

FACHHOCHSCHULE WÜRZBURG-SCHWEINFURT

ABTEILUNG SCHWEINFURT

Fachrichtung Betriebswirtschaft/ Wirtschaftsingenieurwesen

STUDIENSCHWERPUNKT MANAGEMENT IN KMU



DIPLOMARBEIT

Energetische Bewertung von Windkraftanlagen

Verfasser: Matthias Geuder
Matrikelnr.: 4500021
Abgabe: 02.04.2004
Referent: Prof. Dr. Wolfgang Vieweg
Korreferent: Prof. Wolfgang Frank

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	VIII
1 Einleitung	1
2 Energie	5
2.1 Energiebegriffe	5
2.2 Energieträger	6
2.3 Energiehaushalt.....	7
2.3.1 Energievorräte.....	7
2.3.2 Energieverbrauch	8
2.4 Energieszenarien	10
2.4.1 Reichweite konventioneller Energieträger	10
2.4.2 Nachhaltige Energieversorgung in Deutschland bis 2050	13
2.5 Regenerative Energien	14
2.6 Beurteilung.....	16
3 Kumulierter Energieaufwand	17
3.1 VDI-Richtlinie 4600	17
3.1.1 Definition über den Lebenszyklus	17
3.1.2 Definition über beteiligte Primärenergieträger	18
3.1.3 Bestimmung der Bilanzgrenzen.....	19
3.1.4 Kombination von Mikro- und Makroanalyse	21
3.1.5 Kuppelprodukte	21
3.1.6 Recycling.....	22
3.2 Definition im Zuge der Lebenszyklusanalyse	22
3.3 Definitionsvorschlag des Öko-Instituts Darmstadt	24
3.4 Energetische Kennzahlen	26
3.4.1 Energetische Amortisationszeit	26
3.4.2 Erntefaktor.....	27
3.4.3 Substitutionsfaktor	28

4	Methoden zur Ermittlung des kumulierten Energieaufwands	30
4.1	Prozesskettenanalyse	30
4.2	Materialbilanzen-Analyse	32
4.3	Energetische Input – Output Analyse	33
4.3.1	Aufbau der Input-Output Tabellen	34
4.3.2	Berechnungsverfahren	35
4.4	Hybrid-Ansatz	38
5	Aktuelle Hilfsmittel zur Erstellung von Sachbilanzen	43
5.1	Die KEA Datenbank	44
5.1.1	Allgemeine Informationen	44
5.1.2	Datenbankstruktur	44
5.1.3	Bedienung	45
5.1.3.1	Darstellung von Produktinformationen	47
5.1.3.2	Darstellung von Prozessinformationen	48
5.1.4	Eignung für die Bilanzierung	49
5.2	Umberto	51
5.2.1	Aufbau der Struktur des Stoffstromnetzes	51
5.2.2	Spezifikation der Netzelemente	53
5.2.3	Auswertung und Darstellung der Stoffstromdaten	53
5.2.4	Eignung zur Bilanzierung	55
5.3	Gemis	55
6	Bilanzierung der Windkraftanlage E-66	58
6.1	Windkraftanlagen	58
6.1.1	Weltweite Entwicklung	58
6.1.2	Windkraftanlagenhersteller	59
6.1.3	Windkraftanlagen	60
6.1.4	Technische Details	61
6.2	Bestimmung des KEA mit Hilfe der Materialbilanzen-Methode	64
6.2.1	Grundlagen	64
6.2.1.1	Werkstoffausnutzungsgrade	64
6.2.1.2	Energieaufwendungen der Werkstoffe	65
6.2.1.3	Fertigungszuschläge	67
6.2.2	Bilanz der Anlage E-66	68

6.2.2.1	Rotorblätter	68
6.2.2.2	Generator.....	69
6.2.2.3	Restliche Gondel.....	70
6.2.2.4	Stahlurm	70
6.2.2.5	Netzanbindung – Steuertechnik.....	71
6.2.2.6	Fundament.....	72
6.2.2.7	Weitere Energieaufwendungen für Transport und Montage	72
6.2.2.8	Betrieb und Wartung	75
6.2.2.9	Gesamter kumulierter Energieaufwand der Anlage	76
6.2.3	Energetische Amortisation und Erntefaktor	77
6.3	Bestimmung des KEA mit Hilfe der IO-Analyse	78
6.4	Vergleich verschiedener Anlagen und Standorte	80
7	Mögliche Diskussionsansätze	85
7.1	Das Bilanzierungsobjekt	86
7.2	Grundstoffbilanzierung.....	87
7.2.1	Angewandte Methoden	87
7.2.2	Vergleich verschiedener Grundstoffe und Quellen.....	89
7.2.3	Grundstoffbilanzierung am Beispiel der Rapserzeugung	91
7.3	Bilanzierung der Zulieferteile	94
7.4	Bilanzierung im Unternehmen Enercon	96
7.5	Bilanzierung von Transport, Endmontage und Wartung	98
7.6	Bilanzierung über IO-Tabellen	99
7.6.1	IO-Analyse als „Grobcheck“	99
7.6.2	Endogenisierung von Abschreibungen.....	102
7.6.3	Hybrid-Ansatz.....	105
7.7	Recycling der Anlagen	106
7.7.1	Derzeitige Situation und Möglichkeiten	106
7.7.2	Kosten der Entsorgung.....	107
7.7.3	Stoffliche und energetische Beurteilung des Recyclings	108
8	Bilanzierungsvorschläge im Kontext zur aktuellsten Studie	110
8.1	Vorschläge zur Bilanzierung von WKA	110
8.1.1	Einheitliche Grundstoffdaten	110

8.1.2	Kombination von Prozessketten-, Hybrid- und Materialbilanzen-Analyse	112
8.1.2.1	Stahlurm	112
8.1.2.2	Generator.....	113
8.1.2.3	Restliche Gondel und Netzanbindung.....	114
8.1.2.4	Schlußfolgerung.....	114
8.2	Das Verbundprojekt	115
8.2.1	Vorgehen bei der Bilanzierung	116
8.2.2	Onshore- und Offshore-Anlagen	118
8.2.3	Darstellung der Ergebnisse	122
9	Zusammenfassung und Ausblick	124
	Literaturverzeichnis	128
	Buchquellen	128
	Zeitschriften	131
	Internetquellen	132
	Sonstige Quellen	135
	Anlagen	136
	Anlage 1: Ausschnitt aus der VDI-Richtlinie 4600.....	136
	Anlage 2: Windkarte Deutschlands.....	136
	Anlage 2: Windkarte Deutschlands.....	137
	Anlage 3: Bilder der Stahlurmherstellung.....	138
	Anlage 4: Bilder bei Enercon	139
	Anlage 5: Bilder von der Endmontage und Wartung.....	141
	Erklärung.....	142

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1 Energiewandlungskette	5
Abbildung 2-2 Energiequellen und ihre Erscheinungsformen bzw. Wirkungen	7
Abbildung 2-3 Energiebilanz der Erde	8
Abbildung 2-4 Weltprimärenergieverbrauch ohne Biomasse und Sonstige	9
Abbildung 2-5 Primärenergieverbrauch der Welt und in Deutschland	10
Abbildung 2-6 Entwicklungsszenarien des Primärenergiebedarfs weltweit	12
Abbildung 2-7 Möglichkeiten zur Nutzung des regenerativen Energieangebots	14
Abbildung 2-8 Energiewürfel	15
Abbildung 3-1 Stoff und Energieströme eines Herstellungsprozesses	20
Abbildung 3-2 Lebenszyklusanalyse und Anwendungsmöglichkeiten	23
Abbildung 3-3 KEA nach verschiedenen Szenarien und Holzprodukten	26
Abbildung 3-4 Amortisationszeit, Erntefaktor und Substitutionsfaktor	29
Abbildung 4-1 Schema eines Materialstammbaumes	30
Abbildung 4-2 Vorgehen bei der Prozesskettenanalyse	31
Abbildung 4-3 Schematischer Aufbau der IO-Tabellen	34
Abbildung 4-4 Schematischer Aufbau der Energieverwendungsmatrix	36
Abbildung 4-5 Schema des Hybrid Ansatzes	39
Abbildung 4-6 Schema der monetären Bilanz eines Prozesses	39
Abbildung 4-7 Ermittlung der Nettowertschöpfung T	40
Abbildung 4-8 Schema der Aufteilung der unbekanntenen Vorleistungen	41
Abbildung 4-9 Vorgehen beim zu Nullsetzen von Sektoren	42
Abbildung 5-1 Ökobilanzsoftware und Vertreiber	43
Abbildung 5-2 Vereinfachte Prozesskette zur Rohstahlgewinnung	45
Abbildung 5-3 Startansicht des Programms	46
Abbildung 5-4 Suchmaske für Produkte	46
Abbildung 5-5 Primärenergieflussbild für eine Tonne Portlandzementklinker	47
Abbildung 5-6 Ausschnitt aus dem Prozessbaum Betonfertigteilherstellung	49
Abbildung 5-7 Betriebliche Input-Output-Analyse	50
Abbildung 5-8 Netzstruktur eines WKA Stahlturms in Umberto	52
Abbildung 5-9 „Balance Sheet“ einer Windkraftanlage	54
Abbildung 6-1 Entwicklung der weltweit installierten Leistung von WKA	58
Abbildung 6-2 Marktanteile der WKA-Hersteller weltweit und Deutschland	59

Abbildung 6-3 Entwicklung von Windkraftanlagen.....	60
Abbildung 6-4 Gondel der E-66	62
Abbildung 6-5 Offshore Türme und Fundamente	63
Abbildung 7-1 Stahlherstellung.....	88
Abbildung 7-2 Prozessschritt Feldarbeit.....	92
Abbildung 7-3 KEA der Rohmaterialien, Fertigungszuschläge und Rest.....	95
Abbildung 7-4 Verringerung der IO-Zuschlagssätze.....	97
Abbildung 7-5 Zusammensetzung der Energieaufwandskoeffizienten	104
Abbildung 8-1 KEA von Onshore- und Offshore-Fundamenten und Netzanbind.....	121
Abbildung 8-2 Darstellung der Sachbilanzgrößen	122

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1 Umrechnungsfaktoren zwischen verschiedenen Energieeinheiten.....	6
Tabelle 2-2 Reserven fossiler Energieträger	11
Tabelle 2-3 Uranvorräte	11
Tabelle 3-1 Deutsche Bezeichnungen für Lebenszyklusanalysen.....	22
Tabelle 6-1 Werkstoffausnutzungsgrade η_w für Bauteilgruppen	64
Tabelle 6-2 KEA-Werte für ausgewählte Rohmaterialien	66
Tabelle 6-3 Fertigungszuschlagsätze, errechnet mit der IO-Analyse	67
Tabelle 6-4 Aufteilung der Energieaufwendungen nach dem Massenverhältnis	67
Tabelle 6-5 KEA eines Rotorblattes	69
Tabelle 6-6 KEA des Generators.....	69
Tabelle 6-7 KEA der restlichen Gondel	70
Tabelle 6-8 KEA des Stahlturms	71
Tabelle 6-9 KEA der Netzanbindung und Steuertechnik	71
Tabelle 6-10 KEA des Fundaments (tiefgründig).....	72
Tabelle 6-11 KEA der Transporte.....	74
Tabelle 6-12 KEA der Montage am Aufstellungsort.....	75
Tabelle 6-13 KEA der Wartung.....	76
Tabelle 6-14 Gesamter KEA der Anlage	76
Tabelle 6-15 AZ und EF nach der Materialbilanzen-Analyse	78
Tabelle 6-16 Energieintensitäten der Bauteile.....	79
Tabelle 6-17 AZ und EF nach der IO-Analyse.....	79
Tabelle 6-18 Vergleich verschiedener Anlagen und Standorte	81
Tabelle 7-1 Vergleich des KEA (MJ/kg) verschiedener Grundstoffe und Quellen	90
Tabelle 7-2 Entsorgungsmöglichkeiten von Windkraftanlagen.....	107
Tabelle 7-3 Sachbilanzverfahren zur Berücksichtigung von Recyclingprozessen ...	109
Tabelle 8-1 Rohmaterialzusammensetzungen der Anlagen in kg	117
Tabelle 8-2 KEA-von Onshore und Offshore-Fundamenten und Netzanbindung....	120

Abkürzungsverzeichnis

AZ	energetische Amortisationszeit
ct	Cent
EE	Endenergie
EEG	Erneuerbares Energien Gesetz
EF	Erntefaktor
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Monomer
EP-Harz	Epoxidharz
ha	Hektar
IKP	Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde, Uni Stuttgart
IOA	Input-Output-Analyse
KEA	Kumulierter Energieaufwand
KEA _{Ges}	Gesamter kumulierter Energieaufwand
KEA _H	Kumulierter Energieaufwand der Herstellung
KEA _N	Kumulierter Energieaufwand der Nutzung
KEA _E	Kumulierter Energieaufwand der Entsorgung
KLR	Kosten- und Leistungsrechnung
KNA	Nicht-energetischer Aufwand
KPA	Kumulierter Prozessenergieaufwand
kWh	Kilowattstunde
LCA	Lebenszyklusanalyse
m/s	Meter pro Sekunde
OeVE	Institut für Ökologisch verträgliche Energiewirtschaft, GH Essen
PE-LD	Polyethylen, Low Density
PET	linearer Polyester
PKA	Prozesskettenanalyse
PSI	Paul – Scherrer – Institut (Schweiz)
PVC	Polyvinylchlorid
RME	Raps-Methyl-Ester
SEI	Stoffgebundener Energieinhalt
SF	Substitutionsfaktor
StBA	Statistisches Bundesamt
StrEG	Stromeinspeisungsgesetz

VDI	Verein Deutscher Ingenieure
W_{el}	elektrische Arbeit
W_{netto}	innerhalb eines Jahres erzeugte, elektrische Nettoenergie

1 Einleitung

Mit dem Stromeinspeisungsgesetz (StrEG) vom Januar 1991 startete die kommerzielle Nutzung der Windenergie in Deutschland. Dieses Gesetz wurde am 01.04.2000 vom Erneuerbaren-Energien-Gesetz (EEG), das aus Sicht der regenerativen Energien in vielen Punkten Verbesserungen aufweist, abgelöst¹.

„Ziel des Gesetzes ist es, im Interesse des Klima- und Umweltschutzes eine nachhaltige Entwicklung der Energieversorgung zu ermöglichen und den Beitrag erneuerbarer Energien an der Stromversorgung deutlich zu erhöhen, um entsprechend den Zielen der Europäischen Union und der Bundesrepublik Deutschland den Anteil erneuerbarer Energien am gesamten Energieverbrauch bis zum Jahr 2010 mindestens zu verdoppeln“ (§ 1 EEG)²

Die wichtigsten Strukturelemente des EEG sind garantierte Mindestpreise für Elektrizität aus erneuerbaren Energien. Im Gegensatz zu früher ist es dabei möglich, die gesamte Stromproduktion einzuspeisen und nicht nur den über den eigenen Bedarf hinausgehenden Überschuss. Nach dem sogenannten Referenz-Standardmodell wird für jede neue Windenergieanlage zunächst über 5 Jahre ein Mindestsatz von 9 ct/kWh³ gezahlt. Nach Ablauf dieses Zeitraums orientiert sich die Höhe der Vergütung am Stromertrag, den die Anlage an einem Referenzstandort mit einer mittleren Jahreswindgeschwindigkeit von 5,5 m/s in einer Höhe von 30 Metern über Grund erreichen würde. Erreicht eine Anlage innerhalb der fünf Jahre mindestens 150 Prozent des so errechneten Referenzbetrags, sinkt die Vergütung ab dem sechsten Jahr auf 6,1 ct/kWh⁴. Ist der Ertrag geringer, verlängert sich die Laufzeit der hohen Anfangsvergütung entsprechend folgendem Modell: für jeweils 0,75 Prozent des Referenzbetrags, den der tatsächliche Ertrag den Wert von 150 Prozent unterschreitet, um zwei Monate. Diese Regelung kommt so besonders Anlagen im Binnenland mit schlechteren Stromerträgen zu Gute. Offshore-Anlagen unterliegen dagegen gesonderten Regelungen.

¹ vgl. Staiß, F.: Jahrbuch Erneuerbare Energien 02/03, (Hrsg.): Stiftung Energieforschung Baden-Württemberg, Radebeul - Bieberstein 2003, Seite 136 ff

² vgl. Staiß, F.: Jahrbuch Erneuerbare Energien 02/03, a.a.O., Seite 134

³ vgl. Themenpapier Windenergie, Stand Juli 2002, Seite 2

⁴ vgl. Themenpapier Windenergie, Stand Juli 2002, Seite 2

Bedenkt man, dass für eine heute übliche 1,5 MW Anlage 1,8 Mio. € Investitionskosten und ca. 50.000 € für weitere jährliche Aufwendungen (Pacht, Versicherung, Wartung, usw.) erbracht werden müssen, wird klar, dass die Wirtschaftlichkeit einer Anlage gewährleistet sein sollte⁵. Dies konnte durch das EEG sehr wohl erreicht werden.

Aufgrund der Tatsache, dass die Wirtschaftlichkeit der Windkraftanlagen zu üblichen Einspeisevergütungen unzureichend ist, stellt sich berechtigterweise die Frage, ob Windkraftanlagen die Energien, die für ihre Herstellung und Wartung aufgewendet wurden, im Laufe der Betriebszeit wieder „hereinspielen“ können. Schenkt man den Aussagen der Windkraftgegner Glauben, so amortisieren sich Windkraftanlagen erst nach mehreren Jahren, wenn nicht sogar Jahrzehnten. Oft hört man auch in der breiten Masse, dass Windräder energetisch völlig ineffizient wären. Folgendes kurze Beispiel ist im Internet zu finden und berechnet für eine 1.5 MW Anlage eine Amortisationszeit von ca. 5 Jahren. Der Autor stützt sich dabei auf einen vom Statistischen Bundesamt ermittelten Energiegehalt des „Produzierenden Gewerbes“ von 15,12 MJ Energie pro 1 Euro Investitionskosten⁶.

Energiegehalt der Anlage

Bau der Anlage:	1.500.000 €			
Infrastruktur, Fundament, Planung, Netzanbindung:	337.500 €			
Wartung (20 Jahre):	825.000 €			
Gesamtinvestition:	2.662.000 €			
Energiegehalt:	2.662.000 €	* 15,12 MJ/€	=	40.249.440 MJ

Amortisationszeit

Energiegehalt:	40.249.440 MJ			
Jährlicher Ertrag:	8.100.000 MJ		= ca. 5 Jahre	

Nach Angaben des Autors stellt dieser Wert einen absolut unteren Grenzwert dar, da noch nicht alle Aufwendungen berücksichtigt wurden, auf die er aber, bis auf Subventionen, nicht näher eingeht. Somit sollen sich, wenn alle Aufwendungen miteinbezogen werden, Windkraftanlagen erst nach 10 bis 20 Jahren amortisieren.

⁵ vgl. Kaltschmitt et al.: Erneuerbare Energien – Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte, Springer Verlag, 3. Auflage, Berlin 2003, Seite 315 ff

⁶ vgl. Höppner, J.: Anmerkungen zum Nutzen der Windkraft, Seite 3

Aufgrund von unterschiedlichen Aussagen in der Öffentlichkeit und der Unklarheit, welche Faktoren bei der Energiebilanzierung von Produkten berücksichtigt werden müssen, soll das Ziel dieser Arbeit sein, das Thema des „kumulierten Energieaufwandes“ speziell bei Windkraftanlagen näher zu betrachten. Hierbei soll der Leser einen umfassenden wissenschaftlichen Eindruck über Energiebilanzen von Produkten und Windkraftanlagen erhalten, um sich leichter ein eigenes Urteil mit Hilfe der in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse bilden zu können.

Im zweiten Kapitel wird allgemein auf das Themengebiet Energie eingegangen. Anhand von Statistiken und Szenarien wird die Notwendigkeit einer weltweiten Energiewende aufgezeigt. In diesem Zusammenhang werden ebenfalls nötige Strategien zur Lösung des Problems sowie das Potential erneuerbarer Energien näher erläutert.

Im dritten Kapitel wird der Begriff des kumulierten Energieaufwandes eingeführt und dessen bisheriges wissenschaftliches Verständnis und die daraus resultierenden verschiedenen Definitionsmöglichkeiten aufgezeigt. Auch die Frage nach dem Zustandekommen von energetischen Kennzahlen darf in dieser Rubrik nicht fehlen.

In den nächsten beiden großen Gliederungspunkten werden alle bekannten Methoden zur Ermittlung des kumulierten Energieaufwands beschrieben und grob beurteilt. Wie heutzutage üblich, ist die Computertechnik auch in diesem Bereich nicht mehr wegzudenken. Deswegen wird weiterhin ein Überblick über die Möglichkeiten von Softwareunterstützung im Hinblick auf die Sachbilanzierung und deren Anwendungsmöglichkeiten in der Praxis gegeben.

Im sechsten Kapitel werden schließlich die theoretischen Grundlagen des kumulierten Energieaufwands und seiner Berechnung auf das Beispiel einer Windkraftanlage übertragen. Dazu wird die Studie des Instituts für ökologisch verträgliche Energiewirtschaft (OeVE) herangezogen und deren Vorgehensweise näher erläutert. Um die Ergebnisse zu untermauern, wird ein kurzer Vergleich zwischen den in der Vergangenheit und den zur Zeit bekanntesten Studien über Energie- und Stoffbilanzen von regenerativen Energien gezogen und beurteilt.

Das siebte Kapitel soll die bis dahin gewonnenen Erkenntnisse zusammenfassen und mögliche Diskussionspunkte bei der Berechnung des kumulierten Energieaufwands speziell am Beispiel der Windkraftanlage herleiten.

Zum Abschluss werden einige kurze Vorschläge gemacht, welche Punkte bei der Bilanzierung von Windkraftanlagen verbessert werden könnten, um die Aussagekraft

zukünftiger Studien zu erhöhen. Diese Vorschläge werden den Bilanzierungsmethoden der aktuellsten Studie, die aber erst im März 2004 veröffentlicht wurde und deswegen keine weitere Berücksichtigung in früheren Kapiteln finden konnte, gegenübergestellt. Auch wird anhand der im Zuge des Projektes betrachteten Offshore-Windkraftanlagen ein kurzer Vergleich über die energetischen Schwerpunkte solcher Anlagen gezogen.

2 Energie

2.1 Energiebegriffe

Unter Energie wird nach Max Planck die Fähigkeit eines Systems verstanden, äußere Wirkung hervorzubringen, wie z.B. eine Kraft entlang einer Strecke⁷. Allgemein kann Energie in sechs verschiedene Bereiche aufgliedert werden: mechanische Energie, thermische Energie, elektrische Energie und chemische Energie. In der praktischen Anwendung äußert sich die Arbeitsfähigkeit der mechanischen, thermischen und elektrischen Energie in Arbeit, Wärme und Licht. Im Gegensatz dazu muss die chemische Energie sowie die Kern- und Strahlungsenergie erst durch Umwandlung in mechanische oder thermische Energie „arbeitsfähig“ gemacht werden. Dabei werden verschiedene Stufen der Energieumwandlung unterschieden. Aus der Primärenergie (z.B. Steinkohle) wird durch technische Umwandlung Sekundärenergie (z.B. Koks), die wiederum durch Verteilung in Endenergie (z.B. Kohle im Keller des Endverbrauchers) und schließlich in Nutzenergie (z.B. Wärme) umgeformt wird. Abbildung 2-1 veranschaulicht die einzelnen Vorgänge und stellt eine wichtige Grundlage für das weitere Verständnis der Arbeit dar.

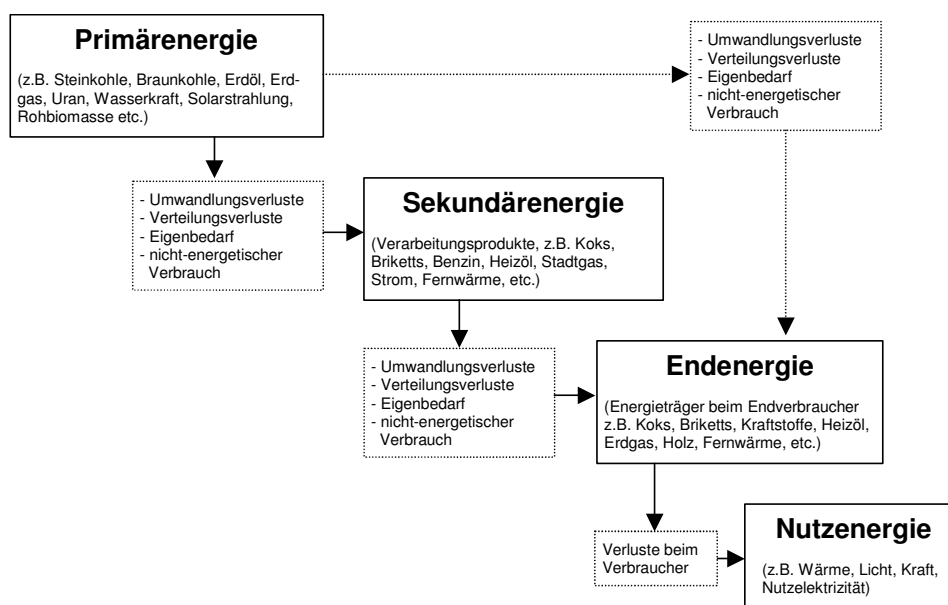


Abbildung 2-1 Energiewandlungskette⁸

⁷ vgl. Kaltschmitt et al.: Erneuerbare Energien – Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte, Springer Verlag, 3. Auflage, Berlin 2003, Seite 1 ff

⁸ entnommen aus: Kaltschmitt et al.: Erneuerbare Energien..., a.a.O., Seite 3

Die Einheit der Energie und der Arbeit ist Joule (J), Wattsekunde (Ws) und Newtonmeter (Nm). Die Leistung, die durch die Ableitung der Arbeit W und der Zeit t definiert ist, wird in Watt (W) gemessen. In Tabelle 2-1 sind die wichtigsten der heute gebräuchlichen Einheiten der Energietechnik angegeben. Vor allem die Umrechnung zwischen Joule und Kilowattstunden ist in folgender Arbeit von Relevanz.

Tabelle 2-1 Umrechnungsfaktoren zwischen verschiedenen Energieeinheiten⁹

	kJ	kcal	kWh	kg SKE	kg RÖE	1 m ³ Erdgas
1 Kilojoule (1kJ = 1000W)	1	0,2388	0,000278	0,000034	0,000024	0,000032
1 Kilokalorie (kcal)	4,1868	1	0,0001163	0,0000143	0,0001	0,00013
1 Kilowattstunde (kWh)	3,600	860	1	0,123	0,086	0,113
1 kg Steinkohleeinheit (SKE)	29,308	7000	8,14	1	0,7	0,923
1 kg Rohöleeinheit (RÖE)	41.868	10.000	11,63	1,428	1	1,319
1 m ³ Erdgas	31.736	7.580	8,816	1,083	0,758	1

Ebenso ist es von Bedeutung die Vorsätze der Zehnerpotenzen zu kennen, die sich folgendermaßen aufgliedern: 10^1 = Deka (da), 10^2 = Hekto (h), 10^3 = Kilo (k), 10^6 = Mega (M), 10^9 = Giga (G), 10^{12} = Tera (T), 10^{15} = Peta (P) und 10^{18} = Exa (E).

2.2 Energieträger

Unter einem Energieträger wird ein Stoff verstanden, aus dem direkt oder durch eine oder mehrere Umwandlungen End- bzw. Nutzenergie gewonnen werden kann. Energieträger werden deshalb nach dem Grad ihrer Umwandlung in Primär-, Sekundär- und Endenergieträger unterteilt. Des weiteren können die verfügbaren Energieträger zusätzlich zwischen fossil biogenen, fossil mineralischen und erneuerbaren Energieträgern unterschieden werden¹⁰.

- Unter fossil biogenen Energieträgern werden im Wesentlichen die Energieträger Kohle und flüssige bzw. gasförmige Kohlenwasserstoffe (Erdöl, Erdgas) verstanden, die biologischen Ursprungs sind.

⁹ entnommen aus: Quaschnig, V.: Regenerative Energiesysteme – Technologie, Berechnung, Simulation, Hanser Verlag, 3. Auflage, München 2003, Seite 2

¹⁰ vgl. Kaltschmitt et al.: Erneuerbare Energien..., a.a.O., Seite 4

- Unter fossil mineralischen Energieträgern werden die Stoffe zusammengefasst, die durch Kernspaltung oder Verschmelzung Energie bereitstellen (u. a. Uran, Wasserstoff) und durch geologische Prozesse gebildet wurden.
- Unter erneuerbaren Energien werden die Primärenergien verstanden, die als „unerschöpflich“ angesehen werden. Diese werden laufend aus den Energiequellen Solarenergie, geothermische Energie und Gezeitenenergie gespeist. Des Weiteren ist die von der Sonne eingestrahelte Energie für eine Vielzahl weiterer erneuerbarer Energien verantwortlich (z.B. Windenergie, Wasserkraft).

2.3 Energiehaushalt

2.3.1 Energievorräte

Zu den primären Energiequellen der Erde zählen neben den regenerativen Energieströmen aus Sonne, Erdwärme und Planetengravitation auch die nicht regenerativen Energiequellen der Atomkerne. Diese bilden zusammen unsere heutigen Energievorräte.

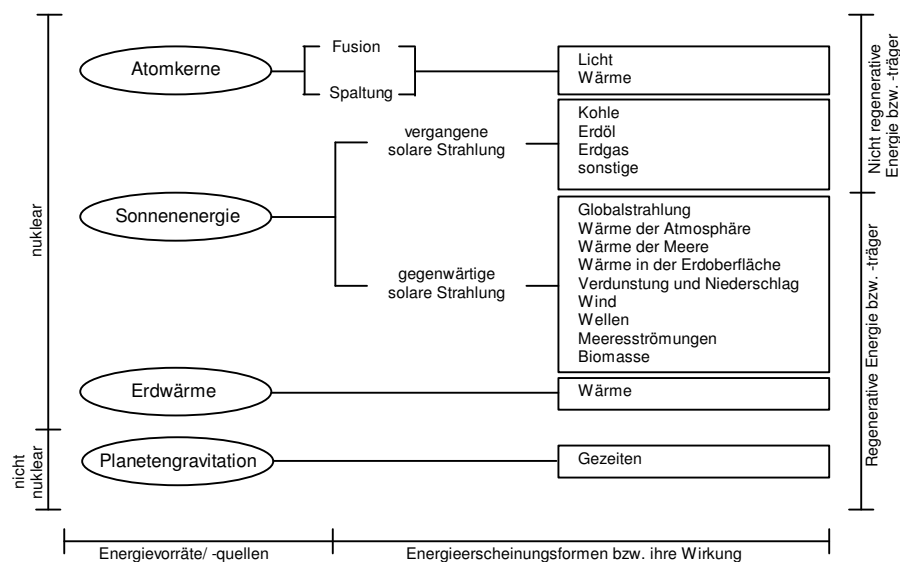


Abbildung 2-2 Energiequellen und ihre Erscheinungsformen bzw. Wirkungen¹¹

¹¹ entnommen aus: Kaltschmitt et al.: Erneuerbare Energien..., a.a.O., Seite 45

Der größte Teil der Energiereserven, der fossil biogene, wurde im Verlauf geologischer Zeiträume durch die Umsetzung solarer Strahlung in organische Substanz erzeugt. Vor allem durch die Ablagerungen von Plankton in den Weltmeeren entstanden biogene Energieträger, wie Kohle, Erdöl und Erdgas.

Die Sonne spielte dabei eine wichtige Rolle als „Energieförderer“, da sie jährlich ca. $5,6 \cdot 10^{24}$ J auf die Erde einstrahlt. 31 Prozent davon werden gleich von der Atmosphäre wieder in den Weltraum zurückgeführt. Der Rest hält mit der freigesetzten Energie der Planetengravitation und der Erdwärme und des jährlich weltweiten Primärenergieverbrauchs die Energiebilanz der Erde aufrecht.

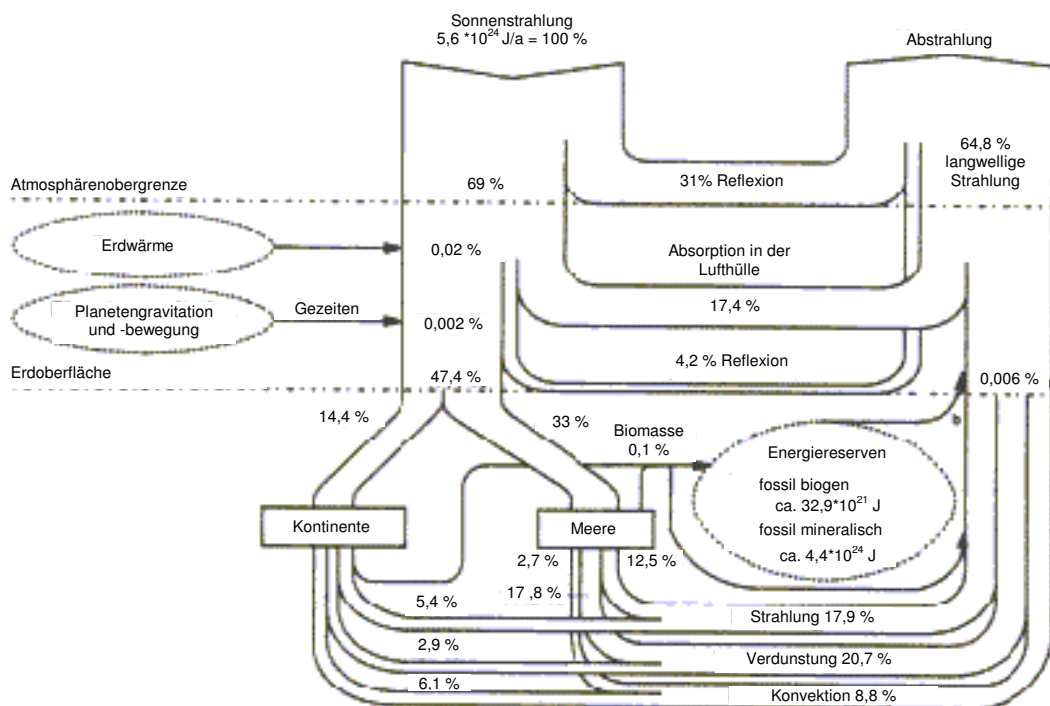


Abbildung 2-3 Energiebilanz der Erde¹²

2.3.2 Energieverbrauch

Die Geschichte der wichtigsten Primärenergieträger Kohle und Erdöl begann Ende des 18. Jahrhunderts mit dem Fortschreiten der Industrialisierung. Sie lösten Energieträger wie Holz und die Nutzung der Wasser- und Windkraft in zunehmenden Maße ab.

Aber erst nach der Weltwirtschaftskrise von 1929 stieg der Energieverbrauch weltweit drastisch an. Nach dem 2. Weltkrieg gewann das Erdgas, sowie in den

¹² entnommen aus: Kaltschmitt et al.: Erneuerbare Energien..., a.a.O., Seite 46

60er Jahren die Atomkraft, stetig an Bedeutung, die jedoch nur, im Gegensatz zur weit verbreiteten Meinung, einen geringen Anteil zur Deckung des derzeitigen Primärenergieverbrauchs beitragen. Deswegen werden 85 Prozent des Weltenergiebedarfs (ca. 351 EJ im Jahr 2001) durch Kohle, Erdöl und Erdgas gedeckt.

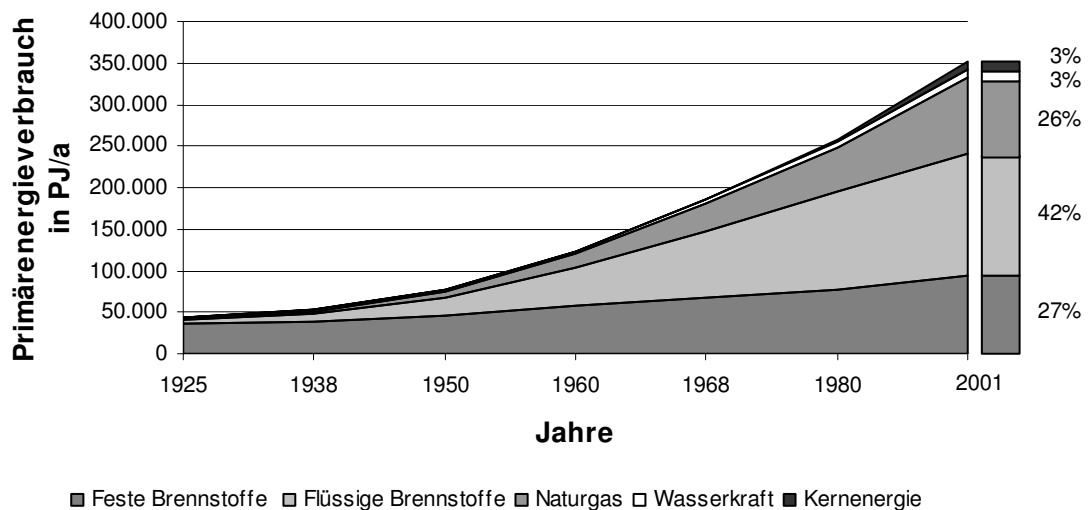


Abbildung 2-4 Weltprimärenergieverbrauch ohne Biomasse und Sonstige¹³

Da die sonstigen Energieträger wie Biomasse sowie Wind- und Solarenergie auf groben Schätzwerten beruhen, sind sie in der Grafik nicht enthalten. Zusammen hatten sie jedoch im Jahr 1999 einen Anteil von ca. 47.000 PJ (ca. 13 Prozent) am weltweiten Primärenergieverbrauch.

Zu bemerken ist, dass der Energiebedarf der Erde sehr ungleichmäßig verteilt ist. Vom gesamten Energiebedarf entfallen knapp 21 Prozent auf Europa, 30 Prozent auf Nordamerika, ca. 4 Prozent auf Zentral- und Südamerika, knapp 15 Prozent auf die ehemalige UdSSR und den nahen Osten, rund 3 Prozent auf Afrika und etwa 27 Prozent auf Asien und den Pazifischen Raum (im westlichen Australien und Neuseeland).

Der Primärenergieverbrauch in Deutschland setzt sich jedoch im Vergleich zum Rest der Welt im Jahre 2001, wie in Abbildung 2-5 dargestellt, folgendermaßen zusammen:

¹³ entnommen aus: Quaschnig, V.: Regenerative Energiesysteme..., a.a.O., Seite 8; zitiert nach: Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ des 11. Deutschen Bundestages (Hrsg.): Schutz der Erdatmosphäre, Economica Verlag, Bonn 1995 und *BP Statistical Review of World Energy 2002*, London 2002

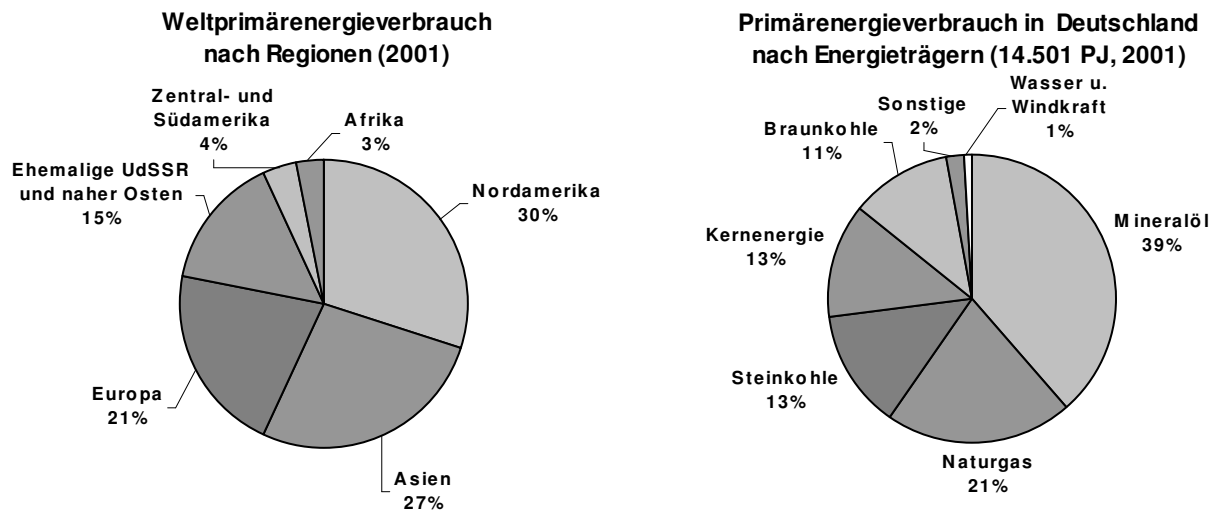


Abbildung 2-5 Primärenergieverbrauch der Welt¹⁴ und in Deutschland¹⁵

2.4 Energieszenarien

2.4.1 Reichweite konventioneller Energieträger

Unsere heutige Energieversorgung basiert, wie man aus den vorhergehenden Abschnitten entnehmen kann, zum größten Teil auf fossil biogenen und fossil mineralischen Energieträgern¹⁶. Doch im Laufe des letzten Jahrhunderts verbrauchte der Mensch einen Großteil dieser Vorräte, wie es auch am steigenden Weltprimärenergiebedarf zu erkennen ist. Deswegen wird es in Zukunft immer schwieriger werden, abbaufähige fossile Energieträger zu finden. Ein eindeutiges Zeichen dieser Entwicklung sind Hochseebohrinseln, z.B. in der Nordsee, mit Hilfe derer mit enormem technischen Aufwand versucht wird, den Bedarf an Erdöl und Erdgas zu befriedigen.

Aufgrund dieser Tatsache existieren viele Berechnungen über die Reichweite unserer fossilen Energieträger. Im Allgemeinen hört man des öfteren Zahlen, die eine große Schwankungsbreite aufweisen und deshalb auch nicht als realistisch angesehen oder für übertrieben bezeichnet werden. Sicher ist jedoch anhand einiger Studien, dass Erdöl und Erdgas bei anhaltendem oder steigendem Bedarf noch in

¹⁴ entnommen aus Kaltschmitt et al.: Erneuerbare Energien..., a.a.O., Seite 5; zitiert nach: BP *Statistical Review of World Energy 2002*, London 2002

¹⁵ entnommen aus Kaltschmitt et al.: Erneuerbare Energien..., a.a.O., Seite 8; zitiert nach: *Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen*, Auswertungstabellen zur Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland 1990-2000, Berlin 2002

¹⁶ vgl. Quaschnig, V.: *Regenerative Energiesysteme...*, a.a.O., Seite 11 ff

diesem Jahrhundert erschöpft sein werden. Die Kohlevorräte hingegen werden nach heutigen Prognosen noch über einen längeren Zeitraum verfügbar sein.

Tabelle 2-2 Reserven fossiler Energieträger¹⁷

	Erdöl	Erdgas	Kohle
Kumulierte Förderung bis 2000	124,6 Mrd. t	69,6 Bill. m ³	-
Sicher gewinnbare Reserven	143,0 Mrd. t/ 5.987 EJ	155,1 Bill. m ³ 4922 EJ	984 Mrd. t SKE 28.852 EJ
Förderung im Jahr 2001	3,58 Mrd. t/ 150 EJ	2,46 Bill. m ³ 78 EJ	4,56 Mrd. t SKE 134 EJ
Reichweite bei heutiger Förderung	40 Jahre	63 Jahre	216 Jahre
Zusätzlich gewinnbare Reserven	88,6 Mrd. t	197,9 Bill. m ³	6.668 Mrd. t SKE
Reichweite sicher und zusätzlich gewinnbarer Reserven	65 Jahre	143 Jahre	-

Das Uranvorkommen der Erde beträgt Schätzungen zufolge ca. 27 Mio. t. Davon sind ca. 6,2 Mio. t bekannt. Hiervon sind aber nur die Hälfte der Vorkommen wirtschaftlich nutzbar. Ginge man nun davon aus, die verschwindenden fossil biogenen Energieträger durch Kernenergie zu kompensieren, würde man spätestens an folgendem Rechenbeispiel scheitern:

Tabelle 2-3 Uranvorräte¹⁸

	Vorräte zu Gewinnungskosten von		Insgesamt
	bis 80 US \$/Kg U	80-130 US \$/Kg U	
Hinreichend sicher nachgewiesene Vorräte	2,090 Mio. t	1,062 Mio. t	3,152 Mt/ 1.291 EJ
Geschätzte zusätzliche Vorräte	0,931 Mio. t	0,484 Mio. t	1,415 Mt/ 580 EJ

1. Option: Die Hälfte des Weltenergiebedarfs soll durch Kernenergie gedeckt werden, das entspräche ungefähr 200 EJ.

=> 1.871 EJ (Sichere und geschätzte Vorräte) /200 EJ pro Jahr = 9,3 Jahre

¹⁷ entnommen aus: Quaschnig, V.: Regenerative Energiesysteme..., a.a.O., Seite 11; zitiert nach: Bundesministerium für Wirtschaft (Hrsg.): *Energiedaten, Bonn, verschiedene Jahrgänge* und *Bp Statistical Review of World Energy 2002*, London 2002

¹⁸ entnommen aus: Quaschnig, V.: Regenerative Energiesysteme..., a.a.O., Seite 12; zitiert nach: Prognos (Hrsg.): *Energierport II: Die Energiemärkte Deutschlands im zusammenwachsenden Europa*, Schäfer Poeschel, Stuttgart 1996

2. Option: Wir gehen unter sonst gleich bleibenden Bedingungen davon aus, dass alle 27 Mio. t förderbar sind, das entspräche ca. 11067 EJ.

$$\Rightarrow 11067 \text{ EJ} / 200 \text{ EJ pro Jahr} = 55 \text{ Jahre}$$

3. Option: Die Brütertechnologie erhöht den Wirkungsgrad um das 60 fache, der komplette Weltenergiebedarf soll durch Kernenergie gedeckt werden und die Vorräte entsprächen wieder 1.871 EJ.

$$\Rightarrow (1.871 / 400) * 60 = 280 \text{ Jahre}$$

Natürlich könnte man die verschiedenen Parameter bis ins Unendliche kombinieren und diskutieren. Doch die Aussage des Beispiels liegt nahe: Auch die Kernenergie wird die zukünftige Energiekrise nicht lösen, allenfalls hinauszögern. Selbst wenn man durch Brüterreaktoren den Wirkungsgrad deutlich erhöhen könnte und sich damit erheblichen Risiken aussetzen würde, wäre die Energiefrage langfristig nicht gelöst.

Weiterhin wird angenommen, dass der Weltprimärenergiebedarf konstant bleibt. Ergebnisse verschiedener Studien belegen dies jedoch nicht, wie dem folgenden Diagramm zu entnehmen ist.

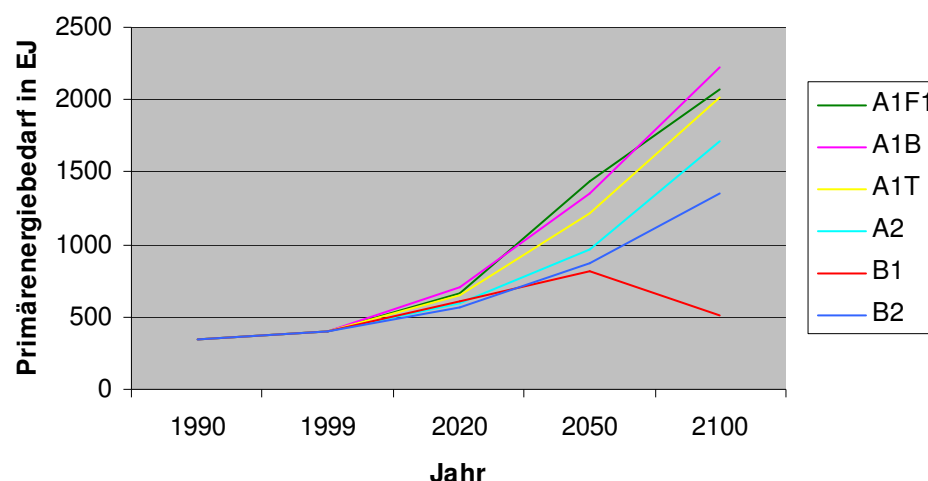


Abbildung 2-6 Entwicklungsszenarien des Primärenergiebedarfs weltweit¹⁹

¹⁹ entnommen aus: Quaschnig, V.: Regenerative Energiesysteme..., a.a.O., Seite 37; zitiert nach: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): *Third Assessment report of Working Group I, Summary of policy Makers*, Shanghai 2001

Die Schwankungsbreite von sechs Untersuchungen erstreckt sich von 514 EJ bis 2.226 EJ Primärenergiebedarf bis zum Jahre 2100. Das würde im extremsten Falle eine Verfünffachung gegenüber heute (ca. 450 EJ) bedeuten. Daran wird ersichtlich, dass eine genaue Bestimmung der Reichweite konventioneller Energieträger von vielen Faktoren abhängig ist und somit nicht genau vorhergesagt werden kann.

2.4.2 Nachhaltige Energieversorgung in Deutschland bis 2050

In Anbetracht der Verknappung fossiler Energieträger²⁰ und des Treibhauseffektes sind sich Experten sicher, dass die heutige und die durch den Trend (abnehmende Bevölkerungszahlen, bessere Wirkungsgrade bei Motoren und Kraftwerken usw.) beschriebene Entwicklung den Kriterien der Nachhaltigkeit nicht genügen wird. Defizite wie die weiterhin starke Dominanz fossiler Energieträger, die 2050 noch 90 Prozent des Primärenergiebedarfs decken würden, die starke Abhängigkeit von Importenergien, das Verfehlen aller Klimaschutzziele (Kyoto-Protokoll) und die mangelnde Berücksichtigung von Umweltkosten wären die Folge.

Ein mögliches Szenario wird von der Enquete Kommission, dem IER und den Autoren der UBA Studie vorgelegt. Es beruht auf drei Stützpfeilern: Energieeinsparung, Erhöhung der Energieeffizienz und Ausbau der erneuerbaren Energien. Dabei geben fünf Punkte den wesentlichen Inhalt des Vorhabens wieder:

- Minderung des Primärenergiebedarfs bis 2050 auf 61 Prozent (Enquete-IER) bis 46 (UBA) des heutigen Wertes.
- Steigerung der Energieproduktivität während der nächsten 20 – 30 Jahre um durchschnittlich mindestens 3 Prozent pro Jahr.
- Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien am Primärenergieverbrauch bis 2050 auf 40 Prozent (UBA) bis 50 Prozent (Enquete-IER).
- Minderung des Verbrauchs fossiler Energieträger bis 2050 auf ca. ein Drittel des heutigen Wertes.
- Als Zwischenziel: Reduktion der Treibhausgasemissionen um 40 Prozent sowie Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung um den Faktor zwei bis drei.

²⁰ vgl. Staiß, F.: Jahrbuch Erneuerbare Energien 02/03, (Hrsg.): Stiftung Energieforschung Baden-Württemberg, Radebeul - Bieberstein 2003, Seite 234 ff

Zu diesem Szenario ist hinzuzufügen, dass es eine Option von vielen ist, dessen Realisierung aber im Vergleich zu anderen Studien als positiv eingeschätzt werden kann. Weiterhin wird ein hoher Beitrag der regenerativen Energien zur Energieversorgung angenommen, d.h. dass die Verpflichtungen aus dem Kyoto-Protokoll und den politischen Zielen, regenerative Energien bis 2050 auf 50 Prozent gegenüber 2000 zu erhöhen, eingehalten werden müssen.

2.5 Regenerative Energien

Wie im vorhergehenden Abschnitt dargestellt, setzt man große Hoffnungen in den Ausbau regenerativer Energien und deren Nutzbarmachung. Dazu existieren mehrere Möglichkeiten:

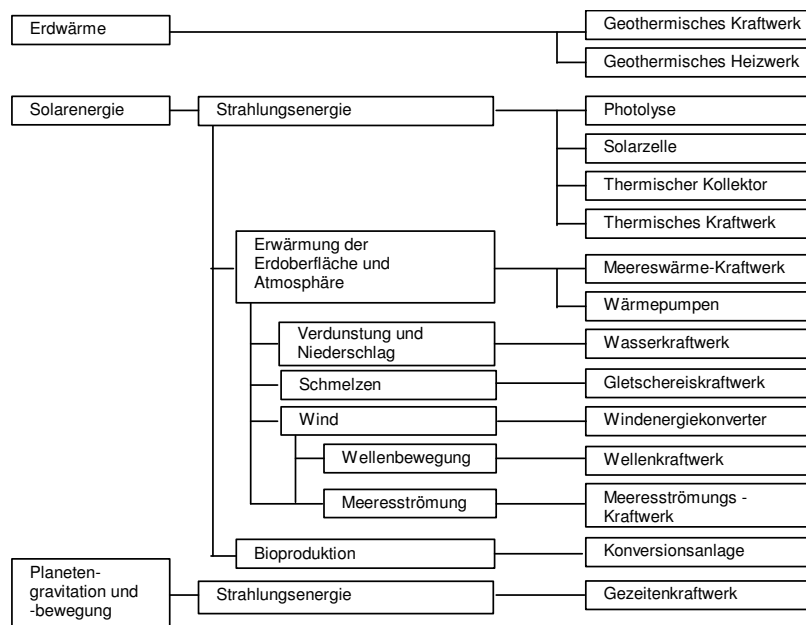


Abbildung 2-7 Möglichkeiten zur Nutzung des regenerativen Energieangebots²¹

Nur wenige Varianten haben das Potential eine großflächige und konstante Stromerzeugung, wie sie in Zukunft benötigt wird, bereitzustellen. Die größten Potentiale werden infolgedessen der Stromerzeugung durch Windkraft, Wasserkraft, Photovoltaik und Biomasse zugesprochen.

²¹ entnommen aus: Kaltschmitt et al.: Erneuerbare Energien..., a.a.O., Seite 12

Die Windenergie hat in den vergangenen Jahren in Deutschland und auch weltweit einen unerwarteten Aufschwung erlebt. Aber auch Photovoltaikanlagen wurden durch das 100.000 Dächerprogramm sowie Biogasanlagen durch günstige Darlehen, Subventionen und erhöhte Vergütungssätze gefördert.

Schon alleine das Potential der jährlichen Energiemenge der Sonneneinstrahlung von $3,9 \cdot 10^{24}$ J auf der Erdoberfläche entspricht dem 10.000fachen des Weltenergiebedarfs pro Jahr und damit auch weit mehr als der gesamten Energiemenge aller verfügbaren Energiereserven. Gelänge es nur ein Zehntausendstel der Sonnenenergie zu nutzen, würde damit der Energiebedarf der Menschheit gedeckt werden können.

Diesen Umstand soll der Energiewürfel in Abbildung 2-8 graphisch veranschaulichen. Das Volumen des Würfels steht synonym für die Menge der jährlich durch die Sonne eingestrahlten Energie. Die kleinen Würfel auf der linken unteren Seite sollen die im Verhältnis dazu auf der Erde noch verfügbaren fossilen Energiereserven darstellen. Der blaue Würfel auf der rechten unteren Seite steht als Synonym für den jährlichen Energieverbrauch der Menschheit. Die Frage stellt sich nun, ob es uns technisch gelingen wird, dieses Zehntausendstel, vor allem im Hinblick auf die Knappheit und Güte der für die Nutzung regenerativen Energien zur Verfügung stehenden Flächen, zu nutzen.

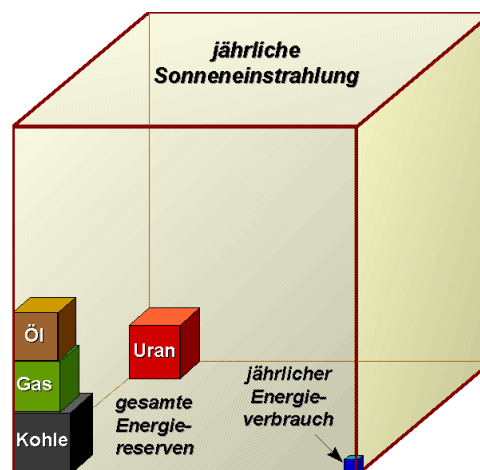


Abbildung 2-8 Energiewürfel²²

²² entnommen aus: Quaschnig, V.: Regenerative Energiesysteme..., a.a.O., Seite 25

2.6 Beurteilung

Im zweiten Kapitel wurde neben allgemeinen Informationen anhand von Zahlen und Statistiken kurz aufgezeigt, dass durch den in den letzten Jahrzehnten drastisch gestiegenen Energiebedarf die konventionellen Energieträger schnell aufgebraucht sein werden. Daher ist es höchste Zeit Wege zu finden, die es ermöglichen, unseren heutigen Lebensstandard und unsere Existenzgrundlage zu erhalten. Dabei ist es notwendig, nicht nur die knappen Ressourcen, sondern auch die Emissionen und Umweltverschmutzung, bedingt durch die Nutzbarmachung fossiler Energieträger, zu berücksichtigen.

Die Kernenergie spielt in dieser Beurteilung sicherlich eine zwiespältige Rolle, da sie nach Meinung einiger Wissenschaftler als „saubere“ Energie angesehen wird und somit auch einen großen Anteil am zukünftigen Energiemix beitragen könnte. Doch alleine aus ethischen Gründen sollte diese Art Energie nicht weiter verfolgt werden, zumal Atomkraft die Energiefrage nur über weitere Jahre hinauszögern würde und somit keine wirkliche Alternative zu regenerativen Energien darstellt.

Energieszenarien von verschiedenen wissenschaftlichen Instituten basieren deswegen oft auf einem drastischen Anstieg erneuerbarer Energien. Deren großflächiger Ausbau verläuft im Verhältnis zu den angestrebten Zielen aber eher schleppend. Mangelnde Wirtschaftlichkeit, Widerstand der konventionellen Energieversorger, mangelnde staatliche Förderung in den meisten Ländern der Welt und viele technische Probleme, wie die schwankende Bereitstellung und das Speicher- bzw. Verteilungsproblem, bremsen deren Aufschwung beträchtlich. Das größte Problem stellen hierbei jedoch die in der Anfangsphase steigenden Energiepreise und die politische Lage vieler Länder dar. Nichts desto trotz wird man keine andere Wahlmöglichkeit haben, als diese Energien weltweit und in großem Stile zu fördern und auszubauen.

Eine Grundvoraussetzung für die langfristige Wirtschaftlichkeit und die Existenzberechtigung der erneuerbaren Energien ist jedoch die Schaffung eines Mehrwertes in energetischer Hinsicht. Würde z.B. ein Windrad nicht die Menge an Energie, oder nur geringfügig mehr produzieren, wie für seine Herstellung benötigt wurde, wären alle Überlegungen umsonst. Finanzielle Wirtschaftlichkeit und energetische Wirtschaftlichkeit hängen zwar nahe zusammen, können aber z.B. durch Subventionen und preisliche Bewertungsspielräume differieren.

3 Kumulierter Energieaufwand

Die Frage nach dem kumulierten Energieaufwand eines Produkts oder einer Dienstleistung und der Methodik der Ermittlung war lange Zeit von geringem Interesse. Zwischen 1950 und 1974 beschäftigten sich einige Autoren, wie P. Chapman mit diesem Thema²³. Doch erst 1974 wurde auf einer IFIAS (Institut for International Advanced Studies) Tagung erstmals versucht, international standardisierte Definitionen und Abgrenzungen festzulegen. Bis heute gibt es aber noch keine wirklich länderübergreifenden einheitlichen Richtlinien, die es erlauben, Energiewerte ohne Komplikationen zu vergleichen. Deswegen werden im folgenden Abschnitt sowohl einige deutsche als auch internationale Richtlinien, Normen und Definitionsvorschläge, die sich mit dem kumulierten Energieaufwand auseinandersetzen, vorgestellt und deren wesentliche Inhalte beschrieben.

3.1 VDI-Richtlinie 4600

3.1.1 Definition über den Lebenszyklus

Der kumulierte Energieaufwand wird heute speziell nach der VDI-Richtlinie 4600 der VDI Gesellschaft Energietechnik definiert²⁴. Er beschreibt den gesamten Energieaufwand, der im Zusammenhang mit der Herstellung, Nutzung und Entsorgung eines Gegenstandes steht und setzt sich vereinfacht nach Gleichung 3-1 zusammen.

$$KEA = KEA_H + KEA_N + KEA_E \quad \text{Gleichung 3-1}$$

Als KEA_H wird der primärenergetische Energieaufwand bezeichnet, dessen Summe alle Energieaufwendungen bei der Herstellung selbst, der Gewinnung, Verarbeitung, Herstellung und Entsorgung der Fertigungs-, Hilfs- und Betriebsstoffe und Betriebsmittel sowie der Transporte ergeben.

Als KEA_N wird der primärenergetische Energieaufwand bezeichnet, der sich aus dem Betrieb oder der Nutzung eines Gegenstandes oder einer Dienstleistung

²³ vgl. Mauch, W.: Kumulierter Energieaufwand für Güter und Dienstleistungen – Basis für Ökobilanzen, IFE Schriftenreihe Heft 26, Lehrstuhl für Energie- und Anwendungstechnik, München 1993, Seite 6 ff

²⁴ vgl. Schaefer, H.: Zielvorstellungen und grundlegende Prinzipien der KEA-Richtlinie, VDI-Berichte 1218, VDI Verlag, Düsseldorf 1995, Seite 1 ff

zusammensetzt. Diese Summe beinhaltet neben dem Betriebsenergieverbrauch auch den kumulierten Energieaufwand für die Herstellung und Entsorgung von Ersatzteilen, von Hilfs- und Betriebsstoffen sowie von Betriebsmitteln, die für den Betrieb und die Wartung erforderlich sind. Dabei ist der Energieaufwand für Transporte miteinzubeziehen.

Als KEA_E wird der primärenergetische Energieaufwand bezeichnet, der sich bei der Entsorgung eines Gegenstandes oder Teilen eines Gegenstandes, d.h. dem endgültigen Ausschleusen aus dem Nutzungskreislauf, ergibt. Hierbei sind auch die Energieaufwendungen enthalten, die für die Herstellung und Entsorgung von Hilfs- und Betriebsstoffen sowie von Betriebsmitteln und für Transporte erforderlich sind.

3.1.2 Definition über beteiligte Primärenergieträger

Eine weitere Möglichkeit den KEA innerhalb der Richtlinie zu definieren folgt daraus, dass sich dieser aus dem kumulierten Prozessenergieaufwand (KPA) und dem nicht-energetischen Aufwand (KNA) zusammensetzen lässt²⁵. So besteht der kumulierte Prozessenergieaufwand aus allen Endenergien (EE), z.B. Wärme, Kraft, Licht und sonstige Nutzelektrizitätserzeugung, die zur Produktion eines Gutes benötigt werden. Der kumulierte nicht-energetische Aufwand (KNA) beinhaltet alle nicht-energetisch eingesetzten Energieträger, z.B. Öl bei der Kunststoffherstellung oder Erdgaseinsatz für die Herstellung von Schmierstoffen, als auch den stoffgebundenen Energieinhalt (SEI) aller anderen brennbaren Stoffe, z.B. als Werkstoff verarbeitete Biomasse.

Zum Vergleich und zur Addition der verschiedenen Endenergien und nicht-energetischen Aufwendung werden diese mit Bereitstellungsnutzungsgraden gewichtet und auf Primärenergie umgerechnet. Somit kann der KEA als die Summe der primärenergetisch bewerteten Endenergien und des primärenergetisch bewerteten Energieinhalts des nicht-energetischen Verbrauchs und des stoffgebundenen Energieinhalts nach Gleichung 3-2 dargestellt werden. Der Bereitstellungsnutzungsgrad g wird hierbei als Quotient aus Heizwert und kumuliertem Energieaufwand für die Bereitstellung des Energieträgers definiert.

²⁵ vgl. Wagner H.-J.: Kumulierter Energieaufwand (VDI-Richtlinie 4600) und energetische Amortisationszeit – Methoden, Beispiele, Perspektiven – Produktbezogene Ökobilanzen, IV UTECH Berlin - Umwelttechnologieforum 1996, 26.02 – 01.03.96, Seite 6 ff

Unter dem Heizwert versteht man die bei einer Verbrennung nutzbare Wärmemenge, bezogen auf die Menge des eingesetzten Brennstoffs²⁶. Im Gegensatz dazu wird beim Brennwert die Kondensationswärme des bei der Verbrennung gebildeten Wassers hinzugezählt. So ist der Heizwert von trockenem Holz ca. 7 Prozent geringer als sein Brennwert.

$$KEA = KPA + KNA = \sum_{i=1}^l \left(\frac{EE_i}{g_i} \right) + \sum_{j=1}^m \left(\frac{NEV_j}{g_j} \right) + \sum_{k=1}^n \left(\frac{SEI_k}{g_k} \right) \quad \text{Gleichung 3-2}$$

KPA	: kumulierter Prozessenergieaufwand [MJ]
KNA	: kumulierter nicht-energetischer Aufwand [MJ]
EE	: Endenergie [MJ]
NEV	: nicht-energetischer Verbrauch [MJ]
SEI	: stoffgebundener Energiegehalt [MJ]
g	: Bereitstellungsnutzungsgrad [MJ _{End} /MJ]

$$g = \frac{H_U}{KEA_{BE}} \quad \text{Gleichung 3-3}$$

H_U	: Heizwert eines Energieträgers [MJ]
KEA_{BE}	: kumulierter Energieaufwand für die Bereitstellung des Energieträgers [MJ]

Als anschauliches Beispiel für den Bereitstellungsnutzungsgrad wäre die Unterscheidung zwischen Primärenergie und Endenergie bei Strom zu nennen. Zur Erzeugung einer Kilowattstunde Strom werden ungefähr 2,97 Kilowattstunden Primärenergie (Strommix-Deutschland) benötigt, d.h. zwei Drittel des Brennstoffes werden als Abwärme, Reibungsverluste usw. an die Umwelt abgegeben. Das bedeutet nun, dass man die Endenergie Strom mit dem Faktor 2,97 multiplizieren muss, um deren ursprünglichen Primärenergiegehalt zu erfahren. In diesem Zusammenhang gibt die Richtlinie auch Vorschläge zur Festlegung des Nutzungsgrads der verschiedenen Stromerzeugungstechnologien (Stromerzeugung aus Kernenergie, fossiler Energie und regenerativer Energie). Dieser Punkt ist jedoch sehr umstritten und soll hier nicht weiter ausgeführt werden.

3.1.3 Bestimmung der Bilanzgrenzen

Ein wichtiger Kernpunkt der VDI-Richtlinie ist die Festlegung bestimmter Bilanz- bzw. Systemgrenzen und Bewertungsvorschriften, um ein einheitliches Vorgehen bei der

²⁶ vgl. www.net.lexikon.de/Heizwert.html, Datum: 7. März 2004

Bilanzierung zu gewähren²⁷. Der Bilanzraum gibt vor, welche Produktionsfaktoren erfasst und bewertet werden sollen, die anhand folgender Graphik verdeutlicht werden.

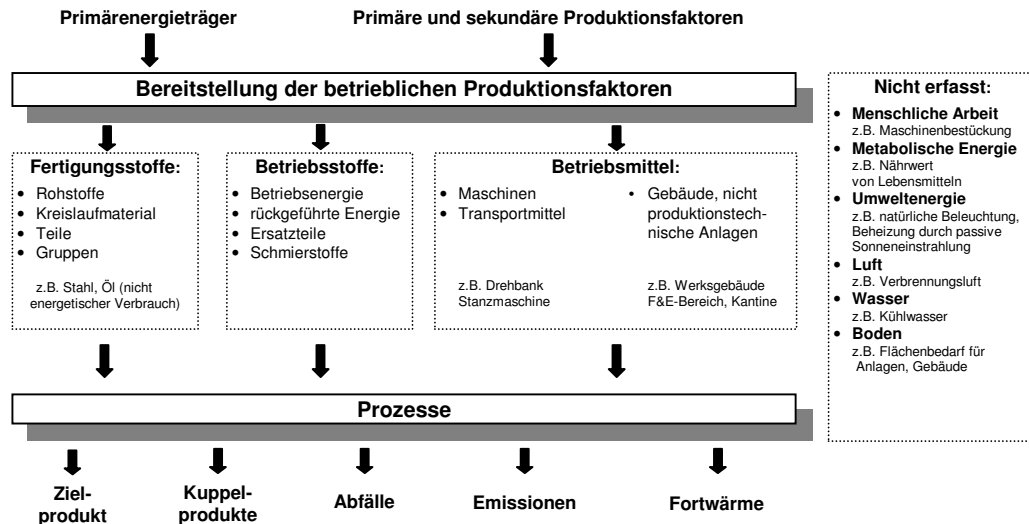


Abbildung 3-1 Stoff und Energieströme eines Herstellungsprozesses²⁸

Weiterhin können im Bezug auf den Bilanzraum folgende Abgrenzungen getroffen werden²⁹:

- Zeitliche Abgrenzung (d.h. die Herstellung eines Gutes umfasst einen längeren Zeitraum: Gewinnung der Rohstoffe – Herstellung der Vorerzeugnisse – Endmontage – Deponierung)
- Technologische Abgrenzung (Berücksichtigung der Fertigung nach deren technischem Stand, Auslastung und Organisation)
- Räumliche Abgrenzung (Berücksichtigung regionaler, nationaler und wirtschaftlicher Grenzen)

Die Bilanzgrenzen eines ökonomischen Gutes sollten sich im Idealfall vom Rohstoff in der Lagerstätte bis zur Endlagerung bzw. Deponierung erstrecken. Da jedoch eine lückenlose Erfassung aller Vor- und Nebenkette aufgrund der komplexen Zusammenhänge realer Produktionsprozesse fast nicht möglich ist, ist es wichtig, eine Abgrenzung zwischen relevanten und nicht relevanten Prozessketten

²⁷ vgl. Häuslein, A., Möller, A.: Möglichkeiten und Grenzen zur Berechnung des kumulierten Energieaufwandes, VDI-Berichte 1218, VDI Verlag, Düsseldorf 1995, Seite 52-53

²⁸ entnommen aus: Corradini, R., Hutter, C., Köhler, D.: Ganzheitliche Bilanzierung von Grundstoffen und Halbzeugen, Teil I: Allgemeiner Teil, Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München 1999, Seite 16

²⁹ vgl. Wagner H.-J.: Kumulierter Energieaufwand (VDI-Richtlinie 4600) und energetische Amortisationszeit ..., a.a.O., Seite 9

vorzunehmen. Dies wird mit Hilfe sogenannter Abgrenzungskriterien erreicht, die nach Abbildung 3-1 die Parameter für den Bilanzraum vorgeben. Im Verlauf der Ermittlung des KEA sind außerdem im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse Untersuchungen mit variierenden Bilanzgrenzen vorzunehmen, um die Auswirkungen der verschiedenen Bilanzgrenzen abschätzen zu können (z.B. Parametervariation sowohl mit als auch ohne Hilfs- und Betriebsstoffe)

3.1.4 Kombination von Mikro- und Makroanalyse

Ähnlich wie bei der Bestimmung der Bilanzgrenzen stellt sich auch hinsichtlich des Detaillierungsgrades der Untersuchung die Frage nach einer geeigneten Abschätzung. Eine vollständige Prozesskettenanalyse (Analyse der verschiedenen Herstellungsprozesse) wäre aufgrund der Datenmenge und des damit verbundenen Aufwandes nicht handhabbar. Da eine reine Makroanalyse (Analyse anhand von volkswirtschaftlichen Daten) nur ungenaue Ergebnisse liefert, ist eine Kombination aus Mikro- und Makroanalyse, die in Kapitel fünf näher erläutert werden, anzustreben.

3.1.5 Kuppelprodukte

Bei zahlreichen Produktionsprozessen entstehen neben dem eigentlichen Zielprodukt zwangsläufig eine Reihe von weiteren Produkten (z.B. die Raffination von Rohöl). Dies verlangt aber eine Aufteilung des Energieaufwandes, da nur ein Teil der Energie dem untersuchten Produkt zuzuordnen ist. Zu diesem Zweck ist die Festlegung so genannter Kuppelfaktoren nötig, die genauso durch eine Sensitivitätsanalyse nachzuprüfen sind. Dies ist ebenfalls aus der Kosten- und Leistungsrechnung zur Kalkulation der Preise bei Kuppelprodukten bekannt³⁰, wie z.B. die Verteilungs- oder Schlüsselungsmethode, bei der die Kosten unter anderem auch nach Heizwerten verteilt werden können. Zur Aufteilung des KEA auf Ziel- und Kuppelprodukte werden physische (Masse), energetische (Heizwert), wirtschaftliche (Marktpreis) und technische Größen herangezogen. Damit lehnt sich dieses Verfahren an die in der KLR üblichen Methoden an.

³⁰ vgl. Jorasz, W.: Kosten- und Leistungsrechnung, Schäfer-Poeschel Verlag, 2. Auflage, Stuttgart 2000, Seite 200

3.1.6 Recycling

Stoffe, die das Ergebnis eines Produktionsprozesses sind und wieder in die Produktion einfließen, müssen hinsichtlich ihres Energiegehalts Berücksichtigung finden. Dabei werden Sekundärstoffe mit Ausnahme ihres Heizwertes als energiefrei bewertet, da der Energieaufwand ihrer Vorgeschichte schon im Primärprodukt enthalten ist. Bilanziert werden aber Transportprozesse sowie Aufbereitung und Sortierung der Produkte im Recyclingprozess. Der Vorschlag der Richtlinie ist eine von vielen Möglichkeiten Recyclingprodukte zu bewerten. Deswegen gibt dieser Punkt unter Experten immer wieder Anlass zu Diskussionen.

3.2 Definition im Zuge der Lebenszyklusanalyse

Die Lebenszyklusanalyse (LCA) versteht sich als ein Instrument zur systematischen Erfassung und Bewertung von Produkten und Dienstleistungen, mit deren Hilfe Schlussfolgerungen zu den ökologischen, ökonomischen, technischen und sozialen Auswirkungen getroffen werden können³¹. Dabei werden in der deutschen Literatur mehrere Bezeichnungen für LCA verwendet, deren Schwerpunkte verschiedene Bereiche umfassen (vgl. Tabelle 3-1).

Tabelle 3-1 Deutsche Bezeichnungen für Lebenszyklusanalysen³²

Verfahren	Bilanzobjekt	Dimension
Ökobilanz (/ISO 14040/ ff.)	Produkt (einschließlich Dienstleistung)	Ressourcen, menschliche Gesundheit, ökologische Wirkungen
Produktlinienanalyse (Öko-Institut)	Produkt	Umwelt, Ökonomie, Gesellschaft
Ganzheitliche Betrachtung von Energiesystemen (PSI)	Energiesystem, -technik	Umwelt, menschliche Gesundheit, Unfallrisiken, Ökonomie, soziale Aspekte
Ganzheitliche Bilanzierung (IKP)	Produkte, Technologie, Projekt	Umwelt, Ökonomie, Technik

Die Ökobilanz ist dabei ein Verfahren, dass sich hauptsächlich mit Ressourcen sowie Energie- und Stoffströmen befasst. Die Berechnung des KEA ist zwar ein Teil der Ökobilanz, der Schwerpunkt liegt jedoch mehr auf der Ermittlung von Emissionen und deren Auswirkungen. Da es sich hierbei um ein international genormtes

³¹ vgl. Marheineke, T.: Lebenszyklusanalyse fossiler, nuklearer und regenerativer Stromerzeugungstechniken, Dissertation, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Stuttgart 2002, Seite 9

³² entnommen aus Marheineke, T.: Lebenszyklusanalyse..., a.a.O., Seite 9

Verfahren handelt, hat es auch große Verbreitung unter den Anwendern gefunden. Anhand des folgenden Schaubilds soll das Vorgehen beim Erstellen einer Ökobilanz kurz erläutert werden. Im Zusammenhang mit der Berechnung des KEA ist aber nur der Bereich Zieldefinition und Sachbilanz von Interesse.

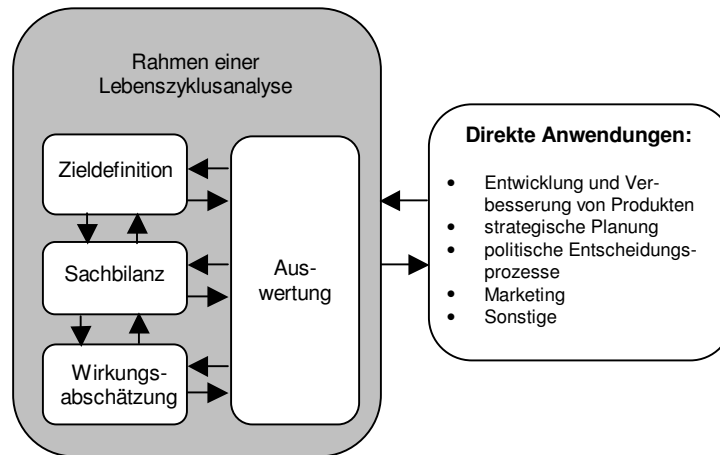


Abbildung 3-2 Lebenszyklusanalyse und Anwendungsmöglichkeiten³³

In der Zieldefinition wird der Rahmen der Bilanzierung, z.B. Definition des Bilanzobjektes, Grenzen und Annahmen bei der Bilanzierung usw., festgelegt. Die Sachbilanz beschreibt anschließend die Vorgehensweise bei der Ermittlung und Erhebung der Daten. Dabei sind neben der Berechnung des KEA, der als Kennwert für die Ressourcenbeanspruchung gilt, noch andere Werte wichtig, wie z.B. Emissionen (CO₂, NO_x). Die Wirkungsabschätzung und Auswertung sollen nun weitere Informationen über die Folgen der in der Sachbilanz ermittelten Größen geben, z.B. Auswirkungen des Treibhausgases auf Mensch und Natur.

In diesem Zusammenhang ist die methodische Ermittlung des KEA mit dem Verfahren vergleichbar, das von der VDI-Richtlinie vorgeschrieben wird³⁴. Dazu ist speziell die EN ISO Norm 14040 ff entwickelt worden und sieht folgende Vorgehensweise im Bereich der Energiebilanzierung vor³⁵:

³³ entnommen aus: Marheineke, T.: Lebenszyklusanalyse..., a.a.O., Seite 9

³⁴ vgl. Hutter C, Köhler D.: Ökobilanzierung mit Hilfe der KEA-Datenbank - Praxistests, Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München 1999, Seite 27

³⁵ vgl. Saykowski, F.: Übertragung der KEA-Richtlinie auf den aktuellen Stand der Ökobilanzierung, VDI-Berichte 1218, VDI Verlag, Düsseldorf 1995, Seite 49

- Erfassung der Energie für die Herstellung und Bereitstellung von Energie
- Erfassung der „Feedstock-Energie“ (gleichbedeutend mit dem über den Heizwert bewerteten Materialeinsatz)
- Erfassung der Prozessenergien
- Berücksichtigung sämtlicher Wirkungsgrade und Verluste der Prozessketten
- Im Falle von Kuppelproduktion oder Recyclingprozessen sind Zuordnungen für die Energie und andere Parameter möglichst nach physikalisch einsichtlichen Verfahren vorzunehmen.
- Der Einfluss sämtlicher Annahmen (Zuordnungen, Bilanzgrenzen, Abschneidekriterien) und Datenlage auf das Bilanzergebnis muss unter Berücksichtigung des zu Beginn definierten Bilanzzieles untersucht werden (Sensitivitätsanalyse).

3.3 Definitionsvorschlag des Öko-Instituts Darmstadt

Da die VDI-Richtlinie 4600 Spielraum in der Berechnung des KEA zulässt, d.h. dass z.B. offen gelassen wird, ob nur der Gesamt-KEA als Zahlenwert oder auch Teilmengen ausgewiesen werden dürfen, ist man um eine stetige Verbesserung bemüht. Aufgrund der Aussagekraft und der Transparenz, vor allem in ökologischer Hinsicht, wird vom Öko-Institut Darmstadt folgende Aufteilung vertreten³⁶.

$$KEA_{\text{Summe}} = KEA_{\text{nichtererneuerbar}} + KEA_{\text{erneuerbar}} + KEA_{\text{andere}} \quad \text{Gleichung 3-4}$$

KEA_{nichtererneuerb.} = Summe der fossilen und nuklearen Primärenergien
KEA_{erneuerbar} = Summe der regenerativen Energien
KEA_{andere} = Summe energetisch genutzter Reststoffe
KEA_{Summe} = Summe aller Komponenten

Mit Hilfe vorgeschlagener Disaggregation (Aufteilung) lässt sich die Aussage über den Ressourcenaufwand und über die aus Umweltsicht grundverschiedenen Wirkungsaspekte verbessern. Z.B. zählt ein Anteil von Uran und Kohle beim Gesamt-KEA gleichviel wie der Anteil der Windenergie. Dass jedoch Windenergie evtl. ressourcenschonender und umweltfreundlicher ist, wird dabei nicht berücksichtigt.

³⁶ vgl. Fritsche, U. R. et al.: Methodikfragen bei der Berechnung des kumulierten Energieaufwands, Arbeitspapier im Rahmen des UBA-F&E Vorhabens Nr. 10401123, Öko-Institut, Darmstadt 1999, Seite 3 ff

Es wird deswegen vorgeschlagen, zum einen die erneuerbaren Energien und zum anderen fossile und nukleare Energien, obwohl ihre Umweltwirkung untereinander sehr unterschiedlich ausfallen kann, zu addieren. Da jedoch die Zukunft der Kernenergie zumindest politisch entschieden scheint, wird diese Berechnung zugelassen. Die Summe energetisch genutzter Reststoffe dient dabei nur als Richtungskomponente für Umwelteffekte (z.B. NO_x -Emissionen).

Des Weiteren wurde angemerkt, dass Nutzungsgrade, wie z.B. der Wirkungsgrad einer Solarzelle oder eines Kraftwerkes, aus Gründen der Kompatibilität mit internationalen Statistiken und aus Gründen der oft beliebigen und schwierigen Definition nicht mehr in die Betrachtung mit einfließen sollen. Diesem liegt die Annahme zu Grunde, dass die auf die Erde einfallende Sonnenenergie stetig vorhanden ist und somit als unerschöpflich angesehen werden kann. Daher sollen die Nutzungsgrade auf 100 Prozent gesetzt werden. Diese Regelung betrifft aber nur die Prozessstufe der Energiegewinnung, also die Umwandlung von Ressourcen in nutzbare Energieträger (Kraftwerksnutzungsgrade, Nutzungsgrade von Solarzellen und Windrädern usw. – nicht zu verwechseln mit den Bereitstellungsnutzungsgraden).

Als dritten verbesserungswürdigen Punkt hat man die fehlende Abgrenzung zwischen Energie- und Stoffbilanzen in der VDI-Richtlinie 4600 angeführt. Energieträger die nicht energetisch genutzt werden, wie z.B. Erdgas bei der Herstellung von Düngemitteln oder Holz für die Herstellung von Möbeln, werden normalerweise über den Heizwert berücksichtigt. Formal ist dies aber nur richtig, wenn man am Ende des Lebenszyklusses den entsprechenden Heizwert dem Produkt auch wieder gutschreibt. In der Praxis ist es allerdings wenig aussichtsreich, für die sehr unterschiedlichen Produktgruppen komplette Lebenszyklen mit Daten zur Entsorgung und den anzurechnenden Gutschriften zu erstellen. Aus diesem Grunde sollen im KEA ausschließlich die Energieanteile mitbilanziert werden, die sich direkt aus dem energetisch genutzten Energieinhalt von Brennstoffen bzw. Primärenergien ergeben. Für die Produktion der Möbel würde das bedeuten, dass der Heizwert des Rohstoffes Holz keine Berücksichtigung findet. Nur die Energien, die zum Schlagen und Aufbereiten des Holzes und zur Herstellung der Möbelstücke aufgewendet werden, fließen in den KEA mit ein. Diese Größe wird in der Literatur auch als KEV

(kumulierter Energieverbrauch) bezeichnet³⁷. In folgendem Diagramm wird am Beispiel von Holz und Holzprodukten verdeutlicht, wie sich die einzelnen KEA-Definitionsvorschläge in der Praxis auswirken. Die Varianten VDI-klassisch, -brutto und -netto zeigen hierbei den Spielraum, den die Richtlinie 4600 bei der Bewertung der Recyclingprodukte offen lässt.

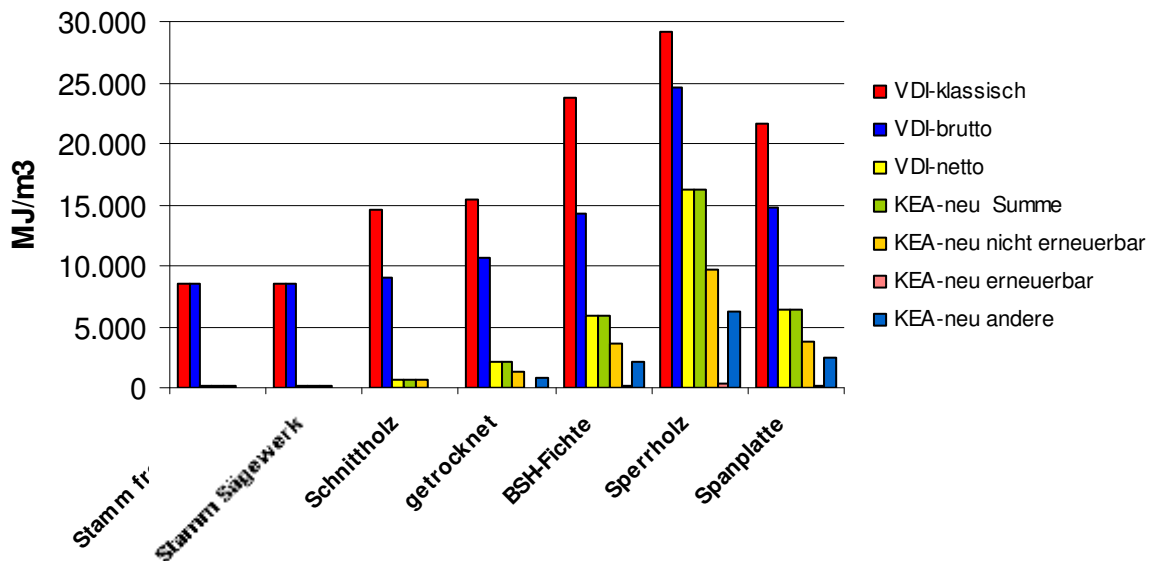


Abbildung 3-3 KEA nach verschiedenen Szenarien und Holzprodukten³⁸

3.4 Energetische Kennzahlen

3.4.1 Energetische Amortisationszeit

Wie aus der Betriebswirtschaft bekannt, sollten sich Investitionen nach einer bestimmten Zeitdauer amortisieren, d.h. dass der Kapitaleinsatz der Investition durch die jährlich erwirtschafteten Überschüsse wieder ins Unternehmen zurückfließt. Eine Investition hat sich somit amortisiert, wenn die Überschüsse nach einer gewissen Zeitspanne größer oder gleich dem eingesetzten Kapital sind.

Bezieht man diese Aussage nicht auf Unternehmen sondern auf energieerzeugende Anlagen und betrachtet das Ganze in energetischer Hinsicht, so ergibt sich folgende Überlegung³⁹:

³⁷ vgl. Mauch, W.: Folien zum Vortrag: Der KEV als Maß für energiebedingte Umweltbelastungen – Methode, Aussagekraft und Grenzen des Einsatzes, Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München 2003

³⁸ entnommen aus Fritsche, U. R. et al.: Methodikfragen..., a.a.O., Seite 17

³⁹ vgl. Hagedorn, G.: Kumulierter Energieaufwand von Photovoltaik und Windkraftanlagen, Forschungsstelle für Energiewirtschaft, IFE Schriftenreihe Heft 25, München 1992, Seite 37

Der Kapitaleinsatz der Investition entspricht dem KEA zur Herstellung und Entsorgung der Anlage (z.B. Windrad). Der Einzahlungsüberschuss besteht analog aus der Differenz der innerhalb eines Jahres von die Anlage erzeugten und durch den Bereitstellungsfaktor primärenergetisch bewerteten Nettoenergie und dem jährlichen KEA_N . Die Nettoenergie wird speziell bei der Betrachtung regenerativer Energien verwendet. Aufgrund der unbeständigen Verfügbarkeit der regenerativen Energiequellen würde die übliche Angabe der Nennleistung keine Aussagekraft besitzen.

Die VDI-Richtlinie gibt keine geeignete Definition der Amortisationszeit an, die man jedoch mit den aus der Richtlinie gewonnenen Daten berechnen kann. Die hier vorgestellte Definition zieht im Gegensatz zu anderen den kompletten Lebenszyklus mit ein und wurde daher aus verschiedenen älteren Einzeldefinitionen zusammengesetzt.

Die energetische Amortisationszeit AZ gibt somit an, wie lange ein Kraftwerk betrieben werden muss, bis es die Menge an Energie bereitgestellt hat, die zur Herstellung, zum Betrieb⁴⁰, und zur Entsorgung⁴¹ der Anlage benötigt wurde.

$$AZ = \frac{KEA_H + KEA_E}{\left(\frac{W_{netto}}{g} - KEA_N \right)} \quad \text{Gleichung 3-5}$$

AZ	: energetische Amortisationszeit [a]
KEA_H	: kumulierter Energieaufwand zur Herstellung der Anlage [MJ]
KEA_E	: Kumulierter Energieaufwand zu Entsorgung der Anlage [MJ]
W_{netto}	: innerhalb eines Jahres erzeugte Nettoenergie [MJ/a]
g	: Bereitstellungsnutzungsgrad [MJ _{End} /MJ]
KEA_N	: jährlicher kumulierter Energieaufwand zur Nutzung der Anlage [MJ/a]

3.4.2 Erntefaktor

Erntefaktoren in der Energiewirtschaft stellen im Allgemeinen Energieaufwendungen einer Energieerzeugung gegenüber, d.h. der Erntefaktor gibt an, wie viel mal mehr Primärenergie durch ein Kraftwerk erzeugt werden kann, als zu seiner Herstellung,

⁴⁰ vgl. Pick, E., Wagner, H.-J.: Beitrag zum kumulierten Energieaufwand ausgewählter Windenergiekonverter, Arbeitsbericht des Instituts für ökologisch verträgliche Energiewirtschaft, Universität Essen 1998, Seite 13

⁴¹ vgl. Wagner, H.-J.: Kumulierter Energieaufwand (VDI-Richtlinie 4600) und energetische Amortisationszeit..., a.a.O., Seite 7

seinem Betrieb und seiner Entsorgung aufgewendet wurde. Er wird deshalb als Quotient aus der während der Lebenszeit erzeugten Nettoenergie und dem kumulierten Energieaufwand bezeichnet⁴². Energiewirtschaftlich rentabel sind nur Anlagen, die Erntefaktoren größer Eins aufweisen. Auch in dieser Definition soll wieder der gesamte Lebenszyklus betrachtet werden⁴³.

$$EF = \frac{W_{\text{netto}} / g}{(KEA_H + KEA_N + KEA_E)} \quad \text{Gleichung 3-6}$$

EF	: Erntefaktor [-]
W_{netto}	: innerhalb der Lebenszeit erzeugte Nettoenergie [MJ]
g	: Bereitstellungsnutzungsgrad [MJ _{End} /MJ]
KEA_H	: kumulierter Energieaufwand zur Herstellung [MJ]
KEA_N	: kumulierter Energieaufwand zur Nutzung [MJ]
KEA_E	: kumulierter Energieaufwand zur Entsorgung [MJ]

Für konventionelle Kraftwerke werden oft Erntefaktoren kleiner Eins ausgewiesen. Dies ist jedoch wenig aussagekräftig, da solchen Anlagen Energie in Form von fossilen Energieträgern zugeführt wird. Somit kann der Erntefaktor eines Kernkraftwerks nicht mit dem Erntefaktor einer Photovoltaikanlage verglichen werden.

3.4.3 Substitutionsfaktor

Wird eine Anlage nach dem Substitutionsprinzip bewertet, so bedeutet dies, dass der durch das System erzeugten Energiemenge eine gleiche Menge Primärenergie gegenübergestellt wird⁴⁴. Somit ist der Substitutionsfaktor ein Indikator für die fossile Primärenergiemenge, die durch den Betrieb einer regenerativen Anlage eingespart werden kann. Mathematisch betrachtet müsste der Zähler der Gleichung durch $W_{\text{netto}} / g - (KEA_H + KEA_N + KEA_E)$ ersetzt werden.

An folgendem Schaubild soll der Zusammenhang zwischen Amortisationszeit, Erntefaktor und Substitutionsfaktor nochmals aufgezeigt werden.

⁴² vgl. Pick, E., Wagner, H.-J.: Beitrag zum kumulierten Energieaufwand..., a.a.O., Seite 13

⁴³ vgl. Wagner, H.-J.: Kumulierter Energieaufwand (VDI-Richtlinie 4600) und energetische Amortisationszeit..., a.a.O., Seite 7

⁴⁴ vgl. Hagedorn, G.: Kumulierter Energieaufwand..., a.a.O., Seite 33

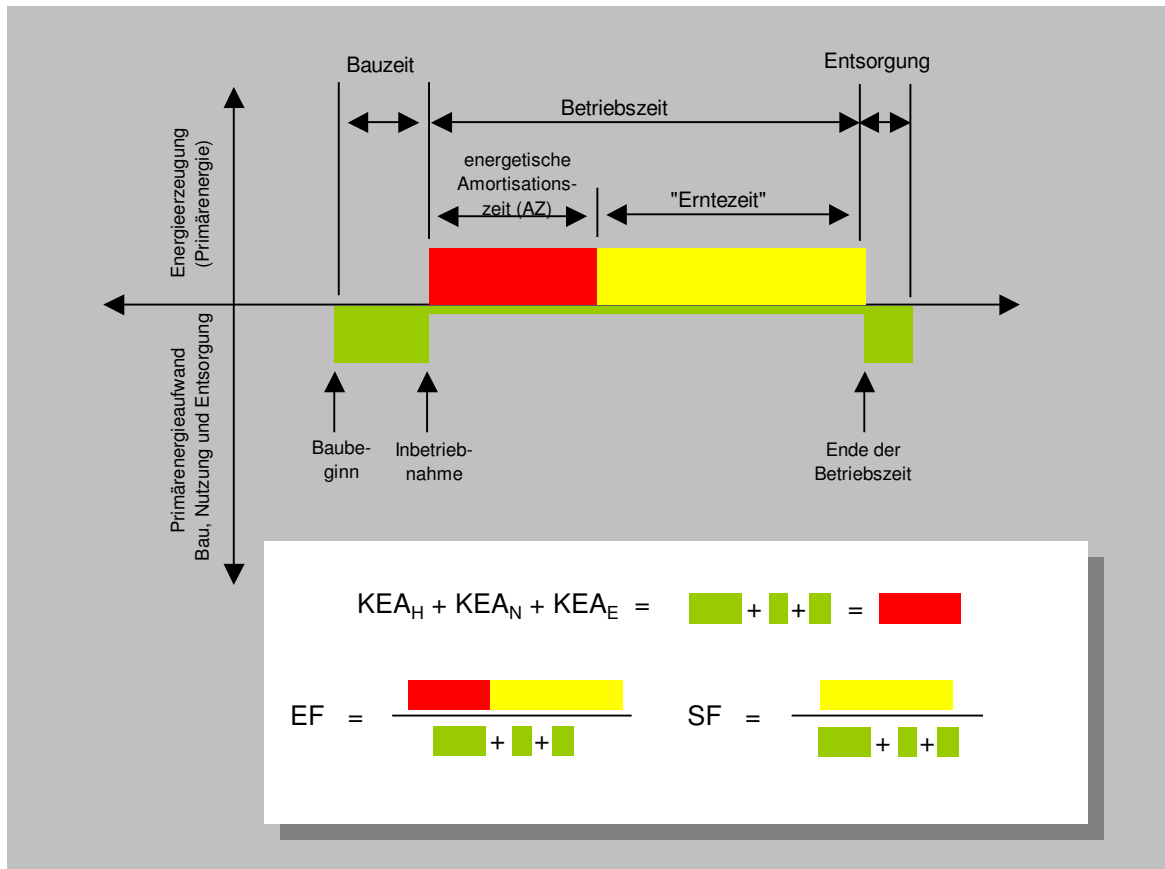


Abbildung 3-4 Amortisationszeit, Erntefaktor und Substitutionsfaktor⁴⁵

⁴⁵ in Anlehnung an: Wagner, H.-J.: Energieketten von A bis Z - Erntefaktoren und energetische Amortisationszeit, Elektrizitätswirtschaft, Ausgabe 8, 1996, Seite 453

4 Methoden zur Ermittlung des kumulierten Energieaufwands

Nachdem bekannt ist, was man unter dem KEA versteht, welche grundlegenden Punkte bei der Berechnung zu betrachten sind und welche Kennzahlen sich aus dem KEA bilden lassen, soll im Folgenden näher auf die verschiedenen methodischen Ansätze zu seiner Ermittlung eingegangen werden. Grundsätzlich gibt es vom Aufbau her zwei Varianten und zwar die Prozesskettenanalyse und die Input-Output-Analyse. Die restlichen Methoden stellen Mischformen aus der PKA und der IOA dar.

4.1 Prozesskettenanalyse

Die Prozesskettenanalyse wird im Fachjargon als Mikroanalyse bezeichnet. Sie geht vom Endprodukt aus und untersucht alle Vor- und Nebenstufen einer verzweigten Produktionskette bis hin zur Rohstoffgewinnung der Basismaterialien⁴⁶. Abbildung 4-1 soll dies anhand des Materialstammbaums verdeutlichen.

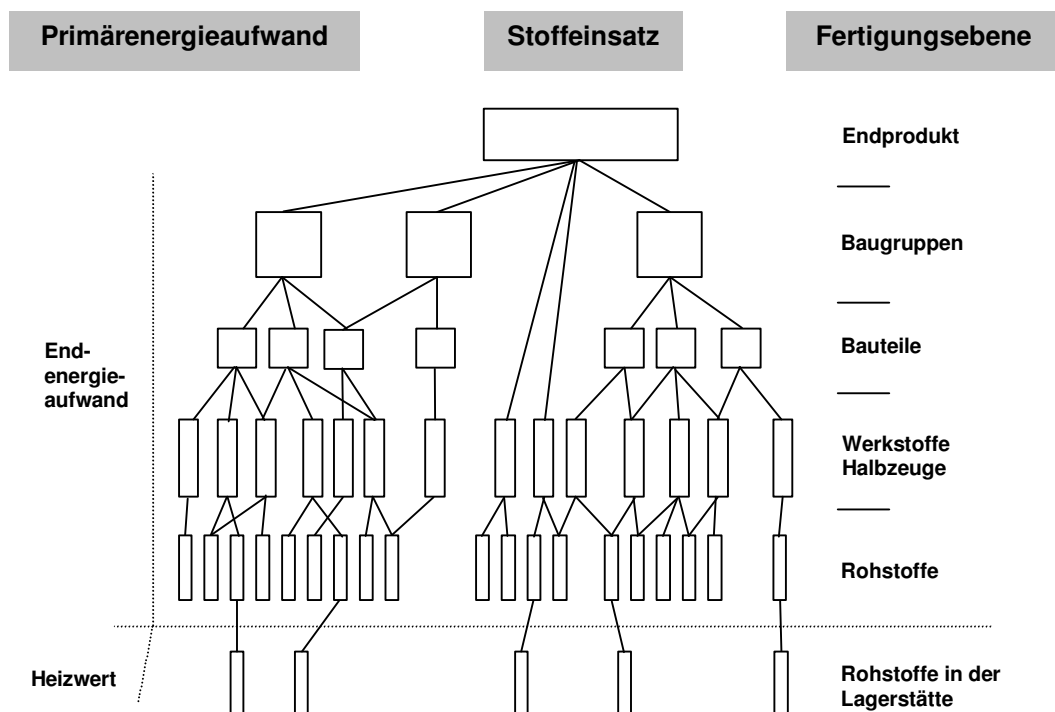


Abbildung 4-1 Schema eines Materialstammbaumes⁴⁷

⁴⁶ vgl. Mauch, W.: Kumulierter Energieaufwand für Güter und Dienstleistungen – Basis für Ökobilanzen, IFE Schriftenreihe Heft 26, Lehrstuhl für Energie und Anwendungstechnik, München 1993, Seite 37

⁴⁷ entnommen aus Mauch, W.: Kumulierter Energieaufwand für Güter und Dienstleistungen..., a.a.O., Seite 37

Dabei ist in jeder Produktionsebene Energie für die Herstellungs- und Fertigungsprozesse erforderlich, die mit dem KEA_H der eingesetzten Materialien ein vorläufiges Ergebnis für den KEA_H des gesamten Produkts ergibt. Auf diese Weise kann der KEA_H zunächst auf Baugruppen-, dann auf Bauteil- bzw. Halbzeug- und schließlich bis zur Rohstoffebene ermittelt werden. Es werden also alle Halbzeuge, Rohmaterialien, Hilfs- bzw. Betriebsstoffe und Betriebsmittel zur Herstellung eines Produktes mit allen ihren eigenen Produktionsketten berücksichtigt. Da das Zurückverfolgen des kompletten Stammbaums oft zu kompliziert wäre, wird vorgeschlagen, zuerst eine Grob- und dann eine Feinanalyse der Prozesse nach Abbildung 4-2 durchzuführen.

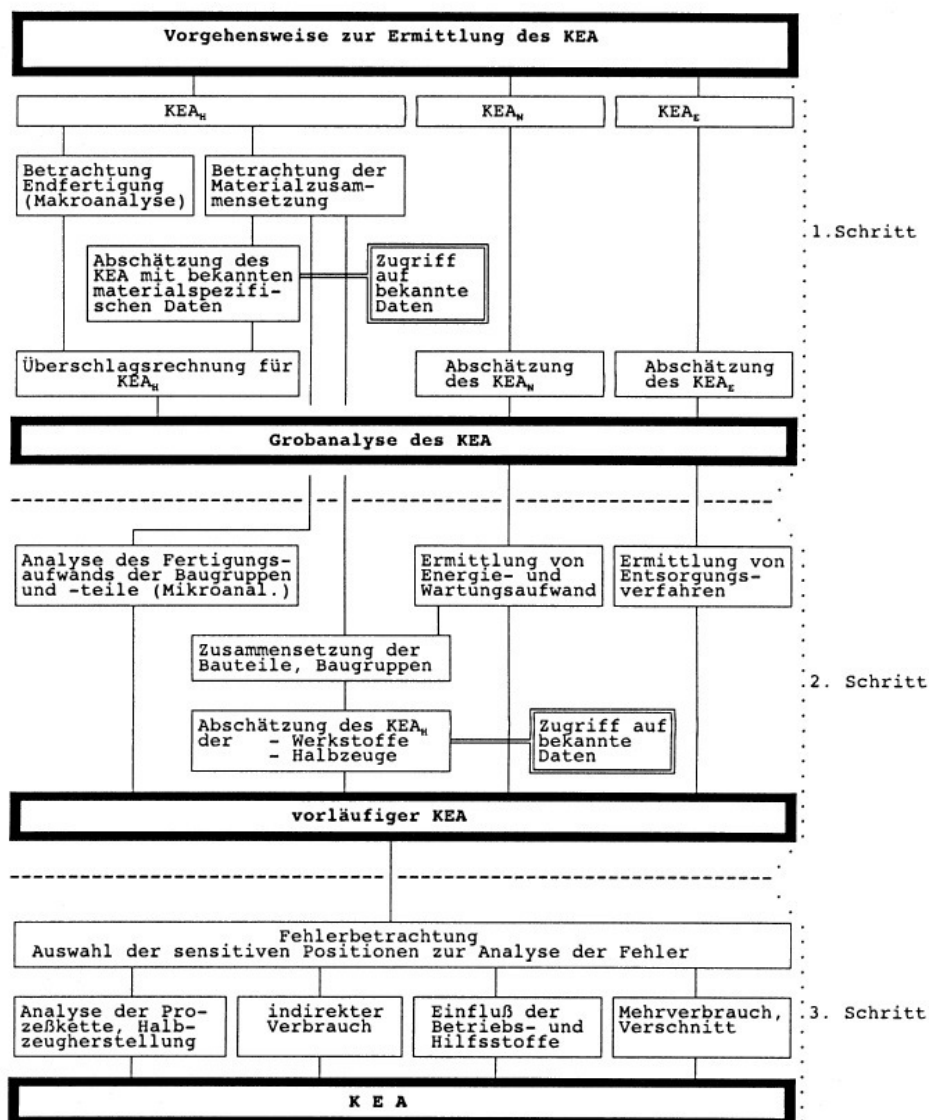


Abbildung 4-2 Vorgehen bei der Prozesskettenanalyse⁴⁸

⁴⁸ entnommen aus: Corradini, R., Hutter, C. Köhler, D.: Ganzheitliche Bilanzierung von Grundstoffen und Halbzeugen, Teil I: Allgemeiner Teil, Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München 1999, Seite 13

Hierbei werden diejenigen Prozesse ausgeklammert oder „grob“ abgeschätzt, deren Beitrag am KEA gering erscheint oder schwierig zu bilanzieren ist. Um dennoch genaue Werte zu erhalten, sollte man auf iterative Weise das Ergebnis nachprüfen. Durch Neukombination der einzelnen Parameter und schrittweises Angleichen an das mögliche Ergebnis (Sensitivitätsanalyse) können mit dieser Methode eventuelle Schätzfehler ausgeglichen werden.

Die Prozesskettenanalyse liefert auf Grund ihrer Vorgehensweise sehr genaue Werte und stellt somit das „ideale“ Verfahren zur Ermittlung des KEA dar. Jedoch ist der Aufwand zur Analyse der gesamten Baumstruktur immens hoch und mit vielen Fehlerquellen verbunden (z.B. Messfehler, unterschiedliche Systemgrenzen, Bewertungsfehler).

4.2 Materialbilanzen-Analyse

Auf Grund der Tatsache, dass die Durchführung einer kompletten Prozesskettenanalyse sehr aufwendig und dadurch auch teuer ist, wurde die Materialbilanzen-Methode entwickelt. Im Unterschied zur PKA wird dort der Fertigungsaufwand nur mit Zuschlagsfaktoren abgeschätzt⁴⁹.

Dabei werden die in das Produkt eingeflossenen Basismaterialien zuerst nach der Menge und dem Gewicht aufgeschlüsselt. Dies erfolgt anhand von Stücklisten, die normalerweise beim jeweiligen Hersteller in Form von Bauplänen oder Bestellaufträgen vorhanden sind. Anschließend werden die einzelnen Materialien mit den spezifischen Energieaufwendungen (z.B. in MJ/Kg) multipliziert, die meist aus zuvor erstellten Prozesskettenanalysen stammen. Fertigungs-, Weiterverarbeitungs- und Montageenergien zur Herstellung werden gewöhnlich durch Zuschlagsfaktoren berücksichtigt.

Es wird also nicht wie bei der PKA die Prozessenergie für jeden Fertigungsschritt einzeln bestimmt, sondern mit einem pauschalen Faktor gerechnet, siehe Gleichung 4-1. Dieses System ist auch aus der Kosten- und Leistungs-Rechnung bekannt, bei dem z.B. Gemeinkosten den Produkteinzelkosten über einen vorher festgelegten Schlüssel zugerechnet werden.

⁴⁹ vgl. Wagner, H.-J., Wenzel, B.: Energetische Input-Outputrechnung und Prozesskettenanalysen - Möglichkeiten und Grenzen beider Methoden, In: ganzheitliche Bilanzierung von Energiesystemen, VDI-Berichte 1328, VDI Verlag, Düsseldorf 1997, Seite 16

$$KEA_H = \sum_{\text{Materialien}} (kea_{\text{Material}} \cdot m_{\text{Material}} \cdot F_F) \cdot F_M \quad \text{Gleichung 4-1}$$

- KEA_H** : kumulierter Energieaufwand für die Herstellung [MJ]
kea_{Material} : spez. Kumulierter Energieaufwand für ein bestimmtes Material [MJ]
m_{Material} : Masse des Materials [Kg]
F_F : Zuschlagsfaktor für die Fertigung
F_M : Zuschlagsfaktor für die Montage

Mit der Materialbilanzen-Methode ergibt sich eine große Vereinfachung gegenüber der PKA. Jedoch erreicht sie nicht deren Genauigkeit, d.h. bei zunehmender Fertigungstiefe nehmen die Abweichungen vom tatsächlichen Wert stark zu, da man je nach Werkstoff und Werkstück von variierenden Fertigungszuschlägen von 10 – 50 Prozent ausgehen kann⁵⁰. In der Praxis greift man allerdings gerne auf diese Methode zurück.

4.3 Energetische Input – Output Analyse

Im Gegensatz zu den anderen beiden Methoden handelt es sich bei der Input-Output-Analyse um eine wirtschaftswissenschaftliche Methode, die als Verflechtungsanalyse der Volkswirtschaft in den 30er und 40er Jahren von Wassily Leontief entwickelt wurde und aus der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung stammt⁵¹.

Die volkswirtschaftliche Gesamtrechnung ist ein Verfahren, dass das wirtschaftliche Geschehen einer Volkswirtschaft quantitativ darstellt, wie z.B. die Berechnung des Bruttosozialproduktes. Unter anderem werden dabei sogenannte Nebenrechnungen verwendet, worunter auch Input-Output-Tabellen fallen. Diese bilden die vollständigen Produktionsverflechtungen der Sektoren einer Volkswirtschaft zur Herstellung und Bereitstellung aller Waren und Dienstleistungen anhand von Geldströmen ab. Ein wesentliches Ziel ist dabei, Nachfrageänderungen und deren Auswirkungen auf den Produktions- und Dienstleistungsbereich zu analysieren. Speziell bei der energetischen Input-Output Rechnung werden IO-Tabellen mit den

⁵⁰ vgl. Wagner, H.-J., Wenzel, B.: Energetische Input-Outputrechnung und Prozesskettenanalysen..., a.a.O., Seite 16

⁵¹ vgl. Gabler Wirtschaftslexikon, Gabler Verlag, 13. Auflage, Wiesbaden 1993, Seite 3641

Tabellen der Energieverwendung verknüpft⁵². Diese Methode weist somit dem Geldwert von Waren Energieaufwendungen zu und ermittelt ein bestimmtes Verhältnis zwischen Energieeinsatz und Preis für alle Wirtschaftssektoren. Der KEA wird hierbei durch die Multiplikation des Ab-Werk-Preises eines Produktes mit der Energieintensität des jeweiligen Sektors bestimmt.

4.3.1 Aufbau der Input-Output Tabellen

Die Input-Output-Tabellen der deutschen Volkswirtschaft, die vom Statistischen Bundesamt erstellt werden, geben die wirtschaftlichen Verflechtungen von 58 Produktions- und Dienstleistungssektoren in Form einer quadratischen Matrix **V** (58x58) wieder (I. Quadrant) und werden beispielhaft in Abbildung 4-3 veranschaulicht.

	Spalte	1 ... j ... 58	60	61	62	63	64	65	67
Zeile	nach	Vorleistungsnachfrage	Endnachfrage, letzte Verwendung						gesamte Verwendung (entspricht auch Zeile 67)
		empfangene Produktionssektoren (Input)	Priv. Verbrauch	Staat	Invest. Aus.	Invest. Bauten	Vorräte	Ausfuhr	
	von								
1	liefernde Produktionssektoren (Output)	$v_{1,1}$... $v_{1,j}$... $v_{1,58}$	...						x_1
:		:	:						:
i		$v_{i,1}$... $v_{i,j}$... $v_{i,58}$	y _i						x_i
:		:	:						:
58		$v_{58,1}$... $v_{58,j}$... $v_{58,58}$	...						x_{58}
62	Abschreibungen								
63	Steuern								
64+65	Einkommen								
66	Bruttowertschöpfung								
67	Produktionswert	x_1 ... x_j ... x_{58}							

Quadranten der Input-Outputtabelle

I

II

III

Abbildung 4-3 Schematischer Aufbau der IO-Tabellen⁵³

Die Spalten des I. Quadranten zeigen an, welche Vorleistungen ein Produktionsbereich von einem anderen Produktionsbereich und sich selbst bezieht. Entsprechend lässt sich aus den Zeilen des I. Quadranten ablesen, in welchem Wert ein Produktionsbereich Güter als Vorleistungen an andere Produktionsbereiche

⁵² vgl. Wagner, H.-J., Wenzel, B.: Energetische Input-Outputrechnung und Prozesskettenanalysen..., a.a.O., Seite 11 ff

⁵³ entnommen aus Wagner, H.-J., Wenzel, B.: Energetische Input-Outputrechnung und Prozesskettenanalyse..., a.a.O., Seite 12

einschließlich sich selbst liefert. Die Endnachfragematrix **Y** (58x6) im II. Quadranten beschreibt den Wert der Lieferung von Gütern an die letzte Verwendung, also an den Endverbraucher. Diese sind in die Kategorien privater Verbrauch, Staatsverbrauch, Investitionen Anlagen, Investitionen Bauten, Vorratsveränderungen und Ausfuhr (Zeile 60-65) unterteilt. Die Primäraufwandsmatrix **G** im III. Quadranten beinhaltet die monetären Inputs in Form von Abschreibungen, Steuern, Subventionen und gezahlten Einkommen (ab Zeile 62), die neben den Vorleistungen als Kosten in die Produktion eingehen. Die nichterwähnten Zeilen haben keine Auswirkungen auf das weitere Vorgehen.

4.3.2 Berechnungsverfahren

Das Ergebnis folgender Berechnung soll der Energieaufwand eines bestimmten Produkts (z.B. Turm, Generator, Flügel usw.) sein⁵⁴. Hierzu müssen im ersten Schritt die prozentuale Anteile der direkten Vorleistungen aller Sektoren am Produktionswert eines Sektors ermittelt werden. Dies geschieht, indem man mittels der IO-Tabellen die kumulierten Produktionswerte nach Gleichung 4-2 berechnet.

$$\sum v_{ij} + y_i = x_i \quad \text{Gleichung 4-2}$$

oder in Matrixschreibweise: $V + Y = X$

Unter dem kumulierten Produktionswert wird die Zeilensumme aus der Vorleistungsnachfrage und der Endnachfrage eines Sektors verstanden. Dividiert man nun die einzelnen Elemente v_{ij} der Vorleistungsmatrix **V** durch die entsprechenden Produktionswerte x_j , so erhält man die sogenannte Input-Koeffizientenmatrix **A**. Diese Matrix beschreibt, welche Produktionswerte jeder Sektor insgesamt erbringen muss, damit der Nachfragesektor eine Einheit seines Outputs bereitstellen kann, wobei aber nur die direkten Vorleistungen in der Matrix berücksichtigt werden. Die Gleichung 4-3 lässt sich nun folgendermaßen darstellen:

$$\sum a_{ij} \cdot x_j + y_i = x_i \quad \text{Gleichung 4-3}$$

bzw. $A \cdot X + Y = X$

⁵⁴ vgl. Wagner, H.-J., Wenzel, B.: Energetische Input-Outputrechnung und Prozesskettenanalysen..., a.a.O., Seite 12 ff

Im zweiten Schritt sollen auch die indirekten Vorleistungen mit erfasst werden. Hierzu löst man die Gleichung nach \mathbf{X} auf und zur Vereinfachung wird $(\mathbf{I}-\mathbf{A})^{-1} = \mathbf{C}$ gesetzt. \mathbf{I} stellt die Einheitsmatrix dar, die nach den Regeln der Matrizen-division eingeführt werden muss.

$$\mathbf{X} = (\mathbf{I}-\mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{Y} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{Y} \quad \text{Gleichung 4-4}$$

\mathbf{C} wird als Leontief-Inverse bezeichnet. Diese beschreibt im Gegensatz zur Matrix \mathbf{A} auch die indirekten Vorleistungen. Unter den direkten Vorleistungen versteht man die Lieferungen in Geldströmen gemessen, die in der Vorleistungsmatrix \mathbf{V} angegeben sind⁵⁵, z.B. benötigt man für eine Einheit Kunststoffzeugnis 0,3 Einheiten Öl und 0,1 Einheiten Strom usw.. Die indirekten Vorleistungen berücksichtigen nun auch einfach erklärt, welche Vorleistungen zur Erzeugung der 0,3 Einheiten Öl bzw. der 0,1 Einheiten Strom nötig sind, also die Vorleistungen der Vorleistungen. Diese Kette ist nun beliebig oft fortzusetzen. Deswegen könnte man \mathbf{C} auch als geometrische Reihe bezeichnen, bei der die Elemente von \mathbf{A} als vorgelagerte Produktionsstufen interpretiert werden können⁵⁶.

$$\mathbf{C} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} = \lim_{m \rightarrow \infty} \sum_{p=0}^m \mathbf{A}^p = \mathbf{I} + \mathbf{A} + \mathbf{A}^2 + \mathbf{A}^3 + \dots \quad \text{Gleichung 4-5}$$

Im dritten und letzten Schritt muss nun die Gleichung 4-4, die das gesamte Güteraufkommen in Abhängigkeit der Vorleistungs- und Endnachfrage in Geldströmen beschreibt, auf Energieströme umgerechnet werden. Dazu benutzt man die so genannte Energieverwendungsmatrix.

	Spalte	1	...	j	...	58	60-65	67
Zeile		Produktionssektoren					Endnachfrage	Gesamt
1	Energie-träger	$s_{1,1}$	...	$s_{1,j}$	...	$s_{1,58}$	...	s_1
:		:	:	:	:	:	:	:
k		$s_{k,1}$	...	$s_{k,j}$	...	$s_{k,58}$	$s_{k,l}$	s_k
:		:	:	:	:	:	:	:
29		$s_{29,1}$	...	$s_{29,j}$	...	$s_{29,58}$	...	s_{21}

Abbildung 4-4 Schematischer Aufbau der Energieverwendungsmatrix⁵⁷

⁵⁵ vgl. Prof. Dr. Ströbele: Skript Energiewirtschaft III, Lehrstuhl für Volkswirtschaftstheorien –, WWU-Münster, WS 03/04, Seite 7 ff

⁵⁶ vgl. Prof. Dr. Ströbele: Skript Energiewirtschaft III..., a.a.O., Seite 13

⁵⁷ vgl. Wagner, H.-J., Wenzel, B.: Energetische Input-Outputrechnung und Prozesskettenanalysen..., a.a.O., Seite 13

Das Statistische Bundesamt gibt zusammen mit den IO-Tabellen eine Statistik der Energieverwendung in energetischen Einheiten (TJ) heraus. Diese Statistik hat mit 58 Sektoren der Güterproduktion und 6 Sektoren der letzten Verwendung die gleiche Abgrenzung wie die IO-Tabellen. In den Zeilen weist sie die Energieverwendung von 29 Energieträgern aus, die nach Primär- und Sekundärenergieträger unterschieden werden, wobei aber nur die Primärenergieträger berücksichtigt werden, um Doppelzählungen zu vermeiden.

Um einen aussagekräftigen Kennwert zu erhalten, werden die gelieferten Energiemengen in jeder Spalte durch den zugehörigen Produktionswert dividiert. Es wird also das selbe Verfahren wie bei der Berechnung der Input-Koeffizientenmatrix **A** angewandt. Man erhält nun eine Kennzahl in (MJ/ Geldeinheit), die angibt wie viel Energie eines bestimmten Energieträgers benötigt wird, damit die Produktionssektoren für eine Geldeinheit produzieren können. Im Vergleich dazu beschrieb die Matrix **A**, welche Produktionswerte jeder Sektor insgesamt erbringen muss, damit die Produktionssektoren eine Einheit ihres Outputs bereitstellen können. Diese Kennzahl wird nun als Energieaufwandskoeffizient bezeichnet.

$$d_{kj} = \frac{s_{kj}}{x_j} \text{ oder Matrix D} \quad \text{Gleichung 4-6}$$

Durch Multiplikation dieser abgeleiteten Matrix **D** mit der zuvor berechneten Matrix $(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$, ergeben sich die sogenannten Energieaufwandskoeffizientenmatrix **E**, die den Energieaufwand, inklusive aller direkten und indirekten Vorleistungen, zur Produktion eines bestimmten Gutes pro Geldeinheit angibt.

$$\mathbf{E} = \mathbf{D} \cdot (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \quad \text{Gleichung 4-7}$$

Der kumulierte Energieaufwand zur Herstellung eines Produktes ergibt sich nun, indem man zuerst die Kosten (Ab-Werk-Preis) eines entsprechenden Produkts in Erfahrung bringt. Als nächstes multipliziert man diese Kosten mit dem entsprechenden Energieaufwandskoeffizienten ϵ_{kj} der Matrix **E** und erhält so den kumulierten Energieaufwand eines Produktes.

$$KEA_H = P_j \cdot \varepsilon_{kj} \quad \text{Gleichung 4-8}$$

KEA_H : kumulierter Energieaufwand der Herstellung [MJ]
P_j : Kosten des Produktes des Sektors j [Geldeinheit]
ε_{kj} : Energiekoeffizient, gibt die direkten und indirekten Energieaufwendungen pro Geldeinheit eines Produktes des Sektors j an [MJ/ Geldeinheit]

Mit der Input-Outputanalyse lässt sich im Vergleich zur Prozesskettenanalyse wesentlich schneller und auch einfacher eine Grobabschätzung des KEA geben. Mit dem Wort Grobabschätzung wird schnell deutlich, dass es sich hierbei um eine Methode handelt, die nicht für alle Zwecke der Energiebilanzierung zu verwenden ist. In der Praxis findet sie jedoch häufiger Anwendung, da vor allem die Kosten für das methodische Vorgehen im Rahmen bleiben.

4.4 Hybrid-Ansatz

Eine neuerer Ansatz Energie- und Stoffströme bzw. kumulierte Energieaufwendungen zu bilanzieren wurde vom Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung Stuttgart im Rahmen der Ökobilanz oder Lebenszyklusanalyse (LCA) entwickelt. Diese Methode versucht die Vorteile der Prozesskettenanalyse mit den Vorteilen der Input-Output-Analyse auf eine bis dahin noch nicht praktizierte Art zu verknüpfen⁵⁸.

Der Hybrid-Ansatz benutzt, wie schon erwähnt, Ergebnisse der PKA und der IO-Analyse. Bei der Bilanzierung werden zunächst Prozesse, für deren Bereitstellung hohe Energie- und Stoffmengen erwartet werden, d.h. deren Anteil am Endprodukt sehr groß ist, mit der PKA bilanziert (1. Schritt, vgl. Abbildung 4-5). Nun besteht die Möglichkeit, Zwischenprodukte, die eindeutig einem der 58 Produktionssektoren der IO-Tabellen zugeordnet werden können, oder Zwischenprodukte, deren Bilanzierungsaufwand zu keinem Verhältnis zum Ergebnis steht, auf der Inputseite mit der IO-Analyse abzuschätzen (2.Schritt). Des Öfteren tritt auch der Fall ein, dass Zwischenprodukte oder Vorleistungen nicht bilanziert werden. So wird entweder aus Gründen der Datenverfügbarkeit oder auf Grund der Annahme, dass Vorleistungen

⁵⁸ vgl. Hartmann, D.: Ganzheitliche Bilanzierung der Stromerzeugung aus regenerativen Energien, Dissertation, Stuttgart 2001, Seite 32 ff

für das Gesamtergebnis nicht relevant sind, die Bereitstellung von Investitionsgütern, die Hilfsstoffe, die Wartung oder allgemeine Dienstleistungen usw. vernachlässigt. Anhand von IO-Tabellen werden diese Größen nun den verschiedenen Sektoren zugeteilt und deren Energiegehalt berechnet (3.Schritt).

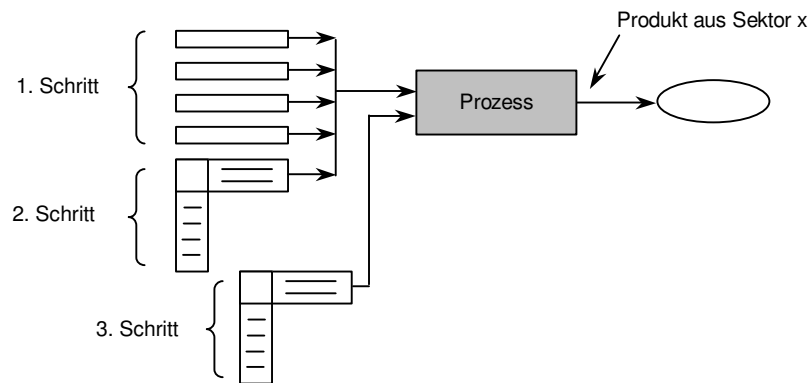


Abbildung 4-5 Schema des Hybrid Ansatzes⁵⁹

Die Berechnung des Energiegehalts der außer Acht gelassenen Vorleistungen muss zuerst über den Umweg ihres monetären Werts erfolgen. Dieser ergibt sich aus der monetären Bilanz eines Prozesses.

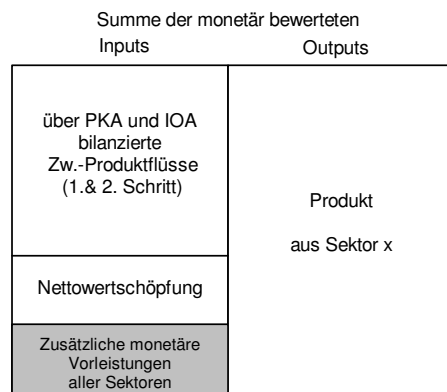


Abbildung 4-6 Schema der monetären Bilanz eines Prozesses⁶⁰

Die monetäre Bilanz setzt sich auf der Inputseite aus den mit der PKA oder der IO-Analyse sicher erfassten Zwischenprodukten, der Nettowertschöpfung T des Prozesses und der Summe der unbekanntenen Vorleistungen zusammen. Besondere Bedeutung haben bei dieser Vorgehensweise zwei Aspekte. Wichtig ist zuerst die Abschätzung der im Allgemeinen unbekanntenen Nettowertschöpfung T. Danach

⁵⁹ entnommen aus: Hartmann, D.: Ganzheitliche Bilanzierung der Stromerzeugung..., a.a.O., Seite 33-34

⁶⁰ entnommen aus: Hartmann, D.: Ganzheitliche Bilanzierung der Stromerzeugung..., a.a.O., Seite 35

verbleiben als Differenz zur monetär bewerteten Outputseite die zusätzlichen monetären Vorleistungen. Allerdings ist am Ende noch festzulegen, wie der Wert der unbekanntenen Vorleistungen den Sektoren der IO-Tabellen zugeordnet wird, um daraus die Energieaufwendungen zu berechnen.

Zunächst erfolgt die Abschätzung der Nettowertschöpfung T, indem man den betrieblichen Produktionsprozess analysiert und die daraus gewonnenen Werte mit denen der IO-Analyse verknüpft.

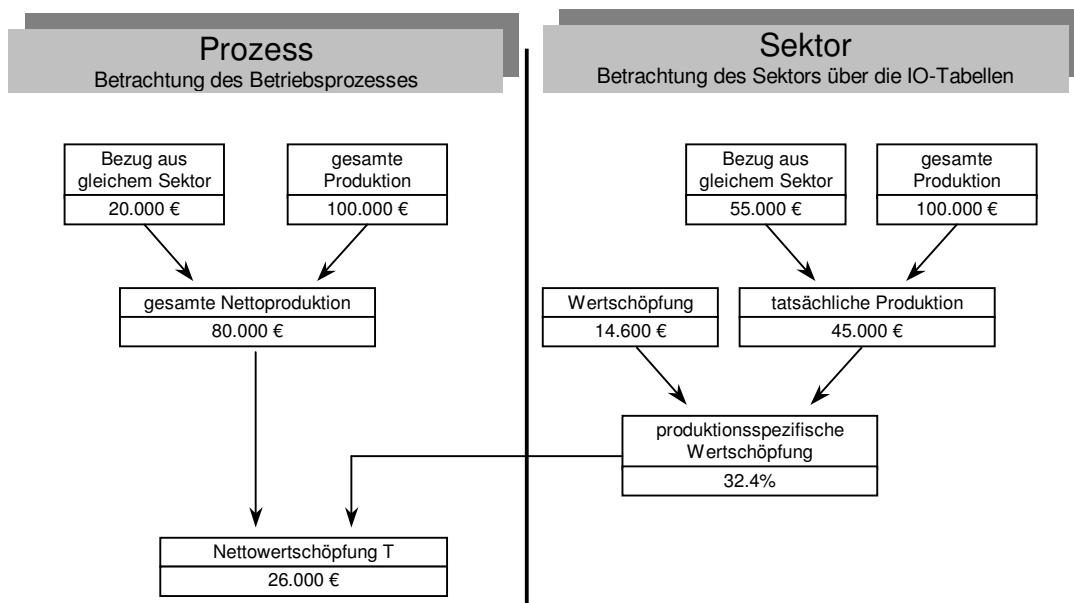


Abbildung 4-7 Ermittlung der Nettowertschöpfung T⁶¹

Dies soll anhand eines Herstellungsprozesses für den Turm einer WKA verdeutlicht werden. Zuerst errechnet man die Nettoproduktion des Betriebsprozesses. Diese ergibt sich aus der gesamten Produktion (Wert des Turms 100.000 €) abzüglich der aus dem Sektor „Erzeugnisse aus Ziehereien“, zu dem das eigentliche Produkt (Turm) zugeordnet wird, aufgewendeten Vorleistungen (z.B. Stahl: 20.000 €). Daraus resultiert eine Nettoproduktion von 80.000 €.

Nun führt man den selben Vorgang mit Hilfe der IO-Tabellen für diesen Sektor durch. Dem Wert von 100.000 € werden mittels IO-Tabellen 55.000 € Vorleistungen aus dem eigenen Sektor zugerechnet. Hierdurch ergibt sich eine tatsächliche Produktion von 45.000 €. Dieser Wert ließe sich zum Vergleich auch mit der Input-

⁶¹ entnommen aus: Hartmann, D.: Ganzheitliche Bilanzierung der Stromerzeugung..., a.a.O., Seite 36

erfassten Vorleistungen werden danach den verschiedenen Sektoren zugeordnet und von ihnen abgezogen. Dabei können Restbeträge übrigbleiben, die in diesem Sektor schließlich als zusätzliche Aufwendungen interpretiert werden können. Sind die sicher erfassten Vorleistungen größer oder gleich als die über die IO-Analyse ermittelten Werte, wird der Sektor auf Null gesetzt, d.h. er erbringt keine Vorleistung mehr. Vorleistungen mit negativem Vorzeichen gibt es also nicht. Es kann aber auch der Fall sein, dass verschiedenen Sektoren nichts abgezogen wird, je nachdem wie genau bei der Prozesskettenanalyse und IO-Analyse zuvor gearbeitet werden konnte.

Durch das Reduzieren der Vorleistungen eines Sektors kann die Summe aller Vorleistungen auf der Inputseite nun kleiner als zuvor sein (vgl. Abbildung 4-9). Unter der Annahme, dass aus der monetären Bilanz ein Betrag von 54.000 € sicher erfasst wird, ergeben sich 20.000 € zusätzlich monetäre Vorleistungen ($100.000 \text{ €} - 54.000 \text{ €} - 26.000 \text{ €} = 20.000 \text{ €}$). Daher kann der ursprüngliche Wert von 20.000 € auf 15.000 € gesunken sein. Im Bezug auf die zuvor ermittelte Wertschöpfung von 26.000 € ist die Summe aus beiden nun von 46.000 € auf 41.000 € gesunken, was einem Faktor von 1,122 entspricht. Um die ursprüngliche Summe wieder zu erreichen, werden die Anteile mit diesem Faktor linear skaliert, womit sich die Wertschöpfung von 26.000 € auf 29.170 € und die zusätzlichen Vorleistungen auf 16.830 € erhöhen, so dass sich wieder eine Summe von 46.000 € ergibt. In Abbildung 4-8 wird der Vorgang im Vergleich zu Abbildung 4-9 im Zusammenhang erläutert. Aus dem Vektor der skalierten Vorleistungen können nun mit Hilfe der IO-Analyse die Energieaufwendungen der einzelnen unbekanntenen monetären Vorleistungen bestimmt werden.

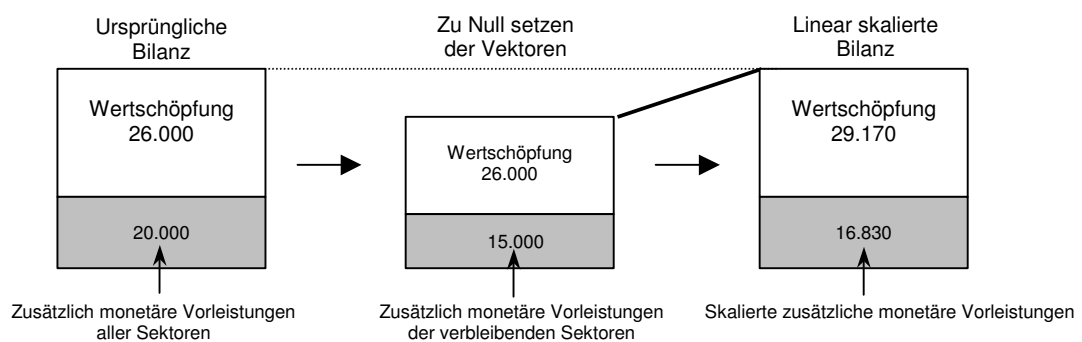


Abbildung 4-9 Vorgehen beim zu Nullsetzen von Sektoren⁶³

⁶³ entnommen aus: Hartmann, D.: Ganzheitliche Bilanzierung der Stromerzeugung..., a.a.O., Seite 38

5 Aktuelle Hilfsmittel zur Erstellung von Sachbilanzen

Nachdem nun die gängigsten Methoden zur Bilanzierung vorgestellt wurden, wird noch kurz auf die Bilanzierungsmöglichkeiten mittels Computertechnik eingegangen⁶⁴. Allein stehende Daten nutzen nämlich wenig, wenn sie nicht modelliert, verglichen, ausgewertet und neu kombiniert werden können. Dazu dienen spezielle Datenbanken, auch Ökobilanzsoftware genannt, die in universitären Einrichtungen oder auch in der freien Wirtschaft eingesetzt werden, um den Prozess der Bilanzierung zu erleichtern und praxistauglich zu gestalten. Will man für ein bestimmtes Produkt z.B. eine Ökobilanz aufstellen, sind Unmengen von Daten notwendig, die heutzutage ohne PC-Unterstützung nicht mehr zu handhaben wären. Anbieter von Ökobilanzsoftware sind oft Universitäten oder auch Unternehmen, die innerhalb eines Forschungsprojektes Daten im Energiebereich ermittelt haben und diese vermarkten. Europa liegt dabei im internationalen Vergleich deutlich an der Spitze, da in Amerika nur zwei solcher Programme bekannt sind. In der folgenden Tabelle sind nur Hersteller enthalten, deren Software auch den Kriterien der Ökobilanzierung entspricht. P bedeutet dabei die Eignung für eine Produktökobilanz und B für eine Betriebsökobilanz. Da die Tabelle nicht vollständig ist, kann auf der Internetseite www.econova.de eine aktuelle Zusammenstellung aller Firmen aufgerufen werden.

Software name	Typ	Entwickler
Audit	P/B	AUDIT GmbH, Graz/ Österreich und Siemens Nixdorf, München
CUMPAN	P	DeBis Systemhaus, Fellbach, vormals Universität Hohenheim, Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik
EcoPro	P	EMPA Schweizerisch Eidgenössische Materialprüfungsanstalt, St. Gallen/ Schweiz
GaBi	P	IKP Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde Universität Stuttgart und PE Product Engineering, Dettingen/Teck
KCL-ECO	P	The Finish Pulp and Paper Research Institute (KCL), Espoo/ Finnland
LCAInventory Tool	P	Chalmers Industriteknik, Göteborg/ Schweden
PIA	P	Toegepaste Milieu Economie TME, Den Haag/ Niederlande
SimaPro	P	Pre Consultants, Amersfoot/ Niederlande
TEAM/DEAM	P	Ecobilan, Paris/ Frankreich
Umberto	P/B	Ifu Institut für Umweltinformatik Hamburg und ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg

Abbildung 5-1 Ökobilanzsoftware und Vertreter⁶⁵

⁶⁴ vgl. Schmidt, M., Häuslein, A.: Ökobilanzierung mit Computerunterstützung, Springer Verlag, Berlin 1997, Seite 6 ff

⁶⁵ entnommen aus: Schmidt M., Häuslein, A.: Ökobilanzierung..., a.a.O., Seite 7

5.1 Die KEA Datenbank

5.1.1 Allgemeine Informationen

Die Forschungsstelle für Energiewirtschaft der TU München hat im Rahmen des Forschungsprojektes „Analyse von Energie- und Stoffströmen – Basisdaten für die Ökologische Bewertung von Unternehmen, Wirtschaftsgütern und Dienstleistungen“ eine Datenbank entwickelt, die vor allem öffentliche Einrichtungen sowie kleine und mittlere Betriebe bei der Durchführung einer Ökobilanz und auch bei der Analyse von Energiesparpotentialen unterstützen soll⁶⁶.

In der Standardausrüstung enthält die Datenbank Informationen über die Energiebereitstellung in Deutschland (z.B. KEA Werte von Strom), Informationen über 40 wichtige Grundstoffe und Halbzeuge und über verschiedene industrielle Verfahren sowie deren Energiegehalte, Emissionen und Stoffwerte (z.B. Heizwert).

Die energetische Bilanzierung erfolgt dabei nach den Vorschriften der VDI-Richtlinie 4600 und ermöglicht dem Anwender Daten zum KEA über Stoffströme, Energien und Emissionen zu sammeln und aufzubereiten. Dabei kann zwischen einer produktbezogenen Ökobilanz und einer betrieblichen Ökobilanz unterschieden werden. Weiterhin verfügt die Software über ein Tool zur Durchführung von Prozesskettenanalysen sowie graphische Ausgabemöglichkeiten für Sankey-Diagramme und Prozessbäume.

5.1.2 Datenbankstruktur

Zur Prozessbeschreibung (z.B. Transporte, Herstellungsverfahren) werden in der objektorientiert programmierten Datenbank automatisch sogenannte Input-Outputlisten erstellt, welche alle Inputs (Materialaufwendungen, Transportaufwendungen, Fertigungsenergien usw.) für verschiedenste Prozesse enthalten, mit Hilfe derer der Output berechnet wird. Durch Verwendung eines Outputs (z.B. Roheisen) als Input für einen anderen Prozess entsteht eine Prozesskette, die über Produkte untereinander verknüpft ist. Dies wird anhand einer vereinfachten Prozesskette zur Rohstahlerzeugung in Abbildung 5-2 veranschaulicht.

⁶⁶ vgl. Hutter, C., Köhler, D.: Ökobilanzierung mit Hilfe der KEA-Datenbank - Praxistests, Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München 1999, Seite 31 ff

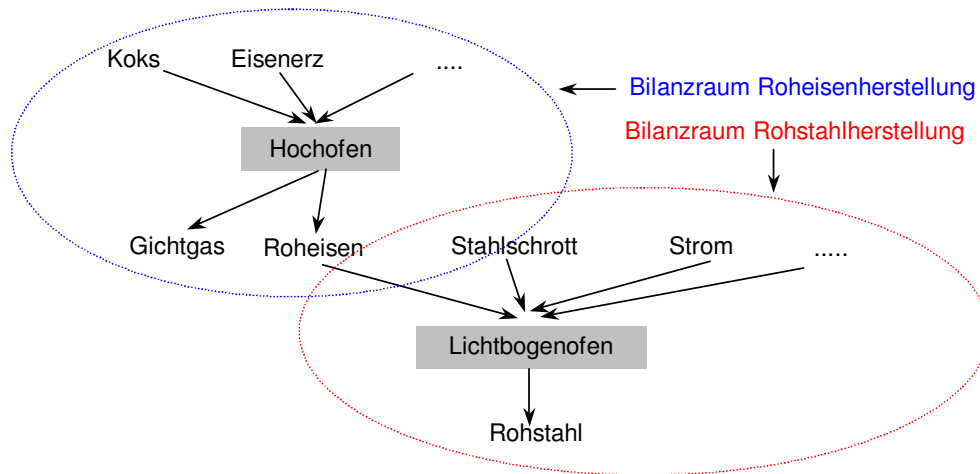


Abbildung 5-2 Vereinfachte Prozesskette zur Rohstahlgewinnung⁶⁷

Das in der Datenbank integrierte Berechnungstool macht es möglich, alle bekannten Energieaufwendungen und evtl. Emissionen, die in ein bestimmtes Produkt fließen, zu kumulieren. Die Summe daraus ergibt nun den Gesamtenergieaufwand eines Produktes.

5.1.3 Bedienung

Nachdem man sich zum Programm über einen persönlichen Login Zugang verschafft hat, stehen folgende Menüs zur Verfügung:

- Datei: Hier besteht die Möglichkeit Daten aus Vorgängerversionen oder anderen Datenbanken zu importieren und das Programm zu beenden.
- Bearbeiten: Hier können Produkte bzw. Prozesse ausgewählt werden (Produkt bzw. Prozess suchen), die für eine Bilanzierung herangezogen werden sollen.
- Administrator: In diesem Menü können Grundeinstellungen vorgenommen werden.
- Hilfe: Übliche Windows-Hilfe

Für Produkt- bzw. Prozess-Suchen sind auch Schaltfelder vorgesehen (vgl. Abbildung 5-3). Über das Schaltfeld „Produkt suchen“ gelangt der Benutzer in das in

⁶⁷ entnommen aus: Hutter, C., Köhler, D.: Ökobilanzierung mit Hilfe der KEA-Datenbank - Praxistests, a.a.O., Seite 32

Abbildung 5-4 dargestellte Suchfenster, in dem ein zu bilanzierendes Produkt unter anderem über einen Filter ausgewählt und über einen Button die Form der Darstellung vorgegeben werden kann. Es können aber auch neue Produkte erstellt werden. Dies macht allerdings nur Sinn, wenn die entsprechenden Input-Produkte und Prozesse auch in der Datenbank enthalten sind. Möchte man z.B. ein Auto bilanzieren, müssen dafür auch alle Zwischenprodukte, Halbzeuge und sonstige Aufwendungen vorliegen, sonst würde dies schon programmtechnisch nicht funktionieren oder das Ergebnis wäre wenig aussagekräftig. Das Feld „Prozess suchen“ bietet im Großen und Ganzen die selben Funktionen, wie „Produkt suchen“ und beinhaltet somit ein weitgehend identisches Suchfenster.

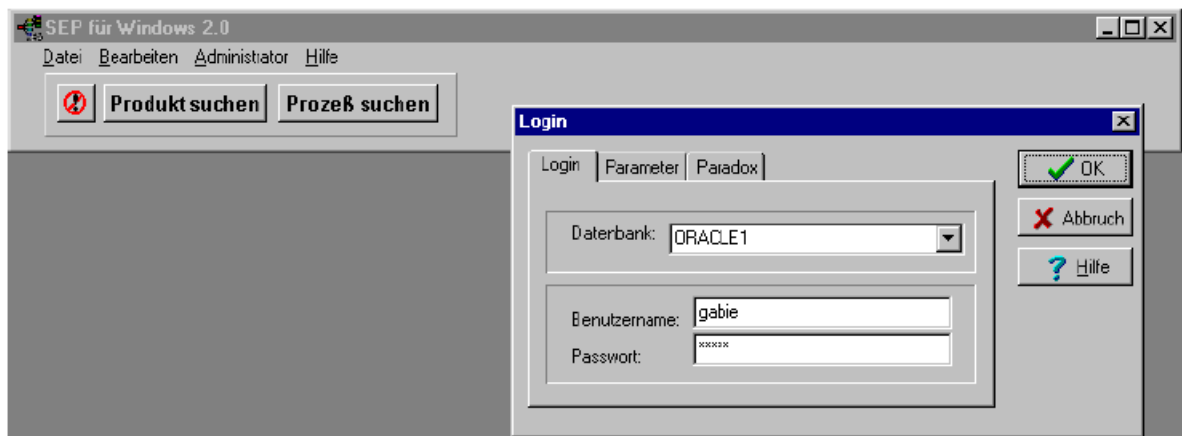


Abbildung 5-3 Startansicht des Programms

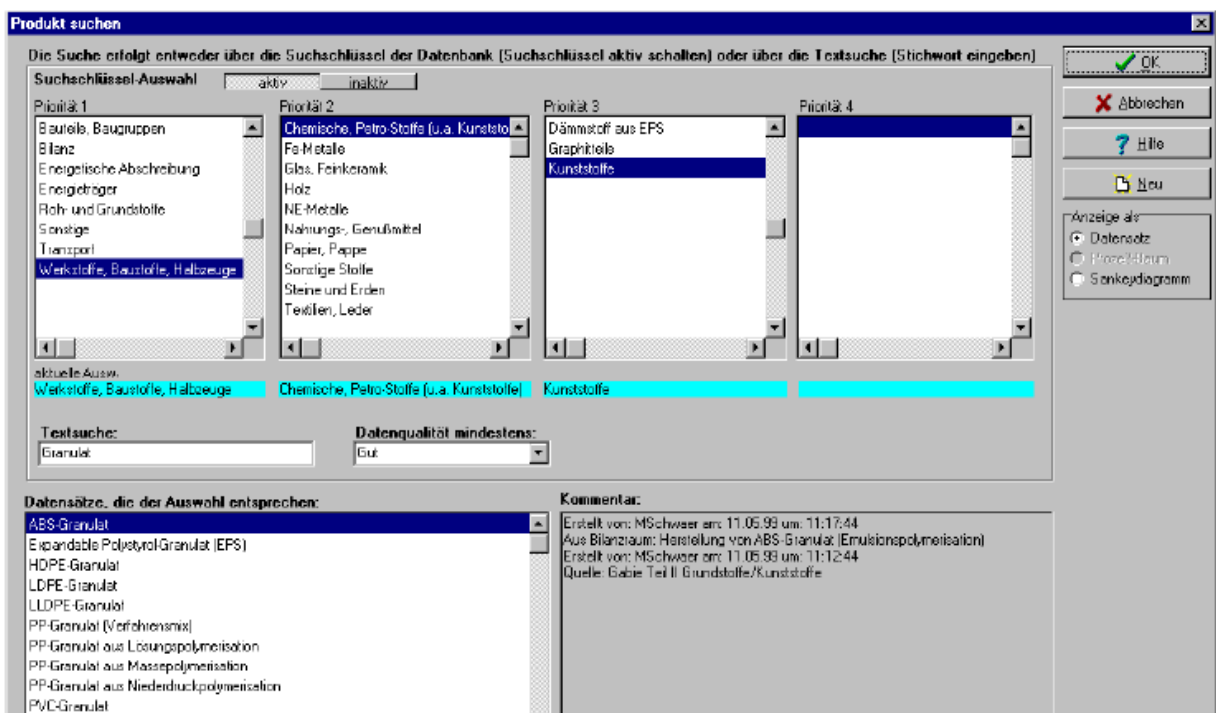


Abbildung 5-4 Suchmaske für Produkte

5.1.3.1 Darstellung von Produktinformationen

Hat man sich für ein Produkt entschieden, in diesem Beispiel Zementklinker, der Grundstoff für jede Zementsorte, bietet das Programm zwei Möglichkeiten Informationen darzustellen. Zum einen wäre das ein so genanntes Datenblatt. Dieses enthält allgemeine Informationen wie Name, Bezugsgröße und Einheiten der Stoffwerte, die angezeigt werden sollen, sowie die Werte selbst (z.B. Masse, Heizwert, KEA, Bereitstellungsnutzungsgrade, CO₂, NO_x, SO₂, usw.). Die Angaben beziehen sich dabei immer auf ein bestimmtes Gewicht z.B. ein Kilogramm oder Gramm. Ferner bietet sich noch die Möglichkeit, einen Kommentar zum Datensatz zu verfassen, der aber teilweise vom Programm vorgegeben wird. Dieser enthält z.B. automatisch Angaben zur Datenqualität und zur Erstellung des Datensatzes (Datum, Uhrzeit, Person usw.).

Die Darstellung der Werte kann aber auch graphisch anhand von so genannten Sankey-Diagrammen erfolgen, nachdem man die nötigen Parameter (z.B. darzustellende Eigenschaften und Anzahl der Ebenen) festgelegt und die Schaltfläche „Anzeigen“ im Datenblatt bestätigt hat.

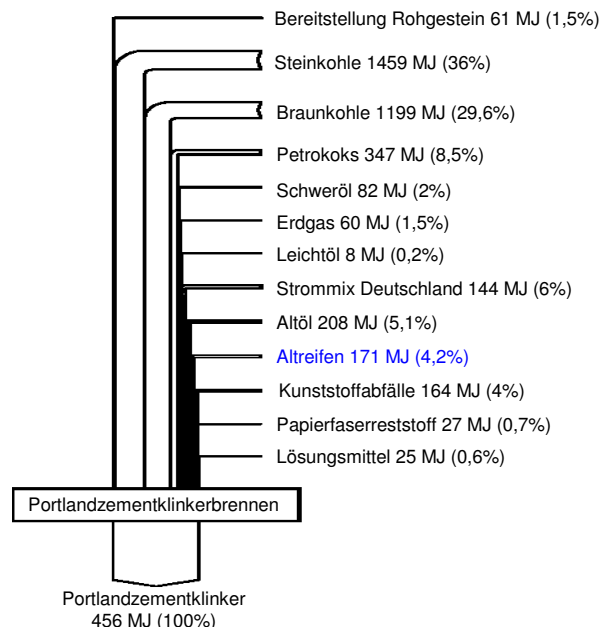


Abbildung 5-5 Primärenergieflussbild für eine Tonne Portlandzementklinker⁶⁸

⁶⁸ entnommen aus: Hutter, C., Lilleike, J., Schwärzer, M.: Ganzheitliche Bilanzierung von Grundstoffen und Halbzeugen, Teil II: Baustoffe, Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München 1999, Seite 36

Hinzuzufügen ist, dass im Produkt-Datenblatt die Option besteht, die Berechnung der Werte entweder entlang der ganzen Prozesskette oder über bestimmte Bilanzräume (vgl. Abbildung 5-2) zu vollziehen. Dies kann bei sehr langen Prozessketten nützlich sein, beschränkt aber die Datenqualität, da bestimmte Parameter wie z.B. Altreifen bei der Portlandzementherstellung außer Acht gelassen werden.

Das Programm beinhaltet des Weiteren verschiedene Auswertungsmöglichkeiten, wie z.B. explizites Ausweisen von bestimmten Aufwendungen am Gesamt-KEA eines Produktes. Möchte man in diesem Zusammenhang die Energiemengen für die Transporte bei der Portlandzementklinkerherstellung wissen, errechnet das Programm jene anhand der Mengen und der für die Erzeugung der Inputs geleisteten Transporte, die in der Datenbank enthalten sind.

5.1.3.2 Darstellung von Prozessinformationen

Dem Erzeugen von Produkten stehen natürlich auch Herstellungsprozesse gegenüber. Neben dem Produkt-Datenblatt existiert daher ein sogenanntes Prozess-Datenblatt. In diesem können die Inputs und Outputs von Prozessen bestimmt, neue Prozesse angelegt und bestehende verändert werden. Der Kopf des Prozess-Datenblatts entspricht dabei weitgehend dem der Produkte. Wesentliches Element sind die beiden dargestellten Listen. Zum einen die Liste der Inputs mit deren Inputmengen und zum anderen die Liste der Outputs mit deren Outputmengen. Anhand spezieller Berechnungsvorschriften und Kuppelfaktoren errechnet das Programm aus den Inputmengen den dazugehörigen Output (z.B. KEA Wert, Emissionswerte). Dies erfolgt standardgemäß direkt proportional zur Masse oder zum Heizwert. Es besteht aber auch die Möglichkeit, alle Werte von Hand einzugeben. Mit dem Anlegen der Prozesse ist somit ein weiterer Grundstein für das Bilanzieren eines Produktes gelegt.

Um Prozesse auch anschaulich darzustellen, können Prozessbäume erzeugt werden, die eine Prozesskette graphisch in ihre Einzelprozesse aufteilen. Der Prozessbaum ist aber keine reine Graphik, sondern bietet durch Doppelklicken auf die jeweiligen Prozesse die Option, diese zu bearbeiten. Es können hier also ähnliche Funktionen ausgeführt werden wie im Datenblatt.

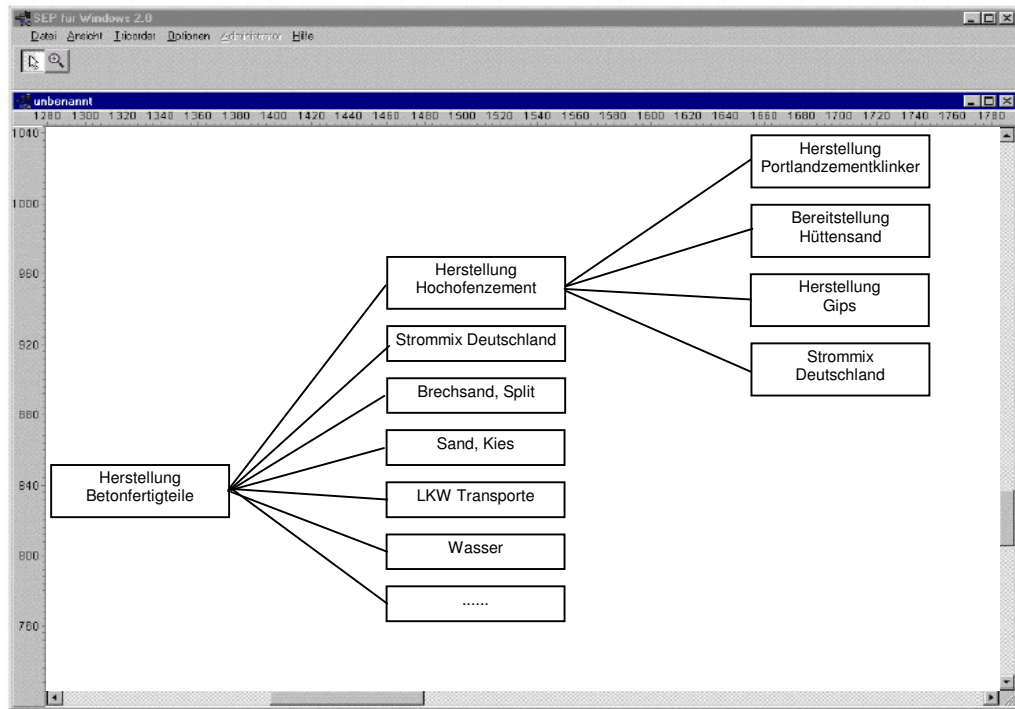


Abbildung 5-6 Ausschnitt aus dem Prozessbaum Betonfertigteilerstellung⁶⁹

5.1.4 Eignung für die Bilanzierung

Im Vergleich zu anderen Softwarelösungen zur Unterstützung der Ökobilanzierung liegt der Schwerpunkt dieses Programms hauptsächlich in der Erstellung von Energie- und Stoffstromanalysen, d.h. in der Sachbilanz (vgl. Abbildung 3-2). Aussagen über eventuelle Auswirkungen der in der Sachbilanz ermittelten Werte können mit diesem Programm nicht gemacht werden. Somit entspricht es auch nicht den Anforderungen für die Erstellung eines Ökoaudits nach EN ISO 14000 ff.

Der Einsatzschwerpunkt der Software liegt daher eindeutig in der Produktökobilanz. Hier bietet der KEA sogar eine ausgereifere und konkretere Methodik der Bilanzierung an, als das in der EN ISO Norm 14040 ff „Produktökobilanz“ vorgegeben wird, da sein Schwerpunkt auf der Exploration, Gewinnung und Aufbereitung von Energieträgern beruht⁷⁰. Die ISO Norm dagegen lässt hier wesentlich mehr Spielraum, da ihr eigentlicher Zweck die Bilanzierung im Hinblick auf mögliche Umweltauswirkungen ist und nicht die exakte Ermittlung des

⁶⁹ entnommen aus: Hutter, C., Lilleike, J., Schwärzer, M.: Ganzheitliche Bilanzierung von Grundstoffen und Halbzeugen, Teil II: Baustoffe, a.a.O., Seite 49-58

⁷⁰ vgl. Hutter, C., Köhler, D.: Ökobilanzierung mit Hilfe der KEA-Datenbank - Praxistests, a.a.O., Seite 28

Ressourcenverbrauchs. Die KEA Methodik wird deswegen im Fachjargon auch als Kurz-Ökobilanz bezeichnet.

Neben der Produktökobilanz ist es dem Programm auch möglich eine „Betriebsökobilanz“ aufzustellen, die die Auswirkungen der Tätigkeit eines Unternehmens am jeweiligen Standort auf die Umwelt beschreibt⁷¹. Diese Auswirkungen lassen sich auf die betrieblichen Stoff- und Energieströme zurückführen und werden mit Hilfe einer betrieblichen Input-Outputanalyse dargestellt. Die innere Struktur des Betriebes bleibt dabei unberücksichtigt, womit der Betrieb sozusagen als Blackbox angesehen werden kann.



Abbildung 5-7 Betriebliche Input-Output-Analyse⁷²

Somit können wichtige betriebliche Kennzahlen errechnet werden, wie z.B. die Entwicklung des Energieverbrauchs im Unternehmen über den periodenweisen Vergleich des KEA pro Kilogramm Produkt. Diese Art der Bilanzierung entspräche im betrieblichen Rechnungswesen einer reinen Gewinn- und Verlustrechnung ohne Berücksichtigung jeglicher Bestände. Sinken z.B. die Mengen an Sonderabfällen im Vergleich zur letzten Periode, so würde das eine wesentliche Verbesserung der Ökobilanz bedeuten. Man ist jedoch der Auffassung, dass diese Bestände irgendwann den Betrieb verlassen und schließlich miterfasst werden. Dadurch verzerrt sich die Bilanz aber zu sehr und gibt keinen wahrheitsgetreuen Aufschluss über die ökologische Bewertung eines Unternehmens.

Auch wurde die KEA-Datenbank ursprünglich nicht als Werkzeug für die Durchführung eines betrieblichen Öko-Audits konzipiert, schon alleine deswegen,

⁷¹ vgl. Hutter, C., Köhler, D.: Ökobilanzierung mit Hilfe der KEA-Datenbank - Praxistests, a.a.O., Seite 14

⁷² entnommen aus: Hutter, C., Köhler, D.: Ökobilanzierung mit Hilfe der KEA-Datenbank - Praxistests, a.a.O., Seite 15

weil sie auf der KEA-Bilanzierung beruht. Diese wurde aber wiederum hauptsächlich für Lebenszyklusanalysen von Produkten entwickelt. Aus diesen Gründen ist die Anwendung der Software für Betriebsbilanzen eingeschränkt.

5.2 Umberto

Mit Umberto wurde 1994 von Mitarbeitern des ifeu-Instituts für Energie- und Umweltforschung in Heidelberg und von Informatikern des Ifu-Instituts für Umweltinformatik in Hamburg ein Programm vorgestellt, das die komplexen Zusammenhänge der Ökobilanzierung besser erfasst und dennoch flexibel in der Anwendung bleibt. Dies konnte man durch die Verwendung von Petrinetzen, wie sie in der Informatik gebräuchlich sind, erreichen.

5.2.1 Aufbau der Struktur des Stoffstromnetzes

Generell wird bei einer Produktökobilanz und bei einer Betriebsbilanz unterschiedlich vorgegangen⁷³. Bei der Produktökobilanz geht man vom Produkt aus und analysiert zuerst die Herstellungsprozesse der benötigten Einzelteile und schließlich die dafür benötigten Vorprodukte, Hilfs- und Betriebsstoffe. Die Berechnung erfolgt also Schritt für Schritt entgegen der eigentlichen Stoffstromrichtung des Systems. Bei der betrieblichen Bilanz wird meistens vom Wareneingang aus „flussabwärts“ gerechnet, d.h. entlang des Flusses der Stoffströme und für den Einzelprozess aus der bekannten Inputmenge der Output berechnet. Aufgrund der sich immer weiter verzweigenden Netzstruktur werden mehrere Prozesse und Produkte erfasst. Probleme ergeben sich bei Stoffrekursionen, d.h. wenn ein Prozess Input eines nachgelagerten Prozesses benötigt und wenn Lagerbestände und Recyclingschleifen, bei denen Wertstoffe nach der Nutzung wieder in die Herstellung fließen, zu berücksichtigen sind.

Dieser sich bis jetzt ausschließende Gegensatz wird von den oben genannten Stoffstromnetzen (Petrinetzen), die die kombinierte Strom- und Bestandsrechnung ermöglichen, „überwunden“. Der Aufbau solcher Netze besteht aus drei

⁷³ vgl. Schmidt, M., Häuslein, A.: Ökobilanzierung..., a.a.O., Seite 18 ff

verschiedenen Elementklassen und kann mit Hilfe eines graphischen Netzeditors vorgenommen werden⁷⁴.

- Transitionen stehen stellvertretend für Prozesse, d.h. in ihnen findet die Energie- und Stoffumwandlung eines Prozesse statt. Einem bestimmten Input wird also nach vordefinierten Regeln (z.B. Kuppelfaktoren) oder Rezepturen der dazugehörige Output zugeordnet.
- Stellen sind dagegen Lager, in denen nur das Halten von Energie- und Stoffbeständen und deren Verteilung erfolgt. Des weiteren existieren noch Input-Output-Stellen, die die Schnittstellen zur Außenwelt darstellen und die Verbindungsstellen, die Ströme nur verteilen können, aber nicht als Lager wirken (d.h. deren Bestände immer Null oder konstant sind).
- Verbindungen zeigen an, wie die Energien und Stoffe im Netz fließen, bzw. welche Prozesse über diese Ströme miteinander verbunden sind. Dabei muss beachtet werden, Stellen und Transitionen beim Erstellen eines Netz stets abzuwechseln. Transitionen müssen also immer durch eine Stelle verbunden werden. Findet keine Lagerhaltung statt, verwendet man zur Verknüpfung Verbindungsstellen.

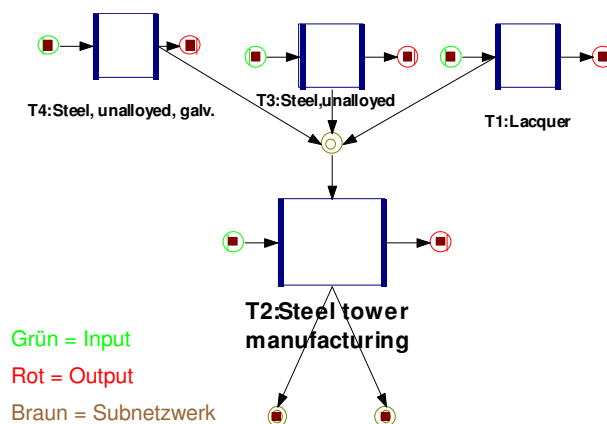


Abbildung 5-8 Netzstruktur eines WKA Stahlturms in Umberto⁷⁵

⁷⁴ vgl. Schmidt, M., Häuslein, A.: Ökobilanzierung..., a.a.O., Seite 38
⁷⁵ entnommen aus: Bruno I.: Ecobalance of a wind turbine, Diplomarbeit, Institut für technische Thermodynamik, DLR-Suttgart, Stuttgart 2003, Seite 53

Beim Einsatz von Software zu Ökobilanzierung entsteht schnell ein sehr großer Datenbestand. Deswegen beinhaltet Umberto neben den Stoffstromnetzen noch weitere Strukturierungselemente. Hierzu zählen Projekte, die alle Daten mit Hilfe von Materiallisten und Szenarien zusammenfassen, die zum Untersuchungsthema gehören (hier Windrad). Ein Szenario besteht dabei aus einem Stoffstromnetz, deren Gesamtheit wiederum ein Projekt beschreibt.

5.2.2 Spezifikation der Netzelemente

Neben der Netzstruktur müssen die darin enthaltenen Netzelemente näher spezifiziert (beschrieben, definiert) werden. Zur Spezifikation von Transitionen werden einerseits die Materialien angegeben, die dem Input oder Output des jeweiligen Prozesses entsprechen und andererseits die Abhängigkeiten der Materialströme festgelegt. Diese können wie bei der KEA-Datenbank in Form von Verhältniszahlen oder Funktionen gemacht werden. Die Spezifikation der Stellen besteht aus den Anfangsbeständen der Stellen mit den dazugehörigen Materialbezeichnungen und Mengen. Für Durchgangsstellen werden meist Anfangsbestände von Null angenommen. Um Verbindungen zu spezifizieren, werden Material und Menge angegeben, von denen ein Fluss in der Verbindung stattfindet. Normalerweise genügen aber nur wenige Verbindungsspezifikationen um alle anderen Stoffströme berechnen zu können.

Eingegeben können Spezifikationen nun entweder manuell in einer Input-Outputliste oder sie können bei sich wiederholenden Prozessen der programminternen Bibliothek bzw. Datenbank entnommen werden.

5.2.3 Auswertung und Darstellung der Stoffstromdaten

Nach der Berechnung der Stoff- und Energieströme, in der auch unbekannte Ströme so weit wie möglich erfasst und berechnet werden, können diese nun in Umberto auf vielfältige Weise ausgewertet und dargestellt werden⁷⁶. Hierzu dient in erster Linie die so genannte „Balance sheet“ des Inventory Inspectors, die vergleichbar mit den Datenblättern der KEA-Datenbank ist. Die Bilanz ist ebenfalls nach dem Muster der Input-Outputtabellen aufgebaut und stellt die Energie- und Stoffströme hinsichtlich

⁷⁶ vgl. Schmidt, M., Häuslein, A.: Ökobilanzierung..., a.a.O., Seite 47 ff

der auftretenden Materialarten und -mengen dar. Hierbei ist die Bilanzierung ganzer Netze möglich, aber auch einzelne Ausschnitte und Prozesse können auf diese Weise betrachtet werden (vgl. Abbildung 5-9).

Input:			Output:		
Item	Quantity	Unit	Item	Quantity	Unit
T1 Operation			T2 wind turbine		
Sonstige			basic chemical materials		
Windenergie	2.94215E11	kJ	basic chemical materials, inorg.		
T2 wind turbine			sulfuric acid	529.493680	kg
basic chemical materials			emissions (air)		
basic chemical materials, inorg.			Abgas (trocken Nomvol.)	5.340383E5	Nm ³
nitrogen	735.484379	kg	particles	3.397794E3	kg
oxygen	208.407614	kg	particles (>PM10)	0.632174	kg
phosphate (as P2O5)	2.351578	kg	particles (PM10)	1.378656	kg
sodium hydroxide	0.084436	kg	particles (small)	215.625997	kg
sulfuric acid	0.000337	kg	particles from diesel exhaust	0.477900	kg
emissions (water)			VOC (a)		
emissions (w)			methane	1.909063E3	kg
inorganic compounds (w)			methane, fossil	127.498385	kg
phosphate	0.015475	kg	methane, renewable	0.025151	kg
fine chemicals			NMVOC (a)		
explosives	3.676726	kg	NMVOC (HC excl. benzene)	0.041719	kg
land use			NMVOC (HC excl. PAH)	0.634188	kg
Fläche K2	19.182129	m ²	NMVOC (HC excl. PAH/Benzene)	0.118549	kg
Fläche K3	215.798951	m ²	NMVOC (hydrocarbons)	0.000001	kg
Fläche K4	124.683838	m ²	NMVOC from diesel emission	0.741151	kg
Fläche K5	70.334473	m ²	NMVOC, arom., unspec.	0.413498	kg
Fläche K7	1.778081	m ²	NMVOC, halog. (a)		
land use C7 (FRG)	0.000101	m ²	NMVOC, chlorinated (a)		
land use II-III	965.177008	m ² 2a	NMVOC, chlor., aliph. (a)		
land use II-IV	1.206471E3	m ² 2a	dichloroethylene	1.024084	kg
metals			vinyl chloride	0.747875	kg
ferrous metals			NMVOC, chlor., arom. (a)		
steel	0.086792	kg	chlorobenzenes	0.000000	kg
Materialien			chlorophenols	0.000000	kg
PA	247.800000	kn	PCR	0.001380	kn
Sum			Sum		
kJ	3.06253E11	kJ	kBq	3.100912E8	kBq
kg	7.285952E7	kg	kJ	2.95170E11	kJ

Abbildung 5-9 „Balance Sheet“ einer Windkraftanlage⁷⁷

Die Datenqualität hängt zum Großteil davon ab, wie genau die Netzwerke im Vorfeld gestaltet wurden. Weiterhin lassen sich die Werte automatisch auf eine Einheit eines Materials skalieren. So lässt sich z.B. Erdgas auch in m³ angeben statt in Kilo.

Umberto bietet dem Anwender darüber hinaus zahlreiche graphische Ausgabemöglichkeiten und, um dem Namen einer Ökobilanzsoftware zu tragen, auch vielfältige, an kein bestimmtes System geknüpfte Optionen zur Wirkungsabschätzung. Es kann anhand von Kennzahlen (z.B. Energieverbrauch pro Umsatz etc.), Ökopunkten (Schweizer Methode) und Koeffizienten eine Aussage über viele Auswirkungen der Stoffe auf die Umwelt getroffen werden. Die Methode des Umweltbundesamtes Berlin schlägt z.B. zehn verschiedene Auswirkungen vor,

⁷⁷ entnommen aus: Bruno I.: Ecobalance of a wind turbine, Diplomarbeit, Institut für technische Thermodynamik, DLR-Suttgart, Stuttgart 2003, Seite 16

die man bei der Durchführung einer Ökobilanz betrachten sollte⁷⁸: Verbrauch von Rohstoffen, Treibhauseffekt, Ozonabbau, Beeinträchtigung der Gesundheit des Menschen, Direkte Schädigung von Organismen und Ökosystemen, Bildung von Photooxidantien, Versauerung von Boden und Gewässer, Eintrag von Nährstoffen in Böden und Gewässer, Flächenverbrauch und Lärmbelästigung.

5.2.4 Eignung zur Bilanzierung

Nachdem Umberto in seinen Grundzügen beschrieben wurde, wird deutlich, dass in diesem Programm die Schwachstellen, wie jene bei der KEA-Datenbank zu finden waren, zum größten Teil behoben wurden. Umberto eignet sich sowohl für die Aufstellung einer Produkt- als auch einer Betriebsökobilanz, was erst durch Petrinetze ermöglicht werden konnte. Im Grunde besteht das Programm aus einer relationalen Datenbank, deren Zugriff durch die Benutzeroberfläche gekapselt ist und dessen Berechnungsvorschriften weder auf einen speziellen inhaltlichen Anwendungsbereich (Kostenrechnung, Prozessoptimierung, Umweltmanagement, Produktökobilanz)⁷⁹ noch auf eine bestimmte Bilanzierungsmethodik⁸⁰ beschränkt sind. Daher lässt sich auch eine Berechnung des KEA, wie er in der VDI-Richtlinie vorgegeben wird, durchführen⁸¹. Wichtige Punkte der Richtlinie wie Bestimmung der Bilanzgrenzen, Kombination von Mikro- und Makroanalyse, Berücksichtigung von Kuppelprodukten, Rückführung von Stoffen und gleichzeitige Erfassung von Stoff- und Energieströmen finden dabei ausreichend Berücksichtigung⁸².

5.3 Gemis

Das Computerprogramm Gemis⁸³ (Gesamt-Emissions-Modell-Integrierter-Systeme) wurde vom Öko-Institut e.V. und der Gesamthochschule Kassel (GhK) in den Jahren 1987-89 entwickelt. Der Schwerpunkt dieser Software liegt bei der Analyse von Umwelt- und Kostenaspekten im Bezug auf Energie-, Stoff- und Transportsystemen.

⁷⁸ vgl. Stahl, B.: Methodenvergleich und Methodenentwicklung zur Lösung der Bewertungsproblematik in produktbezogenen Ökobilanzen, Dissertation, Bremen 1998, Seite 43

⁷⁹ vgl. www.umberto.de/#wasist, Datum: 25. Februar 2004

⁸⁰ vgl. Saykowski, F., Übertragung der KEA-Richtlinie auf den aktuellen Stand der Ökobilanzierung, VDI-Berichte 1218, VDI Verlag, Düsseldorf 1995, Seite 57

⁸¹ vgl. Schmidt, M., Häuslein, A.: Ökobilanzierung mit Computerunterstützung, a.a.O., Seite 171 ff

⁸² vgl. Saykowski, F., Übertragung der KEA-Richtlinie..., a.a.O., Seite 65 ff

⁸³ vgl. www.oeko.de/service/gemis/files/setup/setup.exe, Datum: 25. Januar 2004

Deswegen kann die Software auch als ein branchenspezifisches Tool bezeichnet werden. Dieses Programm stellt aber lediglich ein Hilfsmittel, aufgrund relativ guter recherchierten Daten im Zusammenhang mit den drei genannten Bereichen dar. Es ist als Ökobilanzsoftware in einem Betrieb ungeeignet, da es weder ISO-Norm konform ist noch eine betriebliche Analyse (außer Energieversorgungsunternehmen) zulässt. Dennoch stellt es auf dem Energiegebiet ein sehr nützliches Werkzeug dar, das eine umfassende Datenbasis bereitstellt und noch dazu als „public domain“ Software öffentlich zugänglich ist.

Eine genauere Beschreibung des Programms soll an dieser Stelle nicht folgen, da alle Informationen im Internet erhältlich sind und heruntergeladen werden können. Weiterhin unterscheidet sich der Grundaufbau z.B. im Vergleich zur KEA-Datenbank nicht wesentlich. Jedoch sollen die Kernpunkte des Programms kurz aufgezählt werden:

- Datenbank, die relevante Informationen zu Energie-, Stoff- und Transportsystemen bereitstellt, inkl. Kommentaren/Datenquellen, Ortsbezug und Hinweisen zur Datenqualität.
- Zusätzlich zu den Produkten und Prozessen entwickeltes Szenariomodul, in dem eine Vielzahl von Energie-, Stoff- und Transportprozessen sowie deren Kombination miteinander verglichen werden können.
- Analysemodul zur Berechnung von Szenarien und vertiefte Darstellung der Ergebnisse.
- Grafikmodul zur Darstellung.
- Umfassendes Hilfe-System mit Handbuch.

Hervorzuheben ist, dass Gemis alle wesentlichen Schritte von der Primärenergiegewinnung bis zur Bereitstellung von Nutzenergie mit einbezieht, d.h. auch Hilfsenergien und Materialaufwand zur Herstellung von Energieanlagen und Transportsystemen, wie es durch die VDI-Richtlinie speziell für den KEA vorgeschrieben ist. Die Datenbank enthält dabei im Vergleich zu anderen Datenbanken oder Programmen die Bereitstellung von Energieträgern (fossile, regenerative, und nachwachsende Energieträger, Uran, usw.), von Wärme und Strom (Kraftwerke, Heizungen usw.), von Stoffen (Stahl, Kupfer, Baumaterialien usw.) und von Transportprozessen (Personenkraftwagen, öffentliche Verkehrsmittel,

Gütertransporte usw.). Weiterhin ist es auch möglich, mit Hilfe von Schnittstellen (Input-Output-Stellen) Daten von Gemis auf Umberto zu übertragen. Neben den üblichen Auswertungsmöglichkeiten nach Ressourcenaufwand, Emissionen (CO₂, CH₄, N₂O, Staub, SO₂, NO_x, CO und NMVOC), Flächenbedarf usw. kann das Programm auch Kosten berücksichtigen, die z.B. zur Berechnung des volkswirtschaftlichen Schadens bei zu hohen Emissionswerten (Smog) herangezogen werden können.

6 Bilanzierung der Windkraftanlage E-66

6.1 Windkraftanlagen

6.1.1 Weltweite Entwicklung

Die ersten Informationen über die Existenz von Windmühlen stammen aus historischen Quellen aus dem Jahre 644 nach Christus⁸⁴. Diese Windmühlen mit vertikaler Achse wurden im persisch-afghanischen Grenzgebiet zum mahlen von Getreide eingesetzt. In Europa wurden Windmühlen zum ersten Mal im 12. Jahrhundert in der Normandie erwähnt. Von da an verbreitete sich diese Technik über Europa und die ganze Welt.

Doch dem Dänen Poul la Cour gelang es nach historischen Überlieferungen zum ersten Mal 1891 mit einem Windrad Strom für den eigenen Bedarf zu erzeugen. Vor allem in Europa, aber auch in Amerika, begann man von diesem Zeitpunkt an immer effektivere Windräder zu entwickeln, die hauptsächlich zur Versorgung von ländlichen Gehöften bestimmt waren. Die Leistungen der Anlagen betrug Mitte des 20. Jahrhunderts schon bis zu 1200 kW (eine Pilotanlage in den USA). Der Durchschnitt war jedoch mit ca. 1-50 kW wesentlich geringer. Nachdem den Windkraftanlagen auf Grund der niedrigen Energiepreise Mitte des letzten Jahrhunderts keine weitere weltweite Beachtung galt, erlebten diese in den letzten 10 Jahren eine unerwartete Renaissance.

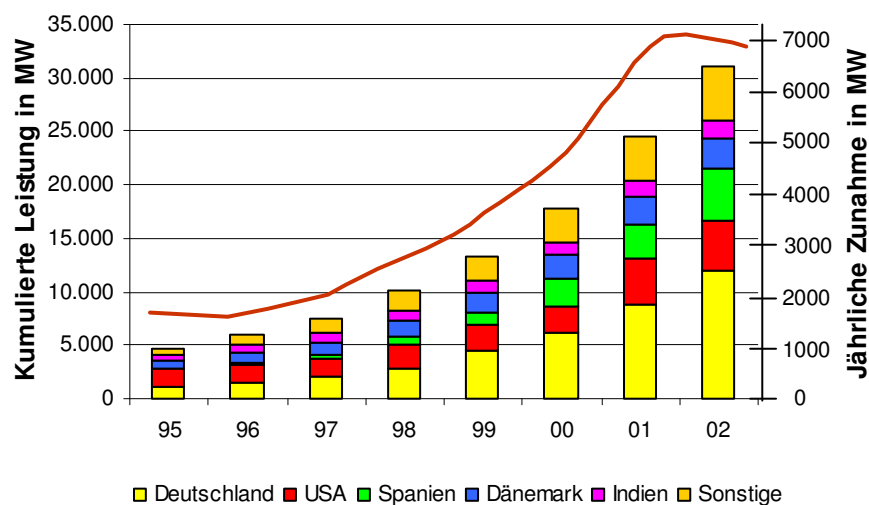


Abbildung 6-1 Entwicklung der weltweit installierten Leistung von WKA⁸⁵

⁸⁴ vgl. Hau, E.: Windkraftanlagen – Grundlagen – Technik – Einsatz – Wirtschaftlichkeit, Springer Verlag, Berlin 1988, Seite 2 ff

⁸⁵ vgl. Bundesverband Windenergie, Zahlen zur Windenergie - Statistik, Datum: 23. Februar 2004

Dem Diagramm ist zu entnehmen, dass Ende des Jahres 2002 rund 30.000 MW Gesamtleistung installiert waren. Das entspricht ca. 0,4 Prozent des weltweiten Strombedarfs. Fast 86 Prozent der Leistung stehen in Ländern der EU, wobei Deutschland daran, noch weit vor Dänemark, einen Anteil von ca. 53 Prozent hat und damit auch ein Drittel zur weltweit installierten Gesamtleistung beiträgt⁸⁶. Zurückzuführen ist diese Entwicklung auf die unterschiedlichen politischen Rahmenbedingungen und Fördermaßnahmen in den jeweiligen Ländern. Gesetzlich festgelegte Einspeisevergütungen in Deutschland und Spanien sowie eine stromertragsabhängige Steuervergünstigung in den USA sind dafür verantwortlich, dass bis zu 80 Prozent der zugebauten Leistungen in diesen drei Ländern erreicht wurde. Eine dänische Studie prognostiziert sogar, dass Ende 2007 ca. 83.000 MW weltweit installiert sein werden, d.h. zwei Prozent des Strombedarfs würden durch Windkraft gedeckt⁸⁷.

6.1.2 Windkraftanlagenhersteller

Weltweit gab es im Jahre 2002 etwa 25 Windkraftanlagenhersteller⁸⁸. Leider lagen keine vollständigen Zahlen zu 2002 vor, so dass die weltweiten Marktanteile der Hersteller aus dem Jahre 2001 an folgender Tabelle veranschaulicht werden.

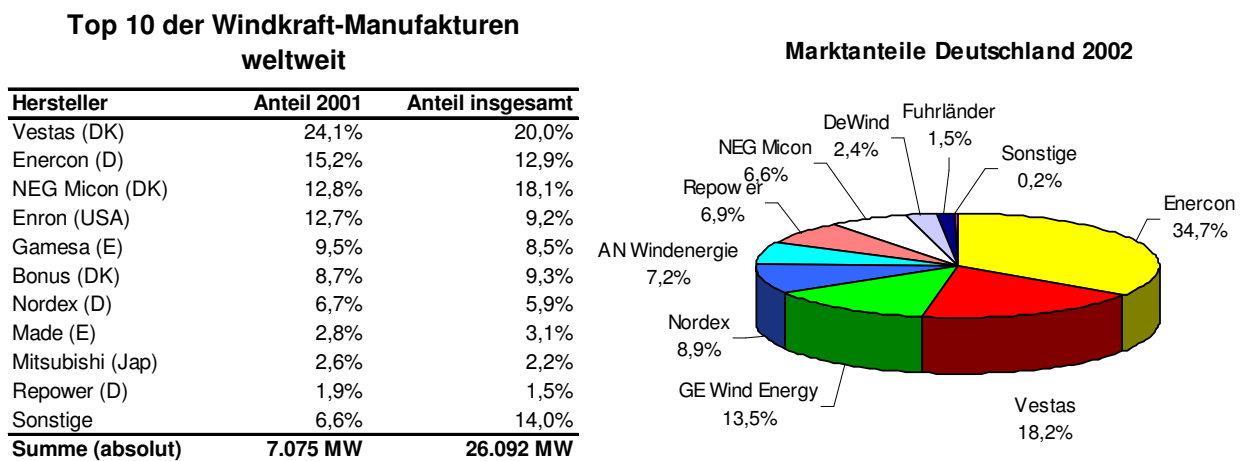


Abbildung 6-2 Marktanteile der WKA-Hersteller weltweit⁸⁹ und Deutschland⁹⁰

⁸⁶ vgl. BTM, World Market Update 2002, Datum: 24. Februar 2004, Seite 1

⁸⁷ vgl. BTM, World Market Update 2002, Datum: 24. Februar 2004, Seite 2

⁸⁸ vgl. BTM, World Market Update 2002, Datum: 24. Februar 2004, Seite 1

⁸⁹ vgl. Wind Power World Market Update 2001, (Hrsg.): Neue Energie, Heft Juni 2002, Seite 102

⁹⁰ vgl. IWR, Windenergiemarkt 2002, Datum: 24. Februar 2004

Vestas, ein dänischer Hersteller, konnte 2002 seine Marktführerschaft in der Welt mit 22,2 Prozent behaupten, gefolgt von Enercon mit 18,5 Prozent, NEG Micon, Gamesa und GE Wind (Enron). Auch wenn zu den letzten drei Firmen keine Prozentsätze vorlagen, dürften die Anteile an der gesamten weltweit installierten Leistung konstant geblieben sein. Auffallend ist, dass unter den Top Ten drei deutsche und drei dänische Hersteller zu finden sind

Die Marktanteile in Deutschland gliedern sich anders auf als die weltweiten, da hier hauptsächlich deutsche Hersteller vertreten sind. Mit der Herstellung von WKA wurde im Jahr 2002 in Deutschland übrigens ein Bruttoumsatz von ca. 4,7 Mio. Euro erwirtschaftet⁹¹.

6.1.3 Windkraftanlagen

Aber auch die Entwicklung der Windkraftanlagen schritt in den letzten Jahren kräftig voran. Zwar hatte man schon in den 1930er und 1940er Jahren Pilotprojekte mit bis zu 10 MW in Planung, doch scheiterten diese Anlagen oft an der technischen Umsetzung und an den zu dieser Zeit noch zu geringen Wirkungsgraden. Die folgende Grafik soll die rasante Entwicklung der Windkraftanlagengrößen in den letzten Jahrzehnten darstellen.

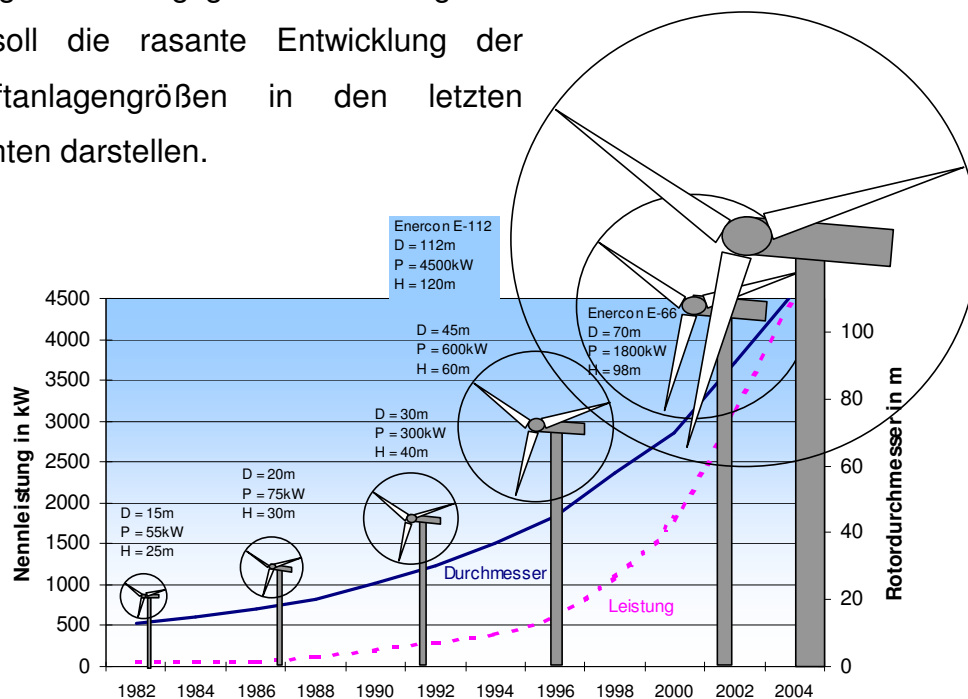


Abbildung 6-3 Entwicklung von Windkraftanlagen⁹²

⁹¹ vgl. IWR, Windenergiemarkt 2002, Datum: 24. Februar 2004

⁹² entnommen aus: Voß, A.: Windenergie – Entwicklungen, Erwartungen und energiewirtschaftliche Einordnung, Stuttgart 2003, Seite 5

Standard sind heutzutage Anlagen mit 1,0 bis 2,5 MW. Zum Vergleich kann mit einer 1,5 MW Anlage der Strombedarf von ca. 1000 Haushalten oder 3 Elektroloks gedeckt werden. Enercon hat mit der E-112, die 4,5 MW leistet, neue Maßstäbe gesetzt. Diese Anlage wurde 2002 als Pilotanlage bei Magdeburg errichtet und deckt den Strombedarf einer Kleinstadt.

6.1.4 Technische Details

Die heutigen modernen Windkraftanlagen sind im Gegensatz zu früheren Ausführungen meistens Horizontalachs-Windenergiekonverter. Rotoren mit vertikaler Achse, wie der Savonius-, Darrieus- und H-Rotor finden ihre Anwendung in speziellen Nischenanwendungen, in denen sie den Horizontalachskonvertern eindeutig überlegen sind, z.B. bei extremen Witterungsbedingungen wie in der Arktis. Eine Windkraftanlage mit horizontaler Achse zur Erzeugung elektrischen Stroms besteht im Wesentlichen aus folgenden Komponenten⁹³:

- Rotorblätter, Rotornabe, Rotorbremse und ggf. Blattverstellmechanismus
- Generator und normalerweise Getriebe
- Windmesssystem und Windnachführung (Azimutverstellung)
- Gondel, Turm und Fundament
- Elektrische Schaltanlagen, Regelung und Netzanschluss

In der folgenden Studie wird eine WKA der Firma Enercon, eine E-66/15.66 mit 1,5 MW Leistung, betrachtet⁹⁴. Dieses Modell ist Mitte der 1990er in die Serienproduktion gegangen und ist mittlerweile von der E66/18.70 mit 1,8 MW abgelöst worden. Es handelt sich hierbei um eine WKA mit drei Rotorblättern aus GFK die vor dem Turm angeordnet sind (Lufläufer). Drei Rotorblätter haben einen ruhigeren Lauf als zwei oder eines und sind vom Materialaufwand noch akzeptabel, außerdem hat die Anzahl der Rotorblätter keinen wesentlichen Einfluss auf die Leistung. GFK wird aus Kosten- und Gewichtsgründen im Vergleich z.B. zur Stahlbauweise verwendet.

⁹³ vgl. Quaschnig, V.: Regenerative Energiesysteme – Technologie, Berechnung, Simulation, Hanser Verlag, 3.Auflage, München 2003, Seite 189 ff

⁹⁴ vgl. Pick, E., Wagner, H.-J.: Beitrag zum kumulierten Energieaufwand ausgewählter Windenergiekonverter, Arbeitsbericht des Instituts für ökologisch verträgliche Energiewirtschaft, Universität Essen 1998, Seite 14 ff

Als erstes Unternehmen konstruierte Enercon seit 1991 Windenergiekonverter ohne reparaturanfälliges Getriebe. Beim Generator handelt es sich deswegen um einen synchronen Ringgenerator, dessen Drehzahl variabel ist. Dieser Generator erlaubt es auch bei niedriger Drehzahl aufgrund einer Vielzahl elektrischer Pole die nötigen Frequenzen bereitzustellen. Dadurch erhöhen sich jedoch das Gewicht und die Abmessungen des Generators (vgl. Abbildung 6-4).

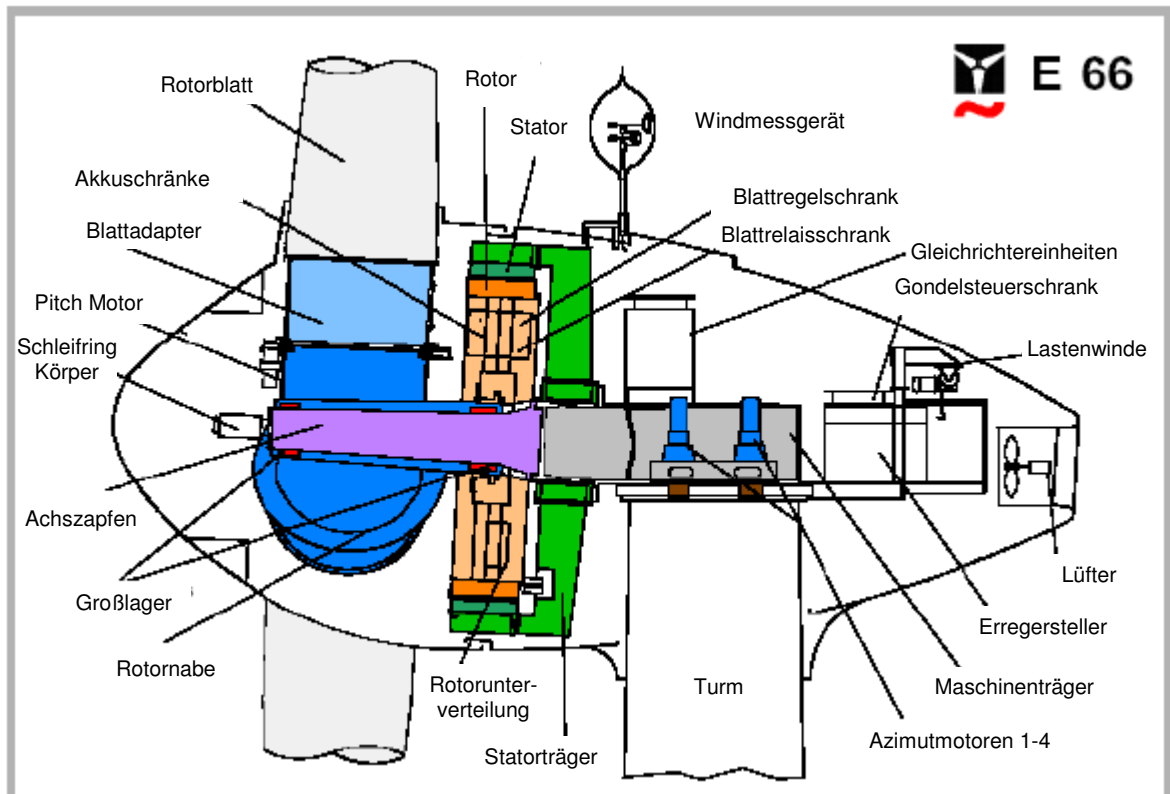


Abbildung 6-4 Gondel der E-66⁹⁵

Die Regelung der Rotorgeschwindigkeit wird über eine so genannte Pitch-Regelung vorgenommen, die den Anstellwinkel der Rotorblätter verändern kann und bewirkt, dass immer aerodynamisch optimale Strömungsverhältnisse am Blatt herrschen. Stall-Regelungen nutzen im Vergleich den so genannten Stall-Effekt. Dieser definiert sich dadurch, dass bei hohen Windgeschwindigkeiten Strömungsabrissverluste an den speziell dafür konstruierten Flügeln auftreten. Die Strömungsabrissverluste halten daher die Rotordrehzahl auf gleichem Niveau. Des Weiteren muss die Anlage immer in Windrichtung ausgerichtet werden, um ihre Leistung voll auszuschöpfen.

⁹⁵ entnommen aus: Chataignere, A., Le Boulch, D.: Wind turbine systems, Final Report, Verbundprojekt Eclipse 2003, Seite 9

Dies erreicht man durch eine drehbare Gondel (Maschinenhaus), die mit Hilfe von Giermotoren (Azimutantrieb) dem Wind nachgeführt wird.

Die Netzeinspeisung wird über einen Gleichstromzwischenkreis mit Frequenzumrichter nach Transformation auf Netzspannung vollzogen. Diese Variante hat den Vorteil, z.B. gegenüber einem Asynchrongenerator mit Getriebe und direkter Netzkopplung, wesentlich wartungsfreundlicher, geräuschärmer und mit minimaler Blindleistung betrieben werden zu können.

Standardmäßig wird die Anlage mit Stahltürmen ausgeliefert. Diese sind zum einen leichter als Betontürme und weisen ein besseres Schwingungsverhalten auf. Allgemein wird in Zukunft jedoch wieder mehr Augenmerk auf Gittermasten gesetzt, da diese bei sehr hohen Anlagen wesentlich günstiger sind, aber leider optisch weniger ansprechen. Für sehr große Anlagen (E-112), benutzt man auch Hybrid-Türme, deren untere Hälfte aus Beton und deren obere Hälfte aus Stahl besteht.

Als letztes Bauteil ist das Fundament zu nennen. Hier wird grob in flachgründige, tiefgründige und Fundamente für Offshore-Anlagen unterschieden. Dabei werden flachgründige Fundamente hauptsächlich im Binnenland verwendet. Tiefgründige Fundamente haben zusätzlich durch in den Boden gerammte Stahlpfähle Halt und finden in den Küstenregionen Anwendung. Windenergiekonverter auf See können, wie in Abbildung 6-5 zu sehen ist, am Meeresboden verankert werden.

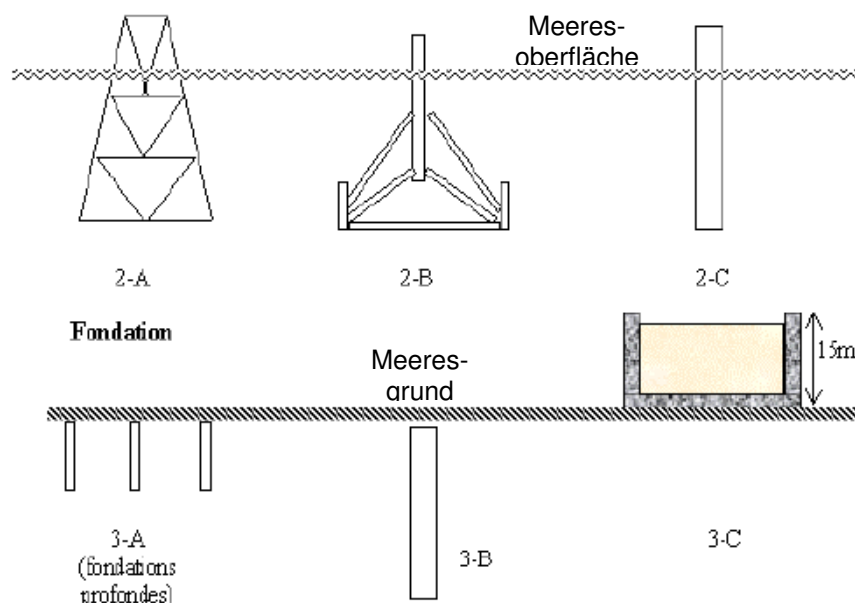


Abbildung 6-5 Offshore Türme und Fundamente⁹⁶

⁹⁶ vgl. Chataignere, A., Le Boulch, D.: Wind turbine systems, Final Report, Verbundprojekt Eclipse 2003, Seite 32

6.2 Bestimmung des KEA mit Hilfe der Materialbilanzen-Methode

Nachfolgendes Rechenbeispiel bezieht sich auf die Studie „Beitrag zum kumulierten Energieaufwand ausgewählter Windenergiekonverter“, die von E. Pick und H.-J. Wagner des Instituts für ökologisch verträgliche Energiewirtschaft der Uni Essen verfasst wurde. Weiterhin wurden die Werte der in der Studie aufgeführten Tabellen 6-1 bis 6-17 aus den Seiten 26-54 der Studie entnommen.

6.2.1 Grundlagen

6.2.1.1 Werkstoffausnutzungsgrade

Die Firma Enercon besitzt im Vergleich zu anderen Windkraftanlagenherstellern eine hohe Fertigungstiefe, z.B. werden die Rotorblätter und der Generator selbst hergestellt. Dadurch war man in der Lage eine ziemlich genaue Bilanz der eingesetzten Werkstoffe und Materialmengen der Bauteile zu erstellen.

Die Mengenzbilanzierung der verwendeten Werkstoffe wurde anhand von Stücklisten und Zeichnungen durchgeführt. Daraufhin wurden die eingesetzten Rohmaterialien zur Herstellung der einzelnen Bauteile und Vorprodukte ermittelt. Hierzu war es auch notwendig Werkstoffausnutzungsgrade η_w , die in folgender Tabelle kurz aufgelistet werden, bei den Zulieferern und bei Enercon in Erfahrung zu bringen.

Tabelle 6-1 Werkstoffausnutzungsgrade η_w für Bauteilgruppen

Bezeichnung	Ermittelte Werkstoffaus- nutzungsgrade η_w [%]	Gewählter Werkstoffaus- nutzungsgrad η_w zur weiteren Rechnung [%]	Bemerkung
Kleine bearbeitete Teile, z.B. Lagerdeckel, Druckringe	89 – 87	88	
Scweißteile	91	91	
Drehteile	91 - 80	86	
Frästeile	91 - 80	86	
Einfache Biege­teile		95	geschätzt
Normteile		95	geschätzt
Kunststoffteile, z.B. Spritzguß (PA, PE), zum Teil bearbeitet	100 - 96	98	
Glasfaser verstärkter Kunststoff (GFK): Kleinteile bis 25 Kg Großteile ab 25 Kg	90 – 81 96 - 90	85 92	Verschnitt durch Kantenbeschneidung

Werkstoffausnutzungsgrade beziehen das Endgewicht (Output eines Prozesses) eines Bauteils auf die verwendete Menge Rohmaterial (Input eines Prozesses). Aus methodischen Gründen sollte sich die Berechnung des KEA auf die Menge des Rohmaterials beziehen, d.h. je höher der Werkstoffausnutzungsgrad, desto geringer ist die Differenz des Energiegehalts zwischen End- und Rohmaterial und umgekehrt. Einflussfaktoren auf den Werkstoffausnutzungsgrad wären z.B. der Verschnitt oder die Zerspanungsleistung beim Drehen eines Werkstückes. Probleme ergaben sich bei der Elektrik und Elektronik: Hier wurde vereinfacht ein Werkstoffausnutzungsgrad η_w von 100% angenommen.

Mit diesen Werkstoffausnutzungsgraden wurden nun die eingesetzten Rohmaterialien ermittelt. Daraus ergibt sich durch Multiplikation mit dem jeweiligen KEA der Energieaufwand für das benötigte Material (KEA_{Roh}).

6.2.1.2 Energieaufwendungen der Werkstoffe

Zur Berechnung des KEA wurden spezifische Energieaufwendungen der Werkstoffe benutzt, die meist aus Prozesskettenanalysen stammen. Dennoch lagen für einige Materialien keine Werte vor. Diese wurden schließlich durch Annahmen oder Abschätzungen berücksichtigt. Da auch keine Angaben über den bei der Produktion in die Werkstoffe einfließenden Recyclinganteil verfügbar waren, wurden einige Materialien als Primärwerkstoffe angesetzt. Die Daten der folgenden Tabelle wurden von den Autoren aus einer Datenbank des Fachgebietes „Ökologisch verträgliche Energiewirtschaft“ der Universität GH Essen entnommen.

Tabelle 6-2 KEA-Werte für ausgewählte Rohmaterialien

Werkstoff/ Prozess		Dichte [Kg/dm ³]	kea [MJ/Kg]	Bemerkung
Eisenmetalle	Stahl, unlegiert	7,85	18,4	eigentlich Stahlschne
	Stahl, unlegiert, verzinkt	7,85	22,9	Blech, elektrolytisch verzinkt
	Stahl, niedrig legiert	7,85	31,0	
	Stahl, niedrig legiert, verzinkt	7,85	35,2	abgeschätzt, aus Stahl, un-legiert, verzinkt und Stahl, niedrig legiert
	Stahl, hoch legiert	7,85	42,0	
	Elektroblech	7,85	82,0	
	Stahlguß	7,85	61,8	
	Gußeisen	7,85	17,6	
	Betonstabstahl	7,85	30,1	
NE-Metalle	Aluminium	2,70	199,9	primär, BRD-Mix
	Kupfer	8,93	83,9	primär Rohstoff
	Kupfer, Verarbeitung zu Draht 0,6 mm	-	11,4	benutzt für Leitungen im Generator, Trafo
	Kupfer, Verarbeitung zu Draht 0,06 mm	-	17,9	benutzt für Stromleitungen allg.
	Zinn	7,29	67,2	
	Blei	11,34	17,7	primär Rohstoff
	Messing	8,30	53,0	
Kunststoffe	Glasfasern	2,50	50,0	
	EP Harz	1,80	80,0	geschätzt
	UO Harz	1,22	78,0	
	EPDM	-	96,8	
	FPM	-	177,2	als PA gerechnet
	Gummi	1,00	117,0	
	NBR	1,00	117,0	als Gummi gerechnet
	PA	1,13	177,2	
	PC + GF	-	91,0	mit 30% Glasfaser
	PE-LD	0,93	88,6	
	PES	1,38	177,2	als PA gerechnet
	PET	1,37	140,0	
	PMMA	1,19	91,0	
	PTFE	2,10	177,2	als PA gerechnet
	PUR	1,20	107,5	
	PVA	-	177,2	als PA gerechnet
	PVC	1,39	66,8	
	PVC-Hartschaum	-	66,8	als PVC gerechnet
Folienextrusion	-	6,0		
Sonstige	TetraPack	-	87,5	
	Isolationspapier	-	79,2	
	Holz	-	21,5	für Pressholz verwendet
	Baumwolle	0,03	7,0	als Schafschurwolle gerechnet
	Äthylenoxid	-	61,0	für Härter bei GFK
	Lack	1,10	125,0	
	Vinyltoloul	-	58,0	als Toloul gerechnet
	Fett	1,10	39,4	als Öl gerechnet, kea/Liter
	Öl	0,80	39,4	
	Elektrik, allg.	-	100,0	
	Elektronik	-	235,0	
	Normalbeton B25	2,30	0,7	inkl. Transport
	Leichtbeton B25	1,60	2,3	inkl. Transport

6.2.1.3 Fertigungszuschläge

Speziell in dieser Studie wurden die Prozessenergien, die bei der Herstellung der Bauteile und Vorprodukte bei den Zulieferern eingesetzt wurden, über pauschale Zuschlagsfaktoren abgeschätzt. Diese Zuschlagsfaktoren hat man für die betreffenden Sektoren über die IO-Analyse berechnet.

Tabelle 6-3 Fertigungszuschlagsätze, errechnet mit der IO-Analyse

Sektor	Fertigungszuschlagssatz
Stahlbau	15%
Maschinenbau	21%
Elektrotech. Erzeugnisse	16%

Prozess- und Hilfsenergien, die durch die Fertigung und Montage der Anlagenteile im Unternehmen Enercon anfallen, wurden nicht für die jeweiligen Prozesse und Verfahren messtechnisch ermittelt. Darunter fallen die direkten Energieaufwendungen, wie z.B. Strom, Gas, Diesel und auch die indirekten, wie z.B. Licht, Heizung und anderer Energiebedarf, wie z.B. für die Verwaltung und die Entwicklungsabteilung. Stattdessen wurden die bezogenen Energien mit Hilfe der Jahresenergieabrechnung von 1997 und einem Gewichtsschlüssel auf die produzierten Windkraftanlagen umgewälzt. Diesem Schlüssel liegt die Annahme zu Grunde, dass mit Zunahme der Masse eines Windrads auch deren Energiebedarf steigt.

Tabelle 6-4 Aufteilung der Energieaufwendungen nach dem Massenverhältnis

Anlage	Massenverhältnis
E-30	0,5
E-40	1,0
E-66	4,0

Hierzu muss angemerkt werden, dass der Turm von einem Zulieferer stammt und somit nicht dieser Berechnung unterliegt. Ferner wurden die eingesetzten Energien, wie Strom, Gas und Diesel, mit Hilfe von Gemis 3.03 auf Primärenergie umgerechnet.

6.2.2 Bilanz der Anlage E-66

Nach den allgemeinen Anmerkungen werden im folgenden die Baugruppen der Anlage E-66 und deren KEA näher erläutert. Dabei beinhalten die Rechnungen eine Auflistung der vom Gewicht her energetisch relevanten Werkstoffe, bewertet mit den in Tabelle 6-2 angegebenen KEA. Es ist weiterhin anzumerken, dass die genauen Gewichte der Rohmaterialien nicht aus dem Bericht von Pick und Wagner entnommen werden konnte, da diese nur anhand von Diagrammen in Prozentzahlen dargestellt wurden. Die genauen Prozente wurden jedoch nur für die Materialien angegeben, deren Gewichtsanteil sehr groß war. Deswegen mussten die Gewichte aus einer Diplomarbeit des Deutschen Luft- und Raumfahrtzentrums entnommen werden, die sich ebenfalls auf diese Studie bezog, jedoch keine KEA-Werte auswies⁹⁷.

Unter Sonstige werden alle Materialien zusammengefasst, deren Menge zu gering war, um sie hier explizit aufzuführen. Diese wurden mit einem Durchschnitts-KEA bewertet, um wieder auf die ursprünglichen Ergebnisse von Pick und Wagner zu gelangen, wobei es zu geringfügigen Abweichungen kam. Der KEA bezieht sich außer bei den Fundamenten immer auf die Rohmaterialien, also auf die mit dem jeweiligen Werkstoffbereitstellungsfaktor (Kehrwert des Werkstoffausnutzungsgrades von Tabelle 6-1) multiplizierten Endgewichte. Die Energien der Fertigungszuschläge werden extra ausgewiesen.

6.2.2.1 Rotorblätter

Die Rotorblätter bestehen zum größten Teil aus GFK auf Basis von Epoxidhartz, dass mit speziellen Härtern gehärtet wird. Dazu müssen die Materialien in der Formschale mit Gas erhitzt werden. Diese Energie wird aber über die Jahresenergieabrechnung und den Massenschlüssel auf die WKA aufgeschlagen. Hilfsstoffe wie Eimer, Folien und Stoffe, deren Verbrauch leicht abgeschätzt werden konnte, sind in der Rubrik Sonstige enthalten. Für weitere nicht bilanzierte Verbrauchsmaterialien, wie Schleifscheiben, Spachteln, Pinsel usw., wird ein Zuschlagsfaktor von drei Prozent vom Gesamt-KEA aller Materialien gewählt. Alle anderen Werkstoffe und deren KEA sind der folgenden Tabelle zu entnehmen.

⁹⁷ vgl. Bruno I.: Ecobalance of a wind turbine, Diplomarbeit, Institut für technische Thermodynamik, DLR-Suttgart, Stuttgart 2003, Seite 41-44

Tabelle 6-5 KEA eines Rotorblattes

Nr.	Materialien	spezifisches Gewicht [Kg]	%	KEA der Materialien [MJ/Kg]	Gesamt - KEA der Materialien [MJ]	%
1	Aluminium	50	0,9	199,9	9.995,0	2,7
2	Gummi	76	1,4	117,0	8.892,0	2,4
3	PA	80	1,5	177,2	14.176,0	3,8
4	PVC	150	2,8	66,8	10.020,0	2,7
5	Sonstige	169	3,1	51,3	8.669,7	2,3
6	Lack	170	3,2	125,0	21.250,0	5,7
7	PE	215	4,0	88,6	19.049,0	5,1
8	PVC-Hartschaum	254	4,7	66,8	16.967,2	4,6
9	Härter	525	9,8	61,0	32.025,0	8,6
10	EP Harz	1.515	28,1	80,0	121.200,0	32,6
11	Glasfasern	2.180	40,5	50,0	109.000,0	29,4
Summe:		5.384			371.244	
Zuschlagsfaktor für Verbrauchsmaterialien (3%)					+	11.000
KEA _{Roh} eines Rotorblattes						382.244

6.2.2.2 Generator

Der Ringgenerator besteht hauptsächlich aus der Stahlkonstruktion, den Blechpaketen aus Elektroblech und dem Kupfer für die Wicklungen. Diese drei Werkstoffe machen ca. 98 Prozent der eingesetzten Materialmengen aus.

Für die Fertigung der Zulieferbauteile wird ein pauschaler Zuschlagssatz von zehn Prozent erhoben. Außer dem Tränken der Wicklungen mit „Tränkeharz“, fallen keine weiteren nennenswerten Energien an, da diese in der Gesamtenergiebilanz von Enercon enthalten sind.

Tabelle 6-6 KEA des Generators

Nr.	Materialien	spezifisches Gewicht [Kg]	%	KEA der Materialien [MJ/Kg]	Gesamt - KEA der Materialien [MJ]	%
1	Sonstige	489	1,2	87,0	42.543,0	1,6
2	Kupfer aus Leitungen	8.992	22,1	95,3	856.937,6	32,8
3	Stahl, unlegiert	13.265	32,6	18,4	244.076,0	9,3
4	Elektroblech	17.944	44,1	82,0	1.471.408,0	56,3
Summe:		40.690			2.614.965	
Fertigungszuschlagssatz (10%)					+	261.496
KEA _{Roh} des Generators						2.876.461

6.2.2.3 Restliche Gondel

Die restliche Gondel umfasst recht unterschiedliche Bauteile. Darunter fallen zum einen der Achszapfen, die Blattadapter und die Rotornabe, die nicht in den Bauteilen Generator und Rotorblatt enthalten sind. Des weiteren beinhaltet die Gondel Lager Getriebe, Motoren für die Blattverstellung, Azimutdrehung und schließlich ihre Verkleidung. Aber auch die Elektrik und Elektronik für die Blattverstellung und die Gondelunterverteilung fallen in diese Baugruppe. Die Materialien Stahl und Gusseisen haben einen Anteil von ca. 90 Prozent an der Gondel. Glasfasern und UP Harz für die GFK Verkleidung machen zusammen nochmals einen Gewichtsanteil von ca. 6,5 Prozent aus. Der Zuschlagssatz für die Fertigung der Gondelbauteile soll hier 15 Prozent betragen.

Tabelle 6-7 KEA der restlichen Gondel

Nr.	Materialien	spezifisches Gewicht [Kg]	%	KEA der Materialien [MJ/Kg]	Gesamt - KEA der Materialien [MJ]	%
1	Aluminium	133	52,0	199,9	26.586,7	1,7
2	Elektronik	265	0,5	235,0	62.275,0	3,9
3	Kupfer	332	0,6	95,3	31.639,6	2,0
4	Lack	398	0,8	125,0	49.750,0	3,2
5	Glasfasern	797	1,6	50,0	39.850,0	2,5
6	Stahl, nied. leg., verz.	1.328	2,6	35,2	46.745,6	3,0
7	Sonstige	1.661	3,3	55,9	92.849,9	5,9
8	UP Harz	2.060	4,0	78,0	160.680,0	10,2
9	Stahlguß	3.654	7,2	61,8	225.817,2	14,3
10	Stahl, nied. leg.	8.992	17,6	31,0	278.752,0	17,7
11	Stahl, unlegiert	10.626	20,8	18,4	195.518,4	12,4
12	Gußeisen	20.845	40,8	17,6	366.872,0	23,3
Summe:		51.091		Summe:	1.577.336	
				Fertigungszuschlagssatz (15%)	+	236.600
				KEA _{Roh} der restlichen Gondel		1.813.936

6.2.2.4 Stahlurm

Der Turm der Anlage besteht aus insgesamt nur drei Werkstoffen: unlegierter Stahl, verzinkter Stahl und Lack. Die Anteile für unlegierten Stahl betragen ca. 95 Prozent, für unlegiert verzinkten Stahl zwei bis drei Prozent und der Rest entfällt auf den Lack, wobei der energetische Anteil des Lacks eine nicht zu unterschätzende Rolle spielt. Hier soll der Fertigungszuschlag von 15 Prozent nach der IO-Analyse voll ausgenutzt werden. Es entstehen nämlich keine Doppelzählungen, da der Turm direkt vom Zulieferer stammt.

Tabelle 6-8 KEA des Stahlturms

Nr.	Materialien	spezifisches Gewicht [Kg]	%	KEA der Materialien [MJ/Kg]	Gesamt - KEA der Materialien [MJ]	%
1	Lack	3.789	2,5	125,0	473.625,0	14,7
2	Stahl, unleg., verz.	5.034	3,3	22,9	115.278,6	3,6
3	Stahl, unlegiert	143.270	94,2	18,4	2.636.168,0	81,7
Summe:		152.093			3.225.072	
				Fertigungszuschlagssatz (15%)	+	483.760
				KEA _{Roh} des Stahlturms		3.708.832

6.2.2.5 Netzanbindung – Steuertechnik

In dieser Baugruppe sind einerseits alle Komponenten, die zum Generator gehören und zum anderen die allgemeine Steuertechnik enthalten. Daneben beinhaltet die Baugruppe die Turmverkabelung und den Netztransformator inklusive Leistungsschaltanlage und Transformatorhaus. Es finden Werkstoffe wie Stromleitungen (Kupfer, PVC, Gummi), Elektrik, Elektronik, Leichtbeton (Trafostation) und Stahl (Schaltschränke) Anwendung.

Des Weiteren wird hier ein Zuschlagsfaktor von 10 anstatt 16 Prozent gewählt, da z.B. die Energie zum Verlöten der Platinen der Steuerungselektronik in der Gesamtenergiebilanz von Enercon enthalten ist.

Tabelle 6-9 KEA der Netzanbindung und Steuertechnik

Nr.	Materialien	spezifisches Gewicht [Kg]	%	KEA der Materialien [MJ/Kg]	Gesamt - KEA der Materialien [MJ]	%
1	Sonstige	412	1,5	132,0	54.384,0	4,0
2	PVC	596	2,1	66,8	39.812,8	2,9
3	Stahl, hoch legiert	596	2,1	42,0	25.032,0	1,8
4	Baustahl	687	2,5	30,1	20.678,7	1,5
5	Stahl, unleg., verz.	687	2,5	22,9	15.732,3	1,1
6	Öl	916	3,3	39,4	36.090,4	2,6
7	Stahl, niedrig legiert	916	3,3	31,0	28.396,0	2,1
8	rest. Elektrik	962	3,5	100,0	96.200,0	7,0
9	Eisen	962	3,5	18,4	17.700,8	1,3
10	Elektronik	1.283	4,6	235,0	301.505,0	21,9
11	Elektroblech	1.742	6,3	82,0	142.844,0	10,4
12	Kupfer aus Leitungen	5.965	21,5	95,3	568.464,5	41,4
13	Leichtbeton	12.010	43,3	2,3	27.623,0	2,0
Summe:		27.734			1.374.464	
				Fertigungszuschlagssatz (10%)	+	137.446
				KEA _{Roh} Netzanbindung - Steuerung		1.511.910

6.2.2.6 Fundament

Das Fundament besteht aus Normalbeton, Bewehrungsstahl (Baustahl), PVC für Kabelkanäle und unlegiertem Stahl für Stahlpfähle bei tiefgründigen Fundamenten. Die Ausführung des Fundaments ändert sich je nach Standort und Turmgröße. An Küstenstandorten werden fast immer tiefgründige Fundamente verwendet, im Binnenland jedoch meistens flachgründige.

Der Normalbeton besitzt bei allen Fundamenten den größten Anteil am Gewicht. Stahl und PVC spielen dabei eine untergeordnete Rolle. Bei den Energiegehalten erhöht sich jedoch der Anteil des Stahls beträchtlich. Der Beitrag von PVC ist vernachlässigbar gering.

Für die Herstellung des Fundaments wurden keine weiteren Zuschläge angesetzt. Nur das Ausheben der Baugrube wurde mit 62.125 MJ berücksichtigt. Hierbei spielt es keine Rolle, ob es sich um ein flach- oder tiefgründiges Fundament handelt. Die folgende Berechnung bezieht sich aber auf ein Tiefgründiges. Der Unterschied zum Flachgründigen beläuft sich auf ca. 140.000 MJ.

Tabelle 6-10 KEA des Fundaments (tiefgründig)

Nr.	Materialien	spezifisches Gewicht [Kg]	%	KEA der Materialien [MJ/Kg]	Gesamt - KEA der Materialien [MJ]	%
1	PVC	690	0,1	66,8	46.092,0	3,1
2	Stahl, unlegiert	12.185	2,0	18,4	224.204,0	15,1
3	Baustahl	27.080	4,4	30,1	815.108,0	54,8
4	Normalbeton	574.754	93,5	0,7	402.327,8	27,0
Summe:		614.709		Summe:	1.487.732	
				Ausheben der Baugrube	+	62.125
				KEA _{Roh} Fundament		1.549.857

6.2.2.7 Weitere Energieaufwendungen für Transport und Montage

Transportaufwendungen können natürlich nur pauschal abgeschätzt werden, da diese stark vom jeweiligen Standort der WKA abhängig sind. Hierzu hat man die Energieaufwendungen in Aufwendungen für den Transport der Vorprodukte zu Enercon und Aufwendungen für den Transport von Enercon zum Aufstellungsort unterteilt. Außer Acht gelassen wurden in der Studie die Transporte von Halbzeugen und Rohstoffen zu den Unterherstellern und Verkehrsaufwendungen, die nicht direkt

dem Produkt zuzuordnen sind, wie z.B. Aufwendungen im Vertrieb zur Auftragsbeschaffung.

Für die Transportaufwendungen der Vorprodukte wurde mit einer insgesamt zurückgelegten Strecke (Hin- und Rückfahrt) von 400 km gerechnet, da die Bauteile zum größten Teil aus einem Umkreis von 200 km geliefert wurden. Diese Strecke muss für die Berechnung der Energie mit dem Faktor 1,67 MJ/ tkm⁹⁸ multipliziert werden. Leider fehlten an dieser Stelle Angaben über die Gewichte der Vorprodukte. So wurde der Wert von 69.053 MJ für die Transportaufwendungen der Zulieferprodukte direkt aus dem Bericht entnommen. Hieraus kann auf ein Gewicht der Zulieferteile von ca. 103 t zurückgeschlossen werden.

Unter die Aufwendungen „Transport von Enercon zum Aufstellungsort“ fallen folgende Sachverhalte:

- Transport der Rotorblätter, des Generators, der restlichen Gondel und der Netzanbindung mit einer nach folgendem Schema aufgeteilten km-Pauschale: Küste 400 km, küstennah 600 km und Binnenland 1.000 km (jeweils Hin und Zurück). Hierunter fällt auch das Trafohaus, da der Hersteller in der Nähe von Enercon ansässig ist.
- Transport des Turms, des Netztransformators und der Trafostation, da diese Bauteile direkt vom Unterhersteller zum Aufstellungsort geliefert werden. Es wurde eine mittlere Strecke von 800 km für den Turm angenommen. Netztransformator und Trafo werden wie oben in Küste 315 km küstennah 475 km und Binnenland 790 km (jeweils Hin und Zurück) unterteilt⁹⁹.
- Transport des Betons mit einer Pauschale von 100 km (Hin und Zurück), weil dieser als Ortbeton bezogen wird.

⁹⁸ Dieser Faktor gibt an wie viel Energie in MJ pro Tonne Fracht und Kilometer aufzuwenden sind. Es wird mit einer mittleren Auslastung von 50 Prozent gerechnet, unter der Annahme, dass die LKW leer zurückfahren. Solche Werte kann man normalerweise GEMIS 4.01 entnehmen. Hier wurde aber mit einem durch die Autoren geschätzten Wert gerechnet.

⁹⁹ Diese Werte wurde aus dem Bericht des DLR entnommen, Seite 44

In folgender Tabelle wird nun der Energieaufwand der Transporte von Enercon zum Aufstellungsort „Küste“ aufgezeigt. Dieser wird anhand der km-Pauschale, der Gewichte¹⁰⁰ der Bauteile und der Entfernung nach folgender Formel berechnet.

$$KEA_T = 1,67MJ \times \text{Gewicht}[T] \times \text{Entfernung}[Km] \quad \text{Gleichung 6-1}$$

Des weiteren werden die Aufwendungen der Transporte von den Unterherstellern zu Enercon mitberücksichtigt und so der Gesamtaufwand berechnet (siehe Tabelle 6-11).

Tabelle 6-11 KEA der Transporte

Bauteil	km-Pauschale [MJ/tkm]	Gewicht [T]	Entfernung [km]	Energieaufwand des Transports [MJ]
Generator	1,67	39,02	400	26.065
rest. Gondel	1,67	42,86	400	28.630
Rotorblätter	1,67	11,4	400	7.615
Netzanbindung	1,67	10,1	400	6.747
Turm	1,67	129,37	800	172.838
Netztransformator	1,67	3,94	315	2.073
Trafostation	1,67	13,62	315	7.165
Fundament	1,67	614,71	100	102.657
			Summe:	353.790
			Transport der Vorprodukte	+ 69.053
			KEA der Transportaufwendungen	422.843

Die Energieaufwendungen bei der Endmontage werden laut Pick und Pernkopf¹⁰¹ im wesentlichen durch den Aufbau des Turms und den Zusammenbau der Gondel bestimmt. Dafür wird ein spezieller Schwerlastkran benötigt (siehe Bild Anhang 5), der die Bauteile nach oben befördert. Für die Förderhöhen wird beim Turm die halbe Turmhöhe angesetzt, bei den Rotorblättern, dem Generator und der restlichen Gondel die Nabenhöhe.

¹⁰⁰ Flache Fundamente, wie sie im Binnenland benutzt werden, haben ein Gewicht von 852,17 t. Tiefe Fundamente mit Stahlpfählen dagegen nur 614,71 t, da der Betonanteil geringer ist.

¹⁰¹ zitiert nach: Pernkopf, M.: Ermittlung des Gesamtbedarfs zur Errichtung eines betriebsbereiten Windenergiekonverters, Studienarbeit, Institut für Flugzeugbau, Uni Stuttgart 1991

Daraus ergibt sich mit einem Nutzungsgrad η_M von 0,2 des Dieselmotors und einem Bereitstellungsfaktor für Diesel von $C_D = 1,09 \text{ MJ/MJ}_{\text{End}}$ nach Gleichung 6-2 die Gesamtenergieaufwendungen für die Endmontage.

$$KEA_M = C_D \cdot \frac{1}{\eta_M} \cdot m \cdot g_p \cdot H \cdot \frac{1}{10^6} \quad \text{Gleichung 6-2}$$

Tabelle 6-12 KEA der Montage am Aufstellungsort

Bauteil	$C_D \times 1/\eta_M$ [MJ/MJ _{End}]	Masse [kg]	Ortsfaktor g_p [m/s ²]	Höhe [m]	Energieaufwand der Endmontage [MJ]
Turm	5,45	129373	9,81	32	221
Rotorblatt	5,45	11400	9,81	67	41
Generator	5,45	39020	9,81	67	140
restl. Gondel	5,45	42860	9,81	67	154
Summe:					555

6.2.2.8 Betrieb und Wartung

Für die Wartung und den Betrieb der Anlage sind Arbeiten wie der Getriebeölwechsel (Pitch), das Abschmieren verschiedener beweglicher Teile, sowie das Erneuern von Verschleißteilen zu verrichten. Berücksichtigte Anlagenteile und Wartungen sind hier kurz aufgelistet:

- Getriebe für die Pitchverstellung
- Blei-Akkus und zugehörige Elektrik (Pitch)
- Restliche Steuertechnik für Rotorblätter
- Reib- und Gleitbeläge
- Fett
- Überholen der Rotorblätter

Hinzu kamen noch Fahrten für die Wartung und Transport der zu erneuernden Anlagenteile, die mit durchschnittlich 150 km Entfernung von der Servicestation und 3,53 MJ/km Primärenergiebedarf angesetzt wurden. Transporte von Bauteilen zur Firma Enercon wurden vernachlässigt, der Transport der überholten Rotorblätter wurde jedoch berücksichtigt. Leider waren keine weiteren Angaben zur genaueren

Ausführung von Pick gegeben, so dass sich für die E-66 folgender Energiebedarf ergab.

Tabelle 6-13 KEA der Wartung

Wartung	174.862
Transporte, Fahrten	
Küste	16.288
küstennah	23.903
Binnenland	39.134

6.2.2.9 Gesamter kumulierter Energieaufwand der Anlage

Mit den bisher berechneten Daten kann nun der Gesamtenergiebedarf zur Herstellung, Montage und zum Betrieb der WKA E-66 Für den Standort „Küste“ in Tabelle 6-14 angegeben werden.

Tabelle 6-14 Gesamter KEA der Anlage

Baugruppen	KEA der E-66 [MJ]	%
Rotorblätter	1.146.732	8,4%
Generator	2.876.461	21,1%
restl. Gondel	1.813.936	13,3%
Turm	3.708.832	27,3%
Fundament	1.549.857	11,4%
Netzanbindung	1.511.910	11,1%
Montage bei Enercon	379.734	2,8%
Montage am Standort	555	0%
Transporte, Vorprodukte	69.053	0,5%
Transporte, Aufstellung	353.790	2,6%
Transporte, Wartung	16.288	0,1%
Wartung	174.862	1,3%
	13.602.010	100%

Der hier berechnete Wert von 13.602 GJ weicht nur geringfügig von dem in der Studie angegebenen Wert von 13.611 GJ ab. Jedoch soll später mit den Werten von Pick weitergerechnet werden.

Aus der Tabelle lässt sich nun schließen, dass der Stahlturm mit 27,3 Prozent den größten Anteil am KEA hat, gefolgt vom Generator mit 21,1 Prozent und der restlichen Gondel mit 13,3 Prozent. Dies resultiert vor allem aus dem Einsatz hochenergetischer Materialien, wie Stahl beim Turm sowie Elektroblech und Kupfer beim Generator. Überraschend ist, dass Aufwendungen für Transport, Montage und

Wartung nur 7,3 Prozent am gesamten KEA beitragen. Auch das Fundament trägt mit 11,4 Prozent nur einen geringeren Anteil bei.

Es muss schließlich noch hinzugefügt werden, dass hier nur der Küstenstandort dargestellt wurde. Die Energieaufwendungen des küstennahen Standorts mit 13.555 GJ und des Standorts Binnenland mit 13.648 GJ variieren aber nur in einer kleinen Bandbreite. Das ist durch die verschiedenen Fundamente und den längeren Transportwegen zu erklären.

6.2.3 Energetische Amortisation und Erntefaktor

Um die energetische Amortisationszeit und den Erntefaktor zu bestimmen, müssen zuerst die Erträge, die mit der E-66 an den 3 Standorten zu erzielen sind abgeschätzt werden. Dazu werden entweder spezielle Windgutachten für den jeweiligen Standort herangezogen oder man greift auf schon vorhandene Daten, wie z.B. meteorologische Windkarten zurück, in denen für ganz Deutschland die Windverhältnisse angegeben sind. Für die Ertragsberechnung wird die normalerweise in 10 m Höhe gemessene, mittlere jährliche Windgeschwindigkeit v_{10} mit einer Exponentialfunktion und dem Hellmannexponenten α auf Nabenhöhe umgerechnet, da mit zunehmender Höhe auch die Windgeschwindigkeit zunimmt¹⁰². Die mittlere Windgeschwindigkeit ist aber nur bedingt aussagefähig, da sie nicht angibt, ob z.B. lange Flautezeiten, große Sturmböen oder ein gleichmäßiges Windangebot vorliegen. Dies wird durch die statistische Funktion $f(v)$ der Weibfull- oder Raileigh - Verteilung berücksichtigt. Mit entsprechenden physikalischen Formeln kann schließlich daraus der jährliche Energieertrag berechnet werden.

Für die drei Standorte sind in folgender Tabelle die errechneten Jahresenergieerträge W_{netto} (Bruttoertrag abzüglich des Eigenverbrauchs der Anlage) den Energieaufwendungen gegenübergestellt. Daraus leiten sich, wie in Tabelle 6-15 beschrieben, schließlich die Amortisationszeit (in Monaten angegeben) und der Erntefaktor ab.

¹⁰² vgl. Quaschnig, V.: Regenerative Energiesysteme, Technologie - Berechnung - Simulation, Hanser, 3. Auflage, München 2003, Seite 174 ff und Seite 224

Tabelle 6-15 AZ und EF nach der Materialbilanzen-Analyse

Kenngröße	Standort	Standort	Standort
	Küste	küstennah	Binnenland
W_{el} [kwh]	4.086.320	3.204	2.497.550
W_{netto} [kwh]	4.072.018	3.193.185	2.488.809
KEA_H [GJ]	10.333	10.284	10.344
KEA_N [GJ]	147	153	165
AZ [m]	3,7	4,7	6,1
EF [-]	63,9	50,3	38,9

Die energetischen Amortisationszeiten liegen bei der E-66 zwischen ca. vier und sechs Monaten. Die niedrigste Amortisationszeit wird, wie erwartet, an der Küste erreicht, da hier der Energieertrag der Anlage um ca. 63 Prozent höher ist als im Binnenland. Stellt man nun die Amortisationszeiten einer erwarteten Lebensdauer von 20 Jahren gegenüber, so ist die Energiebilanz einer Windkraftanlage erfreulich hoch.

Die Erntefaktoren beschreiben nun wie viel mal mehr Primärenergie erzeugt wird, als zu Herstellung und Betrieb benötigt werden. Am Standort „Binnenland“ konnten ca. 40-mal und am Standort „Küste“ sogar ca. 64 mal mehr Energie erzeugt werden, wie für diese Anlagen aufgewendet wurde. Man könnte aber auch, um das Beispiel des Substitutionsfaktors nochmals aufzugreifen, sagen, dass im Verhältnis zur aufgewendeten Energie das bis zu 63fache (Standort Küste, SF = 62,9) an Primärenergie eingespart werden konnte.

6.3 Bestimmung des KEA mit Hilfe der IO-Analyse

Im folgenden soll der kumulierte Energieaufwand der Anlage E-66 anhand der IO-Analyse dargestellt werden. Die Windenergiekonverter fallen laut des Statistischen Bundesamtes in den Produktionssektor „Herstellung von Maschinenbauerzeugnissen“. Die WKA soll aber, wie schon in Kapitel 6.2.2 beschrieben, nach Bauteilen aufgeteilt und den verschiedenen Wirtschaftssektoren zugeordnet werden, damit die unterschiedlichen Materialien möglichst genau bewertet werden können.

Weiterhin müssen die Energieintensitäten der Bauteile mit dem jeweiligen Ab-Werk-Preis multipliziert werden, um den gesamten KEA zu erhalten. Die Energieintensitäten wurden mit den IO-Tabellen von 1993 berechnet, da 1998 noch keine aktuelleren Tabellen vorlagen. Die prozentualen Anteile der Baugruppen am

Gesamtpreis wurden von Enercon bereitgestellt. Tabelle 6-16 gibt einen kurzen Überblick über die zur IO-Analyse verwendeten Daten.

Tabelle 6-16 Energieintensitäten der Bauteile

Baugruppe	Wirtschaftssektor		Energieintensität [MJ/DM]
Rotorblätter	11	Herst. von Kunststoffzeugnissen	7
Nabe und Übertragung	21	Herst. von Maschinenbauerzeugnissen	3,7
Generator	26	Herst. von elektrotechnischen Erzeugnissen	3,9
restliche Gondel	20	Herst. von Stahl- und Leichtmetallerzeugnissen	5
Elektrik, Regelung	26	Herst. von elektrotechnischen Erzeugnissen	3,9
Turm	20	Herst. von Stahl- und Leichtmetallerzeugnissen	5
Fundament	41	Hoch- und Tiefbau	4,3
Montage	42	Ausbau	3,2
Netzanschluss (Trafohaus, etc.)	26	Herst. von elektrotechnischen Erzeugnissen	3,9
Transporte	48	sonstiger Verkehr	6,9

Leider lagen keine weiteren Werte vor, um eine detaillierte Ausführung zu unternehmen, so dass die Ergebnisse, sowie die Amortisationszeit und der Erntefaktor in folgender Tabelle kurz dargestellt werden.

Tabelle 6-17 AZ und EF nach der IO-Analyse

Kenngröße	Standort	Standort	Standort
	Küste	küstennah	Binnenland
W_{el} [kwh]	4.086.320	3.204.400	2.497.550
W_{netto} [kwh]	4.072.018	3.193.185	2.488.809
KEA_H [GJ]	20.686	20.776	20.776
AZ [m]	5,7	7,3	9,4
EF [-]	42,0	32,8	25,6

Es muss beachtet werden, dass diese Berechnung nur den KEA der Herstellung ausweist. Der Betrieb wird außer Acht gelassen. Dennoch sind die KEA-Werte im Vergleich zur Materialbilanzmethode im Durchschnitt um ca. 54 Prozent größer. Daraus resultieren natürlich auch veränderte Amortisationszeiten und Erntefaktoren.

Im Allgemeinen kann daraus geschlossen werden, dass die kumulierten Energieaufwendungen, die mit der IO-Analyse ermittelt wurden, eine Obergrenze

darstellen. Selbst diese Obergrenze ist jedoch weit von der Aussage entfernt, Windkraftanlagen wären energetisch unrentabel. Somit wäre diese These widerlegt. Der wirkliche Wert dürfte sich demnach zwischen den Ergebnissen der Materialbilanzen-Methode, die als Untergrenze zu sehen sind, und denen der IO-Analyse befinden.

6.4 Vergleich verschiedener Anlagen und Standorte

Um die in diesem Beispiel aufgeführten Ergebnisse noch einmal zu untermauern, sind die wichtigsten Studien der letzten 15 Jahre über Windkraftanlagen auf der nächsten Seite kurz zusammengefasst.

Tabelle 6-18 Vergleich verschiedener Anlagen und Standorte

Erläuterungen	Mischanalysen (z.B. Materialbilanzmethode oder kombinierte Mikro- und Makroanalyse)						Hybridmethode					IO-Analyse			
	Institut	OeVE		FFE/ TU München			IER Stuttgart					FFE/ TU München		Dän. Windindustrie	
Studie	Domrös	Pick und Wagner		Hagedorn	Pernkopf	Hartmann ¹					Pick und Wagner		Krohn ²		
Jahr	92	98		92	91	01					98		97		
Firma	Enercon			-	-	Südwind	Hanseat. AG	GET	HSW	Nordtank	Enercon		Dän. Hersteller		
Typ	E-32	E-40	E-66	-	-	SW N3127	ET 550	GET 41	HSW 1000	NTK 1500	E-40	E-66	-		
Nennleistung [kW]	300	500	1500	500	1200	450	270	550	600	1000	1500	500	1500	600	1500
Standort Binnenland															
Stromertrag [GWh _{el}]	0,700	0,803	2,490	-	-	-	-	-	-	-	-	0,803	2,490	-	-
KEA _{Ges} [GJ]	2.711	4.342	13.648	-	-	-	-	-	-	-	-	6.618	20.776	-	-
AZ [m]	4,3	6,0	6,1	-	-	-	-	-	-	-	-	9,3	9,4	-	-
EF [-]	56,0	39,4	38,9	-	-	-	-	-	-	-	-	25,8	25,6	-	-
Standort küstennah															
Stromertrag [GWh _{el}]	0,900	1,064	3,204	-	-	-	-	-	-	-	-	1,064	3,204	1,130	-
KEA _{Ges} [GJ]	2.711	4.314	13.555	-	-	-	-	-	-	-	-	6.618	20.776	3.169	-
AZ [m]	2,5	4,5	4,7	19,6	15,0	3,0	-	-	-	-	-	7,0	7,3	4,1	-
EF [-]	72,0	52,5	50,3	12,0	16,0	-	-	-	-	-	-	34,2	32,8	58,9	-
Standort Küste															
Stromertrag [GWh _{el}]	1,100	1,370	4,086	-	-	-	0,595	1,240	1,350	2,370	3,675	1,370	4,086	1,393	-
KEA _{Ges} [GJ]	2.711	4.397	13.611	-	-	-	4.086	5.847	7.043	11.653	15.855	6.749	20.686	3.169	-
AZ [m]	2,1	3,5	3,7	5,7	6,0	4,0	7,7 (10,9)	5,3 (7,5)	5,8 (8,2)	5,5 (7,8)	4,8 (6,8)	5,6	5,7	3,3	-
EF [-]	88,0	66,4	63,9	42,0	39,0	-	22,0 (31,1)	45,4 (32,0)	41 (29,0)	43,4 (30,7)	49,5 (35,0)	43,2	42,0	72,7	-
Offshore															
Stromertrag [GWh _{el}]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,046
KEA _{Ges} [GJ]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11.060
AZ [m]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,2
EF [-]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	75,5

1) KEA, AZ und EF mussten aus den Angaben des Autors berechnet werden, da diese Werte nicht Kernpunkt der Studie waren und die Angabe der Energieaufwendungen über die Inanspruchnahme energetischer Ressourcen (IEER) gemacht wurde. Der KEA wird hier nicht als eine einzige Zahl angegeben, sondern setzt sich, durch die über den Lebensweg in Anspruch genommenen Mengen der Primärenergie von Braunkohle, Steinkohle, Rohöl, Erdgas und Uranerz zusammen, die in MWh Primärenergie pro erzeugte GWh Strom angegeben werden. Dadurch soll der Primärenergieverbrauch besser den verschiedenen Energieträgern zugeordnet werden können (Disaggregation des KEA). Weiterhin musste der Energiegehalt des Strommixes Deutschland berechnet werden. Dieser ergab bei Hartmann 2,1 MJ/MJ_{End} im Gegensatz zu 2,97 MJ/MJ_{End} bei Pick und Wagner. Um aufzuzeigen, welche Auswirkung die Umrechnung des Nettoenergieertrages einer WKA auf Primärenergie hat, stellen die Werte in Klammern AZ und EF mit dem von Hartmann zugrundegelegten Strommix von 2,1 MJ/MJ_{End} dar. Die Werte ohne Klammer wurden mit dem von Pick und Wagner angenommenen Bereitstellungsfaktor von 2,97 MJ/MJ_{End} berechnet. Diese Rechnung beachtet aber nicht, dass bei dem zugrundegelegten Strommix von Pick und Wagner auch der Energiegehalt des Windrades steigen müsste, jedoch nicht um 40%, wie das bei den AZ von 4,8 auf 6,8 Monaten der Fall ist. Daher hinkt der Vergleich ein wenig!

2) Auch bei Krohn mussten AZ und EF berechnet werden. Der Strommix in Dänemark betrug dabei 2,29 MJ/MJ_{End}.

Die 1992 am Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Kraftwerkstechnik der TU München veröffentlichte Studie von Gerd Hagedorn bilanziert insgesamt 37 Windkraftanlagen in einem Leistungsbereich von 10 bis 3000 KW Nennleistung¹⁰³. Als Bilanzierungsmethode wurde eine Kombination aus Mikro- und Makroanalyse gewählt. Diese Studie ist eine der bekanntesten Veröffentlichungen im Bereich der Windkraft und wurde vielfach in der Fachliteratur zitiert. Jedoch gilt sie als veraltet und weist im Gegensatz zu anderen Autoren recht hohe Amortisationszeiten und niedrige Erntefaktoren auf. Leider werden in dieser Studie die Aussagen sehr allgemein gehalten, so dass sich z.B. der Stromertrag und die Energieaufwendungen den einzelnen WKA nicht zuordnen lassen.

Weniger Interesse galt den Diplom¹⁰⁴- und Studienarbeiten¹⁰⁵ von Domrös 1992 und Pernkopf 1991 (Bilanzierung ohne Aufbau und Montage). Als einzige ausländische Arbeit konnte eine von der Dänischen Windindustrie herausgegebene Studie von 1997 ausfindig gemacht werden¹⁰⁶. Diese beruht auf einer reinen IO-Analyse und weist im Vergleich zu den Berechnungen von Pick und Wagner energetisch bessere Werte auf. Die beiden Autoren führen dies auf folgende Faktoren zurück: Die volkswirtschaftliche Struktur Dänemarks besitzt wenig Grundstoffindustrie (stahlerzeugende Industrie, Kunststoffindustrie) und muss solche Produkte importieren. Der Preis für die Windkraftanlage mit umgerechnet 970.000 DM (Stand 98) für 600 kW scheint viel zu gering. Außerdem ist nicht klar, ob eine Berücksichtigung von Maschinen und Gebäuden stattgefunden hat. Somit würde sich die Amortisationszeit um ca. 10-15 Prozent erhöhen. Weiterhin müsste ein wesentlich größerer Unterschied zwischen Onshore- und Offshore-Anlagen bestehen.

Die renommierte Studie des Instituts für ökologisch verträgliche Energiewirtschaft der Uni Essen (OeVE) von 1998 wurde in diesem Kapitel näher erläutert. Die Ergebnisse wurden ebenfalls vielfach zitiert und auch von Enercon zur Marketingzwecken benutzt.

¹⁰³ vgl. Hagedorn, G.: Kumulierter Energieaufwand von Photovoltaik- und Windkraftanlagen, Forschungsstelle für Energiewirtschaft, IFE Schriftenreihe Heft 25, München 1992, Seite 70

¹⁰⁴ vgl. Domrös, R.: Energetische Amortisationszeit von Windkraftanlagen auf Basis der Prozesskettenanalyse, Diplomarbeit, TU Berlin, Fachgebiet für Energie- und Rohstoffwirtschaft, 1992, Seite 134

¹⁰⁵ Die beiden Werte sind aus dem Bericht von Pick und Wagner entnommen, da die Arbeit von Pernkopf dem Institut für Flugzeugbau der Universität Stuttgart nicht mehr vorlag

¹⁰⁶ vgl. Krohn, S.: The Energy Balance of modern Wind Turbines, Windpower Note, Copenhagen 1997, Seite 7 und Seite 12

Die Dissertation von Hartmann aus dem Jahre 2001 ist sozusagen die Antwort des IER Stuttgart auf den Bericht von Pick und Wagner. Neben anderen Stromerzeugungstechniken, wie Photovoltaik, Wasser- und Steinkohlekraftwerken werden hier verschiedene Windkraftanlagen und ihre Auswirkungen auf Umwelt und Ressourcenverbrauch bewertet. Der Beitrag stützt sich dabei als einziger auf die Normen der EN ISO 14040 ff.

Auf den ersten Blick erscheinen die Zahlen der Tabelle etwas verwirrend, deswegen dazu einige Erläuterungen: Grundsätzlich wurden die Bilanzierungsergebnisse im Hinblick auf ihr Ertragspotential auf Grund unterschiedlicher Windgeschwindigkeiten in 4 Standorte aufgeteilt. Für die einzelnen Standorte werden Stromertag wie üblich in GWh (incl. Eigenverbrauch der WKA), KEA_{Ges} in MJ, AZ in Monaten und EF angegeben. Vergleichen lassen sich dabei die Anlagen energetisch am objektivsten über den KEA_{Ges} . AZ und EF beziehen dagegen auch die kalkulierten Erträge mit ein. Da jede Studie pro Standort andere Windgeschwindigkeiten und daher auch Erträge zugrundelegt, lassen sich über die AZ und den EF schwer Rückschlüsse auf den jeweiligen Energieaufwand ziehen. Dies sollte man beim Betrachten solcher Werte immer bedenken. Dabei ist auch anzumerken, dass eine primärenergetische Bewertung der Erträge wesentlichen Einfluss auf Amortisationszeiten und Erntefaktoren haben, da dies nämlich nicht zwingend vorgeschrieben ist. Ohne eine Umrechnung auf Primärenergie würde sich die WKA wesentlich schneller amortisieren und ein scheinbar gutes Ergebnis aufweisen.

Der obigen Tabelle ist schließlich zusammenfassend anzumerken, dass die Angaben zwischen den einzelnen Untersuchungen aus folgenden Gründen nicht direkt vergleichbar sind und nur als Richtwert angesehen werden sollten:

- Unterschiedliche Baujahre der Anlagen. Im Laufe der Zeit erhöht sich durch optimierte Fertigungsmethoden die Produkteffizienz, die unter anderem durch einen sparsameren Energieeinsatz charakterisiert wird.
- Unterschiede im Anlagenkonzept von Windkraftanlagen verschiedener Hersteller (z.B. mit und ohne Getriebe).
- Unterschiedliche Parameter bei der Ertragsabschätzung (z.B. Streuung der mittleren Windgeschwindigkeiten bei Standort Binnenland von 5,5 m/s bei Pick und Wagner bis 7 m/s bei Hagedorn; unterschiedliche primärenergetische Bewertung des Stromertrags)

-
- Unterschiedliche Parameter bei der Bilanzierung (z.B. Bilanzraumgröße, Bilanzierungsmethoden, Datenqualität der Vorketten und Energiegehalte der Rohstoffe und Vorprodukte usw.).

Es wird aber ersichtlich, dass alle Studien die energetische Effizienz von Windkraftanlagen bestätigen. Außer bei Hagedorn liegen die Amortisationszeiten immer deutlich unter einem Jahr. Des Weiteren lassen sich auch die Unterschiede im Bezug auf die Bilanzierungsmethoden, Anlagen und die verschiedenen Herstellungszeiträume erkennen.

7 Mögliche Diskussionsansätze

In den bisherigen Kapiteln wurde aufgezeigt, was unter dem kumulierten Energieaufwand zu verstehen ist, durch welche Methoden er sich berechnen lässt, welche grundsätzlichen Möglichkeiten eines Softwareeinsatzes bestehen und wie der KEA am Beispiel einer Windkraftanlage ermittelt wird. Weiterhin wurde aufgezeigt, dass Kennzahlen zur Amortisation und zur „Erntemenge“ mit Vorsicht zu betrachten sind, da sie nicht unbedingt auf den Energiegehalt und somit auf eine Ressourcenschonung der Anlage schließen lassen.

Nun stellt sich die Frage, inwieweit die bisherigen Erkenntnisse praxisreif sind, d.h. sind die Methoden wirklich ausgereift genug, um brauchbare Ergebnisse zu liefern, verbergen sich vielleicht doch gravierende Mängel in der Methodik, die auf den ersten Blick nicht erkannt werden können oder kann man Aussagen über den KEA ohne Probleme entgegennehmen?

Hierzu sollte man sich die Firma Enercon¹⁰⁷ und die dänische Windindustrie¹⁰⁸ ins Gedächtnis rufen, die mit Hilfe der vorgestellten Studien für ihre Produkte werben. Energetische Amortisation in kürzester Zeit – ein Slogan, der sogar den größten Pessimisten umstimmen soll. Auch diverse Internetseiten und Fachliteratur beziehen sich auf die genannten Studien und unterstützen dadurch diese Aussagen. Von Windkraftgegnern, wie in der Einleitung vorgestellt, wird aber immer noch standfest behauptet, dass Windenergie energetisch ineffizient sei. Wessen Meinung soll man nun als Leihes Glauben schenken?

Deswegen wird im folgenden Kapitel nochmals näher auf das Berechnungsbeispiel der E-66 eingegangen, um daraus eventuell allgemeingültige methodische Kritikpunkte abzuleiten. Dies soll dazu beitragen, einen möglichst objektiven Eindruck über die Vorgehensweise beim Aufstellen von Sachbilanzen zu erhalten. Vor allem soll damit auch der Hintergrund teurerer Ökobilanzsoftware, deren Datenbanken überwiegend aus „manuell“ recherchierten Werten bestehen, offen gelegt werden, um schließlich deren Nutzen für den Praktiker beurteilen zu können.

¹⁰⁷ vgl. Bunk, O.: Positive Umweltbilanz – Anlagen amortisieren sich nach wenigen Monaten, (Hrsg.): Windblatt – Das Enercon Magazin, Ausgabe 03/2002, Seite 12

¹⁰⁸ vgl. Krohn S.: The energy balance of modern wind turbines, windpower note, 1997, Seite 1

7.1 Das Bilanzierungsobjekt

Als Bilanzierungsobjekt wurde das Modell E-66/15.66 gewählt, das 1995 in die Serienproduktion ging. Mit 1,5 MW Nennleistung, 65m Nabenhöhe und 66m Rotordurchmesser war diese Anlage für damalige Verhältnisse eine der Großen und Modernen. Infolge ständiger technischer Weiterentwicklung und kürzeren Innovationszyklen wurde dieses Modell Ende der 1990er Jahre vom Typ E-66/18.70 abgelöst¹⁰⁹. Mit 1,8 oder 2,0 MW Nennleistung, Nabenhöhen von 65m, 85m, 98m und 114m und einem Rotordurchmesser von 70m entspricht die Anlage dem heutigen Entwicklungsstand. Somit ist nachzuvollziehen, dass die Energiebilanzen der heutigen Anlagen sicher nicht 1:1 auf die Bilanz von Pick und Wagner übertragbar sind.

Der technische Fortschritt schmälert besonders die Aussagekraft der Hagedorn'schen Studie. Zu Beginn der 1990er Jahre waren vor allem viele der größeren Anlagen noch in Planung oder wurden als Prototypen zu Testzwecken errichtet. Teilweise wurde aus Vereinfachungsgründen von Hagedorn der Materialbedarf aus den Werten kleinerer Modelle für die entsprechenden Anlagen errechnet¹¹⁰. Weiterhin lagen auch keine definitiven Daten über die spätere Serienfertigung vor, d.h. über eventuelle Fertigungsenergieaufwendungen, so dass diese großteils abgeschätzt werden mussten.

Unter diesen Punkt fallen auch die zahlreichen Anlagenkonzepte der Windkraftanlagenhersteller¹¹¹. Angefangen bei den unterschiedlichen Materialien zur Rotorblattherstellung (Stahl, Holz, Aluminium, Titan, GFK usw.), den verschiedenen Generatorkonzepten (mit und ohne Getriebe, Synchrongenerator, Asynchrongenerator) und Steuerungsvarianten (Pitch, Stall) über die Bauart der Türme (Stahl, Beton, Holz) und den Fundamenten (tiefgründig, flachgründig, Offshore) zu den Netzeinspeisungsmöglichkeiten (mit und ohne Transformator) ergibt sich eine Fülle von Parametern, die den KEA beeinflussen.

Infolgedessen wird hier offensichtlich, dass die Ermittlung des KEA vor allem im Hinblick auf die rasante Entwicklung der Technik eine Momentaufnahme darstellt. Der direkte Vergleich von Werten innerhalb eines längeren Zeitraums (Bilanzraum)

¹⁰⁹ vgl. Enercon GmbH (Hrsg.): Technische Daten der getriebelosen E-66

¹¹⁰ vgl. Hagedorn, G.: Kumulierter Energieaufwand von Photovoltaik- und Windkraftanlagen, Forschungsstelle für Energiewirtschaft, IFE Schriftenreihe Heft 28, München 1992, Seite 69 ff

¹¹¹ vgl. Quaschnig, V.: Regenerative Energiesysteme – Technologie, Berechnung, Simulation, Hanser Verlag, 3.Auflage, München, 2003 Seite 189 ff

und zwischen grundsätzlich verschiedenen Typen (Bilanzobjekte) sollte nicht ohne vorherige Markt- und Anlagenkenntnis erfolgen, da dies unter Umständen zu einer Fehlinterpretation der Ergebnisse führen würde.

7.2 Grundstoffbilanzierung

7.2.1 Angewandte Methoden

Die Bilanzierungsmethode von Pick und Wagner stellt eine Mischung aus Prozessketten-, Materialbilanzen- und Input-Output-Analyse dar. Somit bedient man sich der Vorteile aller drei Methoden. Die Prozesskettenanalyse gilt als ein sehr genaues Verfahren, da die Energieaufwendungen unter anderem mittels Messungen innerhalb und zwischen den verschiedenen Prozessen ermittelt werden. Aber auch als ein sehr Aufwendiges. Deswegen ist vor allem aus Kostengründen abzuschätzen, ob der Aufwand einer Prozesskettenanalyse mit dem dadurch gewonnenen Nutzensvorteil gegenüber anderen Methoden in Kauf genommen werden kann. Daher greifen Pick und Wagner nur bei den Energiegehalten der Grundstoffe auf Werte zurück, die meist aus Prozesskettenanalysen stammen sollen (vgl. Tabelle 6-2). Spezifische Energieaufwendungen der Werkstoffe sind oft in Datenbanken verschiedener Universitäten und Firmen gespeichert oder auch als kostenlose Version in Gemis enthalten. Nun liegt es nahe kurz zu prüfen, ob die Werte der Uni Essen wirklich aus reinen Prozesskettenanalysen stammen.

Da nach vorhergehender Rechnung der Turm mit ca. 27 Prozent maßgeblich am Gesamtenergiegehalt der Anlage beteiligt ist und daran unlegierter Stahl einen Anteil von ca. 84 Prozent hat, soll nun der Prozess der Stahlherstellung näher betrachtet werden. Alle Angaben in Abbildung 7-1 beziehen sich auf eine Tonne Output pro Herstellungsprozess, d.h. eine Tonne Eisenerzmix95 (Stückerz, Feinerz und Pellets), Roheisen und Oxygenstahl. Der Prozess der Rohstoffbereitstellung umfasst die Nummern 1-3, der Prozess der Roheisengewinnung die Nummern 4-6 und der Prozess der eigentlichen Stahlherstellung die Nummer 7.

Prozesskette Stahlherstellung

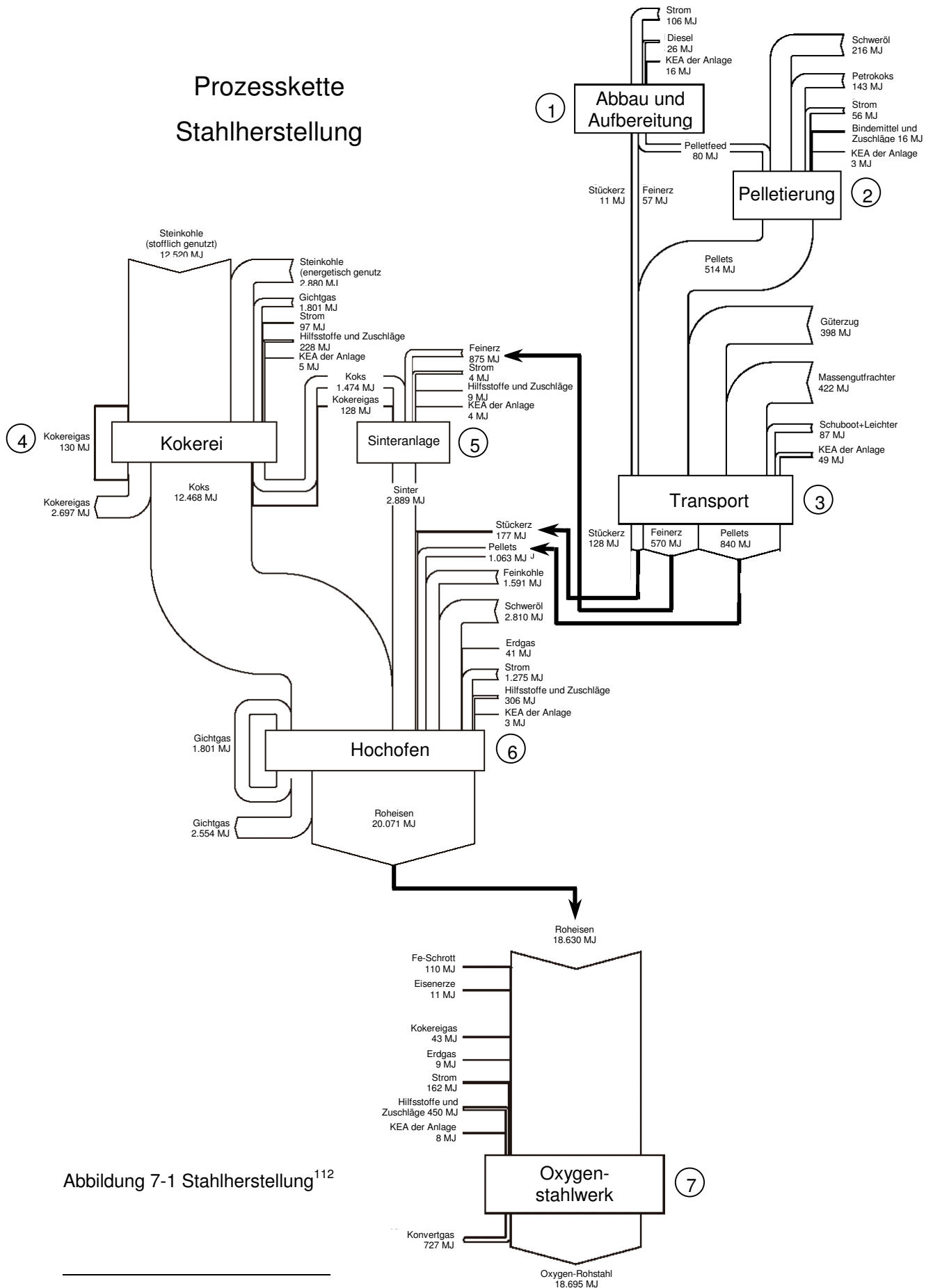


Abbildung 7-1 Stahlherstellung¹¹²

¹¹² vgl. Corradini, R., Köhler, D.: Ganzheitliche Bilanzierung von Grundstoffen und Halbzeugen, Teil III: Metalle, Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München 1999, Seite 5-23

Obiger Stahlherstellungsprozess soll nur einen kleinen Teil aller beteiligten Prozesse aufzeigen. Vorketten wie der Steinkohleabbau, die Strom-, Diesel- und Gaserzeugung, Transportaufwendungen usw., sind nicht im Schaubild enthalten. Das Schaubild verdeutlicht aber, dass erhebliche Anstrengungen, Kosten und Zeit in Anspruch genommen werden müssen, alle Details entlang der Stahlherstellung zu bilanzieren. Natürlich hat man bestimmte Abschneidekriterien der Bilanzräume definiert, die relevante von nicht relevanten Prozessen trennen. Doch könnte der Volksmund in diesem Zusammenhang sogar einmal recht behalten, der besagt: "Kleinvieh macht auch Mist". Werden diese Kriterien durch eine Sensitivitätsanalyse nicht nochmals geprüft, können schnell beträchtliche Abweichungen entstehen. Hierbei muß auch beachtet werden, dass man in der Stahlproduktion Rohstoffe wie Eisenerze und Pellets oft importiert. Dies setzt für die Bilanzierung voraus, dass auch von anderen Ländern Daten vorhanden sind. Doch gerade aus Ländern der dritten Welt dürfte sich deren Qualität als fraglich erweisen.

Weiterhin ist es nur schwer vorstellbar, derartig komplexe Zusammenhänge allein durch die Prozesskettenanalyse zu erschließen. Das würde bedeuten, dass man sich zwangsläufig auch in der Grundstoffbilanzierung Methoden wie der Materialbilanz- oder der IO-Analyse bedienen muss, die aber nicht die Genauigkeit der Prozesskettenanalyse erreichen. Auch im Forschungsprojekt GABIE wurde auf die Kombination von Mikro- und Makroanalyse zurückgegriffen¹¹³. Oft scheitert die Datenerhebung bereits schon an mangelnder Informationsweitergabe seitens der Betriebe, denen der damit verbundene Aufwand zu groß ist oder die keine Unternehmensinterna preisgeben wollen.

7.2.2 Vergleich verschiedener Grundstoffe und Quellen

Der KEA-Wert von Stahl in Abbildung 7-1 von ca. 18,7 MJ pro kg Stahl weicht nicht viel von den 18,4 MJ ab, welchen Pick und Wagner verwendet haben. Allerdings handelt es sich bei der Studie des OeVE um eine Stahlschiene, deren Energiegehalt durch das Walzen höher sein müsste, als die des Rohstahls. In Tabelle 7-1 werden die Energiegehalte einiger Grundstoffe, die in der WKA Anwendung fanden, mit

¹¹³ vgl. Corradini, R., Hutter, C., Köhler, D.: Ganzheitliche Bilanzierung von Grundstoffen und Halbzeugen, Teil I: Allgemeiner Teil, Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München 1999, Seite 11 ff

Daten, die vom OeVE selbst in einer Zeitschrift publiziert wurden¹¹⁴ und Daten, die auf Recherchen des FFE¹¹⁵ sowie auf Gemis 4.13 beruhen, verglichen. Die Werte des OeVE und des FFE sind annähernd aus den selben Jahren. Die Werte von Gemis stammen von 1995 bis 2002 und sind daher hinreichend mit den anderen beiden vergleichbar.

Tabelle 7-1 Vergleich des KEA (MJ/kg) verschiedener Grundstoffe und Quellen

Material	Energiewirt. Tagesfragen 97	OeVE 97	FFE 96	Gemis 4.13 04
unlegierter Stahl	20,5	18,4	18,7	22,9
Gußeisen	-	17,6	-	14,5
Alu Primärmix	239	199,9	204,1	220,5
Kupfer primär	41,8	83,9	44,2	71,2
Kupfer Draht 0,6 mm	-	95,3	46,7	-
Kupfer Draht 0,06 mm	59,6	101,8	57,8	-
Blei primär	33,6	17,7	-	29,1
EP - Harz	-	80,0	140,0	79,7
PVC	66,8	66,8	53,6	24,3
PVC-Kabelisolierung	-	-	59,9	-
PE-LD	88,6	88,6	67,0	19,7
Normalbeton B25 mit PZ	1,5	0,7	0,7	1,0
Leichtbeton B25 mit Bläthton	-	2,3	2,2	-
Gummi (SBR)	-	117,0	78,8	-
EPDM	-	-	96,8	39,3
PET	83,8	-	140,0	31,9
Toluol	-	-	58,0	8,6

Auffallend ist, dass sich bei Stoffen wie Stahl, Gußeisen und Aluminium die Abweichungen untereinander im Rahmen halten. Bei Kupfer, Beton, EP-Harz, PVC, PE-LD, PET, Toluol und EPDM differieren die Werte aber manchmal über 50 Prozent. Erklären lässt sich dies zum einen deswegen, weil Pick und Wagner teilweise Energieaufwendungen von Verarbeitungsprozessen mit in die Berechnung aufgenommen haben. Dies wird beim Kupferdraht deutlich, da hier wahrscheinlich der Aufwand für die PVC-Isolierung mit enthalten ist. Zum anderen resultieren die Unterschiede aus den verschiedenen Bilanzierungsmethoden. Weiterhin wurden von Pick und Wagner bewusst Obergrenzen gewählt, um die Studie nicht „schön zu rechnen“. Nur die Differenz bei Kupfer primär scheint etwas verwunderlich. Die Werte in Gemis, die oft nur als Schätzwerte (PET) oder Daten mit mittlerer Qualität

¹¹⁴ vgl. Wagner, H.-J., Wenzel, B.: Energiebilanzen – Vorgehen und Materialanhaltswerte, In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, Ausgabe 11, 1997, Seite 687

¹¹⁵ vgl. Ganzheitliche Bilanzierung von Grundstoffen und Halbzeugen, a.a.O., Teil II, III und IV

deklariert sind, liegen meist wesentlich unter denen der „Konkurrenz“ (PET, Toluol). Ein möglicher Erklärungsversuch ist, dass in Gemis schon die Bilanzierungsvorschläge des Öko-Instituts verwirklicht sind.

Man kann somit festhalten, dass selbst die Grundstoffbilanzierung, auf die alle weiteren Schritte aufbauen, keine absolut exakten und einheitlich anwendbaren Werte liefert. Die Unterschiede in der obigen Tabelle sollen diese Tatsache nochmals untermauern. Besonders die „Schnelllebigkeit“ der Technik und Prozesse verlangt eine ständige Anpassung der Datensätze. Dies ist aber aus Kosten- und Zeitgründen nicht möglich.

7.2.3 Grundstoffbilanzierung am Beispiel der Raps-erzeugung

Mit der Verknappung der Ressourcen und dem steigenden Umweltbewusstsein wird die Landwirtschaft in zunehmenden Maße wieder als „Rohstofflieferant“ entdeckt. Biodiesel, RME, Biogas und Biomasse sind langsam im Begriff zu einem ernstzunehmenden Wirtschaftszweig für viele landwirtschaftliche Betriebe zu werden, auch wenn derzeit oft erst eine staatliche Unterstützung die finanzielle Rentabilität ermöglicht.

Aus diesem Grund war es wie beim konventionellen Diesel erwägenswert, eine Energiebilanz über Biodiesel zu erstellen, um sicherzustellen, dass vergleichsweise weniger Umweltauswirkungen mit diesem neuen Energieträger verbunden sind. In Folge wird deswegen der Prozessschritt „Feldarbeit“ in der Prozesskette Biodieselproduktion, die auf eine Studie des FFE zurückgeht, näher erläutert und beurteilt, um eine Aussage über die Genauigkeit solcher Studien treffen zu können.

Dreier legt in seiner Untersuchung einen etwas über den deutschen Durchschnitt liegenden Betrieb mit 50 ha Betriebsgröße zugrunde¹¹⁶. Dies entspricht westdeutschem Standard. Ostdeutsche Betriebe stattdessen bewirtschaften wesentlich größere Einheiten von 50 bis zu 10.000 ha. Aufgrund der „günstigeren“ Struktur und des rationellen Maschineneinsatzes können diese Betriebe wesentlich effizienter und preisgünstiger als der westdeutsche „Nachbar“ produzieren. Dies schlägt sich auch auf den Energieaufwand pro ha nieder. Aus eigener Erfahrung

¹¹⁶ vgl. Dreier, T.: Biogene Kraftstoffe – Energetische, ökologische und ökonomische Analyse, Lehrstuhl für Energie- und Anwendungstechnik, IFE Schriftenreihe Heft 38, München 1999, Seite 12 ff

benötigt ein normaler Westbetrieb für 20 ha Weizensaat ohne Pflugeinsatz und Vorbestellung ca. 24 h (3m Arbeitsbreite, 100kW Schlepper). Ostdeutsche Betriebe dagegen bestellen in der selben Zeit unter guten Bedingungen bis zu 100 ha und mehr (6m Arbeitsbreite, 180kW Schlepper). Dementsprechend verhalten sich die variablen Kosten und damit auch der Energieaufwand (geringerer Dieselverbrauch modernerer und größerer Traktoren, höhere Auslastung der Maschinen auf Grund geringerer Leerlaufzeiten und Flächenleistung usw.). Benötigt der westdeutsche Betrieb somit ca. 25 l Diesel pro ha beläuft sich der Verbrauch des ostdeutschen Betriebs unter gleichen Bodenverhältnissen auf ca. 12 l/ha. Dieses Beispiel kann erfahrungsgemäß auf die meisten Arbeitsgänge im Ackerbau übertragen werden (Pflügen, schwere Bodenbearbeitung, Pflanzenschutz- und Düngemaßnahmen, Ernten).

Die Arbeitsgänge, die zum Rapsanbau innerhalb eines Jahres unternommen werden müssen, werden von Dreier zum größten Teil miteinbezogen (vgl. Abbildung 7-2).

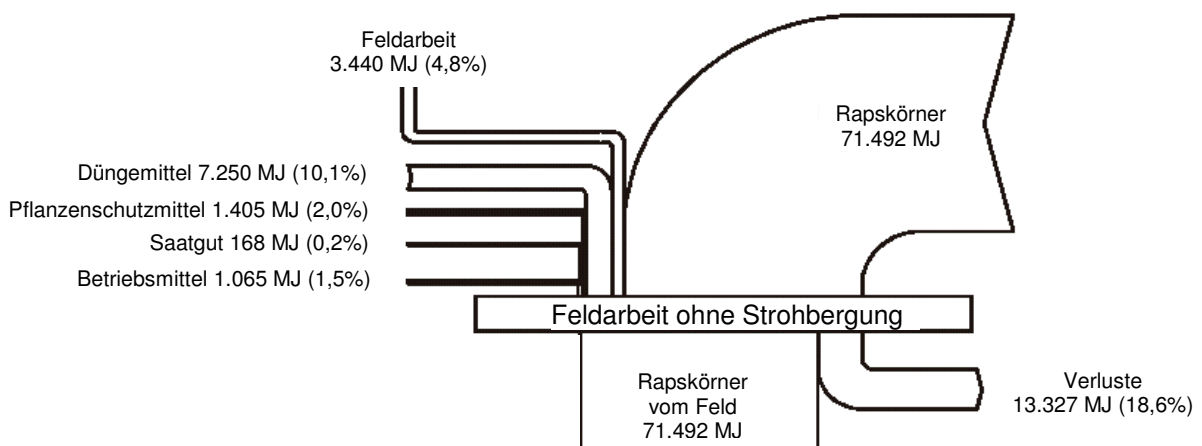


Abbildung 7-2 Prozessschritt Feldarbeit¹¹⁷

Hier kann man sich nur Durchschnittswerten bedienen, da die Anbaustrategie von Jahr zu Jahr je nach Witterung sehr unterschiedlich ausfallen kann. Für den Anbau werden aber nur variable Energieaufwendungen angesetzt, wie Dieselverbrauch, Dünger und Pflanzenschutzmittel. Vor allem die Leistungen der in der Studie verwendeten Traktoren dürfte schätzungsweise um ca 30 Prozent höher angesetzt werden. Eine Bilanzierung des Herstellungsaufwandes der doch oft sehr

¹¹⁷ entnommen aus: Dreier, T.: Ganzheitliche Bilanzierung von Grundstoffen und Halbzeugen, Teil V: Biogene Kraftstoffe, Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München 1999, Seite 38

aufwendigen Technik Wirtschaftsgebäude wird nicht unternommen. Die Dünge- und Pflanzenschutzmittelmengen gibt Dreier wieder in Anlehnung an Literaturdurchschnittswerten an, die jedoch als praxistauglich angesehen werden können. Nur die Stickstoffmenge von 144 kg N/ha, die für die Ganzpflanze angesetzt wird, liegt in der Praxis um ca. 30-50 Prozent höher. Phosphor und Kali werden bei vielen Betrieben dem Boden über die wirtschaftseigenen Dünger (Gülle) zugeführt und müssen so nicht zugekauft werden. Aufgrund der weniger ausgeprägten Viehhaltung in Ostdeutschland müssen diese Betriebe in Punkto Düngung jedoch Nährstoffe in energieintensiver mineralischer Form dem Boden zufügen. Dadurch kann sich die Energiebilanz wieder etwas angleichen. Berücksichtigt werden muss auch die im Rapskorn enthaltene Energie in Form von Öl. Dabei wird ein Ölgehalt von 40 Prozent und ein Durchschnittsertrag von drei t/ha angenommen. Das entspricht auch der Realität. Etwas verwunderlich ist, dass bei Dreier die Druschverluste, üblicherweise ein bis zwei Prozent der Erntemenge, und der Energiegehalt des auf dem Acker verbleibenden Rapsstrohs gleichzusetzen mit dem für den Anbau benötigten Energieaufwand sind. Die auf einem Hektar (10.000m²) erzeugte Menge an Rapskörnern beläuft sich schließlich auf 71.492 MJ. Das entspricht ungefähr der Energiemenge, die mit 190m² monokristalliner Solarzellen pro Jahr erzeugt werden kann¹¹⁸.

Abgesehen von den Strukturunterschieden zwischen West- und Ostdeutschland, den unterschiedlichen Anbauverfahren und den nichtberücksichtigten Herstellungsaufwendungen für die Maschinen und Gebäude werden im Prozessschritt „Feldarbeit“ alle wichtigen Parameter miteinbezogen. Natürlich muss ich anmerken, dass es sich hier um sehr einfache Abläufe handelt, die verhältnismässig leicht zu bilanzieren sind. Ein größeres Problem stellte die Bewertung der Pflanzenschutzmittel dar, da oft viele Jahre an Forschungsarbeit für Wirkstoffe aufgewendet werden müssen und aufgrund der Vielfalt der Mittel es unmöglich ist, genaue Werte zu ermitteln.

An diesem Beispiel sollte nochmals verdeutlicht werden, dass trotz großer Bemühungen auch Grundstoffe nicht alle Energieaufwendungen enthalten, die während des Lebenszyklusses in das Produkt fließen, und deswegen teilweise

¹¹⁸ eigene Berechnung aus Daten von Hartmann, D.: Ganzheitliche Bilanzierung der Stromerzeugung aus regenerativen Energien, Dissertation, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart 2001, Seite 55

gemittelte, annahmenlastige und vereinfachte Werte darstellen können. Ersichtlich wird aber auch, dass es wichtig ist, große Anteile am Gesamtenergieaufwand (Energiegehalt der Rapskörner) einigermaßen exakt zu erfassen, damit kleine Abweichungen (Pflanzenschutzmittel, Dünger, Feldarbeit) nicht ins Gewicht fallen und somit ein aussagekräftiger Wert für die Praxis geschaffen werden kann. Nach bisherigen Erfahrungen kann diese Erkenntnis auf viele industrielle Prozesse analog übertragen werden.

7.3 Bilanzierung der Zulieferteile

Der nächste Bilanzierungsschritt ist die energetische Beurteilung der Teile, die von Zulieferern entweder als Halb- oder Fertigerzeugnisse hergestellt werden. Wie schon beschrieben wird hierzu die Materialbilanzenmethode verwendet. Die vom Zulieferer eingesetzten Rohmaterialmengen werden mit Hilfe der Werkstoffausnutzungsgrade ermittelt. Nach Pick und Wagner konnten für einige größere Bauteile genaue Daten über den Werkstoffverschnitt ermittelt werden. Andere wurden wiederum geschätzt oder wie bei Elektrobauteilen keine angenommen.

Ganz klar ist auf den ersten Blick nicht, wie Pick und Wagner das Problem mit den Werkstoffausnutzungsgraden lösen. Bedenkt man, dass der Energiegehalt der Bauteile über das Gewicht des Rohmaterials bestimmt wird, sollte hier schon einigermaßen genau vorgegangen werden. Betrachtet man die Komponente Azimutverstellung, die aus einem Elektro- oder Hydraulikmotor und einem Getriebe besteht, wird klar, dass oft Einzelteile von verschiedenen Zulieferern, die wiederum von Zulieferern versorgt werden in der Komponente enthalten sind. Ein Elektromotor ist z.B. aus mehreren Bauteilen zusammengesetzt, deren Werkstoffausnutzungsgrade untereinander verschieden sind. Es wird daher angenommen, dass mittels der Stücklisten alle Bauteile bis in die kleinsten Einzelteile zerlegt und somit verschiedene Einzelteilgruppen (z.B. Drehteile, Schweißteile, Normteile) gebildet wurden, deren Werkstoffausnutzungsgrad nach Auskunft der Zulieferer ähnlich ist. Auf diese Weise lässt sich am einfachsten die Rohmaterialmenge bestimmen. Da aber in der Praxis Bearbeiten nicht gleich Bearbeiten ist und für die Herstellung von Lagerdeckeln und Druckringen völlig andere Verfahren und Ausschüsse bestehen, spiegelt ein Werkstoffausnutzungsgrad

von 88 Prozent für die Gruppe „kleine bearbeitete Teile“ einen zu ungenauen Wert wider, auch wenn die angeblich ermittelten Werkstoffausnutzungsgrade zwischen 87 und 89 Prozent liegen sollen¹¹⁹. Ebenso der für die Elektronik und Elektrik (Schaltschränke, Steuerungseinheiten, Kabel usw.) außer Acht gelassene Werkstoffausnutzungsgrad kann das Ergebnis beeinflussen, zumal der KEA für elektrotechnische Erzeugnisse im Verhältnis sehr hoch ist. Positiv anzumerken ist, dass beim Turm die Methode gut angewandt werden kann, da sich die Fertigungstiefe in Grenzen hält.

Folgendes Diagramm soll verdeutlichen, wie wichtig es ist die Menge des Rohmaterials nicht nur abzuschätzen, sondern möglichst genau zu erfassen. Die Energieaufwendungen für Rohmaterialien haben nämlich am gesamten Energiegehalt der Anlage einen Anteil von ca. 84 Prozent.

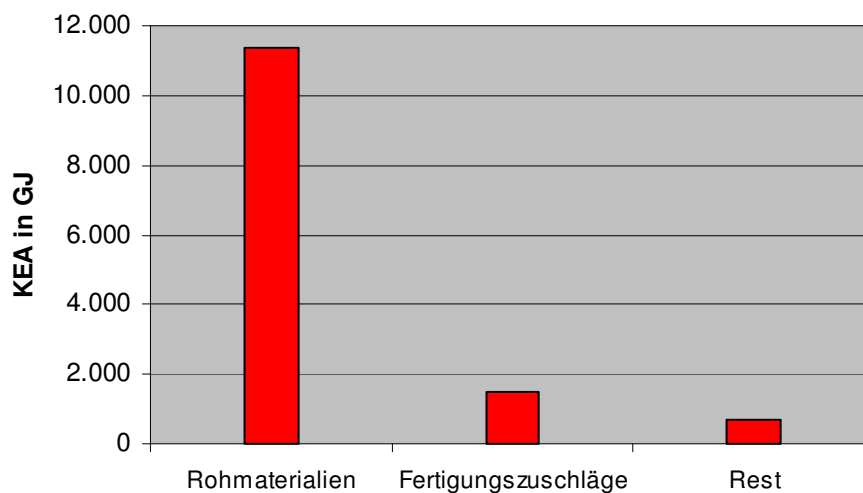


Abbildung 7-3 KEA der Rohmaterialien, Fertigungszuschläge und Rest

Energiemengen, die bei der Herstellung der Bauteile in den Betrieben benötigt werden, wie z.B. Strom, Hilfs- und Betriebsstoffe, Gebäude, Maschinen usw. wurden pauschal über die Fertigungszuschläge für Stahlbau, Maschinenbau und elektrotechnische Erzeugnisse abgeschätzt. Die Fertigungszuschläge hat man jedoch aus Vereinfachungsgründen nicht in den Betrieben selbst, sondern durch die IO-Analyse ermittelt. Diese pauschalen Fertigungszuschlagssätze spiegeln eine ganze Branche wider, von Betrieb zu Betrieb können Fertigungszuschlagssätze aber beträchtlich differieren, je nach Fertigungstiefe, Maschinen und Verfahren. Auch nicht

¹¹⁹ vgl. Pick, E., Wagner, H.-J.: Beitrag zum kumulierten Energieaufwand ausgewählter Windenergiekonverter, Arbeitsbericht des Instituts für ökologisch verträgliche Energiewirtschaft, Universität Essen 1998, Seite 26

berücksichtigt wurden eventuelle Transportaufwendungen, wie z.B. beim Transport von Rohstoffen zu den Zulieferern oder von Zulieferer zu Zulieferer:

Hier hätte man annehmen können, dass bei den einzelnen Zulieferern zumindest die Fertigungszuschlagssätze individuell bestimmt werden, auch wenn der Aufwand dafür größer gewesen wäre. Die eingesetzten Material-, Stoff- und Energiemengen liegen dem Unternehmen neben deren Preisen sogar ziemlich genau vor, da diese zu den jährlichen Jahresabschlüssen und auch zu Kalkulationszwecken unentbehrlich sind. Weiterhin hätte diese Methode nicht der Genauigkeit einer Kostenträgerrechnung entsprechen müssen. Eine Mischung aus den wichtigsten Energieaufwendungen hätte genügt. Kombiniert mit langjährigen Erfahrungswerten können hier bestimmt bessere Ergebnisse erreicht werden, als über IO-Tabellen. Eine mögliche Erklärung für die Verwendung der IO-Tabellen wäre, dass die Betriebe solche Zahlen nicht der Öffentlichkeit zugänglich machen wollen. Dann bleibt natürlich keine andere Wahl.

Aus oben genannten Gründen hätte der Bilanzraum „Herstellung der Zulieferteile“ genauer betrachtet werden müssen, da vor allem die Ermittlung der Fertigungszuschläge zu wagen für eine verursachungsgerechte Zuordnung der Energieaufwendungen ist. Hier wäre es, wenn möglich, angebracht gewesen, betriebspezifische Werte zu ermitteln.

7.4 Bilanzierung im Unternehmen Enercon

Die Bilanzierung bei Enercon selbst dagegen konnte zufriedenstellender gelöst werden. Diese umfasste die Herstellung der Rotorblätter und des Generators, sowie die Montage der Gondel, in der alle wichtigen Bauteile sowie Teile der Steuerung und Netzanbindung untergebracht sind. Das Prinzip der Werkstoffausnutzungsgrade wurde auch hier für Bauteile, die selbst produziert wurden (Generator, Gondelkonstruktion), angewandt. Die Materialien der Rotorblätter konnten sogar sehr genau ermittelt werden, da die gesamte Produktion bei Enercon selbst stattgefunden hatte. Fertigungszuschlagssätze gibt es keine, da man alle Energieaufwendungen eines Jahres über das Massenverhältnis auf die Anlagen aufteilt. In diesem Zusammenhang hat man die über die IO-Analyse ermittelten Zuschlagssätze für die jeweiligen Baugruppen und Wirtschaftssektoren verringert, da in jenen schließlich auch die Energieaufwendungen von Enercon enthalten sind und es so zu

Doppelzählungen gekommen wäre. Die Frage ist nur, ob diese Verringerung den Aufwendungen bei Enercon entspricht und ob man dadurch nur den „Schätzwerten“ einen „Hauch“ Präzision verleihen will. Durchaus könnte es auch sein, dass der Fertigungszuschlag für Maschinenbauerzeugnisse für Windradbauteile in Wirklichkeit nicht 21 Prozent sondern nur 15 Prozent beträgt. Demzufolge müsste der neue Zuschlagssatz auf 9 Prozent sinken. Da aber mit 15 Prozent gerechnet wird, kommt es zur besagten Doppelzählung.

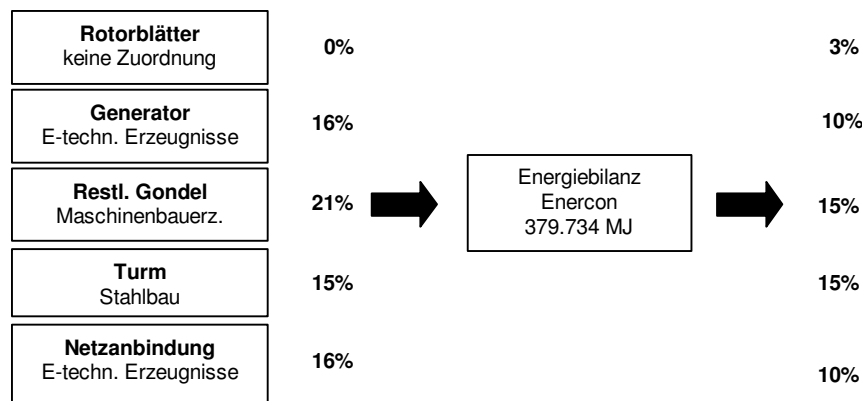


Abbildung 7-4 Verringerung der IO-Zuschlagssätze

Der Generator wird gemäß seinen Produkteigenschaften in den Sektor 26 „Herstellung von elektrotechnischen Erzeugnissen“ eingeordnet. Methodisch mag das richtig sein, jedoch sollte er aufgrund seiner Materialien eher dem Sektor Maschinenbauerzeugnisse zugeordnet werden. Somit wird er mit einem Energiegehalt wie Platinen, Schalter, Relais usw. bewertet.

Umgekehrt sollten auch wie beim tiefgründigen Fundament Zuschlagssätze nicht vernachlässigt werden. Für das Fundament werden grundsätzlich keine Zuschlagssätze angegeben, da sie in den KEA-Angaben zu den Materialien schon enthalten sind, außer bei Stahl unlegiert. Auch der unlegierte Stahl muß durch mehrere Walz- oder Pressvorgänge zu den speziellen Stahlgründungspfählen geformt werden, was die Rechnung jedoch nicht berücksichtigt. Pick und Wagner kommentieren diesen Punkt mit der Begründung, dass der Fehler vernachlässigbar gering sein dürfte. Berücksichtigung finden speziell beim Fundament noch Aushubarbeiten. Mögliche Erschließungsaufwendungen, wie Wegebau und Kabelverlegung, die von Standort zu Standort variieren und oft von beträchtlichem Umfang sind, werden nicht miterfasst bzw. nicht erwähnt.

Der letzte wichtige Punkt ist, dass die Energieaufwendungen für die Herstellung der Gebäude und Maschinen bei Enercon und auch bei den Zulieferern nicht mit berücksichtigt wurden. Stellt man sich vor, dass ein Großteil der Investitionen für Gebäude und Maschinen aufgewendet wird, kann dieser Teil energetisch nicht ganz irrelevant sein. Man darf jedoch nicht den Fehler begehen und Kosten mit Energieaufwendungen gleich stellen. Aber eine grobe Einschätzung kann darüber getroffen werden.

Es wird deutlich dass die Bilanzierung im Unternehmen Enercon anhand der Methode der IO-Fertigungszuschlagssätze und der Werkstoffausnutzungsgrade als mittelmäßig einzuschätzen ist, schon alleine aus dem Grund, weil keine einzigen Messungen durchgeführt wurden. Es werden zwar die betriebsspezifischen Energieaufwendungen ermittelt und auch über einen Schlüssel auf die Anlagen verteilt, doch können die dadurch gewonnenen Ergebnisse durch die notwendige Angleichung der IO-Fertigungszuschlagssätze wieder relativiert werden.

7.5 Bilanzierung von Transport, Endmontage und Wartung

Angesichts der Tatsache, dass die drei Größen Transport, Endmontage und Wartung am Gesamt-KEA mit nur ca. 4,5 Prozent nach der Rechnung von Pick und Wagner beteiligt sind, wird nur kurz darauf eingegangen.

Die Transportaufwendungen beinhalten, wie schon erläutert, die Transporte der Zulieferer zu Enercon und der fertigen Bauteile zum Aufstellungsort. Die Parameter, die hier zur Anwendung kommen, scheinen durchaus passable Werte zu liefern, vorausgesetzt der Wert von 1,67 MJ/ tkm entspricht der Realität.

Bei der Errichtung der WKA wird aber nur der Schwerlastkran ohne Anfahrt und eventuellem Auf- und Abbau angesetzt, da dies die größte Energieaufwendung laut Pick und Wagner darstellt. Aber auch die Montage, die sich über mehrere Monate hinzieht, nimmt schon Energie in Anspruch, wie z.B. elektrische Geräte, Werkzeuge, An- und Abfahrt der Arbeiter, Kleinteile, usw.. Vielleicht könnte man hier auf Erfahrungswerte zurückgreifen.

Die Wartung hingegen verbraucht mit ca. 174.862 MJ innerhalb der 20-jährigen Lebenszeit erwähnenswerte Energiemengen. Diese werden aber hauptsächlich für die Erneuerung verschiedener Bauteile sowie Ölwechsel und Fett aufgewendet. Da die Masse der Windräder aber noch lange nicht die erwartete Lebenszeit erreicht hat,

lässt sich heute schlecht abschätzen, welche Reparaturen nach 20 oder mehr Jahren auftreten. Verschlossene Großlager oder ähnlich schwerwiegende Reparaturen würden beispielsweise den KEA_N schnell in die Höhe treiben.

7.6 Bilanzierung über IO-Tabellen

7.6.1 IO-Analyse als „Grobcheck“

Im vorletzten Kapitel des Beitrags von Pick und Wagner wird der KEA des Windenergiekonverters, wie auch im dänischen Beitrag von S. Krohn, rein über die IO-Analyse bestimmt. Da aber selbst das Abschätzen der Fertigungszuschlagssätze über IO-Analyse umstritten ist, kann grundsätzlich eine alleinige IO-Analyse für eine sachgerechte Bilanzierung aus folgenden Gründen nicht empfohlen werden^{120,121}.

- Die IO-Tabellen unterteilen die gesamte Volkswirtschaft lediglich in 58 Produktionsbereiche. Somit ergeben sich zwangsläufig Inhomogenitäten innerhalb der Sektoren, d.h. die Zuordnung bestimmter Produkte zu den jeweiligen Sektoren kann nicht eindeutig vorgenommen werden. Auch bei einer Differenzierung nach 368 Sektoren wie sie die Tabellen der USA aufweisen, kann man keine homogenen Produktpaletten erwarten. Stammen z.B. zwei unterschiedliche und durch den gleichen Preis gekennzeichnete Produkte aus einem Sektor, werden ihnen zwangsläufig die selben Vorleistungen und Sachbilanzgrößen durch die IO-Analyse zugeordnet, obwohl diese eigentlich zwei unterschiedlichen Herstellungsprozessen entspringen.
- Ein direkter Zusammenhang zwischen dem Marktpreis und den Energieaufwendungen für die Produkte ist nur selten gegeben. Deswegen wird auch der Ab-Werk-Preis¹²² zugrundegelegt, in dem MWSt, Gewinn und Transportkosten nicht enthalten sind. Allerdings kann sich auch der Ab-Werk-Preis aufgrund verschiedener Rabatte verringern (z.B. zahlt die Industrie

¹²⁰ vgl. Hartmann, D.: Ganzheitliche Bilanzierung der Stromerzeugung..., a.a.O., Seite 32

¹²¹ vgl. Wagner, H.-J., Wenzel, B.: Energetische Input-Outputrechnung und Prozesskettenanalyse – Möglichkeiten und Grenzen beider Methoden, VDI-Berichte 1328, VDI-Verlag, Düsseldorf 1997, Seite 23

¹²² vgl. Pick, E., Wenzel, B.: Energetische Input-Output-Analyse, verschiedene Ansätze zur Berücksichtigung von Abschreibungen, Arbeitsbericht des Instituts für ökologisch verträgliche Energiewirtschaft, Universität Essen 1997, Seite 10

einen niedrigeren Strompreis als das Gewerbe), die energetischen Aufwendungen für die Produktion bleiben aber konstant. Aus diesem Grund wurde das „gemischt monetär-energetische Modell“ entwickelt, das durch Angabe von Mengeneinheiten innerhalb der energieliefernden Sektoren Verzerrungen durch unterschiedliche Preise auszuschalten vermag¹²³.

- Mischkalkulationen in der Kostenrechnung ordnen Kosten den verschiedenen Kostenstellen nicht immer verursachungsgerecht zu, je nachdem welche Kalkulationsverfahren und Verfahren zur innerbetrieblichen Leistungsverrechnung verwendet werden. Dadurch kann es zu Preisverzerrungen und dadurch zu Fehlern in der IO-Analyse kommen.
- Die Erstellung der IO-Tabellen ist mit hohem Aufwand verbunden. Daher erscheinen diese im Bezug auf den Betrachtungszeitraum erst Jahre später und werden nur alle zwei Jahre angefertigt. Pick und Wagner mussten deswegen 1997 auf IO-Tabellen von 1993 zurückgreifen. Demzufolge mussten auch die Preise der Anlagen angepasst werden. Da die E-66 aber 1993 noch nicht in Serie produziert wurde, hat man hier einen fiktiven Preis, der aus der E-40 abgeleitet wurde, zugrundegelegt. Aber nicht nur die Probleme von Seiten des Herstellers, sondern auch Inflation, unterschiedliche Kaufkraft in den verschiedenen Ländern oder der permanente Wechsel der Produktionspalette erschweren es, die Werte über so lange Zeiträume zu vergleichen.
- Oft ist das statistische Ausgangsmaterial der IO-Tabellen mit erheblichen Datenlücken verbunden, die durch Schätzungen geschlossen werden und so weitere Fehlberechnungen mit sich ziehen.
- Vereinfachend wird die Annahme getroffen, dass Importe als Inlandsprodukte interpretiert werden, da ausländische IO-Tabellen nicht den Deutschen entsprechen. Deren Aufwendungen können sich aber beträchtlich unterscheiden. Europaweit ist diese Annahme jedoch unter Umständen vertretbar¹²⁴.

¹²³ vgl. Pick, E., Wenzel, B.: Energetische Input-Output-Analyse..., a.a.O., Seite 9

¹²⁴ vgl. Weber, Ch.: Untersuchung zum KEA von Produktgruppen mit Hilfe der Input-Output-Analyse, VDI-Berichte 1218, VDI Verlag, Düsseldorf 1995, Seite 173

Neben den genannten Schwachpunkten der IO-Analyse sprechen allerdings einige wesentliche Vorteile für den Einsatz der Methode:

- Die IO-Analyse ist im Vergleich zur Prozesskettenanalyse sehr schnell bei vorhandenen Daten durchzuführen¹²⁵. In vielen Fällen lässt sich daher ein überschlägiges Ergebnis für den KEA errechnen, wenn man durchschnittlich 2,5-3 MJ/Euro ansetzt und diese mit dem Ab-Werkpreis multipliziert. Für erste Einschätzungen genügt dieser Wert. Die Windkraftgegner gingen im Gegensatz dazu von ca. 7,5 MJ/Euro aus.
- Im Vergleich zu Mikroanalysen ist die IO-Analyse kostengünstig, da keine langwierigen Messungen und Recherchen in Unternehmen vorgenommen werden müssen.
- Alle direkten und indirekten Aufwendungen können über die Leontief-Inverse für einen Sektor bestimmt werden¹²⁶. Demnach entfallen im Gegensatz zur PKA Abschneidekriterien, die den Bilanzraum händelbar halten sollen. Weiterhin ist eine Berücksichtigung der Infrastruktur, der Dienstleistungen, des Verschleißes von Maschinen und der Nutzung von Gebäuden über die Abschreibungen möglich.

Trotz einiger Punkte, die gegen den alleinigen Einsatz der IO-Analyse sprechen, ist sie ein gutes Instrument zur schnellen KEA-Bestimmung eines Produktes. Dies kann vor allem bei der Entwicklung neuer Produkte hilfreich sein, da in dieser Lebenszyklusphase noch keine Prozesse und Betriebsabläufe für eine eventuelle Prozesskettenanalyse bekannt sind.

Aufgrund der in diesem Kapitel diskutierten Punkte, wird offensichtlich, dass das in der Einleitung angeführte Rechenbeispiel der Windkraftgegner auf keinen seriösen Hintergrund aufbaut. Die Windkraftanlage wird weder in verschiedene Baugruppen aufgeteilt, um diese den jeweiligen Sektoren zuordnen zu können, noch wird der Ab-Werk-Preis herangezogen. Stattdessen rechnet der Verfasser mit einem pauschalen

¹²⁵ vgl. Wagner, H.-J., Wenzel, B.: Energetische Input-Outputrechnung..., a.a.O., Seite 23

¹²⁶ vgl. Hartmann, D.: Ganzheitliche Bilanzierung der Stromerzeugung..., a.a.O., Seite 31

Faktor für das produzierende Gewerbe und stützt sich auf Marktpreise, in denen der Gewinn des Unternehmens enthalten ist. Die MWSt und Transportkosten sind jedoch in diesen Marktpreisen nicht enthalten. Auch wird die Wartung mit dem selben Faktor bewertet wie die Herstellung. Dies ist allerdings fraglich. Weiterhin rechnet er mit geringeren Stromerträgen als die anderen Studien, was natürlich zu einer Verschlechterung der AZ und des EF führt. Die energetische Anrechnung von Subventionen, die dadurch begründet wird, dass jedem erwirtschafteten Euro eine gewisse Energiemenge gegenübersteht, mag vom Ansatz her richtig sein. Eine wahrheitsgetreue Zurechnung der damit verbundenen Energieaufwendungen ist aber nicht möglich. Daher wird klar, dass die Windkraftgegner mit relativ einfachen Rechnungen, einer fachlich unwissenden Masse auf unseriöse Art und Weise „vorgaukeln“, die Windkraft wäre in energetischer Hinsicht ineffizient.

7.6.2 Endogenisierung von Abschreibungen

Natürlich wird die IO-Analyse trotz vieler Nachteile ein wichtiges Hilfsmittel bei der Bilanzierung bleiben. Vor allem die Möglichkeit, mit dieser Methode Aufwendungen für Gebäude und Maschinen grob berücksichtigen zu können, ist ein triftiger Grund, nicht in allen Bereichen auf die IO-Analyse zu verzichten. Dafür müssen aber einige grundlegende Dinge des Verfahrens bekannt sein.

Für die Herstellung von Gütern in einer Volkswirtschaft sind Produktionsanlagen und Gebäude erforderlich, deren Produktion und Errichtung in früheren Jahren Energie verbraucht hat. Dieser zurückliegende Energieaufwand ist allerdings nicht in der Vorleistungsmatrix enthalten, sondern wird in Zeile 63 indirekt über die Abschreibungen ausgewiesen. So wäre es sinnvoll, jenen Energieaufwand anteilig einzubringen. Pick und Wenzel haben deswegen verschiedene Möglichkeiten vorgestellt, wie derartige Energieaufwendungen mit eingerechnet werden können¹²⁷.

Da das StBA keine Tabellen über die jährlich verwendeten Ausrüstungen und Gebäude der Produktionsbereiche aufstellt, werden die Abschreibungen in Zeile 63 für eine weitere Berechnung herangezogen. Man geht also davon aus, dass die Abschreibungen eines Produktionssektors Äquivalente der tatsächlichen Investitionen eines Sektors darstellen, die mindestens zur Erhaltung der

¹²⁷ vgl. Pick, E., Wenzel, B.: Energetische Input-Output-Analyse..., a.a.O., Seite 5 ff

Produktionskapazität des Betriebes notwendig sind (vgl. Finanzierung durch Abschreibungen und Lohmann-Ruchti-Effekt in der Betriebswirtschaft). Korrekt betrachtet sind die Abschreibungen in der Vergangenheit ebenfalls mit den dort gültigen Energiemengen und Kosten produziert worden (z.B. Errichtung einer Produktionshalle vor 20 Jahren). Diese Vergangenheitsinvestitionen sollen aber nach heute gültigen „energetischen Kosten“ bewertet werden.

Neben der Endogenisierung (Berücksichtigung) mit Hilfe der Vorleistungs-Input-Koeffizienten, der Output-Koeffizienten und der Gleichverteilung hat man sich für eine Endogenisierung anhand der Investitionsgüternachfrage entschieden¹²⁸, da deren Ergebnisse der Realität am nächsten kommen. Dabei baut die Methode auf die Struktur der Zusammensetzung der Investitionsgüter Ausrüstungen und Bauten im Sektor der Endnachfrage auf. In der Praxis sind nämlich nur 26 von 58 Sektoren an der Produktion von Ausrüstungen und Bauten direkt beteiligt, d.h. die anderen Sektoren erbringen nur Vorleistungen für diese Produkte.

Im ersten Schritt soll nun ermittelt werden, welche Anteile die 26 verschiedenen Sektoren an der Summe aller nachgefragten Anlage- und Gebäudeinvestitionen haben. Dazu werden die Spalten 62 (Ausrüstungen) und 63 (Bauten) zu einem neuen Vektor addiert und dessen Summen gebildet, die somit die Nachfrage nach beiden Investitionsgütern beschreibt. Als nächstes normiert man die Werte des neuen Spaltenvektors auf seine Summe und erhält dadurch die Anteile der 26 Sektoren am gesamten Investitionsgüteraufkommen von Bauten und Ausrüstungen.

Im zweiten Schritt sollen die Anteile der 26 Produktionsbereiche an der gesamten Abschreibungssumme ermittelt werden, d.h. die Abschreibungssumme wird auf die 26 Sektoren umgeschlagen. Daher multipliziert man die Koeffizienten aus dem ersten Schritt mit der Gesamtsumme der Abschreibungen (Zeile 63) aller Produktionsbereiche und erhält als Ergebnis einen neuen Spaltenvektor.

Im dritten Schritt müssen die Ergebnisse des Spaltenvektors aber noch den 58 Sektoren in den dazugehörigen 26 Zeilen zugerechnet werden, da die Produktionsbereiche Vorleistungen im Sinne von Anlagen und Gebäuden von den 26 Sektoren beziehen. Dies erreicht man, indem die bisher errechneten Abschreibungssummen der Sektoren anhand der tatsächlichen

¹²⁸ vgl. Weber, Ch.: Untersuchung zum KEA..., a.a.O., Seite 175

Abschreibungsverteilung der 58 Sektoren in Zeile 63 auf auf diese zeilenweise verteilt werden.

Die gewonnene „Investitionskreuzmatrix“ \mathbf{W} wird dann auf die Vorleistungsmatrix \mathbf{X} addiert. Aus der neuen Matrix \mathbf{V}^+ werden analog, wie im Kapitel 4.3.2 beschrieben, die Energieintensitäten ε errechnet. Damit ergibt sich eine durchschnittliche Zuwachsrate von 16 Prozent im Gegensatz zur Methode der Vorleistungs-Input-Koeffizienten mit 46 Prozent Zuwachs, Vorleistungs-Output-Koeffizienten mit 30 Prozent und gleichmäßige Verteilung mit 50 Prozent. Für die verwendeten Energieintensitäten der IO-Analyse am Beispiel der E-66 würde sich folgendes Schaubild ergeben.

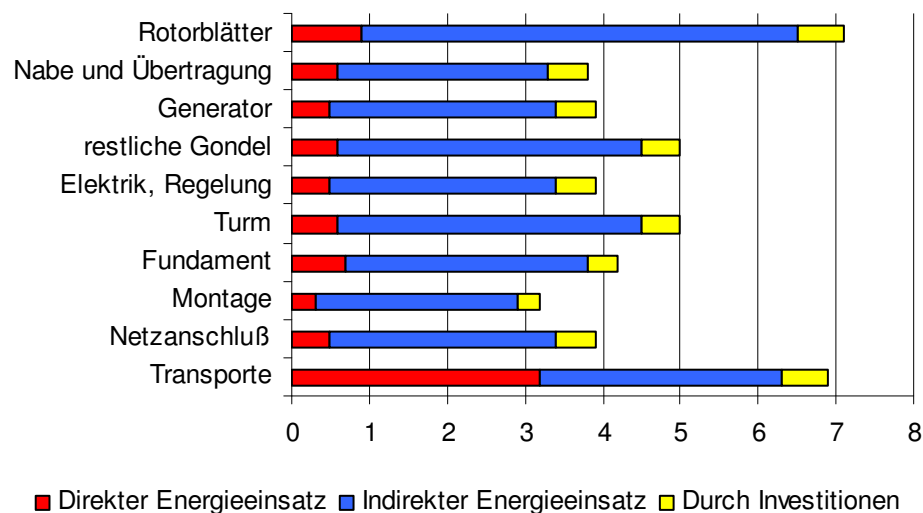


Abbildung 7-5 Zusammensetzung der Energieaufwandskoeffizienten¹²⁹

Hierbei lässt sich gut erkennen, dass das Miteinbeziehen der Abschreibungen, die ein Synonym für die früheren Investitionen in Gebäude und Maschinen darstellen, die Energieintensitäten merklich beeinflusst. Deswegen wurde auch an der Arbeit von Krohn kritisiert, dass hier nicht deutlich wird, ob eine Endogenisierung der Abschreibungen erfolgt ist und wenn ja, mit welchen Methoden.

¹²⁹ vgl. Pick, E., Wenzel, B.: Energetische Input-Output-Analyse..., a.a.O., Seite 17

7.6.3 Hybrid-Ansatz

Hartmans Untersuchung beruht im Gegensatz zur Materialbilanzanalyse auf dem von Marheineke entwickelten Hybrid-Ansatz (vgl. Kapitel 4.4). Dieser stützt sich auch wie Mischanalysen auf Ergebnisse der IO-Analyse.

Ausgangspunkt ist jedoch eine vorausgehende Prozesskettenanalyse für die wichtigen Stoff- und Energieströme. Nach den bisherigen Erkenntnissen stellt sich berechtigterweise die Frage, inwieweit diese Prozesskettenanalyse auch eine Prozesskettenanalyse ist. Am Beispiel der Grundstoffbilanzierung wurde klar, dass Abschneidekriterien unerlässlich sind, um den Aufwand in Grenzen zu halten. Weiterhin kann mit dem Wort Prozesskettenanalyse noch nicht angenommen werden, dass auch Messungen durchgeführt wurden, ohne die ein aussagekräftiges Ergebnis nicht zustandekommt. Auch können in diesem Zusammenhang Mischanalysen zum Einsatz gekommen sein. Deswegen sollten an dieser Stelle von den Autoren der Studien Angaben über das genaue Vorgehen der Bilanzierung gemacht werden, damit man zumindest die Qualität der Daten grob einschätzen kann.

Restliche unbekannte Daten werden schließlich über die IO-Analyse bestimmt. Auch von der VDI-Richtlinie wird eine Kombination von Mikro- und Makroanalyse vorgeschlagen. Doch die Methode, über die Nettowertschöpfung unbekannte Prozesse zu bilanzieren, ist neu und stellt auch nach Meinung von Experten ein solides Verfahren dar, dessen Genauigkeit zum größten Teil von der Qualität der Prozesskettenanalyse abhängt¹³⁰. Beim Vergleich der verschiedenen Windenergiekonverter lagen die Werte immer zwischen den Werten der Materialbilanzanalyse und denen der reinen IO-Analyse. Lässt man die baulichen Unterschiede der WKA außer Acht, lässt sich sagen, dass die Methode zwischen den Verfahren von Pick und Wagner angesiedelt werden kann, da sie wahrscheinlich generell einen höheren Anteil über die IO-Analyse abschätzt als die Materialbilanzanalyse.

¹³⁰ vgl. Weber, Ch.: Untersuchung zum KEA..., a.a.O., Seite 186

7.7 Recycling der Anlagen

7.7.1 Derzeitige Situation und Möglichkeiten

Bei einem steigenden Beitrag der Windenergie zur Energieversorgung wird in Zukunft die Anzahl der WKA weiterhin zunehmen. Nur sehr wenige WKA haben bis jetzt die kalkulatorische Lebenszeit von 20-25 Jahren erreicht. Mit größeren Außerbetriebnahmen von Windkraftanlagen kann aber schon in ca. 5-10 Jahren (bezogen auf das Jahr 2004) gerechnet werden¹³¹. Bei einer theoretisch fünfprozentigen Stromversorgung Deutschlands wären dies nach Angaben Kleemanns rund 1000 Anlagen der 500/600 kW Klasse. Diese Zahl gilt nur zur Veranschaulichung, da derartige Angaben von vielen Parametern abhängig sind und deswegen nicht genau vorhergesagt werden können. Vereinzelt werden bereits durch eine verbesserte Wirtschaftlichkeit der neuen Anlagen alte Anlagen frühzeitig abgebaut (Repowering) oder müssen Ersatzteile verschiedener Komponenten erneuert werden. Vorstellbar wäre auch ein Verkauf der Altanlagen nach Übersee oder in Länder der Dritten Welt. Solche Anlagen müssen aber noch funktionsfähig sein, sonst würde sich der Abbau und der weite Transport, verbunden mit dem Risiko einer überholten Gebrauchtanlage, nicht rechnen.

Daher macht man sich schon heute Gedanken über ein mögliches Recycling der ausgedienten Windenergiekonverter. Praktische Erfahrungen liegen aber bis auf das Wiederverwerten oder Deponieren der ausgetauschten Ersatzteile während der Nutzungsphase fast nicht vor. Es steht jedoch fest, dass sich Windkraftanlagen durch eine große Bandbreite zu recycelnder Stoffe aus den Bereichen Bauwesen, Maschinenwesen, Kunststofftechnik und Elektrotechnik auszeichnen. Auch das Recycling selbst stellt keine großen Anforderungen an spezielle Techniken und Verfahren, da auf bestehende Wiederverwertungsstrukturen zurückgegriffen werden kann. Bis auf die Rotorblätter, die aus Verbundmaterialien bestehen, können nahezu alle Stoffe vollständig wieder den verschiedenen Stoffkreisläufen zugeführt werden (siehe Tabelle 7-2)

¹³¹ vgl. Kleemann, M., van Erp, F., Kehrbaum, R.: Windenergieanlagen - Nutzung, Akzeptanz und Entsorgung, Forschungszentrum Jülich 1998, Seite 40

Tabelle 7-2 Entsorgungsmöglichkeiten von Windkraftanlagen¹³²

	Wieder-/Weiterverwertung von Werkstoffen	Verbrennung	Deponierung
Rotorblätter GFK-UP GFK-EP	GFK als Füllstoff für Kunststoffe, z.B. SMC, BMC, PA, PP Harze als Reduktionsmittel im Stahlwerk und GF als Schlacke im Zementwerk Harz als Brennstoff und GF als Zementzusatz im Zementwerk		Hausmüll
Fundament	Stahl im Stahlwerk Kupfer in der Sekundärhütte Beton als Zuschlagsstoff für neuen Beton oder Starßenuntergrund		Bauschutt
Turm Stahlrohr Schleuderbeton Stahlgitter	Stahl im Stahlwerk Beton als Zuschlagsstoff für neuen Beton oder Starßenuntergrund		
Generator und Getriebe Asynchron mit Getriebe Synchron ohne Getriebe	Stahl im Stahlwerk legierter Stahl im Edelstahlwerk Zweitrafination des Getriebes zu Getriebeöl	Getriebeöl in MVA/SVA	

7.7.2 Kosten der Entsorgung

Von Seiten des Gesetzgebers wurde bis jetzt noch keine Verpflichtung zum Recycling von Windkraftanlagen im Zuge des Kreislaufwirtschaftsgesetzes erlassen. Deswegen werden bis zum Erlass derartiger Vorschriften in erster Linie die Kosten solcher Maßnahmen den Umfang der Wiederverwertung bestimmen. Vorsichtige Schätzungen einer Umfrage unter Windkraftanlagenherstellern belaufen sich auf ca. 25000 Euro für eine Anlage der 500/600 kW Leistungsklasse¹³³. Hierbei wird von folgender Materialzusammensetzung je kW installierter Leistung ausgegangen: 8 kg GFK, 400 kg Beton, 150 kg unlegierter Stahl, 4 kg legierter Stahl, 8 kg Kupfer und 0,5 kg Ölfüllmenge. Der reine Schrottwert, der zu mehr als der Hälfte durch Kupfer bestimmt ist, würde sich auf ca. 13.500 Euro belaufen. Demgegenüber stehen ungefähr folgende Kosten: GFK Deponierung 2.250 Euro, Altölsorgung 250 Euro, Schwerlastkran 7.500 Euro, Transport 10.000 Euro, Abbruch des Fundaments 11.000 Euro (voluminöses Fundament 20.000 Euro) und Personalkosten 7.500 Euro. Auf diese Weise ergeben sich die anfangs genannten 25.000 Euro Entsorgungskosten. Die Zahlen sind von 1995 und beziehen sich auf eine Anlage mit Getriebe. Daher können heutzutage je nach Anlagentyp durchaus anderer Werte gelten. Dennoch dürfte damit eine grobe Richtung vorgegeben sein.

¹³² entnommen aus Kehrbaum R.: Perspektiven eines Recycling von Windkraftanlagen, DEWI Magazin Nr.7, 1995, Seite 36

¹³³ vgl. Kehrbaum R.: Perspektiven eines Recycling von Windkraftanlagen, DEWI Magazin Nr.7, 1995, Seite 37

7.7.3 Stoffliche und energetische Beurteilung des Recyclings

Neben dem Schrottwert, der im Verhältnis zum Anschaffungswert gering ist, können allerdings auch die Energie- und Stoffgehalte des Recyclingmaterials der Windkraftanlage wieder gutgeschrieben werden. Domrös hat sich hiermit in seiner Arbeit näher beschäftigt und beschreibt vor allem die Möglichkeit einer Wiederverwertung der einzelnen Werkstoffe (Stahl, Guß, Kupfer, Beton) einschließlich Transport¹³⁴. Grundüberlegung von Domrös ist, dass die Energiemengen des Recyclings voll der Windkraftanlage zugerechnet werden. Daher muss man auch berücksichtigen, mit welchen Recyclingmaterialien wieder die selben Qualitäten an Rohstoffen erzeugt werden können, die denen der Primärrohstoffe entsprechen. In Windrädern werden nämlich nur qualitativ hochwertige Materialien eingesetzt. Diesem Umstand soll eine Recyclingquote von 75% Rechnung tragen.

Andere Ansätze zur Bewertung des Recyclings wurden von Kehrbaum vorgestellt¹³⁵. Einige dieser Methoden schreiben die Energie des Recyclings sowohl dem Windrad als auch anderen Produkten, die aus dem wiederaufbereiteten (minderwertigen) Material der Windkraftanlage bestehen, gut. Diese Ansätze spiegeln eher das gewöhnliche Vorgehen in der Praxis wider und werden teilweise auch zur Bilanzierung eingesetzt. Kehrbaum wendet diese Verfahren auf eine WKA der 500/600 kW Leistungsklasse an. Würde man ein Recycling außer Acht lassen, ergäbe sich für die WKA ein KEA von 6.852 GJ. Dabei wurden die Materialmengen der Modell-WKA aus den Materialzusammensetzungen anderer Anlagen bestimmt, d.h. eine spezielle Datenerhebung wurde nicht vorgenommen. Das bedeutet nun, dass diese Werte nicht mit den in der Arbeit vorgestellten Angaben verglichen werden sollten. Sie demonstrieren nur die Unterschiede der Recyclingbewertungsverfahren, deren Ergebnisse der folgenden Tabelle zu entnehmen sind.

¹³⁴ vgl. Domrös, R.: Energetische Amortisationszeit von Windkraftanlagen auf Basis der Prozesskettenanalyse, Diplomarbeit, TU Berlin, Fachgebiet für Energie- und Rohstoffwirtschaft, 1992, Seite 107 ff

¹³⁵ vgl. Kehrbaum, R.: Materialrückführungsprozesse in der Sachbilanz, Dissertation, RWTH Aachen 1997, Seite 9 ff

Tabelle 7-3 Sachbilanzverfahren zur Berücksichtigung von Recyclingprozessen¹³⁶

Verfahren	Substitutionsverfahren							Partitionsverf.	
	Cut-off	Primär Input-substitution	Primär Output-substitution	Cut-off Output-substitution	Halbe Substitution	Anteilige Substitution	Closed-loop	Gesamt Partition	Direkt Partition
KEA _{Ges} der Anlage [GJ]	6.055	6.147	4.418	3.621	5.283	5.419	5.956	13.648	7.074
Unterschied zum KEA ohne Recycling	-12%	-10%	-36%	-47%	-23%	-21%	-13%	+99%	+3%

Laut Kehrbaum, der die Verfahren einem Vergleich unterzogen hat, sollte man sich für die Methode der Halben Substitution entscheiden, da sie sehr einfach durchzuführen ist und praxisnahe Ergebnisse liefert. Es werden nämlich Transportaufwendungen, das Recycling der Stoffe, die bei der Produktion anfallen, und das Recycling am Ende des Lebenszykluses betrachtet. Für die WKA E-66 würde dies eine Reduktion des KEA um 23 Prozent bedeuten. Die Amortisationszeiten würden sich nun zwischen 2,6 (Küste) und 4,8 (Binnenland) Monaten und die Erntefaktoren zwischen jeweils 50 und 90 bewegen.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass ein Einbeziehen des Recyclings der Anlagen aus den genannten Gründen sinnvoll ist und in naher Zukunft wahrscheinlich auch praktiziert wird. Auch hier sind wie bei den Bilanzierungsmethoden verschiedene Verfahren zur Berücksichtigung des Recyclings möglich. Daher sollten beim Vergleich verschiedener Werte und Studien auch die Anrechnungsverfahren des Recyclings näher betrachtet werden, da diese unter Umständen großen Einfluß auf das Ergebnis haben können.

¹³⁶ vgl. Kehrbaum, R.: Materialrückführungsprozesse in der Sachbilanz, a.a.O., Seite 134 (Werte wurden aus den Angaben berechnet)

8 Bilanzierungsvorschläge im Kontext zur aktuellsten Studie

Im folgenden Kapitel soll aus den bisher gewonnenen Erkenntnissen ein kurzes Resümee gezogen und daraus einige Vorschläge zu einer praxisgerechten Ermittlung des kumulierten Energieaufwands bei Windkraftanlagen abgeleitet werden. Diesem Vorgehen sollen schließlich noch die Bilanzierungsmethoden des aktuellsten Verbundforschungsprojekts, das Ökobilanzen über derzeitige Windkraftanlagen und andere regenerative Energien erstellt hat, gegenübergestellt werden.

Hierzu ist anzumerken, dass diese Diplomarbeit ursprünglich auf Daten des Verbundforschungsprojektes aufbauen sollte, da unter anderem von Seiten der WindkraftHersteller und anderen wirtschaftlichen Einrichtungen keine verwertbaren Informationen zu erfahren waren. Herr Briem vom IER Stuttgart, der das Forschungsprojekt leitete, aber keinen genauen Zeitpunkt über die Veröffentlichung erster Daten nennen, da diese noch geprüft werden mussten. Zuerst hieß es Mitte Januar 2004. Dieser Termin konnte allerdings nicht eingehalten werden, so dass mit den Ergebnissen der Studie nicht mehr gerechnet habe. Daher musste der Aufbau der Arbeit nach früheren Studien gestaltet werden. Am 15. März 2004 waren jedoch erste Veröffentlichungen im Internet zu finden, darunter auch die der Windkraft. Dieser Umstand erwies sich dennoch im Nachhinein nicht unbedingt als Nachteil, weil durch den direkten Vergleich alter und neuer Studien so manche Überraschung ans Tageslicht kam.

8.1 Vorschläge zur Bilanzierung von WKA

8.1.1 Einheitliche Grundstoffdaten

Die VDI-Richtlinie 4600, die EN ISO Norm 14041 ff und weitere Bilanzierungsgrundsätze zur Verbesserung des methodischen Vorgehens erschweren es, einen gemeinsamen Nenner bei der Bilanzierung zu finden. Wie aus Kapitel 7.2.2 ersichtlich wurde, können durchaus für Grundstoffdaten verschiedene Zahlenwerte angegeben werden. Die einzelnen Werte können dabei nicht als falsch oder richtig angesehen werden, sondern spiegeln nur die Berechnungsvorschrift und die Berechnungsmethode wider, die teilweise durch die

Richtlinie und die EN ISO Norm vorgegeben werden. Dabei können sogar innerhalb einer Vorschrift unterschiedliche Vorgehensweisen richtig sein (z.B. Anrechnung des Recyclings, Bewertung von Kuppelprodukten, Bewertung regenerativer Energien – 100% Regel, Bilanzraum etc.). Vor allem aber die Berechnungsmethodik (PKA, IOA, MBA, Hybrid-Ansatz) hat wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis.

Daher ist es für die Praxis wünschenswert standardisierte Verfahren zu entwickeln, die es ermöglichen, Energie- und Stoffströme sowie deren Auswirkungen auf die Natur und den Menschen zu vergleichen. Vor allem wissenschaftliche Einrichtungen sind hierzu verpflichtet durch interdisziplinäre Zusammenarbeit, sowohl auf nationaler und internationaler Ebene, Projekte voranzutreiben, die das derzeitige „Bilanzierungswirrwarr“ entflechten. Oft entsteht der Eindruck, dass jedes Forschungsinstitut bis jetzt seine eigene „Suppe gekocht hat“, was unter anderem auch auf den Erhalt beträchtlicher Forschungsgelder von Landes- oder Bundesebene zurückzuführen ist. Alleine zur Bilanzierung von Stromerzeugungstechniken sind zur Zeit drei Studien bekannt, die zum Teil verschieden sind und im Zuge derer auch viele Grundstoffdaten ermittelt wurden. Dies wären zum einen die schon vorgestellten GABIE und GEMIS und zum anderen die Studie „Ökoinventare für Energiesysteme“ der ETH Zürich¹³⁷. Weiterhin können durch den Vertrieb profitabler Ökobilanzsoftware, die auch aus den Forschungsgeldern finanziert wurde, Gewinne für das Institut oder für mit diesem in Verbindung stehende Personen erzielt werden. Solche Umstände erschweren natürlich eine engere Zusammenarbeit.

Dennoch haben sich im Projekt „Lebenszyklusanalyse ausgewählter zukünftiger Stromerzeugungstechniken“ das LEE Bochum, das IER Stuttgart, das FFE München, das DLR und die Forschungsanstalt Jülich mit einigen europäischen Instituten zusammengetan, um auf diesem Gebiet eine standardisierte Datenbasis zu entwickeln¹³⁸. Dieses Verbundprojekt hat somit Modellcharakter und soll einen Anstoß für notwendige weitere Vorhaben in der Zukunft geben. In der Betriebswirtschaft wurden schließlich auch Bilanzierungsstandards eingeführt (HGB, US-GAAP usw.), um Unternehmen weltweit transparenter zu machen. Deswegen stellt sich die Frage, warum das nicht auch im Energiebereich erreicht werden kann.

¹³⁷ vgl. Marheineke, T.: Lebenszyklusanalyse fossiler, nuklearer und regenerativer Stromerzeugungstechniken, Dissertation, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Stuttgart 2002, Seite 4

¹³⁸ Gespräch mit Herrn Briem, Mitarbeiter des IER Stuttgart, 11. Dezember 2003

Mit einheitlich ermittelten und vergleichbaren Grundstoffdaten, wäre für den nachfolgenden Bilanzierungsprozess daher ein großer Schritt getan, da die erste Fehlerquelle entschärft wäre. Die Genauigkeit des Ergebnisses würde sich folglich mehr an der Bilanzierungsmethode des ausgewählten Objekts orientieren.

8.1.2 Kombination von Prozessketten-, Hybrid- und Materialbilanzen-Analyse

Eine Windkraftanlage eignet sich ganz gut für eine Bilanzierung. Das resultiert vor allem daraus, dass ein ziemlich großer Anteil der Bauteile, die am Energieaufwand maßgeblich beteiligt sind, aus Betrieben mit durchschaubarer Fertigung im Kleinserienmaßstab stammen. Daher kann eine Kombination aus Materialbilanzen- und Prozesskettenanalyse grundsätzlich bei vielen Bauteilen angewandt werden. Die IO-Analyse soll dagegen, gemäß Hybrid-Ansatz, nur zum Abschätzen schwer bilanzierbarer Teile und zur Berücksichtigung der Wirtschaftsgebäude und Maschinen benutzt werden.

8.1.2.1 Stahlurm

Die Herstellung des Stahlturms wird normalerweise von Zulieferern übernommen, die sich hierauf spezialisiert haben. Im Grunde besteht der Turm aus Stahlplatten, die mit Hilfe einer Presse gebogen und am Ende zusammengeschweißt werden (vgl. Anhang). So entsteht ein Rohrstück des Turms. Durch Zusammenschweißen und verstreben der einzelnen Rohrstücke zu transportierbaren Einheiten, die wiederum mit speziellen Flanschen miteinander verschraubt werden können, wird es ermöglicht den Turm am Aufstellungsort einfach zu errichten. Neben dem notwendigen Lack und den Materialien für Kleinteile (Leitern, Schrauben, Halterungen usw.) dürfte der Materialaufwand damit beschrieben sein.

Der Herstellungsprozess gestaltet sich daher eher „einfach“. Somit sollte es auch möglich sein, anhand von Stücklisten und unternehmensinternen Aufzeichnungen, die eingesetzten Materialien (Stahl, Schweißdraht, Lack, Kleinteile usw.) und den Verschnitt ziemlich genau zu bilanzieren. Die Fertigungs- und Montageenergien könnten dabei über einen geeigneten Schlüssel anhand der Jahresenergieabrechnung auf das Produkt aufgeschlagen werden. Andererseits könnte man auch mit Hilfe des BAB und der innerbetrieblichen Leistungsverrechnung auf eventuelle Materialzusammensetzungen, Energien sowie Hilfs- und

Betriebsstoffe schließen. Transportaufwendungen, Gebäude- und Maschineneinsatz ließen sich anhand von Erfahrungswerten grob abschätzen, da eine Bilanzierung zu aufwendig wäre. Aber auch deren Ermittlung nach dem Hybrid-Ansatz wäre hier sehr gut denkbar.

8.1.2.2 Generator

Laut Pick und Wagner wird der Generator bei Enercon selbst montiert¹³⁹. Somit ist für die Bilanzierung des Generators ein guter Grundstein gelegt. Dieser besteht wie in Kapitel 6.2.2.2 beschrieben zu 98 Prozent aus Materialien wie Stahlguß für den Stator und Elektroblech sowie Kupfer für den Rotor und stammen alle von Zulieferern. Der Achszapfen allerdings, auf dem sich der Rotor dreht, wird der Baugruppe restliche Gondel zugeordnet. Diese 98 Prozent ließen sich daher schon ziemlich genau bilanzieren, besonders da bei den Elektroblechen geringe Stanzverluste anfallen und Stahlguß in einer Form ohne viel Verluste gegossen wird. Auch bräuchte man nicht unbedingt auf die Fertigungszuschlagssätze der IO-Analyse zurückgreifen, sondern könnte sehr wohl betriebspezifische ermitteln. Dazu ist aber die Herstellung des Stators und der Elektrobleche genauer zu betrachten.

Der Montageaufwand bei Enercon selber wird dagegen mit der Jahresenergiebilanz auf die Produkte aufgeschlagen. Da der Stator von Hand gewickelt und normalerweise kein Verschnitt angenommen wird, fallen hier keine großen Energiemengen an (siehe Anhang). Nur das Tränken der Wicklungen mit speziellem Harz ist zu erwähnen, das aber in der Energiebilanz enthalten ist. Statt der Aufteilung über den Massenschlüssel könnten hier Messungen durchgeführt oder wenn möglich, Erfahrungswerte aus der Kostenrechnung herangezogen werden. Restliche Kleinteile könnte man wiederum über die IO-Analyse ermitteln.

Somit stellt der Generator neben dem Turm ein weiteres Bauteil dar, das eigentlich gut zu bilanzieren ist. Problematischer wird es allerdings bei Windkraftanlagen mit anderen Antriebskonzepten, wie z.B. mit Getriebe und Asynchrongenerator, die vollständig bei Zulieferern gefertigt werden. Hier wäre der Bilanzierungsaufwand ohne IO-Fertigungszuschlagssätze schon wesentlich höher.

¹³⁹ vgl. Pick, E., Wagner, H.-J.: Beitrag zum kumulierten Energieaufwand ausgewählter Windenergiekonverter, Arbeitsbericht des Instituts für ökologisch verträgliche Energiewirtschaft, Universität Essen 1998, Seite 24

8.1.2.3 Restliche Gondel und Netzanbindung

Diese beiden Baugruppen stellen die größten Schwierigkeiten bei der Bilanzierung dar, da sie, wie in Kapitel 6.2.2.3 und 6.2.2.5 beschrieben, alle recht unterschiedliche Bauteile enthalten. Denkbar wäre hier eine differenziertere Aufteilung. Dies würde das Problem aber nicht beseitigen, da die Teile trotzdem bilanziert werden müssten, egal in welcher Baugruppe sie sich befänden.

Vor allem die in der Gondel enthaltenen Bauteile, wie der Achszapfen bzw. Triebstrang, die Großlager, die Gondelträgerkonstruktion, die Blattadapter, der Drehkranz und die Gondelverkleidung, könnten über die Materialbilanzen-Methode mit betriebsspezifischen Fertigungssätzen bilanziert werden, wofür aber wiederum umfassende Recherchen bei den Zulieferern nötig wären. Schwieriger gestaltet sich dies schon bei der Elektronik und den Motoren für die Azimutverstellung. Entweder man schätzt diesen Teil komplett über die IO-Analyse oder man wählt die Methode von Pick und Wagner mit den IO-Fertigungszuschlagssätzen.

Die Baugruppe Netzanbindung umfasst ebenfalls sehr viele verschiedene Materialien. Leicht zu bilanzieren lassen sich hier vor allem die Kupferleitungen, deren Anteil am KEA der Baugruppe ca. 41 Prozent beträgt. Auch die Energieaufwendungen für das Transformatorhaus und dessen Fundament können ohne große Probleme genau erfasst werden. Die Bilanzierung des Trafos, der Schaltanlagen und der Steuerelektronik müsste man beim Zulieferer vornehmen. Dies könnte Schwierigkeiten bereiten, da es sich hier um komplexe Produkte handelt. Eine Bilanzierung rein über die IO-Analyse wäre zu ungenau, daher könnte man den Kompromiss der IO-Fertigungszuschlagssätze anwenden.

8.1.2.4 Schlußfolgerung

Das Fundament und die restlichen Aufwendungen für Transport, Montage und Wartung, sollen nicht weiter betrachtet werden, da diese erstens einen geringen Anteil am KEA aufweisen und weiterhin nur auf Annahmen und Erfahrungswerten beruhen. Dies wurde aber von Pick und Wagner befriedigend gelöst.

Wie man am Rechenbeispiel gut erkennt ist es sehr wichtig, die Menge der Rohmaterialien und deren Fertigungszuschläge genau zu bilanzieren, da die Herstellung der Bauteile mit ca. 93 Prozent wesentlich am KEA der Windkraftanlage beteiligt ist. Deswegen sollte man bei der Bilanzierung der Zulieferteile bis hin zum

Rohstoff nicht auf pauschale Annahmen setzen. Durch eine Kombination der zur Verfügung stehenden Methoden lassen sich, wie oben ansatzweise beschrieben, mögliche grobe Fehler ausschließen. Einziges Hindernis ist allerdings ein höherer Arbeitsaufwand und die Voraussetzung, dass die Herstellerbetriebe auch bereit sind, Unternehmensinterna für derartige Zwecke bereitzustellen.

Computerprogramme wie Umberto, um nochmals auf Kapitel fünf zurückzukommen, können grundsätzlich bei der Bilanzierung große Hilfen sein. Es ist auch möglich mittels Programm den kumulierten Energieaufwand eines Windrades berechnen zu lassen. Allerdings müssen dafür erst alle notwendigen Inputdaten vorliegen, ohne die das Programm keine brauchbaren Ergebnisse liefert. Deswegen soll an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen werden, dass eine ordentliche Analyse des Lebenszykluses eines Produktes nur in der Praxis vorgenommen werden kann. Datenbanken und Programme ermöglichen zwar eine vielfältige Kombination aller Werte bzw. eine Simulation unterschiedlicher Prozesse und Szenarien, doch hängt deren Ergebnis zwangsläufig von der Qualität der in der Praxis bilanzierten Größen ab. Darüber sollte man sich unter anderem beim betrieblichen Einsatz so genannter Ökobilanzsoftware bewusst sein.

8.2 Das Verbundprojekt

Im Verbundprojekt wurden neben anderen Systemen der Stromerzeugung, wie z.B. Biomasse, Photovoltaik, Kernkraft, vier gängige Windkraftanlagen bilanziert¹⁴⁰. Darunter fallen eine Vestas V44 mit 600 kW, eine Enercon E-66 mit 1500 kW, eine Modellwindkraftanlage mit 2500 kW und eine Enercon E-112 mit 4500 kW.

Die Bilanzierung der Anlagen wurde nach den Grundsätzen der EN ISO 14040 ff vollzogen und deren Resultate, wie bei Hartmann, als Sachbilanzgrößen ausgewiesen (Emissionen, Ressourcenverbrauch). Größen wie der kumulierte Energieaufwand und energetische Kennzahlen spielen bei dieser Betrachtung eine weniger große Rolle. Leider waren die Angaben der Ressourcenverbräuche von Steinkohle, Braunkohle, Erdöl, Erdgas und Uranerz alle in kg/kWh angegeben. Geeignete Umrechnungsfaktoren der kg-Werte in MJ-Werte konnten nicht gefunden werden. In der Literatur sind zwar viele Angaben über Energieumrechnungsfaktoren

¹⁴⁰ vgl. Wind turbine readme, Datum 15. März 2004

zu erfahren, allerdings weisen diese eine große Schwankungsbreite auf. Deshalb wurde im Gegensatz zur Studie von Hartmann darauf verzichtet, die kumulierten Energieaufwendungen, AZ und EF der Anlagen auszurechnen, da die Ergebnisse unter Umständen falsch gewesen wären.

8.2.1 Vorgehen bei der Bilanzierung

Weiterhin werden KEA, AZ und EF im Vergleich zu früheren Studien wahrscheinlich nicht viel abweichen, da die Autoren des Projekts keine wesentlich neuen Datenerhebungen durchgeführt haben¹⁴¹. Die Bilanzierung der Enercon Anlage wurde 1:1 dem Bericht von Pick und Wagner entnommen. Auch die Daten der Vestas Anlage, die noch dazu sehr annahmenlastig sind, stammen aus der Literatur. Die 2500 kW Anlage wurde aus Bauteilen einer Nordex N80 und aus Teilen, die der Literatur zu entnehmen sind, zusammengesetzt. Da die E-112 noch eine Pilotanlage ist, wurden die Werte der E-66, außer die des Turms, einfach hoch skaliert. Betrachtet man nun in Tabelle 8-1 die einzelnen Bauteile und Rohmaterialzusammensetzungen, wird man feststellen, dass beträchtliche Unterschiede im Bezug auf die Qualität der Datenerhebung zwischen den Anlagen bestehen. Die Werte sind aus dem Final Report des Verbundprojektes zusammengestellt.

Zur Pilotanlage E-112 ist hinzuzufügen, dass sie ca. neun mal so schwer ist wie ihre „kleine Schwester“, die E-66. Da die E-112 aber nur das dreifache an Leistung bringt, könnte man leicht annehmen, dass diese Anlage energetisch gesehen schlecht abschneidet. Betrachtet man jedoch die Materialinputs genauer, lässt sich feststellen, dass die Anlage alleine aus 7.436 t Beton besteht. Das sind immerhin ca. 90 Prozent am Gesamtgewicht. Da Beton aber einen sehr geringen KEA-Wert hat, gleicht sich die Energiebilanz im Verhältnis zur E-66 wieder an oder ist sogar geringfügig besser. Anlagen mit Betontürmen haben nämlich grundsätzlich niedrigere KEA-Werte als solche mit Stahltürmen.

¹⁴¹ vgl. Chataignere, A., Le Boulch, D.: Wind turbine systems, Final Report, Verbundprojekt Eclipse 2003, Seite 16 ff

Tabelle 8-1 Rohmaterialzusammensetzungen der Anlagen in kg

Bauteile	Materialien	Vestas V44 600 kW	Enercon E-66 1500 kW	Modellanlage 2500 kW	Enercon E-112 4500 kW
Blatt (1Stück)	Glasfasern	1.917	2.188	9.200	8.128
	EP-Harz		1.516		5.632
	Härter		525		1.950
	Aluminium	-	33	-	122
	Polyamid	-	76	-	282
	Polyethylen	-	228	-	847
	PVC-Hartschaum	-	279	-	1.036
	PVC	-	131	-	487
	Lack	-	184	-	684
	Gummi	-	55	-	204
	Sonstige	-	169	-	628
		1.917	5.384	9.200	20.000
3 Stück:		5.751	16.152	27.600	60.000
Gondel und Generator	Aluminium	1.850	127	8.820	605
	Kupfer	1.000	9.281	7.690	44.252
	Gußeisen	-	21.027	38.000	100.258
	Stahlguß	-	3.708	-	17.680
	Elektroblech	-	17.927	-	85.477
	Stahl (unlegiert)	18.850	24.038	66.400	114.614
	Stahl (nied. legiert)	-	9.101	-	43.394
	Stahl (nied. leg., verz.)	-	1.329	-	6.337
	Stahl (hoch leg.)	-	14	-	67
	Lack	-	654	-	3.118
	Glasfasern	750	924	2.820	4.406
	UP-Harz		2.159		10.294
	Elektronik	-	120	-	572
	HDPE	50	-	-	-
	Sonstige	-	1.872	-	8.926
		22.500	90.409	123.730	440.000
Turm	Lack	250	4.217	539	2.411
	Beton	-	-	-	5.900.000
	Stahl (unlegiert)	37.000	144.182	130.000	-
	Stahl (unleg., verz.)	-	4.695	-	369.000
	Stahl (hoch leg.)	-	-	1.797	-
		37.250	153.094	130.539	6.271.411
Netzanbindung	Stahl (unleg., verz.)	3.279	715	1.192	2.145
	Stahl (nied. legiert)	-	-	1.545	-
	Stahl (nied. leg., verz.)	-	927	-	2.781
	Stahl (hoch leg.)	-	-	1.050	-
	Stahl (hoch leg., verz.)	-	630	-	1.890
	Elektroblech	-	1.300	2.167	3.900
	Baustahl	-	741	1.235	2.223
	Eisen	-	1.042	1.737	3.126
	Kupfer	-	6.119	10.199	18.357
	PVC	-	747	1.245	2.241
	Getriebeöl	-	940	1.567	2.820
	Elektrik	-	1.065	1.775	3.195
	Elektronik	-	1.283	2.138	3.849
	Leichtbeton	-	12.000	20.000	36.000
	Sonstige	-	225	375	675
		3.279	27.509	45.850	83.202
Fundament (tiefgründig, onshore)	Baustahl	4.735	26.300	43.833	-
	Stahl (unlegiert)	-	13.243	22.072	-
	Beton	43.230	575.000	958.333	1.500.000
	PVC	-	165	277	-
		47.965	614.708	1.024.515	1.500.000
Gesamtgewicht:		116.745	901.872	1.352.234	8.354.613

Anhand der Tabelle und der obigen Angaben ist deutlich zu erkennen, dass auch die aktuellste Studie von 2003 keine wesentliche Verbesserung gegenüber früheren Arbeiten darstellt. Die Materialzusammensetzungen der Anlagen von Vestas, Enercon und der Modellanlage basieren nämlich genau auf diesen „veralteten“ Werten. Außerdem ist die Genauigkeit der Materialzusammensetzung der Vestas- und der Modellanlage wesentlich schlechter recherchiert als die der Enercon. Auch von der kleinen E-66 auf die Materialzusammensetzung der E-112 zu schließen, entspricht sicher nicht der Realität. Unklar ist außerdem, wie die Fertigungszuschläge bei den Enercon Anlagen verrechnet wurden. Dies konnte man dem Bericht nicht entnehmen. Fertigungszuschläge bei der Vestas- und der Modellanlage wurden der Literatur entnommen. Dagegen wurden alle weiteren Aufwendungen für Montage, Transport, Errichtung, Wartung und teilweise Recycling ähnlich wie bei Pick und Wagner berücksichtigt und stellen akzeptable Werte dar.

Gerade am Beispiel der Enercon E-66 und der in dieser Diplomarbeit diskutierten Punkte und Verbesserungsvorschläge wird klar, wie in der Praxis bei der Bilanzierung überwiegend vorgegangen wird. Viele Punkte werden aus Vereinfachungsgründen angenommen oder aufgrund fehlender Daten nicht miteinbezogen. Es muss jedoch angemerkt werden, dass das Hauptziel des Projektes eher ein einheitliches Vorgehen beim Bilanzieren zwischen den verschiedenen Stromerzeugungstechniken war, d.h. gleiche Bilanzierungsmethoden, Bilanzgrenzen, Grundstoffdaten usw.. Darunter sollte aber nicht die Qualität des einzelnen Ergebnisses leiden, wie es in dieser Studie zumindest bei der Windkraft der Fall ist.

8.2.2 Onshore- und Offshore-Anlagen

Das Thema Ausbau der Windenergie vor der Küste hat in den vergangenen Jahren sowohl national als auch international deutliche Konturen angenommen¹⁴². Neben der Kostensenkung aufgrund des hohen Windangebots auf See geht es vor allem darum, die Windenergie aus ökologischen Gründen und aus Gründen der Akzeptanz an geeigneten Standorten weiter auszubauen. Offshore-Windparks bieten dazu beträchtliche Potentiale. Je nachdem, welche Entfernung zur Küste bzw. welche

¹⁴² vgl. Staiß, F.: Jahrbuch Erneuerbare Energien 02/03, (Hrsg.): Stiftung Energieforschung Baden-Württemberg, Radebeul – Bieberstein 2003, Seite 81 ff

Wassertiefen als erschließbar angesetzt werden, beläuft sich das nutzbare Potential auf ca. die Hälfte des gegenwärtigen Stromverbrauchs in Deutschland.

Im Verbundprojekt Eclipse hat man deswegen die 2,5 MW Anlage sowohl als Onshore- als auch als Offshore-Anlage bilanziert. Bei der Onshore-Anlage wurde ein tiefgründiges Fundament angenommen. Die Materialzusammensetzungen des Fundaments lehnen sich dabei an die Angaben von Pick und Wagner an. Für die Offshore-Anlage wurden drei verschiedene Fundamente angenommen (siehe Abbildung 6-5). Dies wäre zum einen ein Gewichtsfundament (Senkkasten), das mit Kies gefüllt ist und so dem Windrad Stand verleiht. Die anderen beiden Fundamente bestehen aus einem Einpfahl- oder Dreibeinfundament, das im Boden verankert ist und auf das der Turm geflanscht wird. Bei der Netzanbindung werden zwei Varianten unterschieden: 25 km und 100 km Entfernung zur Küste.

Im Folgenden werden die verschiedenen Fundamentvarianten mit Hilfe der Angaben aus der Studie einer groben energetischen Betrachtung unterzogen, um die Vorteilhaftigkeit der Offshore-Standorte beurteilen zu können.

Da einerseits von den Autoren der Studie keine verwertbaren Angaben über Fertigungsenergieaufwendungen und Transportaufwendungen gemacht wurden und aus den vorhergehenden Kapiteln bekannt ist, dass die Mengen der Rohmaterialien einen Großteil am KEA_{Ges} beitragen, wurden nur diese in die Betrachtung miteinbezogen. Die Rohmaterialmengen waren dem Bericht des Verbundforschungsprojektes zu entnehmen. Probleme gab es bei der Netzanbindung, die nur für Onshore-Anlagen bilanziert wurde und Bauteile wie die Turmverkabelung und den Transformator enthält. Man kann jedoch davon ausgehen, dass auch Offshore-Anlagen einen Transformator und die Turmverkabelung benötigen, um den Strom am Meeresgrund in das Netzkabel einzuspeisen. Deswegen wurden bei den Offshore Anlagen dieselbe Netzanbindung wie bei den Onshore-Anlagen angenommen. Keine Berücksichtigung fanden jedoch bei den Offshore-Anlagen die Materialien (Beton, Baustahl) für das Trafohaus, das für Anlagen an Land nötig ist. Die KEA-Werte der Rohmaterialien wurden dem Bericht von Pick und Wagner entnommen, da in der Studie des Verbundprojektes keine Angaben darüber vorhanden sind. Nur der KEA-Wert für Kies stammt aus GABIE, Teil II: Baustoffe.

In Tabelle 8-2 sind alle Rohmaterialmengen der Anlagen und der jeweilige KEA aufgeführt. Für die Offshore-Anlagen wurden für die 25 km Distanz und die 100 km Distanz zur Küste zwei verschiedene KEA-Gesamtwerte berechnet. Für die Onshore-Anlage dagegen wurde nur ein Wert ausgewiesen.

Tabelle 8-2 KEA-von Onshore und Offshore-Fundamenten und Netzanbindung¹⁴³

Materialien	Onshore	KEA [MJ/kg]	Offshore Senkkasten	KEA [MJ/kg]	Offshore Einpfahl	KEA [MJ/kg]	Offshore Dreibein	KEA [MJ/kg]
Fundament								
Baustahl	43.833	1.319.373	200.000	6.020.000	0	0	0	0
Stahl, unlegiert	22.072	406.125	6.675	122.820	9.856	181.350	9.835	180.964
Stahl (unleg., verz.)	0	0	136.000	3.114.400	399.000	9.137.100	120.000	2.748.000
Stahl (nied., leg.)	0	0	0	0	0	0	0	0
Stahl (hoch legiert)	0	0	2.229	93.618	5.970	250.740	1.091	45.822
Beton	958.333	670.833	2.700.000	1.890.000	0	0	0	0
PVC	277	1.884	0	0	0	0	0	0
Schotter	0	0	11.300.000	497.200	0	0	0	0
		2.398.215		11.738.038		9.569.190		2.974.786
Netzanbindung								
Baustahl	1.235	37.174	0	0	0	0	0	0
Stahl, unlegiert	1.737	31.961	1.737	31.961	1.737	31.961	1.737	31.961
Stahl (unleg., verz.)	1.192	27.297	1.192	27.297	1.192	27.297	1.192	27.297
Stahl (nied., leg.)	1.545	47.895	1.545	47.895	1.545	47.895	1.545	47.895
Stahl (hoch legiert)	1.050	44.100	1.050	44.100	1.050	44.100	1.050	44.100
Elektroblech	2.167	177.694	2.167	177.694	2.167	177.694	2.167	177.694
Kupfer	10.199	971.965	10.199	971.965	10.199	971.965	10.199	971.965
PVC	1.245	83.166	1.245	83.166	1.245	83.166	1.245	83.166
Öl	1.567	61.740	1.567	61.740	1.567	61.740	1.567	61.740
Elektronik	2.138	502.430	2.138	502.430	2.138	502.430	2.138	502.430
restl. Elektrik	1775	177.500	1775	177.500	1775	177.500	1775	177.500
Leichtbeton	20000	46.000	0	0	0	0	0	0
Sonstige	375	49.500	375	49.500	375	49.500	375	49.500
		2.258.421		2.175.247		2.175.247		2.175.247
Offshore 25 km								
Stahl, unlegiert	-	-	220000	4.048.000	220000	4.048.000	220000	4.048.000
Kupfer	-	-	160920	16.381.656	160920	16.381.656	160920	16.381.656
				20.429.656		20.429.656		20.429.656
Offshore 100 km								
Stahl, unlegiert	-	-	440000	8.096.000	440000	8.096.000	440000	8.096.000
Kupfer	-	-	1130000	115.034.000	1130000	115.034.000	1130000	115.034.000
				123.130.000		123.130.000		123.130.000
KEA _{Ges}	-	4.656.635	-	-	-	-	-	-
KEA _{Ges} 25 km	-	-	-	34.342.941	-	32.174.094	-	25.579.689
KEA _{Ges} 100 km	-	-	-	137.043.285	-	134.874.438	-	128.280.033

¹⁴³ zusammengestellt aus: Chataignere, A., Le Boulch, D.: Wind turbine systems, Final Report, Verbundprojekt Eclipse 2003, Seite 33-34

Aus der Tabelle wird ersichtlich, dass Offshore-Fundamente und die dazugehörige Netzanbindung bis zu 30-mal mehr Energie in Form von Rohmaterialien enthalten, als Onshore-Fundamente. Das aufwendigere Offshore-Fundament trägt dazu allerdings einen geringen Anteil bei.

Ausschlaggebend für den KEA der Offshore-Anlage ist die Länge des Kabels, welches wiederum von der Entfernung des Standortes zur Küste abhängt und der Mehraufwand an Stahl. Aus der Studie wird nicht ersichtlich, aus welchen Gründen die 100 km Version doppelt so viel Stahl benötigt wie die 25 km Version. Ein möglicher Erklärungsansatz wäre, dass wegen der zunehmenden Wassertiefe die Türme bzw. Trägerkonstruktionen größer ausgelegt werden müssen. Diese sind aber aus methodischen Gründen dem Fundament zuzurechnen. Da diese Tatsache nur eine Vermutung ist, bleibt sie aber in der weiteren Arbeit unberücksichtigt.

Bei der 100 km Distanz errechnet sich somit für Kabel (inkl. Isolierung) und Stahl ein Wert von ca. 1.231 GJ pro Kilometer. Das ist fast ein Zehntel des gesamten kumulierten Energieaufwands der E-66. Diese Angaben enthalten aber noch keine Fertigungs-, Montage und Transportaufwendungen. So dürften die Energieaufwendungen noch einmal um ca. 15-20 Prozent (Schätzwert) ansteigen. Folgendes Diagramm soll das Verhältnis der Energieaufwendungen für die Rohmaterialien des Fundaments und der Netzanbindung bei Onshore- bzw. Offshore-Anlagen nochmals verdeutlichen.

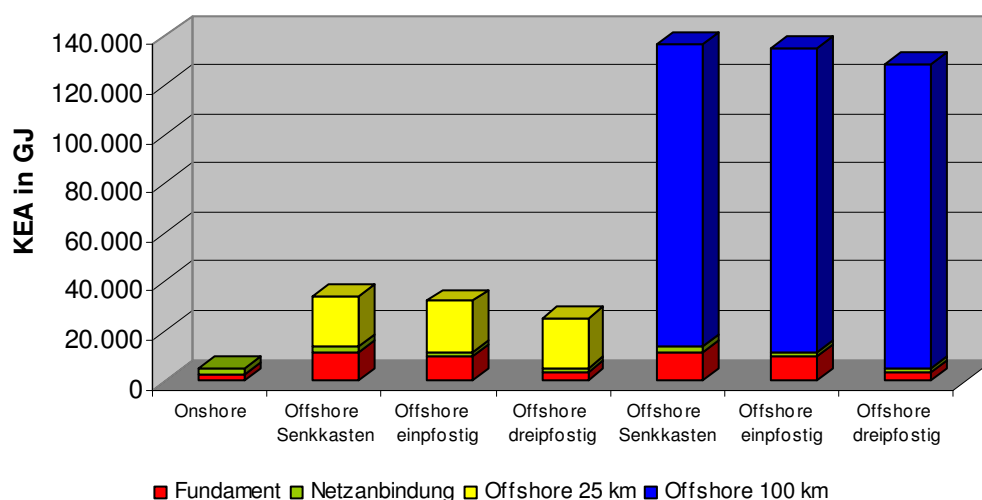


Abbildung 8-1 KEA von Onshore- und Offshore-Fundamenten und Netzanbind.

Bei einem zugrundegelegten Stromertrag von 9,7 GWh/a¹⁴⁴ würde sich eine Amortisationszeit von ca. 1,3 Jahren für die Variante „Offshore, Senkkasten, 100 km bis zur Küste“ ergeben. Dagegen würde sich die Variante „Senkkasten, 25 km bis zur Küste“ schon in ca. vier Monaten und das Onshore-Fundament in ca. 27 Tagen amortisieren. Hierbei wurde ein um 40 Prozent niedrigerer Stromertrag als bei den Offshore-Anlagen angesetzt. Würde man noch 15 Prozent Energieaufwendungen für Fertigung, Transport und Montage einrechnen, würde sich die Amortisationszeit bei der Variante „Senkkasten, 100 km bis zur Küste“ auf ca. 1,5 Jahre erhöhen. Es wird also deutlich, dass bei Offshore-Anlagen die Länge des Kabels vom Standort zur Küste zum Großteil verantwortlich für den Gesamt-KEA der Anlage ist. Dies deckt sich auch mit den Aussagen einer Studie des Deutschen Windenergie Instituts¹⁴⁵. Hier werden ca. 60 Prozent mehr Investitionskosten für Offshore-Anlagen als für Anlagen auf dem Festland veranschlagt, wobei das Kabel einen Großteil der Kosten verursacht.

8.2.3 Darstellung der Ergebnisse

Die Darstellung der Bilanzergebnisse erfolgt, wie schon erwähnt, nach den Vorgaben der Lebenszyklusanalyse, unterteilt in die verschiedenen Wirkkategorien und Rohstoffe. Für den Leihen sind diese Zahlen allerdings nur schwer zu interpretieren. Daher sind die Informationen, die im Internet veröffentlicht sind, nur einem kleinen Fachpublikum nützlich. Einfache Kennzahlen und Zahlen, unter denen sich jeder etwas vorstellen könnte, fehlen (vgl. Abbildung 8-2).

Flow	Units	Enercon 1500kW, onshore, maintmax, deep foundations			
		Building	Operation	End of Life	
(r) Argon (Ar)	kg	-1,79E-19	-1,46E-19	-3,35E-20	0,00E+00
(r) Barium Sulphate (BaSO ₄ , in ground)	kg	2,01E-06	1,68E-06	1,91E-07	1,34E-07
(r) Basalt (in ground)	kg	7,63E-18	6,20E-18	1,43E-18	0,00E+00
(r) Chromium (Cr, ore)	kg	3,63E-06	3,51E-06	1,09E-07	4,90E-09
(r) Clay (in ground)	kg	2,69E-04	2,68E-04	1,95E-07	7,57E-07
(r) Coal (in ground)	kg	2,92E-03	2,69E-03	1,83E-04	5,12E-05
(r) Cobalt (Co, ore)	kg	2,94E-13	2,72E-13	1,18E-14	9,87E-15
(r) Copper (Cu, ore)	kg	2,26E-04	2,07E-04	1,88E-05	1,42E-08

Abbildung 8-2 Darstellung der Sachbilanzgrößen

¹⁴⁴ vgl. Chataignere, A., Le Boulch, D.: Wind turbine systems, Final Report, Verbundprojekt Eclipse 2003, Seite 31

¹⁴⁵ vgl. Soeker, H. et al.: Zukunft Windkraft – Die Energie aus dem Meer, Technische Möglichkeiten und ökologische Rahmenbedingungen, Deutsches Windenergie Institut (DEWI), Wilhelmshaven 2000, Seite 4

Weiterhin werden die Ergebnisse sehr detailliert dargestellt. Was nützt aber die Genauigkeit auf der Outputseite, wenn auf der Inputseite ungenügend recherchierte Werte vorliegen? Genau auf diesem Punkt sollte in Zukunft mehr Augenmerk liegen. Somit könnte man die Aussagekraft und Glaubwürdigkeit von Ökobilanzen merklich erhöhen. Das große Problem besteht aber darin, dass ungenaue Werte Grundlage neuer Studien werden könnten, deren Ergebnisse dann von Anfang an fehlerhaft sind.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit sollte dem Leser nahelegen, dass der heutige Lebensstandard der Menschheit, so positiv wie er klingt, von kurzfristiger Natur sein wird, wenn nicht in den nächsten Jahrzehnten geeignete Optionen gefunden werden, das herannahende Energie- und Umweltproblem zu lösen. Vor allem die westlichen Industrienationen, die von der „Ausbeutung“ der Ressourcen und dem sorglosen Umgang mit der Natur wohl am meisten profitiert haben, müssen ihrer globalen Verantwortung nachkommen und mit „Hochdruck“ an dem bis jetzt eingeschlagenen Weg weiterarbeiten und „saubere regenerative Energien“ fördern und ausbauen. Denn wenn nicht wir, wer dann? Generell ist der Mensch ein kurzfristig denkendes Wesen, dessen höchstes Bestreben die „Glückmaximierung während der Betriebszeit“ darstellt. Auf diesem Prinzip beruht unser kapitalistisches System und zunehmend auch die gesellschaftlichen Werte und Normen. Gerade deswegen wird es kein leichtes Unterfangen, den „Koloss“ der globalen Marktwirtschaft in das richtige Fahrwasser zu bringen. Als Beispiel könnte hier die aktuelle Auseinandersetzung zwischen den beiden Ministern Trittin und Clement um die Emissionsrechte angeführt werden. Dies verdeutlicht wie schwierig es ist, ein Konsens zwischen ökologischen und ökonomischen Interessen zu finden.

Erneuerbare Energien wie die Windkraft sollen in Zukunft einen wesentlichen Beitrag zur Energieversorgung und zum Schutz unseres Lebensraumes beitragen. Dazu ist sicherlich ihre finanzielle Wirtschaftlichkeit ein entscheidender Punkt. Doch noch viel wichtiger für deren erfolgreichen und Sinn bringenden Einsatz ist die energetische Rentabilität und die mit dem Bau und der Nutzung der Anlagen erzeugten Umweltbelastungen im Vergleich zur konventionellen Energieversorgung. Für den Ressourcenverbrauch und die CO₂ Werte kann der kumulierte Energieaufwand als Indikator herangezogen werden. Vor allem Europa und allen voran Deutschland betreiben schon seit mehreren Jahrzehnten Grundlagenforschung auf diesem Gebiet. Speziell in der VDI-Richtlinie 4600 und in der EN ISO 14040 ff wird der KEA näher definiert und dessen Ermittlungsmethoden festgelegt. Da die Richtlinie und die ISO Norm jedoch in vielen Fällen Freiräume für die Definition und die methodische Berechnung des KEA für Verbesserungsvorschläge bieten und verschiedene Schwerpunkte im Bezug auf die Bilanzgrößen bzw. Bilanzräume legen, wird deutlich,

dass die Vergleichbarkeit „marktüblicher“ KEA-Werte nicht immer gegeben ist. Deswegen muss man sich in Zukunft auf standardisierte Verfahren einigen, die es nicht nur deutschlandweit ermöglichen, Lebenszyklusanalysen von Produkten miteinander vergleichen zu können.

Einen wichtigen Punkt im Bezug auf die Aussagekraft des KEA spielen die unterschiedlichen Methoden zu dessen Ermittlung. Hierzu zählt die Prozesskettenanalyse, die die Energieaufwendungen aller energetisch relevanten Prozesse entlang des Produktlebenszyklusses von der Lagerstätte der Rohstoffe bis zur Endlagerung erfassen soll. Aber auch die Input-Output-Analyse, die die Energiegehalte von Produkten über die volkswirtschaftliche Verflechtung anhand von statistischen Zahlenwerten berechnet, kann herangezogen werden. In der Praxis sind allerdings so genannte Mischanalysen, wie die Materialbilanzanalyse oder der Hybrid-Ansatz, die oft aus der Kombination der „reinen“ Prozesskettenanalyse und der IO-Analyse bestehen, üblich. Dadurch sollen die Vorteile beider Ansätze ausgenutzt werden, denn alleine über die IO-Analyse ermittelte Werte sind zu ungenau für ein aussagekräftiges Ergebnis. Jedoch scheut man sich oft aus Kostengründen und Gründen des enormen zeitlichen und personellen Einsatzes vor einer detaillierten Erfassung vieler energetisch maßgeblicher Prozesse innerhalb des Produktlebenszyklusses. Stattdessen beruft man sich auf Annahmen oder Durchschnittswerte.

Vor diesem Hintergrund wurde am Beispiel der Windkraftanlage E-66 die Vorgehensweise bei der Bilanzierung näher erläutert. Energieaufwendungen für die Herstellung, für die Montage, für Transporte, für die Wartung und für ein eventuelles Recycling fanden Berücksichtigung und wurden diskutiert. Hierbei und aufgrund weiterer Studien wurde festgestellt, dass Windkraftanlagen energetisch effizient sind. Energetische Kennzahlen wie die Amortisationszeit und der Erntefaktor lassen auf die energetische Rentabilität der Anlagen schließen. Da aber je nach Studie der angenommene jährliche Stromertrag pro Anlage schwankt, ist ein Vergleich der Studien anhand der Kennzahlen nur bedingt empfehlenswert. Weiterhin wurde deutlich, dass der Kernpunkt der Bilanzierung auf die genaue Erfassung der Rohmaterialien und auf eine einheitliche und aussagekräftige Grundstoffbilanzierung zu richten ist, da eventuelle Abweichungen und Fehler in diesem Punkt den KEA-

Wert am gravierendsten beeinflussen können. Hierzu ist es allerdings notwendig, Zulieferer und deren Vorlieferanten genauer zu betrachten. Auch Fertigungsenergien sollten nicht pauschal, wie in diesem Beispiel, über die IO-Analyse ermittelt werden, da es in vielen Fällen auch möglich ist, betriebsspezifische Werte zu erfahren. Demzufolge scheint eine Kombination aus Prozesskettenanalyse, Materialbilanzanalyse und Hybrid-Ansatz eine vielversprechende Methode zu sein, Energieaufwendungen von Windrädern möglichst realitätsnah zu bilanzieren. Aufwendungen für Transport, Montage und Wartung beruhen charakterbedingt oft auf Annahmen und Schätzwerten. Da sie aber einen verhältnismäßig kleinen Anteil am KEA der Anlage haben, wirken sich eventuelle Abweichungen nicht so stark aus wie z.B. bei der Rohmaterialermittlung. In diesem Zusammenhang muss aber immer bedacht werden, dass ein übermäßig genaues Bilanzieren aufgrund folgender Punkte an seine Grenzen stößt¹⁴⁶:

- Bilanzierungen gelten im Rahmen ihres jeweils gewählten Systems, der zugrundeliegenden Methodik und der verwendeten Datenbasis. Sind dem Leser alle Punkte bis ins Detail bekannt, kann er eine Beurteilung wagen. Häufig fehlen jedoch aus Wettbewerbs- oder aus Kostengründen diese Hintergrundinformationen.
- Ganzheitliche Bilanzierungen sind Momentaufnahmen. Sie verändern sich zeit-, orts- und technologiebezogen ständig.
- Je nach Zielsetzung der Bilanzierung sind großräumig gemittelte Daten für einzelne Produkte wenig geeignet. Demnach ist die Datenqualität von zentraler Bedeutung für die Aussagekraft der Bilanz.
- Häufig werden Bilanzen erstellt, deren Datengrundlage aus verschiedenen Studien entstanden ist. Die Berechnungsgrundlagen dieser Studien können aber inhomogen sein und so das Ergebnis der Bilanz verfälschen.

Das übliche Vorgehen in der Praxis wurde am Vergleich einiger Verbesserungsvorschläge mit der aktuellsten Studie über Windkraftanlagen deutlich. Man hat zwar versucht alle Stromerzeugungstechnologien durch ein einheitliches Vorgehen und eine einheitliche Datenbasis zu bilanzieren, doch konnte das Projekt

¹⁴⁶ vgl. Eyerer, P.: Ganzheitliche Bilanzierung, Springer Verlag, Berlin 1996, Seite 652 ff

die Datenqualität der bisherigen Studien nicht verbessern. Dazu wurden zu viele Werte aus der Literatur entnommen, anstatt diese an Praxisbeispielen zu ermitteln.

Genau die selbe Problematik lässt sich auch auf Ökobilanzsoftware übertragen. Diese soll Unternehmen helfen, die betrieblichen Prozesse energetisch effizient zu gestalten, was unter anderem eine gewünschte Kostenreduktion zur Folge hätte. Bedenkt man aber die Preise solcher Software und bezieht man die in dieser Arbeit diskutierten Punkte in die Kaufentscheidung mit ein, ist gut abzuwägen, ob damit im Vergleich zu den üblichen monetären Optimierungsmethoden ein Nutzen für das Unternehmen erreicht werden kann.

Ferner ist anzumerken, dass die Berechnungen des Energieaufwandes nicht überinterpretiert werden dürfen. Sie sind ein Kriterium aus einer Palette von Kriterien, die zur Bewertung von Gütern und Anlagen herangezogen werden müssen. Die Energiebilanz dient vor allem als Ausschlusskriterium, wenn die energetischen Amortisationszeiten länger als die Lebensdauer sind. Bei allen anderen Fällen spielen Überlegungen wie Kosten, Zuverlässigkeit, Wartungsfreundlichkeit usw. eine ebenso große Rolle. Vor allem die Genauigkeit solcher Rechnungen, die durchaus im Bereich von ± 20 Prozent¹⁴⁷ und mehr angesiedelt werden kann, lässt eindeutig zu wünschen übrig. Trotzdem wird die energetische Betrachtung von Produkten und auch Dienstleistungen in Zukunft einen höheren Stellenwert erlangen, vor allem im Blick auf die Verknappung der Ressourcen und der immer noch hohen Umweltverschmutzungen.

¹⁴⁷ vgl. Wagner H.-J.: Energieketten von A bis Z - Erntefaktoren und energetische Amortisationszeit, Elektrizitätswirtschaft, Heft 8, 1996, Seite 456

Literaturverzeichnis

Buchquellen

- Bruno I.:** Ecobalance of a wind turbine, Diplomarbeit, Institut für technische Thermodynamik, DLR-Suttgart, Stuttgart 2003
- Dreier, T.:** Biogene Kraftstoffe - Energetische, ökologische und ökonomische Analyse, Lehrstuhl für Energie- und Anwendungstechnik, IFE Schriftenreihe Heft 38, München 1999
- Domrös, R.:** Energetische Amortisationszeit von Windkraftanlagen auf Basis der Prozesskettenanalyse, Diplomarbeit, TU Berlin, Fachgebiet für Energie- und Rohstoffwirtschaft, 1992
- Eyerer, P.:** Ganzheitliche Bilanzierung, Springer Verlag, Berlin 1996
- Gabler Wirtschaftslexikon,** Gabler Verlag, 13. Auflage, Wiesbaden 1993
- Häuslein, A., Möller, A.:** Möglichkeiten und Grenzen zur Berechnung des kumulierten Energieaufwandes, VDI-Berichte 1218, VDI Verlag, Düsseldorf 1995
- Hagedorn, G.:** Kumulierter Energieaufwand von Photovoltaik- und Windkraftanlagen, Forschungsstelle für Energiewirtschaft, IFE Schriftenreihe Heft 25, München 1992
- Hartmann, D.:** Ganzheitliche Bilanzierung der Stromerzeugung aus regenerativen Energien, Dissertation, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart 2001
- Hau, E.:** Windkraftanlagen, Grundlagen – Technik – Einsatz – Wirtschaftlichkeit, Springer Verlag, Berlin 1988

-
- Jorasz, W.:** Kosten- und Leistungsrechnung, Schäfer-Poeschel Verlag, 2. Auflage, Stuttgart 2000
- Kaltschmitt, M., Wiese, A., Streicher, W.:** Erneuerbare Energien – Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte, Springer Verlag, 3. Auflage, Berlin 2003
- Kehrbaum, R.:** Materialrückführungsprozesse in der Sachbilanz, Dissertation, RWTH Aachen 1997
- Kleemann, M., van Erp, F., Kehrbaum, R.:** Windenergieanlagen - Nutzung, Akzeptanz und Entsorgung, Forschungszentrum Jülich 1998
- Krohn, S.:** The Energy Balance of modern Wind Turbines, Windpower Note, Copenhagen 1997
- Marheineke, T.:** Lebenszyklusanalyse fossiler, nuklearer und regenerativer Stromerzeugungstechniken, Dissertation, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Stuttgart 2002
- Mauch, W.:** Kumulierter Energieaufwand für Güter und Dienstleistungen - Basis für Ökobilanzen, IFE Schriftenreihe Heft 26, Lehrstuhl für Energie- und Anwendungstechnik, München 1993
- Pick, E., Wagner, H.-J.:** Beitrag zum kumulierten Energieaufwand ausgewählter Windenergiekonverter, Arbeitsbericht des Instituts für ökologisch verträgliche Energiewirtschaft, Universität Essen 1998
- Pick, E., Wenzel, B.:** Energetische Input-Output-Analyse, Verschiedene Ansätze zur Berücksichtigung von Abschreibungen, Arbeitsbericht des Instituts für ökologisch verträgliche Energiewirtschaft, Universität Essen 1997
- Qaschnig, V.:** Regenerative Energiesysteme – Technologie, Berechnung, Simulation, Hanser Verlag, 3. Auflage, München 2003

-
- Saykowski, F.:** Übertragung der KEA-Richtlinie auf den aktuellen Stand der Ökobilanzierung, VDI-Berichte 1218, VDI Verlag, Düsseldorf 1995
- Schäfer, H.:** Zielvorstellungen und grundlegende Prinzipien der KEA-Richtlinie, VDI-Berichte 1218, VDI Verlag, Düsseldorf 1995
- Schmidt, M., Häuslein, A.:** Ökobilanzierung mit Computerunterstützung, Springer Verlag, Berlin 1997
- Soeker, H. et al.:** Zukunft Windkraft – Die Energie aus dem Meer, Technische Möglichkeiten und ökologische Rahmenbedingungen, Deutsches Windenergie Institut (DEWI), Wilhelmshaven 2000
- Stahl, B.:** Methodenvergleich und Methodenentwicklung zur Lösung der Bewertungsproblematik in produktbezogenen Ökobilanzen, Dissertation, Bremen 1998
- Staiß, F.:** Jahrbuch Erneuerbare Energien 02/03, (Hrsg.): Stiftung Energieforschung Baden-Württemberg, Radebeul - Bieberstein 2003
- Wagner, H.-J., Wenzel, B.:** Energetische Input-Outputrechnung und Prozesskettenanalysen - Möglichkeiten und Grenzen beider Methoden, VDI-Berichte 1328, VDI Verlag, Düsseldorf 1997
- Weber, Ch.:** Untersuchung zum KEA von Produktgruppen mit Hilfe der Input-Output-Analyse, VDI-Berichte 1218, VDI Verlag, Düsseldorf 1995

Zeitschriften

- Bunk, O.:** Positive Umweltbilanz – Anlagen amortisieren sich nach wenigen Monaten, (Hrsg.): Windblatt – Das Enercon Magazin, Ausgabe 03/2002
- Kehrbaum, R.:** Perspektiven eines Recycling von Windkraftanlagen, DEWI Magazin Nr.7, 1995
- Pick, E., Wagner, H.-J., Bunk, O.:** Kumulierter Energieaufwand von Windkraftanlagen, Brennstoff - Wärme - Kraft, Ausgabe 11, 1998, Seite 52-55
- Wagner, H.-J.:** Energieketten von A bis Z - Erntefaktoren und energetische Amortisationszeit, Elektrizitätswirtschaft, Ausgabe 8, 1996, Seite 448-456
- Wagner, H.-J., Wenzel, B.:** Energiebilanzen - Vorgehen und Materialanhaltswerte, In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, Ausgabe 11, 1997, Seite 685-688
- Wind Power World Market Update 2001,** (Hrsg.):Neue Energie, Ausgabe 6, 2002

Internetquellen

BTM Consult ApS (Hrsg.): World Market Update 2002, Stand März 2003,
www.btm.dk/Documents/Pressrelease.pdf, Datum: 24. Februar 2004

Bundesverband WindEnergie e.V. (Hrsg.): Zahlen zur Windenergie – Statistik
www.wind-energie.de/informationen/zahlen-zur-windenergie/zahlen-zur-windenergie.htm, Datum: 23. Februar 2004

Chataignere, A., Le Boulch, D.: Wind turbine systems, Final Report, Verbundprojekt Eclipse 2003
www.eclipse-eu.org/wind.zip, Datum 15. März 2004

Corradini, R., Hutter, C., Köhler, D.: Ganzheitliche Bilanzierung von Grundstoffen und Halbzeugen, Teil I: Allgemeiner Teil, Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München 1999
www.ffe.de/download/gabie/gs_allg.pdf, Datum: 30. Januar 2004

Corradini, R., Köhler, D.: Ganzheitliche Bilanzierung von Grundstoffen und Halbzeugen, Teil III: Metalle, Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München 1999
www.ffe.de/download/gabie/metalle.pdf, Datum: 30. Januar 2004

Enercon GmbH (Hrsg.): „Technische Daten der getriebelosen E-66“
www.enercon.de/deutsch/produkte/e_66_daten.html, Datum: 10. Februar 2004

Fritsche, U.R., Jenseit, W., Hochfeld, C.: Methodikfragen bei der Berechnung des kumulierten Energieaufwandes, Arbeitspapier im Rahmen des UBA-F&E-Vorhabens Nr. 10401123, Darmstadt 1999
www.oeko.de/service/kea/dateien/kea-methodik.pdf, Datum: 2. Februar 2004

Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS): Programm zur Analyse der Umweltaspekte von Energie-, Stoff- und Transportprozessen, Version 4.13, Öko-Institut e.V. Darmstadt,
www.oeko.de/service/gemis/files/setup/setup.exe, Datum: 25. Januar 2004

Höppner, J.: Anmerkungen zum Nutzen der Windkraft
www.windkraftgegner.de/hoepfner/, Datum 20. Dezember 2003

Hutter, C., Lilleike, J., Schwärzer, M.: Ganzheitliche Bilanzierung von Grundstoffen und Halbzeugen, Teil II: Baustoffe, Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München 1999
www.ffe.de/download/gabie/baust.pdf, Datum: 30. Januar 2004

Hutter, C., Köhler, D.: Ökobilanzierung mit Hilfe der KEA-Datenbank – Praxistests, Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München 1999
www.ffe.de/download/gabie/pt.pdf, Datum: 30. Januar 2004

Internationales Wirtschaftsforum Regenerativer Energien (IWR) (Hrsg.):
Windenergiemarkt 2002
www.iwr.de/wind/markt/iwrwindmarkt2002.pdf, Datum: 24. Februar 2004

Mauch, W.: Folien zum Vortrag: Der KEV als Maß für energiebedingte Umweltbelastungen – Methode, Aussagekraft und Grenzen des Einsatzes, Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München 2003
www.ffe.de/details/ganz/kea_ind/keaind4.htm#download, Datum: 30. Januar 2004

www.net.lexikon.de/Heizwert.html, Datum: 7. März 2004

Schwaiger, K.: Ganzheitliche energetische Bilanzierung der Energiebereitstellung (GABIE) Teil I: Allgemeiner Teil, Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München 1996
www.ffe.de/download/gabie/kw_allg.pdf, Datum: 30. Januar 2004

Ströbele: Skript Energiewirtschaft III, Lehrstuhl für Volkswirtschaftstheorien –, WWU-Münster, WS 03/04

www.wiwi.uni-muenster.de/~15/Veranstaltungen/energie3/ENWModell01.pdf,

Datum: 15. Februar 2004

Themenpapier Windenergie, Stand Juli 2002

www.natureexperience.org/themenpapier_wind.pdf, Datum: 5. Januar 2004

Wind turbine readme

www.eclipse-eu.org/wind.zip, Datum: 15. März 2004

Sonstige Quellen

Wagner, H.-J.: Kumulierter Energieaufwand (VDI-Richtlinie 4600) und energetische Amortisationszeit - Methoden, Beispiele, Perspektiven – Produktbezogene Ökobilanzen, IV UTECH Berlin - Umwelttechnologieforum 1996, 26.2. – 1.3.1996

Gespräch mit Herrn Briem, Mitarbeiter des IER Stuttgart, 11. Dezember 2003

Voß, A.: Windenergie – Entwicklungen, Erwartungen und energiewirtschaftliche Einordnung, Stuttgart 2003

Anlagen

Anlage 1: Ausschnitt aus der VDI-Richtlinie 4600

ICS 01.040.27		VDI-RICHTLINIEN		Juni 1997 June 1997	
VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE		Kumulierter Energieaufwand Begriffe, Definitionen, Berechnungsmethoden Cumulative Energy Demand Terms, Definitions, Methods of Calculation		VDI 4600 Ausg. deutsch/englisch Issue German/English	
<i>Die deutsche Version dieser Richtlinie ist verbindlich.</i>		<i>No guarantee can be given with respect to the English translation. The German version of this Guideline shall be taken as authoritative.</i>			
Inhalt		Seite		Contents	
Page		Page		Page	
Vorbemerkung		2		Preliminary Note	
2		2		2	
1 Formelzeichen und Definitionen		3		1 Formula Symbols and Definitions	
3		3		3	
1.1 Formelzeichen, Einheiten, technische Begriffe		3		1.1 Formula Symbols, Units, Technical Terms	
3		3		3	
1.2 Definitionen zum <i>Kumulierten Energieaufwand</i>		4		1.2 Definitions on the <i>Cumulative Energy Demand</i>	
4		4		4	
1.2.1 Lebenszyklus (Herstellung, Nutzung, Entsorgung)		5		1.2.1 Life Cycle (Production, Use, Disposal)	
5		5		5	
1.2.2 Beiträge zum <i>Kumulierten Energieaufwand</i>		5		1.2.2 Contributions to the <i>Cumulative Energy Demand</i>	
5		5		5	
1.3 Bereitstellungsnutzungsgrade		6		1.3 Overall Efficiencies of Supply	
6		6		6	
1.4 Bilanzen		8		1.4 Balances	
8		8		8	
2 Methoden der Ermittlung des KEA		11		2 Methods for the Determination of the Cumulative Energy Demand	
11		11		11	
2.1 Abgrenzung benötigter Angaben und Randbedingungen		11		2.1 Required Data and Boundary Conditions	
11		11		11	
2.2 Methoden		13		2.2 Methods	
13		13		13	
2.2.1 Generelles zur Methodik der Bilanzierung		13		2.2.1 General Remarks on the Methodology of Balancing	
13		13		13	
2.2.2 Prozeßkettenanalyse		15		2.2.2 Process Chain Analysis	
15		15		15	
2.2.3 Zurechnungsverfahren bei Kuppelproduktion		17		2.2.3 Allocation in Case of Co-Production	
17		17		17	
2.2.4 Energetische Zuordnung bei der Stoffrückführung		18		2.2.4 Energy Attribution in Case of Material Recycling	
18		18		18	
VDI-Gesellschaft Energietechnik Richtlinienausschuß Kumulierter Energieaufwand					
VDI-Handbuch Energietechnik VDI-Handbuch Betriebstechnik, Teil 1 VDI-Handbuch Konstruktion VDI-Handbuch Wärme-/Heiztechnik					

Frühere Ausgabe: S.95 Entwurf, deutsch
 Former edition: S.95 draft, in German only

Lizenzierte Kopie von elektronischem Datenträger
 Zu beziehen durch / Available from South Verlag GmbH, 10772 Berlin - Alle Rechte vorbehalten / All rights reserved © Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf 1997

Vervielfältigung – auch für innerbetriebliche Zwecke – nicht gestattet / Reproduction – even for internal use – not permitted

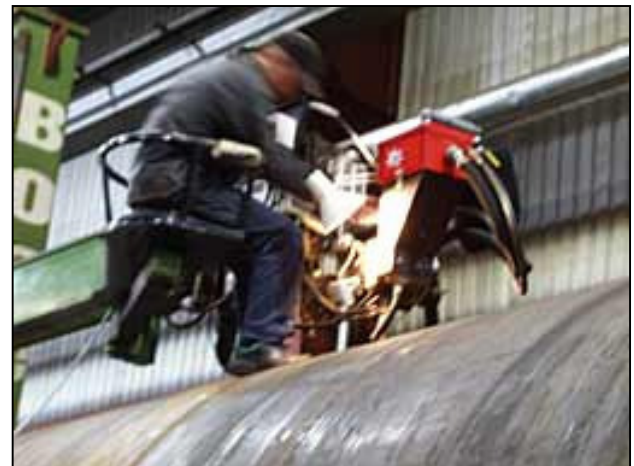
Anlage 3: Bilder der Stahlturmherstellung



Biegen der Turmsegmente



Zusammenschweißen der Segmente



Zusammenschweißen der Segmente



Turmflansch



Flanschen der Segmente

Anlage 4: Bilder bei Enercon



Wickeln des Stators



Wickeln des Stators



Rotorblattherstellung

Anlage 5: Bilder von der Endmontage und Wartung



Montage einer E-66



Wartung der Rotorblätter

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig angefertigt, nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt, alle Quellen und Hilfsmittel angegeben sowie wörtliche und sinngemäße Zitate entsprechend gekennzeichnet habe.

Leinach, 02. April 2004

Matthias Geuder