahl
(Eigene Erstellung)

	Datenbank	Beschreibung
	WiWi	
X	Business Source Complete	Die Datenbank enthält Volltext-Beiträge aus über 10.000 wirtschaftswissenschaftlichen Zeitschriften und anderen Quellen, darunter mehr als 1.150 von Experten geprüfte Wirtschaftspublikationen. Sie deckt praktisch alle Themenbereiche der Wirtschaftswissenschaften ab. Mehr als 350 Titel bieten Deep-Backfiles an, einige sogar rückwärts bis 1922.
x	Emerald Management Xtra	Emerald Management Xtra kombiniert die beiden Datenbanken Emerald Fulltext database und Emerald Management Reviews database. Sie enthält u. a. Volltexte aus bis zu ca. 175 führenden Managementjournalen und bietet ausserdem spezielle Extras (z. B. Fallstudien, Interviews, Reviews) für Lehre und Forschung. Die wichtigen Bereiche der Managementforschung werden abgedeckt, insbesondere die Aspekte Strategie, Führung, Marketing und Personalwesen, Bibliotheksmanagement, Informationsmanagement und Wissensmanagement. Es sind auch mehr als 15 Volltextzeitschriften aus dem Bereich "Engineering & Materials Science" enthalten. Auf den Volltext kann bis zum Jahr 1994, auf die Inhaltsangaben sogar bis 1989 zurückgegriffen werden.
x	TEMA	Weist über 3 Mio. bibliographische Daten seit 1989 mit Abstracts der deutschen und internationalen Fachliteratur aus dem gesamten Gebiet der Technik nach und vermittelt umfassend Ergebnisse aus der Forschung und Entwicklung, gibt Hinweise auf neue innovative Entwicklungen sowie auf praxisorientierte Beschreibungen neuer Produkte und Verfahren. Ergänzende Datenbank Technik und Management - Archiv 1968-1987 (TE87) TEMA besteht aus den Datenbanken: * DOMA (Maschinen- und Anlagenbau), * ZDEE (Elektrotechnik und Elektronik) * WEMA (Werkstoffe) * TOGA (Textil) * MEDI (Medizinische Technik) * BEFO (Betriebsführung und Betriebsorganisation) * BERG (Bergbau) * ETEC (Energietechnik)
		Wirtschaftstheorie sowie Finanzwesen.
x	Elsevier ScienceDirect	Zugriff auf die elektronischen Zeitschriften des Verlags Elsevier, erweitert um Fachdatenbanken und eine Web-Suche. Es kann simultan oder getrennt gesucht werden * nach Aufsätzen aus allen Elsevier-Zeitschriften (mit Zugriff auf Volltexte bei lizenzierten Zeitschriften - z. B. Freedom Collection, Subject Collections -, sonst auf Abstracts) * in den Datenbanken BIOTECNOBASE, Beilstein Abstracts, Compendex, EMBASE, Elsevier BIOBASE, FLUIDEX, GEOBASE, OceanBase, World Textiles (nur Abstracts) * nach "wissenschaftlich relevanten Seiten" im WWW
x	Web of Science	Ein Vorteil von Web of Science gegenüber reinen Fachdatenbanken (Aufsatzdatenbanken) ist die Interdisziplinarität, das breite Fächerspektrum von Kunst, Geistes-, Sozialwissenschaften, Medizin, Naturwissenschaften und Technik. Ausgewertet werden ca. 9.200 wissenschaftliche Zeitschriften mit ca. 37 Millionen Artikel aller Fachgebiete. * Übergreifende oder getrennte Suche in den Teildatenbanken Arts & Humanities Citation Index, Science Citation Index Expanded, Social Sciences Citation Index, Conference Proceedings Citation Index - Science (CPCI-S), Conference Proceedings Citation Index - Social Science & Humanities (CPCI-SSH) (ISI proceedings) * Über die Zitate eines Artikels "Cited References" kann die Forschungsentwicklung retrospektiv verfolgt werden. * Über die "Cited Reference Search" (Aufsätze, die einen Artikel zitiert haben) lässt sich die Forschungsentwicklung auch prospektiv verfolgen. * Über die Suche verwandter Artikel, die die gleiche Literatur zitieren, können thematisch relevante Aufsätze ("Find Related Records") ermittelt werden. * Teilweise mit direkter Verlinkung zu Volltexten * Exportformat für Literaturverwaltungsprogramme wie EndNote®, Reference Manager® and ProCite® * gleiches Login für persönlichen Account in ISI Web of Knowledge und in der Forscher-Community ResearcherID.com
	Übergreifend	
x	Academic Search Complete (via EBSCO Host)	Multidisziplinäre, umfangreiche EBSCOhost-Volltextdatenbank mit mehr als 6.100 Volltextzeitschriften, davon ca. 5.100 "peer reviewed". Zusätzlich enthält die Datenbank Abstracts zu mehr als 10.100 Zeitschriften. Die Volltextdokumente werden im PDF-Format angeboten und gehen zurück bis ins Jahr 1887.

A 2 Recherche: Concept Map und Suchanfragen

Zur Recherchestrategie erstellte Concept Map mit wichtigsten Oberbegriffen der Suche und Synonymen

Tab. 28: Anhang: Concept Map
(Eigene Erstellung)

LCA	LCC	EOl	Produkte der Solarenergie	von der Wiege bis zur Bahre
LC assessment	life cycle cost*	end of life	Ph (F) otovoltaik	cradle to grave
LC analysis	whole life cost*	Nutzungsende	Solarzellen	whole life cycle
Ökobilanz(ierung)	full cost*	Lebensende	Solarmodule	cradle to gate
Ecobalance	total cost*	final stage	solar panel/module/cell	life cycle stages
Umweltbilanz	total cost of ownership		Dünn-/Dickschicht...	phase* of life
LCA study	TCO	Entsorgung		lifetime
Öko-Studie	life cycle accounting	Rücknahme	(sc-Si, pc-Si, a-Si, CdTe...)	
	Product Life Cycle (PCL)	recycling		Lebensweg
Untersuchungsrahmen	Produktlebenszyklus	re(-)use	Silizium?	Lebensphasen
funktionelle Einheit	Lebenszyklus(kosten)	aufbereitung	Halbleiter?	
Referenz-Einheit	(-rechnung)	disposal		
		salvage	Solarthermie	
Sachbilanz	Prozesskosten	collect*	Sonnenkollektoren	
Stoffstrombilanz	Vollkosten		solar collector	
Stoffstromanalyse	Gesamtkosten	product teardown	CSP	
Stofffluss(ß)	(Produkt)-Controlling	Rückbau	CPV (concentrator PV)	
Input/Output	Kostenrechnung	decomissioning	thermosolar	
LC-Inventory			parabolic trough collector	
	externe Effekte		Hybrid?	
Wirkungsabschätzung	externe Kosten			
Wirkungsbilanz	Internalisierung			
impact assessment	monetäre Bewertung			
	Monetarisierung			
Umweltleistung	economic indicator*			
Umweltaspekte	Umweltkosten*			
Umweltindikator*	environmental cost*			
economic aspects	Wirtschaftlichkeit			
Emissionen	Pay-back time			
externe Effekte	trade off			
Externalitäten				
Ressourcenverbrauch				

Suchbegriffskombinationen bei der Recherche

Tab. 29: Suchbegriffskombinationen Life Cycle Assessment
(Eigene Erstellung)

Spra	SB 1	SB 2	SB 3	SB 4	Nr.	Abgeleitete Suchabfragen		
en	Solar*	life cycle	assessment	LCA	1.1.1	(Solar* OR photovoltaic* OR PV) AND ((life cycle AND assessment) OR LCA)		
	photovoltaic*	analysis			1.1.2	(Solar* OR photovoltaic* OR PV) AND life cycle AND analysis	NOT	(life cycle assessment OR LCA)
	PV	inventor*	LCI		1.1.3	(Solar* OR photovoltaic* OR PV) AND ((life cycle AND inventor*) OR LCI)	NOT	(life cycle assessment OR LCA)
		stud*			1.1.4	(Solar* OR photovoltaic* OR PV) AND life cycle AND stud*	NOT	(life cycle assessment OR LCA)
		interpretation			1.1.5	(Solar* OR photovoltaic* OR PV) AND life cycle AND interpretation	NOT	(life cycle assessment OR LCA)
		performance			1.1.6	(Solar* OR photovoltaic* OR PV) AND life cycle AND performance	NOT	(life cycle assessment OR LCA)
		balance			1.1.7	(Solar* OR photovoltaic* OR PV) AND life cycle AND balance	NOT	(life cycle assessment OR LCA)
		scope			1.1.8	(Solar* OR photovoltaic* OR PV) AND scope	NOT	(life cycle assessment OR LCA)
		functional unit	reference unit		1.1.9	(Solar* OR photovoltaic* OR PV) AND (functional unit OR reference unit)	NOT	(life cycle assessment OR LCA)
		ecobalance	eco-balance		1.1.10	(Solar* OR photovoltaic* OR PV) AND (ecobalance OR eco-balance)	NOT	(life cycle assessment OR LCA)
		assessment		LCIA	1.1.11	(Solar* OR photovoltaic* OR PV) AND ((impact AND assessment) OR LCIA)	NOT	(life cycle assessment OR LCA)
		analysis			1.1.12	(Solar* OR photovoltaic* OR PV) AND impact AND analysis	NOT	(life cycle assessment OR LCA)
		evaluation			1.1.13	(Solar* OR photovoltaic* OR PV) AND impact AND evaluation	NOT	(life cycle assessment OR LCA)
		environment*	stud*		1.1.14	(Solar* OR photovoltaic* OR PV) AND environment* AND stud*	NOT	(life cycle assessment OR LCA)
		performance			1.1.15	(Solar* OR photovoltaic* OR PV) AND environment* AND performance	NOT	(life cycle assessment OR LCA)
		aspect*			1.1.16	(Solar* OR photovoltaic* OR PV) AND environment* AND aspect*	NOT	(life cycle assessment OR LCA)
		indicator*			1.1.17	(Solar* OR photovoltaic* OR PV) AND environment* AND indicator*	NOT	(life cycle assessment OR LCA)
		material flow			1.1.18	(Solar* OR photovoltaic* OR PV) AND material flow	NOT	(life cycle assessment OR LCA)
		emissions			1.1.19	(Solar* OR photovoltaic* OR PV) AND emissions	NOT	(life cycle assessment OR LCA)
		input	output		1.1.20	(Solar* OR photovoltaic* OR PV) AND input AND output	NOT	(life cycle assessment OR LCA)
		externalit*	external effect*		1.1.21	(Solar* OR photovoltaic* OR PV) AND externalit* OR external effect*	NOT	(life cycle assessment OR LCA)
		cradle to*			1.1.22	(Solar* OR photovoltaic* OR PV) AND cradle to*	NOT	(life cycle assessment OR LCA)
		footprint*			1.1.23	(Solar* OR photovoltaic* OR PV) AND footprint*	NOT	(life cycle assessment OR LCA)
dt	Solar*	Ökobilanz*			1.2.1	(Solar* OR photovoltaic* OR fotov AND (Ökobilanz* OR Oekobilanz*))		
	photovoltaic*	Umweltbilanz*			1.2.2	(Solar* OR photovoltaic* OR fotov AND Umweltbilanz*)	NOT	Ökobilanz
	PV	Umweltwirkung*			1.2.3	(Solar* OR photovoltaic* OR fotov AND Umweltwirkung*)	NOT	Ökobilanz
	Fotovoltaic*	Umweltbewertung			1.2.4	(Solar* OR photovoltaic* OR fotov AND Umweltbewertung)	NOT	Ökobilanz
	Sonnen*	Untersuchungsrahmen			1.2.5	(Solar* OR photovoltaic* OR fotov AND Untersuchungsrahmen)	NOT	Ökobilanz
	solar	funktion Einheit			1.2.6	(Solar* OR photovoltaic* OR fotov AND funktion* Einheit)	NOT	Ökobilanz
		Referenz-Einheitsreferenzinheit			1.2.7	(Solar* OR photovoltaic* OR fotov AND (Referenz-Einheit OR Referenzinheit))	NOT	Ökobilanz
		Sachbilanz			1.2.8	(Solar* OR photovoltaic* OR fotov AND Sachbilanz)	NOT	Ökobilanz
		Stoffstrom*			1.2.9	(Solar* OR photovoltaic* OR fotov AND Stoffstrom*)	NOT	Ökobilanz
		Stofffluss*	Stofffluß*		1.2.10	(Solar* OR photovoltaic* OR fotov AND (Stofffluss* OR Stofffluß*))	NOT	Ökobilanz
		input	output		1.2.11	(fotovoltaic* OR PV OR Sonnen* O AND input AND output)	NOT	Ökobilanz
		Wirkungs*			1.2.12	(Solar* OR photovoltaic* OR fotov AND Wirkungs*)	NOT	Ökobilanz
		Umweltleistung			1.2.13	(Solar* OR photovoltaic* OR fotov AND Umweltleistung)	NOT	Ökobilanz
		Umweltaspekt*			1.2.14	(Solar* OR photovoltaic* OR fotov AND Umweltaspekt*)	NOT	Ökobilanz
		Emission*			1.2.15	(Solar* OR photovoltaic* OR fotov AND Emission*)	NOT	Ökobilanz
		Umweltindikator	Umwelt-Indikator*		1.2.16	(Solar* OR photovoltaic* OR fotovoltaic* (Umweltindikator* OR Umwelt-Indikator*))	NOT	Ökobilanz
		LCA	Studi*		1.2.17	(Solar* OR photovoltaic* OR fotov AND LCA AND Studi*)	NOT	Ökobilanz
	Oeko*	Studi*		1.2.18	(Solar* OR photovoltaic* OR fotov AND Oeko* AND Studi*)	NOT	Ökobilanz	
	extern* Effekt*	Externalität*		1.2.19	(Solar* OR photovoltaic* OR fotov AND extern* Effekt* OR Externalität*)	NOT	Ökobilanz	
	cradle to*			1.2.20	(fotovoltaic* OR Sonnen* OR *sol: AND cradle to*)	NOT	Ökobilanz	
	Wiege	Bahre		1.2.21	(Solar* OR photovoltaic* OR fotovoltaic* (Wiege AND Bahre))	NOT	Ökobilanz	
esp	solar*	ciclo de vida	ACV		1.3.1	(solar* OR fotovolt* OR fv) AND (ciclo de vida OR ACV)		
	fotovolt*	ciclo vital			1.3.2	(solar* OR fotovolt* OR fv) AND ciclo vital	NOT	ciclo de vida
	FV	inventario			1.3.3	(solar* OR fotovolt* OR fv) AND inventario	NOT	ciclo de vida
		balance*	eco		1.3.4	(solar* OR fotovolt* OR fv) AND balance AND eco	NOT	ciclo de vida
		evaluación de impact*			1.3.5	(solar* OR fotovolt* OR fv) AND evaluación de impact*	NOT	ciclo de vida
		impacto ambiental			1.3.6	(solar* OR fotovolt* OR fv) AND impacto ambiental	NOT	ciclo de vida
		emisiones			1.3.7	(solar* OR fotovolt* OR fv) AND emisiones	NOT	ciclo de vida
		efecto* extern*	externalidad*		1.3.8	(solar* OR fotovolt* OR fv) AND efecto* externo* OR externalidad*	NOT	ciclo de vida
		cuna	tumba		1.3.9	(solar* OR fotovolt* OR fv) AND cuna AND tumba	NOT	ciclo de vida
fr	solair*	cycle* de vie	ACV		1.4.1	(solair* OR photovolt* OR photo: AND (cycle* de vie OR ACV))		
	photovolt*	cycle* vital			1.4.2	(solair* OR photovolt* OR photo: AND cycle* vital)	NOT	cycle* de vie
	photopile*	inventair*			1.4.3	(solair* OR photovolt* OR photo: AND inventair*)	NOT	cycle* de vie
	PV	écobilan*			1.4.4	(solair* OR photovolt* OR photo: AND écobilan*)	NOT	cycle* de vie
		impact*			1.4.5	(solair* OR photovolt* OR photo: AND impact*)	NOT	cycle* de vie
		émission*			1.4.6	(solair* OR photovolt* OR photo: AND émission*)	NOT	cycle* de vie
		environnemen*	étude*		1.4.7	(solair* OR photovolt* OR photo: AND environnemen* AND étude*)	NOT	cycle* de vie
		externalité*	effet* externe*		1.4.8	(solair* OR photovolt* OR photo: AND externalité* OR effet* externe*)	NOT	cycle* de vie
		berceau	tombe		1.4.9	(solair* OR photovolt* OR photo: AND berceau AND tombe)	NOT	cycle* de vie

Tab. 30: Suchbegriffskombinationen Life Cycle Costing
(Eigene Erstellung)

Spra	SB 1 (Produkt)	SB 2	SB 3	SB 4	Nr.	Abgeleitete Suchabfragen
en	Solar*	life cycle	cost*	LCC	2.1.1	(Solar* OR photovoltaik* OR PV) AND ((life cycle AND cost*) OR LCC)
	photovoltaik*	accounting			2.1.2	(Solar* OR photovoltaik* OR PV) AND life cycle AND accounting NOT life cycle costing
	PV	lifetime	cost*		2.1.3	(Solar* OR photovoltaik* OR PV) AND lifetime AND cost* NOT life cycle costing
		whole life	cost*		2.1.4	(Solar* OR photovoltaik* OR PV) AND whole life AND cost* NOT life cycle costing
		full cost*			2.1.5	(Solar* OR photovoltaik* OR PV) AND full cost* NOT life cycle costing
		total cost*			2.1.6	(Solar* OR photovoltaik* OR PV) AND total cost* NOT life cycle costing
		cost	accounting		2.1.7	(Solar* OR photovoltaik* OR PV) AND cost AND accounting NOT life cycle costing
		costing			2.1.8	(Solar* OR photovoltaik* OR PV) AND costing NOT life cycle costing
		environment*	cost*		2.1.9	(Solar* OR photovoltaik* OR PV) AND environment* AND cost* NOT life cycle costing
		product life cycle		PLC	2.1.10	(Solar* OR photovoltaik* OR PV) AND (product life cycle OR PLC) NOT life cycle costing
		life cycle	stage*	phase*	2.1.11	(Solar* OR photovoltaik* OR PV) AND life cycle AND (stage OR phase) NOT life cycle costing
		internali*			2.1.12	(Solar* OR photovoltaik* OR PV) AND internali* NOT life cycle costing
		monet*			2.1.13	(Solar* OR photovoltaik* OR PV) AND monet* NOT life cycle costing
		economic	valuation		2.1.14	(Solar* OR photovoltaik* OR PV) AND economic AND valuation NOT life cycle costing
			indicator*		2.1.15	(Solar* OR photovoltaik* OR PV) AND economic AND indicator* NOT life cycle costing
		cost	analysis		2.1.16	(Solar* OR photovoltaik* OR PV) AND cost AND analysis NOT life cycle costing
			benefit		2.1.17	(Solar* OR photovoltaik* OR PV) AND cost AND benefit NOT life cycle costing
		pay?back			2.1.18	(Solar* OR photovoltaik* OR PV) AND pay?back NOT life cycle costing
		trade?off			2.1.19	(Solar* OR photovoltaik* OR PV) AND trade?off NOT life cycle costing
		cost	effectiveness		2.1.20	(Solar* OR photovoltaik* OR PV) AND cost AND effectiveness NOT life cycle costing
		economic	efficiency		2.1.21	(Solar* OR photovoltaik* OR PV) AND economic AND efficiency NOT life cycle costing
		external	cost*		2.1.22	(Solar* OR photovoltaik* OR PV) AND external AND cost* NOT life cycle costing
		cost*	stud*		2.1.23	(Solar* OR photovoltaik* OR PV) AND cost* AND stud* NOT life cycle costing
dt	Solar*	life cycle costing	LCC		2.2.1	(fotovoltaik* OR Sonnen* OR *soli AND (life cycle costing OR LCC)
	photovoltaik*	Lebenszykluskost	Lebenszyklus-Kosten*		2.2.2	(Solar* OR photovoltaik* OR fotov AND (Lebenszykluskosten* OR Lebenszyklus-Kosten*))
	PV	Lebenszyklusrech	Lebenszyklus-Rechnung*		2.2.3	(Solar* OR photovoltaik* OR fotov AND (Lebenszyklusrechnung OR Lebenszyklus-Rechnung))
	Fotovoltaik*	Lebenszyklus*	Phasen		2.2.4	(Solar* OR photovoltaik* OR fotov AND Lebenszyklus* AND Phasen)
	Sonnen*	Produktlebenszyklus*			2.2.5	(Solar* OR photovoltaik* OR fotov AND Produktlebenszyklus*)
	solar	Vollkosten			2.2.6	(Solar* OR photovoltaik* OR fotov AND Vollkosten*)
		Gesamtkosten*			2.2.7	(Solar* OR photovoltaik* OR fotov AND Gesamtkosten*)
		Prozesskosten			2.2.8	(Solar* OR photovoltaik* OR fotov AND Prozesskosten)
		Kostenrechnung			2.2.9	(Solar* OR photovoltaik* OR fotov AND Kostenrechnung)
		Controlling*			2.2.10	(Solar* OR photovoltaik* OR fotov AND Controlling*)
		Lebensphasen	Kosten		2.2.11	(Solar* OR photovoltaik* OR fotov AND Lebensphasen AND Kosten)
		Lebensweg			2.2.12	(Solar* OR photovoltaik* OR fotov AND Lebensweg)
		internali*			2.2.13	(Solar* OR photovoltaik* OR fotov AND internali*)
		Montarisierung			2.2.14	(Solar* OR photovoltaik* OR fotov AND Montarisierung)
		monetar*	Bewertung		2.2.15	(Solar* OR photovoltaik* OR fotov AND monetar* AND Bewertung)
		Wirtschaftlichkeit			2.2.16	(Solar* OR photovoltaik* OR fotov AND Wirtschaftlichkeit)
		Kostenanalyse*	leben*		2.2.17	(Solar* OR photovoltaik* OR fotov AND (Kostenanalyse* AND leben*))
		Pay?back			2.2.18	(Solar* OR photovoltaik* OR fotov AND Pay?back)
		trade?off			2.2.19	(Solar* OR photovoltaik* OR fotov AND trade?off)
		externe	Kosten		2.2.20	(Solar* OR photovoltaik* OR fotov AND externe AND Kosten)
		Studi*	Kosten*	*kosten	2.2.21	(Solar* OR photovoltaik* OR fotov AND Studi* AND (Kosten* OR *kosten))
		Fallstudi*	Kosten*	*kosten	2.2.21	(Solar* OR photovoltaik* OR fotov AND Fallstudi* AND (Kosten* OR *kosten))
	esp	solar*	Cost*	Ciclo de vida	CCV	2.3.1
fotovolt*			ciclo vital		2.3.2	(solar OR fotovolt* OR fv) AND Cost* AND ciclo vital NOT ciclo de vida
PV			contabilidad		2.3.3	(solar OR fotovolt* OR fv) AND Cost* AND contabilidad NOT ciclo de vida
			cálculo		2.3.4	(solar OR fotovolt* OR fv) AND Cost* AND cálculo NOT ciclo de vida
			análisis		2.3.5	(solar OR fotovolt* OR fv) AND Cost* AND análisis NOT ciclo de vida
			integral*		2.3.6	(solar OR fotovolt* OR fv) AND Cost* AND integral* NOT ciclo de vida
		fase*	vida		2.3.7	(solar OR fotovolt* OR fv) AND fase* AND vida NOT ciclo de vida
		rentabilidad			2.3.8	(solar OR fotovolt* OR fv) AND rentabilidad NOT ciclo de vida
		valuación	monet*		2.3.9	(solar OR fotovolt* OR fv) AND valuación AND monet* NOT ciclo de vida
		internali*	internali*		2.3.10	(solar OR fotovolt* OR fv) AND internali* AND internali* NOT ciclo de vida
		estudio*	casuístico*	caso	2.3.11	(solar OR fotovolt* OR fv) AND estudio* AND (casuístico* OR caso) NOT ciclo de vida
fr	solair*	Coût*	cycle de vie		2.4.1	(solair* OR photovolt* OR photoq AND Coût* AND cycle de vie)
	photovolt*		cycle vital		2.4.2	(solair* OR photovolt* OR photoq AND Coût* AND cycle vital) NOT cycle de vie
	photopile*		évaluation*		2.4.3	(solair* OR photovolt* OR photoq AND Coût* AND évaluation*) NOT cycle de vie
	PV		analyse*		2.4.4	(solair* OR photovolt* OR photoq AND Coût* AND analyse*) NOT cycle de vie
			complet*		2.4.5	(solair* OR photovolt* OR photoq AND Coût* AND complet*) NOT cycle de vie
		rentabilité			2.4.6	(solair* OR photovolt* OR photoq AND rentabilité) NOT cycle de vie
		Controlling*			2.4.7	(solair* OR photovolt* OR photoq AND Controlling*) NOT cycle de vie
		phase*	vie		2.4.8	(solair* OR photovolt* OR photoq AND phase* AND vie) NOT cycle de vie
		internali*			2.4.9	(solair* OR photovolt* OR photoq AND internali*) NOT cycle de vie
		évaluation*	monétaire*		2.4.10	(solair* OR photovolt* OR photoq AND évaluation* AND monétaire*) NOT cycle de vie
		étude*	cas	modèle*	2.4.11	(solair* OR photovolt* OR photoq AND étude* AND (cas OR modèle*)) NOT cycle de vie

Tab. 31: Suchbegriffskombinationen End of Life
(Eigene Erstellung)

Spra	SB 1 (Produkt)	SB 2	SB 3	SB 4	Nr.	Abgeleitete Suchabfragen
en	Solar*	end of life	EOL		3.1.1	(Solar* OR photovoltaic* OR PV) AND (end of life OR EOL)
	photovoltaic*	end of use			3.1.2	(Solar* OR photovoltaic* OR PV) AND end of use NOT (end of life OR EOL)
	PV	final stage*			3.1.3	(Solar* OR photovoltaic* OR PV) AND final stage* NOT (end of life OR EOL)
		end	lifetime		3.1.4	(Solar* OR photovoltaic* OR PV) AND end AND lifetime NOT (end of life OR EOL)
		disposal			3.1.5	(Solar* OR photovoltaic* OR PV) AND disposal NOT (end of life OR EOL)
		salvage			3.1.6	(Solar* OR photovoltaic* OR PV) AND salvage NOT (end of life OR EOL)
		reuse	re-use		3.1.7	(Solar* OR photovoltaic* OR PV) AND (reuse OR re-use) NOT (end of life OR EOL)
		recycling			3.1.8	(Solar* OR photovoltaic* OR PV) AND recycling NOT (end of life OR EOL)
		recover*			3.1.9	(Solar* OR photovoltaic* OR PV) AND recover* NOT (end of life OR EOL)
		collect*	return		3.1.10	(Solar* OR photovoltaic* OR PV) AND (collect* AND return) NOT (end of life OR EOL)
		redemption			3.1.11	(Solar* OR photovoltaic* OR PV) AND redemption NOT (end of life OR EOL)
		treatment			3.1.12	(Solar* OR photovoltaic* OR PV) AND treatment NOT (end of life OR EOL)
		conditioning			3.1.13	(Solar* OR photovoltaic* OR PV) AND conditioning NOT (end of life OR EOL)
		teardown			3.1.14	(Solar* OR photovoltaic* OR PV) AND teardown NOT (end of life OR EOL)
dt	Solar*	end of life	EOL		3.2.1	(fotovoltaic* OR Sonnen* OR *sol; AND (end of life OR EOL)
	photovoltaic*	recycling			3.2.2	(fotovoltaic* OR Sonnen* OR *sol; AND recycling NOT (end of life OR EOL)
	PV	Nutzungsende			3.2.3	(Solar* OR photovoltaic* OR fotov AND Nutzungsende NOT (end of life OR EOL)
	Fotovoltaic*	Lebensende			3.2.4	(Solar* OR photovoltaic* OR fotov AND Lebensende NOT (end of life OR EOL)
	Sonnen*	Endphase*			3.2.5	(Solar* OR photovoltaic* OR fotov AND Endphase* NOT (end of life OR EOL)
	solar	Entsorgung			3.2.6	(Solar OR photovoltaic* OR fotov AND Entsorgung NOT (end of life OR EOL)
		Rücknahme	Rückgabe		3.2.7	(Solar* OR photovoltaic* OR fotov AND (Rücknahme OR Rückgabe) NOT (end of life OR EOL)
		Verwertung			3.2.8	(Solar OR photovoltaic* OR fotov AND *Verwertung NOT (end of life OR EOL)
		aufbereitung			3.2.9	(Solar OR photovoltaic* OR fotov AND *aufbereitung NOT (end of life OR EOL)
		Rückbau			3.2.10	(Solar* OR photovoltaic* OR fotov AND Rückbau NOT (end of life OR EOL)
		Rückgewinnung			3.2.11	(Solar* OR photovoltaic* OR fotov AND Rückgewinnung NOT (end of life OR EOL)
		altstoff*			3.2.12	(Solar* OR photovoltaic* OR fotov AND altstoff* NOT (end of life OR EOL)
		Endnutzung			3.2.13	(Solar* OR photovoltaic* OR fotov AND Endnutzung NOT (end of life OR EOL)
esp	solar*	fin	vida		3.3.1	(solar OR fotovolta* OR fv) AND fin AND vida NOT (fin AND vida)
	fotovoltaic*	utilización			3.3.2	(solar OR fotovolta* OR fv) AND fin AND utilización NOT (fin AND vida)
	PV	fase*	ultim*		3.3.3	(solar OR fotovolta* OR fv) AND fase* AND ultim* NOT (fin AND vida)
		aprovechamiento			3.3.4	(solar OR fotovolta* OR fv) AND aprovechamiento AND vida NOT (fin AND vida)
		recicla*			3.3.5	(solar OR fotovolta* OR fv) AND recicla* AND vida NOT (fin AND vida)
		eliminación			3.3.6	(solar OR fotovolta* OR fv) AND eliminación AND vida NOT (fin AND vida)
		retirada*			3.3.7	(solar OR fotovolta* OR fv) AND retirada* AND vida NOT (fin AND vida)
		tratamiento			3.3.8	(solar OR fotovolta* OR fv) AND tratamiento AND vida NOT (fin AND vida)
		acondicionamiento			3.3.9	(solar OR fotovolta* OR fv) AND acondicionamiento AND vida NOT (fin AND vida)
		reentrega			3.3.10	(solar OR fotovolta* OR fv) AND reentrega AND vida NOT (fin AND vida)
		recuperación			3.3.11	(solar OR fotovolta* OR fv) AND recuperación AND vida NOT (fin AND vida)
fr	solar*	fin	vie		3.4.1	(solar* OR photovoltaic* OR photov; AND fin AND vie NOT (fin AND vie)
	photovoltaic*	utilisation			3.4.2	(solar* OR photovoltaic* OR photov; AND fin AND utilisation NOT (fin AND vie)
	photopile*	phase	finale		3.4.3	(solar* OR photovoltaic* OR photov; AND phase AND finale NOT (fin AND vie)
	PV	recyclage*			3.4.4	(solar* OR photovoltaic* OR photov; AND recyclage* AND vie NOT (fin AND vie)
		évacuation			3.4.5	(solar* OR photovoltaic* OR photov; AND évacuation AND vie NOT (fin AND vie)
		collecte	restitution		3.4.6	(solar* OR photovoltaic* OR photov; AND collecte AND restitution NOT (fin AND vie)
		traitement			3.4.7	(solar* OR photovoltaic* OR photov; AND traitement AND vie NOT (fin AND vie)
		résidu*	utilisation		3.4.8	(solar* OR photovoltaic* OR photov; AND résidu* AND utilisation NOT (fin AND vie)
		préparation			3.4.9	(solar* OR photovoltaic* OR photov; AND préparation AND vie NOT (fin AND vie)

A 3 Kategorienschema (verkürzt): Übergreifende Angaben

Tab. 32: Verkürztes Kategorienschema - Übergreifend
(Eigene Erstellung)

Übergreifend		
Allgemeine Angaben	<ul style="list-style-type: none"> • Veröffentlichungsjahr • Veröffentlichungsort • Ursprung Ersteller 	allgemeine Angaben zur geographischen und zeitlichen Einordnung
	Unternehmensangaben	Hersteller, Zulieferer, Kunden, Dienstleistungen, End of Life Akteure
	Methode	LCA, LCC, weitere
Goal and Scope	Ziel	<ul style="list-style-type: none"> • Ziel, Anlass, Zielgruppe • Bezug zu Regelwerk
	Untersuchungsgegenstand	<ul style="list-style-type: none"> • Technologie • Anwendung/Installation • Standort • technische Parameter wie Wirkungsgrad, Lebensdauer, erzeugter Strom, installierte Spitzenleistung, Fläche • Alternativtechnologien
	Einbezogene und ausgeschlossene Komponenten	BOS, Speicherung, Back up etc.
	Prozessbeschreibung	
	Prozessschritte	<ul style="list-style-type: none"> • Rohstoffgewinnung • Rohstoffbearbeitung • Zulieferer/Vorprodukte • Wafer-Fertigung • Zellen-Fertigung • Modul-Fertigung • Installation vor Ort • Rückbau • Recycling • weitere • Ausnahmen
	Systemgrenze	<ul style="list-style-type: none"> • weitere Annahmen
	Funktionale Einheit	<ul style="list-style-type: none"> • kWh, Wp, m², Modul etc.

A 4 Kategorienschema (verkürzt): Ökologischer Teil (LCA)

Tab. 33: Vereinfachtes Kategorienschema - LCA
(Eigene Erstellung)

Life Cycle Assessment		
LCI	Methode	Datenermittlung, Input-Output-Analyse etc.
	Inputs <ul style="list-style-type: none"> • RHB • Energie • Wasser 	<ul style="list-style-type: none"> • Eingangsgrößen wie Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe • mögliche Energieformen (Treibstoffe, Elektrizität) • Wasserarten • Energiemix
	Outputs <ul style="list-style-type: none"> • Kuppelprodukte • Abfälle • Emissionen in die Luft • Abwasser 	<ul style="list-style-type: none"> • alle relevanten Ausgangsgrößen • insbesondere CO2-Emissionen
	Transport	<ul style="list-style-type: none"> • Angaben zu Entfernungen, Transportmitteln • Vorkette, Produktion, Distribution, EoL
	Ausschuss Allokationen	<ul style="list-style-type: none"> • Anteil Ausschuss, Verluste • Allokation bei Kuppelprozessen
	Detailtiefe	<ul style="list-style-type: none"> • Angaben für gesamtes System oder Aufschlüsselung nach Phasen, nach Einzelteilen
LCIA	Methode	KEA, CML baseline, Eco Indicator
	Schritte <ul style="list-style-type: none"> • Klassifizierung • Charakterisierung • Normierung • Ordnung • Gewichtung 	durchgeführte Schritte einer Wirkungsabschätzung
	Wirkungskategorien <ul style="list-style-type: none"> • Global Warming • Stratospheric Ozone Depletion • Acidification • Eutrophication • Photochemical Smog • Terrestrial Toxicity 	Wirkungskategorien inkl. Wirkungsindikatoren

	<ul style="list-style-type: none"> • Aquatic Toxicity • Human Health • Resource Depletion • Land use • Water Use 	
	KEA	
	Detailtiefe	<ul style="list-style-type: none"> • Komponenten, Phasen
<p>Interpretation Auswertung</p>	<p>Amortisation</p> <ul style="list-style-type: none"> • Energy Payback Time • CO2 Payback Time 	<ul style="list-style-type: none"> • überwiegend Energie-Indikatoren
	<p>Haupteinflussgrößen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Phasen, Prozessschritte • Energie (mix) • technische Parameter • Material 	
	Sensitivität	mehrere Parameter
	<ul style="list-style-type: none"> • Schlussfolgerungen, Widersprüche, Einschränkungen • Empfehlungen • Folgemaßnahmen • Zielerreichung 	

A 5 Kategorienschema (verkürzt): Ökonomischer Teil (LCC)

Tab. 34: Vereinfachtes Kategorienschema - LCC

(Eigene Erstellung)

Life Cycle Costing		
Kosten- kategorien	<ul style="list-style-type: none"> • Kostenstruktur, -kategorien • Ausnahmen 	
	Produzent	<ul style="list-style-type: none"> • F&E • Anlagen, Maschinen, Gebäude • Wartung, Instandhaltung • Kapital • Verwaltung • Steuern, Subventionen etc. • Material • Zuliefererteile • Energie • Lohn • Herstellungskosten gesamt • Einnahmen (Modulpreis) • Transport • Installation • Umwelt (externe, internalisierte) • etc.
	Nutzer	<ul style="list-style-type: none"> • Anfangsinvestition PV-Anlage • Anfangsinvestition Komponenten • Transport • Installation • Kapitalkosten • Betrieb, Netzanbindung, Versicherung, Back up • Lohn • Wartung, Instandhaltung, Austausch • Steuern, Abschreibung, Subventionen, Anreize • Einnahmen, Einspeisevergütung • Restwert • Energie, Erzeugungskosten • Schadenskosten vermieden • etc.
	EoL	<ul style="list-style-type: none"> • Rückbau • Transport • Recycling

		<ul style="list-style-type: none"> • Entsorgung, Lagerung • etc.
	Umwelt	<ul style="list-style-type: none"> • externe Kosten • internalisierte Kosten • voraussichtlich internalisierte Kosten • vermiedene Schadenskosten • CO₂-Reduktion • umweltbezogene Rückflüsse • Monetarisierung
	Gesellschaft	<ul style="list-style-type: none"> • social costs
Methodisch	<ul style="list-style-type: none"> • Risiko • Erfahrungskurve • Vollkosten • Unsicherheiten • Szenarien • Analyse • Discounting • Profitabilität • Portfolio 	<ul style="list-style-type: none"> • Discountrate • Charge rates • Zinssätze • Rendite (ziel) • Inflation
	<ul style="list-style-type: none"> • Sensitivität 	<ul style="list-style-type: none"> • mehrere Parameter
Auswertung	<ul style="list-style-type: none"> • Vorteilhaftigkeit • Internal Rate of Return • Amortisationszeit • Break Even allg. • Discounted Cash Flow • Life Cycle Costs • Net Present Value • weitere 	<ul style="list-style-type: none"> • Feststellungen • Gewichtung • Haupteinflüsse

A 6 Kategorienschema (verkürzt): EoL

Tab. 35: Vereinfachtes Kategorienschema EoL

(Eigene Erstellung)

EoL	
Kategorien	<ul style="list-style-type: none"> • Recycling (Glas, Metall, Module etc.) • Rückbau • Entsorgung • Transport • Kosten • Reuse
Zusatz	<ul style="list-style-type: none"> • Feststellungen • Zukunft • rechtliche Situation

A 7 Kategorienschema (verkürzt): Lebenszyklus

Tab. 36: Vereinfachtes Kategorienschema: Lebenszyklus

(Eigene Erstellung)

Lebenszyklus	
• Lebenszyklusmodell	
• Phasen	<ul style="list-style-type: none"> • F&E • Vorproduktion • Produktion • Installation • Nutzung • EoL • Transporte
Akteure+Perspektiven	entsprechend Phasen

A 8 Kategorienschema (verkürzt) Daten

Tab. 37: Kategorienschema vereinfacht: Daten
(Eigene Erstellung)

Daten	
Allgemein	<ul style="list-style-type: none"> • Qualitätsziele • Qualitätsindikatoren
Datensammlung	<ul style="list-style-type: none"> • Verfahren • Softwareeinsatz • Datenbanken • primäre Sammlung (Messung etc.) • sekundär
Quellen	<ul style="list-style-type: none"> • intern (Unternehmen, Betreiber) • öffentlich • Schätzungen • Unternehmensbezug • weitere Datenherkunft
Kritische Prüfung	<ul style="list-style-type: none"> • intern • extern
Pedigree-Matrix	<ul style="list-style-type: none"> • Bezug
Unsicherheitenbewertung	<ul style="list-style-type: none"> • Datenlücken • Repräsentativität • Schwankungen, Ungenauigkeiten, Messfehler
Prüfung	<ul style="list-style-type: none"> • Vollständigkeit • Sensitivität • Konsistenz

A 9 Übersicht Studien zu STP

A life cycle costing methodology for the assessment of process heat generation by solar energy : Yosef S. Sherif. *Microelectron. Reliab.* 23, 1069 (1984), (1985): in: *Microelectronics Reliability*, Jg. 25, 1985, Heft 2, S. 389-389.

AL-SOUD, M.S.; HRAYSHAT, E.S. (2009): A 50MW concentrating solar power plant for Jordan, in: *Journal of Cleaner Production*, Jg. 17, 2009, Heft 6, S. 625-635.

ALTHAUS, H.J. (1999): Ökologische Optimierung von Sonnenkollektoren. Ecological optimization of solar collectors. 1999, S. 21-25.

BAECHLER, M.C.; LEE, A.D. (1991): Implications of environmental externalities assessments for solar thermal power plants. Einbezug von umwelttechnischen Randbedingungen in die Bewertung von thermischen Sonnenkraftwerken, 1991, S. 151-158.

BATTISTI, R.; CORRADO, A. (2005): Environmental assessment of solar thermal collectors with integrated water storage, in: *Journal of Cleaner Production*, Jg. 13, 2005, Heft 13, S. 1295-1300.

BATTISTI, R.; CORRADO, A. (2005): Environmental assessment of solar thermal collectors with integrated water storage; XXXXX, in: *Journal of Cleaner Production*, Jg. 13, 2005, Heft 13, S. 1295-1300.

BERGMANN, S.; REINLÄNDER, J. (2006): Parabolic trough solar field for multi effect desalination - prediction of technical and economic performance. Parabolrinnensolarfeld für effiziente Entsalzung: Vorhersage und technischer und ökonomischer Leistungsparameter, 2006, S. 1-10.

BILETT, T. (2008): Time for a little payback, in: *Heating & Ventilating Review*, Jg. 47, 2008, Heft 9, S. 28-28.

BILETT, T. (2008): Time for a little payback; XXXXX, in: *Heating & Ventilating Review*, Jg. 47, 2008, Heft 9, S. 28-28.

CARLSSON, B. (2007): Suitability analysis of selective solar absorber surfaces based on a total cost accounting approach, in: *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Jg. 91, 2007, Heft 14, S. 1338-1349.

CAVALLARO, F.; CIRAOLO, L. A Life Cycle Assessment (LCA) of a Paraboloidal-Dish Solar Thermal Power Generation System,

CLITHEROE, P. (2005): With a conventional or solar water heater? in: *Money* (14446219), 2005, Heft 8, S. 20-21.

COHEN, G.E.; KEARNEY, D.W.; KOLB, G.J. (1999): Final report on the operation and maintenance improvement program for concentrating solar power plants, in: SAND99-1290, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, 1999,

Costs of STP Solar Thermal Power. In: (2005): O.V.ABS Energy Research, 2005. S. 38-41.

CRAWFORD, R.H. u.a. (2003): Comparative greenhouse emissions analysis of domestic solar hot water systems, in: *Building Research & Information*, Jg. 31, 2003, Heft 1, S. 34-47.

- CRAWFORD, R.H.; TRELOAR, G.J. (2004): Net energy analysis of solar and conventional domestic hot water systems in Melbourne, Australia, in: *Solar Energy*, Jg. 76, 2004, Heft 1-3, S. 159-163.
- D'ANTONIO, P. (2009): RADIANT DESIGN: Reviewing Renewables & Beyond, in: *Engineered Systems*, Jg. 26, 2009, Heft 5, S. 29-32.
- DAVID ROESSNER, J. (1982): U.S. Government Solar Policy: Appropriate Roles For Non-financial Incentives, in: *Policy Sciences*, Jg. 15, 1982, Heft 1, S. 3-21.
- ELSAFTY, A.; AL-DAINI, A.J. (2002): Economical comparison between a solar-powered vapour absorption air-conditioning system and a vapour compression system in the Middle East, in: *Renewable Energy*, Jg. 25, 2002, Heft 4, S. 569-583.
- EL-SAYED, M. (2005): Solar supported steam production for power generation in Egypt, in: *Energy Policy*, Jg. 33, 2005, Heft 10, S. 1251-1259.
- FLORIDES-GEORGIOS, A.; KALOGIROU-SOTERIS, A. (2007): Optimisation and Cost Analysis of a Lithium Bromide Absorption Solar Cooling System, 2007,
- FLURI, T.P. u.a. (2009): Cost analysis of solar chimney power plants. Kostenanalyse für Aufwindkraftwerke, in: *Solar Energy*, Jg. 83 (2009), 2009, Heft 2, S. 246-256.
- FRAISSE, G. u.a. (2009): Comparative study of various optimization criteria for SDHWS and a suggestion for a new global evaluation. Untersuchung zum Vergleich unterschiedlicher Optimierungskriterien für solare Warmwasserbereiter und Vorschläge zu einer neuen globalen Bewertung, in: *Solar Energy*, Jg. 83 (2009), 2009, Heft 2, S. 232-245.
- GAWLIK, K. (2000): CFD Used To Develop Low-Cost Solar Collector, in: *R&D Magazine*, Jg. 42, 2000, Heft 1, S. 51.
- GRAHN, M. u.a. (2009): Fuel and Vehicle Technology Choices for Passenger Vehicles in Achieving Stringent CO₂ Targets: Connections between Transportation and Other Energy Sectors, in: *Environmental science & technology*, Jg. 43, 2009, Heft 9, S. 3365-3371.
- HANDKE, V.; KAMBUROW, C. (2007): Umweltstandards für solarthermische Kollektoren unter Berücksichtigung ihrer selektiven Beschichtung, 2007, S. 1-12.
- HAWLADER, M.N.A. u.a. (1987): Economic evaluation of a solar water heating system, in: *Energy Conversion and Management*, Jg. 27, 1987, Heft 2, S. 197-204.
- HAWLADER, M.N.A. u.a. (1987): Economic evaluation of a solar water heating system, in: *Energy Conversion and Management*, Jg. 27, 1987, Heft 2, S. 197-204.
- KALOGIROU, S. (2009): Thermal performance, economic and environmental life cycle analysis of thermosiphon solar water heaters. Lebenszyklusanalyse bezüglich der thermischen Leistungsfähigkeit, der Wirtschaftlichkeit und der Umweltverträglichkeit von solaren Warmwasserbereitern nach dem Thermosyphon-Prinzip, in: *Solar Energy*, Jg. 83 (2009), 2009, Heft 1, S. 39-48.

- KALOGIROU, S.A.; TRIPANAGNOSTOPOULOS, Y. (2007): Industrial application of PV/T solar energy systems, in: *Applied Thermal Engineering*, Jg. 27, 2007, Heft 8, S. 1259-1270.
- KILKIS, B.I. (2006): Cost optimization of a hybrid HVAC system with composite radiant wall panels, in: *Applied Thermal Engineering*, Jg. 26, 2006, Heft 1, S. 10-17.
- KLINGENBERGER-UTA, M.; BOLLIN, E.; HIMMELSBACH, S. (2005): Energetische Amortisationszeiten bei solarthermischen Großanlagen, 2005, S. 116-120.
- KOLB, G.J. (1998): Economic evaluation of solar-only and hybrid power towers using molten-salt technology, in: *Solar Energy*, Jg. 62 (1998), 1998, Heft 1, S. 51-61.
- KÜBLER, K. (2005): Zehn Jahre Solarthermie: Beobachtungen in der Praxis, in: *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, Jg. 55 (2005), 2005, Heft 1/2, S. 82-84.
- KUMAR, S. (1994): Return analysis of commercial solar thermal devices, in: *Renewable Energy*, Jg. 4, 1994, Heft 5, S. 481-487.
- KUMAR, S.; TIWARI, G.N. (2009): Life cycle cost analysis of single slope hybrid (PV/T) active solar still, in: *Applied Energy*, Jg. 86, 2009, Heft 10, S. 1995-2004.
- KUMAR, S.; TIWARI, G.N.; SINHA, S. (1993): Techno-economic feasibility analysis of solar thermal systems, in: *Energy Conversion and Management*, Jg. 34, 1993, Heft 12, S. 1267-1272.
- LAING, D. u.a. (2008): Economic Analysis of Modular Storage Operation Concepts and Life Cycle Assessment of Concrete Thermal Energy Storage for Parabolic Trough Power Plants,
- LAMBERT, M.A.; BEYENE, A. (2007): Thermo-economic analysis of solar powered adsorption heat pump, in: *Applied Thermal Engineering*, Jg. 27, 2007, Heft 8-9, S. 1593-1611.
- LECHÓN, Y.; DE LA RÚA, C.; SÁEZ, R. (2008): Life Cycle Environmental Impacts of Electricity Production by Solarthermal Power Plants in Spain, in: *Journal of Solar Energy Engineering*, 2008, Heft May, 130,
- LEMOS, J.M. (2006): Adaptive control of distributed collector solar fields, in: *International Journal of Systems Science*, Jg. 37, 2006, Heft 8, S. 523-533.
- LEWIS, G. (1984): The economics of domestic solar water heating, in: *Solar Energy*, Jg. 33, 1984, Heft 1, S. 95-95.
- MASRUROH, N.A.; LI, B.; KLEMEŠ, J. (2006): Life cycle analysis of a solar thermal system with thermochemical storage process, in: *Renewable Energy*, Jg. 31, 2006, Heft 4, S. 537-548.
- MASRUROH, N.A.; LI, B.; KLEMEŠ, J. (2006): Life cycle analysis of a solar thermal system with thermochemical storage process, in: *Renewable Energy*, Jg. 31, 2006, Heft 4, S. 537-548.
- MASRUROH, N.A.; LI, B.; KLEMEŠ, J. (2006): Life cycle analysis of a solar thermal system with thermochemical storage process; XXXXX, in: *Renewable Energy*, Jg. 31, 2006, Heft 4, S. 537-548.

- MATHUR, J.; BANSAL, N.K. (1999): Energy analysis of solar water heating systems in India. Energieanalyse von Solarwärmesystemen zum Erhitzen von Wasser in Indien, in: *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Jg. 4 (1999), 1999, Heft 2, S. 113-116.
- MEDVED, S.; ARKAR, C.; CERNE, B. (2003): A large-panel unglazed roof-integrated liquid solar collector-energy and economic evaluation, in: *Solar Energy*, Jg. 75 (2003), 2003, Heft 6, S. 455-467.
- MEIßNER, R. (2008): Vergleich thermischer Solarkollektoren mit CPC-Vakuümrohrenkollektoren und Wasser als Wärmeträger, in: *Euroheat & Power*, Jg. 37 (2008), 2008, Heft 10, S. 30-37.
- MIRASGEDIS, S.; DIAKOULAKI, D.; ASSIMACOPOULOS, D. (1996): Solar energy and the abatement of atmospheric emissions, in: *Renewable Energy*, Jg. 7, 1996, Heft 4, S. 329-338.
- NAKAMURA, S.; KONDO, Y. (2006): Hybrid LCC of appliances with different energy efficiency, in: *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Jg. 11 (2006), 2006, Heft 5, S. 305-314.
- NORTON, B.; EAMES, P.C.; LO, S.N. (1998): Full-energy-chain analysis of greenhouse gas emissions for solar thermal electric power generation systems, in: *Renewable Energy*, Jg. 15, 1998, Heft 1-4, S. 131-136.
- OLIVIER, J.R.; HARMS, T.M.; ESTERHUYSE, D.J. (2008): Technical and economic evaluation of the utilization of solar energy at South Africa's SANAE IV base in Antarctica, in: *Renewable Energy*, Jg. 33, 2008, Heft 5, S. 1073-1084.
- O'NEIL, J. (2008): Building for an environmentally ambitious future, in: *Heating & Ventilating Review*, Jg. 47, 2008, Heft 7, S. 28-29.
- PARKER, P.M. (2005): 2006-2011 world outlook for water & air solar energy collectors, 2005. S. 1-186.
- PIETZCKER, R. u.a. (2009): *The Role of Concentrating Solar Power and Photovoltaics for Climate Protection*, 2009,
- PIMENTEL, D. u.a. (2002): Renewable energy: current and potential issues, in: *Bioscience*, Jg. 52, 2002, Heft 12, S. 1111-1120.
- POLLERBERG, C.; ALI, A.H.H.; DÖTSCH, C. (2009): Solar driven steam jet ejector chiller, in: *Applied Thermal Engineering*, Jg. 29, 2009, Heft 5, S. 1245-1252.
- RIVAS, F. u.a. (2006): Life cycle cost based economic assessment of Active Building Envelope (ABE) systems, 2006, S. 5534-5548.
- SCHNITZER, H.; BRUNNER, C.; GWEHENBERGER, G. (2007): Minimizing greenhouse gas emissions through the application of solar thermal energy in industrial processes, in: *Journal of Cleaner Production*, Jg. 15, 2007, Heft 13, S. 1271-1286.
- SEKHAR, S.C.; LIM CHER TOON, K. (1998): On the study of energy performance and life cycle cost of smart window, in: *Energy and Buildings*, Jg. 28, 1998, Heft 3, S. 307-316.

SHERIE, Y.S. (1983): A life cycle costing methodology for the assessment of process heat generation by solar energy, in: *Microelectronics Reliability*, Jg. 23, 1983, Heft 6, S. 1069-1074.

SHERIF, Y.S. (1985): A life cycle costing methodology for the assessment of process heat generation by solar energy. in: *Microelectronics Reliability*, Jg. 25, 1985, Heft 2, S. 389-389.

Solar technology: update, 1976, (0000): in: *ASHRAE Journal*, 0000,

Some Solar Hot Water Systems Have Long Payback, (2007): in: *Energy Design Update*, Jg. 27, 2007, Heft 1, S. 9-10.

STREICHER, E. (2007): Gesamtenergieeinsparung durch Solaranlagen während ihrer Lebensdauer, in: *VDI-Berichte*, 2007, S. 161-172.

STREICHER, E.; DRÜCK, H.; MÜLLER-STEINHAGEN, H. (2008): Gesamtenergieeinsparung versus energetische Amortisationszeit von Solaranlagen, 2008, S. 352-357.

STREICHER, E.; HEIDEMANN, W.; MÜLLER-STEINHAGEN, H. (2002): Methodik zur Ermittlung der energetischen Amortisationszeit von thermischen Solaranlagen. Method to determine the energy payback period of domestic solar hot water systems. 2002, S. 123-128.

STREICHER, E.; HEIDEMANN, W.; MÜLLER-STEINHAGEN, H. (2003): Einfluss von Systemertrag und Pumpenlaufzeit auf die energetische Amortisationszeit von thermischen Solaranlagen. The influence of system gain and pump operating hours on the energy payback time of a domestic solar hot water system. 2003, S. 307-312.

SUDHAKARA REDDY, B. (1995): Electrical vs solar water heater: A case study, in: *Energy Conversion and Management*, Jg. 36, 1995, Heft 11, S. 1097-1106.

SULOCK, J.M. (1980): The economics of solar heating. A note on the appropriate discount rate and the use of the pay back period, in: *Solar Energy*, Jg. 24, 1980, Heft 5, S. 505-506.

TAŞDEMIROĞLU, E.; ARINÇ, F. (1988): A method for technical-economic analysis of solar heating systems, in: *Energy Conversion and Management*, Jg. 28, 1988, Heft 1, S. 95-103.

TRIEB, F.; KRONSHAGE, S.; KNIES, G. (2004): Concentrating on solar power in a trans-mediterranean renewable energy co-operation, in: *ESA SP - European Space Agency Special Publications*, 2004, S. 99-108.

TRIPANAGNOSTOPOULOS, Y. (2007): Aspects and improvements of hybrid photovoltaic/thermal solar energy systems, in: *Solar Energy*, Jg. 81, 2007, Heft 9, S. 1117-1131.

TSOUTSOS, T. u.a. (2003): Solar cooling technologies in Greece. An economic viability analysis, in: *Applied Thermal Engineering*, Jg. 23, 2003, Heft 11, S. 1427.

WAGNER, H.J. (1998): Emissionsbetrachtungen für solarthermische Anlagen zur Warmwasserbereitung, 1998, S. 979-986.

WAGNER, H.J.; PEUSER, F. (1997): Emissionsbetrachtungen für solarthermische Anlagen. Emission considerations for solar-thermal systems. in: *HLH - Zeitschrift für Heizung, Lüftung, Klimatechnik, Haustechnik*, Jg. 48 (1997), 1997, Heft 6, S. 26,31-33.

WAGNER, H.J.; PEUSER, F.A. (1997): Emissionen von Luftschadstoffen und CO(2) bei Herstellung und Betrieb von ausgewählten thermischen Solaranlagen, in: Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 6: Energietechnik, 1997, S. 1-76.

WEINREBE, G.; BOEHNKE, M.; TRIEB, F. (1998): Life Cycle Assessment of an 80 MW SEGS plant and a 30 MW PHOEBUS power tower, in: International Solar Energy Conference, 1998, S. 417-424.

WOLFF, G. (2007): Bring me sunshine [concentrating solar power], in: Power Engineer, Jg. 21, 2007, Heft 2, S. 22-25.

YATTARA, A.; ZHU, Y.; MOSA ALI, M. (2003): Comparison between solar single-effect and single-effect double-lift absorption machines (Part I), in: Applied Thermal Engineering, Jg. 23, 2003, Heft 15, S. 1981.

ZAHRAN, S. u.a. (2008): Greening Local Energy: Explaining the Geographic Distribution of Household Solar Energy Use in the United States, in: Journal of the American Planning Association, Jg. 74, 2008, Heft 4, S. 419-434.

ZIMMER, V.L.; WOO, C.; SCHWARTZ, P. (2006): Concentrated Solar Power for Santa Barbara County: Analysis of High Efficiency Photovoltaic and Solar Thermal Electric, in: University of California, Berkeley, "ERG226, Course project, 2006,

A 10 Übersicht der Studien, die in der IA analysiert wurden

AFGAN, N.H.; CARVALHO, M.G. (2008): Sustainability assessment of a hybrid energy system, in: Energy Policy, Jg. 36, 2008, Heft 8, S. 2893-2900.

AGUADO-MONSONET, M.A.(1998): The environmental impact of photovoltaic technology (Task 6- INTERSUDMED Project), Sevilla 1998.

ALSEMA, E. (1998): Energy requirements and CO2 mitigation potential of PV systems, in: Photovoltaics and the Environment, 1998,

ALSEMA, E.A. (1996): Environmental aspects of solar cell modules. summary report. 96074, 1996.

ALSEMA, E.A. (2009): Life-cycle assessment of crystalline silicon PV module production by REC, in: Proceedings of 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Hamburg, 20-25 September, 2009,

ALSEMA, E.A.; DE WILD-SCHOLTEN, M. (2006): Environmental Impacts of Crystalline Silicon Photovoltaic Module Production, in: Proceedings of 13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering (LCE) 2006, May 31st - June 2nd, 2006, S. 103-108.

ALSEMA, E.A.; DE WILD-SCHOLTEN, M.; MOLENBROECK, E. (2003): Duurzaamheid van fotovoltaïsche systemen op basis van geavanceerde silicium technologie, Utrecht, 2003.

ALSEMA, E.A.; DE WILD-SCHOLTEN, M.J. (2005): The real environmental impacts of crystalline silicon PV modules: an analysis based on up-to-date manufacturers data, in: Proceedings of 20 th European PV Solar Conference, Barcelona.

ALSEMA, E.A.; FRANKL, P.; KATO, K. (1998): Energy pay-back time of photovoltaic energy systems: present status and prospects, in: Report of the Commission of the European Communities - EUR, 1998, S. 2125-2130.

ALSEMA, E.A.; NIEUWLAAR, E. (2000): Energy viability of photovoltaic systems, in: Energy Policy, Jg. 28, 2000, Heft 14, S. 999.

AWERBUCH, S. (2000): Investing photovoltaics: Risk, accounting and the value of new technology, in: Energy Policy, Jg. 28, 2000, Heft 14, S. 1023.

BATTISTI, R.; CORRADO, A. (2005): Evaluation of technical improvements of photovoltaic systems through life cycle assessment methodology, in: Energy, Jg. 30, 2005, Heft 7, S. 952-967.

BAUMANN, A.E.; HILL, R.; HYNES, K.M. (1997): Environmental impacts of PV systems-ground-based vs. BIPV, 1997, S. 1361-1364.

BERNAL-AGUSTÍN, J.L.; DUFO-LÓPEZ, R. (2006): Economical and environmental analysis of grid connected photovoltaic systems in Spain, in: Renewable Energy: An International Journal, Jg. 31, 2006, Heft 8, S. 1107-1128.

BOSSERT, R. u.a. (2000): Thin-film solar cells. technology evaluation and perspectives, Novem, contract no. 146.150-010.1, 2000.

BOYD, S.; BUONASSISI, T.; WILLIAMS, T. (2004): Technology choices for the PV industry: A comparative life cycle assessment, Berkeley Laboratory for Manufacturing Automation, Research Reports 2004/05, Berkeley, 2004. S. 38 ff.

BRIEM, S. u.a. (2004): Lebenszyklusanalysen ausgewählter zukünftiger Stromerzeugungstechniken. Ein Forschungsvorhaben mit finanzieller Unterstützung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit, in: bmb+f.Bundesministerium für Bildung und Forschung, Forschungsberichte, 2004, S. 1-348.

BYRNE, J. u.a. (2007): Evaluating the potential of small-scale renewable energy options to meet rural livelihoods needs: A GIS- and lifecycle cost-based assessment of Western China's options, in: Energy Policy, Jg. 35, 2007, Heft 8, S. 4391-4401.

CAMPOCCIA, A. u.a. (2009): Comparative analysis of different supporting measures for the production of electrical energy by solar PV and Wind systems: Four representative European cases. Vergleichende Analyse unterschiedlicher Fördermaßnahmen zur Stromerzeugung aus Photovoltaik und Windkraft: Vier repräsentative europäische Beispiele aus Frankreich, Deutschland, Italien und Spanien, in: Solar Energy, Jg. 83 (2009), 2009, Heft 3, S. 287-297.

CELIK, A.N.; MUNEER, T.; CLARKE, P. (2008): Optimal sizing and life cycle assessment of residential photovoltaic energy systems with battery storage. Optimale Auslegung und Lebenszyklusbewertung von Haus- Photovoltaikanlagen mit Batteriespeicherung, in: Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Jg. 16 (2008), 2008, Heft 1, S. 69-85.

CELIK, A.N. (2006): Present status of photovoltaic energy in Turkey and life cycle techno-economic analysis of a grid-connected photovoltaic-house, in: Renewable & Sustainable Energy Reviews, Jg. 10, 2006, Heft 4, S. 370-387.

- CLAVADETSCHER, L.; NORDMANN, T.; International Energy Agency (IEA) (Hrsg.) (2007): Cost and performance trends in grid-connected photovoltaic systems and case studies. IEA PVPS task 2. IEA PVPS T2-06:2007, 2007.
- CRAWFORD, R.H. u.a. (2006): Life-cycle energy analysis of building integrated photovoltaic systems (BiPVs) with heat recovery unit, in: Renewable & Sustainable Energy Reviews, Jg. 10, 2006, Heft 6, S. 559-575.
- DE WILD-SCHOLTEN, M.J.; ALSEMA, E.A.(2007): Environmental life cycle inventory of crystalline silicon photovoltaic module production, Status 2005/2006, including EXCEL-File. Complemented by Environmental life cycle inventory of crystalline silicon photovoltaic module production, proceedings of Materials Research Society Symposium, Warrendale, PA (2006, Materials Research Society and EXCEL File 2004. Warrendale, Pa.; Materials Research Society; 1999, 2007.
- DE WILD-SCHOLTEN, M.J.; VELTKAMP, A.C. (2007): Environmental Life Cycle Analysis of dye sensitized solar devices; status and outlook, in: Proceedings of 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 3-7 Sept. 2007, Milan, Italy.
- DE WILD-SCHOLTEN, M.J. u.a. (2006): A cost and environmental impact comparison of grid-connected rooftop and ground-based PV systems, 2006, S. 3167-3173.
- DER MINASSIANS, A. u.a. (2006): Energy payback time of a SolFocus Gen1 concentrator PV system, MSE-ER C226 - Photovoltaic Materials Modern Technologies in the Context of a Growing Renewable Energy Market. Final Project Report December 7, 2006, 2006.
- DONES, R.; FRISCHKNECHT, R. (1998): Life-cycle assessment of photovoltaic systems: results of Swiss studies on energy chains, in: Progress in Photovoltaics Research and Applications, Jg. 6, 1998, Heft 2, S. 117-125.
- EL-KORDY, M.N. u.a. (2002): Economical evaluation of electricity generation considering externalities, in: Renewable Energy, Jg. 25, 2002, Heft 2, S. 317-328.
- ERICKSON, J.D.; CHAPMAN, D. (1995): Photovoltaic technology: Markets, economics, and rural development, in: World Development, Jg. 23, 1995, Heft 7, S. 1129.
- FRANKL, P. u.a. (2006): NEEDS-new energy externalities developments for sustainability. final report on technical data, costs and life cycle inventories of PV applications, Deliverable n° 11.2 - RS Ia, 2006.
- FRANKL, P.; CORRADO, A.; LOMBARDELLI, S. (2004): Environmental and ecological life cycle inventories of present and future PV systems in europe for sustainability policies(ECLIPSE). final report. incl. dataset. Roma, Italia, 2004.
- FRANKL, P. u.a. (1998): Simplified life-cycle analysis of PV systems in buildings: present situation and future trends, in: Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Jg. 6 (1998), 1998, Heft 2, S. 137-146.
- FRISCHKNECHT, R.; Bundesamt für Energie (Schweiz) (2009): IEA-PVPS task 12: Swiss activities in 2008. Aktualisierung der Ökobilanz von CdTe-PV. Annual report 2008, 2009,

FRISCHKNECHT, R.; STUCKI, M.; KREWITT, W.(2009): Meeting the NEEDS of European Environmental Sustainability Assessment: The Case of PV, Uster 2009.

FTHENAKIS, V.; ALSEMA, E. (2006): Photovoltaics energy payback times, greenhouse gas emissions and external costs: 2004-early 2005 status, in: *Progress in Photovoltaics*, Jg. 14, 2006, Heft 3, S. 275-280.

FTHENAKIS, V.M.; KIM, H. (2005): Energy use and Greenhouse Gas emissions in the Life Cycle of Thin Film CdTe Photovoltaics, in: *Proceedings of Symposium G-Life Cycle Analysis*, MRS Fall Meeting, Boston (MS), USA.

FTHENAKIS, V.M.; KIM, H.C. (2007): Cu(InGa)Se₂ Thin Film Solar Cells: comparative Life Cycle Analysis of Buffer Layers, in: *Proceedings of 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 3-7 September 2007, Milan.

FTHENAKIS, V.; KIM, H. (2006): Quantifying the Life-Cycle Environmental Profile of Photovoltaics and Comparisons with Other Electricity-Generating Technologies, in: *Proceedings of Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*,

FTHENAKIS, V.M.(2003): Overview of Potential Hazards. In: Tom Markvart; Luis Castañer (Hrsg.): *Practical Handbook of Photovoltaics*, Elsevier Science, Amsterdam 2003. S. 857-868.

FTHENAKIS, V.M. (2004): Life cycle impact analysis of cadmium in CdTe PV production, in: *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Jg. 8, 2004, Heft 4, S. 303.

FTHENAKIS, V.M.; HYUNG, C.K.; ALSEMA, E. (2008): Emissions from Photovoltaic Life Cycles, in: *Environmental science & technology*, Jg. 42, 2008, Heft 6, S. 2168-2174.

FTHENAKIS, V.M.; KIM, H.C. (2007): CdTe photovoltaics: Life cycle environmental profile and comparisons, in: *Thin Solid Films*, Jg. 515, 2007, Heft 15, S. 5961-5963.

FTHENAKIS, V.M.; KIM, H.C. (2007): Greenhouse-gas emissions from solar electric- and nuclear power: A life-cycle study, in: *Energy Policy*, Jg. 35, 2007, Heft 4, S. 2549-2557.

FTHENAKIS, V.; KIM, H.C. (2009): Land use and electricity generation: A life-cycle analysis, in: *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Jg. 13, 2009, Heft 6, S. 1465-1474.

FTHENAKIS, V.; WANG, W.; KIM, H.C. (2009): Life cycle inventory analysis of the production of metals used in photovoltaics, in: *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Jg. 13, 2009, Heft 3, S. 493-517.

FTHENAKIS-VASILIS, M. (2004): Environmental life cycle assessment of cadmium telluride solar cells: Cd emissions. *Bewertung der Umweltbelastung durch den Lebenszyklus von Cadmiumtellurid- Solarzellen: Cd-Emissionen*, in: *Proceedings of 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Vol. 2., Jun 7-11, 2004, Paris, FR. S. 2166-2169.

GAGNON, L.; BÉLANGER, C.; UCHIYAMA, Y. (2002): Life-cycle assessment of electricity generation options: The status of research in year 2001, in: *Energy Policy*, Jg. 30, 2002, Heft 14, S. 1267-1278.

- GAIDDON, B.; JEDLICZKA, M. (2006): Compared assessment of selected environmental indicators of photovoltaic electricity in OECD cities. 2006, PVPS Task 10, PVPS Task 10, Activity 4.4, Report IEA-PVPS T10, 2006.
- GARCÍA-VALVERDE, R. u.a. (2009): Life cycle assessment study of a 4.2kW p stand-alone photovoltaic system, in: *Solar Energy*, Jg. 83, 2009, Heft 9, S. 1434-1445.
- GILAU, A.M.; VAN BUSKIRK, R.; SMALL, M.J. (2007): Enabling optimal energy options under the Clean Development Mechanism, in: *Energy Policy*, Jg. 35, 2007, Heft 11, S. 5526-5534.
- GREIJER, H. u.a. (2001): Environmental aspects of electricity generation from a nanocrystalline dye sensitized solar cell system, in: *Renewable Energy*, Jg. 23, 2001, Heft 1, S. 27-39.
- GÜRZENICH, D.; WAGNER, H.J. (2004): Cumulative energy demand and cumulative emissions of photovoltaics production in Europe, in: *Energy*, Jg. 29, 2004, Heft 12-15, S. 2297-2303.
- GÜRZENICH, D. (2002): Methodische Aspekte zu Kumulierten Energieaufwendungen und Emissionen bei Photovoltaikanlagen in der Europäischen Union, Ruhr-Universität Bochum, DE, Bochum 2002.
- HERMANNSDÖRFER, I.; RÜB, C.; Universität der Künste Berlin (Hrsg.) (2005): PV ACCEPT final report, IPS-2000-0090, Berlin, 2005.
- HONDO, H. (2005): Life cycle GHG emission analysis of power generation systems: Japanese case, in: *Energy*, Jg. 30, 2005, Heft 11-12, S. 2042-2056.
- HUBER, W.; KOLB, G. (1995): Life cycle analysis of silicon-based photovoltaic systems. Lebenszyklus-Analyse von photovoltaischen Systemen auf Siliziumbasis, in: *Solar Energy*, Jg. 54 (1995), 1995, Heft 3, S. 153-163.
- ISKANDER, C.; SCERRI, E. (1996): Performance and cost evaluation of a stand-alone photovoltaic system in Malta, in: *Renewable Energy*, Jg. 8, 1996, Heft 1-4, S. 437-440.
- ITO, M. u.a. (2005): Comparative Study of m-Si, a-Si and CdTe System of Very Large-Scale PV (VLS-PV) Systems in Desert, in: *Proceedings of 20th EU-PVSEC*, S. 2178-2181.
- ITO, M. u.a. (2008): A comparative study on cost and life-cycle analysis for 100 MW very large-scale PV (VLS-PV) systems in deserts using m-Si, a-Si, CdTe, and CIS modules, in: *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, Jg. 16, 2008, Heft 1, S. 17-30.
- ITO, M. u.a. (2003): A preliminary study on potential for very large-scale photovoltaic power generation (VLS-PV) system in the Gobi desert from economic and environmental viewpoints, in: *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Jg. 75 (2003), 2003, Heft 3-4, S. 507-517.
- ITO, M. u.a. (2004): Comparative study of fixed and tracking system of very large-scale PV (VLS-PV) systems in the world deserts. Vergleichende Untersuchung sehr großer Photovoltaik-Systeme mit und ohne Sonnenstandsnachführung in den Wüsten der Erde, 2004, S. 2113-2116.
- JUNGBLUTH, N.; STUCKI, M.; FRISCHKNECHT, R. (2009): Photovoltaics. In: Dones, R. u.a. (Hrsg.): *Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Ver-*

gleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Swiss 2009.

JUNGBLUTH, N.; TUCHSCHMID, M.; DE WILD-SCHOLTEN, M. (2008): Life Cycle Assessment of Photovoltaics: Update of ecoinvent data v2.0, 2008. Online im Internet: <http://www.ipcrystalclear.info/data/pdf/SP6-%20ECN,%20M.de%20Wild%20et%20al,%20report%20by%20ESU%20Services,%20Life%20Cycle%20Assessment%20of%20Photovoltaics%20Update%20of%20ecoinvent%20data%20v20.pdf>, Abruf: 04.11.2009, 9.15 Uhr.

JUNGBLUTH, N. (2005): Life cycle assessment of crystalline photovoltaics in the Swiss ecoinvent database, in: *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, Jg. 13 (2005), 2005, Heft 5, S. 429-446.

KALDELLIS, J.K. u.a. (2009): Optimum autonomous photovoltaic solution for the Greek islands on the basis of energy pay-back analysis, in: *Journal of Cleaner Production*, Jg. 17, 2009, Heft 15, S. 1311-1323.

KALOWEKAMO, J.; BAKER, E. (2009): Estimating the manufacturing cost of purely organic solar cells, in: *Solar Energy*, Jg. 83, 2009, Heft 8, S. 1224-1231.

KANNAN, R. u.a. (2006): Life cycle assessment study of solar PV systems: An example of a 2.7kW(ind p) distributed solar PV system in Singapore, in: *Solar Energy*, Jg. 80 (2006), 2006, Heft 5, S. 555-563.

KATO, K.; MURATA, A.; SAKUTA, K. (1997): An evaluation on the life cycle of photovoltaic energy system considering production energy of off-grade silicon, in: *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Jg. 47 (1997), 1997, Heft 1-4, S. 95-100.

KATO, K.; MURATA, A.; SAKUTA, K. (1998): Energy pay-back time and life-cycle CO₂ emission of residential PV power system with silicon PV module, in: *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, Jg. 6 (1998), 1998, Heft 2, S. 105-115.

KATO, K. u.a. (2001): A life-cycle analysis on thin-film CdS/CdTe PV modules, in: *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Jg. 67, 2001, Heft 1-4, S. 279-287.

KEMMOKU, Y. u.a. (2002): Life cycle CO₂ emissions of a photovoltaic/wind/diesel generating system, in: *Electrical Engineering in Japan*, Jg. 138 (2002), 2002, Heft 2, S. 14-23.

KEOLEIAN, G.A.; LEWIS, G.M.D. (2003): Modeling the life cycle energy and environmental performance of amorphous silicon BIPV roofing in the US, in: *Renewable Energy*, Jg. 28, 2003, Heft 2, S. 271-293.

KEOLEIAN, G.A.; LEWIS, G.M. (1997): Application of life-cycle energy analysis to photovoltaic module design, in: *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, Jg. 5 (1997), 1997, Heft 4, S. 287-300.

KHOUZAM, K.Y. (1999): Technical and economic assessment of utility interactive PV systems for domestic application, in: *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Jg. 14, 1999, Heft 4, S. 1544.

- KNAPP, K.; JESTER, T. (2001): Empirical investigation of the energy payback time for photovoltaic modules, in: *Solar Energy*, Jg. 71 (2001), 2001, Heft 3, S. 165-172.
- KOLHE, M. (2009): Techno-Economic Optimum Sizing of a Stand-Alone Solar Photovoltaic System, in: *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Jg. 24, 2009, Heft 2, S. 511-519.
- KOLHE, M.; KOLHE, S.; JOSHI, J.C. (2002): Economic viability of stand-alone solar photovoltaic system in comparison with diesel-powered system for India, in: *Energy Economics*, Jg. 24, 2002, Heft 2, S. 155.
- KORONEOS, C.; STYLOS, N.; MOUSSIOPOULOS, N. (2006): LCA of multicrystalline silicon photovoltaic systems Part 1: Present situation and future perspectives, in: *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Jg. 11 (2006), 2006, Heft 2, S. 129-136.
- KORONEOS, C.; STYLOS, N.; MOUSSIOPOULOS, N. (2006): LCA of multicrystalline silicon photovoltaic systems. Part 2: Application on an island economy, in: *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Jg. 11 (2006), 2006, Heft 3, S. 183-188.
- KRAUTER, S.; RÜTHER, R. (2004): Considerations for the calculation of greenhouse gas reduction by photovoltaic solar energy, in: *Renewable Energy*, Jg. 29, 2004, Heft 3, S. 345-355.
- LAZOU, A.A.; PAPATSORIS, A.D. (2000): The economics of photovoltaic stand-alone residential households: A case study for various European and Mediterranean locations, in: *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Jg. 62, 2000, Heft 4, S. 411-427.
- LEWIS, G.; KEOLEIAN, G.A. (1997): Life cycle design of amorphous silicon photovoltaic modules. full report. EPA/600/R-97/081, Ann Arbor, MI (USA), 1997.
- LEWIS, G. u.a. (1999): PV-BILD: A life cycle environmental and economic assessment tool for building-integrated photovoltaic installations, in: National Science Foundation/Lucent Technologies Industrial Ecology Grant BES-9727268, 1999,
- MARHEINEKE, T.(2002): Lebenszyklusanalyse fossiler, nuklearer und regenerativer Stromerzeugungstechniken Life cycle assessment of fossil, nuclear and renewable electricity generation techniques, Dissertation, Universität Stuttgart, Fakultät Energietechnik, Stuttgart 2002.
- MASON, J. u.a. (2006): Energy payback and life-cycle CO₂ emissions of the BOS in an optimized 3•5 MW PV installation, in: *Prog.Photovolt: Res.Appl*, Jg. 14, 2006, S. 179–190.
- MATHUR, J.; BANSAL, N.K.; WAGNER, H.J. (2002): Energy and environmental correlation for renewable energy systems in India, in: *Energy Sources*, Jg. 24 (2002), 2002, Heft 1, S. 19-26.
- MATSUHASHI, R.; MOMOBAYASHI, Y.; ISHITANI, H. (2002): Feasibility study on a CDM project utilizing photovoltaic systems, in: *Environmental Economics & Policy Studies*, Jg. 5, 2002, Heft 2, S. 105.
- MAYER-SPOHN, O. u.a. (2007): Lebenszyklusanalyse ausgewählter stromerzeugungstechniken, stand 2005, Arbeitsbericht Nr. 1, Stuttgart, 2007.

MCMONAGLE, R. (2006): The Environmental Attributes of Solar PV in the Canadian Context, 2006. Online im Internet: <http://www.saaep.ca/EnvironmentalAttributesofSolarPV.pdf>, Abruf: 07.10.2009, 13.30 Uhr.

MEIER, P.J. (2002): Life-cycle assessment of electricity generation systems and applications for climate change policy analysis, Dissertation, UMI Dissertation Services, Ann Arbor, Mich., Ann Arbor, Mich. 2002.

MEIJER, A. u.a. (2003): Life-cycle assessment of photovoltaic modules: comparison of mc-Si, InGaP and InGaP/mc-Si solar modules, in: Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Jg. 11 (2003), 2003, Heft 4, S. 275-287.

MOHR, N.J. u.a. (2007): Life cycle assessment of thin-film GaAs and GaInP/GaAs solar modules. Lebenszyklus-Bewertung von Dünnschicht-Solarzellen-Modulen auf der Basis von GaAs und GaInP/GaAs, in: Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Jg. 15 (2007), 2007, Heft 2, S. 163-179.

MOORE, L.M.; POST, H.N. (2008): Five years of operating experience at a large, utility-scale photovoltaic generating plant. Fünf Jahre Betriebserfahrung mit einer großen Photovoltaik-Anlage zur öffentlichen Stromversorgung, in: Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Jg. 16 (2008), 2008, Heft 3, S. 249-259.

MÜLLER, A.; WAMBACH, K.; ALSEMA, E. (2006): Life cycle analysis of solar module recycling process, in: Proceedings of Materials Research Society Symposium, MRS Fall Meeting 2005, Nov 28-30, 2005, Boston, US. S. 89-94.

MUNEER, T. u.a. (2006): Life cycle assessment of a medium-sized photovoltaic facility at a high latitude location. Bestimmung des langjährigen Nutzens einer mittelgroßen Photovoltaik-Anlage in hoher geographischer Breite, in: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A (Journal of Power and Energy), Jg. 220 (2006), 2006, Heft 6, S. 517-524.

NASSEN, J.; EVERTSSON, J.; ANDERSSON, B.A. (2002): Distributed power generation versus grid extension: an assessment of solar photovoltaics for rural electrification in northern Ghana, in: Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Jg. 10 (2002), 2002, Heft 7, S. 495-510.

NAWAZ, I.; TIWARI, G.N. (2006): Embodied energy analysis of photovoltaic (PV) system based on macro- and micro-level, in: Energy Policy, Jg. 34, 2006, Heft 17, S. 3144-3152.

NISHIMURA, A. u.a. (2009, in press): Life cycle assessment and evaluation of energy pay-back time on high-concentration photovoltaic power generation system, in: Applied Energy, Jg. In Press, Corrected Proof, 2009, in press,

NOUNI, M.R.; MULLICK, S.C.; KANDPAL, T.C. (2006): Photovoltaic projects for decentralized power supply in India: A financial evaluation, in: Energy Policy, Jg. 34, 2006, Heft 18, S. 3727-3738.

OLIVER, M.; JACKSON, T. (2001): Energy and economic evaluation of building-integrated photovoltaics, in: Energy, Jg. 26, 2001, Heft 4, S. 431-439.

OLIVER, M.; JACKSON, T. (2000): The evolution of economic and environmental cost for crystalline silicon photovoltaics, in: Energy Policy, Jg. 28, 2000, Heft 14, S. 1011.

- OLIVIER, J.R.; HARMS, T.M.; ESTERHUYSE, D.J. (2008): Technical and economic evaluation of the utilization of solar energy at South Africa's SANAE IV base in Antarctica, in: *Renewable Energy*, Jg. 33, 2008, Heft 5, S. 1073-1084.
- PACCA, S.; HORVATH, A. (2002): Greenhouse gas emissions from building and operating electric power plants in the Upper Colorado River Basin, in: *Environ.Sci.Technol.*, Jg. 36, 2002, Heft 14, S. 3194-3200.
- PACCA, S.; SIVARAMAN, D.; KEOLEIAN, G.A.(2006): Life Cycle Assessment of the 33 kW Photovoltaic System on the Dana Building at the University of Michigan: Thin Film Laminates, Multi-crystalline Modules, and Balance of System Components. 2006, University of Michigan, Michigan 2006.
- PEHARZ, G.; DIMROTH, F. (2005): Energy payback time of the high-concentration PV system FLATCON(R), in: *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, Jg. 13 (2005), 2005, Heft 7, S. 627-634.
- PEHNT, M. (2006): Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies, in: *Renewable Energy: An International Journal*, Jg. 31, 2006, Heft 1, S. 55-71.
- PERPINAN, O. u.a. (2009): Energy payback time of grid connected PV systems: Comparison between tracking and fixed systems. *Ökobilanz von netzverbundenen Photovoltaik-Systemen: Vergleich zwischen nachgeführten und feststehenden Systemen*, in: *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, Jg. 17 (2009), 2009, Heft 2, S. 137-147.
- POULLIKKAS, A. (2009): Parametric cost-benefit analysis for the installation of photovoltaic parks in the island of Cyprus, in: *Energy Policy*, Jg. 37, 2009, Heft 9, S. 3673-3680.
- RAUGEI, M.; FRANKL, P. (2009): Life cycle impacts and costs of photovoltaic systems: Current state of the art and future outlooks, in: *Energy*, Jg. 34, 2009, Heft 3, S. 392-399.
- RAUGEI, M.; BARGIGLI, S.; ULGIATI, S. (2007): Life cycle assessment and energy payback time of advanced photovoltaic modules: CdTe and CIS compared to poly-Si, in: *Energy*, Jg. 32, 2007, Heft 8, S. 1310-1318.
- REHMAN, S.; BADER, M.A.; AL-MOALLEM, S.A. (2007): Cost of solar energy generated using PV panels, in: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 11, 2007, Heft 8, S. 1843-1857.
- REICH, N. u.a. (2007): CO₂ EMISSIONS OF PV IN THE PERSPECTIVE OF A RENEWABLE ENERGY ECONOMY, in: *Proceedings of 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 3-7 September 2007, Milan, Italy.
- REICH-WEISER, C.; DORNFELD, D.; HORNE, S. (2008): Environmental assessment and metrics for solar: Case study of SolFocus solar concentrator systems, Berkeley, 2008.
- REN, H.; GAO, W.; RUAN, Y. (2009): Economic optimization and sensitivity analysis of photovoltaic system in residential buildings, in: *Renewable Energy*, Jg. 34, 2009, Heft 3, S. 883-889.

RICHARDS, B.S.; WATT, M.E. (2007): Permanently dispelling a myth of photovoltaics via the adoption of a new net energy indicator, in: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 11, 2007, Heft 1, S. 162-172.

ROES, A. u.a. (2009): Ex-ante environmental and economic evaluation of polymer photovoltaics, in: *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, Jg. 17, 2009, Heft 6,

ROTH, I.F.; AMBS, L.L. (2004): Incorporating externalities into a full cost approach to electric power generation life-cycle costing, in: *Energy*, Jg. 29, 2004, Heft 12-15, S. 2125-2144.

SALVE, J.L.(2008): Dealing with uncertainties in Life Cycle Assessment for emerging technologies. Test case: LCA of Silicon Thin-film PV, Master's thesis in Environmental Sciences, School of Science, Open University of the Netherlands, 2008.

SAMPATTAGUL, S. u.a. Evaluation of Environmental Impacts of Polycrystalline Silicon Solar Cell PP. by Using LCA Aspect, Online im Internet: <http://www.lcacenter.org/InLCA2006/Sampattagul-presentation.pdf>, Abruf: 29.10.2009, 09.00 Uhr.

SENG, L.Y.; LALCHAND, G.; SOW LIN, G.M. (2008): Economical, environmental and technical analysis of building integrated photovoltaic systems in Malaysia, in: *Energy Policy*, Jg. 36, 2008, Heft 6, S. 2130-2142.

SIMS, R.E.H.; ROGNER, H.; GREGORY, K. (2003): Carbon emission and mitigation cost comparisons between fossil fuel, nuclear and renewable energy resources for electricity generation, in: *Energy Policy*, Jg. 31, 2003, Heft 13, S. 1315.

SORENSEN, B. (1998): Life-cycle analysis of present and future Si-based solar cells. in: *Proceedings of Second Photovoltaic World Conference*, July 1998, Vienna.

STOPPATO, A. (2008): Life cycle assessment of photovoltaic electricity generation, in: *Energy*, Jg. 33, 2008, Heft 2, S. 224-232.

SUSTAINABILITY EVALUATION OF SOLAR ENERGY SYSTEMS (SENSE) (2008): Sustainability evaluation of solar energy systems (SENSE). LCA analysis, Stuttgart, 2008.

TAHARA, K.; KOJIMA, T.; INABA, A. (1997): Evaluation of CO₂ payback time of power plants by LCA, in: *Energy Conversion and Management*, Jg. 38, 1997, Heft Supplement 1, S. S615-S620.

TALAVERA, D.; NOFUENTES, G.; AGUILERA, J. (2010): The internal rate of return of photovoltaic grid-connected systems: A comprehensive sensitivity analysis, in: *Renewable Energy*, Jg. 35, 2010, Heft 1, S. 101-111.

TRIEB, F.; LANGNISS, O.; KLAISS, H. (1997): Solar electricity generation-a comparative view of technologies, costs and environmental impact. *Solare Elektrizitätserzeugung - eine vergleichende Analyse der Technologien, Kosten und Umweltfaktoren*, in: *Solar Energy*, Jg. 59 (1997), 1997, Heft 1-3, S. 89-99.

TRIPANAGNOSTOPOULOS, Y. u.a. (2005): Energy, Cost and LCA Results of PV and Hybrid PV/T Solar Systems, in: *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, Jg. 13, 2005, S. 235-250.

VIGNESWARAN, A. u.a. (2008): Cost comparison between amorphous silicon and cadmium telluride for stand-alone photovoltaic system in Malaysia, 2008, S. 468-472.

WATT, M.E. u.a. (1998): Life-cycle air emissions from PV power systems, in: Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Jg. 6 (1998), 1998, Heft 2, S. 127-136.

Wei-Fu Su; Shyh-Jier Huang (2001): Economic Analysis for Demand-Side Hybrid Photovoltaic and Battery Energy Storage System, in: IEEE Transactions on Industry Applications, Jg. 37, 2001, Heft 1, S. 171.

WIES, R.W. u.a. (2005): Simulink Model for Economic Analysis and Environmental Impacts of a PV With Diesel-Battery System for Remote Villages, in: IEEE Transactions on Power Systems, Jg. 20, 2005, Heft 2, S. 692-700.

WILSON, R.; YOUNG, A. (1996): The embodied energy payback period of photovoltaic installations applied to buildings in the UK, in: Building and Environment, Jg. 31, 1996, Heft 4, S. 299-305.

YAMADA, K. u.a. (1995): Evaluation of photovoltaic energy systems in terms of economics, energy and CO₂ emissions, in: Energy Conversion and Management, Jg. 36, 1995, Heft 6-9, S. 819-822.

YAMASHITA, N. u.a. (2008): An Environmental Potential of PV systems and Greening by Utilizing the Ecological Footprint, in: Forest, Jg. 31, 2008, Heft 48.7, S. 3.57.

A 11 Dokumente ähnlich analysiert

ALSEMA, E.A. (2006): Life Cycle Assessment of PV technology: current status and further needs, in: Proceedings of SENSE Workshop, 7 September 2006, Dresden.

ALSEMA, E.; DE WILD-SCHOLTEN, M. (2004): Environmental life cycle assessment of advanced silicon solar cell technologies, S. 11.

BRIEM, S.; BLESL, M.; FAHL, U. (2002): Ganzheitliche Bilanzierung von Stromerzeugungstechniken als Element von Nachhaltigkeitsanalysen zukünftiger Energiesysteme, in: VDI-Berichte, 2002, S. 363-376.

BYRNE, J. (1996): Levelized Cost Analyses of Small-Scale, Off-Grid Photovoltaic, Wind, and PV-Wind Hybrid Systems for Inner Mongolia, China, in: Center for Energy and Environmental Policy, University of Delaware, Newark, Delaware, 1996,

BYRNE, J.; SHEN, B.; WALLACE, W. (1998): The economics of sustainable energy for rural development: A study of renewable energy in rural China, in: Energy Policy, Jg. 26, 1998, Heft 1, S. 45-54.

DE WILD-SCHOLTEN, M.J.; ALSEMA, E. (2006): Environmental life cycle inventory of crystalline silicon photovoltaic module production, S. 59.

DE WILD-SCHOLTEN, M.J.; ALSEMA, E. (2006): Environmental life cycle inventory of crystalline silicon photovoltaic module production_EXCEL File, S. 59.

DE WILD-SCHOLTEN, M.J.; ALSEMA, E. (2007): Environmental life cycle inventory of crystalline silicon photovoltaic module production_EXCEL File. Status 2005/2006, S. 59.

- GÜRZENICH, D. u.a. (1999): Cumulative energy demand for selected renewable energy technologies. Gesamt-Energiebedarf für ausgewählte Technologien mit erneuerbaren Energiequellen, in: *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Jg. 4 (1999), 1999, Heft 3, S. 143-149.
- ITO, M. u.a. A Preliminary Study on Potential for Very Large-Scale Photovoltaic Power Generation (VLS-PV) System on the Gobi Desert from Economic and Environmental Viewpoints, in: *Life*, Jg. 10, S. 20-30.
- KEOLEIAN, G.A.; LEWIS, G.M.D. (1997): Application of life-cycle energy analysis to photovoltaic module design, in: *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, Jg. 5, 1997, Heft 4, S. 287-300.
- KNAPP, K.; JESTER, T. (2000): An empirical perspective on the energy payback time for photovoltaic modules, S. 641-648.
- KNAPP, K.E.; JESTER, T.L. (2000): Initial empirical results for the energy payback time of photovoltaic modules,
- KNAPP, K.; JESTER, T.; MIHAIK, G. (2000): ENERGY BALANCES FOR PHOTOVOLTAIC MODULES: STATUS AND PROSPECTS, S. 1450-1455.
- KRAUTER, S. (2003): Greenhouse gas reduction by PV, 2003, S. 2610-2613.
- KUEMMEL, B.; NIELSEN, S.K.; SØRENSEN, B.(1997): Life-cycle analysis of energy systems, Roskilde University Press Roskilde, 1997.
- KUROKAWA, K. u.a. (2000): A preliminary analysis of very large scale photovoltaic power generation systems, 2000, S. 2951-2954.
- LEWIS, G.; KEOLEIAN, G.A. (1997): Life cycle design of amorphous silicon photovoltaic modules.project summary, United States Environmental Protection Agency, EPA/600/SR-97/081, 1997.
- LEWIS, G.; KEOLEIAN, G. (1996): Amorphous silicon photovoltaic modules: a life cycle design casestudy, S. 141-147.
- MARHEINEKE, T. u.a. (2000): Ganzheitliche Bilanzierung der Energie-und Stoffströme von Energieversorgungstechniken Life Cycle Assessment of Energy and Material Flows of Energy Supply Technologies, 2000,
- MARHEINEKE, T.; KREWITT, W.; FRIEDRICH, R. (2001): Lebenszyklusanalyse verschiedener Stromerzeugungstechnologien, in: *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, Jg. 51 (2001), 2001, Heft 5, S. 274-279.
- NORDMANN, T.; CLAVADETSCHER, L.; JAHN, U. (2007): PV system performance and cost analysis, a report by IEA PVPS Task 2. PV-Systemleistung und Kostenanalyse, ein Bericht der IEA PVPS Task 2, 2007, S. 3385-3388.
- OLIVER, M. (1999): The viability of solar photovoltaics With specific reference to building integrated photovoltaics cladding systems, 1999,

- PACCA, S.; SIVARAMAN, D.; KEOLEIAN, G.A. (2007): Parameters affecting the life cycle performance of PV technologies and systems, in: *Energy Policy*, Jg. 35, 2007, Heft 6, S. 3316-3326.
- PEHNT, M.; BUBENZER, A.; RAUBER, A. (2002): 4 Life Cycle Assessment of Photovoltaic Systems-Trying To Fight Deep-Seated Prejudices, in: *Photovoltaics Guidebook for Decision-makers: Technological Status and Potential Role in Energy Economy*, 2002, S. 179.
- PHYLIPSEN, G.J.M.; ALSEMA, E.A. (1995): Environmental life-cycle assessment of multi-crystalline silicon solar cell modules, 95057, Utrecht, 1995.
- PHYLIPSEN, G.J.M.; ALSEMA, E.A. (1995): Environmental life-cycle assessment of multi-crystalline silicon solar cell modules. umweltrelevante abschätzung des lebenszyklus von multikristallinen silizium-solarzellenmodulen, 95057, Utrecht, The Netherlands, 1995. S. 1-65.
- RAUGEI, M.; FRANKL, P. (2008): Life Cycle Impacts and Total Costs of Present and Future Photovoltaic Systems: State-of-the Art and Future Outlook of a Strategic Technology Option for a Sustainable Energy System, in: *Sustainable Energy Production and Consumption: Benefits, Strategies and Environmental Costing*, 2008, S. 293.
- RAUGEI, M. u.a. (2007): Life Cycle Assessment of Present and Future Photovoltaic Systems,
- ROOSMALEN, J.A.M.v. (1995): Thin-film solar cells. Vergleichende Beurteilung von Dünnschicht-Solarzellen aus a-Si, CuInSe₂, f-Si und nc-TiO₂, in: ECN-C, Netherlands Energy Research Foundation, 1995,
- SCHMID, A.L.; HOFFMANN, C.A.A. (2004): Replacing diesel by solar in the Amazon: short-term economic feasibility of PV-diesel hybrid systems, in: *Energy Policy*, Jg. 32, 2004, Heft 7, S. 881.
- SHRESTHA, G.B.; GOEL, L. (1998): A study on optimal sizing of stand-alone photovoltaic stations, in: *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Jg. 13, 1998, Heft 4, S. 373.
- TALAVERA, D.L. u.a. (2007): Tables for the estimation of the internal rate of return of photovoltaic grid-connected systems, in: *Renewable and sustainable energy reviews*, Jg. 11, 2007, Heft 3, S. 447-466.
- TRIPANAGNOSTOPOULOS, Y. u.a. (2004): Applications aspects of hybrid PVT/AIR solar systems, in: *Proceedings of EuroSun2004*, Freiburg, 2004, S. 22-25.
- TRIPANAGNOSTOPOULOS, Y. u.a. (2006): Performance, cost and life-cycle assessment study of hybrid PVT/AIR solar systems, in: *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, Jg. 14 (2006), 2006, Heft 1, S. 65-76.
- VAN SARK, W.; SCHROPP, R. (2006): Contributions of Utrecht University, Faculty of Science to 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EPSEC21). in: *Proceedings of 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EPSEC21)*., 4-8 September, 2006, Dresden.
- VELTKAMP, A.; DE WILD-SCHOLTEN, M. (2006): in: *Dye sensitised solar cells for large-scale photovoltaics; the determination of environmental performances*, 2006,

WILLIAMS, T. u.a. (2005): Technology Choices for the PV Industry: A Comparative Life Cycle Environmental Impact Perspective, 2005,

A 12 Dokumente, die gemäß der Priorisierung in Kap.6.1.5 nicht in die Inhaltsanalyse eingegangen sind

ALSEMA, E.(2003): Energy Pay-Back Time and CO₂ Emissions of PV Systems. In: Tom Markvart; Luis Castañer (Hrsg.): Practical Handbook of Photovoltaics, Elsevier Science, Amsterdam 2003. S. 869-886.

ALSEMA, E.; DE WILD-SCHOLTEN, M. (2004): Environmental life cycle assessment of advanced silicon solar cell technologies, S. 11.

ALSEMA, E.; NIEUWLAAR, E. (2002): Levenscyclusanalyse van fotovoltaïsche systemen met dakopstelling. Een studie gericht op de bijdrage van Balance-of-System componenten in het milieuprofiel van PV-systemen op daken, 2002,

ALSEMA, E.A.; NIEUWLAAR, E. (2000): Energy viability of photovoltaic systems, in: Energy Policy, Jg. 28, 2000, Heft 14, S. 999.

BARON, S. (1984): The embedded energy costs in solar energy systems, in: Solar and Wind Technology, Jg. 1, 1984, Heft 1, S. 63-69.

BAUER, C. u.a. Comparative environmental assessment of current and future electricity supply technologies for Switzerland,

BELL, B.F.; MCGOWAN, J.G. (1984): An analytical study of a hybrid wind-passive solar system, in: Solar Energy, Jg. 32, 1984, Heft 3, S. 401-415.

CHERUBINI, A.(2001): Processo produttivo di moduli fotovoltaici in silicio policristallino. Master degree thesis, University of Rome "La Sapienza", Rome 2001.

DURAND, S.J. (1994): Attaining a 30-year photovoltaic system lifetime: the BOS issues. Lebensdauer eines Sonnenkraftwerks von 30 Jahren: Das BOS-Ergebnis, in: Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Jg. 2 (1994), 1994, Heft 2, S. 107-113.

EVTUHOV, V. (1979): Parametric cost analysis of photovoltaic systems, in: Solar Energy, Jg. 22, 1979, S. 427-433.

FRANTA, G.(. u.a. (1981): Life-cycle costing of solar energy investments Gesamtkostenrechnung bei Solarenergieinvestitionen, 1981.

FTHENAKIS, V. (2009): Sustainability of photovoltaics: The case for thin-film solar cells, in: Renewable and Sustainable Energy Reviews, Jg. 13, 2009, Heft 9, S. 2746-2750.

GROPPER, J. (1988): Technical and economic trade-off study between photovoltaic power systems and closed cycle vapor turbogenerators. Technischer und kostenmaessiger Vergleich zwischen photovoltaischen Energiesystemen und Dampfgeneratoren mit geschlossenem Kreislauf, 1988, S. 302-307.

GULLBERG, M. u.a. (2005): Village electrification technologies—an evaluation of photovoltaic cells and compact fluorescent lamps and their applicability in rural villages based on a Tanzanian case study, in: Energy Policy, Jg. 33, 2005, Heft 10, S. 1287-1298.

- HAGEDORN, G. (1989): Hidden energy in solar cells and photovoltaic power stations. Die in Sonnenzellen und Sonnenbatterien hineingesteckte Energie, in: Report of the Commission of the European Communities - EUR, 1989, S. 542-545.
- HAGEDORN, G. u.a. (1992): Umweltrelevante Masseneinträge bei der Herstellung verschiedener Solarzellentypen : eine vergleichende Analyse konventioneller und ausgewählter neuer Verfahren unter Berücksichtigung der Einsatzstoffe und Prozeßketten sowie der Entsorgungs- und Recyclingmöglichkeiten : Endbericht; Contract PLI14120, München 1992.
- HAYAMI, H.; NAKAMURA, M.; YOSHIOKA, K. (2005): The Life Cycle CO₂ Emission Performance of the DOE/NASA Solar Power Satellite System: A Comparison of Alternative Power Generation Systems in Japan, in: IEEE Transactions on Systems, Man & Cybernetics: Part C - Applications & Reviews, Jg. 35, 2005, Heft 3, S. 391-400.
- INABA, A.; YAMADA, K.; KOMIYAMA, H. (1993): An energy evaluation for solar photovoltaic energy systems. Eine Energieaufwandsabschätzung für photovoltaische Sonnenkraftwerke, 1993, S. 490.
- JONES, G.J. (1992): Photovoltaics as a worldwide energy source. Photovoltaik als weltweite Energiequelle, 1992, S. 145-152.
- JUNGBLUTH, N.; DONES, R.; FRISCHKNECHT, R. (2008): Life cycle assessment of photovoltaics: Update of theecoinvent database, in: Materials Research Society Symposium - Proceedings, 2008, S. 33-42.
- KALOGIROU, S.A.; TRIPANAGNOSTOPOULOS, Y. (2007): Industrial application of PV/T solar energy systems, in: Applied Thermal Engineering, Jg. 27, 2007, Heft 8, S. 1259-1270.
- KOELLE, H.H. (1988): On the life cycle cost and return on investment of a 500 GW global space solar power system, in: Acta Astronautica, Jg. 18, 1988, S. 181-189.
- KONER, P.K.; DUTTA, V.; CHOPRA, K.L. (2000): A comparative life cycle energy cost analysis of photovoltaic and fuel generator for load shedding application, in: Solar Energy Materials and Solar Cells, Jg. 60, 2000, Heft 4, S. 309-322.
- LANCASHIRE, S.J. (1988): Life-cycle comparison of different battery types for use with photovoltaic systems. Vergleich von Lebenszyklen unterschiedlicher Batterietypen im Einsatz mit Photovoltaiksystemen, 1988, S. 1157-1163.
- LÜBBERT, E. (1994): Kosten erneuerbarer Energien. Betriebserfahrungen und Wirtschaftlichkeit von Solar- und Windkraftanlagen in Deutschland, in: Bulletin.Schweizerischer Elektrotechnischer Verein, Jg. 85 (1994), 1994, Heft 10, S. 18-22.
- MATSUHASHI, R.; ISHITANI, H. (2000): Evaluation of energy technologies to realize sustainable systems, in: Electrical Engineering in Japan, Jg. 130 (2000), 2000, Heft 2, S. 25-31.
- MATSUOKA, I. (2004): Economic evaluation of space solar power system, in: ESA SP - European Space Agency Special Publications, 2004, S. 65-68.

- MCCONNELL, R.D. (2002): Assessment of the dye-sensitized solar cell, in: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 6, 2002, Heft 3, S. 271-293.
- MEIJER, A.; HUIJBREGTS, M. (2002): Vergelijkende milieugerichte levenscyclusanalyse van het InGaP-multikristallijn Si tandem zonnepaneel met het multikristallijn Si zonnepaneel, in: *Institute for Biodiversity and Ecosystem Dynamics, Universiteit van Amsterdam, The Netherlands*, 2002,
- NEFF, T.L.(1981): *The social costs of solar energy : a study of photovoltaic energy systems*, 1981.
- NOWLAN, M.J.; HOGAN, S.J.; DARKAZALLI, G. (1995): A cost analysis for high volume crystalline silicon photovoltaic module manufacturing. *Kostenanalyse der Serienfertigung von Photovoltaik-Modulen aus kristallinem Silicium*, 1995, S. 2334-2336.
- OLIVER, M.; JACKSON, T. (2001): Energy and economic evaluation of building-integrated photovoltaics, in: *Energy*, Jg. 26, 2001, Heft 4, S. 431-439.
- PALZ, W.; ZIBETTA, H. (1991): Energy pay-back time of photovoltaic modules, in: *International Journal of Solar Energy*, Jg. 10, 1991, Heft 3-4, S. 211-216.
- PIMENTEL, D. u.a. (2002): Renewable energy: current and potential issues, in: *Bioscience*, Jg. 52, 2002, Heft 12, S. 1111-1120.
- POURIS, A. (1987): The cost of photovoltaic cells in South Africa, in: *Energy*, Jg. 12, 1987, Heft 2, S. 117-121.
- PUST, K.; DECKERS, D.(1996): *Kumulierter Energieaufwand, Amortisationszeit, Erntefaktor und Substitutionsfaktor für die 1 MWp Photovoltaikanlage in Toledo/Spanien. Diplomarbeit, Diplom, Fachhochschule Gelsenkirchen, Fachbereich Elektrotechnik, Gelsenkirchen 1996.*
- RAMAN, V.; TIWARI, G.N. (2008): Life cycle cost analysis of HPVT air collector under different Indian climatic conditions, in: *Energy Policy*, Jg. 36, 2008, Heft 2, S. 603-611.
- RIS, H.R. (1991): *Energiebilanz von Solarzellenanlagen. Energierückfallzeit innerhalb von 5 bis 11 Jahren. Energie balance by solar-energy power stations.* in: *Elektrotechnik, Aarau*, Jg. 42 (1991), 1991, Heft 11, S. 53-56.
- ROTH, E. (1994): *Energetischer Vergleich von Kraftwerken. Energetic comparison of power stations.* in: *Brennstoff Wärme Kraft - BWK*, Jg. 46 (1994), 1994, Heft 1/2, S. 28-32.
- RUEGG, R. (1979): *Calculating the solar dollar gains. Ins and outs of life cycle costing Berechnung der Kostenvorteile von Solarsystemen. Input und Output der Gesamtkostenrechnung,* in: *Solar engng.mag.*, 1979,
- RUEGG, R.T.(1980): *Life-cycle costing manual for the federal energy management programs Handbuch der Gesamtkostenrechnung fuer die Bundes-Energiemanagement- Programme*, 1980.
- SCHLUETER, L.E. (1987): *Maintenance requirements and costs at the Carrisa Plains photovoltaic plant. Unterhaltung und Kosten beim Sonnenkraftwerk in Carrisa Plains*, 1987, S. 1362.

SENES CONSULTANTS LIMITED (2008): Methods to assess the impacts on the natural environment of generation options, 29, 2008.

SETTERWALL, C. (1997): Livscykelanalys för solceller, in: Utveckling AB: Vattenfall, 1997,

SHERIE, Y.S. (1983): A life cycle costing methodology for the assessment of process heat generation by solar energy, in: Microelectronics Reliability, Jg. 23, 1983, Heft 6, S. 1069-1074.

SISKOS, J.; HUBERT, P. (1983): Multi-criteria analysis of the impacts of energy alternatives: A survey and a new comparative approach, in: European Journal of Operational Research, Jg. 13, 1983, Heft 3, S. 278-299.

SOAST, A. (1989): Planned Solar Energy Installations Can Compete with Fossil Fuel Units, in: Enr, 1989,

SRINIVAS, K.S. u.a. (1992): Energy investments and production costs of amorphous silicon PV modules. Energieinvestitionen und Herstellungskosten von Photovoltaikmodulen aus amorphem Silicium, 1992, S. 549-554.

TAMPIER, M.; PROBE, P. (2002): Promoting green power in Canada, in: Pollution Probe Organization, Toronto, ON, Canada, 2002,

TARRANT, D.E. u.a. (1991): CuInSe(ind 2) module environmental reliability. Umweltzuverlässigkeit von CuInSe/sub2/-Modulen, in: Solar Cells, Jg. 30 (1991), 1991, Heft 1-4, S. 549-557.

TURIEL, I.; ESTRADA, H.; LEVINE, M. (1981): Life-cycle cost analysis of major appliances, in: Energy, Jg. 6, 1981, Heft 9, S. 945-970.

VAN BRUMMELEN, M.; NIEUWLAAR, E. (1994): Life cycle assessment of roof integrated solar cell systems. Department of Science, in: Technology and Society, Utrecht University, The Netherlands, 1994,

WEIK, H. (1990): Der Beitrag der Solarenergie zur Eindämmung des Treibhaus-Effektes. Solar battery and solar collector decrease the hothouse-effect. in: Sonnenenergie und Wärmepumpe, Bielefeld, Jg. 15 (1990), 1990, Heft 1, S. 13-14.

WEISSER, D. (2004): Costing electricity supply scenarios: A case study of promoting renewable energy technologies on Rodriguez, Mauritius, in: Renewable Energy, Jg. 29, 2004, Heft 8, S. 1319-1347.

YALCINTAS, M.; KAYA, A. (2009): Conservation vs. renewable energy: Cases studies from Hawaii, 2009.

ZERTA, M. u.a. (2004): Earth & space-based power generation systems - A comparison study, in: ESA SP - European Space Agency Special Publications, 2004, S. 29-36.

A 13 Reviews zu LZA für PV oder Energiesystemen allgemein

ALSEMA, E. (1998): Energy requirements and CO2 mitigation potential of PV systems, in: Photovoltaics and the Environment, 1998,

- ALSEMA, E. (1998): Energy requirements of thin-film solar cell modules-a review, in: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 2, 1998, Heft 4, S. 387-415.
- BANKIER, C.; GALE, S. (2006): Energy payback of roof mounted photovoltaic cells, in: *Energy Bulletin*, Jg. 16, 2006,
- BOSSERT, R. u.a. (2000): Thin-film solar cells. technology evaluation and perspectives, Novem, contract no. 146.150-010.1, 2000.
- COLLE, S.; DE-ABREU, S.L.; RUTHER, R. (2001): Uncertainty in economical analysis of solar water heating and photovoltaic systems, in: *Solar Energy*, Jg. 70 (2001), 2001, Heft 2, S. 131-142.
- FTHENAKIS, V.M.; HYUNG, C.K.; ALSEMA, E. (2008): Emissions from Photovoltaic Life Cycles, in: *Environmental science & technology*, Jg. 42, 2008, Heft 6, S. 2168-2174.
- JUNGBLUTH, N.; FRISCHKNECHT, R. (2000): Literaturstudie Ökobilanz Photovoltaikstrom und Update der Ökobilanz für das Jahr 2000, in: URL: www.esu-services.ch, 2000,
- JUNGBLUTH, N.; STUCKI, M.; FRISCHKNECHT, R.(2009): Photovoltaics. In: Dones, R.u.a. (Hrsg.): *Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz*. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Swiss 2009.
- KRAUTER, S.; RÜTHER, R. (2004): Considerations for the calculation of greenhouse gas reduction by photovoltaic solar energy, in: *Renewable Energy*, Jg. 29, 2004, Heft 3, S. 345-355.
- LUND, C.; BISWAS, W. (2008): A Review of the Application of Lifecycle Analysis to Renewable Energy Systems, in: *Bulletin of Science, Technology & Society*, Jg. 28, 2008, Heft 3, S. 200-209.
- MATHUR, J.; BANSAL, N.K.; WAGNER, H. (2004): Dynamic energy analysis to assess maximum growth rates in developing power generation capacity: case study of India, in: *Energy Policy*, Jg. 32, 2004, Heft 2, S. 281.
- MCCONNELL, R. (2005): Concentrator photovoltaic technologies: Review and market prospects, in: *Refocus*, Jg. 6, 2005, Heft 4, S. 35-39.
- MCMONAGLE, R. (2006): The Environmental Attributes of Solar PV in the Canadian Context, 2006. Online im Internet: <http://www.saaep.ca/EnvironmentalAttributesofSolarPV.pdf>, Abruf: 07.10.2009, 13.30 Uhr.
- MEIER, P.J.(2002): Life-cycle assessment of electricity generation systems and applications for climate change policy analysis, Dissertation, UMI Dissertation Services, Ann Arbor, Mich., Ann Arbor, Mich. 2002.
- MILES, R.W.; HYNES, K.M.; FORBES, I. (2005): Photovoltaic solar cells: An overview of state-of-the-art cell development and environmental issues, in: *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, Jg. 51, 2005, Heft 1-3, S. 1-42.
- PACCA, S.; SIVARAMAN, D.; KEOLEIAN, G.A.(2006): Life Cycle Assessment of the 33 kW Photovoltaic System on the Dana Building at the University of Michigan: Thin Film

Laminates, Multi-crystalline Modules, and Balance of System Components. 2006, University of Michigan, Michigan 2006.

PERPINAN, O. u.a. (2009): Energy payback time of grid connected PV systems: Comparison between tracking and fixed systems. Ökobilanz von netzverbundenen Photovoltaik-Systemen: Vergleich zwischen nachgeführten und feststehenden Systemen, in: Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Jg. 17 (2009), 2009, Heft 2, S. 137-147.

PIETZCKER, R. u.a. (2009): The Role of Concentrating Solar Power and Photovoltaics for Climate Protection, 2009,

SHERWANI, A.; USMANI, J. (2010): Life cycle assessment of solar PV based electricity generation systems: A review, in: Renewable and Sustainable Energy Reviews, Jg. 14, 2010, Heft 1, S. 540-544.

TSOUTSOS, T.; FRANTZESKAKI, N.; GEKAS, V. (2005): Environmental impacts from the solar energy technologies, in: Energy Policy, Jg. 33, 2005, Heft 3, S. 289-296.

Varun; PRAKASH, R.; BHAT, I.K. (2009): Energy, economics and environmental impacts of renewable energy systems, in: Renewable and Sustainable Energy Reviews, Jg. 13, 2009, Heft 9, S. 2716-2721.

World Energy Council(2004): Comparison of Energy Systems using Life Cycle Assessment. A special report of the World Energy Council, 2004.

A 14 Inhaltsanalyse: konventionell vs. softwaregestützt

Tab. 38: Einfacher Vergleich konventionelle vs. computergestützte Inhaltsanalyse

(Eigene Erstellung, unter Verwendung von ATTESLANDER, P.; CROMM, J. (2003)241-247; KUCKARTZ, U. (2007)12 ff. sowie Herstellerangaben)

Kriterium	konventionell	MaxQDA	Atlas.ti
Textbearbeitung und -verwaltung	<ul style="list-style-type: none"> • alle Formate möglich • Verwaltung regulär auf PC und in Printform 	<ul style="list-style-type: none"> • kein pdf möglich • Konvertierung mit OCR Software uä erforderlich --> zusätzlicher Zeitaufwand+Fehlerpotential, da nicht 100%ig möglich • Behandlung von Abbildungen sehr aufwendig (bei Konvertierung), da Nachbearbeitung notwendig • interne Verwaltung der Dokumente innerhalb des Programms (Bilden von Subgruppen etc) • schneller Mausklick zum Textwechsel 	<ul style="list-style-type: none"> • pdf möglich • interne Verwaltung der Dokumente innerhalb des Programms (Bilden von Subgruppen etc) • schneller Mausklick zum Textwechsel
Kodierung	<ul style="list-style-type: none"> • Aufnahme entsprechender Informationen in Excel-Liste/-Schema • optional: Markierung mit Kommentar an entsprechender Stelle (Printform oder in Datei als pdf- oder Word-Markierung) 	<ul style="list-style-type: none"> • hierarchisches Codesystem (bis 10 Stufen) • nach Erstellung der einzelnen Codes per Mausklick an der entsprechenden Stelle • Kodierort und genaue Zitierung werden erfasst • Differenzierung und Filterung verschiedener Code-Kategorien • besonders geeignet für größere Code-Schemata • einfache Bündelung • für einfache Codes - Auto-Coding möglich • per Suchfunktion • Memofunktion 	<ul style="list-style-type: none"> • nach Erstellung der einzelnen Codes per Mausklick an der entsprechenden Stelle • Kodierort und genaue Zitierung werden erfasst • Differenzierung und Filterung verschiedener Code-Kategorien • besonders geeignet für größere Code-Schemata • einfache Bündelung • für einfache Codes - Auto-Coding möglich • per Suchfunktion

Kriterium	konventionell	MaxQDA	Atlas.ti
			<ul style="list-style-type: none"> • Memofunktion
Anpassung Kodierschema/ Flexibilität	<ul style="list-style-type: none"> • möglich • mühsames Suchen der einzelnen Code-Markierungen 	<ul style="list-style-type: none"> • problemlose Anpassung des Kodierschemas • Nachverfolgung per Mausklick, falls Anpassung über anderen Code nachvollziehbar • Fusionierung von Codes oä problemlos, Zitatstellen bleiben erhalten 	<ul style="list-style-type: none"> • problemlose Anpassung des Kodierschemas • Nachverfolgung per Mausklick, falls Anpassung über anderen Code nachvollziehbar • Fusionierung von Codes oä problemlos, Zitatstellen bleiben erhalten
Auswertung	<ul style="list-style-type: none"> • Excel 	<ul style="list-style-type: none"> • mehrere interne Tools • Excel-Export • Zitatlisten (codespezifische Auflistung der konkreten Textsegmente) 	<ul style="list-style-type: none"> • mehrere interne Tools • Excel-Export • Zitatlisten (codespezifische Auflistung der konkreten Textsegmente)
spätere Nachvollziehbarkeit und Weiterverwendung	<ul style="list-style-type: none"> • Printform: Durchblättern und Hand-Markierungen erfassen • bzw. einscannen • PC: evt Markierungen in pdfs oä. möglich 	<ul style="list-style-type: none"> • Kodierungen, Kommentierungen etc. sind später nachvollziehbar • Detaillierung einzelner Themen möglich, z.B. an allen Stellen, an denen ein bestimmter Code verwendet wird, kann durch einfaches Aufrufen tiefergehend codiert werden 	<ul style="list-style-type: none"> • Kodierungen, Kommentierungen etc. sind später nachvollziehbar • Detaillierung einzelner Themen möglich, z.B. an allen Stellen, an denen ein bestimmter Code verwendet wird, kann durch einfaches Aufrufen tiefergehend codiert werden
Tool-Verfügbarkeit	<ul style="list-style-type: none"> • Excel Vollversion vorhanden 	<ul style="list-style-type: none"> • Trial Version 30 Tage • (für Kodierung+Auswertung voraussichtlich zu kurz) 	<ul style="list-style-type: none"> • Studentenversion (voller Nutzungsumfang)

A 15 Erfahrungskurve für PV, Referenzenliste

ANSELM, V.(2008): Auswirkung der Erfahrungskurve auf die Preisgestaltung, GRIN Verlag, 2008.

Energy Technology Perspectives 2008 - Scenarios&Strategies to 2050, (2008): 2008.

FERIOLI, F.; SCHOOTS, K.; VAN, d.Z. (2009): Use and limitations of learning curves for energy technology policy: A component-learning hypothesis, in: Energy Policy, Jg. 37, 2009, Heft 7, S. 2525-2535.

FRANKL, P. u.a. (2006): NEEDS-new energy externalities developments for sustainability. final report on technical data, costs and life cycle inventories of PV applications, Deliverable n° 11.2 - RS Ia, 2006.

HARMON, C. (2000): Experience curves of photovoltaic technology, in: Laxenburg, IIASA, pp, Jg. 17, 2000,

JUNGINGER, M. u.a. (2008): Technological learning in the energy sector, 2008.

KESHNER, M.; ARYA, R. (2005): Study of potential cost reductions resulting from super-large-scale manufacturing of PV modules, in: National Renewable Energy Laboratory, Final Subcontract Report NREL/SR-520-36846, at http://www.nrel.gov/ncpv/thin_film/docs/keshner.pdf, accessed, Jg. 12, 2005,

KUROKAWA, K.; KOMOTO, K.; VAN DER VLEUTEN, P.(2007): Energy from the desert: practical proposals for very large scale photovoltaic systems, Earthscan/James & James, 2007.

MCDONALD, A.; SCHRATTENHOLZER, L. (2001): Learning rates for energy technologies, in: Energy Policy, Jg. 29, 2001, Heft 4, S. 255-261.

NEIJ, L. (1997): Use of experience curves to analyse the prospects for diffusion and adoption of renewable energy technology, in: Energy Policy, Jg. 25, 1997, Heft 13, S. 1099.

NEIJ, L. (2008): Cost development of future technologies for power generation—A study based on experience curves and complementary bottom-up assessments, in: Energy Policy, Jg. 36, 2008, Heft 6, S. 2200-2211.

NEIJ, L.; ANDERSEN, P.; DURSTEWITZ, M. (2003): The use of experience curves for assessing energy policy programmes,

NEIJ, L. u.a. (2003): Experience curves: A tool for energy policy assessment, Environmental and Energy Systems Studies, Univ., 2003.

NEMET, G.F. (2006): Beyond the learning curve: factors influencing cost reductions in photovoltaics, in: Energy Policy, Jg. 34, 2006, Heft 17, S. 3218-3232.

NEMET, G.F. (2009): Interim monitoring of cost dynamics for publicly supported energy technologies, in: Energy Policy, Jg. 37, 2009, Heft 3, S. 825-835.

OLIVER, M.; JACKSON, T. (2000): The evolution of economic and environmental cost for crystalline silicon photovoltaics, in: Energy Policy, Jg. 28, 2000, Heft 14, S. 1011.

PEREZAGUA, E. (2005): A Vision for Photovoltaic Technology, in: Report by the Photovoltaic Technology Research Advisory Council (PV TRAC), European Communities, 2005,

- REEKER, M.(2004): *Kostenentwicklung erneuerbarer Energien*, Cuvillier Verlag, 2004.
- ROUT, U.K. u.a. (2009): Uncertainty in the learning rates of energy technologies: An experiment in a global multi-regional energy system model, in: *Energy Policy*, Jg. 37, 2009, Heft 11, S. 4927-4942.
- SCHAEFFER, G.J. u.a. (2004): Learning from the sun; analysis of the use of experience curves for energy policy purposes: The case of photovoltaic power. final report of the PHO-TEX project, in: Report ECN DEGO: ECN-C-04-035, ECN Renewable Energy in the Built Environment, 2004,
- SHUM, K.L.; WATANABE, C. (2008): Towards a local learning (innovation) model of solar photovoltaic deployment, in: *Energy Policy*, Jg. 36, 2008, Heft 2, S. 508-521.
- SRINIVASAN, S. (2007): The Indian solar photovoltaic industry: a life cycle analysis, in: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 11, 2007, Heft 1, S. 133-147.
- VAN, d.Z.; RABL, A. (2004): The learning potential of photovoltaics: implications for energy policy, in: *Energy Policy*, Jg. 32, 2004, Heft 13, S. 1545.
- WELLER, T. (2001): *Photovoltaik im Wettbewerb der verteilten Energieerzeugung*, 2001, S. 7-12.
- ZWAAN-B-VAN, d.; RABL, A. (2003): Prospects for PV: a learning curve analysis, in: *Solar Energy*, Jg. 74 (2003), 2003, Heft 1, S. 19-31.
- ZWEIBEL, K. The terawatt challenge for thin-film PV, in: *Thin Film Solar Cells: Fabrication, Characterization and Applications*.

A 16 Inventar von LZA zur PV, geordnet nach Gesamtbewertung

Referenz	LCA	LCC	Ü	gew. Summe
LEWIS, G. u.a. (1999): PV-BILD: A life cycle environmental and economic assessment tool for building-integrated photovoltaic installations, in: National Science Foundation/Lucent Technologies Industrial Ecology Grant BES-9727268, 1999,	93,2%	66,7%	71,4%	77,4%
PACCA, S.; SIVARAMAN, D.; KEOLEIAN, G.A.(2006): Life Cycle Assessment of the 33 kW Photovoltaic System on the Dana Building at the University of Michigan: Thin Film Laminates, Multi-crystalline Modules, and Balance of System Components. 2006, University of Michigan, Michigan 2006.	96,6%	50,0%	85,4%	76,9%
JUNGBLUTH, N.; STUCKI, M.; FRISCHKNECHT, R.(2009): Photovoltaics. In: Dones, R.u.a. (Hrsg.): Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Swiss 2009.	100,0%	16,7%	100,0%	70,8%
SALVE, J.L.(2008): Dealing with uncertainties in Life Cycle Assessment for emerging technologies. Test case: LCA of Silicon Thin-film PV, Master's thesis in Environmental Sciences, School of Science, Open University of the Netherlands, 2008.	88,3%	33,3%	86,1%	68,4%
MASON, J. u.a. (2006): Energy payback and life-cycle CO2 emissions of the BOS in an optimized 3- 5 MW PV installation, in: Prog.Photovolt: Res.Appl, Jg. 14, 2006, S. 179–190.	65,0%	41,7%	94,3%	65,6%
ITO, M. u.a. (2008): A comparative study on cost and life-cycle analysis for 100 MW very large-scale PV (VLS-PV) systems in deserts using m-Si, a-Si, CdTe, and CIS modules, in: Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Jg. 16, 2008, Heft 1, S. 17-30.	50,5%	75,0%	69,3%	64,7%
KANNAN, R. u.a. (2006): Life cycle assessment study of solar PV systems: An example of a 2.7kW(ind p) distributed solar PV system in Singapore, in: Solar Energy, Jg. 80 (2006), 2006, Heft 5, S. 555-563.	46,8%	58,3%	81,2%	61,2%

MEIER, P.J.(2002): Life-cycle assessment of electricity generation systems and applications for climate change policy analysis, Dissertation, UMI Dissertation Services, Ann Arbor, Mich., Ann Arbor, Mich. 2002.	54,1%	33,3%	96,8%	59,6%
BERNAL-AGUSTÍN, J.L.; DUFO-LÓPEZ, R. (2006): Economical and environmental analysis of grid connected photovoltaic systems in Spain, in: Renewable Energy: An International Journal, Jg. 31, 2006, Heft 8, S. 1107-1128.	57,8%	66,7%	52,2%	59,2%
SENG, L.Y.; LALCHAND, G.; SOW LIN, G.M. (2008): Economical, environmental and technical analysis of building integrated photovoltaic systems in Malaysia, in: Energy Policy, Jg. 36, 2008, Heft 6, S. 2130-2142.	61,4%	58,3%	57,6%	59,2%
ITO, M. u.a. (2003): A preliminary study on potential for very large-scale photovoltaic power generation (VLS-PV) system in the Gobi desert from economic and environmental viewpoints, in: Solar Energy Materials and Solar Cells, Jg. 75 (2003), 2003, Heft 3-4, S. 507-517.	46,8%	75,0%	50,0%	57,7%
KALOWEKAMO, J.; BAKER, E. (2009): Estimating the manufacturing cost of purely organic solar cells, in: Solar Energy, Jg. 83, 2009, Heft 8, S. 1224-1231.	10,9%	100,0%	59,4%	56,6%
CELIK, A.N.; MUNEEER, T.; CLARKE, P. (2008): Optimal sizing and life cycle assessment of residential photovoltaic energy systems with battery storage. Optimale Auslegung und Lebenszyklusbewertung von Haus-Photovoltaikanlagen mit Batteriespeicherung, in: Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Jg. 16 (2008), 2008, Heft 1, S. 69-85.	43,2%	83,3%	40,7%	56,5%
WATT, M.E. u.a. (1998): Life-cycle air emissions from PV power systems, in: Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Jg. 6 (1998), 1998, Heft 2, S. 127-136.	28,9%	75,0%	64,3%	55,6%
FRANKL, P.; CORRADO, A.; LOMBARDELLI, S. (2004): Environmental and ecological life cycle inventories of present and future PV systems in europe for sustainability policies(ECLIPSE). final report. incl. dataset. Roma, Italia, 2004.	79,1%	0,0%	92,5%	55,4%
FRANKL, P. u.a. (2006): NEEDS-new energy externalities developments for sustainability. final report on technical data, costs and life cycle inventories of PV applications, Deliverable n° 11.2 - RS Ia, 2006.	85,4%	33,3%	45,8%	55,3%

TRIPANAGNOSTOPOULOS, Y. u.a. (2005): Energy, Cost and LCA Results of PV and Hybrid PV/T Solar Systems, in: Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Jg. 13, 2005, S. 235-250.	61,4%	41,7%	62,9%	55,0%
REHMAN, S.; BADER, M.A.; AL-MOALLEM, S.A. (2007): Cost of solar energy generated using PV panels, in: Renewable and Sustainable Energy Reviews, Jg. 11, 2007, Heft 8, S. 1843-1857.	14,6%	100,0%	45,1%	53,6%
WIES, R.W. u.a. (2005): Simulink Model for Economic Analysis and Environmental Impacts of a PV With Diesel-Battery System for Remote Villages, in: IEEE Transactions on Power Systems, Jg. 20, 2005, Heft 2, S. 692-700.	39,8%	75,0%	43,8%	53,3%
ROES, A. u.a. (2009): Ex-ante environmental and economic evaluation of polymer photovoltaics, in: Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Jg. 17, 2009, Heft 6,	71,1%	16,7%	75,3%	53,3%
JUNGBLUTH, N. (2005): Life cycle assessment of crystalline photovoltaics in the Swiss ecoinvent database, in: Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Jg. 13 (2005), 2005, Heft 5, S. 429-446.	88,6%	0,0%	70,7%	52,2%
ITO, M. u.a. (2005): Comparative Study of m-Si, a-Si and CdTe System of Very Large-Scale PV (VLS-PV) Systems in Desert, in: Proceedings of 20th EU-PVSEC, S. 2178-2181.	43,2%	41,7%	74,0%	51,9%
ROTH, I.F.; AMBS, L.L. (2004): Incorporating externalities into a full cost approach to electric power generation life-cycle costing, in: Energy, Jg. 29, 2004, Heft 12-15, S. 2125-2144.	64,3%	58,3%	29,6%	51,8%
NISHIMURA, A. u.a. (2009, in press): Life cycle assessment and evaluation of energy payback time on high-concentration photovoltaic power generation system, in: Applied Energy, Jg. In Press, Corrected Proof, 2009, in press,	87,4%	0,0%	65,4%	50,2%
JUNGBLUTH, N.; TUCHSCHMID, M.; DE WILD-SCHOLTEN, M. (2008): Life Cycle Assessment of Photovoltaics: Update of ecoinvent data v2.0, 2008. Online im Internet: http://www.ipcrystalclear.info/data/pdf/SP6-%20ECN,%20M.de%20Wild%20et%20al,%20report%20by%20ESU%20Services,%20Life%20Cycle%20Assessment%20of%20Photovoltaics%20Update%20of%20ecoinvent%20data%20v20.pdf , Abruf: 04.11.2009, 9.15 Uhr.	82,3%	0,0%	70,6%	50,0%

LEWIS, G.; KEOLEIAN, G.A. (1997): Life cycle design of amorphous silicon photovoltaic modules. full report. EPA/600/R-97/081, Ann Arbor, MI (USA), 1997.	36,2%	25,0%	92,8%	49,2%
BRIEM, S. u.a. (2004): Lebenszyklusanalysen ausgewählter zukünftiger Stromerzeugungstechniken. Ein Forschungsvorhaben mit finanzieller Unterstützung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit, in: bmb+f. Bundesministerium für Bildung und Forschung, Forschungsberichte, 2004, S. 1-348.	79,4%	0,0%	69,8%	48,7%
GARCÍA-VALVERDE, R. u.a. (2009): Life cycle assessment study of a 4.2kW p stand-alone photovoltaic system, in: Solar Energy, Jg. 83, 2009, Heft 9, S. 1434-1445.	68,7%	0,0%	75,0%	46,5%
BOYD, S.; BUONASSISI, T.; WILLIAMS, T. (2004): Technology choices for the PV industry: A comparative life cycle assessment, Berkeley Laboratory for Manufacturing Automation, Research Reports 2004/05, Berkeley, 2004. S. 38 ff.	61,4%	25,0%	53,3%	46,2%
GÜRZENICH, D.(2002): Methodische Aspekte zu Kumulierten Energieaufwendungen und Emissionen bei Photovoltaikanlagen in der Europäischen Union, Ruhr-Universität Bochum, DE, Bochum 2002.	72,3%	0,0%	69,1%	46,1%
MATSUHASHI, R.; MOMOBAYASHI, Y.; ISHITANI, H. (2002): Feasibility study on a CDM project utilizing photovoltaic systems, in: Environmental Economics & Policy Studies, Jg. 5, 2002, Heft 2, S. 105.	29,1%	75,0%	29,8%	45,4%
POULLIKKAS, A. (2009): Parametric cost-benefit analysis for the installation of photovoltaic parks in the island of Cyprus, in: Energy Policy, Jg. 37, 2009, Heft 9, S. 3673-3680.	7,3%	83,3%	42,9%	44,6%
DE WILD-SCHOLTEN, M.J. u.a. (2006): A cost and environmental impact comparison of grid-connected rooftop and ground-based PV systems, 2006, S. 3167-3173.	46,8%	41,7%	44,5%	44,3%
Wei-Fu Su; Shyh-Jier Huang (2001): Economic Analysis for Demand-Side Hybrid Photovoltaic and Battery Energy Storage System, in: IEEE Transactions on Industry Applications, Jg. 37, 2001, Heft 1, S. 171.	0,0%	83,3%	50,5%	44,3%
ALSEMA, E.A.; DE WILD-SCHOLTEN, M.; MOLENBROECK, E. (2003): Duurzaamheid van fotovoltaïsche systemen op basis van geavanceerde silicium technologie, Utrecht, 2003.	73,8%	0,0%	58,9%	43,5%
MARHEINEKE, T.(2002): Lebenszyklusanalyse fossiler, nuklearer und regenerativer Stromerzeugungstechniken Life cycle assessment of fossil, nuclear and renewable electricity generation techniques, Dissertation, Universität Stuttgart, Fakultät Energietechnik, Stuttgart 2002.	81,3%	8,3%	40,2%	43,4%
ALSEMA, E.A. (1996): Environmental aspects of solar cell modules. summary report. 96074, 1996.	71,1%	0,0%	59,5%	42,8%
OLIVER, M.; JACKSON, T. (2001): Energy and economic evaluation of building-integrated photovoltaics, in: Energy, Jg. 26, 2001, Heft 4, S. 431-439.	28,9%	66,7%	30,0%	42,4%

SORENSEN, B. (1998): Life-cycle analysis of present and future Si-based solar cells. in: Proceedings of Second Photovoltaic World Conference, July 1998, Vienna.	42,7%	41,7%	39,6%	41,4%
BATTISTI, R.; CORRADO, A. (2005): Evaluation of technical improvements of photovoltaic systems through life cycle assessment methodology, in: Energy, Jg. 30, 2005, Heft 7, S. 952-967.	50,5%	0,0%	79,0%	41,4%
DER MINASSIANS, A. u.a. (2006): Energy payback time of a SolFocus Gen1 concentrator PV system, MSE-ER C226 - Photovoltaic Materials Modern Technologies in the Context of a Growing Renewable Energy Market. Final Project Report December 7, 2006, 2006.	25,2%	33,3%	69,2%	41,3%
HERMANNSDÖRFER, I.; RÜB, C.; Universität der Künste Berlin (Hrsg.) (2005): PV ACCEPT final report, IPS-2000-0090, Berlin, 2005.	35,7%	41,7%	46,9%	41,1%
STOPPATO, A. (2008): Life cycle assessment of photovoltaic electricity generation, in: Energy, Jg. 33, 2008, Heft 2, S. 224-232.	79,6%	0,0%	43,8%	41,0%
ISKANDER, C.; SCERRI, E. (1996): Performance and cost evaluation of a stand-alone photovoltaic system in Malta, in: Renewable Energy, Jg. 8, 1996, Heft 1-4, S. 437-440.	7,3%	66,7%	49,4%	40,7%
YAMADA, K. u.a. (1995): Evaluation of photovoltaic energy systems in terms of economics, energy and CO2 emissions, in: Energy Conversion and Management, Jg. 36, 1995, Heft 6-9, S. 819-822.	28,9%	58,3%	33,8%	40,7%
DONES, R.; FRISCHKNECHT, R. (1998): Life cycle assessment of photovoltaic systems: results of Swiss studies on energy chains, in: Progress in Photovoltaics Research and Applications, Jg. 6, 1998, Heft 2, S. 117-125.	57,8%	0,0%	66,9%	40,3%
VIGNESWARAN, A. u.a. (2008): Cost comparison between amorphous silicon and cadmium telluride for stand-alone photovoltaic system in Malaysia, 2008, S. 468-472.	0,0%	75,0%	46,7%	40,3%
BOSSERT, R. u.a. (2000): Thin-film solar cells. technology evaluation and perspectives, Novem, contract no. 146.150-010.1, 2000.	42,7%	33,3%	44,8%	40,1%
DE WILD-SCHOLTEN, M.J.; VELTKAMP, A.C. (2007): Environmental Life Cycle Analysis of dye sensitized solar devices; status and outlook, in: Proceedings of 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 3-7 Sept. 2007, Milan, Italy.	77,4%	0,0%	42,9%	40,0%

ALSEMA, E.A. (2009): Life-cycle assessment of crystalline silicon PV module production by REC, in: Proceedings of 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Hamburg, 20-25 September, 2009,	56,8%	0,0%	66,5%	39,8%
PEHNT, M. (2006): Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies, in: Renewable Energy: An International Journal, Jg. 31, 2006, Heft 1, S. 55-71.	68,0%	0,0%	53,2%	39,7%
KHOUZAM, K.Y. (1999): Technical and economic assessment of utility interactive PV systems for domestic application, in: IEEE Transactions on Energy Conversion, Jg. 14, 1999, Heft 4, S. 1544.	0,0%	83,3%	34,5%	39,5%
NASSEN, J.; EVERTSSON, J.; ANDERSSON, B.A. (2002): Distributed power generation versus grid extension: an assessment of solar photovoltaics for rural electrification in northern Ghana, in: Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Jg. 10 (2002), 2002, Heft 7, S. 495-510.	7,3%	66,7%	45,3%	39,5%
CAMPOCCIA, A. u.a. (2009): Comparative analysis of different supporting measures for the production of electrical energy by solar PV and Wind systems: Four representative European cases. Vergleichende Analyse unterschiedlicher Fördermaßnahmen zur Stromerzeugung aus Photovoltaik und Windkraft: Vier repräsentative europäische Beispiele aus Frankreich, Deutschland, Italien und Spanien, in: Solar Energy, Jg. 83 (2009), 2009, Heft 3, S. 287-297.	0,0%	75,0%	42,9%	39,1%
MUNEER, T. u.a. (2006): Life cycle assessment of a medium-sized photovoltaic facility at a high latitude location. Bestimmung des langjährigen Nutzens einer mittelgroßen Photovoltaik- Anlage in hoher geographischer Breite, in: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A (Journal of Power and Energy), Jg. 220 (2006), 2006, Heft 6, S. 517-524.	39,6%	25,0%	53,6%	38,7%
OLIVER, M.; JACKSON, T. (2000): The evolution of economic and environmental cost for crystalline silicon photovoltaics, in: Energy Policy, Jg. 28, 2000, Heft 14, S. 1011.	14,3%	50,0%	53,6%	38,6%
NAWAZ, I.; TIWARI, G.N. (2006): Embodied energy analysis of photovoltaic (PV) system based on macro- and micro-level, in: Energy Policy, Jg. 34, 2006, Heft 17, S. 3144-3152.	54,1%	0,0%	64,7%	38,4%
EL-KORDY, M.N. u.a. (2002): Economical evaluation of electricity generation considering externalities, in: Renewable Energy, Jg. 25, 2002, Heft 2, S. 317-328.	28,9%	50,0%	34,9%	38,1%
KORONEOS, C.; STYLOS, N.; MOUSSIOPOULOS, N. (2006): LCA of multicrystalline silicon photovoltaic systems Part 1: Present situation and future perspectives, in: The International Journal of Life Cycle Assessment, Jg. 11 (2006), 2006, Heft 2, S. 129-136. ; KORONEOS, C.; STYLOS, N.; MOUSSIOPOULOS, N. (2006): LCA of multicrystalline silicon photovoltaic systems. Part 2: Application on an island economy, in: The International Journal of Life Cycle Assessment, Jg. 11 (2006), 2006, Heft 3, S. 183-188.	74,5%	0,0%	39,8%	38,0%

MOHR, N.J. u.a. (2007): Life cycle assessment of thin-film GaAs and GaInP/GaAs solar modules. Lebenszyklus-Bewertung von Dünnschicht-Solarzellen-Modulen auf der Basis von GaAs und GaInP/GaAs, in: Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Jg. 15 (2007), 2007, Heft 2, S. 163-179.	70,1%	0,0%	43,4%	37,6%
AGUADO-MONSONET, M.A.(1998): The environmental impact of photovoltaic technology (Task 6- INTERSUDMED Project), Sevilla 1998.	64,1%	0,0%	49,2%	37,2%
CELIK, A.N. (2006): Present status of photovoltaic energy in Turkey and life cycle techno-economic analysis of a grid-connected photovoltaic-house, in: Renewable & Sustainable Energy Reviews, Jg. 10, 2006, Heft 4, S. 370-387.	0,0%	75,0%	35,4%	36,9%
LAZOU, A.A.; PAPATSORIS, A.D. (2000): The economics of photovoltaic stand-alone residential households: A case study for various European and Mediterranean locations, in: Solar Energy Materials and Solar Cells, Jg. 62, 2000, Heft 4, S. 411-427.	0,0%	66,7%	43,8%	36,5%
FTHENAKIS, V.M.; KIM, H. (2005): Energy use and Greenhouse Gas emissions in the Life Cycle of Thin Film CdTe Photovoltaics, in: Proceedings of Symposium G-Life Cycle Analysis, MRS Fall Meeting, Boston (MS), USA.	43,2%	0,0%	70,5%	36,3%
ALSEMA, E.A.; DE WILD-SCHOLTEN, M.J. (2005): The real environmental impacts of crystalline silicon PV modules: an analysis based on up-to-date manufacturers data, in: Proceedings of 20th European PV Solar Conference, Barcelona.	63,6%	0,0%	46,4%	36,2%
ITO, M. u.a. (2004): Comparative study of fixed and tracking system of very large-scale PV (VLS-PV) systems in the world deserts. Vergleichende Untersuchung sehr großer Photovoltaik-Systeme mit und ohne Sonnenstandsnachführung in den Wüsten der Erde, 2004, S. 2113-2116.	3,6%	41,7%	67,4%	36,1%
ALSEMA, E.A.; DE WILD-SCHOLTEN, M. (2006): Environmental Impacts of Crystalline Silicon Photovoltaic Module Production, in: Proceedings of 13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering (LCE) 2006, May 31st - June 2nd, 2006, S. 103-108.	60,2%	0,0%	49,1%	35,8%
DE WILD-SCHOLTEN, M.J.; ALSEMA, E.A.(2007): Environmental life cycle inventory of crystalline silicon photovoltaic module production, Status 2005/2006, including EXCEL-File. Complemented by Environmental life cycle inventory of crystalline silicon photovoltaic module production, proceedings of Materials Research Society Symposium, Warrendale, PA (2006, Materials Reserach Society and EXCEL File 2004. Warrendale, Pa.; Materials Research Society; 1999, 2007.	47,1%	0,0%	63,3%	35,5%
REN, H.; GAO, W.; RUAN, Y. (2009): Economic optimization and sensitivity analysis of photovoltaic system in residential buildings, in: Renewable Energy, Jg. 34, 2009, Heft 3, S. 883-889.	21,6%	41,7%	44,3%	35,4%

KEOLEIAN, G.A.; LEWIS, G.M. (1997): Application of life-cycle energy analysis to photovoltaic module design, in: Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Jg. 5 (1997), 1997, Heft 4, S. 287-300.	32,5%	0,0%	77,6%	34,7%
PACCA, S.; HORVATH, A. (2002): Greenhouse gas emissions from building and operating electric power plants in the Upper Colorado River Basin, in: Environ.Sci.Technol, Jg. 36, 2002, Heft 14, S. 3194-3200.	35,9%	33,3%	33,1%	34,2%
SUSTAINABILITY EVALUATION OF SOLAR ENERGY SYSTEMS (SENSE) (2008): Sustainability evaluation of solar energy systems (SENSE). LCA analysis, Stuttgart, 2008.	46,1%	0,0%	59,8%	34,1%
MEIJER, A. u.a. (2003): Life-cycle assessment of photovoltaic modules: comparison of mc-Si, InGaP and InGaP/mc-Si solar modules, in: Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Jg. 11 (2003), 2003, Heft 4, S. 275-287.	56,8%	0,0%	45,8%	33,6%
OLIVIER, J.R.; HARMS, T.M.; ESTERHUYSE, D.J. (2008): Technical and economic evaluation of the utilization of solar energy at South Africa's SANAE IV base in Antarctica, in: Renewable Energy, Jg. 33, 2008, Heft 5, S. 1073-1084.	0,0%	58,3%	40,3%	32,5%
MCMONAGLE, R. (2006): The Environmental Attributes of Solar PV in the Canadian Context, 2006. Online im Internet: http://www.saaep.ca/EnvironmentalAttributesofSolarPV.pdf , Abruf: 07.10.2009, 13.30 Uhr.	64,3%	0,0%	33,1%	32,5%
BAUMANN, A.E.; HILL, R.; HYNES, K.M. (1997): Environmental impacts of PV systems-ground-based vs. BIPV, 1997, S. 1361-1364.	54,1%	0,0%	43,6%	32,0%
PERPINAN, O. u.a. (2009): Energy payback time of grid connected PV systems: Comparison between tracking and fixed systems. Ökobilanz von netzverbundenen Photovoltaik-Systemen: Vergleich zwischen nachgeführten und feststehenden Systemen, in: Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Jg. 17 (2009), 2009, Heft 2, S. 137-147.	25,2%	0,0%	75,8%	31,6%
NOUNI, M.R.; MULLICK, S.C.; KANDPAL, T.C. (2006): Photovoltaic projects for decentralized power supply in India: A financial evaluation, in: Energy Policy, Jg. 34, 2006, Heft 18, S. 3727-3738.	0,0%	58,3%	37,1%	31,6%
MÜLLER, A.; WAMBACH, K.; ALSEMA, E. (2006): Life cycle analysis of solar module recycling process, in: Proceedings of Materials Research Society Symposium, MRS Fall Meeting 2005, Nov 28-30, 2005, Boston, US. S. 89-94.	56,3%	0,0%	39,4%	31,5%
RAUGEI, M.; BARGIGLI, S.; ULGIATI, S. (2007): Life cycle assessment and energy pay-back time of advanced photovoltaic modules: CdTe and CIS compared to poly-Si, in: Energy, Jg. 32, 2007, Heft 8, S. 1310-1318.	56,8%	0,0%	38,7%	31,5%
HUBER, W.; KOLB, G. (1995): Life cycle analysis of silicon-based photovoltaic systems. Lebenszyklus-Analyse von photovoltaischen Systemen auf Siliziumbasis, in: Solar Energy, Jg. 54 (1995), 1995, Heft 3, S. 153-163.	54,1%	0,0%	40,2%	31,0%
KEOLEIAN, G.A.; LEWIS, G.M.D. (2003): Modeling the life cycle energy and environmental performance of amorphous silicon BIPV roofing in the US, in: Renewable Energy, Jg. 28, 2003, Heft 2, S. 271-293.	32,3%	0,0%	65,6%	31,0%

TALAVERA, D.; NOFUENTES, G.; AGUILERA, J. (2010): The internal rate of return of photovoltaic grid-connected systems: A comprehensive sensitivity analysis, in: Renewable Energy, Jg. 35, 2010, Heft 1, S. 101-111.	7,3%	50,0%	30,9%	29,3%
ERICKSON, J.D.; CHAPMAN, D. (1995): Photovoltaic technology: Markets, economics, and rural development, in: World Development, Jg. 23, 1995, Heft 7, S. 1129.	0,0%	41,7%	48,7%	29,2%
MAYER-SPOHN, O. u.a. (2007): Lebenszyklusanalyse ausgewählter stromerzeugungstechniken, stand 2005, Arbeitsbericht Nr. 1, Stuttgart, 2007.	50,0%	0,0%	35,8%	28,2%
RAUGEI, M.; FRANKL, P. (2009): Life cycle impacts and costs of photovoltaic systems: Current state of the art and future outlooks, in: Energy, Jg. 34, 2009, Heft 3, S. 392-399.	14,3%	25,0%	46,2%	27,6%
GAIDDON, B.; JEDLICZKA, M. (2006): Compared assessment of selected environmental indicators of photovoltaic electricity in OECD cities.2006, PVPS Task 10, PVPS Task 10, Activity 4.4, Report IEA-PVPS T10, 2006.	50,5%	0,0%	33,1%	27,6%
CRAWFORD, R.H. u.a. (2006): Life-cycle energy analysis of building integrated photovoltaic systems (BiPVs) with heat recovery unit, in: Renewable & Sustainable Energy Reviews, Jg. 10, 2006, Heft 6, S. 559-575.	25,2%	0,0%	62,0%	27,4%
ALSEMA, E.A.; NIEUWLAAR, E. (2000): Energy viability of photovoltaic systems, in: Energy Policy, Jg. 28, 2000, Heft 14, S. 999.	43,2%	0,0%	40,2%	27,2%
GÜRZENICH, D.; WAGNER, H.J. (2004): Cumulative energy demand and cumulative emissions of photovoltaics production in Europe, in: Energy, Jg. 29, 2004, Heft 12-15, S. 2297-2303.	39,6%	0,0%	44,2%	27,1%
AWERBUCH, S. (2000): Investing photovoltaics: Risk, accounting and the value of new technology, in: Energy Policy, Jg. 28, 2000, Heft 14, S. 1023.	0,0%	58,3%	22,0%	27,0%
FTHENAKIS, V.; ALSEMA, E. (2006): Photovoltaics energy payback times, greenhouse gas emissions and external costs: 2004-early 2005 status, in: Progress in Photovoltaics, Jg. 14, 2006, Heft 3, S. 275-280.	35,9%	8,3%	37,3%	26,7%
FRANKL, P. u.a. (1998): Simplified life-cycle analysis of PV systems in buildings: present situation and future trends, in: Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Jg. 6 (1998), 1998, Heft 2, S. 137-146.	43,2%	0,0%	38,0%	26,5%
PEHARZ, G.; DIMROTH, F. (2005): Energy payback time of the high-concentration PV system FLATCON(R), in: Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Jg. 13 (2005), 2005, Heft 7, S. 627-634.	25,2%	0,0%	58,5%	26,4%
REICH, N. u.a. (2007): CO 2 EMISSIONS OF PV IN THE PERSPECTIVE OF A RENEWABLE ENERGY ECONOMY, in: Proceedings of 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference, 3-7 September 2007, Milan, Italy.	18,0%	0,0%	66,7%	26,3%

ALSEMA, E. (1998): Energy requirements and CO2 mitigation potential of PV systems, in: Photovoltaics and the Environment, 1998,	43,2%	0,0%	34,9%	25,6%
KOLHE, M.; KOLHE, S.; JOSHI, J.C. (2002): Economic viability of stand-alone solar photovoltaic system in comparison with diesel-powered system for India, in: Energy Economics, Jg. 24, 2002, Heft 2, S. 155.	0,0%	41,7%	36,2%	25,5%
CLAVADETSCHER, L.; NORDMANN, T.; International Energy Agency (IEA) (Hrsg.) (2007): Cost and performance trends in grid-connected photovoltaic systems and case studies. IEA PVPS task 2. IEA PVPS T2-06:2007, 2007.	7,3%	25,0%	46,0%	25,1%
KRAUTER, S.; RÜTHER, R. (2004): Considerations for the calculation of greenhouse gas reduction by photovoltaic solar energy, in: Renewable Energy, Jg. 29, 2004, Heft 3, S. 345-355.	46,8%	0,0%	28,4%	24,9%
FTHENAKIS, V.M.; KIM, H.C. (2007): Greenhouse-gas emissions from solar electric- and nuclear power: a life cycle study, in: Energy Policy, Jg. 35, Heft 4, S. 2549-2557.	28,6%	0,0%	49,3%	24,8%
KATO, K.; MURATA, A.; SAKUTA, K. (1997): An evaluation on the life cycle of photovoltaic energy system considering production energy of off-grade silicon, in: Solar Energy Materials and Solar Cells, Jg. 47 (1997), 1997, Heft 1-4, S. 95-100.	39,6%	0,0%	34,2%	24,1%
MATHUR, J.; BANSAL, N.K.; WAGNER, H.J. (2002): Energy and environmental correlation for renewable energy systems in India, in: Energy Sources, Jg. 24 (2002), 2002, Heft 1, S. 19-26.	35,9%	0,0%	38,0%	24,0%
TAHARA, K.; KOJIMA, T.; INABA, A. (1997): Evaluation of CO2 payback time of power plants by LCA, in: Energy Conversion and Management, Jg. 38, 1997, Heft Supplement 1, S. S615-S620.	28,9%	0,0%	46,2%	24,0%
SAMPATTAGUL, S. u.a. Evaluation of Environmental Impacts of Polycrystalline Silicon Solar Cell PP. by Using LCA Aspect, Online im Internet: http://www.lcacenter.org/InLCA2006/Sampattagul-presentation.pdf , Abruf: 29.10.2009, 09.00 Uhr.	41,7%	0,0%	30,5%	23,8%
FTHENAKIS, V.; KIM, H. (2006): Quantifying the Life-Cycle Environmental Profile of Photovoltaics and Comparisons with Other Electricity-Generating Technologies, in: Proceedings of Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion,	35,9%	0,0%	36,9%	23,6%
GILAU, A.M.; VAN BUSKIRK, R.; SMALL, M.J. (2007): Enabling optimal energy options under the Clean Development Mechanism, in: Energy Policy, Jg. 35, 2007, Heft 11, S. 5526-5534.	14,3%	33,3%	22,9%	23,5%
FTHENAKIS, V.M.; HYUNG, C.K.; ALSEMA, E. (2008): Emissions from Photovoltaic Life Cycles, in: Environmental science & technology, Jg. 42, 2008, Heft 6, S. 2168-2174.	25,2%	0,0%	48,9%	23,5%
FTHENAKIS, V.; WANG, W.; KIM, H.C. (2009): Life cycle inventory analysis of the production of metals used in photovoltaics, in: Renewable & Sustainable Energy Reviews, Jg. 13, 2009, Heft 3, S. 493-517.	39,6%	0,0%	31,8%	23,4%

KOLHE, M. (2009): Techno-Economic Optimum Sizing of a Stand-Alone Solar Photovoltaic System, in: IEEE Transactions on Energy Conversion, Jg. 24, 2009, Heft 2, S. 511-519.	0,0%	41,7%	26,7%	22,6%
KATO, K. u.a. (2001): A life-cycle analysis on thin-film CdS/CdTe PV modules, in: Solar Energy Materials and Solar Cells, Jg. 67, 2001, Heft 1-4, S. 279-287.	39,6%	0,0%	29,1%	22,6%
RICHARDS, B.S.; WATT, M.E. (2007): Permanently dispelling a myth of photovoltaics via the adoption of a new net energy indicator, in: Renewable and Sustainable Energy Reviews, Jg. 11, 2007, Heft 1, S. 162-172.	28,9%	0,0%	41,1%	22,5%
TRIEB, F.; LANGNISS, O.; KLAISS, H. (1997): Solar electricity generation-a comparative view of technologies, costs and environmental impact. Solare Elektrizitätserzeugung - eine vergleichende Analyse der Technologien, Kosten und Umweltfaktoren, in: Solar Energy, Jg. 59 (1997), 1997, Heft 1-3, S. 89-99.	18,0%	25,0%	24,7%	22,4%
GAGNON, L.; BÉLANGER, C.; UCHIYAMA, Y. (2002): Life-cycle assessment of electricity generation options: The status of research in year 2001, in: Energy Policy, Jg. 30, 2002, Heft 14, S. 1267-1278.	46,4%	0,0%	17,1%	21,4%
HONDO, H. (2005): Life cycle GHG emission analysis of power generation systems: Japanese case, in: Energy, Jg. 30, 2005, Heft 11-12, S. 2042-2056.	21,6%	0,0%	44,3%	20,8%
FTHENAKIS, V.M.; KIM, H.C. (2007): Cu(InGa)Se ₂ Thin Film Solar Cells: comparative Life Cycle Analysis of Buffer Layers, in: Proceedings of 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference, 3-7 September 2007, Milan.	25,5%	0,0%	38,5%	20,5%
KNAPP, K.; JESTER, T. (2001): Empirical investigation of the energy payback time for photovoltaic modules, in: Solar Energy, Jg. 71 (2001), 2001, Heft 3, S. 165-172.	25,2%	0,0%	36,0%	19,6%
FTHENAKIS, V.M.; KIM, H.C. (2007): CdTe photovoltaics: Life cycle environmental profile and comparisons, in: Thin Solid Films, Jg. 515, 2007, Heft 15, S. 5961-5963.	18,2%	0,0%	41,1%	18,7%
FTHENAKIS-VASILIS, M. (2004): Environmental life cycle assessment of cadmium telluride solar cells: Cd emissions. Bewertung der Umweltbelastung durch den Lebenszyklus von Cadmiumtellurid-Solarzellen: Cd-Emissionen, in: Proceedings of 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Vol. 2., Jun 7-11, 2004, Paris, FR. S. 2166-2169.	18,2%	0,0%	34,9%	16,8%
YAMASHITA, N. u.a. (2008): An Environmental Potential of PV systems and Greening by Utilizing the Ecological Footprint, in: Forest, Jg. 31, 2008, Heft 48.7, S. 3.57.	17,7%	0,0%	31,6%	15,7%
FTHENAKIS, V.; KIM, H.C. (2009): Land use and electricity generation: A life-cycle analysis, in: Renewable & Sustainable Energy Reviews, Jg. 13, 2009, Heft 6, S. 1465-1474.	3,4%	0,0%	47,6%	15,5%

A 17 Inhaltsanalyse: vollständige Code-Liste²⁶²

0.1_Autoren	1.3.2.1a_Embodied CO2	2.8.6_Ausw_weitere Indikatoren
0.2.1_Veröff_Jahr	1.3.2.1a_Klass_Air emissions	2.8.7_Ausw_LCC
0.2.2_Veröff_Ort	1.3.2.1b_Klass_Energy	2.9.1_Datenherkunft
0.3_Titel	1.3.2.1c_Ecotox	2.9.2_Datenqualität
0.4_Urspr Ersteller	1.3.2.2_Klass_OzoneDepl	2_Basisjahr (106)
0.5_Ursprung Daten	1.3.2.3_Klass_Acid	2_cost categories
0.6_Zugänglichkeit	1.3.2.4_Klass_Eutr	2_COSTS_Ausnahmen
0.7_Referenzstudien	1.3.2.5_Klass_Smog	2_costs_future
0.8.1_UN_Zulieferer	1.3.2.6_Klass_TerrTox	2_Costs_methode
0.8.2_UN_Hersteller	1.3.2.7_Klass_Aqu_fresh	2_costs_structure_allg
0.8.3_UN_Kunden	1.3.2.8_Klass_Aqu_marine	2_costs_structure_elemente
0.8.4_UN_Services	1.3.2.9_Klass_Human	2_costs_structure_phasen
0.8.5_UN_EoL	1.3.3.1a_WirkInd_GlobWarm_other	2_Feststellungen
0.9.1_Methode_LCA	1.3.4.1a_Charakt_Acid_AP	2_Gewichtung
0.9.2_Methode_LCC	1.3.4.1a_Charakt_Acid_other	2_Haupteinfl_ProzSchr
0.9.3_Methode_mathematisch	1.3.4.1a_Charakt_Aqu_fresh_oher	2_Haupteinfluss_Capital Costs
0.9.4_Methode_other	1.3.4.1a_Charakt_Aqu_marine_oher	2_Haupteinfluss_Costs_Material
1.1.01.1_Studie_Art	1.3.4.1a_Charakt_Eutr_EP	2_Haupteinfluss_sonst
1.1.01.2_Studie_Einbezug andere Technologien/Alternativen	1.3.4.1a_Charakt_Eutr_other	2_Haupteinfluss_Wirkungsgrad
1.1.01.3_Studie_Ziel	1.3.4.1a_Charakt_GlobWarm_GWP	2_Methode_sonst
1.1.01.4_Studie_Anlass	1.3.4.1a_Charakt_GlobWarm_other	2_Net Cash Flow
1.1.01.5_Studie_Zielgruppe	1.3.4.1a_Charakt_Human_other	3 Entsorgung
1.1.01.6_Studie_Regelwerk	1.3.4.1a_Charakt_KEA	3 EoL
1.1.02_Approach	1.3.4.1a_Charakt_Land_other	3 Recycling
1.1.03_Techn_a-Si	1.3.4.1a_Charakt_Land_SolWaste	3 Recycling_Metals
1.1.03_Techn_CdS/CdTe	1.3.4.1a_Charakt_OzoneDepl_ODP	3_Entsorgung_shreddering
1.1.03_Techn_CdTe	1.3.4.1a_Charakt_OzoneDepl_other	3_EoL_Metal
1.1.03_Techn_CIGS	1.3.4.1a_Charakt_Resource_other	3_EoL_options
	1.3.4.1a_Charakt_Smog_other	3_EoL_reasons

²⁶² Auf den Anhang einer vollständigen Liste inklusive Codebeschreibung wurde aufgrund des sehr großen Umfangs verzichtet, siehe hierfür die beigefügten Dateien.

1.1.03_Techn_CIS	1.3.4.1a_Charakt_TerrTox	3_EoL_Trapo
1.1.03_Techn_DSC	_other	3_EoL_Zukunft
1.1.03_Techn_GaAs	1.3.4.1a_Charakt_Water_other2	3_Feststellungen
1.1.03_Techn_GaInP/GaAs	1.3.4.1x_Erg_Acid_AP	3_Legal_situation
1.1.03_Techn_hcPV(high concentration)	1.3.4.1x_Erg_Eutro_EP	3_Recycl_costs
1.1.03_Techn_InGaP	1.3.4.1x_Erg_GWP	3_Recycl_glass
1.1.03_Techn_InGaP/mc-Si	1.3.4.1x_Erg_Human	3_Recycl_Module
1.1.03_Techn_organic	1.3.4.1x_Erg_KEA	3_Recycling_during_Production
1.1.03_Techn_pc-Si	1.3.4.1x_Erg_Materialaufwand	3_Recycling_Silicon
1.1.03_Techn_Polymer	1.3.5.1a_Norm_Acid_AP	3_Recycling_storage_devices
1.1.03_Techn_PV	1.3.5.1a_Norm_Acid_other	3_Reuse
1.1.03_Techn_ribbon	1.3.5.1a_Norm_Aqu_fresh_oher	4.1_Lebenszyklusmodell
1.1.03_Techn_sc-Si	1.3.5.1a_Norm_Aqu_marine_oher	4.2.1_R&D_allgemein
1.1.03_Techn_tandem	1.3.5.1a_Norm_Eutr_EP	4.2.10_Phasen_Maintenance/Repair /Services
1.1.03_Techn_Thin film	1.3.5.1a_Norm_Eutr_other	4.2.12_EoL_decommissioning
1.1.03_Techn_triple	1.3.5.1a_Norm_GlobWarm_GWP	4.2.13_EoL_Recycling
1.1.03_Technologie	1.3.5.1a_Norm_GlobWarm_other	4.2.14_Phasen_EoL_disposal
1.1.03a_Techn_Umfang	1.3.5.1a_Norm_Human_other	4.2.14a_Phasen_EoL
1.1.03b_Techn_installation (Application)	1.3.5.1a_Norm_OzoneDepl_ODP	4.2.15_Phasen_Ausnahmen
1.1.04.1_Abstrah_Techn	1.3.5.1a_Norm_OzoneDepl_other	4.2.2_Phasen_Pre_RohstGewinnung
1.1.04.2_Abstrah_konkrete Anlage	1.3.5.1a_Norm_Resource_other	4.2.4_Phasen_Production
1.1.05_Produktsystem_Standort	1.3.5.1a_Norm_Smog_other	4.2.4a_Phasen_Prod_RohstBearb
1.1.06.1_Param_Wirkungsgrad_worst	1.3.5.1a_Norm_TerrTox_other	4.2.4b_Phasen_Prod_Wafer-Fe
1.1.06.1a_Param_Wirkungsgrad_worst_Zelle	1.3.9_Indikator_Eco_Load	4.2.4c_Phasen_Prod_Zellen-Fe
1.1.06.1b_Param_Wirkungsgrad_worst_Modul	1.3_Charakt_EcoTox	4.2.4d_Phasen_Prod_Modul-Fe
1.1.06.2_Param_Wirkungsgrad_base	1.3_Gesamtbewertung	4.2.5a_Phasen_Constr. (Prod enthalten oder nur Inst?)
1.1.06.2a_Param_Wirkungsgrad_base_Zelle	1.3_LCIA_Berechnung	4.2.5b_Phasen_Installation(116)
1.1.06.2b_Param_Wirkungsgrad_base	1.3_LCIA_Charakt	4.2.9_Phasen_Use
	1.3_LCIA_Charakt_Elemente	4.4.1_User
	1.3_LCIA_Charakt_phasenweise	4.4_Perspektiven
	1.3_LCIA_Gew	
	1.3_LCIA_Klass	

e_Modul	1.3_LCIA_Norm	4_Phasen
1.1.06.2c_Param_Performance ratio	1.3_LCIA_Norm_Elemente	4_Phasen_Transport
1.1.06.3_Param_Wirkungsgrad_best	1.3_LCIA_Ordnen	5.1_DataQ-Goals
1.1.06.3a_Param_Wirkungsgrad_bes t_Zelle	1.4.1.1a_Amort_verbal_EPBT	5.2_DataQ-Indicators
1.1.06.3b_Param_Wirkungsgrad_bes t_Modul	1.4.1.1b_Amort_verbal_CO2PBT	5.3.1_DatSammlung_Verfahren
1.1.06.3c_Param_WirkGrad_BOS (31)	1.4.1.2a_Amort_Berechn_EPBT	5.3.2._Software
1.1.06_Param_shading	1.4.1.2b_Amort_Berechn_CO2PBT	5.3.3_Datenbanken
1.1.07.1_Param_Fläche	1.4.1.3a_Amort_Wert_EPBT	5.3.4_DatSammlung_primär
1.1.07.2_Param_erzeugter Strom	1.4.1.3b_Amort_Wert_CO2PBT	5.3.5_DatSammlung_sekundär
1.1.07.2b_Param_LeistungPeak	1.4.1.3c_Amort_Wert_weitere PBT	5.4.1_Quellen_intern
1.1.07.3_Param_Lebensdauer_base	1.4.1.4_Indikat_LCCO2_verbal	5.4.2_Quellen_öffentlich
1.1.07.3a_Param_Lebensdauer_wors t	1.4.1.4b_Indikat_LCCO2_Berechnun g	5.4.3_Quellen_Schätzungen
1.1.07.3b_Param_Lebensdauer_best	1.4.1.4c_Indikat_LCCO2_Wert	5.4.4_Datenherkunft_allg
1.1.07.3b_Param_Lebensdauer_Komp onenten	1.4.1.6_Indik_Material Intensity	5.5_KritPrüf
1.1.07.4_Param_Irradiation	1.4.1.7_Indik_transformity	5.6_PedigreeMatrix
1.1.07.5_Param_weitere	1.4.1.8_Indikat_electricity production efficiency	5.7.1_Unsich_Datenlücken
1.1.07.5a_Param_losses	1.4.1.8a_Energy payback ratio (86)	5.7.2_Unsich_Repräsent
1.1.07.5a_Param_Volllaststunden(130)	1.4.1.8b_Indikat_Net Energy balance	5.7.3_Unsich_Schwank/Ungenau/Mes sfehl
1.1.07.5b_Param_degradadtion(93)	1.4.1.8c_Indikat_Net energy Ratio (NER)	5.7.3a_Unsich_Stat
1.1.07.5c_Param_Failure	1.4.1.8d_Indikat_Energy Return Factor	5.7.4_Sensi_Consumer behavior
1.1.07.6_Param_Load	1.4.1.8e_Indikat_Energy Return on Investment	5.7.4_Sensi_Datenlücken/Annahmen
1.1.07.7_Param_production scale(83)	1.4.1.8f_Indikat_GHG Payback Time	5.7.4_Sensi_Econom_interest
1.1.08_Storage	1.4.1.8g_Indikat_GHG RoI	5.7.4_Sensi_Energiemix
1.1.08a_Storage_NEIN	1.4.1.8h_Indikat_required life- time	5.7.4_Sensi_Energy_consumption
1.1.09_Back-up-Technologien	1.4.1.9_Indikat_LC conversion efficiency	5.7.4_Sensi_Freiflächenanteil
1.1.09a_Backup-NEIN		5.7.4_Sensi_irradiation
		5.7.4_Sensi_Lebensdauer
		5.7.4_Sensi_Lebensdauer_Komponen ten
		5.7.4_Sensi_Location

1.1.10_FU	1.4.1.9a_Indikat/Param_Energy	5.7.4_Sensi_Material
1.1.10a_FU_kWh	Yield	5.7.4_Sensi_Performance ratio
1.1.10b_FU_W	1.4.1.9b_Indikat_Emission coef-	5.7.4_Sensi_production sca-
1.1.10c_FU_kg	ficient	le(113)
1.1.10d_FU_m2	1.4.2.1_Haupteinfluss_Phasen/Pro	5.7.4_Sensi_ProzSchr
1.1.10e_FU_module/System	z	5.7.4_Sensi_Rahmen
1.1.10f_FU_Zeit	1.4.2.2_Haupteinfluss_Mat	5.7.4_Sensi_Recycling
1.1.10g_FU_Wafer	1.4.2.3_Haupteinfluss_techn	5.7.4_Sensi_Temperatur
1.1.10h_FU-Cell	1.4.2.3b_Haupteinfluss_techn_Wir	5.7.4_Sensi_Wirkungsgrad(ab62)
1.1.10i_FU_Vorprodukte	kungsgrad	5.7.4_Sensi_Wirkungsgrad(ab62)
1.1.11_Komponenten	1.4.2.4_Haupteinfluss_Lebensdaue	5.7.5_Sensi_Cost_Damage Costs
1.1.12_Komponenten_Ausnahmen	r	5.7.5_Sensi_Cost_Discounting
1.1.13.0_ProzBeschr	1.4.2.5_Haupteinfluss_Energie	5.7.5_Sensi_Cost_interest
1.1.13.1_ProzSchr_Rohstoffgewinn	1.4.2.5a_Haupteinfluss_Energie_M	5.7.5_Sensi_Cost_Price/Wp
ung	ix	5.7.5_Sensi_Cost_Selling Price
1.1.13.1a_ProzSchr_Rohstoffbearb	1.4.2.6_Haupteinfluss_sonst	5.7.5_Sensi_Cost_Subsidy
1.1.13.1b_ProzSchr_ZulieferVorpr	1.4.2.7_Einfluss BOS(155)	5.7.5_Sensi_Cost_weitere
od	1.4.3_Zielerreichung	5.8.1_Check_Vollständ
1.1.13.2_ProzSchr_Waferprod	1.4.4_Schlussfolgerungen	5.8.2_Check_Sensit
1.1.13.3_ProzSchr_Zellen-Fe	1.4.5_Widersprüche	5.8.2a_Check_Regression
1.1.13.4_ProzSchr_Modulfertigung	1.4.6_Einschränkungen	5.8.3_Check_Konsistenz
1.1.13.5_ProzSchr_Inst vor Ort	1.4.7_Empfehlungen	5_szenarien
1.1.13.6_ProzSchr_Rückbau	1.4.8_Folgemaßnahmen	6 Einflüsse allg
1.1.13.6a_ProzSchr_Recycling	1.4_Avoided Emissions	6 Einflüsse_battery system
1.1.13.7_ProzSchr_weitere	1.4_Indikator_General Sustaina-	6 Ergebnis allg
1.1.13.8_ProzSchr_Ausnahmen	bility Index	6 Hebel erzeugte Energie
1.1.14_SystGr_weitere Annahmen	1.4_replaced energy	6 hindrance_availability solar
1.1.15.1_cradle to GRAVE	2 installation	power
1.1.15.2_cradle to GATE	2 Klassifizierung	6 hindrance_reliability
1.2.3.1_Input_Rohstoffe	2 tax	6 LCA Ergebnis
1.2.3.10_Input_Öl	2.11.1_Einflüsse_irradiation	6 major hindrance_spec inv costs
1.2.3.10a_Input_FossilFuels	2.12_Ausw_IRR	6 solutions
	2.12_Ausw_Net present Value	7 Referenzen
	2.2.1_producer_R&D	

1.2.3.11_Input_Land	2.2.10_producer_maintenance and repair	8
1.2.3.1a_Input_recycled feeds-tock	2.2.11_producer_liability	8.1_Methode_Vgl
1.2.3.1a_Input_Rohstoffe_Teilprozess	2.2.12_producer_taxes	8_Bewertung_Energy
1.2.3.1b_Input_Vorprodukte	2.2.13_producer_subsidies	8_Bewertung_Manufact
1.2.3.2_Input_Hilfsstoffe	2.2.14_producer_environment	8_Bewertung_Methode
1.2.3.3_Input_Betriebstoffe	2.2.15_producer_overhead	8_Bewertung_Techn
1.2.3.4_Input_Verpackung	2.2.16_producer_revenue	8_BOS
1.2.3.5_Input_Wasser	2.2.17_Preis_Modul	8_con (PV)
1.2.3.6_Input_Luft	2.2.18_producer_manufacturing costs	8_Cost_Meth_Kritik
1.2.3.7_Input_Strom	2.2.18a_producer_manu_costs_processes	8_costs_review_feed in etc politics
1.2.3.7a_Input_Energie_gesamt_(K EA)	2.2.2_producer_purchased components	8_critical issues LCA
1.2.3.7a_Input_Strom_Teilprozess	2.2.2a_BOS(105)	8_future
1.2.3.7b_Input_Energie_Teilprozess_PER	2.2.3_producer_materials	8_History
1.2.3.8_Input_Energiemix	2.2.4_producer_energy	8_Indikatoren
1.2.3.9_Input_Gas	2.2.5_producer_machines	8_installation
1.2.4.01_Output_Produnkte	2.2.5a_producer_facilities/capital investment	8_Kritik allgemein
1.2.4.01a_Output_Produnkte/Kuppel_Teilproz	2.2.5b_producer_depreciation	8_LCA_con
1.2.4.02_Output_Kuppelprodukte	2.2.6_producer_labor	8_LCA_pro
1.2.4.03_Output_Abfälle_Sonder	2.2.7_producer_waste management	8_Main_Producers
1.2.4.04_Output_Abfälle_recycled	2.2.8_producer_emission controls	8_pro (PV)
1.2.4.05_Output_Abfälle_Rest	2.2.9_producer_transport	8_PV hot spots
1.2.4.06_Output_Emiss_CO2	2.3.0_user_capital	8_Silicon
1.2.4.06a_Output_Emiss_CO2_Teilprozess	2.3.0a_generation costs_Berechnung	8_standard test conditions
1.2.4.07_Output_Emiss_CO	2.3.0a_generation costs_Wert	8_Studienvergleich
1.2.4.08_Output_Emiss_NOx	2.3.0a_user_capital_elementweise	8_Studienvgl_Erklärung Unterschiede
1.2.4.09_Output_Emiss_Particles	2.3.0b_user_total systems costs	8_Tech
1.2.4.10_Output_Emiss_CH4	2.3.0c_LCOE	8_trade offs
1.2.4.11_Output_NMVOc	2.3.0d_LCOE_levelization	PRFG_1.3 Emissionen berechnung
		PRFG_1.3 Wirkung gesamt
		PRFG_1.3.1.1_Schritte_Klassifizierung

1.2.4.12_Output_Emiss_SOx	rate/charge	PRFG_1.3.2.1_Schritte_Charakteri
1.2.4.13_Output_Emiss_nach Pha- sen	2.3.0e_user_energy cost figure of merit	sierung PRFG_1.4 Einflüsse
1.2.4.14_Output_Emiss_weitere	2.3.1_user_purchase of prod- uct/investment	PRFG_4 perspective_user
1.2.4.14a_Output_Emissionen_DIRE KT (125)	2.3.10_user_taxes	
1.2.4.15_Output_Emiss_Abwärme	2.3.1a_user_Abschr	
1.2.4.16_Output_Abwass_behandelt	2.3.1a_user_Cash flow	
1.2.4.17_Output_Abwass_unbehande lt	2.3.1a_user_installation 2.3.1a_user_investment_component	
1.2.4.18_Output_Abwass_weiterver w	en 2.3.1b_user_subsidies/incentives	
1.2.4.19_Output_Energie_wiederge wonnen	2.3.2_user_energy 2.3.2_user_Unterteilung_fix/var	
1.2.4.20_Output_Energie_Verluste	2.3.2a_user_land use	
1.2.4.21_Output_Lärm	2.3.2a_user_operation_allg	
1.2.4.21_Output_Slag	2.3.2b_user_transmission/distrib	
1.2.5.1_Daten_LCI_regional	ution	
1.2.5.2_Daten_LCI_zeitlich	2.3.3_user_material	
1.2.5.3_Daten_LCI_keine konkre- ten Werte	2.3.4_user_maintenance 2.3.4a_user_insurance(109)	
1.2.5.3a_LCI_aggregiert	2.3.4a_user_transaction	
1.2.6.1_Trapo_Vorkette	2.3.4b_user_O&M_escalation	
1.2.6.2_Trapo_Produktion	2.3.4c_user_backup	
1.2.6.3_Trapo_Distribution	2.3.5_user_labor	
1.2.6.4_Trapo_disposal	2.3.5b_user_repair&replacement	
1.2.8_Ausschuss	2.3.6_user_disassembly	
1.2.9_Allokationen	2.3.7_user_disposal	
1.2_Avoided material	2.3.7a_user_salvage	
1.2_Detail_Komponenten(64)	2.3.8_user_revenue	
1.2_Detail_phasenweise	2.3.8a_user_revenue_price/feed	
1.2_LCI_Ausnahmen	in tariff	
1.2_LCI_infrastructure	2.3.8b_user_electricity	
1.2_LCI_Methode(ab 62)	costs/avoided	

1.3.0_IA_phasenweise	2.3.9_user_transport
1.3.0_Wirkabsch_komponentenweise (ab43)	2.3_user_capital
1.3.1_WirkAbsch_Methode	2.4_EoL
1.3.1_WirkAbsch_Schritt_Ausnahme	2.6.1_Env_avoided damage cost
n	2.6.1_EnvCosts_external
1.3.2.0_WirkKat_Ausnahmen	2.6.2_EnvCosts_internal
1.3.2.0a_Indikat__Ecological Footprint	2.6.3_EnvCosts_to be interna- lized
1.3.2.0b_Indikat__biocapacity	2.6.4_EnvCosts_Monetarisierung
1.3.2.1_Klass_GlobWarm	2.6.4a_EnvCosts_ReducingCO2
1.3.2.10_Klass_Resource	2.6.5_EnvCosts_UmweltbezRevenue
1.3.2.11_Klass_Land	2.6.6_SocialCosts
1.3.2.12_Klass_Water	2.7.1_Meth_Risiko
1.3.2.13_Klass_Visual impacts	2.7.10_Meth_learning curve
	2.7.11_Meth_full cost pricing
	2.7.2_Meth_Unsicherheiten
	2.7.3_Meth_Szenarien
	2.7.4_Meth_Analyse
	2.7.5_Meth_Discounting
	2.7.6_Meth_Discounttrate
	2.7.6a_discount_risks
	2.7.6b_Meth_charge rates
	2.7.6c_Meth_profitability
	2.7.6d_Meth_portfolio
	2.7.7_Meth_Zinssätze
	2.7.7a_Inflation
	2.7.8_Meth_Renditeziel
	2.7.9_Meth_weitere
	2.8.1_Ausw_Vorteilhaftigkeit
	2.8.2_Ausw_Rendite
	2.8.3_Ausw_Amortisationszeit
	2.8.4_Ausw_Break-Even

	2.8.4a_Ausw_monetary payback	
	2.8.5_Ausw_DCF-Ergebnis	

Literatur

- ALSEMA, E. u.a. (2009a): Methodology guidelines on life cycle assessment of photovoltaic electricity, IEA-PVPS T12-01:2009, 2009a.
- ALSEMA, E. u.a. (2009b): Methodology guidelines on life cycle assessment of photovoltaic electricity, 2009b,
- ALSEMA, E.A.; DE WILD-SCHOLTEN, M.; MOLENBROECK, E. (2003): Duurzaamheid van fotovoltaïsche systemen op basis van geavanceerde silicium technologie, Utrecht, 2003.
- ALSEMA, E.A.; DE WILD-SCHOLTEN, M.J. (2005): The real environmental impacts of crystalline silicon PV modules: an analysis based on up-to-date manufacturers data, in: Proceedings of 20 th European PV Solar Conference, Barcelona.
- AMIN, M.; MABE, M.A. (2003): Impact factors: use and abuse, in: Medicina [Buenos Aires], Jg. 63, 2003, S. 347-354.
- ANSELM, V.(2008): Auswirkung der Erfahrungskurve auf die Preisgestaltung, GRIN Verlag, 2008.
- ARCHER, M.D.(2001): The Past and Present. In: Archer, M.D.; HILL, R. (Hrsg.): Clean Energy from Photovoltaics, Imperial College Press, London 2001. S. 1-32.
- ATTESLANDER, P.; CROMM, J.(2003): Methoden der empirischen Sozialforschung: 10, Walter De Gruyter Inc, 2003.
- BACK-HOCK, A.(1988): Lebenszyklusorientiertes Produktcontrolling : Ansätze zur computergestützten Realisierung mit e. Rechnungswesen-Daten- u. -Methodenbank, 1988.
- BACK-HOCK, A.(1992): Produktlebenszyklusorientierte Ergebnisrechnung. In: Männel, W. (Hrsg.): Handbuch Kostenrechnung, Gabler, Wiesbaden 1992.
- BATTISTI, R.; CORRADO, A. (2005): Evaluation of technical improvements of photovoltaic systems through life cycle assessment methodology, in: Energy, Jg. 30, 2005, Heft 7, S. 952-967.
- BAUM, H.; COENENBERG, A.G.; GÜNTHER, T.(2004): Strategisches Controlling, 3., überarb. und erw. Aufl. Aufl., Schäffer-Poeschel, Stuttgart 2004.
- BAUM, H.; COENENBERG, A.G.; GÜNTHER, T.(2007): Strategisches Controlling, 4., überarb Aufl. Aufl., Schäffer-Poeschel, Stuttgart 2007.
- BERELSON, B.(1952): Content analysis in communication research, Free Press, Glencoe, Ill. 1952.
- BLANCHARD, B.S.(1978): Design and manage to life cycle cost, M/A Press, Portland, Or. 1978.
- BOGUSKI, T.K. u.a. (1996): LCA Methodology. In: Curran, M.A. (Hrsg.): Environmental life-cycle assessment, McGraw-Hill, New York, NY u.a. 1996. S. 2.1-2.37.
- BOS, W.; TARNAL, C.(1996): Computerunterstützte Inhaltsanalyse in den empirischen Sozialwissenschaften: Theorie, Anwendung, Software, Waxmann Verlag, 1996.

BRIEM, S. u.a. (2004): Lebenszyklusanalysen ausgewählter zukünftiger Stromerzeugungstechniken. Ein Forschungsvorhaben mit finanzieller Unterstützung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit, in: bmb+f. Bundesministerium für Bildung und Forschung, Forschungsberichte, 2004, S. 1-348.

BURSCHEL, C.; LOSEN, D.; WIENDL, A. (2004): Betriebswirtschaftslehre der nachhaltigen Unternehmung, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2004.

BURSTEIN, M. (1988): Life-cycle costing, in: Proceedings of National Association of Accountants (NAA)'s conference: Cost accounting for the '90s: Responding to Technological Change, Montvale. S. 257-271.

BUZAN, T.; BUZAN, B. (2006): The mind map book, BBC, 2006.

CELIK, A.N.; MUNEER, T.; CLARKE, P. (2008): Optimal sizing and life cycle assessment of residential photovoltaic energy systems with battery storage. Optimale Auslegung und Lebenszyklusbewertung von Haus- Photovoltaikanlagen mit Batteriespeicherung, in: Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Jg. 16 (2008), 2008, Heft 1, S. 69-85.

CHAUREY, A.; GUEYE, M.K.; BABU, N.Y. (2003): Financing Renewable Energy in India: A Review of Mechanisms in Wind and Solar Applications, in: International Review for Environmental Strategies, Jg. 4, 2003, Heft 2, S. 249-263.

CHIRAS, D.; ARAM, R.C.O.N.; NELSON, K. (2009): Power from the Sun: A Practical Guide to Solar Electricity, New Society Pub, 2009.

CLAVADETSCHER, L.; NORDMANN, T.; International Energy Agency (IEA) (Hrsg.) (2007): Cost and performance trends in grid-connected photovoltaic systems and case studies. IEA PVPS task 2. IEA PVPS T2-06:2007, 2007.

CORPORATE SOCIAL RESPONSIBILITY EUROPE (CSR EUROPE); (2009): The European business network for CSR. Online im Internet. <http://www.csreurope.org/>, Abruf: 25.11.2009, 17.20 Uhr.

CRYSTALCLEAR; CrystalClear - The next Generation in crystalline silicon technology. Online im Internet. <http://www.ipcrystalclear.info/>,

DE WILD-SCHOLTEN, M.J.; ALSEMA, E.A. (2007): Environmental life cycle inventory of crystalline silicon photovoltaic module production, Status 2005/2006, including EXCEL-File. Complemented by Environmental life cycle inventory of crystalline silicon photovoltaic module production, proceedings of Materials Research Society Symposium, Warrendale, PA (2006, Materials Research Society and EXCEL File 2004. Warrendale, Pa.; Materials Research Society; 1999, 2007.

DE WILD-SCHOLTEN, M.J.; ALSEMA, E. (2007): Environmental life cycle inventory of crystalline silicon photovoltaic module production_EXCEL File. Status 2005/2006, S. 59.

DEPPE, J. (1997): Die Literaturrecherche: Kein Buch mit sieben Siegeln, Teil 1, in: Das Wirtschaftsstudium, Jg. 26, 1997, Heft 1, S. 24-25.

DEPPE, J. (1997): Die Literaturrecherche: Kein Buch mit sieben Siegeln, Teil 2, in: Das Wirtschaftsstudium, Jg. 26, 1997, Heft 2, S. 108-110.

DER MINASSIANS, A. u.a. (2006): Energy payback time of a SolFocus Gen1 concentrator PV system, MSE-ER C226 - Photovoltaic Materials Modern Technologies in the Context of a Growing Renewable Energy Market. Final Project Report December 7, 2006, 2006.

DEWULF, J.; VAN LANGENHOVE, H.(2007): Renewables-based technology.

sustainability assessment, John Wiley & Sons, 2007.

DIN EN ISO 14040:2006: Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006) ; deutsche und englische Fassung EN ISO 14040:2006 = Environmental management - life cycle assessment - principles and framework (ISO 14040:2006) ; german and english version EN ISO 14040:2006 = Management environnemental - analyse du cycle de vie - principes et cadre (ISO 14040:2006) ; version allemande et anglaise EN ISO 14040:2006, (2006): Beuth, Berlin 2006.

DIN EN ISO 14044:2006: Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006) ; deutsche und englische Fassung EN ISO 14044:2006 = Environmental management - life cycle assessment - requirements and guidelines (ISO 14044:2006) ; german and english version EN ISO 14044:2006 = Management environnemental - analyse du cycle de vie - exigences et lignes directrices (ISO 14044:2006) ; version allemande et anglaise EN ISO 14044:2006, (2006): Beuth, Berlin 2006.

DITTMANN, A. u.a. (1998): Energiewirtschaft, Vieweg Teubner Verlag, 1998.

EBERT, V.(2009): Denken Sie selbst! Sonst tun es andere für Sie, 12 Aufl, Orig-Ausg. Aufl., Rowohlt, Reinbek bei Hamburg 2009.

ECLIPSE. Online im Internet. <http://www.eclipse-eu.org/summary.html>,

EKVALL, T. (2002): Limitations of Consequential LCA, in: Proceedings of InLCA/LCM 2002 E-Conference, May 20-25 2002,

EKVALL, T.; WEIDEMA, B.P. (2004): System boundaries and input data in consequential life cycle inventory analysis, in: The International Journal of Life Cycle Assessment, Jg. 9, 2004, Heft 3, S. 161-171.

EL-KORDY, M.N. u.a. (2002): Economical evaluation of electricity generation considering externalities, in: Renewable Energy, Jg. 25, 2002, Heft 2, S. 317-328.

EMBLEMSVÅG, J.(2003): Life-cycle costing: using activity-based costing and Monte Carlo methods to manage future costs and risks, John Wiley & Sons Inc, 2003.

EUROPEAN COMMISSION; Europa-Site on LCA Tools, Services and Data. List of Databases. Online im Internet. <http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcainfohub/databaseList.vm>, Abruf: 08.12.2009, 13.00 Uhr.

EUROPEAN COMMISSION JOINT RESEARCH CENTER (EC JRC); (2009): Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS). Geographical Assessment of Solar Resource and Performance of Photovoltaic Technology.. Online im Internet. <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/index.htm>, Abruf: 20.11.2009, 12.15 Uhr.

FABRYCKY, W.J.; BLANCHARD, B.S.(1991): Life-cycle cost and economic analysis, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ 1991.

- FARDO, S.W.; PATRICK, D.R.(2008): *Electrical power systems technology*, Fairmount Press, 2008.
- FRANKL, P. u.a. (2006): *NEEDS-new energy externalities developments for sustainability. final report on technical data, costs and life cycle inventories of PV applications*, Deliverable n° 11.2 - RS Ia, 2006.
- FRISCHKNECHT, R.; STUCKI, M. (2009): *Scope Dependent Modelling of Electricity in Life Cycle Assessment*, in: *Proceedings of Life Cycle Assessment IX*, September 30, Boston, USA.
- FRÜH, W.(2007): *Inhaltsanalyse: Theorie und Praxis*, UVK-Verl.-Ges., 2007.
- FTHENAKIS, V.; WANG, W.; KIM, H.C. (2009): *Life cycle inventory analysis of the production of metals used in photovoltaics*, in: *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Jg. 13, 2009, Heft 3, S. 493-517.
- FTHENAKIS-VASILIS, M. (2004): *Environmental life cycle assessment of cadmium telluride solar cells: Cd emissions. Bewertung der Umweltbelastung durch den Lebenszyklus von Cadmiumtellurid- Solarzellen: Cd-Emissionen*, in: *Proceedings of 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Vol. 2., Jun 7-11, 2004, Paris, FR. S. 2166-2169.
- FUNTOWICZ, S.O.; RAVETZ, J.R.(1990): *Uncertainty and quality in science for policy*, Springer, Dordrecht, The Netherlands 1990.
- GABELE, E.; MAYER, H.(2003): *Buchführung*, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2003.
- GAIDDON, B.; JEDLICZKA, M. (2006): *Compared assessment of selected environmental indicators of photovoltaic electricity in OECD cities.2006, PVPS Task 10, PVPS Task 10, Activity 4.4, Report IEA-PVPS T10*, 2006.
- GARFIELD, E. (1996): *Fortnightly review: How can impact factors be improved?* in: *British medical journal*, Jg. 313, 1996, Heft 7054, S. 411.
- GARFIELD, E. (2006): *The history and meaning of the journal impact factor*, in: *jama*, Jg. 295, 2006, Heft 1, S. 90.
- GIBSON, R.B.; HASSAN, S.(2005): *Sustainability Assessment: criteria and processes*, Earthscan/James & James, 2005.
- GLOBAL REPORTING INITIATIVE (GRI); (2009): *GRI Reporting Framework*. Online im Internet.
<http://www.globalreporting.org/ReportingFramework/ReportingFrameworkOverview/>, Abruf: 25.11.2009, 17.15 Uhr.
- GOETZBERGER, A.; HOFFMANN, V.U.(2005): *Photovoltaic solar energy generation*, Springer Verlag, 2005.
- GRASSMANN, P. (1987): *Wirkungsgrade in der Welt des Lebens und der Technik*, in: *Heat and Mass Transfer*, Jg. 21, 1987, Heft 2, S. 67-71.
- GREEN, M.A.(2006): *Third generation photovoltaics: advanced solar energy conversion*, Springer Verlag, 2006.

- GREEN, M.A. u.a. (2008): Solar cell efficiency tables (version 32), in: Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Jg. 16, 2008, Heft 5, S. 435–440.
- GREEN, M.A. u.a. (2009): Solar cell efficiency tables (version 33), in: Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Jg. 17, 2009, Heft 1, S. 85–94.
- GREEN, M.A. u.a. (2009): Solar cell efficiency tables (version 34), in: Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Jg. 17, 2009, Heft 5,
- GUINÉE, J.B. (2002): Handbook on life cycle assessment operational guide to the ISO standards, in: The international journal of life cycle assessment, Jg. 7, 2002, Heft 5, S. 311-313.
- GÜNTHER, T.; KRIEGBAUM, C.(1999): Life Cycle Costing. Ein Instrument zur Unterstützung der ökologieorientierten Kostenrechnung. In: Baum, H.; COENENBERG, A.G.; GÜNTHER, E. (Hrsg.): Betriebliche Umweltökonomie in Fällen. Band I: Anwendung betriebswirtschaftlicher Instrumente, Oldenbourg, München u.a. 1999. S. 231-266.
- GÜNTHER, E. u.a. (2005): Life Cycle Costing (LCC) und Life Cycle Assessment (LCA) - eine Übersicht bestehender Konzepte und deren Anwendung am Beispiel von Abwasserpumpstationen, Diplomarbeit, Sächsische Landesbibliothek - Staats- und Universitätsbibliothek Dresden (SLUB), Zellescher Weg 18, 01069 Dresden, Germany 2005.
- GÜNTHER, E.(1994): Ökologieorientiertes Controlling : Konzeption eines Systems zur ökologieorientierten Steuerung und empirische Validierung, Vahlen, München 1994.
- GÜNTHER, E.(2008): Ökologieorientiertes Management : um-(weltorientiert) Denken in der BWL ; mit 104 Tabellen, Lucius & Lucius, Stuttgart 2008.
- HÄBERLIN, H.(2007): Photovoltaik. Strom aus Sonnenlicht für Verbundnetz und Inselanlagen, 1. Aufl., AZ Fachverlage AG, Aarau, CH 2007.
- HAGEDORN, G. (1989): Hidden energy in solar cells and photovoltaic power stations. Die in Sonnenzellen und Sonnenbatterien hineingesteckte Energie, in: Report of the Commission of the European Communities - EUR, 1989, S. 542-545.
- HAGEDORN, G. u.a. (1992): Umweltrelevante Masseneinträge bei der Herstellung verschiedener Solarzellentypen : eine vergleichende Analyse konventioneller und ausgewählter neuer Verfahren unter Berücksichtigung der Einsatzstoffe und Prozeßketten sowie der Entsorgungs- und Recyclingmöglichkeiten : Endbericht; Contract PLI14120, München 1992.
- HAKENJOS, A. (2008): FLATCON Konzentrador-PV Demonstrator-Kraftwerk. Abschlussbericht. FLATCON concentrator photovoltaic demonstration solar power plant. Final report. 2008, S. 1-53.
- HALLAY, H.; PFRIEM, R.(1992): Öko-Controlling, Campus-Verl., 1992.
- Handbook on life cycle assessment: operational guide to the ISO standards, (2002): Kluwar Academic, Dordrecht, Netherlands 2002.
- HAPKE, T. (1999): Recherchestrategien in elektronischen Datenbanken, in: Bibliotheksdienst, Jg. 33, 1999, Heft 7, S. 1113-1129.

HÄRDLER, J.; BREZKE, D.(2006): Betriebswirtschaftslehre für Ingenieure: Lehr- und Praxisbuch für Ingenieure und Wirtschaftsingenieure, Hanser Fachbuchverlag, 2006.

HELIOCLIM (HRSG.); (2009): European Solar Radiation Atlas (ESRA). Online im Internet. <http://www.helioclim.net/esra/radiation.html>, Abruf: 10.11.2009, 11.00 Uhr.

HERRMANN, C.(2009): Ganzheitliches Life Cycle Management : Nachhaltigkeit und Lebenszyklusorientierung in Unternehmen, Springer, Heidelberg 2009.

HÖHNE, C.(2009): Life Cycle Costing. Systematisierung bestehender Studien, Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, Dresden 2009.

HUNKELER, D.J.; LICHTENVORT, K.; REBITZER, G.(Hrsg.) (2008): Environmental life cycle costing, CRC Press, Boca Raton, Fla. 2008.

HUPPES, G. u.a. (2008): Modelling for Life Cycle Costing. In: Hunkeler, D.J.; LICHTENVORT, K.; REBITZER, G. (Hrsg.): Environmental life cycle costing, CRC Press, Boca Raton, Fla. 2008. S. 17-34.

ICC'S COMMISSION ON ENVIRONMENT & ENERGY; INTERNATIONAL CHAMBER OF COMMERCE (ICC); (2009): The Business Charter for Sustainable Development. Online im Internet. <http://www.iccwbo.org/policy/environment/id1309/index.html>, Abruf: 25.11.2009, 17.25 Uhr.

IMPROVING PV ACCEPTABILITY THROUGH INNOVATIVE ARCHITECTURAL DESIGN (PVACCEPT). Online im Internet. www.pvaccept.de.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). (2006). IEC 60904-1, photovoltaic devices. part 1: Measurement of photovoltaic current-voltage characteristics

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). (2007). IEC 60904-2, photovoltaic devices. part 2: Requirements for reference solar cells

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). (2008). IEC 60904-3, photovoltaic devices. part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS PROGRAMME (IEA PVPS) (2004): Trends in PV applications. percentages of grid-connected and off-grid PV power by year. 2003 (figures), (2004): 2004.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS PROGRAMME (IEA PVPS) (2005): Trends in PV applications. cumulative installed PV power as of year end. 2004 (tables), (2005): 2005.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS PROGRAMME (IEA PVPS) (2006): Trends in PV applications. cumulative installed PV power as of year end. 2005 (tables), (2006): 2006.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS PROGRAMME (IEA PVPS) (2007): Trends in PV applications. cumulative installed PV power as of year end. 2006 (tables), (2007): 2007.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS PROGRAMME (IEA PVPS) (2008): Trends in PV applications. cumulative installed PV power as of year end. 2007 (tables), (2008): 2008.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS PROGRAMME (IEA PVPS) (2009a): Trends in PV applications. cumulative installed PV power as of year end. 2008 (tables), (2009): 2009.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS PROGRAMME (IEA PVPS) (2009b): Trends in PV applications. cumulative installed PV power in IEA PVPS countries: Historical perspective. 2008 (tables), (2009): 2009.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). (1992). ISO 9845-1. solar energy—Reference solar spectral irradiance at the ground at different receiving conditions. part 1: Direct normal and hemispherical solar irradiance for air mass 1,5

JUNG, H.(2006): Allgemeine Betriebswirtschaftslehre, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2006.

JUNGBLUTH, N.; STUCKI, M.; FRISCHKNECHT, R.(2009): Photovoltaics. In: Dones, R.u.a. (Hrsg.): Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Swiss 2009.

KALOWEKAMO, J.; BAKER, E. (2009): Estimating the manufacturing cost of purely organic solar cells, in: Solar Energy, Jg. 83, 2009, Heft 8, S. 1224-1231.

KÄMPFE, L.; BERNHARDT, D.(1985): Evolution und Stammesgeschichte der Organismen, G. Fischer, Stuttgart 1985.

KLÖPPFER, W.(2008): Outlook. Role of Environmental Life Cycle Costing in Sustainability Assessment. In: Hunkeler, D.J.; LICHTENVORT, K.; REBITZER, G. (Hrsg.): Environmental life cycle costing, CRC Press, Boca Raton, Fla. 2008. S. 157-162.

KREEB, M.(2001): Umweltkostenmanagement. In: Schulz, W.F. (Hrsg.): Lexikon Nachhaltiges Wirtschaften, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München 2001. S. 465-477.

KUCKARTZ, U.(2007): Einführung in die computergestützte Analyse qualitativer Daten, VS Verlag, 2007.

LEWIS, N.S. (2007): Toward cost-effective solar energy use, in: Science(Washington), Jg. 315, 2007, Heft 5813, S. 798-801.

LICHTENVORT, K. u.a. (2008): Introduction. History of Life Cycle Costing, Its Categorization and Its Basic Framework. In: Hunkeler, D.J.; LICHTENVORT, K.; REBITZER, G. (Hrsg.): Environmental life cycle costing, CRC Press, Boca Raton, Fla. 2008. S. 1-16.

LUQUE, A.; HEGEDUS, S.(2003): Handbook of photovoltaic science and engineering, John Wiley & Sons Inc, 2003.

MARHEINEKE, T.(2002): Lebenszyklusanalyse fossiler, nuklearer und regenerativer Stromerzeugungstechniken Life cycle assessment of fossil, nuclear and renewable electricity

generation techniques, Dissertation, Universität Stuttgart, Fakultät Energietechnik, Stuttgart 2002.

MARKVART, T.; BOGUS, K.(2000): Solar electricity, John Wiley & Sons Inc, 2000.

MARKVART, T.; CASTANER, L.(2003): Practical handbook of photovoltaics: fundamentals and applications, Elsevier Science & Technology, 2003.

MASTERS, G.M.(2004a): Renewable and efficient electric power systems, IEEE, 2004a.

MASTERS, G.M.(2004b): Renewable and efficient electric power systems, John Wiley & Sons Inc., New Jersey 2004b.

MAYRING, P.(2008): Qualitative Inhaltsanalyse: Grundlagen und Techniken, Beltz, 2008.

MCCONNELL, R. (2005): Concentrator photovoltaic technologies: Review and market prospects, in: Refocus, Jg. 6, 2005, Heft 4, S. 35-39.

MEIJER, A. u.a. (2003): Life-cycle assessment of photovoltaic modules: comparison of mc-Si, InGaP and InGaP/mc-Si solar modules, in: Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Jg. 11 (2003), 2003, Heft 4, S. 275-287.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA); ATMOSPHERIC SCIENCE DATA CENTER (2009): NASA Surface meteorology and Solar Energy: Global/Regional Data. Insolation. Annual Averaged from Jul 1983 - Jun 2005. World map. Parameter [Day=ALL]; [Month=Annual]; [Year=ALL]. 2009. Online im Internet: http://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/register.cgi?email=na&task=login&next_url=/cgi-bin/sse/ion-p&page=region_main.ion, Abruf: 20.11.2009, 15.30 Uhr.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (NREL) (USA); (2009a): Online im Internet. <http://www.nrel.gov/>, Abruf: 10.11.2009, 15.00 Uhr.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (NREL) (USA); (2009b): Learning about renewable energy. Online im Internet. <http://www.nrel.gov/learning/>, Abruf: 20.11.2009, 13.15 Uhr.

NEW ENERGY EXTERNALITIES DEVELOPMENT FOR SUSTAINABILITY (NEEDS). Online im Internet. <http://www.needs-project.org/>,

NIEUWLAAR, E.; ALSEMA, E. Environmental aspects of PV power systems, in: IEA PVPS Task, Jg. 1,

OLIVER, M.; JACKSON, T. (2000): The evolution of economic and environmental cost for crystalline silicon photovoltaics, in: Energy Policy, Jg. 28, 2000, Heft 14, S. 1011.

OLIVIER, J.R.; HARMS, T.M.; ESTERHUYSE, D.J. (2008): Technical and economic evaluation of the utilization of solar energy at South Africa's SANAE IV base in Antarctica, in: Renewable Energy, Jg. 33, 2008, Heft 5, S. 1073-1084.

PACCA, S.; SIVARAMAN, D.; KEOLEIAN, G.A.(2006): Life Cycle Assessment of the 33 kW Photovoltaic System on the Dana Building at the University of Michigan: Thin Film Laminates, Multi-crystalline Modules, and Balance of System Components. 2006, University of Michigan, Michigan 2006.

- PALZ, W.; ZIBETTA, H. (1991): Energy pay-back time of photovoltaic modules, in: International Journal of Solar Energy, Jg. 10, 1991, Heft 3-4, S. 211-216.
- PEHARZ, G.; DIMROTH, F. (2005): Energy payback time of the high-concentration PV system FLATCON(R), in: Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Jg. 13 (2005), 2005, Heft 7, S. 627-634.
- PEHNT, M. (2006): Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies, in: Renewable Energy: An International Journal, Jg. 31, 2006, Heft 1, S. 55-71.
- PFEIFFER, W.; BISCHOF, P. (1981): Produktlebenszyklen-Instrument jeder strategischen Produktplanung, in: Planung und Kontrolle, München, Jg. 8, 1981, S. 133-166.
- PHOTOVOLTAIC RESOURCES (PVRESOURCES.COM); (2007): Photovoltaic Standards. Online im Internet. <http://www.pvresources.com/en/standards.php>, Abruf: 01.12.2009, 19.30 Uhr.
- QUASCHNING, V.(2008): Erneuerbare Energien und Klimaschutz, Hanser, München 2008.
- REBITZER, G.; NAKAMURA, S.(2008): Environmental Life Cycle Costing. In: Hunkeler, D.J.; LICHTENVORT, K.; REBITZER, G. (Hrsg.): Environmental life cycle costing, CRC Press, Boca Raton, Fla. 2008. S. 35-58.
- REBITZER, G. u.a. (2004): Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications, in: Environment international, Jg. 30, 2004, Heft 5, S. 701-720.
- REICH-WEISER, C.; DORNFELD, D.; HORNE, S. (2008): Environmental assessment and metrics for solar: Case study of SolFocus solar concentrator systems, Berkeley, 2008.
- SÄCHSISCHE LANDESBIBLIOTHEK - STAATS- UND UNIVERSITÄTSBIBLIOTHEK DRESDEN; (2009): Datenbank-Infosystem (DBIS). Online im Internet. http://rzblx10.uni-regensburg.de/dbinfo/fachliste.php?bib_id=slub&colors=31&ocolors=40&lett=1, Abruf: 02.07.2009, 17.00 Uhr.
- SCHUBERT, U.; STÖRMER, E.(2007): Sustainable development in Europe: concepts, evaluation and applications, Edward Elgar Publishing, 2007.
- SEGLIN, P.O. (1997): Why the impact factor of journals should not be used for evaluating research, in: British medical journal, Jg. 314, 1997, Heft 7079, S. 497.
- SHERWANI, A.; USMANI, J. (2010): Life cycle assessment of solar PV based electricity generation systems: A review, in: Renewable and Sustainable Energy Reviews, Jg. 14, 2010, Heft 1, S. 540-544.
- SIEGWART, H.; SENTI, R.(1995): Product life cycle Management : die Gestaltung eines integrierten Produktlebenszyklus, Schäffer-Poeschel, Stuttgart 1995.
- Solar generation V - 2008. solar electricity for over one billion people and two million jobs by 2020, (2008): Brussels; Amsterdam, 2008.
- Solar Thermal Power Generation Technology, (2005): ABS Energy Research, 2005.

SPV 2006 Solar Photovoltaic Report, (2006): in: Solar Photovoltaics Report, 2006, Heft 4, S. 1-128.

STEIN, M.(2002): Die Sonne, 2002.

Sustainability Evaluation of Solar Energy Systems(SENSE).

TAKIGUCHI, H.; MORITA, K. (2009): Sustainability of silicon feedstock for a low-carbon society, in: Sustainability Science, Jg. 4, 2009, Heft 1, S. 117-131.

TALAVERA, D.L. u.a. (2007): Tables for the estimation of the internal rate of return of photovoltaic grid-connected systems, in: Renewable and sustainable energy reviews, Jg. 11, 2007, Heft 3, S. 447-466.

TALAVERA, D.; NOFUENTES, G.; AGUILERA, J. (2010): The internal rate of return of photovoltaic grid-connected systems: A comprehensive sensitivity analysis, in: Renewable Energy, Jg. 35, 2010, Heft 1, S. 101-111.

TAYLOR, W. (1981): The use of life cycle costing in acquiring physical assets, in: Long range planning, Jg. 14, 1981, Heft 6, S. 32-43.

THOMSON REUTERS (HRSG.); (2009): The Thomson Reuters Impact Factor. Online im Internet. http://thomsonreuters.com/products_services/science/free/essays/impact_factor/, Abruf: 29.11.2009, 19.30 Uhr.

TRIEB, F.; LANGNISS, O.; KLAISS, H. (1997): Solar electricity generation-a comparative view of technologies, costs and environmental impact. Solare Elektrizitätserzeugung - eine vergleichende Analyse der Technologien, Kosten und Umweltfaktoren, in: Solar Energy, Jg. 59 (1997), 1997, Heft 1-3, S. 89-99.

UNGER, J.(2009): Alternative Energietechnik, Vieweg Teubner Verlag, Wiesbaden 2009.

UNITED NATIONS (HRSG.) (1996): Indicators of sustainable development: Guidelines and methodologies, New York, 1996.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP) (1992a): Agenda 21. environment and development agenda. Rio de Janeiro, 1992a.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP) (1992b): Rio declaration on environment and development, Rio de Janeiro, 1992b.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP); SOCIETY FOR ENVIRONMENTAL TOXICOLOGY AND CHEMISTRY (SETAC); LIFE CYCLE INITIATIVE; (2005): Life Cycle Initiative Background. Online im Internet. http://jpl.estis.net/builder/includes/page.asp?site=lcinit&page_id=AC5F8210-CF6F-4226-A5B7-F053F4BBED5C, Abruf: 15.11.2009, 10.15 Uhr.

UNITED NATIONS WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT (UN WCED) (1987): Our common future. the brundtland report. 1987.

Universität Koblenz; Projekt Informationskompetenz(Hrsg.) (2005): Suchstrategien und erste Recherchen, Koblenz 2005.

UNIVERSITÄT MÜNSTER; Recherchekurs Wirtschaftswissenschaften. LOTSE und Econ-Biz. Online im Internet. <http://lotse.uni-muenster.de/wirtschaftswissenschaften/>,

UNIVERSITY OF WATERLOO; (2009): Introduction into Searches. Online im Internet. http://www.lib.uwaterloo.ca/libguides/cdrom/introsrch_concept-map.html,

VON ROEDERN, B.(2008): Advances in Photovoltaic (PV) Technology, Golden, Colorado USA 2008.

WEIDEMA, B.P.; WESNÆS, M.S. (1996): Data quality management for life cycle inventories—an example of using data quality indicators, in: Journal of Cleaner Production, Jg. 4, 1996, Heft 3-4, S. 167-174.

WILDEMANN, H.(1982): Kostenprognosen bei Großprojekten, Poeschel, Stuttgart 1982.

WÜBBENHORST, K.L.(1984): Konzept der Lebenszykluskosten : Grundlagen, Problemstellungen und technologische Zusammenhänge, Verlag für Fachliteratur, Darmstadt 1984.

ZAHORANSKY, R.(2008): Energietechnik: Systeme zur Energieumwandlung. Kompaktwissen für Studium und Beruf, Vieweg Teubner Verlag, Wiesbaden 2008.

ZEHBOLD, C.(1996): Lebenszykluskostenrechnung, Gabler, Wiesbaden, 1996.

Abstract

The special need of a sustainable energy supply in mind the technologies of the renewable source solar energy, especially **photovoltaics** (PV) is main subject of the present thesis. Using the inexhaustible, clean and “freely delivered” power from the sun solar devices may play a major role in a cleaner future, but, on the other hand, they are still energy consuming and expensive in their production which consequently demands a whole life cycle perspective when assessing this technology.

For a closer look at PV the methodology of **Environmental Life Cycle Costing** (ELCC) is introduced by following three theoretical points of view. Namely these are *sustainability*, *life cycle thinking* and the *three dimensional nature* of this tool by regarding environmental, economic and technical aspects in their interaction. Based on theoretical elements of Life Cycle Assessment and Life Cycle Costing in combination with the technical background of photovoltaics main requirements and steps for performing an ELCC for PV are described.

By executing software based content analysis the defined *framework* is checked (and modified) against a *choice of 135 existing studies* analyzing the life cycle of PV technologies from an environmental or economic perspective. As a result the main elements of an ELCC for PV, e.g. environmental impact categories and economic indicators, are identified (methodological feedback).

Within the next step the existing studies are rated by their “quality” regarding the environmental, economic and more general parts of an ELCC for PV in order to create an inventory of life cycle studies for PV. This *inventory* is structured by technologies as well as quality of content respecting ELCC and might be used for further analyses.

At this stage the results propose the possibility of a first estimate of the present status of ELCC for PV: until now there is a good pool of existing analyses of the life cycle of PV systems. But from an ELCC perspective the examination of common hot spots and trade offs between economic and environmental aspects should be expanded.

The theoretical framework of ELCC for PV, the encoded studies and the inventory of life cycle analyses for PV are now the starting point for further analyses, especially of the individual outcome within studies, which will then pose a benchmark for new life cycle studies of PV technology.

Keywords: Life Cycle Assessment; Life Cycle Costing; Environmental Life Cycle Costing; Photovoltaic; Solar Cell; Solar Module; Solar Panel

In dieser Reihe sind bisher erschienen:

<i>Nummer</i>	<i>Autoren</i>	<i>Titel</i>
01/1996	Günther, T. / White, M. / Günther E. (Hrsg.) Schill, O.	Ökobilanzen als Controllinginstrument  Download
02/1998	Günther, E. (Hrsg.) Salzmann, O.	Revisionäre Zeit- und Geschwindigkeitsbetrachtungen im Dreieck des Sustainable Development  Download
I/2000	Günther, E. (Hrsg.) Schmidt, A.	Auszug aus der Diplomarbeit: Umweltmanagement und betriebswirtschaftlicher Nutzen. Eine theoretischen Analyse und empirische Untersuchung am Beispiel ÖKOPROFIT München  Download
03/2000	Günther, E. / Schill, O. (Hrsg.) Klauke, I.	Kommunales Umweltmanagement: Theoretische Anforderungen und Einordnung vorhandener Ansätze  Download
04/2000	Günther, E. (Hrsg.) Krebs, M.	Aufgaben- und Organisationsstruktur der Umweltpolitik in der Bundesrepublik Deutschland  Download
05/2000	Günther, E. / Schill, O. (Hrsg.) Sicker, B.	Umweltfreundliche Beschaffung und Abfallmanagement in öffentlichen Einrichtungen - Eine Untersuchung am Landratsamt Bautzen und Klinikum Bautzen-Bischofswerda  Download
	Günther, E. / Thomas, P. (Hrsg.) Wollmann, R.	Integration des Instrumentes Environment-oriented Cost Management in die Controllingprozesse von Unternehmen in Entwicklungsländern Ergebnisse der Zusammenarbeit mit dem Pilotvorhaben zur Unterstützung umweltorientierter Unternehmensführung in Entwicklungsländern (P3U) der Deutschen Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) Erschienen in den Dresdner Beiträge zur Betriebswirtschaftslehre Nr. 50/01  Download

Fortsetzung:

06/2001	Günther, E. / Berger, A. (Hrsg.) Kaulich, S.	Ermittlung kritischer Erfolgsfaktoren für die Implementierung der Umweltleistungsmessung in Unternehmen, insbesondere für die Maschinenbaubranche  Download
07/2001	Günther, E. / Berger, A. (Hrsg.) Scheibe, L.	Konzeption eines Umweltkennzahlensystems zur Umweltleistungsmessung für Prozesse unter Beachtung der in Unternehmen vorliegenden Rahmenbedingungen  Download
08/2001	Krebs, P. / Günther, E. / Obenaus, G. (Hrsg.) Bölter, C.	Regenwassernutzung im nicht privaten Bereich Eine technische und wirtschaftliche Analyse dargestellt am Beispiel des Fraunhofer-Institutszentrum Dresden  Download
09/2001	Krause, W. / Günther, E. / Schulze, L. (Hrsg.) Huber, V.	Ökologische Bewertung von Reinigungsprozessen in der Oberflächentechnik - Möglichkeiten zum Einsatz integrierter Umweltschutztechnologien  Download
10/2001	Wingrich, H. / Günther, E. / Reißmann, F. / Kaulich, S. / Kraft, A. (Hrsg.) Seidel, T.	Vergleichende Untersuchungen zur Wasseraufbereitung mit getauchten Membranen  Download
11/2002	Koch, R. / Günther, E. / Fröhlich, J. / Jetschny, W. / Klauke, I. (Hrsg.) Sauer, T.	Aufbau eines integrierten Umweltmanagementsystems im universitären Bereich  Download
12/2003	Günther, E. / Berger, A. / Hochfeld, C. (Hrsg.) Tröltzsch, J.	Treibhausgas-Controlling auf Unternehmensebene in ausgewählten Branchen  Download

Fortsetzung:

13/2003	<p>Günther, E. / Neuhaus, R. / Kaulich, S. (Hrsg.) Becker, S. / Kornek, S. / Kreutzfeldt, C. / Opitz, S. / Richter, L. / Ulmschneider, M. / Werner, A.</p>	<p>Entwicklung von Benchmarks für die Umweltleistung innerhalb der Maschinenbaubranche</p> <p>Eine Benchmarkingstudie im Auftrag der Siemens AG</p> <p> Download</p>
	<p>Günther, T. / Günther, E. (Hrsg.) Hoppe, H.</p>	<p>Umweltaspekte und ihre Wertrelevanz für die Unternehmen: Eine Zusammenfassung existierender empirischer Forschungsergebnisse. Erschienen in den Dresdner Beiträgen zur Betriebswirtschaftslehre Nr. 81/04</p> <p> Download</p>
14/2004	<p>Günther, E. / Klauke, I. (Hrsg.) Kreutzfeldt, C.</p>	<p>Herausforderungen für die nachhaltige öffentliche Beschaffung in der Tschechischen Republik im Zuge der EU-Osterweiterung</p> <p> Download</p>
15/2004	<p>Günther, E. / Farkavcová, V. / Hoppe, H. (Hrsg.) Jacobi, R. / Scholz, F. / Umbach, F. / Wagner, B. / Warmuth, K.</p>	<p>Entwicklung eines integrierten Managementsystems bei einem mittelständischen Unternehmen der Entsorgungswirtschaft</p> <p>Verknüpfung von Umweltmanagement und Qualitätsmanagement unter besonderer Berücksichtigung der Transportprozesse in der Entsorgungsbranche</p> <p> Download</p>
16/2004	<p>Günther, E. / Will, G. / Hoppe, H. (Hrsg.) Ulmschneider, M.</p>	<p>Life Cycle Costing (LCC) und Life Cycle Assessment (LCA) – Eine Übersicht bestehender Konzepte und deren Anwendung am Beispiel von Abwasserpumpstationen</p> <p> Download</p>
17/2005	<p>Günther, E. / Hoppe, H. / Klauke, I. (Hrsg.) Deuschle, T. / Friedemann, J. / Kutzner, F. / Mielecke, T. / Müller, M.</p>	<p>Einweg- und Mehrwegtextilien im Krankenhaus – Das Spannungsfeld zwischen Ökonomie und Ökologie</p> <p> Download</p>

Fortsetzung:

18/2005	Günther, T. / Günther, E. / Hoppe, H. (Hrsg.) Mahlendorf, M.	Entwicklung eines Entscheidungsmodells zur Anwendung von Umweltkostenrechnungssystemen: Aktuelle Entwicklungen und Anwendungsbereiche  Download
19/2006	Günther, E. / Kaulich, S. (Hrsg.) Kornek, S.	Entwicklung einer Methodik eines integrierten Managementsystems von Umwelt-, Qualitäts- und Arbeitsschutzaspekten unter besonderer Betrachtung des Risikomanagements  Download
20/2006	Günther, E. / Lehmann-Waffenschmidt, W. (Hrsg.) Bolze, C. / Ernst, T. / Greif, S. / Krügler, S. / Nowotnick, M. / Schneider, A. / Steneberg, B.	Entschleunigung von Konsum- und Unternehmensprozessen  Download
21/2006	Günther, E. / Farkavcovà, V. (Hrsg.) König, J	Ökologische Bewertung von Transportprozessen - Systematisierung und Analyse existierender Bewertungsverfahren und Studien  Download
22/2006	Günther, E. / Becker, U. J. / Farkavcovà, V. (Hrsg.) Kutzner, F.	Emissionshandel im Verkehr - Konsequenzen aus einzelwirtschaftlicher Perspektive  Download
23/2006	Günther, E. / Hoppe, H. (Hrsg.) Mielecke, T.	Erstellung einer Sachbilanz-Studie und Modellierung des Lebensweges von Operationstextilien  Download
24/2007	Günther, E. / Scheibe, L. (Hrsg.) Laitenberger, K. / Meier, K. / Poser, C. / Röhthig, D. / Stienen, J. / Tobias, S.	Umweltkennzahlen zur Prozessbewertung  Download

Fortsetzung:

25/2007	Günther, E. / Bilitewski B. / Hoppe, H. / Janz, A.(Hrsg.) Greif, S.	Ökonomische Analyse der Rückgewinnung von hochwertigen Metallen aus elektrischen und elektronischen Altgeräten in Deutschland  Download
26/2007	Günther, E. (Hrsg.) Steneberg, B.	Beschleunigung und Entschleunigung – eine empirische Untersuchung der Zahlungsbereitschaft für Entschleunigung  Download
27/2007	Günther, E. / Becker, U./ Gerike, R. / Nowack, M. (Hrsg.) Friedemann, J.	Analyse von Verteilungswirkungen externer Effekte im Verkehr  Download
28/2007	Günther, E. / Hoppe, H. (Hrsg.) Poser, C.	Komponenten und Einflussfaktoren der Umweltleistung eines Unternehmens: Strukturierung und Strukturanalyse auf Basis theoretischer und empirischer Ergebnisse  Download
29/2007	Günther, E./ Hoppe, H. (Hrsg.) Laitenberger, K.	Der Einfluss des Umweltschutzes auf die Wettbewerbsfähigkeit von Ländern und Industrien  Download
30/2008	Günther, E. (Hrsg.) Meier, K.	Die Umweltleistung in der Umweltberichterstattung von Unternehmen und deren Zusammenhang mit der ökonomischen Leistung  Download
31/2008	Günther, E./ Tränckner, J./ Nowack, M. (Hrsg.) Röthig, D.	Betriebswirtschaftliche Analyse der Kapazitätsauslastung in der Siedlungsentwässerung  Download
32/2008	Günther, E. / Tränckner, J. / Nowack, M. (Hrsg.) Gaitzsch, G.	Analyse der Auswirkungen des demografischen Wandels auf die Siedlungsentwässerung mit Hilfe des Realoptionsansatzes  Download
33/2008	Günther, E. / Scheibe, L. (Hrsg.) Hüske, A.-K.	Hemmnisse in Entscheidungsprozessen  Download

Fortsetzung:

34/2009	Günther, E. / Günther, T. / Nowack, M. (Hrsg.) John, S.	Bewertung der Auswirkungen des demografischen Wandels auf die Abwasserbetriebe Bautzen mit Hilfe der Szenarioanalyse  Download
35/2009	Günther, E. / Hüske, A.-K. / Hutter, K. / Soyez, K. / Stechemesser, K. (Hrsg.) Domke, T. / Geißler, M. / Gornickel, D. / Görtz, A. / Heide, N. / Hentschel, N. / Hildebrandt, S. / Kasten, M. / Loitsch, N. / Schmidt, M. / Starke, M. / Villalba, M.	Hemmnisse umweltfreundlichen Verhaltens  Download
36/2009	Günther, E. / Stechemesser, K. (Hrsg.) Bergheim, K. / Gerbaulet, C. / Graßhoff, N. / Kittlaus, B. / Klapper, H. / Plischtil, M. / Rehm, F. / Scheel, R.	Anwendung monetärer und nicht-monetärer Entscheidungsinstrumente am Beispiel von Investitionsentscheidungen der MAN Nutzfahrzeuge AG  Download
37/2009	Günther, E. (Hrsg.) Höhne, C.	Life Cycle Costing – Systematisierung bestehender Studien  Download
38/2009	Günther, E. / Stechemesser, K. (Hrsg.) Lehmann, K.	Betriebswirtschaftliche Szenarien auf regionaler Ebene im Hinblick auf Einflüsse des Klimawandels  Download
39/2010	Günther, E. / Manthey, C. (Hrsg.) Gnauck, C.	Herausforderungen ökologisch-ökonomischer Leistungsmessung – Literaturanalyse und Praxistest im Bereich Holz- und Brückenbau  Download
40/2010	Günther, E. / Nowack, M. (Hrsg.) Hentschel, N.	Entwicklung einer Methode zur monetären Bewertung des Wassers für ein Unternehmen unter Einbeziehung des Wasser-Fußabdrucks  Download

Fortsetzung:

<p>41/2010</p>	<p>Günther, E. / Hoppe, H. (Hrsg.)</p> <p>Arndt, S. / Gaitzsch, G. / Gnauck, C. / Höhne, C. / Hüske, A.-K. / Kretz- schmar, T. / Lange, U. / Lehmann, K. / Süß, A.</p>	<p>The Relation between Corporate Economic and Corporate Environmental Performance</p> <p> Download</p>
<p>42/2011</p>	<p>Günther, E. / Poser, C. (Hrsg.)</p> <p>Loitsch, N.</p>	<p>Prüfung der Nachhaltigkeitsberichterstattung von Unternehmen - Eine empirische Analyse nach den Richtlinien der Global Reporting Initiative</p> <p> Download</p>
<p>43/2011</p>	<p>Günther, E. / Nowack, M. (Hrsg.)</p> <p>Endrikat, J. / Schlage, F. / Hillmann, J.</p>	<p>Ökonomische und ökologische Bewertung der Auswirkungen des demografischen Wandels auf die Siedlungsentwässerung</p> <p>Teil 1: Entwicklung von Szenariobausteinen für die Siedlungswasserwirtschaft im Jahr 2050 - Eine Studie auf Basis von Expertenbefragungen</p> <p> Download</p>
<p>44/2011</p>	<p>Günther, E. / Nowack, M. (Hrsg.)</p> <p>Bergheim, K. / Dreuse, A. / Reif, J.</p>	<p>Ökonomische und ökologische Bewertung der Auswirkungen des demografischen Wandels auf die Siedlungsentwässerung</p> <p>Teil 2: Ökonomische Bewertung</p> <p> Download</p>
<p>45/2011</p>	<p>Günther, E. / Nowack, M. (Hrsg.)</p> <p>Müller, J. / Schubert, R. / Woite, M.</p>	<p>Ökonomische und ökologische Bewertung der Auswirkungen des demografischen Wandels auf die Siedlungsentwässerung</p> <p>Teil 3: Ökologische Bewertung</p> <p> Download</p>
<p>46/2011</p>	<p>Günther, E. / Günther, T. / Hoppe, H. (Hrsg.)</p> <p>Krause, M.</p>	<p>Environmental Life Cycle Costing (ELCC) für Produkte der Solarenergie</p> <p>Die Verbindung von Life Cycle Assessment (LCA) und Life Cycle Costing (LCC) - from Cradle to Grave - angewandt auf die Photovoltaik</p> <p> Download</p>