

Brandenburgische Technische Universität Cottbus

Dissertation

**Lebenszyklusanalyse und Bestimmung von
Einflussfaktoren zur nachhaltigen Produkt-
gestaltung von GuD-Kraftwerken**

Von der Fakultät für Umweltwissenschaften und Verfahrenstechnik der
Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus zur Erlangung des
akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs genehmigte Dissertation

vorgelegt von

MSc.

Falko Parthey

geboren am 9.5.1978 in Heidelberg

Matrikel Nummer: 9804668

Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. Jürgen Ertel

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Gerhard Lappus

Tag der mündlichen Prüfung: 26.03.2010

,per aspera ad astra'

(Seneca)

Danksagung

Ich möchte mich ganz besonders bei Prof. Jürgen Ertel vom Institut für Neuwertwirtschaft der BTU Cottbus bedanken, der mich über die gesamte Dauer dieser Arbeit begleitet hat und dem ich es verdanke, den Einstieg in diese spannende Thematik gefunden zu haben.

Mein Dank gilt auch Prof. Gerhard Lappus für die Übernahme der Betreuung meiner Arbeit und der Erstellung des Gutachtens.

Die vorliegende Arbeit wurde durch die Siemens AG in Erlangen unterstützt. Mein Dank gilt Herrn Dr. Helmut Hülsen für die Zustimmung und Unterstützung, sowie meinen aktuellen und insbesondere meinen ehemaligen Kollegen.

Ich möchte mich bei Herrn Konrad Krüger bedanken, für die offenen und konstruktiven Gespräche und kritischen Fragen zur richtigen Zeit.

Mein besonderer Dank aber gilt Dr. Heimo Friede, der mich die ganze Zeit über unterstützt und ermutigt hat, mir aber auch den nötigen Freiraum gegeben hat und mit dem ich eine spannende und prägende Zeit verbracht habe, die ich nicht missen möchte.

Weiterhin möchte ich mich bei allen Diplomanden, Praktikanten und Werkstudenten für die tatkräftige Unterstützung bedanken.

Meiner Familie möchte ich für die vorbehaltlose Unterstützung während der gesamten Zeit danken.

Danke Julia, für Dein Verständnis und für den Rückhalt, den Du mir gegeben hast.

Erlangen, im November 2009

Falko Parthey

Zusammenfassung

Der weltweite Anstieg des Bedarfs an Primärenergie und das Wachstum des weltweiten Bruttoinlandsprodukts geht einher mit der Zunahme damit verbundener Emissionen. Aktuelle wissenschaftlichen Studien zufolge beträgt der Anteil des Energiesektors (Energiewirtschaft, Industrie und Verkehr) 83 % der weltweiten Treibhausgasemissionen. Der Klimawandel und die Projektion der Auswirkungen von Treibhausgasemissionen auf die Atmosphäre werden inzwischen auch auf politischer Ebene akzeptiert und weitergehende Maßnahmen diskutiert. Da aber Zugang zu Elektrizität und nachhaltige Entwicklung untrennbar verknüpft sind, stellt sich die Frage, wie diese Aufgabe innerhalb der nächsten Jahre gelöst werden kann. Weiterhin ergibt sich gleichzeitig durch die verbleibende Laufzeit des aktuellen Kraftwerksparks, je nach Szenario, für Deutschland im Jahr 2020 eine Versorgungslücke von bis zu 12.000 MWh.

Ein Teil der Lösung dieser Problematik liegt in der nachhaltigen Gestaltung von Kraftwerken. Die Erstellung der Lebenszyklusanalyse eines GuD-Kraftwerks aus Sicht eines Herstellers in höchster Detailtiefe bildet daher den Hauptbestandteil dieser Arbeit. Erst die Darstellung des gesamten Produktsystems sowie der Bilanzierungsergebnisse ermöglichen das Aufzeigen von Verbesserungspotentialen. Die Systemgrenzen für die Ökobilanz umfassen alle Abschnitte des Produktlebenszyklus (Materialien, Fertigung, Transport, Betrieb, Wartung und End of Life). Die Erfassung der Materialmengen und Energiedaten liefert die Sachbilanz für alle Komponenten und Lebensphasen. In der Interpretation der Ergebnisse der Ökobilanz, insbesondere für die Kategorie Globale Erwärmung in kg CO₂e überwiegen die Emissionen der Betriebsphase naturgemäß. Die Ergebnisse wurden aber für alle Wirkungskategorien und Lebensphasen erarbeitet.

Auf Basis der erarbeiteten Module der Ökobilanz wurden die Umweltprofile verschiedener Konfigurationen und Betriebsszenarien dargestellt und stehen damit als Entscheidungshilfe bereits während der Produktentwicklung zur Verfügung. Die Darstellung der Auswirkungen von Designentscheidungen auf den ökologischen Fußabdruck des Produktsystems in einer aggregierten Form vereinfacht das Verständnis für Kunden und kann damit in die Kaufentscheidung einbezogen werden. Weiterhin wurde die Basis für ein Reporting der Treibhausgasemissionen nach dem GHG Protokoll erstellt.

Die Ergebnisse werden außerdem in Form einer Typ II Produktumwelterklärung nach ISO 14021 veröffentlicht und als Referenzwert für die Berechnung der Emissionsfaktoren für den jeweiligen Strommix bereitgestellt.

Abstract

The growth of the national GDP on a worldwide level and the associated increasing demand for primary energy inevitably result in higher emissions levels. According to recent international scientific studies the energy sector (including electricity generation, industrial activities and traffic) contributes up to 83 % to the worldwide greenhouse gas emissions. Climate change and the projection of its impacts have been acknowledged also on the political level and concise measures are being considered. Since access to electricity and sustainable development are inseparable, the question arises whether and how adequate answers can be given within the coming years. Furthermore, the definite lifetime of the existing power plant fleet will result in a gap of up to 12.000 MWh in 2020, depending on the scenario.

One part of the answer lies in the sustainable design of power plants. The main contribution of this work is therefore the life cycle analysis of a combined cycle power plant from of a manufacturer's perspective. The visualisation of the entire product system and the results of the impact assessment facilitate the determination of improvement potential. The system boundaries for this study include all relevant phases of the product life cycle (materials, manufacturing, transport, operation, service and end of life). The life cycle inventory consists of all bills of materials and energy consumption for all components and life cycle phases. The interpretation of the results of the impact assessment showed the expected significant contribution in kg CO₂e for the emission of the full load operation. Nevertheless, the results for all impact categories over the entire lifecycle are given.

Various operation scenarios and configurations can now be analysed based on the elaborated modules, and can now serve as decision support already during product development. The visualisation of impacts of design decisions on the ecological footprint of the product system in an aggregated form enables decision makers and customers to evaluate design choices and decide accordingly. Furthermore, the starting point for the greenhouse gas reporting according to the GHG Protocol over the entire product life cycle has been established.

Eventually, the results will be published as Type II Environmental Product Declaration acc. ISO 14021 and serve as reference value for the determination of the CO₂-intensity of the respective grid mix.

Inhaltsverzeichnis

DANKSAGUNG	IV
ZUSAMMENFASSUNG	V
ABSTRACT.....	VI
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	IX
FORMELZEICHEN	XI
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	XII
TABELLENVERZEICHNIS	XVI
1 EINFÜHRUNG.....	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Ziele und Aufbau der Arbeit.....	3
2 GRUNDLAGEN UND RAHMENBEDINGUNGEN	5
2.1 Energiebedarf und Emissionen.....	5
2.2 Der politische Rahmen für den Klimaschutz	8
2.3 Stand der Technik	14
2.4 Produkt-bezogener Umweltschutz	17
2.5 Design for the Environment	20
2.6 Lebenszyklusanalyse.....	25
2.7 Life Cycle Management	33
3 METHODOLOGIE	37
3.1 Zielstellung.....	38
3.2 Funktionelle Einheit.....	38
3.3 Systemgrenzen	38
3.4 Abschneidekriterien	39
3.5 Datenquellen.....	40
3.6 LCA Software	41
3.7 Cockpit.....	42
4 MODELLIERUNG.....	45
4.1 Beschreibung GuD-Kraftwerk	46
4.2 Gasturbine	47
4.2.1 Sachbilanz Gasturbine.....	48
4.2.2 Fertigung Gasturbine	51

4.3	Dampfturbine	52
4.3.1	Sachbilanz Dampfturbine.....	53
4.3.2	Fertigung Dampfturbine	55
4.4	Generator.....	57
4.4.1	Sachbilanz Generator	58
4.4.2	Fertigung Generator	60
4.5	Übrige Maschinentechnik.....	61
4.5.1	Sachbilanz Abhitzedampferzeuger	61
4.5.2	Sachbilanz Kondensator.....	62
4.5.3	Sachbilanz Rohrleitungen und Armaturen	62
4.6	Elektrotechnik	63
4.6.1	Sachbilanz Elektrotechnik.....	64
4.7	Bautechnik	65
4.7.1	Sachbilanz Bautechnik	66
4.8	Betriebsphasen.....	67
4.9	Inbetriebsetzung	70
4.10	Wartung.....	71
4.11	End of Life Szenario.....	72
4.12	Zusammenfassung der Sachbilanz.....	74
5	AUSWERTUNG UND BEWERTUNG.....	75
5.1	Wirkungsabschätzung.....	75
5.2	Betriebsphasen	77
5.3	Komponenten.....	79
5.4	Zusammenfassung der Ergebnisse	83
6	DISKUSSION	85
6.1	Vergleich mit anderen Studien	86
6.2	Einflussfaktoren der Produktgestaltung	88
6.3	Corporate Sustainability.....	96
7	AUSBLICK.....	101
8	LITERATURVERZEICHNIS.....	102
9	ANHANG	112
	EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG	126

Abkürzungsverzeichnis

AHDE	Abhitzedampferzeuger
BAU	Business As Usual
BHS	Betriebs- und Hilfsstoffe
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BREF	Best available Technique Reference Documents
BSD	Biologischer Sauerstoffbedarf
BVT	Beste verfügbare Technik
CDM	Clean Development Mechanism (nach Kyoto-Protokoll)
CRM	Customer Relationship Management
DALY	Disability Adjusted Life Years
DfE	Design for the Environment
DJSI	Dow Jones Sustainability Index
DLN	Dry low NOx burner
EcoDesign	umweltgerechte Produktgestaltung
ELV	End-of-Life Vehicles, Altkraftfahrzeugverordnung
EPD	Environmental Product Declaration (ISO 14020ff)
GHG	Greenhouse gas
GRI	Global Reporting Initiative
GuD	Gas-und-Dampf-Kombi-Kraftwerk
GWP	Global Warming Potential
IEA	International Energy Agency
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPP	Integrierte Produktpolitik
IPPC	Integrated Pollution Prevention and Control
JI	Joint Implementation (nach Kyoto-Protokoll)
KVP	Kontinuierlicher Verbesserungsprozess
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LCA	Life Cycle Assessment
LCI	Life Cycle Inventory
LCIA	Life Cycle Impact Assessment

Abkürzungsverzeichnis

LCM	Life Cycle Management
LCPD	Large Combustion Plant Directive
NAP	Nationaler Allokationsplan
PCF	Product Carbon Footprint
PCR	Product Category Rules
PEP	Produktentstehungsprozess
PLM	Product Life Cycle Management
PM	Particulate Matter
RoHS	Restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment
SCM	Supply Chain Management
SCR	Selektive katalytische NO _x -Reduktion
SGen	Siemens Generator
SGT	Siemens Gasturbine
SNCR	Selektive nicht-katalytische NO _x -Reduktion
SST	Siemens Steam Turbine
THG	Treibhausgase (nach Kyoto Protokoll)
UMS	Umweltmanagementsystem (ISO 14001)
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
WBCSD	World Business Council on Sustainable Development
WEEE	Waste Electric and Electronic Equipment
WEO	World Energy Outlook

Formelzeichen

Bq	Becquerel
C-14	Kohlenstoff 14
C ₂ H ₃ Cl	Vinylchlorid
CFC-11	Trichlorfluormethan
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CO ₂ e	Kohlenstoffdioxid Äquivalent
h	Feuchte absolut in %
H _u	unterer Heizwert in kJ/kg
m _{Br}	Massenstrom Brennstoff
Nm ³	Normkubikmeter
p	Druck in bar
P	Elektrische Leistung in MW
PJ	Petajoule 10 ¹⁵ J
PM _{2,5}	Feinstaub Ø 2.5 µm
ppm	parts per million
Q _{zu}	zugeführte Wärmemenge in kJ/s
SO ₂	Schwefeldioxid
TEG	Triethylenglykol
TJ	Terajoule 10 ¹² J
η	Wirkungsgrad
ρ	Dichte in kg/m ³

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Entwicklung der weltweiten CO ₂ und Non-CO ₂ Emissionen [Stern 2006]	2
Abbildung 1.2: Struktur und Inhalte dieser Arbeit.....	4
Abbildung 2.1: Weltweite CO ₂ Emissionen Strom- und Wärmeerzeugung [Stern 2006]	5
Abbildung 2.2: Weltweite Treibhausgasemissionen nach Sektoren [WRI 2005]	6
Abbildung 2.3: Spezifische Emissionsfaktoren europäischer Strommixe in kg CO ₂ e	7
Abbildung 2.4: Entwicklung gesicherte Leistung in Deutschland bis 2030 [dena 2008]	8
Abbildung 2.5: Übersicht der regionalen Märkte des Emissionshandels	10
Abbildung 2.6: Entwicklung der THG Emissionen nach Sektoren [BMU NAP II].....	11
Abbildung 2.7: Aufteilung des Emissionsbudgets des NAP II [BMU 2006a]	12
Abbildung 2.8: Vergleich von idealen und technisch erreichten Wirkungsgraden	14
Abbildung 2.9: Perspektiven zur Reduzierung der THG Emissionen [McKinsey 2007].....	16
Abbildung 2.10: Auswirkung des Designs auf das Umweltprofil [Züst 1997]	17
Abbildung 2.11: Die Elemente einer Ökobilanz [ISO 14040]	26
Abbildung 2.12: Elemente der Wirkungsabschätzung [ISO 14040].....	29
Abbildung 2.13: Aufbau der Methode zur Wirkungsabschätzung IMPACT 2002+.....	30
Abbildung 2.14: Darstellung Konzept Life Cycle Management - LCM [UNEP 2005].....	34
Abbildung 2.15: Beiträge der Prozesse über den Lebenszyklus eines Produkts	35
Abbildung 3.1: Darstellung der Systemgrenzen	39
Abbildung 3.2: Berechnung und Darstellung der Nachhaltigkeitsprofile	43
Abbildung 3.3: Vergleich von Szenarien und Ergebnissen im Cockpit	44
Abbildung 4.1: Konzeptansicht SCC5-4000F 2x1S [Siemens AG]	45
Abbildung 4.2: Aufbau der Gasturbine SGT5-4000F [Siemens AG]	47
Abbildung 4.3: Aufbau der Gasturbine SGT5-4000F (cut-off 3,5 %)	49

Abbildung 4.4: Ausschnitt aus der Modellierung der SGT5-4000F	50
Abbildung 4.5: Verbrauchsstruktur für Erdgas in der Fertigung der SGT5-4000F	51
Abbildung 4.6: Verbrauch von elektrischer Energie in der Fertigung SGT5-4000F	51
Abbildung 4.7: 3D-Ansicht der Dampfturbine SST5-3000 [Siemens AG]	52
Abbildung 4.8: Modellierung SST5-3000 (cut-off 2 %)	53
Abbildung 4.9: Ausschnitt aus der Modellierung der SST5-3000	54
Abbildung 4.10: Verbrauchsstruktur elektrische Energie in der Fertigung SST5-3000.....	56
Abbildung 4.11: 3D-Ansicht des Generators SGen5-3000W [Siemens AG]	57
Abbildung 4.12: Modellierung SGen5-3000W (cut-off 2 %).....	58
Abbildung 4.13: Ausschnitt Modellierung SGen5-3000W	59
Abbildung 4.14: Prozessschritte der Fertigung SGen5-3000W	60
Abbildung 4.15: Schematische Darstellung 3-Druck AHDE.....	61
Abbildung 4.16: Modellierung Elektrotechnik (cut-off 1,5 %)	63
Abbildung 4.17: Ausschnitt aus Modellierung Elektrotechnik	64
Abbildung 4.18: Modellierung Bautechnik (cut-off 2 %).....	65
Abbildung 4.19: Ausschnitt aus der Modellierung Bautechnik	66
Abbildung 4.20: Input zur Berechnung und Vergleich der Emissionen.....	69
Abbildung 4.21: Verbrauch für das Beizen in der Inbetriebsetzung	70
Abbildung 4.22: Modellierung der Inbetriebsetzung	70
Abbildung 4.23: Closed-loop Recycling Szenario am Beispiel AHDE	72
Abbildung 4.24: Zuordnung der Abfallszenarien zu Materialtypen	73
Abbildung 5.1: Gesamtergebnis der Wirkungsabschätzung in Mt CO ₂ e (35 Jahre).....	75
Abbildung 5.2: Ergebnisse Charakterisierung SCC5-4000F in kg CO ₂ e (cut-off 0,3 %).....	76
Abbildung 5.3: Ergebnisse der Betriebsphasen für Block U10 absolut in Mt CO ₂ e.....	77
Abbildung 5.4: Ergebnisse der Betriebsphasen für Block U20 in Mt CO ₂ e.....	78

Abbildung 5.5: Detaildarstellung der Emissionen im Betrieb in Mt CO ₂ e.....	78
Abbildung 5.6: Ergebnisse der Wirkungsabschätzung der Komponenten in t CO ₂ e	79
Abbildung 5.7: Ergebnisse der Wirkungsabschätzung SGT5-4000F	80
Abbildung 5.8: Lebenszyklus SGT5-4000F in CO ₂ e (cut-off 15 %)	80
Abbildung 5.9: Ergebnisse der Wirkungsabschätzung SST5-3000	81
Abbildung 5.10: Lebenszyklus SST5-3000 HE in CO ₂ e (cut-off 20 %).....	81
Abbildung 5.11: Ergebnisse der Wirkungsabschätzung SGen5-3000W.....	82
Abbildung 5.12: Lebenszyklus SGen5-3000W in CO ₂ e (cut-off 10 %)	82
Abbildung 6.1: Vergleich des spezifischen KEA der Szenarien in MJ/kWh	86
Abbildung 6.2: Darstellung des CO ₂ Beitrags zu den THG-Emissionen im Betrieb.....	88
Abbildung 6.3: Vergleich der CO Emissionsfaktoren in mg/kWh	89
Abbildung 6.4: Einsparung in t CO ₂ /a durch Steigerung Wirkungsgrad Start (+10 %).....	90
Abbildung 6.5: Entwicklung von Werkstoffen und Temperaturen [Siemens AG].....	91
Abbildung 6.6: Spezifische Emissionen in kg CO ₂ e für 1 kg [ecoinvent]	92
Abbildung 6.7: Spezifische Aufwendungen in MJ Primärenergie für 1 kg [ecoinvent]	93
Abbildung 6.8: Reduktion der CO ₂ Emissionen durch Wirkungsgradsteigerung	95
Abbildung 6.9: Übersicht über Berichtsrahmen und Emissionen [WRI/WBCSD 2004]	97
Abbildung 6.10: Umweltportfolio der Siemens AG [Siemens AG 2009].....	98
Abbildung 6.11: Vergleich der spezifischen Emissionsfaktoren in kg CO ₂ /MWh	99
Abbildung 9.1: Sankey Diagramm SCC5-4000F	112
Abbildung 9.2: Schematische Darstellung AHDE mit Benson Hochdrucksektion.....	112
Abbildung 9.3: Vermeidungskostenkurve Energiesektor für 2020 [McKinsey 2007]	113
Abbildung 9.4: Materialzusammensetzung der Gasturbine	120
Abbildung 9.5: Materialzusammensetzung der Dampfturbine SST5-3000	120
Abbildung 9.6: Materialzusammensetzung SGen5-3000W	121

Abbildung 9.7: Materialzusammensetzung AHDE	121
Abbildung 9.8: Materialzusammensetzung übrige Maschinentechnik	122
Abbildung 9.9: Materialzusammensetzung Rohrleitungen und Armaturen	122
Abbildung 9.10: Materialzusammensetzung Elektrotechnik	123
Abbildung 9.11: Materialzusammensetzung Bautechnik	123
Abbildung 9.12: Ergebnisse der Wirkungsabschätzung Bautechnik	124
Abbildung 9.13: Ergebnisse der Wirkungsabschätzung Elektrotechnik.....	124
Abbildung 9.14: Ergebnisse der Wirkungsabschätzung übrige Maschinentechnik	125

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Vergleich der Reduktionsziele von NAP I und NAP II.....	13
Tabelle 2.2: BVT für NO _x - und CO-Emissionen aus gasgefeuerten Anlagen	15
Tabelle 2.3: Produktlebensphasen und dazugehörige Strategien [Siemens AG 2007].....	21
Tabelle 2.4: Wirkungs- und Schadenskategorien der Methode IMPACT 2002+	31
Tabelle 2.5: Anpassung der FMEA –Arbeitstechnik [Dreyer 1997]	36
Tabelle 3.1: Vergleich zwischen Einheits- und Systemprozessen [Goedkoop 2000].....	40
Tabelle 4.1: Technische Daten SCC5-4000F	46
Tabelle 4.2: Materialzusammensetzung SGT5-4000F.....	48
Tabelle 4.3: Materialzusammensetzung SST5-3000	54
Tabelle 4.4: Materialzusammensetzung SGen5-3000W.....	59
Tabelle 4.5: Materialzusammensetzung HRSG	61
Tabelle 4.6: Materialzusammensetzung Kondensator	62
Tabelle 4.7: Materialzusammensetzung Rohrleitungen und Armaturen	62
Tabelle 4.8: Materialzusammensetzung Elektrotechnik.....	64
Tabelle 4.9: Materialzusammensetzung Bautechnik.....	66
Tabelle 4.10: Thermodynamische Parameter SCC5-4000F	67
Tabelle 4.11: Sachbilanz nach Stoffgruppen SCC5-4000F 2x1S.....	74
Tabelle 5.1: CO ₂ Emissionsfaktoren für SCC5-4000F	77
Tabelle 5.2: Gesamtergebnis für die alle Wirkungskategorien SCC5-4000F.....	84
Tabelle 6.1: Vergleich der spezifischen Emissionsfaktoren	86
Tabelle 6.2: Parameter Szenario 0	87
Tabelle 6.3: Parameter Szenario 1 – Spitzenlast.....	87
Tabelle 6.4: Parameter Szenario 2 – Grundlast.....	87

Tabelle 6.5: Vergleich der CO ₂ Emissionsfaktoren über den Lebenszyklus	88
Tabelle 6.6: Durchschnittliche Wirkungsgrade der Betriebsphasen.....	89
Tabelle 6.7: Vergleich der Emissionsfaktoren für Fe-X und Ni-Basis [ecoinvent]	93
Tabelle 6.8: Vergleich der Umweltprofile SGT5-4000F	94
Tabelle 9.1: Übersicht über die in SimaPro 7 enthaltenen Datenbanken	114
Tabelle 9.2: Übersicht über die Wirkungsabschätzungsmethoden	115
Tabelle 9.3: Wirkungskategorien in IMPACT 2002+ mit Äquivalenzeinheiten	117
Tabelle 9.4: Vollständige Sachbilanz SCC5-4000F 2x1S	118

1 Einführung

1.1 Problemstellung

Die im Allgemeinen akzeptierte Postulierung der Brundtland Kommission [WCED 1987] zur Bedeutung von Nachhaltigkeit sowie die Detaillierung des World Business Council on Sustainable Development [WBCSD 2000] bezüglich der Definition von Ökoeffizienz markieren zwei wichtige Meilensteine auf dem Weg in Richtung einer logischen Verknüpfung dieser beiden Konzepte. Die verschiedenen Ebenen und Dimensionen von Nachhaltigkeit wurden weiterhin 1992 in der Agenda 21 der UN, den sogenannten ‚Rio Principles‘ verankert [UN 1992]. Gleichzeitig wurde im Rahmen der United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) durch das daraus entstandene Kyoto-Protokoll die unabdingbare Verknüpfung von Nachhaltigkeit und Klimawandel hergestellt [UN 1994].

Auf dem UN World Summit in Johannesburg wurden dann 2002 Kreislaufwirtschaft und Ökoeffizienz im Zehn-Jahres-Rahmenprogramm als zukunftsweisende und damit relevante Themen auf internationaler Ebene adressiert [UN 2002]. Innerhalb der Europäischen Union wurde der Leitgedanke der Nachhaltigkeit in verschiedenen Aktionsprogrammen definiert [EU 2001, EU 2006a]. Hierdurch wurde ein gemeinsames Verständnis von Nachhaltigkeit gefördert und umgesetzt [EU 2006b] und darüber hinaus als eine ‚conditio sine qua non‘ begriffen und in die aktuelle Gesetzgebung integriert.

Da eine nachhaltige Entwicklung direkt und unabdingbar mit der Verfügbarkeit und Zugang zu Energie bzw. Elektrizität verbunden ist [UN 2002, IEA 2004], besteht ein großer Teil der Herausforderung darin, Systeme zur nachhaltigen Energieversorgung zu gestalten und gleichzeitig einen flächendeckenden und globalen Zugang zu ermöglichen.

Vor dem Hintergrund des weltweit steigenden Energiebedarfs [IEA 2004] entsteht die Notwendigkeit, die Ressourceneffizienz insbesondere bei der Stromerzeugung durch den Einsatz von hocheffizienten Kraftwerken zu erhöhen, um damit den intensiv diskutierten Folgen der steigenden Emissionen von Treibhausgasen entgegenzuwirken. Nimmt man als Indikator das Wachstum des Bruttoinlandsprodukts (BIP), dann hat sich seit 1971 für jeden Anstieg um 1 % eine Steigerung des Primärenergiebedarfs um 0,6 % ergeben [IEA 2004]. Wie Abbildung 1.1 zeigt, belaufen sich die weltweiten Gesamtemissionen für das Jahr 2004 auf ca. 44 Gt. CO₂e [Stern 2006]

Besonderen Nachdruck hat dieser Debatte die Veröffentlichung der Ergebnisse der Studie des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) im Jahr 2007 verliehen.

Dort wird die Schlussfolgerung gezogen wird, dass die Erwärmung unseres Klimas „ohne jeden Zweifel vorhanden ist“. Verantwortlich dafür sind laut IPCC die in der von Zeit von 1750 bis heute emittierten Treibhausgase, welche die Konzentration von CO₂ in der Atmosphäre von 280 ppm auf 379 ppm im Jahr 2005 haben ansteigen lassen [IPCC 2007].

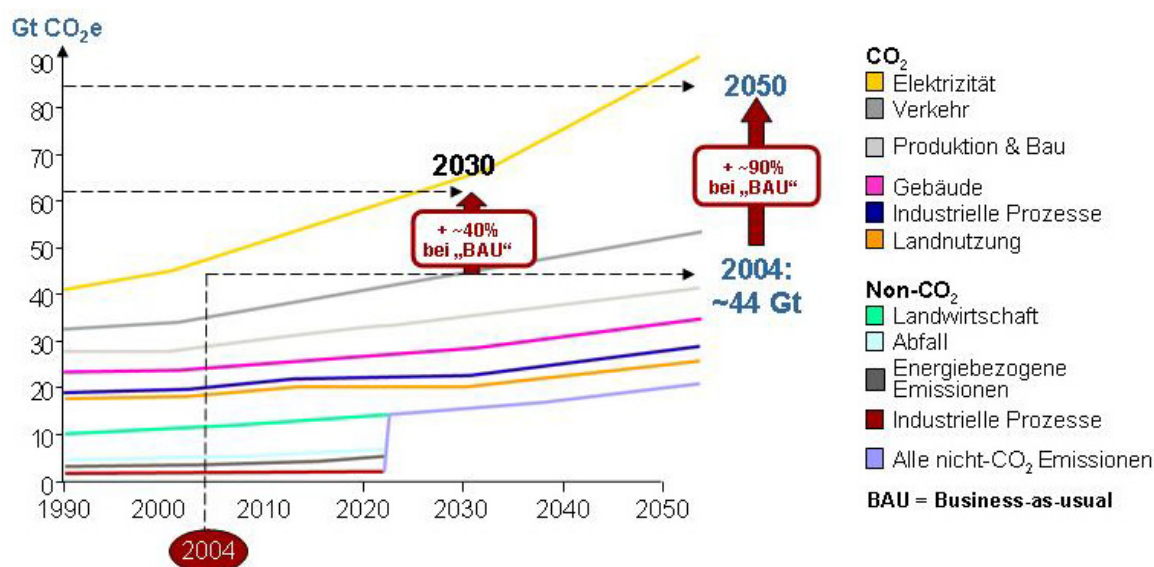


Abbildung 1.1: Entwicklung der weltweiten CO₂ und Non-CO₂ Emissionen [Stern 2006]

Neben dieser Herausforderung auf globaler Ebene, Emissionen zu verringern und vermeiden, um damit dem Klimawandel entgegenzuwirken, muss auf nationaler und regionaler Ebene gleichzeitig das Ziel darin bestehen, eine nachhaltige Entwicklung zu fördern bzw. zu ermöglichen. Übertragen auf den Bedarf an Zugang bzw. Versorgung mit Elektrizität bedeutet dies mittel- und kurzfristig, Produktsysteme zur Erzeugung von elektrischer Energie nachhaltig zu gestalten. Langfristig kann nur ein ausgewogener Mix aus verschiedenen Energieträgern den unterschiedlichen Anforderungen gerecht werden. Um die nachhaltige Gestaltung eines Produktsystems in toto darstellen zu können, und um vorhandenes Optimierungspotential zu erkennen, eignet sich besonders die Methodik der Lebenszyklusanalyse (LCA). Mit dieser Methodik kann der sogenannte „ökologische Fußabdruck“ eines Produktsystems dargestellt werden. Dabei werden die verschiedenen Kategorien der Umweltauswirkungen über den gesamten Lebensweg dargestellt, analysiert und bewertet. Diese Darstellung der Auswirkungen a priori über den gesamten Lebenszyklus ermöglicht die Identifikation von ‚Hot-spots‘, also signifikanter Beiträge in einer der Wirkungskategorien, und die Definition von Maßnahmen zur Verringerung und Vermeidung der entstehenden Umweltauswirkungen.

1.2 Ziele und Aufbau der Arbeit

Gegenstand dieser Arbeit ist die Analyse des Lebenszyklus und Bewertung von Einflussfaktoren zur nachhaltigen Gestaltung von GuD-Kraftwerken. Es wird im Folgenden eine Methodik zur Ermittlung und ganzheitlichen Bewertung der Umweltauswirkungen von GuD-Kraftwerken vorgestellt. Ziel ist es, die Auswirkungen von Designentscheidungen auf das resultierende Umweltprofil über den gesamten Lebenszyklus darzustellen.

Diese Darstellung des Umweltprofils in Form von eigenständigen Modulen, unter gleichzeitiger Berücksichtigung der Prozessstruktur von Planung, Herstellung, Errichtung und Betrieb, ermöglicht die Analyse auf allen Ebenen der Produktstruktur und über alle Lebensphasen hinweg. Es werden überdies Alternativen und Szenarien verglichen und bewertet, Strategien zur nachhaltigen Optimierung des Produktsystems aufgezeigt, sowie die Möglichkeit einer spezifischen Betrachtung und Auswertung von relevanten Parametern für einzelne Komponenten geschaffen.

Begründet durch die Vorgaben aktueller europäischer Richtlinien, die Stoffverbote, Einschränkungen und Registrierung für die Verwendung bestimmter Stoffe erlassen haben, gewinnt die Verfügbarkeit von Informationen über Inhaltsstoffe in Produkten und Komponenten an strategischer Bedeutung. Pro-aktives Handeln stellt damit mittelfristig einen klaren Wettbewerbsvorteil dar. Neben der Erfüllung externer Anforderungen bildet erst die Integration der ermittelten relevanten Aspekte in den Produktentstehungsprozess (PEP) und die Zusammenfassung in einer logischen Struktur die Grundlage für eine nachhaltige Produktgestaltung.

Die interne Lernkurve, also eine Steigerung der Detailkenntnisse der Umweltauswirkungen eines Produkts oder vielmehr der Summe aller vorgelagerter Prozesse innerhalb einer Organisation, wird jedoch in vielen Fällen unterschätzt - da aber nur auf diese Weise die Visualisierung und Optimierung der Nachhaltigkeitsaspekte auf Produkt- und Prozessebene möglich wird, gewinnt die Berücksichtigung von Umweltaspekten in der Produktentwicklung zunehmend auch an strategischer Bedeutung.

Die Ergebnisse des Umweltprofils, insbesondere die Ermittlung der Bilanz der Treibhausgasemissionen und des kumulierten Energiebedarfs über alle Lebensphasen, bilden die Grundlage für die Erstellung einer Produktumwelterklärung (EPD), welche inzwischen von Kunden gefordert wird und als Marketing- und Kommunikationsmittel eine breite Anwendung findet.

Außerdem finden diese Ergebnisse auf Firmenebene Anwendung im Reporting, z. B. nach Vorgabe der GHG Protocol Initiative (www.ghgprotocol.org) bzw. der Global Reporting Initiative (GRI) (www.globalreporting.org).

Der Aufbau und damit die logische Struktur der Arbeit ist in Abbildung 1.2 dargestellt. Kapitel 2 erläutert zu Beginn die Entwicklung der Gesetzgebung auf internationaler und nationaler Ebene und damit den politischen Rahmen für den Klimaschutz, um danach eine Übersicht über die Konzepte und Methoden des produkt-bezogenen Umweltschutzes zu geben. In Kapitel 3 wird die Methodologie und das Vorgehen für die ganzheitliche Bewertung von Produktsystemen analog ISO 14040 und 14044 gegeben und es werden die weiteren Pflichtelemente des Standards adressiert. In Kapitel 4 werden die Modellierung des Systems, sowie die Sachbilanz dargestellt. Die Auswertung und Bewertung der Ergebnisse der Wirkungsabschätzung wird in Kapitel 5 beschrieben. Neben den Ergebnissen der Ökobilanz wird ferner die Übersicht über Input und Outputs in Form eines Cockpits zur Szenarioanalyse und Parametervariation verschiedener Konfigurationen und Randbedingungen vorgestellt. Es folgen die Diskussion der Ergebnisse, der Vergleich mit den Ergebnissen anderer Studien und die Ermittlung und Bewertung von Einflussfaktoren in Kapitel 6 und abschließend der Ausblick in Kapitel 7.

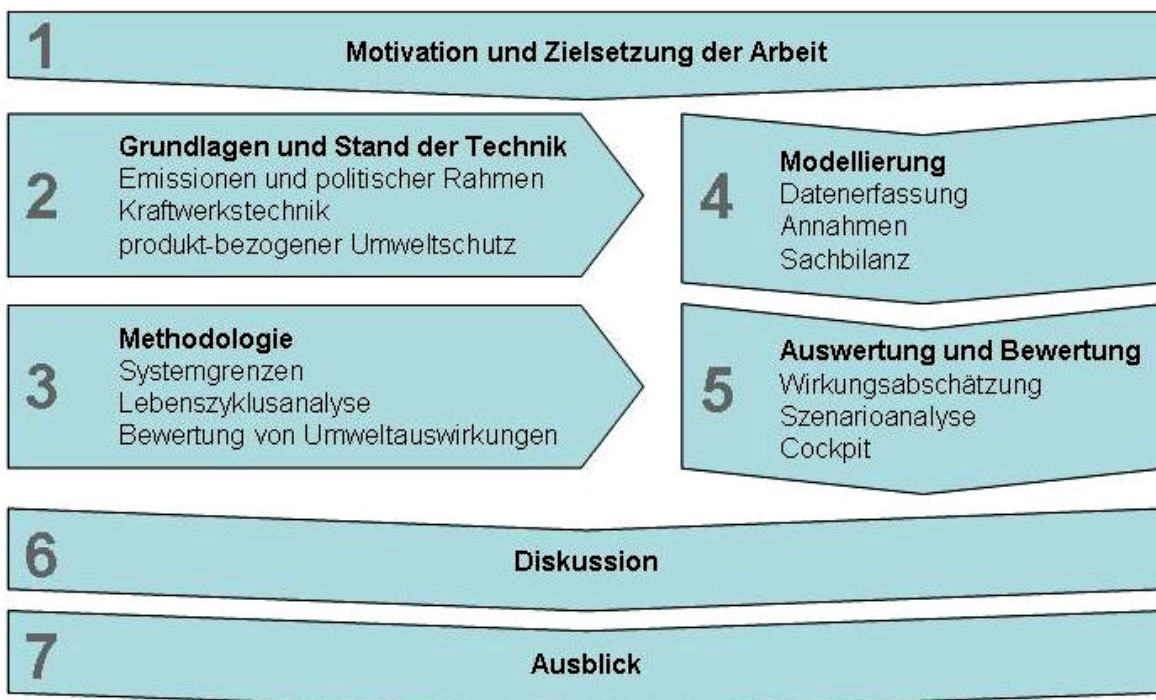


Abbildung 1.2: Struktur und Inhalte dieser Arbeit

2 Grundlagen und Rahmenbedingungen

Im folgenden Kapitel wird zu Beginn auf den weltweiten Energiebedarf und die dazu notwendige Infrastruktur, sowie auf die Entwicklung des fossilen Anteils eingegangen. Weiterhin werden die hierdurch verursachten Emissionen analysiert und die globalen Implikationen und politischen Strategien zur Reduktion der Emissionen beschrieben. Im zweiten Teil werden dann die vorhandenen Konzepte und Strategien zur umweltgerechten Produktgestaltung vorgestellt und erläutert.

2.1 Energiebedarf und Emissionen

In den Industriestaaten (sog. Annex I Länder lt. Kyoto Protokoll) leisten die Bereiche Energiewirtschaft, Industrie und Verkehr aktuell mit 82,8 % den größten Beitrag zur Emission von Treibhausgasen [UN 2006]. Die absoluten Werte für die CO₂ Emissionen haben in diesem Sektor von 1990 bis 2002, wie in Abbildung 2.1 ersichtlich, um 31 % zugenommen. Kohlendioxid macht dabei mit 78,6 % den Hauptanteil der Treibhausgasemissionen aus [UNFCCC 2005].

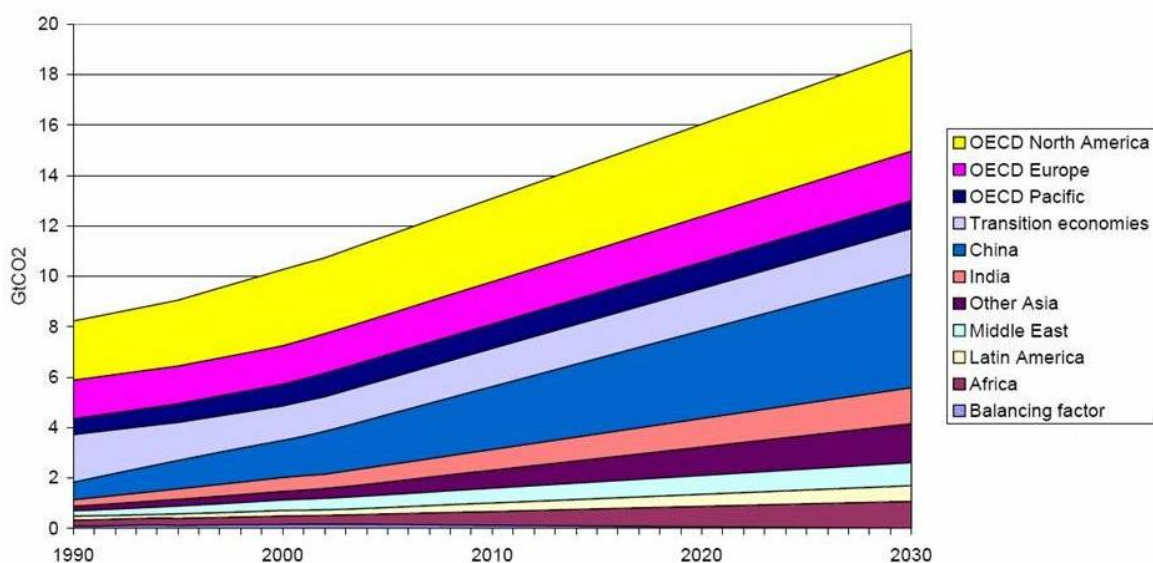


Abbildung 2.1: Weltweite CO₂ Emissionen Strom- und Wärmeerzeugung [Stern 2006]

Der weltweite Anteil der Treibhausgasemissionen aus Strom- und Wärmeerzeugung liegt, wie in Abbildung 2.2 dargestellt, bei 24,6 % in t CO₂e [Stern 2006]. Im ‚Business As Usual‘ (BAU) Szenario würden sich diese Emissionen im Jahr 2030 auf 19 Gt CO₂ belaufen und sich bis 2050 mit 35 Gt CO₂, bezogen auf den heutigen Stand, verdreifacht haben.

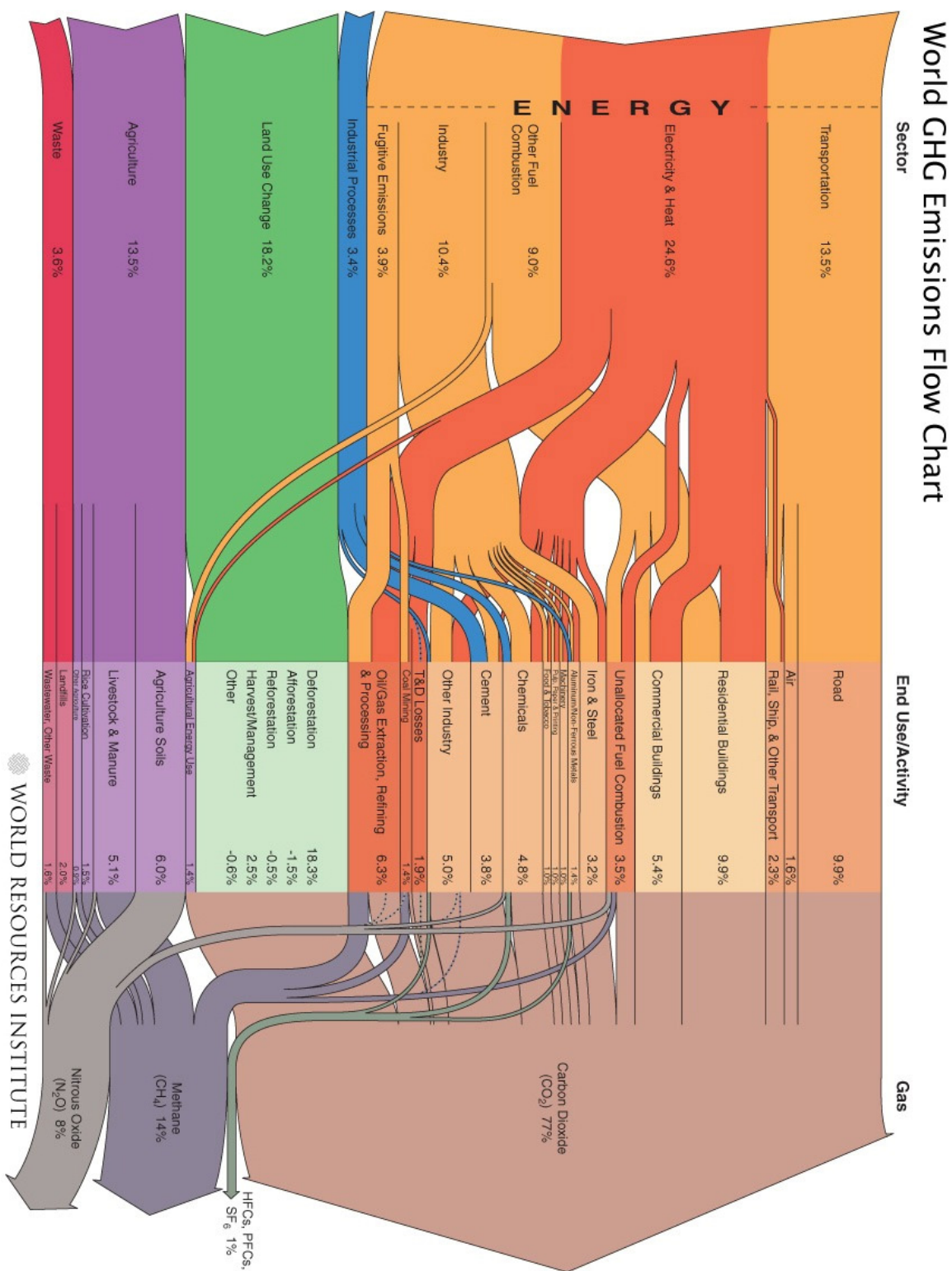


Abbildung 2.2: Weltweite Treibhausgasemissionen nach Sektoren [WRI 2005]

Langfristig stellt sich daher sogar eine Stabilisierung bei 500 ppm (ca. 20 Gt CO₂ /a) als anspruchsvoll dar. Das Erreichen von 450 ppm, wie von der IPCC im Stern Report empfohlen, erscheint bereits heute aber als äußerst herausfordernd.

Im Rahmen der Überprüfung der Reduktionsziele und tatsächlichen Verminderungen der Treibhausgasemissionen steht die Energiewirtschaft im Mittelpunkt, da sie ein Drittel der deutschen Kohlendioxidemissionen verursacht. Neben der Emissionsintensität des aktuellen Versorgungsmix gilt es, auch für die zukünftigen Szenarien eine adäquate Antwort zu finden. Das heißt, neben der Erreichung der Ziele für den Klimaschutz und den damit notwendigen Anpassungen bei der Erzeugung, auch die kontinuierliche Bereitstellung der benötigten Leistung ohne Versorgungslücken zu gewährleisten.

In Abbildung 2.3 ist ein Vergleich der spezifischen Emissionen europäischer Strommixe in kg CO₂e/MWh gegeben. Es wird deutlich, insbesondere im Vergleich mit einem GuD mit 60 % Wirkungsgrad, wie entscheidend sich der Effekt der unterschiedlichen Anteile von nuklearer, fossiler und regenerativer Strom- und Wärmeerzeugung darstellt.

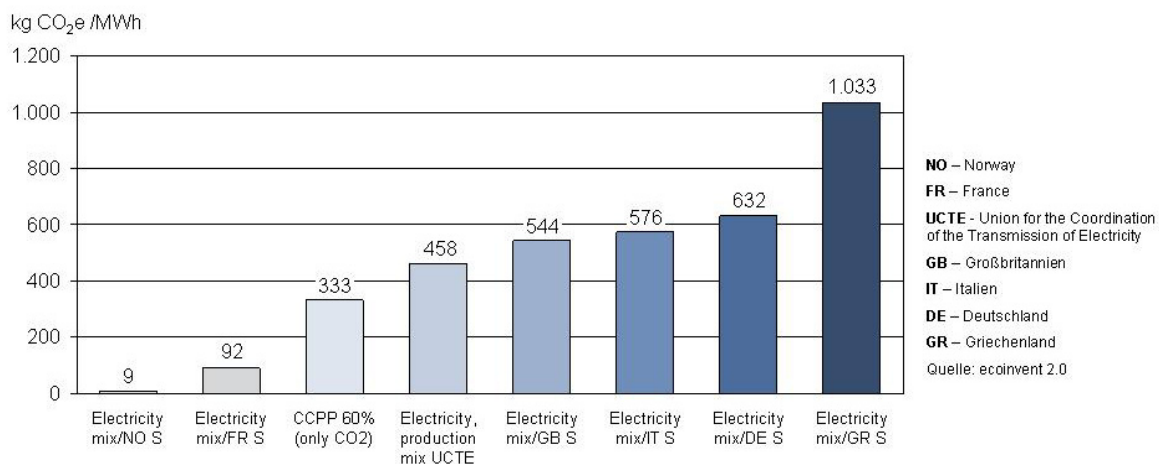


Abbildung 2.3: Spezifische Emissionsfaktoren europäischer Strommixe in kg CO₂e

Das in Abbildung 2.4 gezeigte Szenario der Deutschen Energie Agentur (dena) macht ferner deutlich, dass trotz Einführung des Energieprogramms der Bundesregierung zur Effizienzsteigerung und Senkung des Primärenergiebedarfs durch den geplanten Atomausstieg in einem Delta von 11.700 MW gesicherter Leistung im Jahr 2020 resultiert [dena 2008]. Bei einer angenommenen kontinuierlichen jährlichen Steigerung der Stromnachfrage würde sich im Jahr 2030 sogar ein Fehlbetrag von 15.800 MW ergeben.

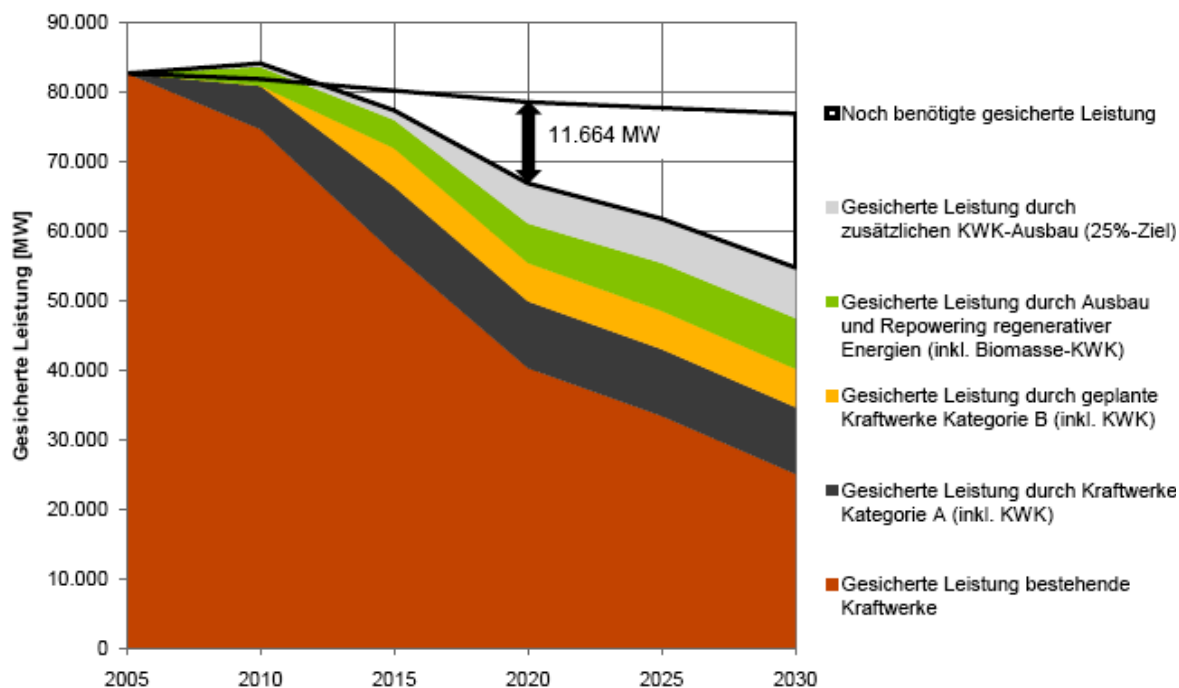


Abbildung 2.4: Entwicklung gesicherte Leistung in Deutschland bis 2030 [dena 2008]

2.2 Der politische Rahmen für den Klimaschutz

In der auf dem ersten UN Umweltgipfel in Rio de Janeiro im Jahr 1992 beschlossene Klimarahmenkonvention (UNFCCC) [UN 1994] wurde das Ziel definiert: „...eine Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre auf einem Niveau zu erreichen, auf dem eine gefährliche anthropogene Störung des Klimasystems verhindert wird. Ein solches Niveau sollte innerhalb eines Zeitraums erreicht werden, welches ausreicht, damit sich die Ökosysteme auf natürliche Weise den Klimaänderungen anpassen können, die Nahrungsmittelerzeugung nicht bedroht wird und die wirtschaftliche Entwicklung auf nachhaltige Weise fortgeführt werden kann“ (Artikel 2 der Klimarahmenkonvention).

Nachdem diese 1994 in Kraft trat, wurden auf jährlichen Treffen die weitere Implementierung verhandelt, bis auf der dritten Vertragstaatenkonferenz COP 3 (Conference of Parties) in Kyoto konkrete Reduktionsziele beschlossen wurden. Im Kyoto-Protokoll [UN 1997], einem Zusatzprotokoll der UN-Klimarahmenkonvention, wurden daraufhin die völkerrechtlich relevanten Reduktions- und Stabilisierungsverpflichtungen für die 39 Industriestaaten der teilnehmenden 190 Staaten für die folgenden sechs Treibhausgase festgelegt:

- Kohlendioxid – CO₂
- Methan – CH₄
- Distickstoffoxid/Lachgas – N₂O
- perfluorierte Kohlenwasserstoffe – FKW, PFC
- teilfluorierte Kohlenwasserstoffe – H-FKW
- Schwefelhexafluorid – SF₆

Gemäß Artikel 25 des Kyoto-Protokolls mussten mindestens 55 Vertragsstaaten, auf die mindestens 55 % der Gesamtemissionen im Jahr 1990 entfielen, das Protokoll ratifizieren. Nach dem Austritt der Vereinigten Staaten 2001 aus der Vereinbarung, trat diese erst nach der Ratifizierung Russlands am 16. Februar 2005 in Kraft. Nach der formellen Entscheidung der Umsetzung und Annahme für Europa [2002/358/EG] bildet die bereits vor dem Inkrafttreten des Kyoto-Protokolls im Jahr 2005 eingeführte europäische Emissionshandelsrichtlinie [2003/87/EG] den rechtlichen Rahmen für das zum 1. Januar 2005 eingeführte Emissionshandelssystem in Europa (Cap-and-trade). Damit wird den sogenannten Annex-B-Ländern (Industrie- und Transformationsländer) der Handel von Emissionszertifikaten untereinander gestattet (Artikel 17 Kyoto Protokoll).

Weitere Bestandteile des Kyoto-Protokolls sind die dort definierten und etablierten Instrumente des Emissionshandels, Joint Implementation (JI) und Clean Development Mechanism (CDM).

Das Instrument Clean Development Mechanism ermöglicht die Anrechnung der Emissionsreduktion durch die Investition eines Annex-B-Landes in ein Projekt eines Non-Annex-B-Landes (Entwicklungsland). Damit sollen auch Schwellenländer die Möglichkeit erhalten, zu einer Reduktion der Treibhausgase auf internationaler Ebene beizutragen (vgl. Abbildung 2.5).

Joint Implementation ermöglicht den Transfer von Reduktionszertifikaten von einem Annex-B-Staat auf einen anderen. Die Idee hierbei ist, dass es zweitrangig ist, wo eine Emission abgebaut wird. Entscheidend ist nur, dass sie abgebaut wird. Die Gesamtmenge der den Annex-B-Staaten zustehenden Emissionen wird durch die Joint Implementation nicht erhöht. Die Anrechnung der Reduktion wird an Hand eines Referenzszenarios durchgeführt und in einem zentralen Register erfasst.

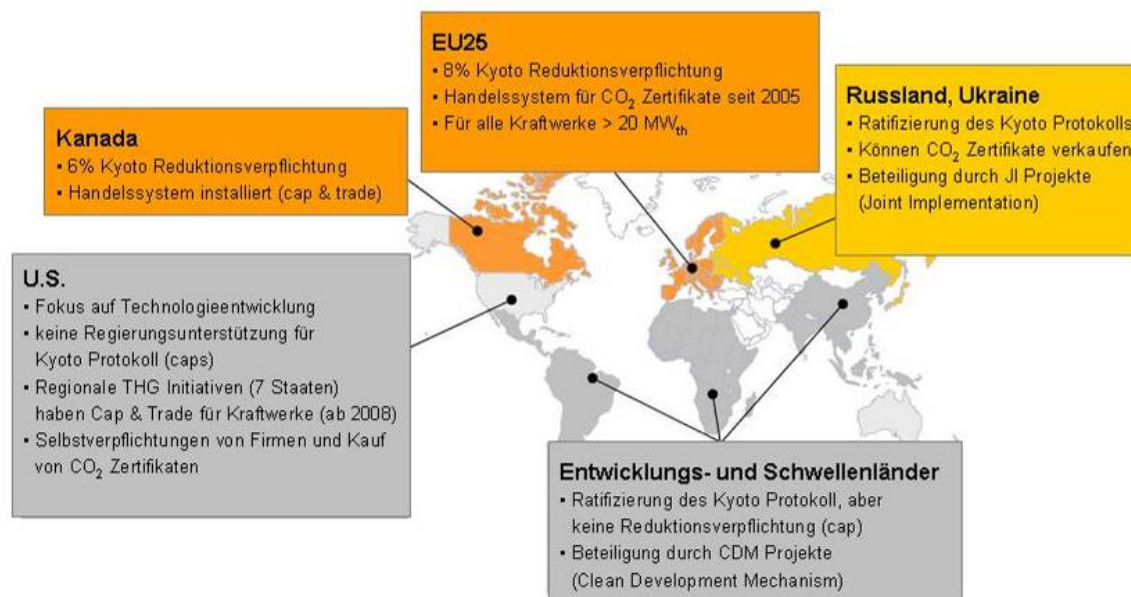


Abbildung 2.5: Übersicht der regionalen Märkte des Emissionshandels

Zusammen mit dem Treibhausgasemissionshandelsgesetz [TEHG 2007], und dem Zuteilungsgesetz 2007 [ZuG 2007] wurde das Handelssystem in deutsches Recht umgesetzt. Dem Projekt-Mechanismen-Gesetz [ProMechG 1997] liegt die „Linking Directive“ [2004/101/EG] zu Grunde, in welcher die Anwendung von CDM und JI Maßnahmen zur Erfüllung der Reduktionsziele geregelt sind. Durch den nationalen Allokationsplan (NAP) werden für Deutschland ca. 55 % der CO₂ Emissionen geregelt [BMU 2006a].

Nicht-Emissionhandelspflichtige Bereiche sind private Haushalte, Verkehr, Gewerbe/ Handel/ Dienstleistungen (GHD), sowie bestimmte Anlagen der Energiewirtschaft und Industrieanlagen. Analog Abbildung 2.6 betragen die gesamten Treibhausgasemissionen im Basisjahr 1.230,3 Mio. t CO₂-Äquivalente. Bis zum Jahr 2004 sind diese um ca. 214,6 Mio. t CO₂e oder 17,4 % gesunken. Dabei haben sich die Emissionen der einzelnen Treibhausgase sehr unterschiedlich entwickelt. Den größten absoluten Rückgang wiesen mit 144,3 Mio. t (-14 %) die CO₂-Emissionen auf; das sind fast zwei Drittel des gesamten Rückgangs der Treibhausgasemissionen. Die Nicht-CO₂-Emissionen (CH₄, N₂O, HFKW, FKW, SF₆) sind von 1990 bis 2004 um insgesamt 70,3 Mio. t (-35,1 %) reduziert worden. Die CO₂-Emissionen halten damit mit 87 % nach wie vor den weitaus größten Anteil an den gesamten Treibhausgasemissionen.

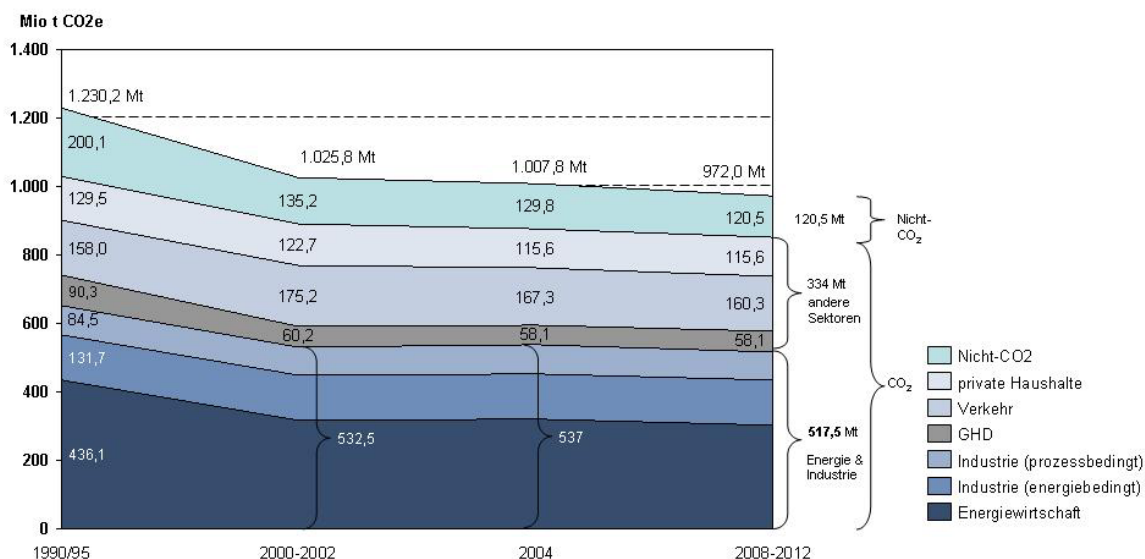


Abbildung 2.6: Entwicklung der THG Emissionen nach Sektoren [BMU NAP II]

Innerhalb der Europäischen Union wird durch das Einführen einer gemeinsamen Emissionsobergrenze und die anteilige Berechnung der notwendigen Beiträge der einzelnen Länder das Prinzip des ‚Burden Sharing‘ umgesetzt. Burden Sharing wird die Lastenverteilung innerhalb der EU durch angepasste Reduktionsverpflichtungen vor dem Hintergrund unterschiedlicher wirtschaftlicher und industrieller Situationen genannt.

Aus dem gesamteuropäischen Minderungsziel von 8 % für die Periode 2008-2012 ergibt sich für Deutschland ein Reduktionsziel für alle Treibhausgase von 21 % im Vergleich zu 1990. Weiterhin hat Deutschland die Europäische Verpflichtung zur Erhöhung des Anteils der primären Energieversorgung aus erneuerbaren Energien auf 4,2 % bereits im Jahr 2006 erfüllt. Auch wird das Ziel, 12,5 % der Stromerzeugung aus erneuerbaren Ressourcen zu erzeugen, erfüllt werden [IEA 2007].

Für die zweite Handelsperiode von 2008-2012 (NAP II) ist weiterhin vorgesehen, eine Zuteilung auf der Basis der historischen Emissionen durchzuführen. Diese Methode wird ‚grandfathering‘ genannt und stellt neben dem sogenannten ‚Auctioning‘, also der Versteigerung der Emissionszertifikate und einer Kombination der beiden Mechanismen, die möglichen Vorgehensweisen der staatlichen Zuteilung dar. Im NAP II findet (vgl. Abbildung 2.7) eine Differenzierung zwischen dem produzierenden Gewerbe und industriellen und öffentlichen KWK-Anlagen (Zuteilung von 98,75 % der Emissionsmenge der Basisperiode) und der Energiewirtschaft (Zuteilung von 85 % der Emissionen der Basisperiode) statt.

Als Basisperiode wird der Zeitraum von 2000-2005 herangezogen. Die relativ geringe Reduktion um 1,25 % zu NAP I für KWK-Anlagen wurde auf Grund des hohen internationalen Wettbewerbs sowie eingeschränkter Reduktionsmöglichkeiten beschlossen.

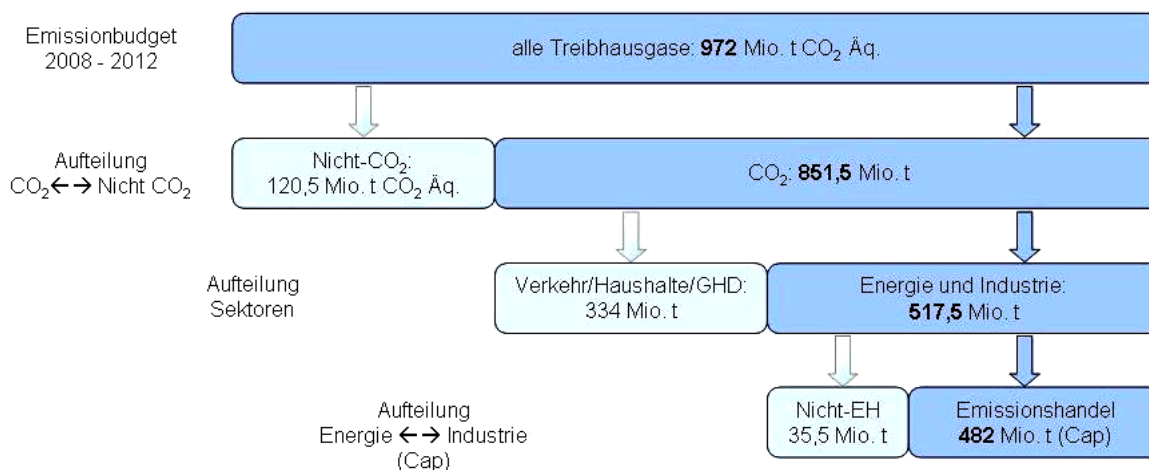


Abbildung 2.7: Aufteilung des Emissionsbudgets des NAP II [BMU 2006a]

Auch sind große chemische Anlagen nun integriert und Sondereffekte für prozessbedingte Emissionen wurden bereits berücksichtigt. Die Reduktion um 15 % für die Energiewirtschaft hingegen wurde mit dem geringen internationalen Wettbewerb sowie den während der ersten Zuteilungsperiode erhaltenen ‚windfall-profits‘, also den ohne eigenes Zutun erhaltenen Gewinn durch kostenlose Zuteilung der Emissionszertifikate, begründet. [BMU 2006b]. Weiterhin wurden verschiedene Ausnahmeregelungen gestrichen, um so eine vereinfachte Erfassung zu ermöglichen. Es erfolgt danach keine Zuteilung mehr für stillgelegte Anlagen, Kleinemittenten bis 25.000 t CO₂e werden vereinfacht erfasst, die Optionsregel (Wahl zwischen Behandlung wie Neuanlage oder Bestandsanlage) wurde abgeschafft und ex-post Korrekturen und ‚early actions‘ werden nicht mehr angerechnet.

Für Neuanlagen nach Stand der Technik (BVT) (siehe Benchmark in Tabelle 2.2) findet eine Zuteilung zu 100 % statt, inklusive einer garantierten Frist von 14 Jahren, während derer keine Minderung gefordert wird. Damit soll eine weitere Planungs- und Rechtssicherheit für die Energieversorger gewährleistet sein.

Allerdings wird gleichzeitig für Anlagen mit schlechteren Wirkungsgraden ein Malus von 15 % eingesetzt, um dadurch einen Anreiz zur Modernisierung zu setzen.

Eine Übertragung der zugeteilten Zertifikate ist jederzeit zu 100 % möglich, jedoch ohne Kompensation für die Stilllegung von KKW. Für die Handelsperiode wurde außerdem eine Reserve von 12 Mio. Emissionszertifikaten eingeplant.

Die aus den oben genannten Mechanismen JI und CDM erhaltenen Zertifikate können ferner nur zu maximal 12 % der Gesamtmenge je Anlage beitragen. In Tabelle 2.1 sind die Reduktionsziele der zweiten Handelsperiode im Vergleich zum Zeitraum 2000 bis 2002 dargestellt, sowie im unteren Teil der Vergleich zum Jahr 2004.

Tabelle 2.1: Vergleich der Reduktionsziele von NAP I und NAP II

Minderungsleistung in der <u>zweiten</u> Handelsperiode der Sektoren gegenüber <u>2000-2002</u>	
Energie und Industrie	15 Mio. t. CO ₂ e
Haushalt und Verkehr	21,9 Mio. t. CO ₂ e
Gewerbe/Handel/Dienstleistungen	2,2 Mio. t. CO ₂ e
Minderungsleistung der Sektoren (gegenüber <u>2004</u>)	
Energie und Industrie	27,4 Mio. t. CO ₂ e
Haushalt und Verkehr	6,9 Mio. t. CO ₂ e
Gewerbe/Handel/Dienstleistungen	0 Mio. t. CO ₂ e

Diese quantifizierten Ziele machen den Anspruch deutlich, eine nachhaltige Reduktion der Emissionen zu erreichen.

Im Weiteren werden nun die technischen Maßnahmen zur Erreichung der oben genannten Reduktionsziele, sowie die auf europäischer Ebene definierten Referenzdokumente der besten verfügbaren Technik (BREF – Best available Technique Reference Documents) erläutert.

2.3 Stand der Technik

Nach den bereits vorgestellten weltweiten Abkommen UNFCCC und Kyoto Protokoll und den dort geregelten Reduktionsszielen, gibt es auf europäischer Ebene neben den Aktionsprogrammen der EU [EU 2006c] auch die für die Strom- und Wärmeerzeugung relevante Richtlinie über die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung (IVU-Richtlinie) (engl. „Integrated Pollution and Prevention Control – IPPC“). Die IPPC Richtlinie [2008/1/EC] [96/61/EG] setzt den Rahmen, innerhalb dessen die Mitgliedsstaaten Betriebserlaubnisse für die in ihr definierten industriellen Anlagen erteilen müssen. Die Richtlinie gilt für neue und grundlegend geänderte Anlagen mit Beginn Oktober 1999 und trat im Jahr 2007 auch für alle bestehende Anlagen in Kraft. Die Genehmigungen für Neuanlagen müssen zwingend auf den definierten Stand der Technik Bezug nehmen.

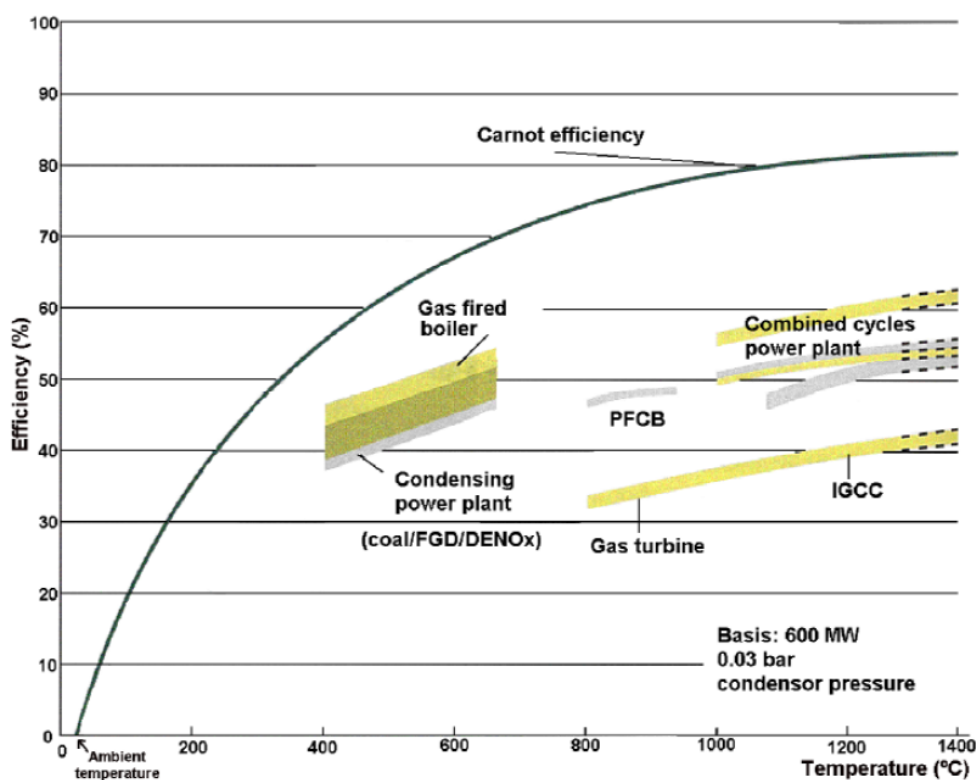


Abbildung 2.8: Vergleich von idealen und technisch erreichten Wirkungsgraden

Hierdurch können EU-weit nur noch effiziente und damit umweltfreundlichere Anlagen genehmigt werden. Neben den erreichbaren Wirkungsgraden aus Abbildung 2.8 wurden auch die zu erreichenden Bereiche der Emissionswerte für Großfeuerungsanlagen nach [2001/80/EG] in Tabelle 2.2 zusammengestellt.

Obwohl die in den BVT-Referenzdokumenten genannten Werte nicht als gesetzlich bindende Grenzwerte gedacht sind, stellen sie dennoch eine sehr gute Orientierung für Industrie, Behörden und Öffentlichkeit dar.

Tabelle 2.2: BVT für NO_x- und CO-Emissionen aus gasgefeuerten Anlagen

Anlagentyp	Emissionswert bei BAT-Anwendung (mg/Nm ³)		O ₂ -Gehalt (%)	Mögliche BVT zur Erzielung dieser Werte
	NO _x	CO		
Gasturbinen				
Neue Gasturbinen	20 - 50	5 - 100	15	Trockene NO _x -arme Vormischbrenner oder SCR
DLN für bestehende Gasturbinen	20 - 75	5 - 100	15	Trockene NO _x -arme Vormischbrenner als Nachrüstpaket, soweit verfügbar
Bestehende Gasturbinen	50 - 90*	30 - 100	15	Wasser- und Dampfeindüsung oder SCR
Gasgefeuerte Kessel				
Neue gasgefeuerte Kessel	50 - 100*	30 - 100	3	NO _x -arme Brenner oder SCR oder SNCR
Bestehende gasgefeuerte Kessel	50 - 100*	30 - 100	3	
GuD-Anlagen				
Neue GuD-Anlagen ohne Zusatzfeuerung (AHDE)	20 - 50	5 - 100	15	Trockene NO _x -arme Vormischbrenner oder SCR
Bestehende GuD-Anlagen ohne Zusatzfeuerung (AHDE)	20 - 90*	5 - 100	15	Trockene NO _x -arme Vormischbrenner oder Wasser- und Dampfeindüsung oder SCR
Neue GuD-Anlagen mit Zusatzfeuerung	20 - 50	30 - 100	anlagen-spezif.	Trockene NO _x -arme Vormischbrenner und NO _x -arme Brenner für den Kesselteil oder SCR oder SNCR
Bestehende GuD-Anlagen mit Zusatzfeuerung	20 - 90*	30 - 100	anlagen-spezif.	Trockene NO _x -arme Vormischbrenner oder Wasser- und Dampfeindüsung und NO _x -arme Brenner für den Kesselteil oder SCR oder SNCR

Als Baustein der IPPC Richtlinie wurden daher die besten Umweltschutzleistungen auf Basis der weltweit verfügbaren Technik ermittelt und als Referenz Dokumente branchenspezifisch zusammengestellt. Diese Referenzdokumente haben weiterhin zum Ziel, die in der jeweiligen Branche bedeutsamsten Umweltprobleme und deren Behandlung sowie die damit verbundenen Kosten zu ermitteln [EIPPCB 2006].

Verglichen mit den aktuell gültigen nationalen Vorschriften ist zu sagen, dass sich die definierten Wertebereiche der BREF Dokumente deutlich am unteren Ende der momentan technisch realisierbaren Werte orientieren, um damit ein beabsichtigtes Zeichen in Richtung Emissionsreduktion zu setzen und neue Technologien zu fördern. Außerdem wurde eine transparente Definition des Stands der Technik erreicht.

In Abbildung 2.9 ist die Projektion der weiteren, europaweit möglichen Vermeidungspotentiale bei Einsatz von Stand der Technik für die Bereiche Gebäudedämmung, Heizungsanlagen, elektrischen Antriebssystemen in der Industrie oder bei bestimmten Maßnahmen in der Optimierung des Antriebsstrangs bei PKW gegeben.

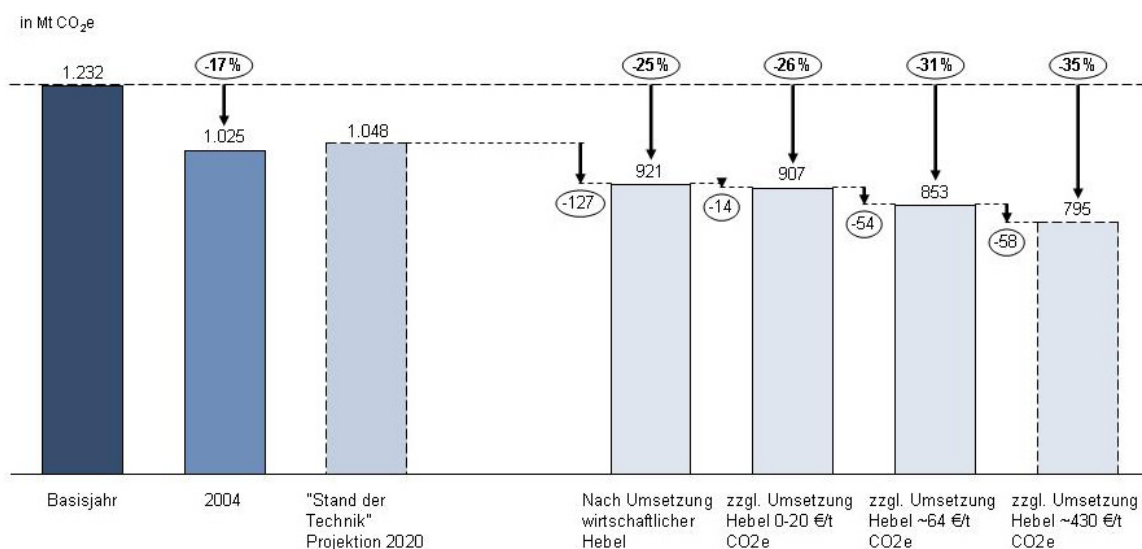


Abbildung 2.9: Perspektiven zur Reduzierung der THG Emissionen [McKinsey 2007]

Weitere 141 Mt CO₂e geringer als für das Stand der Technik Szenario, würden die Emissionen bei Erhöhung des Anteils regenerativer Energien, vor allem Wind und Biomasse, und der Umsetzung wirtschaftlich vertretbarer Maßnahmen mit Vermeidungskosten bis zu 20€/t CO₂ ausfallen [McKinsey 2007]. Das kumulierte Vermeidungspotential, sowie die zugrunde liegenden Annahmen sind im Anhang in Abbildung 9.3 als Vermeidungskostenkurve für den Energiesektor abgebildet.

2.4 Produkt-bezogener Umweltschutz

Das Denken in Lebenszyklen spielt bei der Gestaltung, Bewertung und Optimierung von Produkten (analog ISO 14001) eine entscheidende Rolle. Wie in Abbildung 2.10 ersichtlich, haben die Designentscheidungen im Frühstadium der Produktentwicklung einen erheblichen Einfluss auf das spätere Umweltprofil des Produkts.

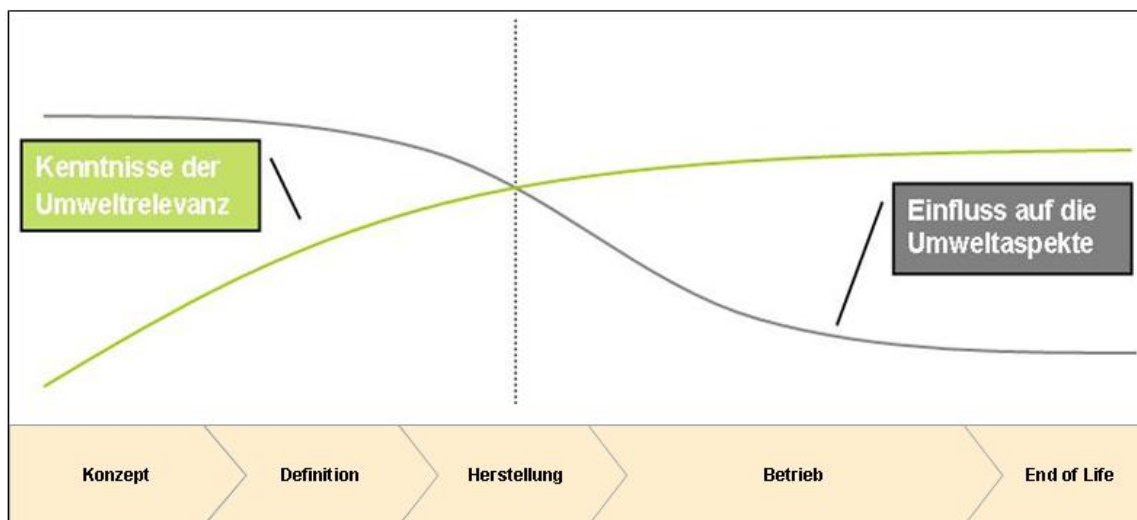


Abbildung 2.10: Auswirkung des Designs auf das Umweltprofil [Züst 1997]

Hieraus abgeleitet ergibt sich die Prämisse, bereits während der Konzeptphase der Produktentwicklung den gesamten späteren Lebensweg des Produkts zu betrachten, bzw. Alternativen und Szenarien vergleichend darzustellen. Die Visualisierung der Auswirkungen über den gesamten Lebensweg beinhaltet neben der einmaligen Erfassung eines Referenzprodukts auch die Anpassung an geänderte Randbedingungen sowie die Integration der Szenarien mehrerer möglicher Alternativen, um unter Berücksichtigung dieser Informationen die für den jeweiligen Fall optimale Wahl treffen zu können.

Zu Beginn der Studie eines Produkts oder Produktsystems spielt, wie in der Einleitung beschrieben, die interne Lernkurve, also eine Steigerung der Detailkenntnisse der Umweltauswirkungen eines Produkts, eine wichtige Rolle. Im Verlauf der Modellierung verschiebt sich der Fokus jedoch in Richtung der Ableitung von Optimierungsstrategien und dem Feedback der erkannten Verbesserungspotentiale in die Konzeptphase. Es werden im Folgenden verschiedene Ansätze und Konzepte vorgestellt, die inhärent den gesamten Lebenszyklus des Produkts, Service, der Anlage oder auch der Dienstleistung betrachten und darüber hinaus eine Minimierung der Umweltauswirkungen anstreben.

Die Anwendung einer solchen Methodik impliziert die Analyse von Designentscheidungen im Frühstadium der Produktplanung, da diese einen erheblichen Einfluss auf das spätere Umweltprofil über den gesamten Lebenszyklus besitzen (vgl. Abbildung 2.10). Im Lasten- und Pflichtenheft sollte daher explizit eine Analyse und erste Abschätzung der Auswirkungen des Produkts von seiner Herstellung, über die Gebrauchsphase, bis hin zum End of Life - also über den gesamten Lebensweg - gefordert bzw. berücksichtigt werden. Dieses Konzept der Lebenszyklusanalyse (engl. Life Cycle Assessment - LCA) oder Ökobilanz ist auf internationaler Ebene in der Normenreihe DIN ISO 14040 und 14044 festgeschrieben [ISO 14040] [ISO 14044]. Hiermit wurde ein Rahmen definiert, der die Methodik des LCA als ein Hilfsmittel zur erfolgreichen Umsetzung einer nachhaltigen Produktgestaltung innerhalb des Umweltmanagementsystems (UMS) einer Firma einordnet - gleichzeitig aber durch die Komplexität der Anwendung und Umsetzung über den Inhalt und Umfang eines herkömmlichen UMS hinausgeht und daher in vielen Fällen nur punktuell eingesetzt wird [Ertel 2008]. Die logische Konsequenz in der Anwendung des Kontinuierlichen Verbesserungsprozesses (KVP) ist die Weiterentwicklung dieser Werkzeuge und Erhöhung der Detailtiefe zur Ermittlung der Umweltbelastungen und Umweltauswirkungen von Produkten, Lösungen oder Dienstleistungen. Das vorausschauende Element dieser Betrachtung ermöglicht die Abbildung zukünftiger Trends und Entwicklungen. Als Beispiel und als Hilfestellung für Produktdesigner können Energie- und Schadstoffprofile unterschiedlicher Werkstoffe oder Fertigungsverfahren dienen, welche eine ökologische Betrachtung und damit einen Vergleich des so genannten ökologischen Rucksacks ermöglichen, d.h. der bereits in der Vorkette verbrauchten Ressourcen und eingesetzten Energie. In Kapitel 6.2 wird ein solches Tool vorgestellt, welches es dem Produktentwickler ermöglicht, mit hinterlegten Umweltprofilen von Werkstoffen in kurzer Zeit und ohne die Notwendigkeit einer umfassenden Lebenszyklusanalyse eine vergleichende Abschätzung durchzuführen.

Die Vorteile einer solchen Betrachtung sind also die Produktoptimierung, Prozessverbesserung und Verbesserung des Umweltprofils, aber auch die Verwendung zum Marketing und eine Erhöhung der Transparenz der Produktstruktur z. B. für die Einhaltung von gesetzlichen Regelungen (z. B. Stoffverbote). Diese Erweiterung des Umweltmanagementsystems, das Konzept des Life Cycle Management (LCM), geht, wie schon erwähnt, weit über die bloße Einführung eines Umweltmanagementsystems und die vereinzelte Durchführung von Lebenszyklusanalysen hinaus – es wird vielmehr ein Rahmen für alle Prozesse und Aktivitäten mit Umweltbezug gebildet und es ist daher der wegweisende Schritt in Richtung Steigerung der Nachhaltigkeit von Produkten und Prozessen.

Einen weiteren wichtigen Baustein, um die durch eine Lebenszyklusanalyse erhaltenen Informationen zielgerichtet einzusetzen – vor allem im Vertrieb und Marketing – und gegebenenfalls zu veröffentlichen, liefert die Normenreihe ISO 14020ff. Die drei abgestuften Arten einer Produktumwelterklärung (engl. EPD – Environmental Product Declaration) sind wie folgt definiert:

- Umweltkennzeichnung (Typ I analog ISO 14024)
- umweltbezogene Anbietererklärung (Typ II analog ISO 14021) und
- extern verifizierte Ökobilanz (Typ III analog ISO 14025)

Diese Abstufung stellt eine sinnvolle Anpassung des Rahmens der zu kommunizierenden Inhalte an die Bedürfnisse unterschiedlicher Zielgruppen dar und stattet den Ersteller mit ausreichend Freiheitsgraden aus, um die Umweltleistung seines Produkts in einer einheitlichen Art und Weise darzustellen. Der potentielle Mehrwert wird in Form einer positiven Darstellung der Produkteigenschaften mit Umweltrelevanz generiert.

Während eine Kennzeichnung nach Typ I einem vom Hersteller ausgesuchten Label (Blauer Engel, EnergyStar, etc.) und dessen Anforderungen entspricht, müssen für eine Typ II Erklärung weiteren Anforderungen, wie Darstellung der relevanten Umweltauswirkungen über den Lebensweg, erfüllt werden. Die genauen Formulierungen wie z. B. „Recyclingfähig“ sind in der Norm definiert, um unscharfe Formulierungen auszuschließen. Im Endeffekt sollte schon hier eine Lebenszyklusanalyse durchgeführt worden sein, um die notwendige Datenbasis zur Zusammenstellung der Informationsmodule verfügbar zu haben. Für Typ III Erklärungen müssen außerdem die Produktkategorien (PCR) sowie die ausgewählten Indikatoren branchenspezifisch festgelegt werden, um die Ergebnisse unterschiedlicher Studien der gleichen Produktgruppe vergleichbar zu machen und damit die Rahmenbedingungen für den legitimen Einsatz der Ergebnisse als Marketinginstrument festzulegen. Auch ist eine externe Verifizierung durchführen zu lassen.

Unabhängig von der Wahl der Form, bietet die Erstellung einer Produktumwelterklärung die Möglichkeit, die positiven umweltrelevanten Entwicklungen eines Produkts zu quantifizieren, visualisieren und kommunizieren.

2.5 Design for the Environment

Die technischen Aspekte von Designentscheidungen zur Verringerung der Umweltbelastung und deren Auswirkungen wurden Anfang der 80er Jahre zum ersten Mal berücksichtigt. Mitte der 90er Jahre wurde das Konzept dann erweitert und bekannt als Design for the Environment (DfE) – synonym werden auch Green Design und Eco Design verwendet [Graedel und Allenby 1995]. Weiterhin wurde die übergeordnete Thematik durch die sogenannte Integrierte Produktpolitik (IPP) der Europäischen Kommission aufgegriffen und in der ‚*Thematic Strategy on the Sustainable Use of Natural Resources*‘ [EU 2006c] weiterverfolgt. Der Gedanke dahinter lautet, nicht nur die Produkte, sondern auch die Prozesse, die zur Herstellung eines Produkts notwendig sind, zu analysieren und auf Optimierungspotential hin zu untersuchen [Guidice et al. 2006].

Die Vorgehensweise des Konzepts gliedert sich in:

- Produktanalyse
- ökologische Analyse und Evaluierung
- Schwachstellenanalyse
- Optimierung der Schwachstellen (Detailoptimierung)
- Anpassung des Gesamtdesigns

Um diese Vorgehensweise auch in allen Phasen des Produktlebenszyklus integrieren zu können, bzw. um die jeweils speziellen Anforderungen identifizieren zu können, eignen sich Leitfäden oder Checklisten, in denen die für die jeweilige Phase relevanten Anforderungen aufgelistet werden. Ein Beispiel ist die firmen-interne Siemens Norm SN 36350 „Umweltverträgliche Produkte und Anlagen“ [Siemens AG 2007]. In dieser, aus mehreren Teilen bestehenden, internen Norm werden allgemeine und spezielle Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Produkten und Anlagen zusammengefasst und bereitgestellt. Es werden die für jeden Prozessschritt relevanten Anforderungen, wie z. B. geltende Stoffverbote aufgeführt. Weiterhin beinhaltet der genereller gehaltene Leitfaden Hinweise zu DfE-Themen wie z. B. Reduktion der Materialvielfalt oder Verbesserung der Demontagemöglichkeit.

Sind alle diese Punkte implementiert, wird an Hand von definierten Bewertungskriterien die Umsetzung sowie deren Qualität mittels eines Punktesystems beurteilt. Diese interne Bewertung stellt einen Teil des KVP dar und es werden hiermit Priorisierungen durchgeführt und Ziele für das integrierte Managementsystem abgeleitet.

Nach [Ehrenfeld & Lenox 1997] wurden die sogenannten 10 goldenen Regeln des Ecodesign aufgestellt:

1. Materialeinsatz minimieren durch Verwendung von rezykliertem und rezyklierbarem Material und Vermeidung von giftigen und schadstoffhaltigen Stoffen
2. Maximierung der austauschbaren oder rezyklierbaren Materialien
3. Reduktion der Emissionen und des Abfalls während der Herstellung
4. Steigerung der Energieeffizienz in Herstellungs- und Nutzungsphase
5. Steigerung der Zuverlässigkeit und Wartungsfreundlichkeit des Systems
6. Erleichterung der Rückgewinnung von Stoffen und Ressourcen durch Planung der Zerlegung
7. Steigerung der Lebensdauer des Produkts (*für Kraftwerke nur unbedingt zutreffend*)
8. Planungsstrategie zur Rückgewinnung von Ressourcen am Lebensende, Erleichterung von Wiederverwendung, Recycling und Verringerung von Abfall
9. Kontrolle und Begrenzung der Kosten zur Optimierung der Umweltleistung
10. Einhaltung von rechtlichen Vorgaben und Bewertung der Entwicklung der Gesetzesvorhaben

Die Implementierung innerhalb der Siemens AG als verbindliche Vorgabe für die Lebensphasen ist in Tabelle 2.3 als Beispiel gegeben.

Tabelle 2.3: Produktlebensphasen und dazugehörige Strategien [Siemens AG 2007]

Produktplanung	Ermittlung der rechtlichen Anforderungen, umweltbezogene Kundenforderungen, umweltbezogenen Ziele definieren, Abschätzung der Auswirkungen über gesamten Lebensweg (LCA)
Produktrealisierung	Anwendung der vorhandenen Checklisten und Tools, z. B. Verpackungsoptimierung
Beschaffung	Einbindung der Lieferanten, Informationen über eingesetzte Materialien und Prozesse
Herstellung	Einsparung von Energie, Reduktion des Einsatzes von BHS
Vertrieb/Service	Erstellen von Produkt-Umwelterklärungen Optimierte Logistik, Konzepte für Rücknahme und Refurbishment
Gebrauch	Optimierung der Betriebsphase, Minimierung des Eigenbedarfs, Kontakt für Kundenfragen
Demontage/Entsorgung	Konzepte für Recycling, Wiederverwendung, Verwertung, Erfahrungsrückfluss zu Produktdesign

Neben diesen Umsetzungen auf Produkt- und Firmenebene wurde das Konzept der erweiterten Herstellerverantwortung im Sinne eines Denkens in Lebenszyklen auch von der Europäischen Kommission im Rahmen des Grünbuchs [EU IPP 2001] integriert. Dieses wurde im Jahr 2003 aktualisiert und konkretisiert [EU IPP 2003], indem fünf Grundsätze formuliert wurden:

1. Denken in Lebenszyklen: Betrachtung des gesamten Lebenszyklus eines Produktes ("von der Wiege bis zur Bahre")
2. Zusammenarbeit mit dem Markt:
Setzen von Anreizen, so dass der Markt das Angebot von und die Nachfrage nach umweltgerechteren Produkten fördern
3. Einbeziehung aller Beteiligten Interessengruppen
4. kontinuierliche Verbesserung
5. Nutzung politischer Instrumente

Die zwei Schwerpunkte der IPP-Strategie lauten:

Schaffung von 'Rahmenbedingungen': die Förderung politischer Maßnahmen und Instrumente (wie freiwillige Abkommen, grünes Beschaffungswesen, Steuern und Zuschüsse, Datenbank zur Lebenszyklusanalyse, EMAS, Öko-Kennzeichnung), die für viele verschiedene Produkte Anwendung finden sollen

- a) ein produktspezifischer Ansatz
Identifizierung der umweltschädlichsten Produkte und die Entwicklung von Pilotprojekten für diese Produkte
- b) erweiterte Herstellerverantwortung für die Entsorgung von Produkten am Ende ihrer Lebensdauer

In der „Waste Electric and Electronic Equipment Direktive (WEEE) [2002/96/EC], ergänzt durch die Direktive 2003/108/EC, werden für Haushaltsgeräte und andere elektrische und elektronische Geräte (z. B. Telekommunikation, Beleuchtung, Medizingeräte, etc.) ähnliche Ziele genannt. Die festgelegten Prinzipien sind:

- Die Hersteller müssen die Sammlung, Behandlung, Wiedergewinnung und umweltfreundliche Beseitigung der genannten Produkte von privaten Haushalten sicherstellen und festgelegte Zielgrößen für Wiedergewinnung und für die rezyklierbare Fraktion einhalten

- Der Inverkehrbringer hat die Pflicht, alte Geräte zurückzunehmen, wenn er neue in Verkehr bringt
- Alle Produkte, die in eine der genannten Produktgruppen fallen, um innerhalb der Europäischen Union in Verkehr gebracht zu werden, müssen mit dem dafür vorgesehenen Symbol, einer durchgestrichenen Mülltonne, versehen werden

Die Mitgliedsstaaten müssen das Design und die Herstellung von Geräten fördern, die WEEE-konform gestaltet wurden.

Die Kernpunkte der End-of-Life Vehicles (ELV oder Altautoverordnung) [2000/53/EC] sind:

- Vermeidung von Abfall von Automobilen und Verbesserung des Umweltprofils für den gesamten Lebenszyklus eines Automobils
- Wiederverwendung und Wiedergewinnung von Abfall, und das Treffen von Vorkehrmaßnahmen in der Designphase, damit das Recycling erleichtert und Sonderabfall vermieden wird
- Detaillierte Zielgrößen für Recycling- und Wiedergewinnungsraten

Neben der beschriebenen WEEE und ELV wurde eine integrierte Produktpolitik auch durch die RoHS (Ziele u. a.: bleifreie Verlotung elektronischer Bauteile, Ersatz für giftige Flammschutzmittel) eingefordert. In Deutschland werden WEEE und RoHS durch das Elektro- und Elektronikgerätegesetz [ElektroG 2005] geregelt.

Des Weiteren werden Energieeffizienz und Energiebedarf durch die EuP Richtlinie [2005/32/EC] (Ecodesign of Energy using Products) für bestimmte Produktgruppen im Sinne eines methodischen Rahmens adressiert. Diese Richtlinie ist in nationales Recht umgesetzt und mit konkreten Zielen versehen.

Kern der Betrachtung der verschiedenen Produktgruppen ist die Forderung nach der Erstellung einer kompletten LCA. Aus den Ergebnissen der Vorstudien für die betrachteten Produktgruppen werden dann sogenannte Implementing Measures definiert, um die identifizierten Verbesserungspotentiale der Produkte zu realisieren.

Die ISO TR 14062 [ISO 14062] dient als Leitfaden und Ergänzung der bestehenden ISO 14000 Reihe und stellt einen praktischen Ratgeber dar (Der Zusatz TR steht für ‚Technical Report‘). Dies bedeutet, es handelt sich um eine Checkliste für die unterschiedlichen und verschieden gelagerten Umweltaspekte eines Produkts, aber auch einer Dienstleistung oder Lösung. Um alle Aspekte eines Produkts zu erfassen, ist es notwendig, alle Ebenen der Produktnachhaltigkeit zu betrachten und darauf angepasste Strategien abzuleiten.

Auf oberster Ebene muss eine abgestimmte Firmenstrategie auch über die Systemgrenzen des eigenen Produkts hinaus analysieren, ob z. B. im Extremfall gerade der Ersatz des Produkts durch eine ähnlich gelagerte Dienstleistung (Software) eine sowohl umweltfreundlichere als auch günstigere Möglichkeit darstellt, bei mindestens gleichem Kundennutzen, effizienter zu produzieren.

Weiterhin wird die Integration und Harmonisierung der unterschiedlichen Managementsysteme wie z. B. Umweltmanagementsystem (ISO 14001), Qualitätsmanagementsystem (ISO 9001), und Arbeitssicherheitsmanagementsystem (OHSAS 18001) vorangetrieben, da auf allgemeiner Ebene die Elemente des Managementsystems adressiert und auch die Begrifflichkeiten harmonisiert verwendet werden [Quella 2003].

Diese Harmonisierung bildet ein Teil des Puzzles im Rahmen der ganzheitlichen Produktstrategie, die ein Optimum aus einer Gleichung mit mehreren Variablen bzw. Unbekannten darstellt:

- Verwendung eines leichteren und umweltfreundlicheren Materials bei gleichzeitiger Reduzierung der Kosten
- Explizite Zielstellung schon in der Designstrategie, nicht nur Materialien zu ändern, sondern eine mit Marktdaten und an Hand von Kundenwünschen belegte Strategie entwickeln, um in allen Stufen der Produktenwicklung eine nachhaltige Verbesserungen zu erzielen.

Das für diese Art der Betrachtung adäquate Hilfsmittel, die Lebenszyklusanalyse wird im folgenden Kapitel theoretisch beschrieben und später in der Anwendung ausführlich dargestellt.

Neben der Anwendung dieser Methodik und der im Rahmen dieser Arbeit erarbeitete weitgehenden Betrachtungen bleibt die Interpretation als abschließende Bewertung und Einordnung in das jeweilige Umfeld der entscheidende Schritt.

2.6 Lebenszyklusanalyse

Die international anerkannte und standardisierte Methode zur Bestimmung der Umweltauswirkungen eines Produkts über den gesamten Lebensweg wird, wie oben bereits beschrieben, Lebenszyklusanalyse, Ökobilanz oder englisch Life Cycle Assessment (LCA) genannt und ist durch die beiden ISO Standards ISO 14040 und 14044 festgeschrieben. Die erste Version der DIN EN ISO 14040 stammte aus dem Jahr 1997 und beschrieb wie im Titel enthalten die Prinzipien und allgemeinen Anforderungen an eine Ökobilanz. Die neue ISO 14040 (siehe Abbildung 2.11) enthält die allgemeine Beschreibung, die vorgeschriebenen Elemente (Teile der 14041, 14042 und 14043) sowie Hintergrundinformationen zur allgemeinen Durchführung einer LCA. Konkrete Anwendungsbeispiele und Vorgaben zur Erstellung von Berichten werden dann parallel zur Struktur von ISO 14001 und 14004 in der neuen DIN EN ISO 14044:2006 Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen gegeben. Weitere Hinweise werden im ‚ISO/Technical Report 14047:2001 Illustrative examples on how to apply ISO 14042 – Life Cycle Assessment – Life Cycle Impact Assessment‘ gegeben, der als weitere Ergänzung zu den beiden neuen Standards gesehen werden kann. Damit soll im Ganzen eine standardisierte Definition der Methodik und eine Vereinheitlichung geschaffen werden.

Die Lebenszyklusanalyse oder Ökobilanz hat sich als populäres und anerkanntes Hilfsmittel etabliert, um die Umweltleistung von Produkten zu bestimmen [de Beaufort 2003]. Eine LCA betrachtet per definitionem den gesamten Lebenszyklus eines Produkts, von der Wiege bis zu Bahre (engl. cradle to grave), d.h. es werden von der Gewinnung der Rohstoffe, über die Fertigung eines Halbzeugs und die Nutzungsphase bis hin zur Entsorgung des Produkts alle relevanten Umweltauswirkungen erfasst und bewertet. Diese ganzheitliche Betrachtung ermöglicht erst einen objektiven Vergleich und Einordnung der jeweiligen Beiträge zur Umweltbelastung in das Gesamtbild.

Die Betrachtung eines Produkts über den gesamten Lebenszyklus ist für sich keine Innovation, wie oben beschrieben adressiert das Konzept des Design for the Environment (DfE) die selbige Herangehensweise. Die ganzheitliche Betrachtung inklusive der Bewertung entwickelt jedoch gerade dadurch ihren Mehrwert bzw. das „Mehr“ an Information, dass die Umweltauswirkungen der Designentscheidungen a priori dargestellt werden und damit in die Entscheidungsfindung einbezogen werden können. Eine Steigerung der Nachhaltigkeit von Produkten lässt sich somit quantifizieren und darstellen.

Eine Ökobilanz besteht nach ISO 14040 aus den in Abbildung 2.11 beschriebenen Elementen.

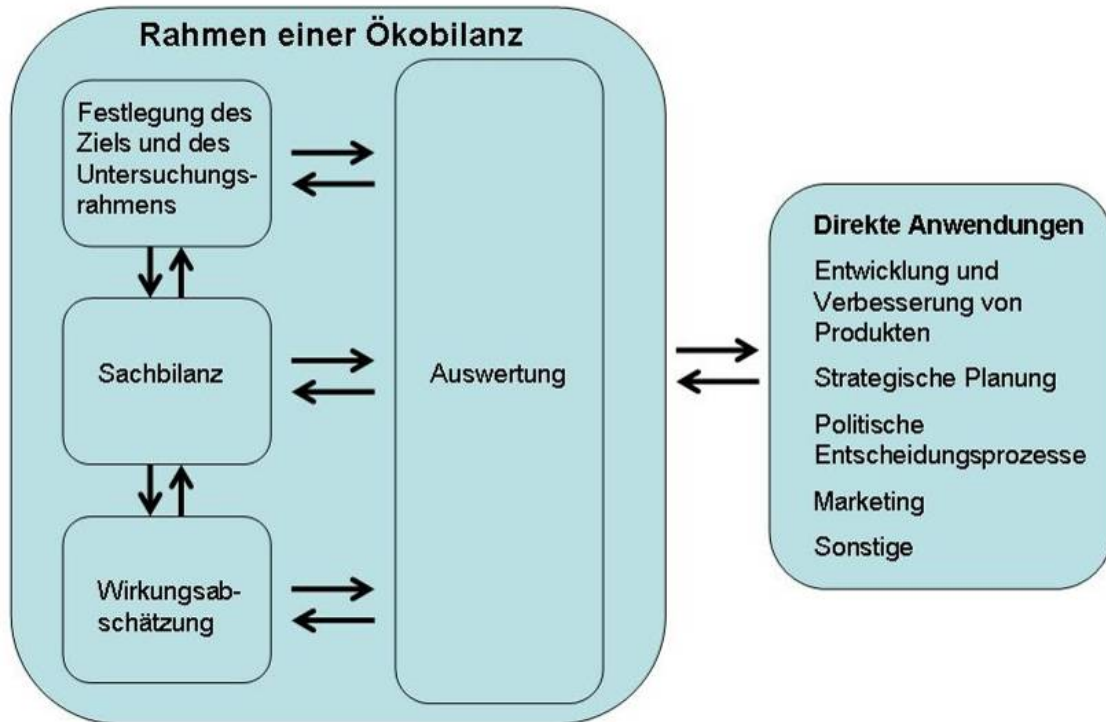


Abbildung 2.11: Die Elemente einer Ökobilanz [ISO 14040]

Fett gehaltene Worte kennzeichnen im Folgenden die **Pflichtelemente der Norm**.

Im ersten Schritt werden das **Ziel** und der **Untersuchungsrahmen** der Studie festgelegt. Für den späteren Bezug der Ergebnisse und für die Modellierung der **Systemgrenzen** wird dann die sehr entscheidende **Funktionelle Einheit** bestimmt. Diese bildet die Bezugsgröße für alle Elementarflüsse innerhalb des modellierten Systems. Eine strikte Festlegung der Systemgrenzen sowie des Untersuchungsrahmens zu Beginn der Studie verhindert eine zu starke Fokussierung auf weniger relevante Aspekte des in fast allen Fällen sehr komplexen und recht unüberschaubaren Modells des Produktsystems. Bereits an dieser Stelle muss durch gründliche Vorbereitung die Grundlage für eine transparente und nachvollziehbare Studie gelegt werden, die wenn gewünscht, die Ansprüche und Anforderungen einer unabhängigen Verifizierung erfüllen kann. Stoffflussdiagramme, die die Unit-Prozesse und ihre Verbindungen darstellen, sollten die Phasen des Lebenszyklus, die elementaren Stoffflüsse und die Unit-Prozesse beinhalten.

Die Beschreibung der Unit-Prozesse wird auf Basis der Rohstoffe oder Zwischenprodukte, Prozessschritte der Herstellung und Verarbeitung und finalen Produkte dargestellt. Input und Output von Energie wird wie jeder andere Stofffluss behandelt, sollte jedoch für die Produktion von Brennstoffen und Prozessenergie innerhalb der Systems relevante Informationen enthalten. Input- und Outputdaten können auch von Anfang an in Kategorien wie Emissionen in Luft, Wasser und Land, Lärm, Landnutzung, Strahlung, Geruch und Abhitze getrennt erfasst werden. Falls die Daten einer Kategorie besonders hervorgehoben werden sollen, kann auch ein Indikator wie z. B. Biologischer Sauerstoffbedarf (BSD) oder Feinstaubemissionen (PM 2.5) verwendet werden.

Die Auswahl der originären Input und Output Datensätze findet während der Definition des Umfangs der Studie statt, da bereits dort eine erste Auswahl der relevanten zu berücksichtigenden Unit-Prozesse stattfindet. Zur Berücksichtigung in einer LCA können verschiedene Kriterien herangezogen werden, wie z. B. Gewicht, Energie oder die Umweltrelevanz. Abhängig vom gewählten Kriterium müssen jeweils alle Beiträge modelliert werden, die oberhalb des gewählten Abschneidekriteriums liegen und die kumulativ zum Input beitragen.

Ein weiterer Aspekt, der beachtet werden muss, ist die Dokumentation der Datenqualität. Diese ist ein guter Indikator für die Verlässlichkeit der Ergebnisse und insbesondere wichtig zur Interpretation der Ergebnisse. Indikatoren, die herangezogen werden, sind z. B. Aktualität der Daten, geographische Gültigkeit/Begrenzung und berücksichtigte Technologie. Weiterhin sollte angezeigt werden, ob die Daten aus Literaturrecherchen stammen, gemessen wurden oder aber qualifiziert geschätzt wurden. Abschließend ist es sinnvoll, die Varianz der Ergebnisse, die Vollständigkeit und die Repräsentativität der Daten anzufügen.

Die **Sachbilanz** (engl. Life Cycle Inventory – LCI) beinhaltet die vollständige **Modellierung** des Produktsystems und damit eine Sammlung von Prozessmodulen und Elementarflüssen, die in aufwendiger Arbeit zusammengetragen werden müssen. Die Datensammlung kann sich als sehr zeitaufwendig gestalten, gerade wenn Daten von Dritten eingefordert werden müssen [Frankl und Rubik 2000]. Eine Strategie kann sein, als Firma die Unterlieferanten in die LCA Aktivitäten einzubinden, indem als Gegenleistung die erarbeitete LCA Studie der gelieferten Komponente zur Verfügung gestellt wird.

Ein sehr wichtiger Faktor für die weitere Bewertung der Inputs und Outputs ist die **Datenqualität**. “For LCA Models, like any other models, it holds that ‘garbage in = garbage out’ [Guinée 2001]. Es wird zwischen ‚Primärdaten‘ aus direkter Messung und ‚Sekundärdaten‘ aus anderen Quellen unterschieden. Außerdem spielt die geographische Gültigkeit und Aktualität der Daten eine wichtige Rolle. Weiterhin müssen alle getroffenen Annahmen bei der Erfassung und Modellierung dokumentiert werden, sowie ein eindeutiges **Abschneidekriterium** der beitragenden Stoff- oder Energieflüsse definiert werden (z. B. 5 % am Gesamtmassenanteil oder mind. 1 % Beitrag zur Gesamtumweltauswirkung). Ein Beispiel für eine gängige Datenbank, die in den kommerziellen Softwarepaketen erhältlich sind, ist dieecoinvent Datenbank [Frischknecht 2005]. Es sind darin sämtliche Vorketten der modellierten Prozesse transparent dokumentiert und es findet eine regelmäßige Aktualisierung statt. Daneben enthalten die Softwarepakete weitere kommerzielle und spezifische Datenbanken mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad und heterogener Transparenz. Momentan wird zum Beispiel innerhalb Deutschlands an der Bereitstellung eines harmonisierten Datensatzes für die Energiebereitstellung gearbeitet [Viebahn 2007]. Weiterhin muss die Frage der **Allokation** der Emissionen zu Stoffflüssen oder Energieflüssen festgelegt werden.

Die Sachbilanz verbindet allgemein die Unit-Prozesse eines Produktsystems anhand von Energie- oder Materialflüssen, d.h. die Zwischenprodukte können an anderer Stelle wieder in den Produktlebenszyklus eintreten (recycled oder als Rohstoff). Es muss daher eine konsistente Allokation von Energie und Massenströmen (zusätzlich zu den Umweltauswirkungen) für jeden Prozessschritt stattfinden. Eine Allokation kann für Co-Produkte, Energie, Exergie, Dienstleistungen (z. B. Transport) und Recycling (open- und closed-loop) durchgeführt werden. Wenn eine Aufteilung von Stoffströmen nicht verhindert werden kann – die ISO 14040 empfiehlt eine Erweiterung der Systemgrenzen wenn möglich – müssen physikalischen Parameter (z. B. Masse) herangezogen werden.

Sollten diese auch nicht eindeutig zuordenbar sein, können die Ströme auch an Hand anderer Parameter alloziert werden (z. B. ökonomische Parameter wie Wert in €).

An diesem Punkt kann die Studie als Sachbilanzstudie (LCI Study) bereits beendet werden - der Weg war jedoch das Ziel und daher kann man diesen Schritt, nämlich die Erstellung der Sachbilanz als die eigentliche Leistung bei der Erstellung einer Lebenszyklusanalyse hervorheben – in ihr steckt der größte Teil des Aufwands. Durch die im Idealfall modular aufgebaute Prozessstruktur können später verschiedene Herstellungsvarianten und Szenarien modelliert und analysiert werden.

In der Phase der **Wirkungsabschätzung** werden (vgl. Abbildung 2.12) die aus der Sachbilanz gewonnenen Ergebnisse durch eine vorher festgelegte Auswahl von Indikatoren qualitativ und quantitativ in Umweltauswirkungen übersetzt und als solche quantifiziert wiedergegeben. In der **Klassifizierung** werden die Ergebnisse der Sachbilanz in Gruppen zugeordnet. Im letzten Schritt findet dann die **Charakterisierung** der Ergebnisse statt, um eine Quantifizierung der Indikatoren zu erreichen. Für die Wirkungskategorie Globale Erwärmung lautet die gemeinsame Einheit zur Berechnung der Ergebnisse ‚kg CO₂ Äquivalente‘.

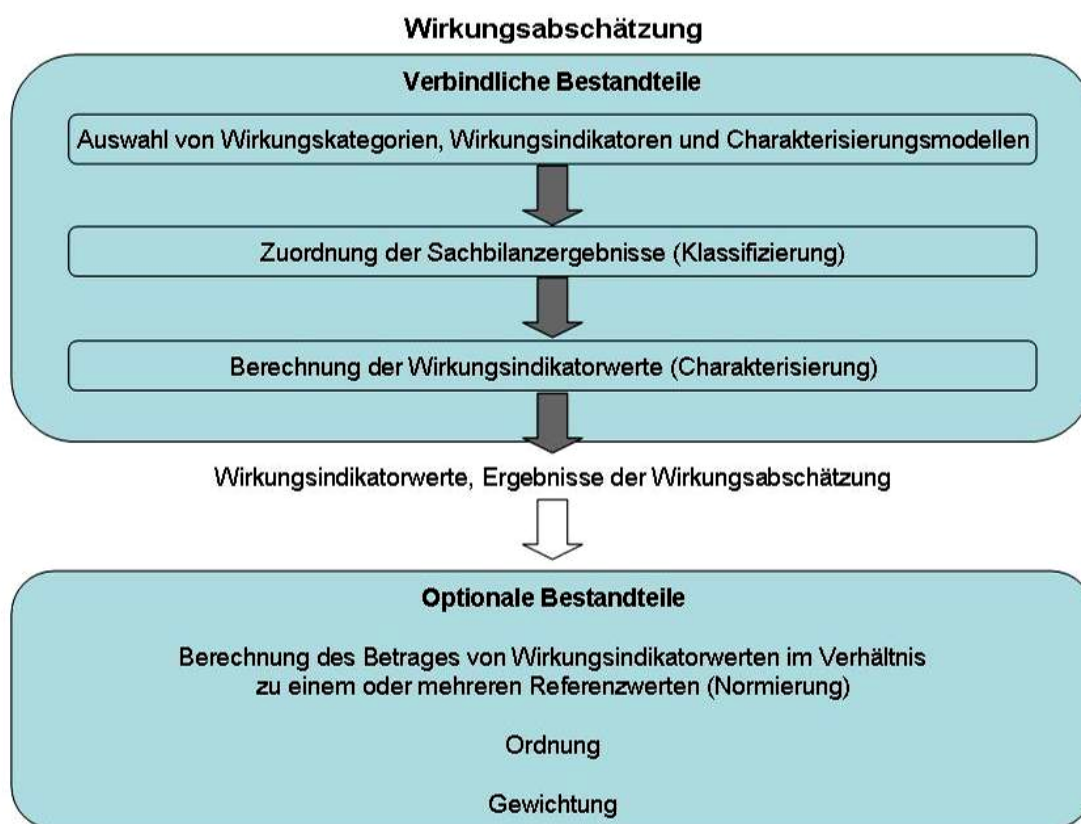


Abbildung 2.12: Elemente der Wirkungsabschätzung [ISO 14040]

Für alle Kategorien müssen adäquate Indikatoren ausgewählt werden. So ist z. B. die Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre ein Indikator für die globale Erwärmung. Die Auswirkungen, wie z. B. globale Erwärmung, Abbau der Ozonschicht, Versauerung von Boden, Ressourcenabbau, etc. sind wiederum unterteilt in lokale, regionale und globale Kategorien. Die Methode Impact 2002+ in Abbildung 2.13 beruht auf Bestandteilen etablierter Methoden, die jedoch um neue Faktoren (siehe auch Tabelle 2.4) ergänzt wurden [Jolliet 2003]. Jedem Sachbilanzergebnis wird der entsprechende Charakterisierungsfaktor der Methode zugeordnet.

Es gibt keine standardisierte Methodik für die Wirkungsabschätzung – gerade deshalb erfordert dieser Schritt ein Höchstmass an Transparenz, um die Zuordnung zu den jeweiligen Wirkungskategorien nachvollziehbar zu machen und um methoden-inhärente Annahmen und Werthaltungen darzustellen.

$$\Sigma \text{ Wirkungsindikatorergebnis} = \Sigma [\text{Zugeordnetes Sachbilanzergebnis des Stoffes} \times \text{Charakterisierungsfaktor des Stoffes}]$$

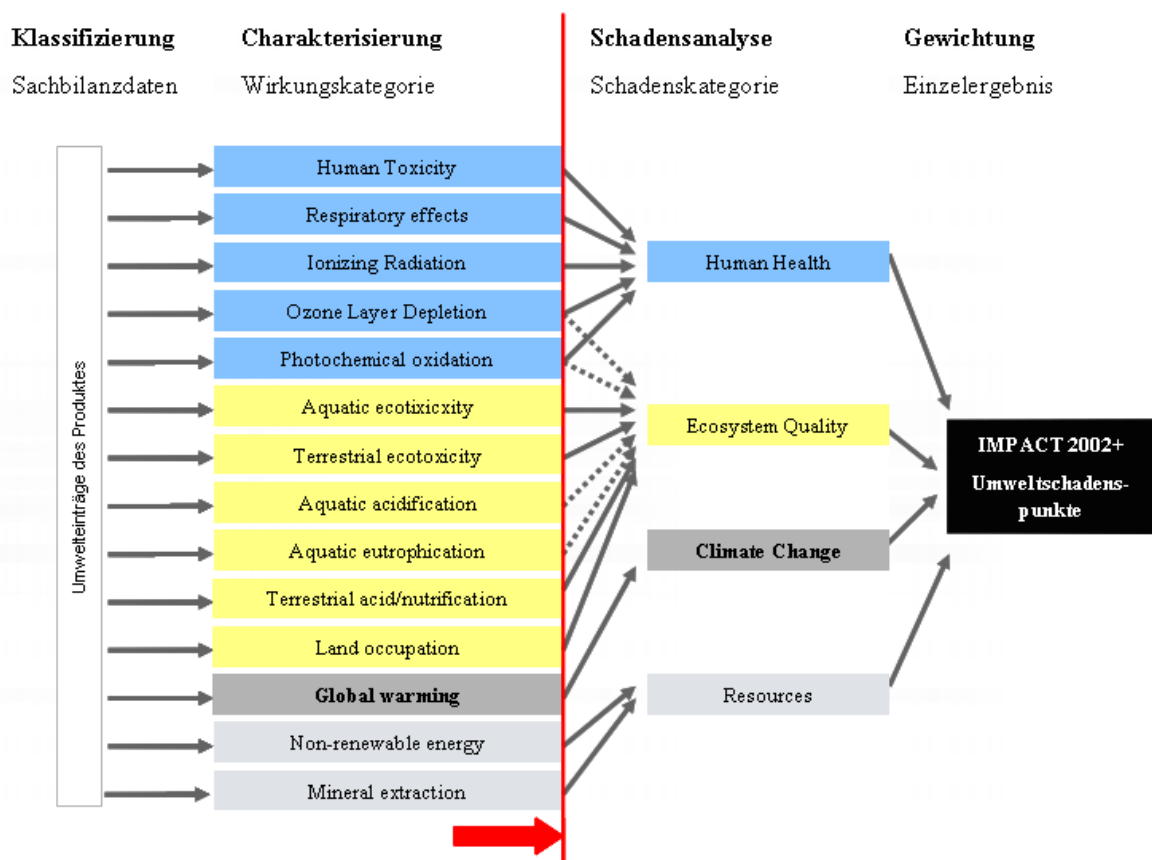


Abbildung 2.13: Aufbau der Methode zur Wirkungsabschätzung IMPACT 2002+

Bei der Auswahl von Wirkungskategorien und Charakterisierungsmodellen muss besonderes Augenmerk darauf gelegt werden, dass die Wahl im Einklang mit dem Ziel und Umfang der Studie steht, und dass Quellen und getroffene Entscheidungen transparent und nachvollziehbar dokumentiert sind.

Die beschriebenen vorgeschriebenen Schritte der Wirkungsabschätzung sind Bestandteil der definierten Methoden und als solche in LCA Software Lösungen implementiert.

Weiterhin sind diese aber auch in eigenständiger Form, z. B. in Form von MS Excel Tabellen erhältlich. Im Anhang sind in Tabelle 9.2 die aktuell verfügbaren Methoden aufgelistet.

Tabelle 2.4: Wirkungs- und Schadenskategorien der Methode IMPACT 2002+

Wirkungskategorien	Äquivalenzeinheit der Wirkungskategorie	Schadensfaktoren	Schadenskategorien	Einheit
Carcinogens	kg C ₂ H ₃ Cl in Luft	1,45E-06	Human Health	DALY
Non-Carcinogens	kg C ₂ H ₃ Cl in Luft	1,45E-06		
Respiratory inorganics	kg PM _{2,5} in Luft	7,00E-04		
Ozone layer depletion	kg CFC-11 in Luft	1,05E-03		
Ionizing radiation	Bq C-14 in Luft	2,10E-10		
Photochemical Oxidation	kg Ethylen in Luft	2,13E-06		
Aquatic ecotoxicity	kg TEG in Wasser	8,88E-05	Ecosystem Quality	PDF*m ² *a
Terrestrial ecotoxicity	kg TEG in Boden	8,88E-05		
Terrestrial acidification/nitrification	kg SO ₂ in Boden	1,04		
Land occupation	m ² kulturfähiges Land	1,09		
Global Warming	kg CO ₂ in Luft	1,00	Climate Change	kg CO ₂ e
Non-renewable energy	MJ primär Energie oder kg Rohöl (860kg/m ³)	5,10E-02	Resources	MJ
Mineral extraction	MJ zusätzlicher Energie oder kg Eisen (im Erz)	45,60		

Notwendigerweise sollte das gewählte Charakterisierungsmodell die Umweltauswirkungen des Produktsystems in geeigneter Weise abbilden. Bei der Auswahl einer bestimmten Methode sollte neben einer ausreichende Reife der Entwicklung auch auf die Vermeidung von double-counting, also der gleichzeitigen Bilanzierung einer Emission in zwei unterschiedlichen Wirkungskategorien, vermieden werden.

Entscheidend ist letzten Endes jedoch die Relevanz am Gesamtbeitrag der Wirkungskategorie. Diese Relevanz ist nur davon abhängig, wie gut der Indikator die Auswirkungen des Sachbilanzergebnisses auf den Kategorieendpunkt abbilden kann. Hier sollten auch die relative Größe, temporäre und räumliche Aspekte sowie die Umkehrbarkeit und die Unsicherheit der Umweltmechanismen berücksichtigt werden.

Besonderes Augenmerk muss auch auf Sachbilanzergebnisse gelegt werden, die zu mehr als einer Wirkungskategorie zugeordnet werden können. (Unterscheidung zwischen seriellen und parallelen Mechanismen).

Bei der schadensorientierten Bewertungsmethode Eco-Indicator 99 zum Beispiel, wird von den drei Schutzobjekten *Menschliche Gesundheit*, *Ökosystemgesundheit* und *Ressourcen* ausgegangen [Goedkoop und Spriensma 2000]. Der Begriff „schadensorientiert“ bringt im Besonderen zum Ausdruck, dass das Modellierungskonzept von den zu erwartenden Schäden ausgeht und nicht etwa die einzelnen Emissionsarten als Startbasis nimmt. Die im Folgenden beschriebenen Schritte sind in der ISO 14040 als **optional** gekennzeichnet. Diese Tatsache ist den teilweise nicht vollständig naturwissenschaftlich begründbaren und aufgrund von Werthaltungen [Lundie 1999] und persönlichen Präferenzen getroffenen Entscheidungen geschuldet.

Im Schritt der **Normalisierung** werden die bis hierher erhaltenen Ergebnisse in Relation zu den z. B. europäischen Gesamtemissionen pro Kopf eines bestimmten Jahres gesetzt. Die Schritte der **Ordnung** und **Gewichtung** beinhalten Entscheidungen zu persönlichen Präferenzen und Werthaltungen. Weiterhin bietet die Methode Eco-Indicator 99 als Auswahlmöglichkeit die Ergebnisse der Befragung eines Panels von Wissenschaftlern zur Relevanz und Wertigkeit der unterschiedlichen Schadenskategorien an [Goedkoop 1999]. Der Anwender kann ferner auf Basis dieser Reihenfolge eine eigene Präferenzordnung erstellen und so seine Ergebnisse individuell bewerten.

Die optionalen Schritte sind je nach gewählter Methode unterschiedlich strukturiert und im jeweiligen Handbuch oder in der jeweiligen Veröffentlichung beschrieben. Das dimensionslose Ergebnis einer solchen Vollaggregation nennt man ‚**Single Score**‘. Diese Zahl beinhaltet dann sichtbar wie unsichtbar das gesamte oben beschriebene Wertesystem der Methode und bleibt daher nur durch die vollständige Dokumentation der getroffenen Entscheidungen nachvollziehbar und transparent.

Diese, teilweise kontrovers diskutierte Zusammenfassung der unterschiedlichen Kategorien, eignet sich jedoch höchstens als Anhaltspunkt in einer frühen Phase der Produktgestaltung für z. B. firmen-interne Zwecke. Der hervorzuhebende Vorteil besteht allein in der sehr guten graphischen Darstellbarkeit der Ergebnisse gegenüber Nicht-Experten. Denn es werden z. B. für die Produktentwickler einzelne Teile oder Teilaspekte greifbarer. Sie eignet sich aber in keinem Falls als abschließende Darstellung der Ergebnisse einer Ökobilanz für externe Adressaten.

2.7 Life Cycle Management

Die von der UNEP/SETAC Life Cycle Initiative im Jahr 2005 veröffentlichte Guideline liefert den Hintergrund für die Anwendung und Implementierung des Konzepts des Life Cycle Management (LCM) mit der Absicht, „eine Brücke zwischen den teilweise divergenten theoretischen Konzepten und der Anwendung in der Praxis zu schlagen“ [UNEP/SETAC 2005]. Die in einigen Bereichen der Industrie bereits gängige Praxis, Lebenszyklusanalysen zur Verbesserung bzw. ganzheitlichen Optimierung der eigenen Produkte durchzuführen, hat sich bisher nicht auf alle Industriezweige übertragen lassen bzw. es mangelt an regulativem und/oder Wettbewerbsdruck, sich dieser Thematik anzunehmen.

Die Umsetzung der EuP-Direktive hat in diesem Kontext die Wahrnehmung der Methodik LCA entscheidend geschärft und zu einer breiteren Anwendung geführt. Oftmals wird jedoch schon die Einführung eines formellen Umweltmanagementsystems, verbunden mit der stellenweise routinemäßigen Zertifizierung als ultima ratio im Bezug auf Umweltschutz gesehen. Es muss jedoch das Bewusstsein geschaffen werden, dass die in der Außenwirkung wichtigen und richtigen Aspekte, einer in der Innenwirkung innerhalb einer Organisation verbindlichen und vollständigen und gelebten Umsetzung bedürfen. Der eigentliche Kern eines jeden Umweltmanagementsystems sind die relevanten Umweltaspekte [ISO 14001 Kap. 4.3], an denen die eigentliche Umweltleistung der Organisation abgelesen werden kann. Diese werden in vielen Fällen nicht von Anfang an in Ihrer tatsächlichen Relevanz wahrgenommen und daher vernachlässigt bzw. vergessen.

Die Einführung eines Umweltmanagementsystems in der betrieblichen Praxis kann heute als Standard bezeichnet werden. Die gesetzlichen Auflagen und weitere Verpflichtungen (auch Selbstverpflichtungen von Firmen) der vorhandenen Managementsysteme können logisch mit der Struktur der ISO 14001 harmonisiert werden, um alle Normforderungen zu erfüllen (mit oder auch ohne größeren Beratungsaufwand durch eigenes, geschultes Personal). Neben den formalen Punkten wie z. B. der Umweltpolitik, [ISO 14001 Kap.3.9], bestehen die Synergieeffekte darin, dass die oft schon vorhandenen Aktivitäten und Dokumente in ein schlüssiges, integriertes Managementsystem eingeordnet werden können.

Die formale Aufrechterhaltung eines UMS erreicht jedoch per se keine Optimierung der Produktnachhaltigkeit, wie z. B. mittels Durchführung einer LCA Studie. Um den Dimensionen der Nachhaltigkeit gerecht zu werden, müssen alle 3 Säulen der Nachhaltigkeit nämlich Umwelt, Kosten und Soziales adressiert und integriert werden.

Das Konzept des Life Cycle Management ist gleichzusetzen mit der „Übertragung des ‚Lebenszyklusdenkens‘ (life cycle thinking) auf die Unternehmensebene, mit dem Ziel, den gesamten Lebenszyklus der Produkte und Dienstleistungen nachhaltiger zu gestalten“ [Jensen und Remmen 2004].

Wie in Abbildung 2.14 ersichtlich, ergibt sich analog der Betrachtung des Lebenszyklus eines Produkts, auch eine prozessorientierte Zuordnung der innerhalb einer Firma zum jeweiligen Lebensabschnitt zugehörigen Aktivitäten mit Umweltbezug.

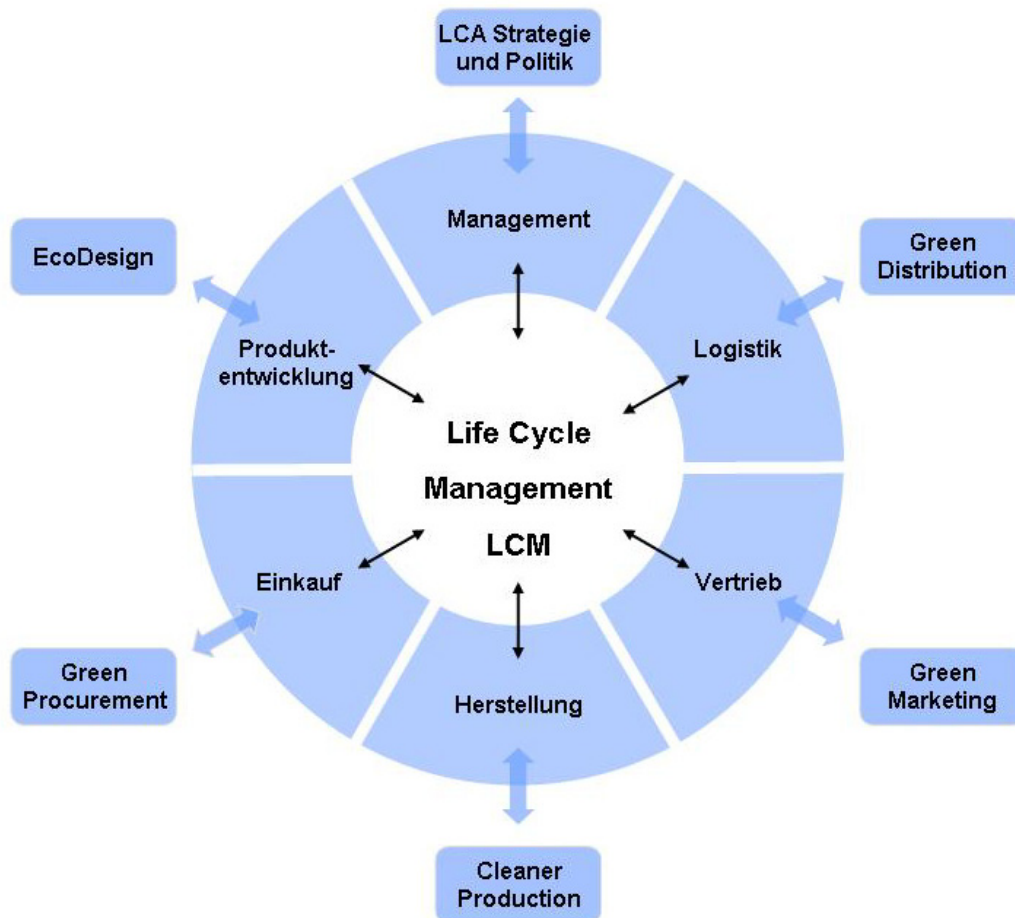


Abbildung 2.14: Darstellung Konzept Life Cycle Management - LCM [UNEP 2005]

Die Integration in die betrieblichen Abläufe und Prozesse kann als der Schlüssel zum Erfolg eines Umweltmanagementsystems angesehen werden. Die in der DIN EN ISO 14001:2005 geschaffene Harmonisierung der Grundsätze und Definitionen mit der ISO 9001 markiert einen weiteren Schritt in Richtung Harmonisierung gleichgerichteter Interessen.

Diese konsequente Zuordnung, denn dafür steht das Konzept LCM [UNEP 2005], bildet im Gegensatz und als Ergänzung zur Produkt- und Prozessorientierung des Umweltmanagements die Orientierung an den Phasen der Produktentwicklung bzw. an den Geschäftsprozessen. Dadurch wird eine Brücke zu der in Managementsystemen verwendete Darstellung der Prozesse in Abbildung 2.15 geschlagen.

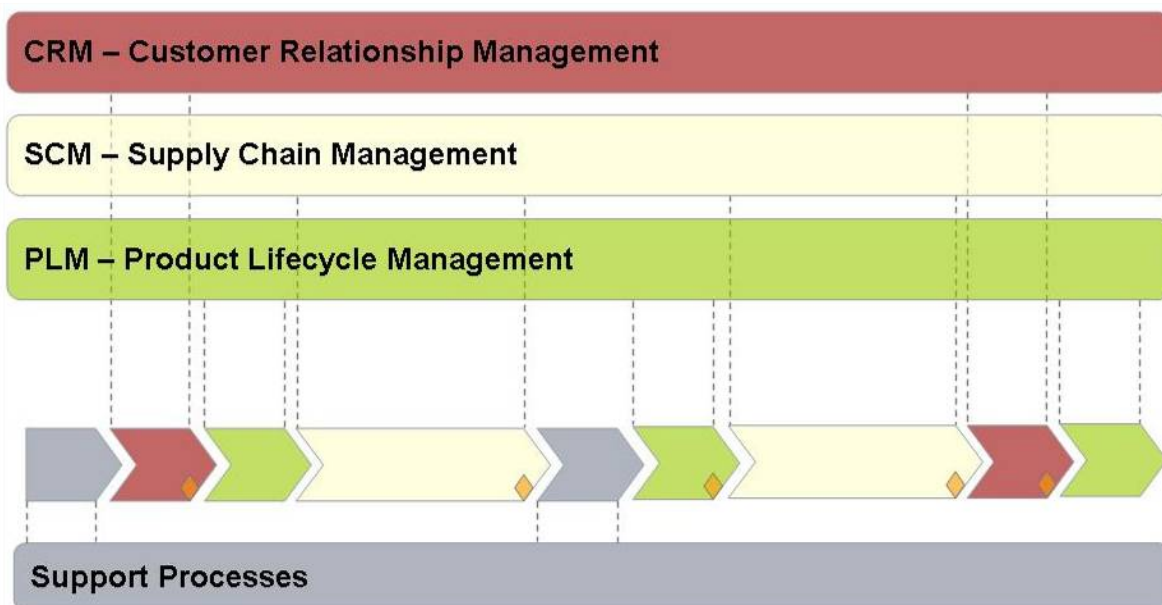


Abbildung 2.15: Beiträge der Prozesse über den Lebenszyklus eines Produkts

Die Abfolge der dargestellten Prozessschritte bildet den aus Kundensicht beschreibbaren Lebenszyklus eines Produkts. Dieser besteht in diesem Fall aus dem Kundenbeziehungsmanagement (CRM), dem Lieferkettenmanagement (SCM) und dem Produktlebenszyklusmanagement (PLM), wobei in diesem Fall Lebenszyklus nicht vollständig analog der ISO 14040 definiert ist, sondern sich an Aspekten der Betriebswirtschaft und des Prozessmanagements orientiert. Die sogenannten unterstützenden Prozesse tragen z. B. mit der Einführung und Aufrechterhaltung eines integrierten Managementsystems zum Erfolg und zur Optimierung eines Produkts in allen Phasen des Lebenszyklus bei.

Zur Steigerung der bereits angesprochenen internen Lernkurve innerhalb einer Organisation wurde daher im Rahmen dieser Arbeit eine Abbildung der Umweltauswirkungen entlang der ablaufenden Prozesse, z. B. in der Fertigung im Werk erarbeitet. Anhand dieser Umweltprofile kann damit dann eine Optimierung aus umwelttechnischer Sicht der Prozess und Komponenten erfolgen.

Die Kombination aus Qualitäts- und Umweltthemen bildet die Grundlage für eine effektivere Herangehensweise. Tabelle 2.5 zeigt die „umweltorientierte Failure Mode and Effect Analysis“ (FMEA) [Dreyer 1997]. Diese Kombination aus der herkömmlichen Methode der systematischen Analyse von Produkten und Prozessen mit dem Ziel, mögliche Fehler und deren Folgen zu identifizieren und so weit wie möglich einzuschränken.

Tabelle 2.5: Anpassung der FMEA –Arbeitstechnik [Dreyer 1997]

FMEA	„umweltorientierte FMEA“
1. Definition des Rahmens und der Funktion des Produkts oder Prozesses	1. Zieldefinition und der Untersuchung und Definition des ökologischen Ist-Zustandes des Produktes oder Prozesses (Sachbilanz)
2. Identifikation möglicher Fehler	2. Identifikation ökologischer Schwachstellen (Wirkungsbilanz)
3. Erstellung einer Rangordnung möglicher Fehler	3. Erstellung einer Rangordnung der Schwachstellen (Bewertung)
4. Auswahl und Durchführung von Abstellmaßnahmen	4. Auswahl und Durchführung von Abstellmaßnahmen
5. Beobachten und Lernen	5. Beobachten und Lernen
6. Dokumentation des Analyseprozesses	6. Dokumentation des Analyseprozesses

Die durchgängige Maxime der ISO 14000ff, des Design for the Environment, sowie der Lebenszyklusanalyse lautet, für den gesamten Lebenszyklus Strategien zur Steigerung der Nachhaltigkeit zu identifizieren und zu adressieren.

Die Zusammenfassung aller umweltrelevanten Aspekte und die Orientierung an den Lebensphasen des Produkts, wie es das Konzept LCM vorschlägt, gehen einher mit der logischen Implementierung in die Struktur eines Managementsystems. Die Erarbeitung und Veröffentlichung einer Produktumwelterklärung bietet die Möglichkeit, pro-aktiv das Umweltprofil der eigenen Produkte darzustellen.

Die Umsetzung der Strategien zur ganzheitlichen Verbesserung von Produkten und Prozessen stellt sowohl für das Produktdesign als auch das Management eine große Herausforderung dar und erfordert den intelligenten Einsatz von Ressourcen, der oben beschriebenen Werkzeuge, sowie vorausschauendes Handeln.

3 Methodologie

Es werden im Folgenden die erarbeiteten Elemente einer standardisierten und vollständigen Ökobilanz nach ISO 14040 dargestellt und beschrieben. Um den Anforderungen der Norm gerecht zu werden, sind die Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens, die Sachbilanz, die Wirkungsabschätzung und die Auswertung der Ergebnisse als Elemente enthalten. In der Zielstellung ist auch bereits eine Indikation für die Gründe der Durchführung der Studie, sowie der Zielgruppe der Studie enthalten. Im Untersuchungsrahmen werden funktionelle Einheit und Systemgrenzen definiert. Weiterhin werden Aussagen über die Datenqualität, Vergleichbarkeitskriterien zweier zu vergleichender Systeme und Aspekte einer kritischen Prüfung festgelegt.

In der Sachbilanz in Kapitel 4 werden die Datenerfassung und Metriken zur Quantifizierung relevanter In- und Outputflüsse des Produktsystems definiert. Nach Durchführung der Wirkungsabschätzung in Kapitel 5 kann dann die Größe und Relevanz der potentiellen Umwelteinwirkungen des Produktsystems erkannt und beurteilt werden. In der Diskussion in 6 ist die Interpretation der gewählten Systemgrenzen, Sachbilanzdaten und der Wirkungspotentiale enthalten, auf Grund derer Maßnahmen zur Produktverbesserung abgeleitet werden können. Zur Plausibilisierung der Ergebnisse wurden eine Sensitivitätsanalyse und ein Vergleich mit anderen Studien durchgeführt.

Die Methoden-inhärente Limitierung der Lebenszyklusanalyse besteht gerade darin, eine statische Momentaufnahme über einen definierten Betrachtungszeitraum abzubilden. Daher ist die Erstellung einer Lebenszyklusanalyse inklusive der umfassenden Modellierung des Produktsystems nur ein Zwischenschritt der in dieser Arbeit vorgestellten Betrachtung.

Es wurde eine Methode zur dynamischen Bewertung verschiedener Konfigurationen und Varianten eines Produktsystems erarbeitet. Um das eigentliche Potential der Projektion über den gesamten Lebenszyklus zu heben, und um damit das Gesamtoptimum und die dazu notwendigen Maßnahmen zu identifizieren, bedarf es eben jener Dynamisierung der Inputparameter. Es wurde das in Kapitel 3.7 beschriebene Cockpit erstellt, um auf Basis der in der vorliegenden Arbeit erstellten Sachbilanzmodule eine adaptive Modellierung und Auswertung verschiedener Konfigurationen des Produktsystems darstellbar zu machen. Erst hierdurch werden die Einflussmöglichkeiten von Designentscheidungen zu Beginn bis zum Ende begreifbar und damit die Möglichkeit geschaffen, diese Faktoren in die Entscheidungen zu Beginn des Produktdesigns mit einzubeziehen.

3.1 Zielstellung

Die Ökobilanz dient der Erfassung aller relevanten Umweltauswirkungen des Produktsystems und Identifikation von ‚Hot-spots‘, also der Prozesse oder Werkstoffe mit besonders relevanten Umweltauswirkungen. Das Hauptziel ist die Ableitung von firmen-internen Strategien zur Optimierung des Umweltprofils des Produkts bzw. der Komponenten. Hier wiederum liegt der Schwerpunkt auf den in Eigenfertigung hergestellten Komponenten, da hier die größten Einflussmöglichkeiten und damit Verbesserungspotentiale liegen. Neben den internen Anforderungen bezüglich der Verbesserung und Optimierung des Produkts werden die Ergebnisse im Rahmen einer Produktumwelterklärung nach ISO 14021 Typ II auch Kunden und interessierten Dritten zugänglich gemacht. Neben dem Marketingaspekt hat also auch die pro-aktive Kommunikation des Beitrags zum Umweltschutz einen hohen Stellenwert.

3.2 Funktionelle Einheit

Die funktionelle Einheit stellt den Nutzen des Produktsystems, sowie die Bezugsgröße für die Referenzierung der Ergebnisse dar. Im Rahmen dieser Ökobilanz wurde das Produktsystem **GuD-Kraftwerk inklusive 35-jähriger Betrieb** als funktionelle Einheit gewählt.

Da für den Vergleich mit anderen Kraftwerkstypen die ‚Erzeugung von 1 MWh elektrischer Energie‘ als funktionelle Einheit eine adäquate Wahl darstellt, wurden in Kapitel 6.1, auch zum Vergleich mit anderen Studien, die relevanten Kennzahlen bezogen auf 1 MWh dargestellt und bewertet. Da in dieser Arbeit jedoch der Schwerpunkt auf der Analyse des Systems lag, und die genaue Betriebsweise der Anlage und das Lastregime - und damit das Umweltprofil - durch externe Faktoren maßgeblich beeinflusst werden, wurde bei der Wahl der funktionellen Einheit die Sicht eines Herstellers an den Anfang gestellt.

3.3 Systemgrenzen

Die Beschreibung der Systemgrenzen ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Sie bilden die Schnittstellen zwischen dem Produktsystem und anderen Systemen bzw. mit der Umwelt. Prinzipiell wurden in dieser Studie vorgelagerte Prozesse betrachtet, soweit diese im Einflussbereich des Herstellers lagen. So wurde die Fertigung der Gasturbine, der Dampfturbine und des Generators als komplett eigenständiger Lebenszyklus modelliert und analysiert. Diese Detailtiefe war jedoch nicht für alle Komponenten darstellbar, da z. B. nicht alle Daten von Unterlieferanten in dieser Granularität zur Verfügung standen.

Als zeitliche Abgrenzung wurde eine Betriebsdauer von 35 Jahren angenommen, mit 2005 als Referenzjahr für die Modellierung der realen Betriebsdaten.

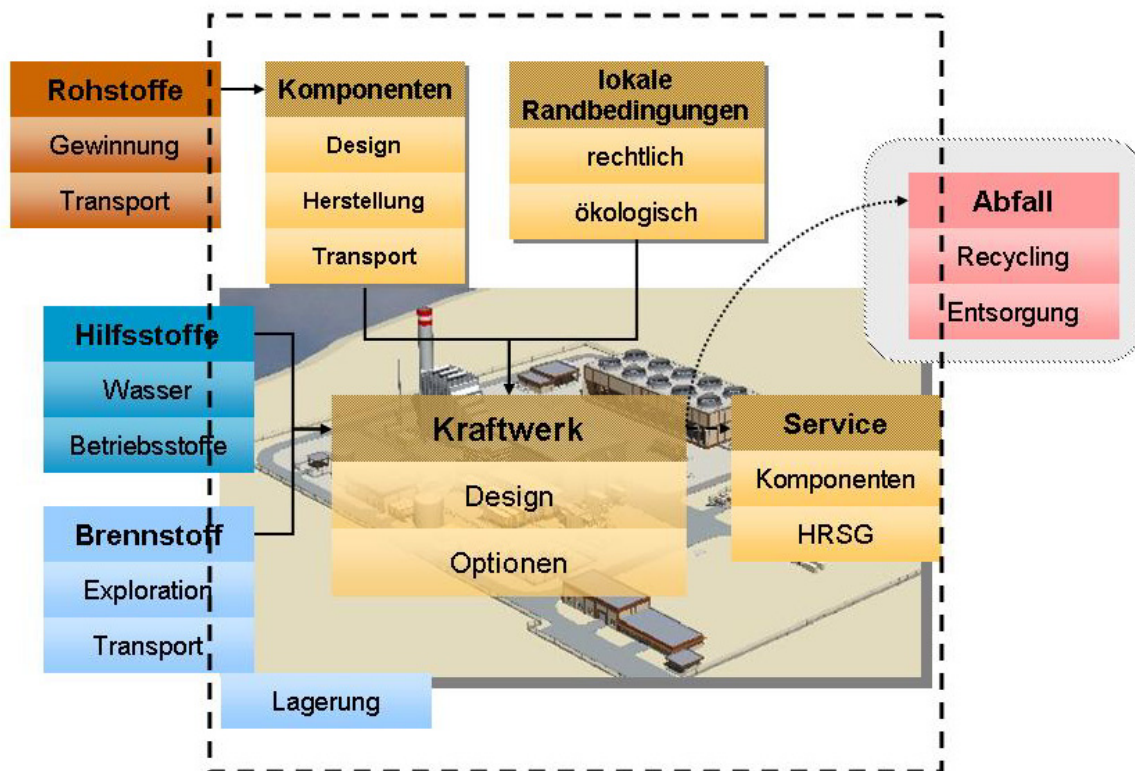


Abbildung 3.1: Darstellung der Systemgrenzen

Für die räumliche Abgrenzung der Herstellung wurde für die Generatoren als Ursprungsland USA, und für die Gasturbinen und Dampfturbinen Deutschland festgelegt. Für den Transport der Komponenten wurden als Referenzwert für den Seetransport 6.500 km und für den Landtransport von Deutschland für ein Ziel innerhalb Europas jeweils 1.500 km angesetzt.

3.4 Abschneidekriterien

Für die Komponenten Gasturbine, Dampfturbine und Generator wurde auf der Inputseite ein Abschneidekriterium von <10 kg gewählt, da dieses keinen relevanten Einfluss auf das Gesamtgewicht hatte, die Modellierung jedoch übersichtlicher und effizienter gestaltete. System-inhärent lagen die Fertigungsdaten in Form von Maximalstücklisten im SAP System vor, Zukaufteile und andere von Unterlieferanten bereitgestellte Unterbaugruppen wurden als ‚black box‘ Systeme abgebildet. Für den Input von Energie und für umweltrelevante Stoffe wurde kein Abschneidekriterium gewählt. Für die Outputseite wurde ebenfalls für Masse, Energie und Umweltrelevanz kein Abschneidekriterium definiert.

3.5 Datenquellen

Zur Modellierung des Produktsystems wurden Datensätze der ecoinvent Datenbank Version 2.0 [Frischknecht 2007] verwendet. In der ecoinvent Datenbank sind, wie in Tabelle 3.1 ersichtlich, Einheitsprozesse („Unit“) und Systemprozesse („System“) vorhanden. Diese Auswahlmöglichkeit ermöglicht die Entscheidung zwischen der Berechnung einer Verknüpfung aller beteiligten Einheitsprozesse und einer Summierung der Gesamtemissionen als eine Art ‚black box‘. Es stellt sich jedoch in der Anwendung als vorteilhaft heraus, wenn nicht die gesamte Vorkette jedes Materials neu berechnet werden muss, sondern lediglich die Summe über die beteiligten Systemprozesse. Innerhalb der Prozesse ist eine einheitliche Wahl von Systemgrenzen und Allokationsmethodik gegeben, weiterhin werden alle Emissionen getrennt nach Kompartiment angegeben.

Tabelle 3.1: Vergleich zwischen Einheits- und Systemprozessen [Goedkoop 2000]

Einheitsprozess (Unit Process)	Systemprozess (System Process)
Transparenter, aber großer Prozessbaum – jeder einzelne Beitrag kann nachverfolgt werden	Vereinfachter Prozessbaum mit Beiträgen als ‚black-box‘
Unsicherheitsabschätzungen sind enthalten (Monte Carlo Analyse kann durchgeführt werden)	Keine Angaben zu Unsicherheiten
Dauer für Berechnung der Ergebnisse bei größerer Anzahl an Prozessen langsam	Schnellere Berechnung durch Zusammenfassung der beitragenden Systemprozesse

Diese Datenbank spiegelt hauptsächlich die Europäische Situation wieder, da Durchschnittswerte für den europäischen Raum mit den hier verwendeten Technologien und z. B. Transportdistanzen ermittelt wurden. Dennoch hat sich die ecoinvent Datenbank zu einer weltweiten Standardquelle für LCA Daten entwickelt - in vielen Fällen sind bisher keine genaueren lokalen Daten vorhanden, und damit liefert der europäische Durchschnittswert auch für eine Studie außerhalb einen belastbaren Wert. Der Vorteil der Verwendung einer einheitlichen Datenbank ist, dass die Bilanzierung weitgehend unaggregiert und damit unbewertet bleibt und eine hohe Transparenz aufweist, was einerseits den Vorteil der Nachvollziehbarkeit, andererseits aber den Nachteil des großen Umfangs mit sich bringt.

Die entsprechenden Bilanzdaten dürfen deshalb als weit gehend neutral erarbeitet betrachtet werden, da auch keine direkten politischen oder wirtschaftlichen Interessen verfolgt wurden. Die Beurteilung und Bewertung der Daten obliegt dem Anwender, welcher damit eine erhöhte Verantwortung übernimmt [Dones 2003]. Gleichzeitig wird die Datenbank auf dieser Grundlage sowohl den Anforderungen einer beschreibenden, als auch einer die Entscheidung unterstützenden Ökobilanz gerecht [Frischknecht 2005].

3.6 LCA Software

Die Modellierung der Informationsmodule stellt nach der Datensammlung den wichtigsten Schritt bei der Durchführung einer Lebenszyklusanalyse dar. Die gesammelten Daten bezüglich Herstellung, Transport, Nutzung und Recycling eines Produkts werden dabei, soweit wie möglich, als elementare Stoffströme dargestellt. Zur Erstellung der Ökobilanz bedarf es einer umfassenden und belastbaren Datengrundlage, um die Modellierung so detailliert wie möglich durchführen zu können.

Es gibt hierzu verschiedene kommerzielle Softwarelösungen, die speziell für die Modellierung komplexer Lebenszyklen konzipiert wurden. In dieser Arbeit wurde aufgrund der komplexen Anforderungen sowohl an die Modellierung des Produktsystems als auch an die Verfügbarkeit und Integration von Datenbanken und Wirkungsabschätzungsmethoden die Software SimaPro in der Version 7.1.8 Developer verwendet. Die Software des niederländischen Unternehmens ‚PRé Consultants‘ (www.pre.nl) ist seit 1990 weltweit etabliert und erfüllt die Anforderungen der ISO 14040.

Neben der Integration der verfügbaren Datenbanken für Sachbilanzdaten stehen auch die gängigen Wirkungsabschätzungsmethoden zur Auswahl. Eine Übersicht der verfügbaren Datenbanken ist in Tabelle 9.1 im Anhang gegeben.

Analog der in Kapitel 2.6 beschriebenen Methodik zur qualitativen und quantitativen Übersetzung der Ergebnisse der Sachbilanz mit Hilfe definierter Indikatoren in Umweltauswirkungen sind die verfügbaren kommerziellen Lösungen nicht primär für so hochkomplexe Produktsysteme wie das in dieser Arbeit betrachtete GuD-Kraftwerk ausgelegt.

Diese Limitierung wurde durch die im Folgenden beschriebene Modellierung und Berechnung der Inputparameter aufgehoben und schließt damit die Lücke zwischen den vorhandenen Berechnungen, z. B. der Kaminemissionen und dem resultierenden Umweltprofil einschließlich der Betriebsphasen.

3.7 Cockpit

Das Ziel dieser Arbeit besteht wie beschrieben darin, die Auswirkungen von Designentscheidungen bereits während der Produktentwicklung über den gesamten Lebenszyklus darzustellen. Mit dieser Arbeit und insbesondere mit der in diesem Kapitel vorgestellten Methodik wurde eine bestehende Lücke geschlossen, damit diese Entscheidungen bewertet und verglichen werden können, und daraus Strategien zur ganzheitlichen Optimierung des Produktsystems aufgezeigt werden können. Wie in der Einleitung zu Kapitel 3 bereits erläutert, wird hiermit eine dynamische Bewertung verschiedener Konfigurationen und Varianten des Produktsystems ermöglicht.

Diese Bewertung war bisher nicht möglich, da in dieser Form kein Modell eines GuD-Kraftwerks auf Basis der erstellten Sachbilanzmodule existierte und damit auch keine Parametrisierung der Input- und Outputparameter mit direkter Verbindung in eine LCA Software zur Bewertung aller Auswirkungen über den gesamten Lebenszyklus vorhanden war.

Der Mehrwert des erstellten Cockpits besteht in den folgenden Punkten:

1. umfassende Darstellung der Module der Sachbilanz
2. direkte Berechnung der Kaminemissionen
3. Parameter als direkter Input zur Berechnung der LCA in SimaPro
4. Berechnung spezifischer Kennzahlen wie z. B. kg Fe-X/MWh
5. Szenarioanalyse durch direkten Vergleich mehrerer Varianten
6. Graphische Auswertung
7. Darstellung des Nachhaltigkeitsprofils verschiedener Szenarien

Die relevanten Input- und Outputparameter werden als schematische Darstellung in Abbildung 3.2 dargestellt. Neben der Berechnung der Inputparameter, welche dann zur Berechnung der Lebenszyklusanalyse mit der Software SimaPro verknüpft sind, werden hier auch die Inputs der thermodynamischen Auslegung der Kreisprozesse integriert.

Damit konnte eine sehr gute Integration der Nachhaltigkeitsanalyse in die bestehenden Prozesse erreicht werden.

Ein direkter Link zur Software SimaPro wurde durch die Auslagerung der Parameter geschaffen und damit die Möglichkeit zum offline-screening der Parameter, ohne die Notwendigkeit der kompletten Berechnung des Lebenszyklus. Zusammen mit einem Vergleich der spezifischen Emissionen und Aufwendungen für die Verwendung verschiedener Werkstoffe ermöglicht diese direkte Verlinkung bzw. vorgelagerte Berechnung der Parameter eine modulare und dennoch umfassende Analyse des gesamten Lebenszyklus eines GuD-Kraftwerks.

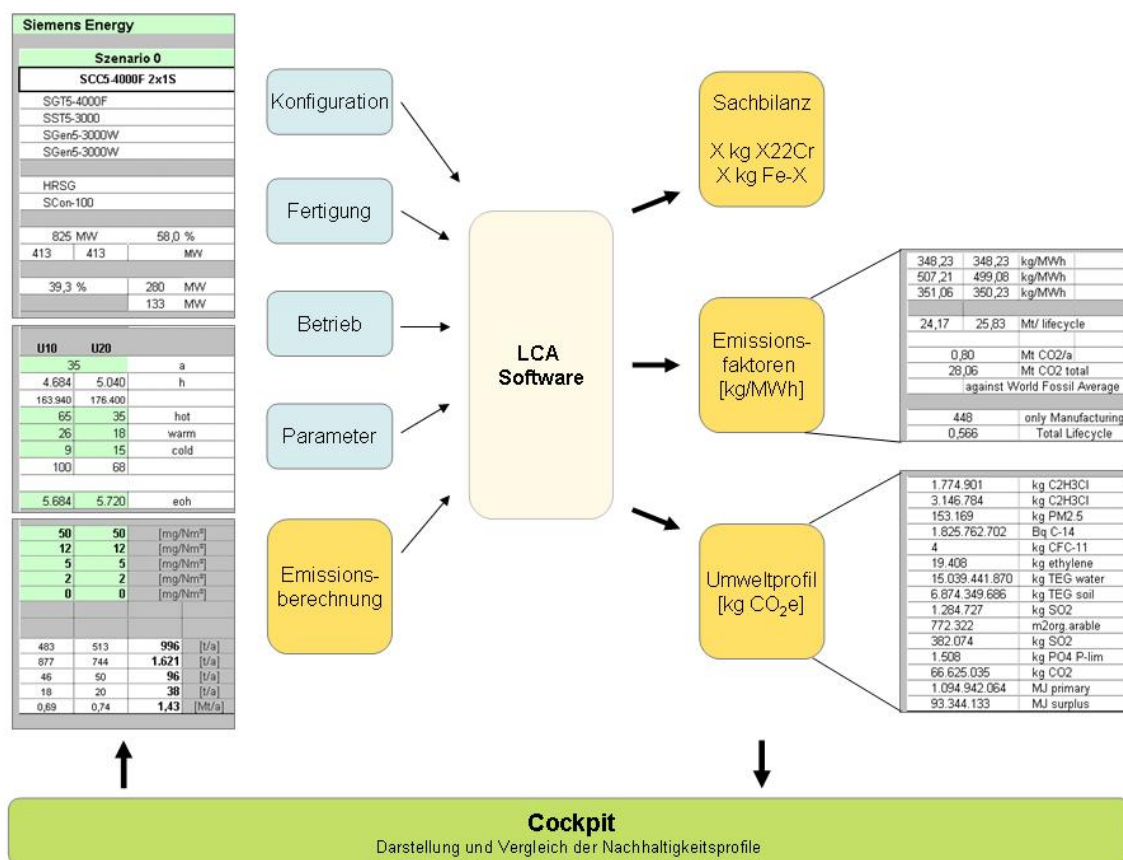


Abbildung 3.2: Berechnung und Darstellung der Nachhaltigkeitsprofile

Das in Abbildung 3.3 dargestellte Cockpit zeigt die Übersichtseite des im Rahmen dieser Arbeit erstellten Tools. Es können damit wie beschrieben Szenarien analysiert und außerdem direkt Parametervariationen durchgeführt werden. Vordefinierte Kraftwerkskonfigurationen können abgerufen werden oder bestehende Referenzszenarien angepasst bzw. verändert werden. Als Input sind alle im Rahmen dieser Arbeit berechneten Referenzmodule hinterlegt, d.h. sowohl die Materialzusammensetzung und Aufwendungen für die Fertigung als auch die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung für alle notwendigen Wirkungskategorien.

Es besteht die Möglichkeit der direkten Eingabe angepasster thermodynamischer Parameter aus einem Kreislaufrechnungsprogramm und die direkte Berechnung der Kaminemissionen, sowie der CO₂ Bilanz über den gesamten Lebenszyklus und der Einsparung gegenüber verschiedenen Referenzszenarien.

	Szenario 1			Szenario 2			Szenario 0						
	SCC5-4000F 2x1S			SCC5-4000F 2x1S			SCC5-4000F 2x1S						
Gasturbine	SGT5-4000F			SGT5-4000F			SGT5-4000F						
Steamturbine	SST5-3000			SST5-3000			SST5-3000						
Generator 1	SGen5-3000W			SGen5-3000W			SGen5-3000W						
Generator 2	SGen5-3000W			SGen5-3000W			SGen5-3000W						
HRSG	HRSG			HRSG			HRSG						
Condenser	SCon-100			SCon-100			SCon-100						
Power Output	825 MW		58,0 %	825 MW		58,0 %	825 MW		58,0 %				
	413	413	MW	413	413	MW	413	413	MW				
GT	39,3 %		280 MW	39,3 %		280 MW	39,3 %		280 MW				
ST			133 MW			133 MW			133 MW				
Lifetime	U10	U20	a	U10	U20	a	U10	U20	a				
	35			35			35						
Operation	4.480	4.480	h	7.490	7.490	h	4.684	5.040	h				
	156.800	156.800		262.150	262.150		163.940	176.400					
Startups	50	50	hot	0	0	hot	65	35	hot				
	200	200	warm	1	1	warm	26	18	warm				
	2	2	cold	0	0	cold	9	15	cold				
Shutdowns	252	252		1	1		100	68					
EOH	7.000	7.000	eoh	7.500	7.500	eoh	5.684	5.720	eoh				
Emissions	NOx	50	50	[mg/Nm ³]	50	50	[mg/Nm ³]	50	50	[mg/Nm ³]			
	CO	12	12	[mg/Nm ³]	12	12	[mg/Nm ³]	12	12	[mg/Nm ³]			
	PM	5	5	[mg/Nm ³]	5	5	[mg/Nm ³]	5	5	[mg/Nm ³]			
	SO ₂	2	2	[mg/Nm ³]	2	2	[mg/Nm ³]	2	2	[mg/Nm ³]			
	NH ₃	0	0	[mg/Nm ³]	0	0	[mg/Nm ³]	0	0	[mg/Nm ³]			
Emissions	NOx	503	503	1.006	[t/a]	738	738	1.476	[t/a]	483	513	996	[t/a]
	CO	2.539	2.539	5.077	[t/a]	187	187	374	[t/a]	877	744	1.621	[t/a]
	PM	44	44	88	[t/a]	74	74	148	[t/a]	46	50	96	[t/a]
	SO ₂	18	18	35	[t/a]	30	30	59	[t/a]	18	20	38	[t/a]
	CO ₂	0,70	0,70	1,39	[Mt/a]	1,08	1,08	2,15	[Mt/a]	0,69	0,74	1,43	[Mt/a]
CO ₂ Emissions	operation	348,23	348,23	kg/MWh	348,23	348,23	kg/MWh	348,23	348,23	kg/MWh			
	starts/shutdowns	504,37	504,37	kg/MWh	502,20	502,20	kg/MWh	507,21	499,08	kg/MWh			
	total	356,43	356,43	kg/MWh	348,25	348,25	kg/MWh	351,06	350,23	kg/MWh			
	24,34	24,34	Mt/ lifecycle	37,67	37,67	Mt/ lifecycle	24,17	25,83	Mt/ lifecycle				
Saving	0,66		Mt CO ₂ /a	1,28		Mt CO ₂ /a	0,80		Mt CO ₂ /a				
	23,14		Mt CO ₂ total	44,73		Mt CO ₂ total	28,06		Mt CO ₂ total				
			against World Fossil Average			against World Fossil Average			against World Fossil Average				

Abbildung 3.3: Vergleich von Szenarien und Ergebnissen im Cockpit

Die in den folgenden Kapiteln beschriebene Lebenszyklusanalyse auf Basis der modellierten Komponenten eines GuD-Kraftwerks wird wie beschrieben in der dargestellten Übersicht zusammengefasst. Das heißt, dass für die hinterlegten Module, wie z. B. Fertigung einer Gasturbine im Werk, sowohl die Emissionen als auch die Verbrauchsdaten hinterlegt und damit verfügbar sind. Weiterhin werden die zentralen Parameter zur Modellierung und Berechnung der Betriebsemissionen auf dieser Basis berechnet und es kann z. B. die Anzahl der Starts gegebenenfalls angepasst werden. Die dadurch resultierenden Emissionsprofile gehen durch die Verknüpfung mit der LCA Software in das Umweltprofil ein.

4 Modellierung

Bei dem in dieser Arbeit betrachteten und in Abbildung 4.1 dargestellten GuD-Kraftwerk handelt es sich um den Typ SCC5-4000F 2x1S, bestehend aus den Blöcken U10 und U20. Die beiden Blöcke bestehen jeweils aus einer Gasturbine vom Typ SGT5-4000F, einem Generator des Typs SGen5-3000W, einer Dampfturbine SST5-3000 und einem 3-Druck Abhitzedampferzeuger als Hauptkomponenten. Die Beschreibung der weiteren Komponenten wird im Folgenden gegeben.



Abbildung 4.1: Konzeptansicht SCC5-4000F 2x1S [Siemens AG]

Die Faktoren, die zur Auswahl dieses Anlagentyps bzw. dieser Anlage geführt haben waren auf der einen Seite die Verfügbarkeit von realen Daten, d.h. es handelt sich um eine Anlage in europäischen Raum, anhand derer die realen Mengengerüste gemessen und danach modelliert wurden. Auf der anderen Seite wurde auf einen Referenzcharakter Wert gelegt, um die Übertragbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten.

Um aber den speziellen Charakteristika gerecht zu werden, und um gleichzeitig allgemein gehaltenen Referenzmodule erstellen zu können, wurde ein modularer Aufbau für die Sachbilanz gewählt. Der entscheidende Vorteil in der Wahl einer bereits fertig gestellten Anlage liegt aber in der Verfügbarkeit realer Betriebsdaten, anhand derer die Emissionen der verschiedenen Betriebsphasen modelliert und bewertet werden konnten. Die weiteren technischen Parameter und Randbedingungen für den Betrieb sind in Tabelle 4.1 gegeben. Auf die detaillierten Betriebsphasen wird in Kapitel 4.8 eingegangen.

4.1 Beschreibung GuD-Kraftwerk

Im Gasturbinen- und Dampfturbinenprozess wird Wärme in mechanische Energie und anschließend in einem Generator in elektrische Energie umgewandelt. Der Wirkungsgrad der Gasturbinen- bzw. Dampfturbinenprozessen hängt von der Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Wärmesenke ab. Die Eintrittstemperatur im Gasturbinenprozess kann bis zu 1500 °C erreichen, die Austrittstemperatur liegt allerdings bei maximal 600 °C, da beim nachgeschalteten Dampfturbinenprozess die Temperatur der Wärmezufuhr durch die Werkstoffe auf ca. 600 °C beschränkt ist. Die Temperatur der Wärmeabfuhr liegt hierbei dann auf Umgebungsniveau. Der Nettowirkungsgrad des offenen Gasturbinenprozesses liegt nur bei bis zu 40 %. Die Kombination beider Prozesse erst in einem GuD-Kraftwerk ermöglicht eine Steigerung des Wirkungsgrades auf bis zu 60 %. Das Leistungsverhältnis zwischen Gasturbine und Dampfturbine liegt üblicherweise bei 2:1.

Die Schaltungsvariante des Abhitzedampferzeugers als Drei-Druck-Prozess mit Zwischenüberhitzung ist mit Dampfparametern von HP 565 °C/ 125 bar, IP 565 °C/ 30 bar und LP 234 °C/ 4.2 bar exergetisch am vorteilhaftesten, da das Gasturbinenabgas mit ca. 600 °C in den Abhitzekessel und über die Wärmetauscher strömt und die Temperaturdifferenz zwischen Rauchgas und Dampftemperatur damit am geringsten ist.

Tabelle 4.1: Technische Daten SCC5-4000F

Beschreibung	Wert	Einheit	Beschreibung	Wert	Einheit
P_{el} brutto	825	MW _{el}	P_{el} netto	804	MW _{el}
Wirkungsgrad brutto	58,0	%	Eigenbedarf	1,5	%
Lebensdauer	35	a	Brennstoffinput	15,2	kg/s
W_{el} brutto	140	TWh	W_{el} netto	136	TWh

Da die Fertigung der Hauptkomponenten innerhalb der Siemens AG den Schwerpunkt der Wertschöpfung bildet und sich hiermit auch die meisten Einflussmöglichkeiten bieten, wurde auf diesen Teil der Arbeit besonderer Augenmerk gelegt. Durch die Möglichkeit der realen Datenerfassung und Messung auf Werks- Komponenten- und Prozessebene konnte eine Auflösung der Daten erreicht werden, die bisher so in der Literatur nicht vorhanden war. Die folgenden Kapitel beschreiben und die erarbeitete Sachbilanz der Komponenten einschließlich der Fertigung und geben weiterhin eine Übersicht über die Modellierung der Komponenten, Prozesse und Werkstoffe einschließlich der Vorketten.

4.2 Gasturbine

Die SGT5-4000F ist eine Verbrennungskraftmaschine mit einer Leistung von 265 MW. Als Brennstoff kann Erdgas oder Heizöl eingesetzt werden. Sie besteht prinzipiell nach Abbildung 4.2 aus dem Kompressor, der Ringbrennkammer mit 24 Hybridbrennern, dem eigentlichen Turbinenteil und dem Diffusor für den Abgasaustritt. Herzstück der Turbine sind die Lauf- und Leitschaufeln, die sowohl im Kompressor als auch in der eigentlichen Turbine auf der Welle bzw. den Leitschaufelträgern montiert sind.

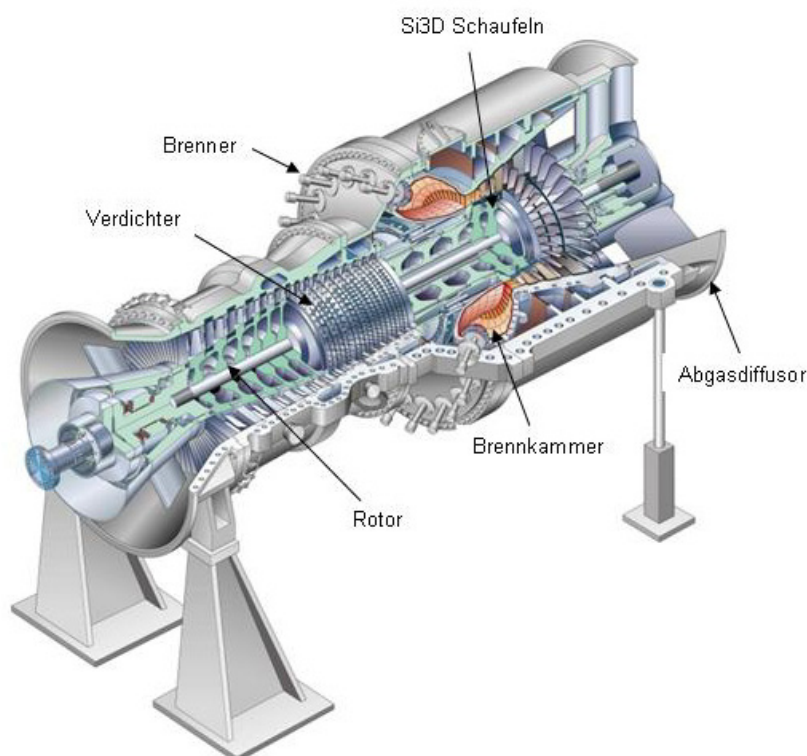


Abbildung 4.2: Aufbau der Gasturbine SGT5-4000F [Siemens AG]

Die Verbrennung läuft nach dem Joule-Prozess ab, welcher idealisiert aus zwei Isobaren und zwei Isentropen besteht: Über den Kompressor wird Luft aus der Umgebung angesaugt, verdichtet (isentropische Kompression) und in die Brennkammern eingeführt, in der sie zusammen mit dem eingespritzten Gas verbrannt (isobare Wärmezufuhr) wird. Das entstehende Verbrennungsgas mit einer Temperatur bis max. 1500 °C strömt dann in den Turbinenteil und setzt bei der Entspannung (isentropische Expansion) die im Fluid enthaltene Enthalpie in mechanische Energie um. Da sich der Kompressor und die Turbine auf einer Welle befinden, wird auch der Kompressor angetrieben. Das Verbrennungsgas wird anschließend über den Diffusor wieder an die Umwelt abgegeben (isobare Wärmeabfuhr).

4.2.1 Sachbilanz Gasturbine

Die Modellierung der Produktstruktur auf Basis der Sachbilanzdaten wurde nach Abbildung 4.3 erstellt. Durch die logische Verknüpfung auf den Ebenen der Prozesse, Unterbaugruppen, und Baugruppen konnte eine nachvollziehbare und transparente Modellierung erreicht werden. In Tabelle 4.2 ist das Mengengerüst der Gasturbine nach Stoffgruppen gegeben.

Tabelle 4.2: Materialzusammensetzung SGT5-4000F

Stoffgruppe	Gewicht [kg]
Eisenlegierungen	311.177
Stahl	242.277
Unlegiert	49.248
Niedriglegiert	64.897
Hochlegiert	11.091
mit Chrom	48.865
mit Chrom-Nickel	68.175
Gusseisen	68.900
Nichteisenmetalle, Nichteisenmetalllegierungen	276
Sonstige Metalle und Halbmetalle	8
Anorganische Werkstoffe, Keramik	545
Kunststoffe	92
Sonstige Werkstoffe	17
Organische Stoffe	1219

Die Sachbilanz verdeutlicht die Zusammensetzung der Komponente aus verschiedenen Stahllegierungen und Gussteilen.

Zur besseren Erklärung der Modellierung folgen zwei Darstellungen zum Aufbau der Gasturbine mit der Vergrößerung eines Ausschnitts.

Durch den komplexen Aufbau der Unterstruktur der Komponenten und der detaillierten Modellierung der vorgelagerten Prozesse und der Referenzierung der gewählten Datenbank stellt dies den besten Kompromiss aus Übersichtlichkeit und Vollständigkeit für die gezeigten Abbildungen dar.

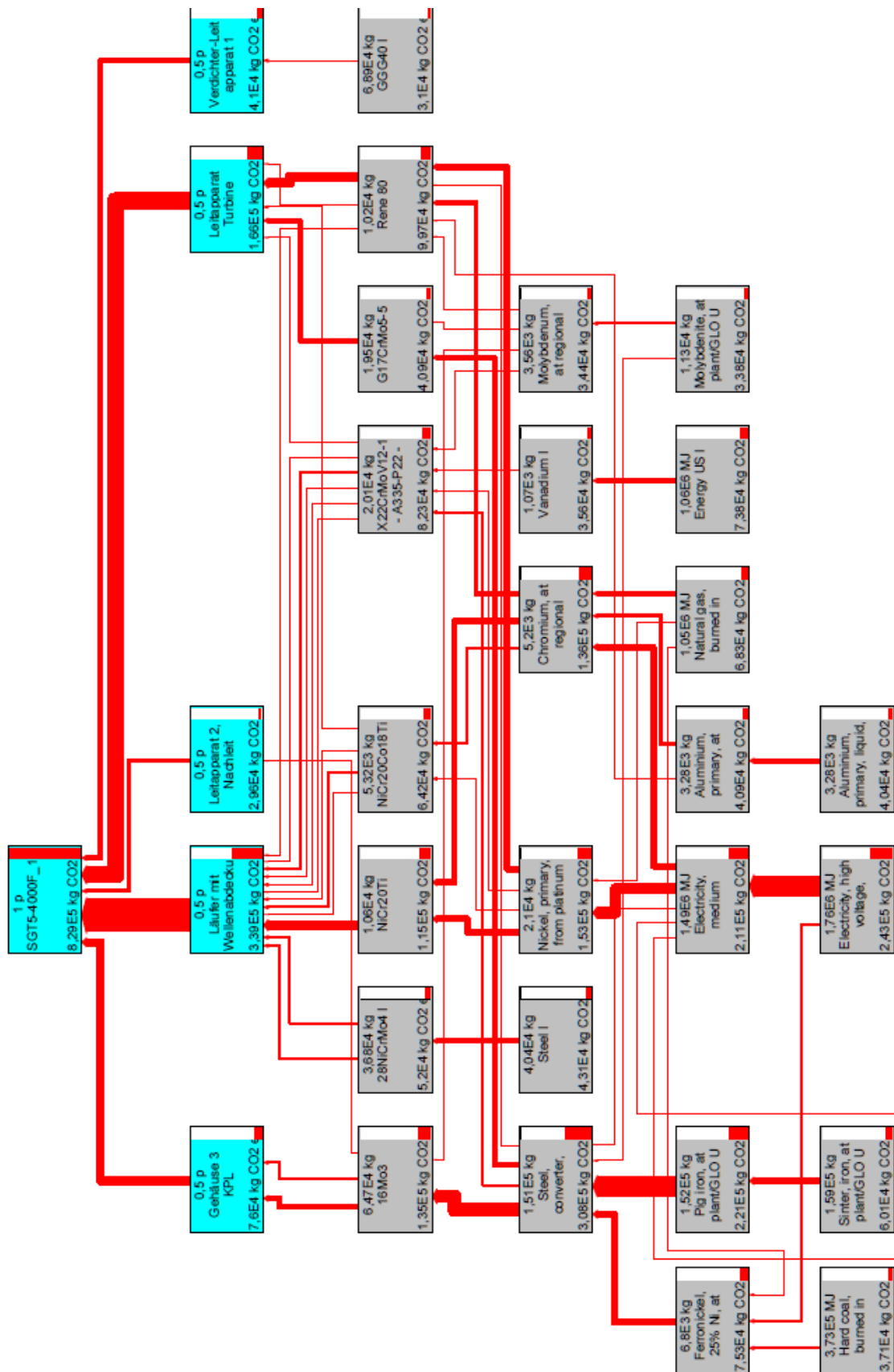


Abbildung 4.3: Aufbau der Gasturbine SGT5-4000F (cut-off 3,5 %)

In der Vergrößerung in Abbildung 4.4 ist die Modellierung der Komponenten der SGT5-4000F aus Baugruppen, Werkstoffen und Prozessen ersichtlich. Neben den Komponenten auf der zweiten Ebene werden die darunterliegenden Werkstoffe ersichtlich. Weiterhin werden die Vorketten und vorgelagerten Prozesse und Inputs deutlich.

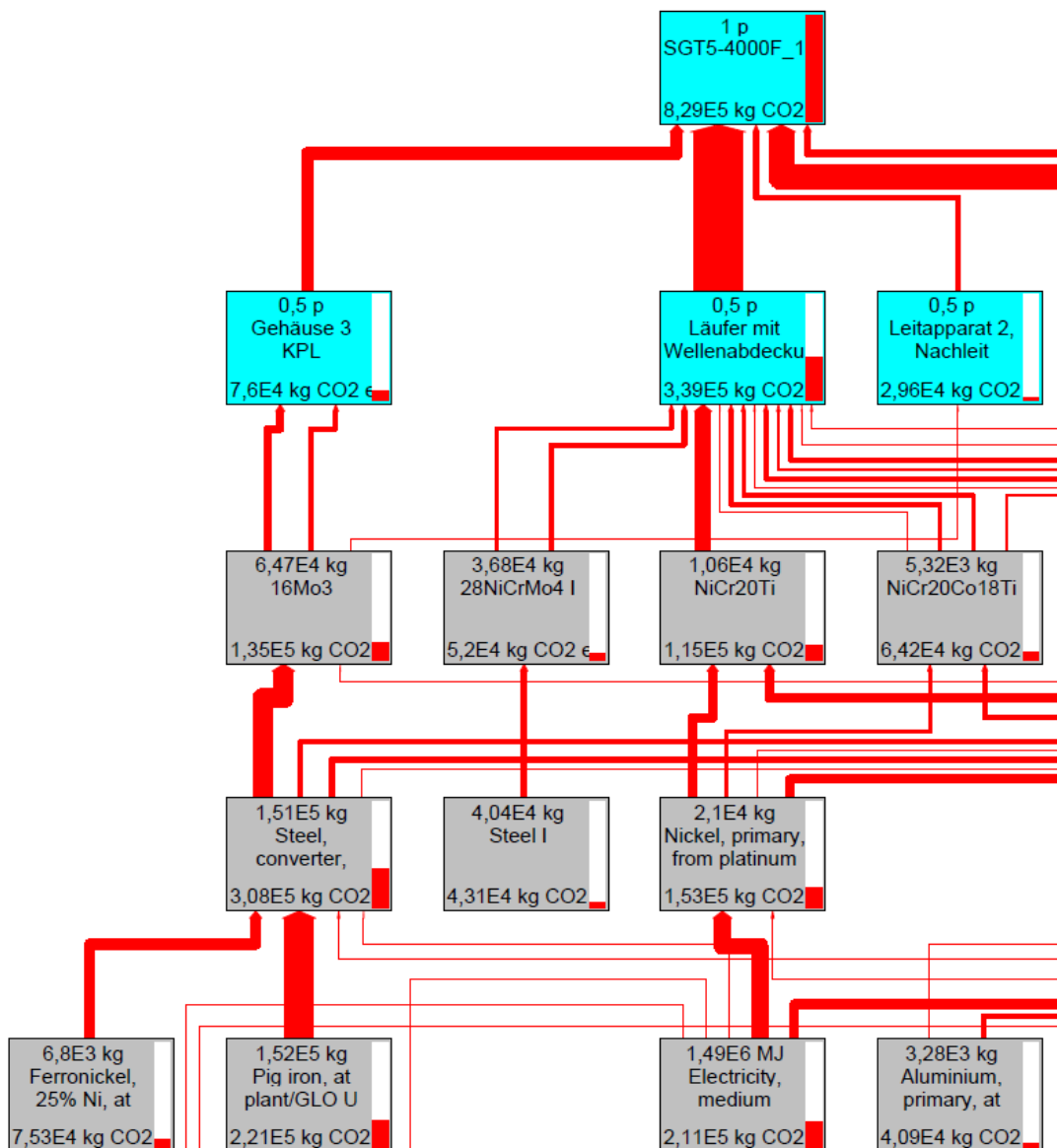


Abbildung 4.4: Ausschnitt aus der Modellierung der SGT5-4000F

Durch die Berücksichtigung aller dieser Inputs ergibt sich später die Gesamtsumme als Umweltprofil der Komponente. Erst diese Form der Modellierung ermöglicht eine detaillierte Analyse der Prozessbeiträge und damit eine Optimierung des Umweltprofils.

4.2.2 Fertigung Gasturbine

Die Analyse der Fertigung der Gasturbine ergab für die Fertigung des Gehäuses einen signifikanten Beitrag von 58 % der CO₂e Emissionen durch den Verbrauch an Erdgas während des Prozesses des Glühens im Glühofen. Die weiteren Beiträge der restlichen Prozesse und Komponenten sind in Abbildung 4.5 ersichtlich.

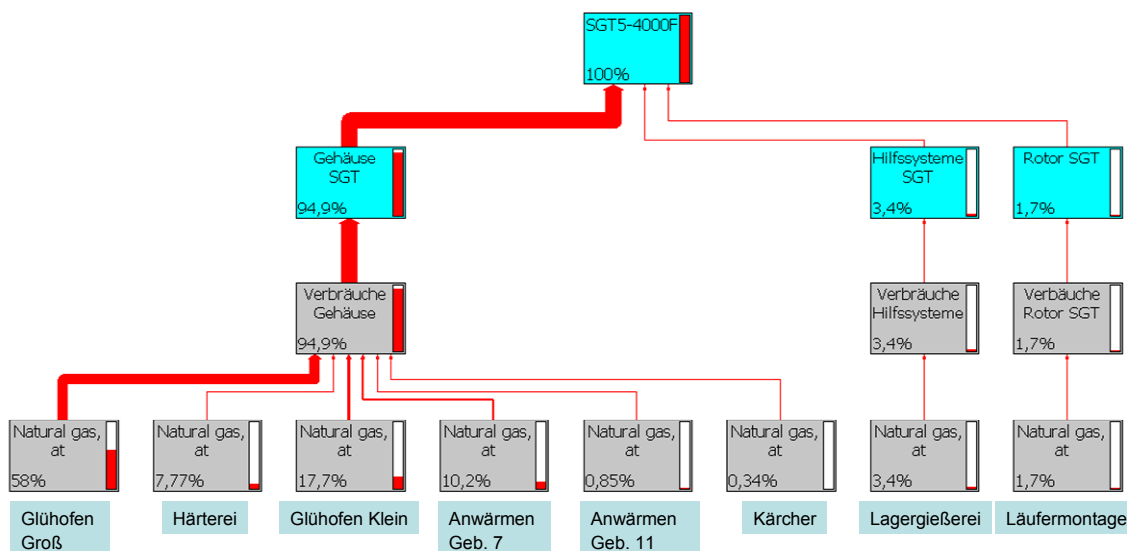


Abbildung 4.5: Verbrauchsstruktur für Erdgas in der Fertigung der SGT5-4000F

Den größten Beitrag für den Verbrauch an Elektrizität ergab sich nach Abbildung 4.6 für die Bearbeitung der Schaufeln (31 %), den Rotor (29 %) und das Gehäuse (19 %).

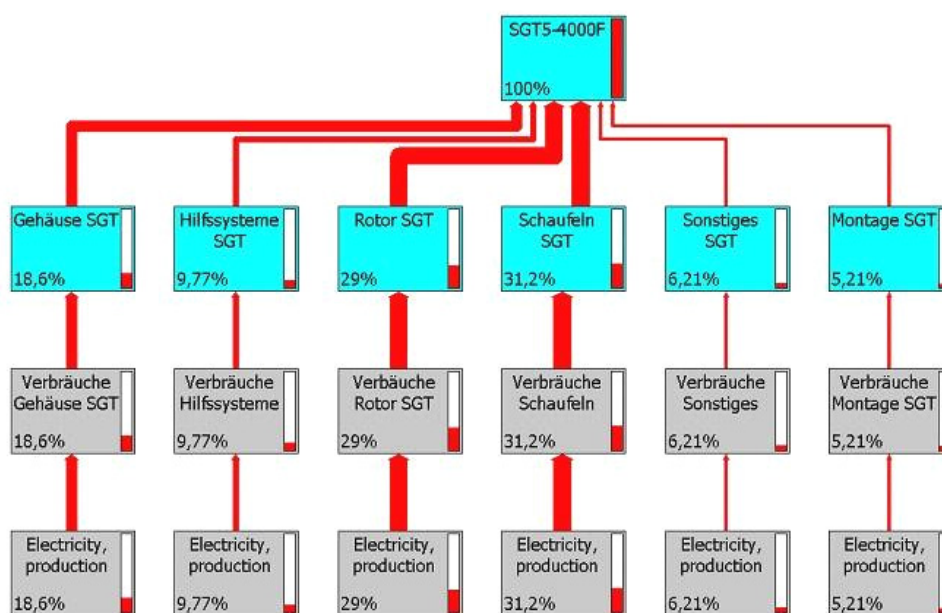


Abbildung 4.6: Verbrauch von elektrischer Energie in der Fertigung SGT5-4000F

4.3 Dampfturbine

Die Dampfturbine ist eine Komponente im Dampfkraftprozess. Der Vergleichsprozess dafür ist der Clausius-Rankine-Prozess: Zunächst wird das Arbeitsmedium Wasser in einem Dampferzeuger verdampft (isobare Wärmezufuhr). Der nachgeschaltete Überhitzer erhöht die Temperatur und damit auch den Druck des Dampfes zur Erzielung eines höheren Wirkungsgrades. In der Dampfturbine wird schließlich der Dampf entspannt (isentropische Expansion) und die kinetische Energie des Dampfes über die Schaufeln der Turbine in mechanische Energie umgewandelt. Der aus der Dampfturbine austretende Dampf wird im Anschluss daran kondensiert (isobare Wärmeabgabe) und das Wasser nach der Druckerhöhung auf den im Dampferzeuger herrschenden Druck (isentropische Kompression) wieder dem Dampferzeuger zugeführt. Die untersuchte Dampfturbine SST5-3000 (HE) in Abbildung 4.7 setzt sich aus einer Hochdruckturbine und einer kombinierten Mittel- und Niederdruckturbine mit einem axialen Abströmteil von 12,5 m² zusammen.

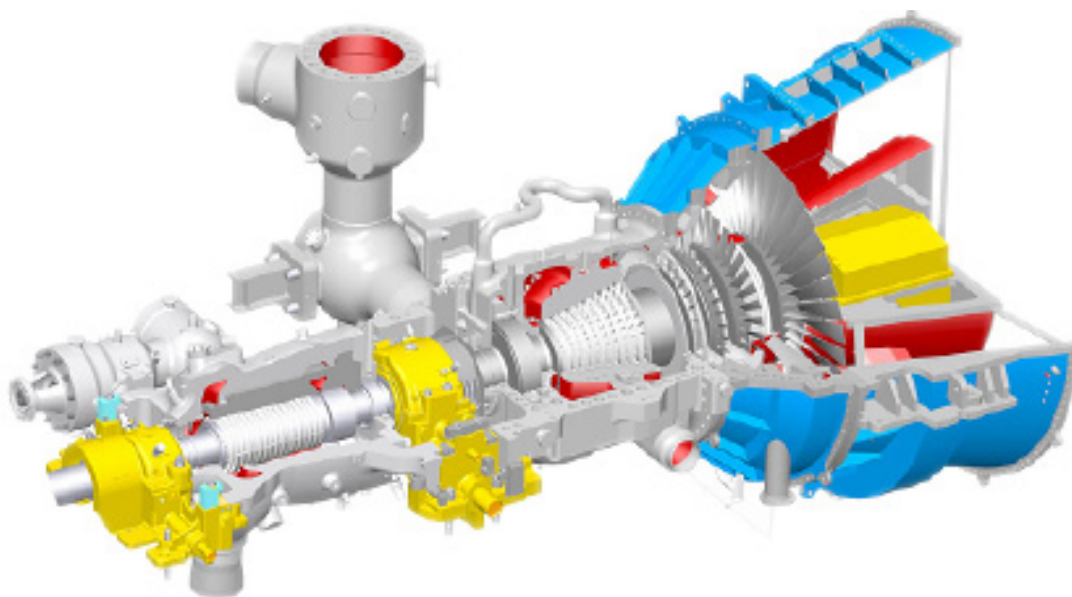


Abbildung 4.7: 3D-Ansicht der Dampfturbine SST5-3000 [Siemens AG]

Die Teilturbinen enthalten geschmiedete Einstückwellen. Die HD-Turbine besitzt eine einstufige Regelstufe in Gleichdruckbauweise, während die übrige Trommelbeschauflung beider Teilturbinen mit etwa 50 %-Reaktionsgrad ausgeführt wird, mit Ausnahme des standardisierten, dreistufigen Niederdruckteiles. Dieser enthält freistehende Laufschaufeln in verwundener Ausführung. HD-Turbine und Getriebe, Getriebe und MD-/ND-Turbine sowie MD-/ND-Turbine und Generator sind starr miteinander gekuppelt.

4.3.1 Sachbilanz Dampfturbine

In Abbildung 4.8 ist die Modellierung der SST5-3000 dargestellt. Es wird die Struktur mit den Baugruppen auf zweiter Ebene, den Werkstoffen und den vorgelagerten Prozessen zur Verarbeitung und Gewinnung der Werkstoffe (vgl. Tabelle 4.3) deutlich.

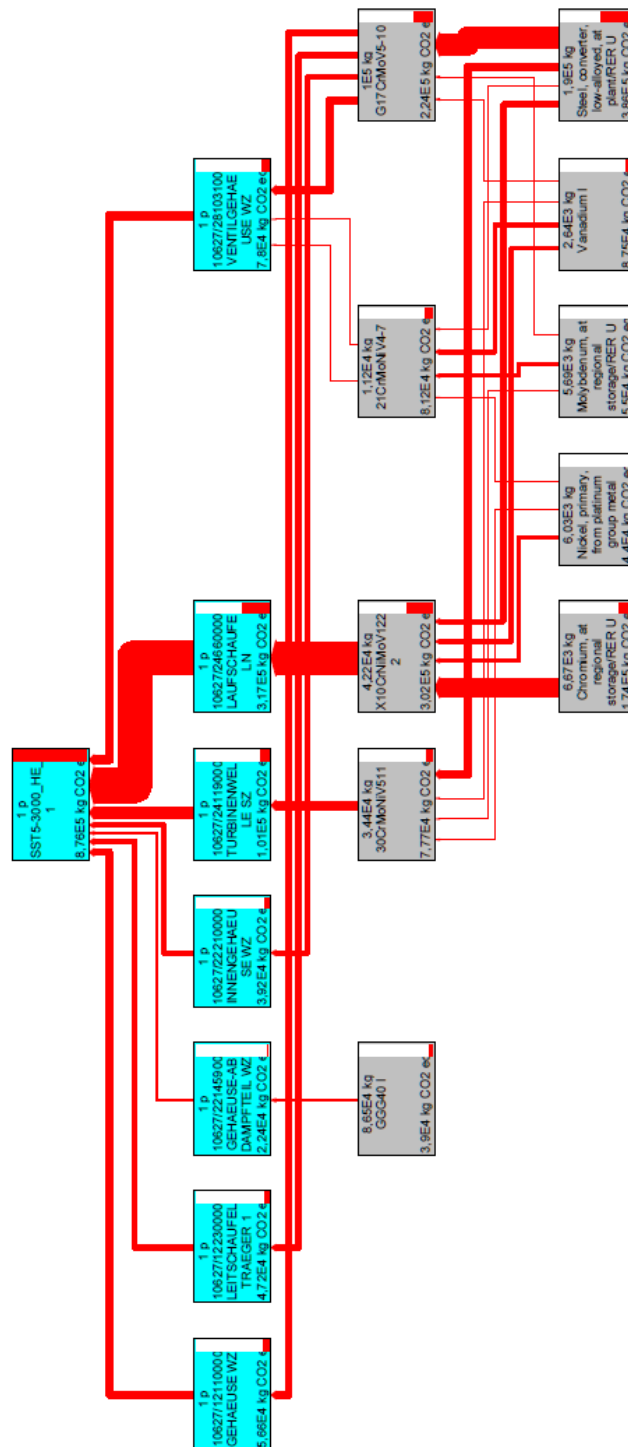


Abbildung 4.8: Modellierung SST5-3000 (cut-off 2 %)

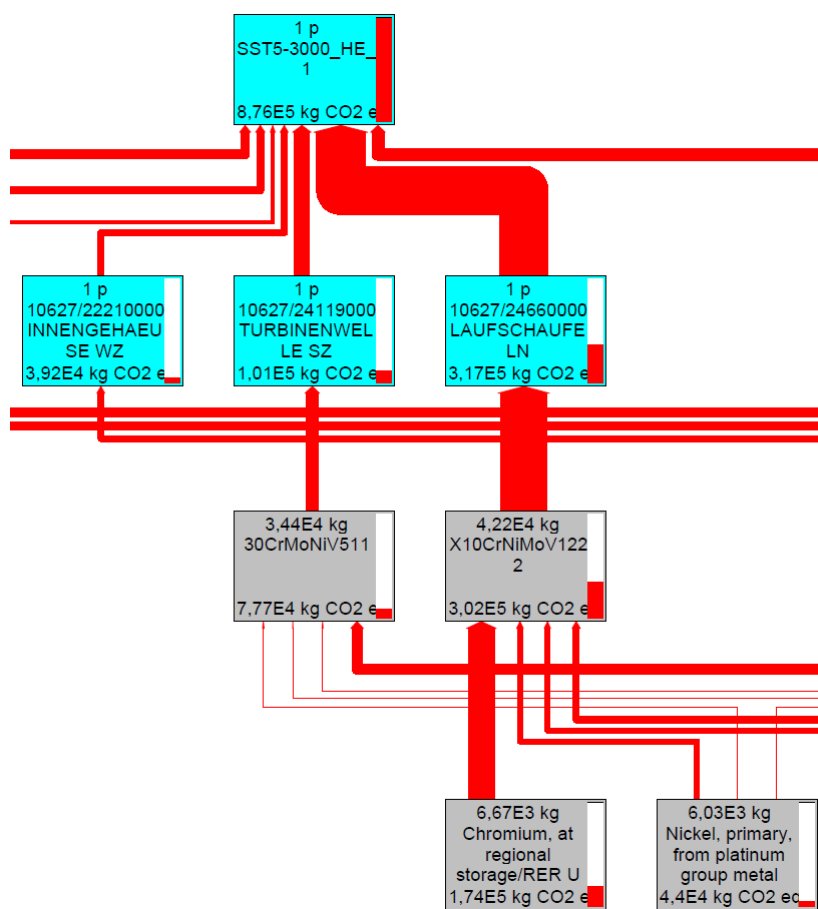


Abbildung 4.9: Ausschnitt aus der Modellierung der SST5-3000

Die weitere Zusammenstellung des Mengengerüsts der Dampfturbine ist in Tabelle 4.3 gegeben. Es wird analog die Zusammensetzung aus Eisenlegierungen und Gussteilen deutlich.

Tabelle 4.3: Materialzusammensetzung SST5-3000

Stoffgruppe	Gewicht [kg]
Eisenlegierungen	300.904
Stahl	214.370
Unlegiert	122.095
Niedriglegiert	3.467
Hochlegiert	1.571
mit Chrom	29.807
mit Chrom-Nickel	57.429
Gusseisen	86.534

4.3.2 Fertigung Dampfturbine

Für die Fertigung der Dampfturbine wurde der jährliche Verbrauch der gesamten Turbinenfertigung anhand eines Referenzwertes berechnet, der die verschiedenen Dampfturbinentypen und Serviceleistungen nach Fertigungsstunden klassifiziert. Die Hochdruckturbine der SST5-3000 hat dabei einen Referenzwert von 0,5; die kombinierte Mittel- und Niederdruckturbine einen Wert von 1. In der Summe hat die untersuchte Turbine also einen Referenzwert von 1,5.

Insgesamt wurden im betrachteten Geschäftsjahr 82 Referenzzylindereinheiten (Summe aller Serviceleistungen und gefertigter Dampfturbinen) gefertigt. Analog dieser Referenzierung wurde die Umrechnung der Jahresverbräuche auf die Werte für Fertigung einer SST5-3000 vorgenommen. Da die Turbinenfertigung hauptsächlich durch großmechanische Bearbeitungsprozesse (Bohren, Fräsen, Drehen) gekennzeichnet ist, konnte im Rahmen des ‚bottom-up‘ Ansatzes der gesamte Fertigungsprozess erfasst werden.

Neben den mechanischen Bearbeitungsschritten waren vor allem der Schweißprozess zur stoffschlüssigen Verbindung der Niederdruck- und Mitteldruckturbinenwellen, der Vorwärm- und Glühprozess der Turbinenwellen als auch die Reinigungen der Ventile und Gehäuse Gegenstand der Untersuchung. Der Montageaufwand konnte auch bei den Betriebs- und Hilfsstoffen quantifiziert werden. Der produktbezogene Verbrauch an Elektroenergie wurde sowohl durch den ‚top-down‘ als auch durch den ‚bottom-up‘ Ansatz ermittelt. Im Werk wurde mit Hilfe von Messwerten an den einzelnen Trafostationen der Elektroenergieverbrauch der Turbinenfertigung ermittelt.

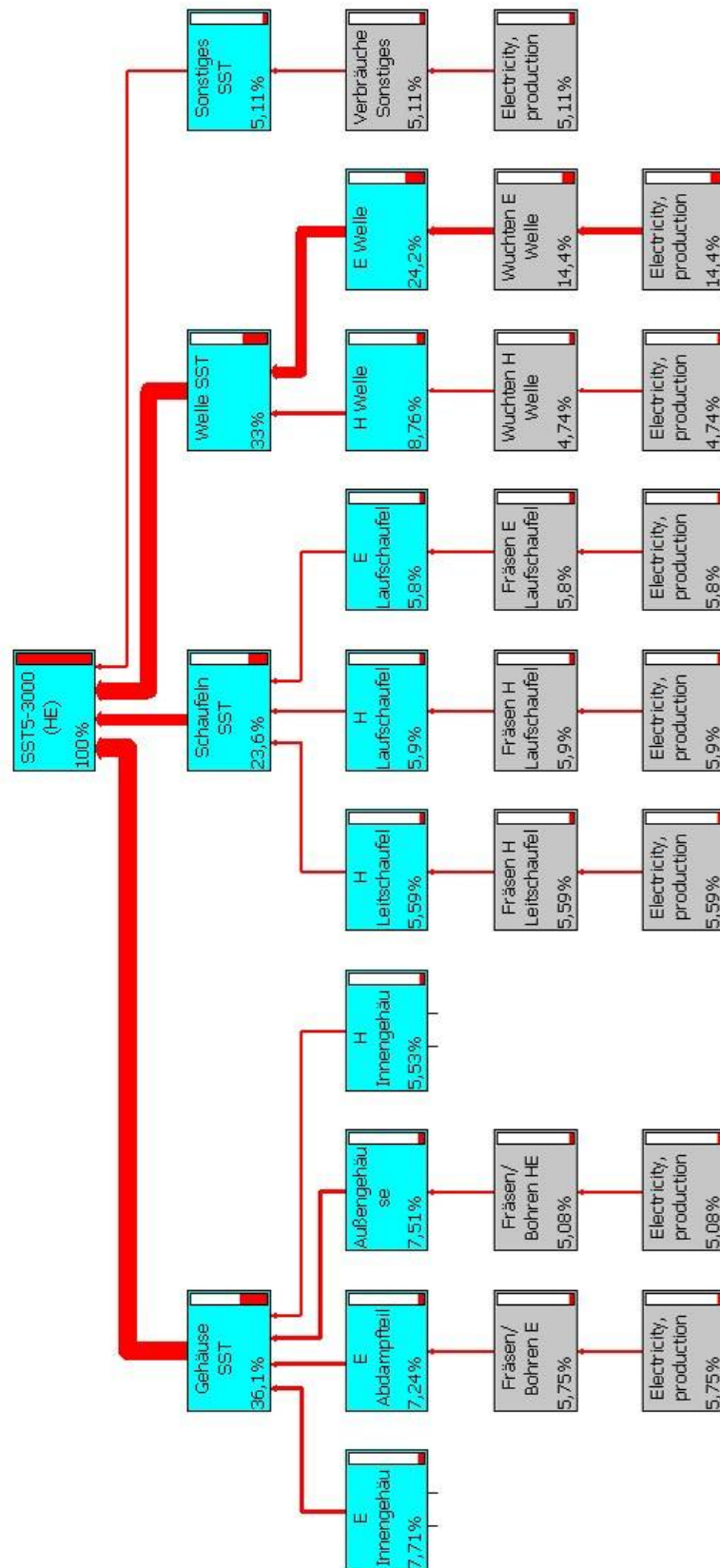


Abbildung 4.10: Verbrauchsstruktur elektrische Energie in der Fertigung SST5-3000

4.4 Generator

Im Generator wird die als Rotation vorliegende mechanische Energie in elektrische Energie transformiert. Einsatz im Kraftwerk finden ausschließlich Drehstrommaschinen, in Form von Synchrongeneratoren oder Asynchrongeneratoren. Synchrongeneratoren werden auch als Turbogeneratoren bezeichnet und erzeugen Leistung bis zu 1500 MW. Verwendung finden sie als Kraftwerksgeneratoren bei Kohlekraftwerken, GuD-Kraftwerken oder Atomkraftwerken. Asynchrongeneratoren werden häufig in Windkraftanlagen oder Kleinwasserkraftanlagen im Leistungsbereich von 1 bis 3 Megawatt eingesetzt.

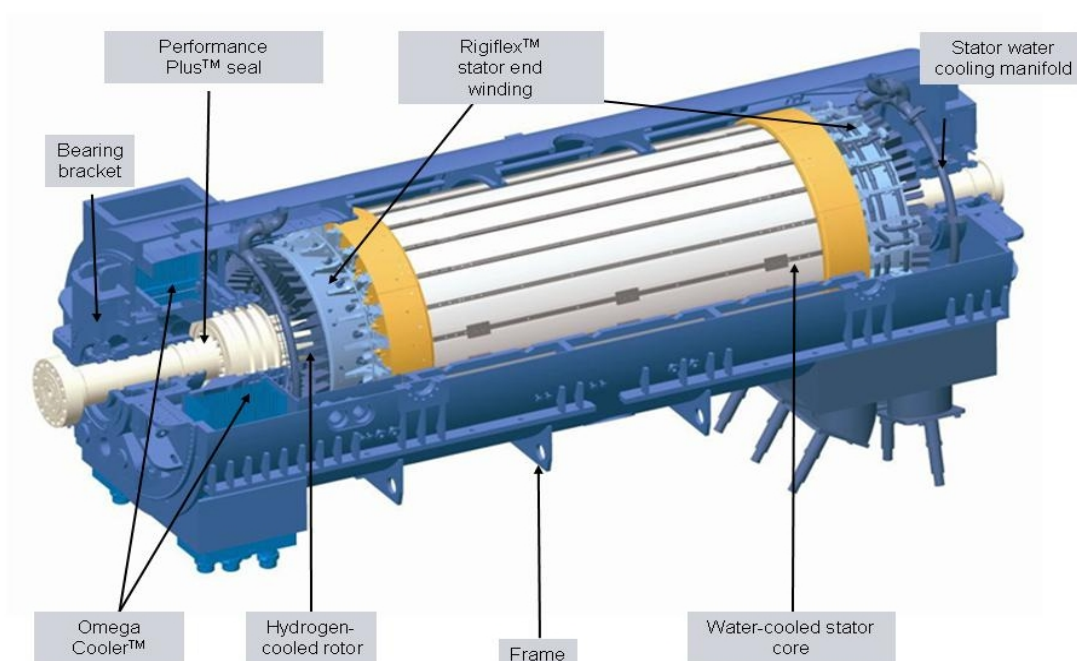


Abbildung 4.11: 3D-Ansicht des Generators SGen5-3000W [Siemens AG]

Die luftgekühlten Generatoren der Serie SGen-1000A sind für den Einsatz in Gas-, GuD-, KWK- und Dampfkraftwerken bis zu einer Leistung von 340 MVA geeignet. Die Ständerwicklung wird indirekt, die Rotorwicklung direkt mit Luft gekühlt.

Generatoren der Reihe SGen-2000H werden mit Wasserstoff gekühlt und sind durch die bessere Wärmeübertragung für größere Leistungen geeignet.

In den höchsten Leistungsbereichen werden Generatoren des Typs SGen5-3000W (siehe Abbildung 4.11) mit wassergekühltem Stator Kern und wasserstoffgekühlten Rotor und Statorwicklungen und eingesetzt.

4.4.1 Sachbilanz Generator

Die Modellierung in Abbildung 4.12 zeigt deutlich die Anteile von Blechpaket und Läufer-
spulen am in Tabelle 4.4 gegebenen Mengengerüst. Die daraus resultierenden Umwelt-
auswirkungen werden in Kapitel 5.3 weitergehend beschrieben.

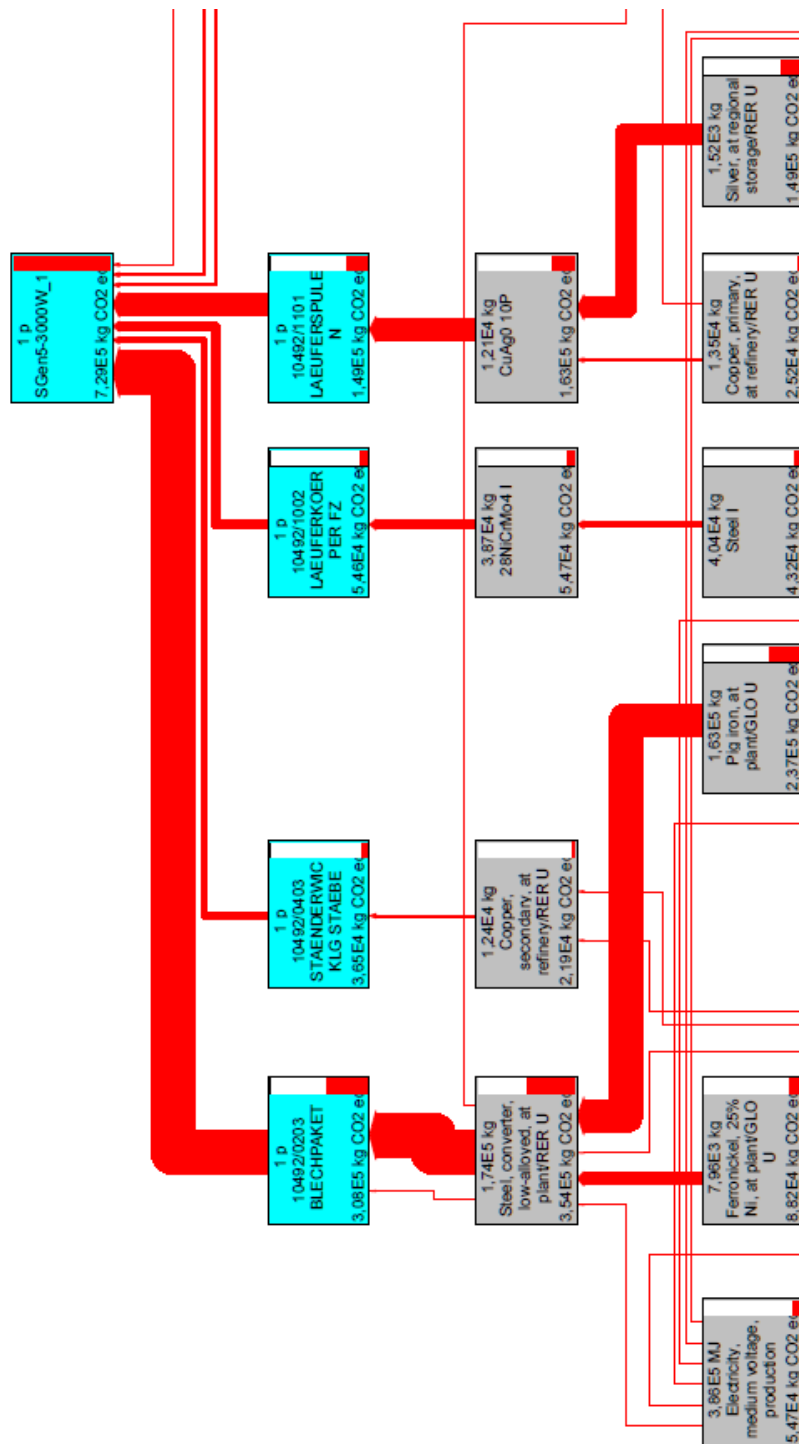


Abbildung 4.12: Modellierung SGen5-3000W (cut-off 2 %)

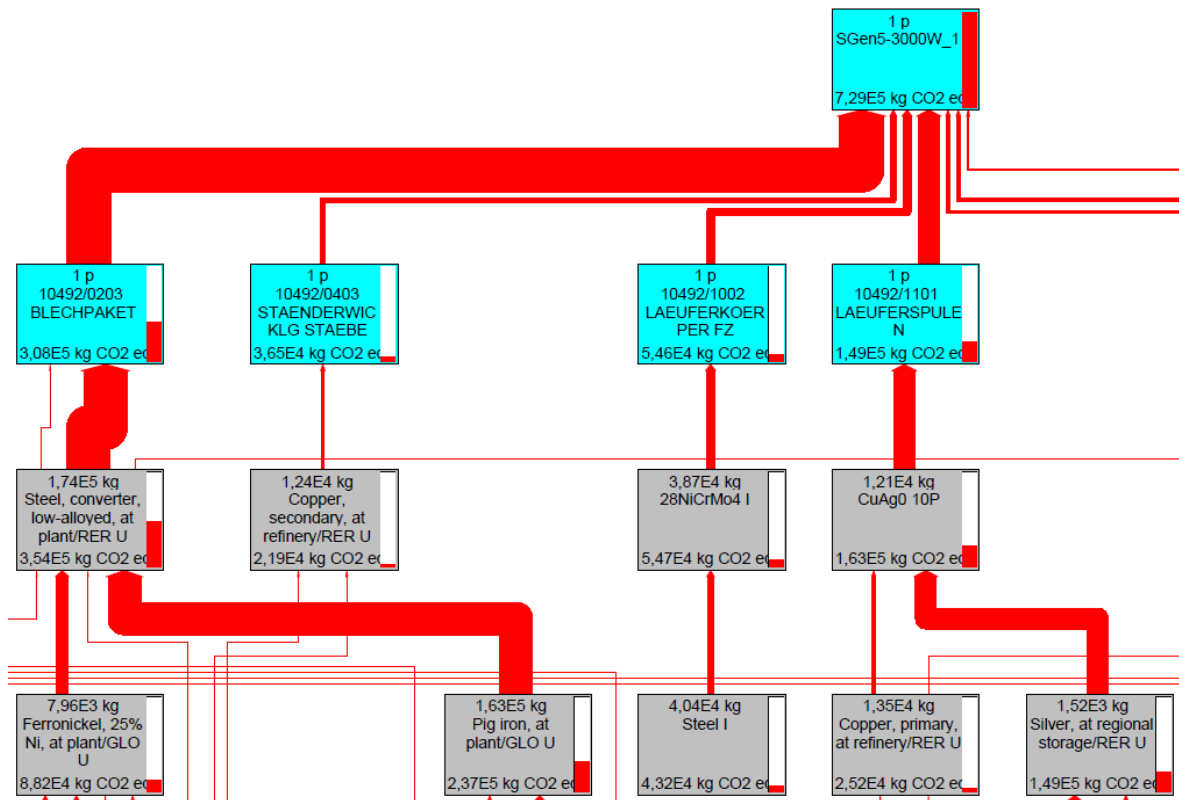


Abbildung 4.13: Ausschnitt Modellierung SGen5-3000W

Im Ausschnitt werden die Beiträge der Blechpakete auf der linken Seite aus Elektrostahl, sowie der Läuferpulen rechts aus Kupferlegierungen deutlich.

Tabelle 4.4: Materialzusammensetzung SGen5-3000W

Stoffgruppe	Gewicht [kg]
Stahl	292.257
Unlegiert	36.316
Niedriglegiert	241.625
Hochlegiert mit Chrom	793
mit Chrom-Nickel	9.125
Gusseisen	4.273
Nichteisenmetalle, Nichteisenmetalllegierungen	45.839
Kupfer- und Kupferlegierungen	45.817
Anorganische Werkstoffe, Keramik	678
Kunststoffe	4.810
Sonstige Werkstoffe	3.609

4.4.2 Fertigung Generator

Die Fertigung des Generators verläuft in den zwei Hauptsträngen Rotor- und Statorfertigung. In Abbildung 4.14 wird der Verlauf der beiden parallel ablaufenden Hauptarbeitsstränge mit Prozessschritten beschrieben. Der Rotor wird als Rohschmiedeteil zu Beginn in Dreh- und Fräsmaschinen bearbeitet. Parallel wird mit der Herstellung des Stators durch Schichtung von Blechsegmenten begonnen. Nachdem am Rotor die Nuten, Bohrungen und Kerben gefertigt sind, werden die Rotorwicklungen eingebaut. Diese werden isoliert und anschließend wird der Rotor aufgeheizt sowie elektrisch geprüft. Das Ausbalancieren des Rotors in einem Wuchtbunker schließt die Arbeiten am Rotor ab.

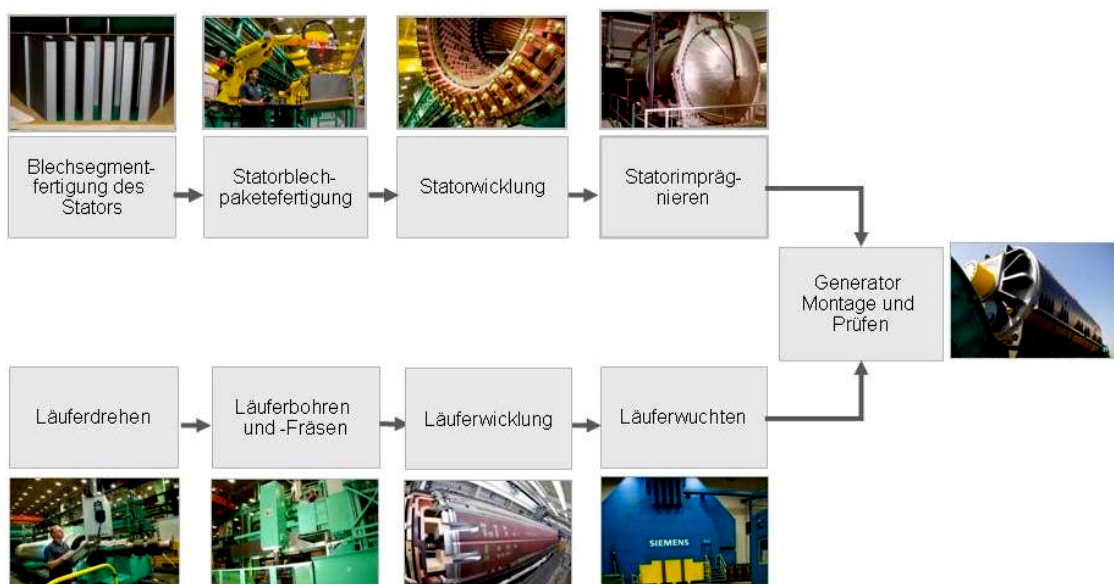


Abbildung 4.14: Prozessschritte der Fertigung SGen5-3000W

Die gestapelten Segmente des Stators werden verpresst und aufgeheizt und danach werden die Statorwicklungen eingebaut und verlötet. Der Stator wird in einer Vakuumkammer mit Harz isoliert und gehärtet. Nach dem Aushärten wird der Rotor in den Stator eingesetzt und beides mit dem Gehäuse und dem Kühlsystem verbunden.

Die Fertigung des Rotors trägt zu 70 % der hauptsächlich Elektrizitäts-bezogenen Aufwendungen der gesamten Fertigung des Generators bei. An diesem Anteil hat das Wuchten im Wuchtbunker wiederum einen Anteil von 82 %. Für den restlichen Anteil der Statorfertigung haben die durch das Ganztränkenverfahren im Vakuum verursachten Aufwendungen mit 40 % den größten Anteil.

4.5 Übrige Maschinentechnik

4.5.1 Sachbilanz Abhitzedampferzeuger

Der Abhitzedampferzeuger (AHDE) liefert Frischdampf in einer Hochdruck-, einer Mittel- und einer Niederdruckstufe (siehe Abbildung 4.15). Er ist in den dampferzeugenden Abschnitten als Zwangsumlauf -Dampferzeuger nach dem Dreidruck-Prinzip ausgeführt. Am sogenannten kalten Ende des Dampferzeugers ist zunächst ein rauchgasbeheizter Kondensatvorwärmer installiert, um das Kondensat vorzuwärmen. Am Ende des AHDE befindet sich der Kamin.

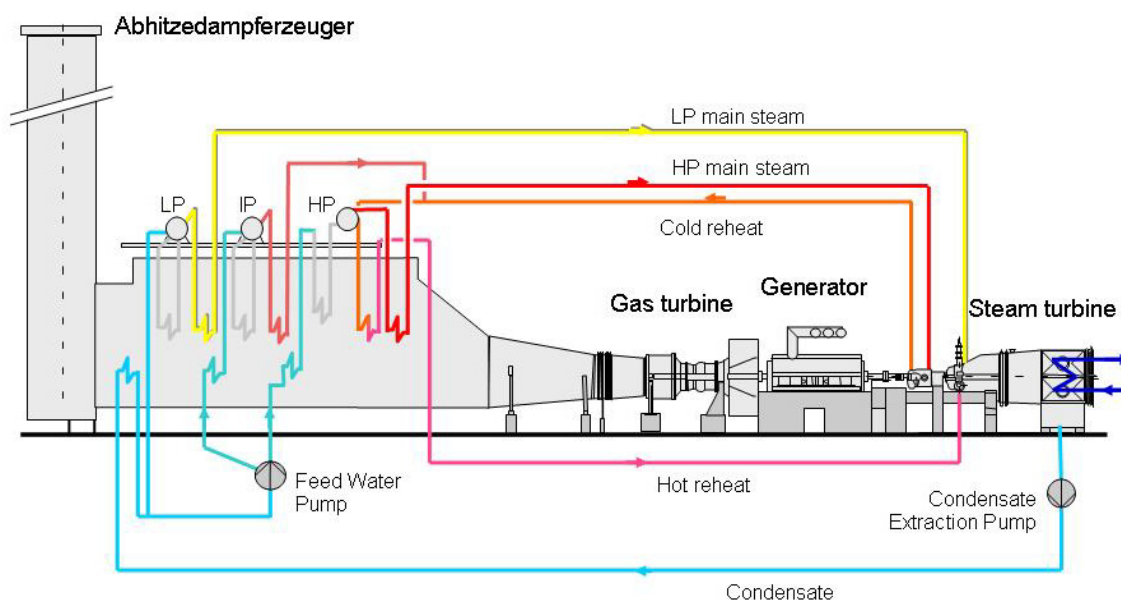


Abbildung 4.15: Schematische Darstellung 3-Druck AHDE

Neben der Stahlkonstruktion und den Wärmetauscherflächen befindet sich im AHDE, wie in Tabelle 4.5 dargestellt, auch der größte Anteil an Isolationsmaterial.

Tabelle 4.5: Materialzusammensetzung HRSG

Stoffgruppe	Gewicht [kg]
Eisen, Eisenlegierungen	4.498.800
Stahl	4.498.800
Unlegiert	3.538.800
Hochlegiert	960.000
Anorganische Werkstoffe, Keramik	135.200
Künstliche Mineralfasern	135.200

4.5.2 Sachbilanz Kondensator

Der Kondensator ist ein wassergekühlter, ungeteilter Oberflächenkondensator mit zwei Wasserkammern und ist unterhalb der Niederdruck-Turbine angeordnet. Der Dampfdom, der Mantel und der Kondensatsammelbehälter (Hotwell) sind ebenso wie die Wasserkammern als Schweißkonstruktion ausgeführt. Der Dampfdom hat einen rechteckigen Querschnitt, so dass die Kondensationsflächen optimal angeordnet werden können. Tabelle 4.6 zeigt im Mengengerüst die Zusammensetzung aus hochlegiertem und unlegiertem Stahl.

Tabelle 4.6: Materialzusammensetzung Kondensator

Stoffgruppe	Gewicht [kg]
Eisen, Eisenlegierungen	160
Stahl	160
Unlegiert	80
Hochlegiert	80

4.5.3 Sachbilanz Rohrleitungen und Armaturen

Im Weiteren ist die Sachbilanz der Rohrleitungen und Armaturen in Tabelle 4.7 gegeben. Neben dem Stahlanteil ist hier auch der Anteil am Isolationsmaterial hervorzuheben.

Tabelle 4.7: Materialzusammensetzung Rohrleitungen und Armaturen

Stoffgruppe	Gewicht [kg]
Stahl	354.549
Unlegiert	89.956
Niedriglegiert	153.505
hochlegiert	111.089
mit Chrom	77.234
mit Chrom-Nickel	33.855
Nichteisenmetalle, Nichteisenmetalllegierungen	5
Anorganische Werkstoffe, Keramik	50,8
Kunststoffe	24.951

4.6 Elektrotechnik

In Abbildung 4.16 ist die Modellierung der Sachbilanz mit dem Mengengerüst nach Tabelle 4.8 abgebildet.

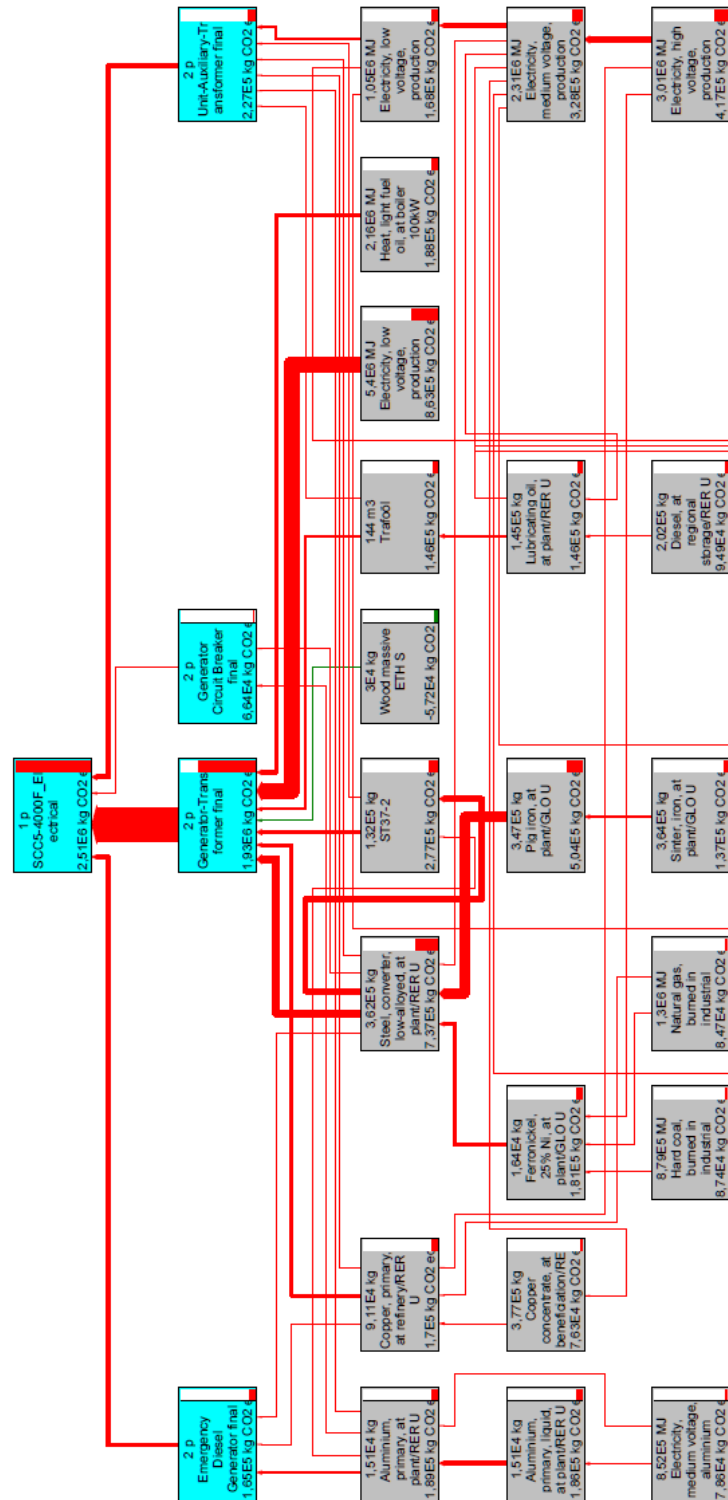


Abbildung 4.16: Modellierung Elektrotechnik (cut-off 1,5 %)

In Abbildung 4.17 werden Maschinentransformator (75 %), Eigenbedarfstransformator (9 %), Hochspannungsschaltanlage (2,6 %), Notstromdiesel (7 %) und Batterien (1,7 %) mit den in Kapitel 5.3 gegebenen Beiträgen an den Umweltauswirkungen dargestellt.

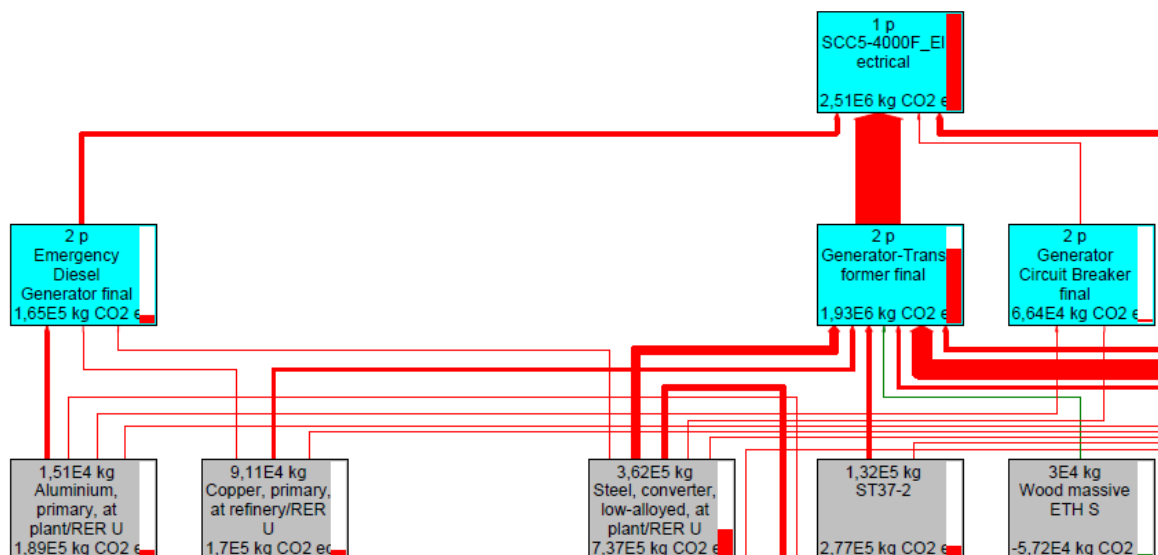


Abbildung 4.17: Ausschnitt aus Modellierung Elektrotechnik

4.6.1 Sachbilanz Elektrotechnik

In der Sachbilanz in Tabelle 4.8 wird neben dem Anteil an Eisen- und Eisenlegierungen der durch den Transport der Komponenten begründete hohe Anteil an Holz deutlich.

Tabelle 4.8: Materialzusammensetzung Elektrotechnik

Stoffgruppe	Gewicht [kg]
Eisen, Eisenlegierungen	370.530
Eisenlegierungen	361.480
Stahl	361.480
Unlegiert	361.480
Gusseisen	9.050
Nichteisenmetalle, Nichteisenmetallelegierungen	120.860
Anorganische Werkstoffe, Keramik	19.361
Kunststoffe	8.274
Sonstige Werkstoffe	30.995
Holz	30.995

4.7 Bautechnik

In Abbildung 4.18 ist die Modellierung der Bautechnik mit der Aufteilung nach Gasturbinenbereich (UMB), Abhitzeesselbereich (UHA), Dampfturbinenbereich (UMA), usw. analog der Sachbilanz in Tabelle 4.9 gegeben. Der Maschinenbereich und der Kesselbereich sind als Stahlskelettkonstruktionen auf Stahlbetonfundamenten mit vorgehängten Metallfassaden ausgeführt. Die gesamte Fläche der Anlage umfasst ca. 20000 m².

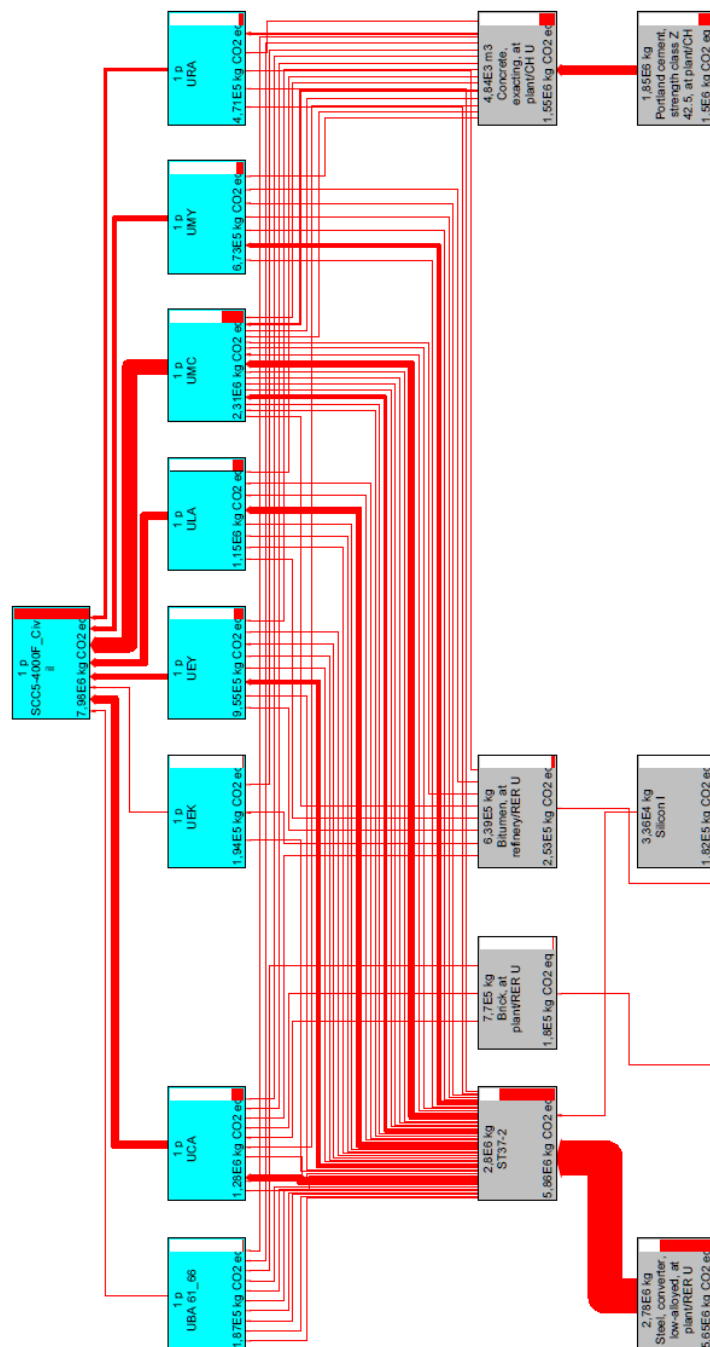


Abbildung 4.18: Modellierung Bautechnik (cut-off 2 %)

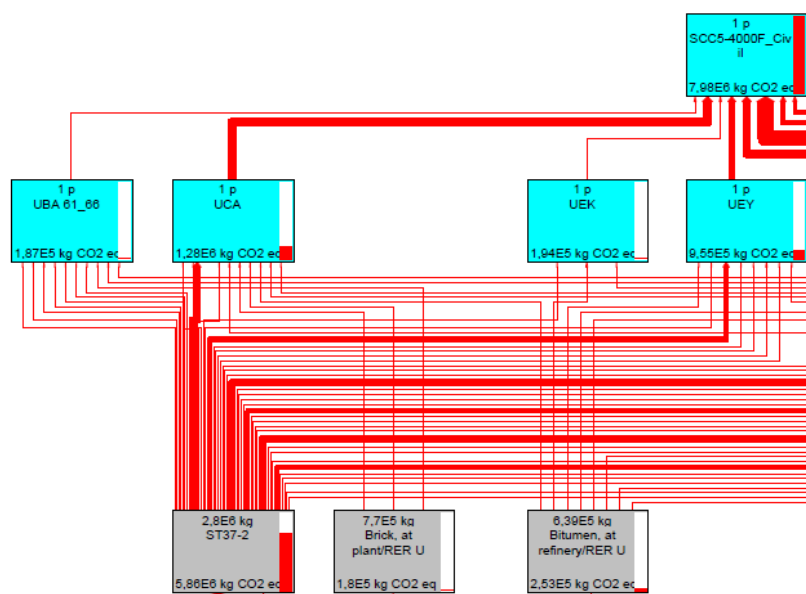


Abbildung 4.19: Ausschnitt aus der Modellierung Bautechnik

4.7.1 Sachbilanz Bautechnik

Es wird mengenmäßig der Stahl- und Betonanteil sichtbar, allerdings machen sich diese Beiträge durch ihren vergleichbar geringen spezifischen Betrag nicht in der Emissionsbilanz bemerkbar.

Tabelle 4.9: Materialzusammensetzung Bautechnik

Stoffgruppe	Gewicht [kg]
Eisen, Eisenlegierungen	1.645.095
Nichteisenmetalle, Nichteisenmetallelegierungen	1.667
Anorganische Werkstoffe, Keramik	5.082
Kunststoffe	39.357
Organische Stoffe	445
Baustoffe	39.784.023
Beton, Mörtel, Putz	38.385.952
Bitumen, Asphalt	410.373
Kies	985.000
Sand	2.215
Schalung	122
Gips	359

4.8 Betriebsphasen

Der Betrieb der Anlage wurde anhand von gemessenen Betriebsdaten aus dem Jahr 2005 für die beiden Blöcke U10 und U20 modelliert. Dieses Referenzszenario wird im Folgenden mit Szenario 0 bezeichnet.

Weiterhin wurde zum Vergleich für Grundlast das Szenario 1 und für Spitzenlast das Szenario 2 erstellt (vgl. Tabelle 6.3 und Tabelle 6.4). Die spezifischen Emissionen für den betrachteten Zeitraum und Konfiguration betragen für NO_x 50 mg/Nm³ und für CO 12 mg/Nm³. Für Staub betragen sie 5 mg/Nm³ und für SO₂ 2 mg/Nm³.

Die thermodynamischen Parameter in Tabelle 4.10, welche als direkter Input für die Berechnung der Betriebsemissionen aus der Kreislaufrechnung integriert sind, werden im Cockpit nach dem in Kapitel 3.7 beschriebenen Vorgehen zur weiteren Berechnung der Emissionen für den gesamten Lebenszyklus verwendet.

Tabelle 4.10: Thermodynamische Parameter SCC5-4000F

Brennstoff	Massenstrom	Heizwert	Abgasvolumenstrom	Druck	Temp.	Dichte	Referenz O ₂	H ₂ O act	O ₂ act.
Typ	m _{Br}	H _U	m _P	p	T	ρ	O _{2 ref}	h _t	O _{2 act}
	kg/s	[kJ/kg]	[kg/s]	[bar]	[°C]	[kg/m ³]	[Vol%]	[Vol%]	[Vol%]
Gas	15,2	46.800	623,31	1,046	602,05	0,405	15	10,85	12,11

Mit den Parametern in Tabelle 4.10 und folgender Formel zur Berechnung des Rauchgasvolumenstroms,

$$V_{feucht,O2act} = m_p * \left(\frac{1}{\rho}\right) * \left(\frac{1,013}{p}\right) * \left(\frac{T+273,15}{273,15}\right) \text{ in [Nm}^3\text{/s]} \quad (1)$$

ergibt sich aus (1)

$$V_{feucht,O2act} = 496,34 \text{ Nm}^3 / \text{s}$$

Nach Normierung auf Standardbedingungen $p = 1,013 \text{ bar}$, eine Temperatur von $T = 0^\circ\text{C}$ und auf einen Bezugssauerstoffgehalt von $O_{2 \text{ ref}} = 15 \%$ ergibt sich folgender Volumenstrom.

$$V_{\text{trocken}, O_{2 \text{ ref}}} = V_{\text{feucht}, O_{2 \text{ act}}} * \left(\frac{100}{(100-h)} \right) * \left[\frac{21 - O_{2 \text{ ref}}}{21 - \left(O_{2 \text{ act}} * \frac{100}{100-h} \right)} \right] * 3600 \text{ [in Nm}^3\text{/h]} \quad (2)$$

$$V_{\text{trocken}, O_{2 \text{ ref}}} = 1.969.667 \text{ Nm}^3\text{/h}$$

Mit dem berechneten Abgasvolumenstrom werden im Weiteren die Emissionen während der Betriebsphasen berechnet. Aus den oben in Tabelle 4.1 und Tabelle 4.10 gegebenen Werten lässt sich weiter der GuD-Wirkungsgrad berechnen:

Mit $Q_{zu} = m_{Br} \times H_u \quad (3)$

und $P_{GT} = \eta_{GT} \times Q_{zu} \quad (4)$

ergibt sich $\eta_{GuD} = \frac{P_{GT} + P_{DT}}{m_{Br} \times H_u} \quad (5)$

Mit den hier gegebenen Werten in Gleichung (5), sowie den Werten aus Tabelle 4.1 ergibt sich der Brutto-Wirkungsgrad des GuD zu:

$$\eta_{GuD} = 0,580$$

Die oben berechneten Werte gehen zur weiteren Berechnung als Inputparameter in die Modellierung und Berechnung der Lebenszyklusanalyse ein.

Neben dem spezifischen Lastregime und der Anzahl der Starts, Shutdowns und Vollaststunden, ist im unteren Teil die Berechnung der spezifischen Emissionsfaktoren, sowie der vermiedenen CO₂ Emissionen durch den Einsatz dieses GuD-Kraftwerks gegen den sogenannten ‚World Average‘ gegeben. Auf diese Berechnung wird gesondert im Kapitel 6.3 eingegangen.

FossilPower4Sustainability		FP4S			Siemens Energy									
		Szenario 1			Szenario 2			Szenario 0						
		SCC5-4000F 2x1S			SCC5-4000F 2x1S			SCC5-4000F 2x1S						
Gasturbine		SGT5-4000F			SGT5-4000F			SGT5-4000F						
Steamturbine		SST5-3000			SST5-3000			SST5-3000						
Generator 1		SGen5-3000W			SGen5-3000W			SGen5-3000W						
Generator 2		SGen5-3000W			SGen5-3000W			SGen5-3000W						
HRSG		HRSG			HRSG			HRSG						
Condenser		SCon-100			SCon-100			SCon-100						
Power Output		825 MW		58,0 %	825 MW		58,0 %	825 MW		58,0 %				
		413	413	MW	413	413	MW	413	413	MW				
GT		39,3 %		280 MW	39,3 %		280 MW	39,3 %		280 MW				
ST				133 MW			133 MW			133 MW				
		U10	U20		U10	U20		U10	U20					
Lifetime		35		a	35		a	35		a				
Operation		4.480	4.480	h	7.490	7.490	h	4.684	5.040	h				
		156.800	156.800		262.150	262.150		163.940	176.400					
Startups		50	50	hot	0	0	hot	65	35	hot				
		200	200	warm	1	1	warm	26	18	warm				
		2	2	cold	0	0	cold	9	15	cold				
Shutdowns		252	252		1	1		100	68					
EOH		7.000	7.000	eoh	7.500	7.500	eoh	5.684	5.720	eoh				
Emissions		NOx	50	50	[mg/Nm ³]	50	50	[mg/Nm ³]	50	50	[mg/Nm ³]			
		CO	12	12	[mg/Nm ³]	12	12	[mg/Nm ³]	12	12	[mg/Nm ³]			
		PM	5	5	[mg/Nm ³]	5	5	[mg/Nm ³]	5	5	[mg/Nm ³]			
		SO ₂	2	2	[mg/Nm ³]	2	2	[mg/Nm ³]	2	2	[mg/Nm ³]			
		NH ₃	0	0	[mg/Nm ³]	0	0	[mg/Nm ³]	0	0	[mg/Nm ³]			
Emissions		NOx	503	503	1.006	[t/a]	738	738	1.476	[t/a]	483	513	996	[t/a]
		CO	2.539	2.539	5.077	[t/a]	187	187	374	[t/a]	877	744	1.621	[t/a]
		PM	44	44	88	[t/a]	74	74	148	[t/a]	46	50	96	[t/a]
		SO ₂	18	18	35	[t/a]	30	30	59	[t/a]	18	20	38	[t/a]
		CO ₂	0,70	0,70	1,39	[Mt/a]	1,08	1,08	2,15	[Mt/a]	0,69	0,74	1,43	[Mt/a]
CO ₂ Emissions		operation	348,23	348,23	kg/MWh	348,23	348,23	kg/MWh	348,23	348,23	kg/MWh			
		starts/shutdowns	504,37	504,37	kg/MWh	502,20	502,20	kg/MWh	507,21	499,08	kg/MWh			
		total	356,43	356,43	kg/MWh	348,25	348,25	kg/MWh	351,06	350,23	kg/MWh			
			24,34	24,34	Mt/ lifecycle	37,67	37,67	Mt/ lifecycle	24,17	25,83	Mt/ lifecycle			
Saving			0,66		Mt CO ₂ /a	1,28		Mt CO ₂ /a	0,80		Mt CO ₂ /a			
			23,14		Mt CO ₂ total	44,73		Mt CO ₂ total	28,06		Mt CO ₂ total			
					against World Fossil Average			against World Fossil Average			against World Fossil Average			

Abbildung 4.20: Input zur Berechnung und Vergleich der Emissionen

Zum Vergleich verschiedener Konfigurationen ist bereits hier eine Gegenüberstellung unterschiedlicher Szenarien und der daraus resultierenden Umweltprofile möglich.

4.9 Inbetriebsetzung

Die umweltrelevanten Prozesse der Inbetriebsetzung stellen das chemische Beizen der Rohrleitungen und des Kessels zur Säuberung von Flugrost und Verunreinigungen und zur Ausbildung einer Schutzschicht gegen Korrosion, sowie der Probebetrieb bei unterschiedlichen Lastpunkten dar. Für die Inbetriebsetzung wurden 54 Tage á 12 h = 648 h im Volllastbetrieb und 59 Tage á 12 h = 708 Stunden bei 80 % Last mit den entsprechend angepassten Wirkungsgraden modelliert. Für das Beizen wurden die in Abbildung 4.21 gegebenen Verbrauchsdaten modelliert. Es wird in Abbildung 4.22 deutlich, dass der Verbrauch an Flusssäure (HF) den größten Beitrag der Umweltauswirkungen ausmacht.

Materialien/Baugruppen	Menge	Einheit	Verteilung	SA ^{^2} oder 2 ^{^4} Min	Max	Kommentar
Hydrogen fluoride, at plant/GLO U	7500	kg	Nicht definiert			
HF ETH 5	220	kg	Nicht definiert			Wetting Agent
HF ETH 5	600	kg	Nicht definiert			NH4OH - Inhibitor
Ammonia, liquid, at regional storehouse/RER U	225	kg	Nicht definiert			
Hydrogen peroxide, 50% in H2O, at plant/RER U	2300	kg	Nicht definiert			
Lime, hydraulic, at plant/CH U	9000	kg	Nicht definiert			
(Zeile hier einfügen)						

Abbildung 4.21: Verbrauch für das Beizen in der Inbetriebsetzung

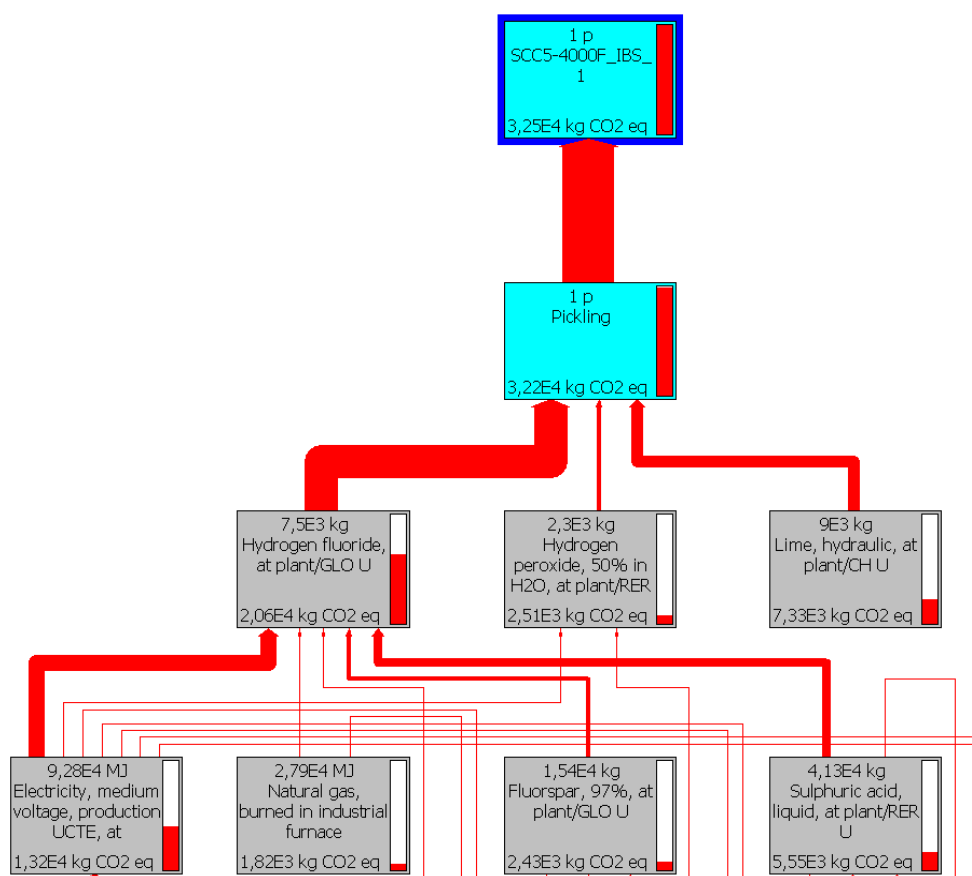


Abbildung 4.22: Modellierung der Inbetriebsetzung

4.10 Wartung

Für die Heißgasteile der Gasturbine werden im Zusammenhang mit der auf 25.000 eoh (equivalent operating hours) festgelegten Wartungsintervalle die Leit- und Laufschaufeln sowie die keramischen Hitzeschilde zu Teilen ausgetauscht. Bei einer Turbinenauslastung von 93 % entsprechen 25.000 eoh, also die gewichteten Summe der Betriebsstunden, ca. drei Jahren, so dass daher etwa alle drei Jahre eine Wartung vorgenommen wird. Das bedeutet, dass im Laufe der angenommenen Betriebsdauer von 35 Jahren 11 Mal ein Austausch stattfindet.

Dabei werden folgende Wartungsarbeiten vorgenommen:

- Austausch der keramischen Hitzeschilde zu 50 %
- Austausch der Leitschaufeln:
 - Stufe 1 zu 100 %
 - Stufe 2 zu 60 %
 - Stufe 3 zu 10 %
 - Stufe 4 zu 5 %
- Austausch der Laufschaufeln:
 - Stufe 1 zur 100 %
 - Stufe 2 zu 90 %
 - Stufe 3 zu 30 %
 - Stufe 4 zu 5 %

Für die Dampfturbine und den Generator wurden folgenden Zeiträumen für die Serviceintervalle angesetzt:

Minor Overhaul	10-12 Monate
Medium Overhaul	12-16 Monate
Major Overhaul	16-20 Monate

Da der Austausch der Komponenten sehr stark vom Lastregime und der Fahrweise abhängig ist, wurde ein entsprechender Austausch bzw. Ersatz der Verschleißteile angenommen und in die Sachbilanz integriert.

4.11 End of Life Szenario

Bedingt durch die hier vorausgesetzten 35 Jahre Lebensdauer der Komponenten, stellt die Modellierung der Lebensphase End of Life ein Szenario dar, welches nur unter Annahme verschiedener Randbedingungen getroffen werden kann. Entsprechend der Vorgaben aus ISO 14040 und ISO 14044 wurde für das Recycling der Materialien ein sogenanntes ‚closed-loop recycling‘ modelliert, bei dem eine Recyclingrate der verwendeten Primärmaterialien für Stahl und Ferrometalle zu 95 % und für Non-Ferrometalle zu 98 % angesetzt wurde. Der Lebenszyklus inklusive des End of Life Szenarios als geschlossener Kreislauf ist in Abbildung 4.23 am Beispiel des AHDE gegeben.

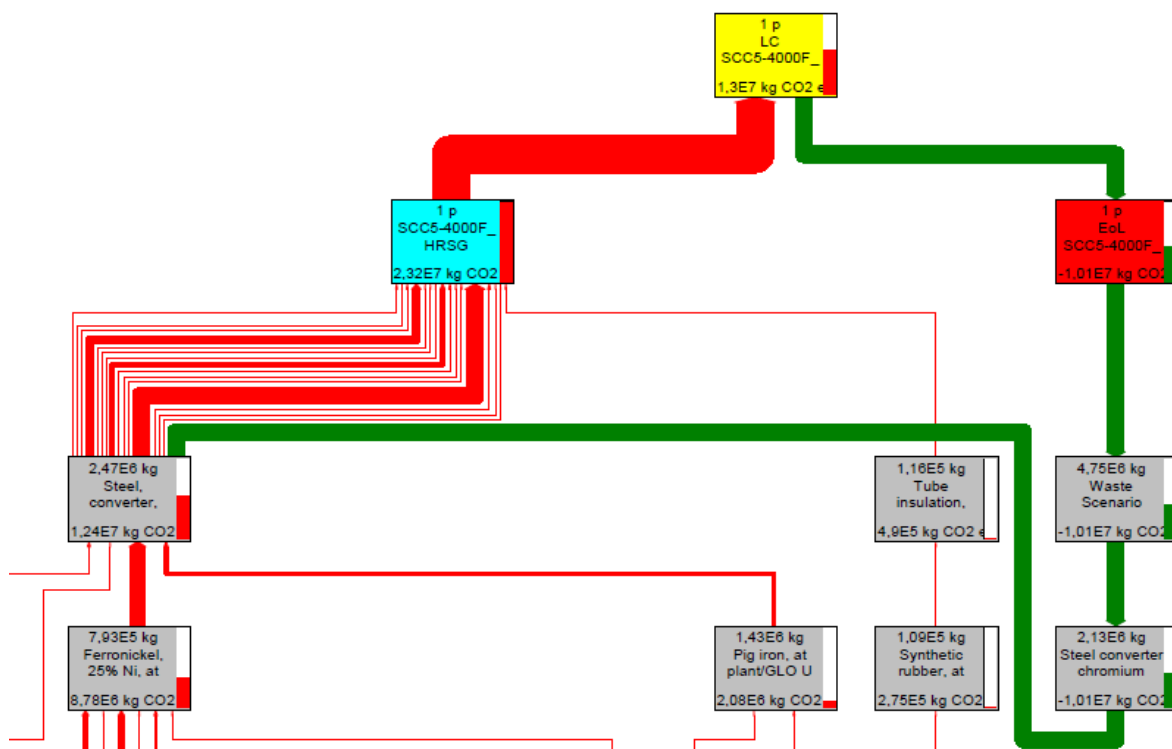


Abbildung 4.23: Closed-loop Recycling Szenario am Beispiel AHDE

Auf der linken Seite werden die Komponenten und Werkstoffe deutlich, in diesem Fall hochlegierter Stahl, und auf der rechten Seite die Gutschrift der stofflichen Verwertung als Beitrag des grünen Pfeils. Die weiteren Abfallszenarien und Zuordnungen der Materialien und Werkstoffgruppen sind in Abbildung 4.24 gegeben. Es wurden auch hier Prozesse und Module aus der ecoinvent Datenbank herangezogen, um eine durchgängige Modellierung und Berechnung der Stoffflüsse zu gewährleisten. Zur durchgängigen und vollständigen Modellierung der Abfallszenarien war eine Zuordnung aller Werkstoffe und eingesetzten Materialien zu den jeweiligen Abfallbehandlungsarten notwendig.

Materialien und/oder Abfalltypen, die aus dem Abfallstrom aussortiert werden	
Abfallszenario/-behandlung	Material- /Abfalltyp
Aluminium Recycling	Aluminium
Copper Recycling	Copper
Steel converter chromium Recycling	Steel, converter, chromium steel 18/8, at plant/RER U
Steel converter low alloy Recycling	Steel, converter, low-alloyed, at plant/RER U
Steel converter unalloyed Recycling	Steel, converter, unalloyed, at plant/RER U
Steel high alloy recycling	High Alloy steel
Steel low alloy recycling	Low alloy Steel
Nickel Recycling	Non-ferro
Lead Recycling	Non-ferro
Zinc Recycling	Zincs
Disposal, building, concrete, not reinforced, to recycling/CH 5	Concrete, exacting, at plant/CH 5
Disposal, building, concrete, not reinforced, to recycling/CH 5	Concrete, exacting, with de-icing salt contact, at plant/CH 5
Disposal, building, concrete, not reinforced, to final disposal/CH 5	Poor concrete, at plant/CH 5
Disposal, building, brick, to recycling/CH 5	Brick, at plant/RER 5
Disposal, building, brick, to recycling/CH 5	Roof tile, at plant/RER 5
Disposal, building, cement (in concrete) and mortar, to sorting plant/CH	Lime mortar, at plant/CH 5
Disposal, building, cement (in concrete) and mortar, to sorting plant/CH	Cement cast plaster floor, at plant/CH 5
Disposal, building, fibre board, to final disposal/CH 5	Glued laminated timber, indoor use, at plant/RER 5
Disposal, building, fibre board, to final disposal/CH 5	Particle board, indoor use, at plant/RER 5
Disposal, building, fibre board, to final disposal/CH 5	Sawn timber, softwood, raw, air dried, u=20%, at plant/RER 5
Disposal, building, fibre board, to final disposal/CH 5	Plywood, outdoor use, at plant/RER 5
Disposal, building, brick, to sorting plant/CH 5	Ceramics ETH 5
Disposal, building, brick, to sorting plant/CH 5	Sanitary ceramics, at regional storage/CH 5

Abbildung 4.24: Zuordnung der Abfallszenarien zu Materialtypen

Die Recyclingraten wurden außerdem im in Kapitel 3.7 beschriebenen Cockpit als Parameter außerhalb der Software modelliert und damit dynamisch gestaltet. Es ist abschließend zu sagen, dass die potentielle Gutschrift der End of Life Phase auf den beschriebenen Annahmen beruht. Es wurde die Phase dynamisch modelliert, um Szenarien vergleichen zu können, eine Gegenrechnung bzw. Verrechnung mit den Aufwendungen und Darstellung als Gesamtsumme wurde nicht dargestellt, um den Anforderungen an Transparenz und Nachvollziehbarkeit sowohl der ISO 14040 als auch den Reporting Richtlinien des GHG Protocols (vgl. Kapitel 6.3) Rechnung zu tragen.

4.12 Zusammenfassung der Sachbilanz

Die Übersicht der Sachbilanz für ein GuD SCC5-4000F in Tabelle 4.11 zeigt die mengenmäßigen Anteile der Komponenten und Gewerke am Gesamtmassengerüst. Es wird deutlich, dass die in der Kategorie Baustoffe zusammengefassten Werkstoffe mit 73 % den größten Anteil haben. Nach Gewerken aufgeteilt ergeben sich für die Bautechnik mengenmäßig 78 % der Gesamtmasse. Mit 17 % folgt dann der Abhitzedampferzeuger.

Tabelle 4.11: Sachbilanz nach Stoffgruppen SCC5-4000F 2x1S

Stoffgruppe	Gewicht [kg]	Anteil %
Eisen, Eisenlegierungen	13.950.462	25,6
Nichteisenmetalle, Nichteisenmetallelegierungen	301.794	0,6
Sonstige Metalle und Halbmetalle	35	0,0
Anorganische Werkstoffe, Keramik	317.281	0,6
Kunststoffe	87.239	0,2
Sonstige Werkstoffe	66.577	0,1
Organische Stoffe	5.331	0,0
Baustoffe	39.784.023	73,0
Total	54.512.744	100,0

Die Erstellung und Zusammenstellung der Sachbilanz stellt den aufwendigsten Schritt einer LCA Studie dar, da eine große Anzahl von Datensätzen zugeordnet und modelliert werden muss. Da aber hier die Basis für eine belastbare und insbesondere glaubwürdige Studie gelegt wird, ist eine entsprechende Genauigkeit unabdingbar. Eine vollständige Übersicht der Sachbilanz nach Stoffgruppen ist im Anhang in Tabelle 9.4 und folgende und in den dort gegebenen Abbildungen dargestellt.

Die Zusammenstellung der Sachbilanz bildet die Grundlage für die weitere Auswertung und Bewertung der Umweltwirkungskategorien. Das hier dargestellte Mengengerüst und die damit modellierten und hinterlegten Vorketten werden im folgenden Schritt der Wirkungsabschätzung mit Hilfe der in Kapitel 2.6 beschriebenen Methodik in Wirkungspotentiale übersetzt und anschließend bewertet. Eine weitere Auswertung wird dann eine Zuordnung von Komponenten und Werkstoffen mit hoher, spezifischer Emissionsintensität vornehmen. Erst dadurch kann eine Aussage über die Auswirkung von Designentscheidungen auf das Umweltprofil von Produkten getroffen werden.

5 Auswertung und Bewertung

Dieses Kapitel beschreibt die Ergebnisse der Ökobilanz für das GuD-Kraftwerk SCC5-4000F 2x1S analog der Anforderungen der ISO 14040/44. Beginnend mit den Werkstoffen und der Fertigung der Komponenten wurden über die Errichtung, den Betrieb bis hin zum End of Life Szenario alle Phasen des Lebenszyklus modelliert und analysiert.

5.1 Wirkungsabschätzung

Aus dieser Analyse resultieren die quantitativen Wirkungspotentiale für die Lebensphasen des Produktsystems. In der Wirkungsabschätzung findet die Übersetzung der ermittelten Sachbilanzdaten mit Hilfe von definierten Charakterisierungsfaktoren in Wirkungspotentiale statt. Die Wirkungsabschätzung nach ISO 14040/44 besteht aus verbindlichen und optionalen Abschnitten (siehe Kapitel 2.6). Wichtig zu betonen ist, dass in der vorliegenden Arbeit ausschließlich Ergebnisse der Charakterisierung dargestellt sind. Es wurde keine Aggregation z. B. als Single Score durchgeführt.

Global Warming in Mt CO₂e

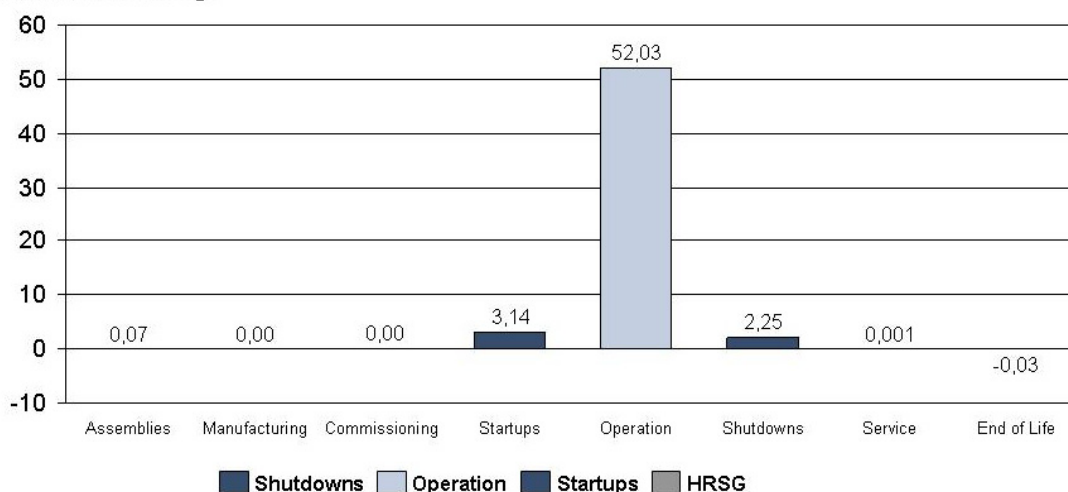


Abbildung 5.1: Gesamtergebnis der Wirkungsabschätzung in Mt CO₂e (35 Jahre)

In Abbildung 5.1 ist das Gesamtergebnis über den gesamten Lebenszyklus von 35 Jahren dargestellt. Es wird deutlich, dass der Gesamtbeitrag der Betriebsphase an der Kategorie Global Warming erwartungsgemäß den größten Beitrag liefert. Die weitere Detaillierung im Folgenden wird auf die einzelnen Betriebsphasen detailliert eingehen, und außerdem verschiedene Szenarien vergleichend darstellen.

Für diese Arbeit sind insbesondere die Wirkungskategorien ‚Global Warming‘ (vgl. Abbildung 5.1) und ‚Non-Renewable Energy‘ (vgl. Kapitel 5.3) von Interesse, da die Ergebnisse dieser Kategorien aussagekräftige Werte für Systeme zur Strom- und Wärmezeugung darstellen.

Die weitergehende Betrachtung der Emissionen von Treibhausgasen ist aufgeschlüsselt nach Beiträgen der Phasen in Kapitel 5.2 gegeben. Alle im Kapitel 2.6 beschriebenen Wirkungskategorien sind außerdem im Modell verfügbar und im Anhang beschrieben.

Die im Folgenden detailliert beschriebenen Emissionen von Treibhausgasen spielen als Schadenskategorie zur Bewertung von Kraftwerken die entscheidende Rolle, da hierdurch der Beitrag zur globalen Erwärmung direkt quantifiziert werden kann. In Abbildung 5.2 ist folglich das Ergebnis für den Lebenszyklus des beschriebenen GuD-Kraftwerks für diese Kategorie gegeben.

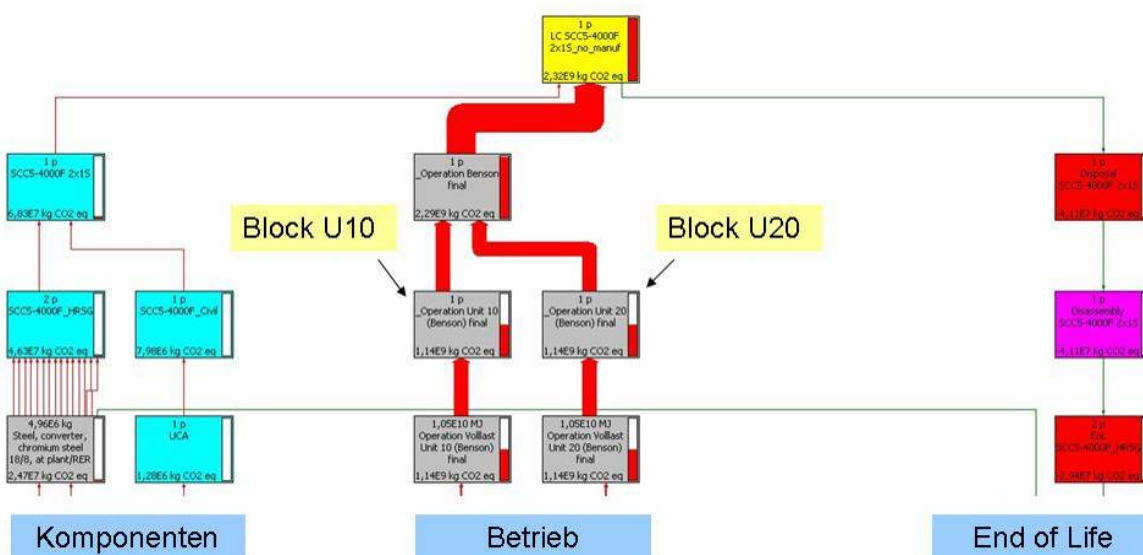


Abbildung 5.2: Ergebnisse Charakterisierung SCC5-4000F in kg CO₂e (cut-off 0,3 %)

Es wird auch hier der signifikante Beitrag der Betriebsphase im Vergleich zu den anderen Lebensphasen deutlich. Zur weiteren Detailanalyse werden nun zuerst die Betriebsphasen verglichen, um eine bessere Darstellung der Emissionsbeiträge zu erhalten.

Danach werden in verschiedenen Szenarien die Sensitivitäten und damit die Einflussmöglichkeiten auf die Reduktion des Umweltprofils betrachtet.

5.2 Betriebsphasen

Zum Vergleich der Emissionsintensität, d.h. der Emissionen bezogen auf die Nettostromerzeugung über den gesamten Lebenszyklus, sind in Tabelle 5.1 die CO₂ Emissionsfaktoren der Lebensphasen gegeben.

Tabelle 5.1: CO₂ Emissionsfaktoren für SCC5-4000F

Lebenshase	Ergebnis	Einheit
Herstellung	0,9	kg/MWh
Betrieb	350,2	kg/MWh
End of Life	-0,2	kg/MWh
Lebenszyklus gesamt	350,9	kg/MWh

Die Berechnung der neben den Kohlendioxidemissionen relevanten Beiträge ist in Abbildung 6.2 gegeben.

Zur weiteren Analyse wurden die Ergebnisse für die verschiedenen Betriebsphasen der beiden Blöcke U10 und U20 ermittelt, welche aufgeschlüsselt in den beiden folgenden Abbildungen gegeben sind.

Global Warming in Mt CO₂ e

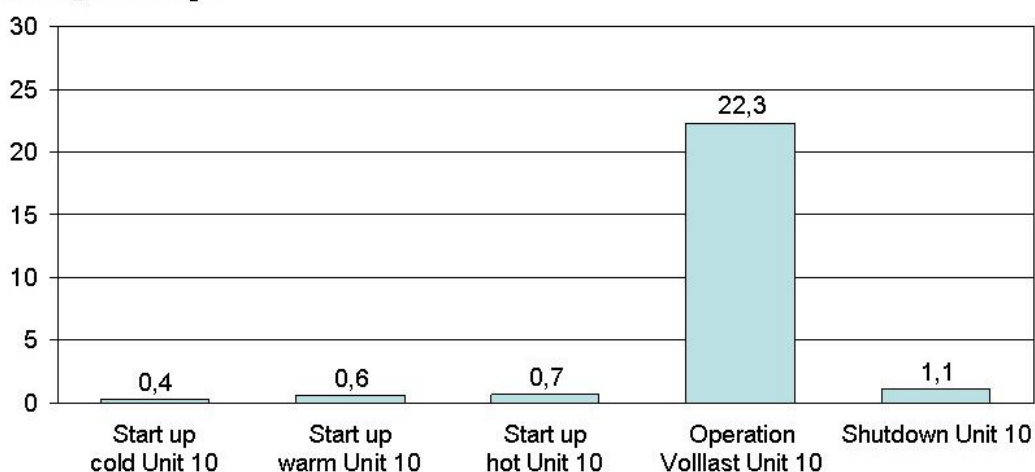


Abbildung 5.3: Ergebnisse der Betriebsphasen für Block U10 absolut in Mt CO₂e

Global Warming in Mt CO₂ e

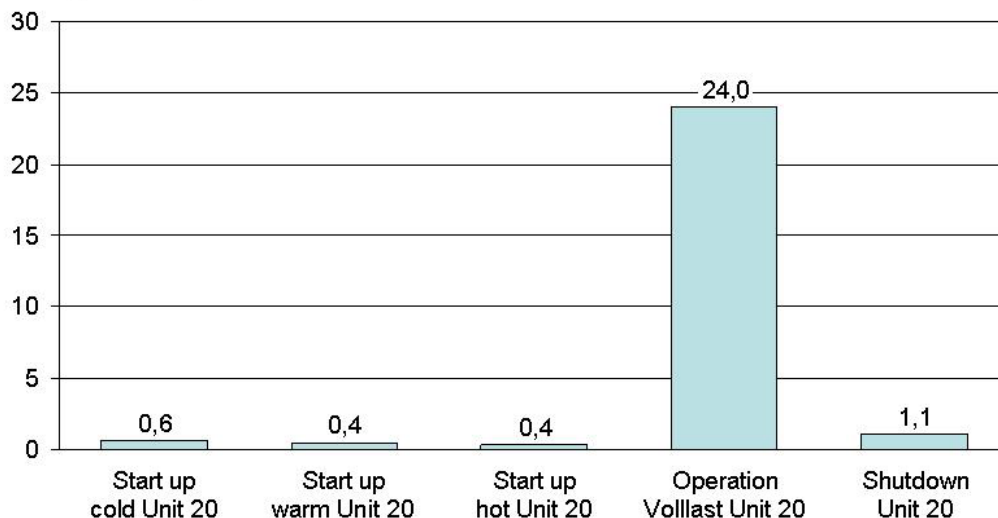


Abbildung 5.4: Ergebnisse der Betriebsphasen für Block U20 in Mt CO₂e

Es wird in Abbildung 5.4 der signifikante Beitrag der Volllaststunden der beiden Blöcke auf das Umweltprofil deutlich.

Um zusätzlich die Emissionen der betrachteten Betriebsweise mit den Emissionen im Grundlastbetrieb und im Spitzenlastbetrieb zu vergleichen, wurden in Abbildung 6.4 mögliche Einsparungen durch Steigerung des Wirkungsgrades während des Starts betrachtet. Eine weitere Analyse der Emissionen der Betriebsphase zeigt Abbildung 5.5, an Hand derer weiterhin deutlich wird, dass die Aufwendungen für den Transport des Brennstoffs (5.000 km per Pipeline) mit 3,8 Mt CO₂ einen Anteil von 7 % haben.

Global Warming in Mt CO₂ e

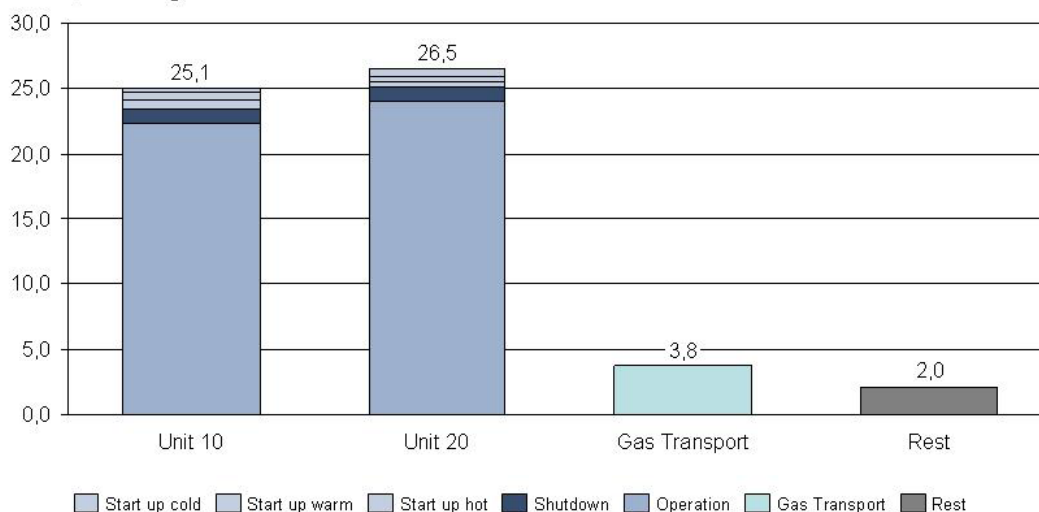


Abbildung 5.5: Detaildarstellung der Emissionen im Betrieb in Mt CO₂e

5.3 Komponenten

Neben dem Betrieb und den daraus resultierenden Umweltauswirkungen, wird im Folgenden auf die Emissionen für die Werkstoffe, die Herstellung, den Service und die Phase End of Life der Komponenten eingegangen.

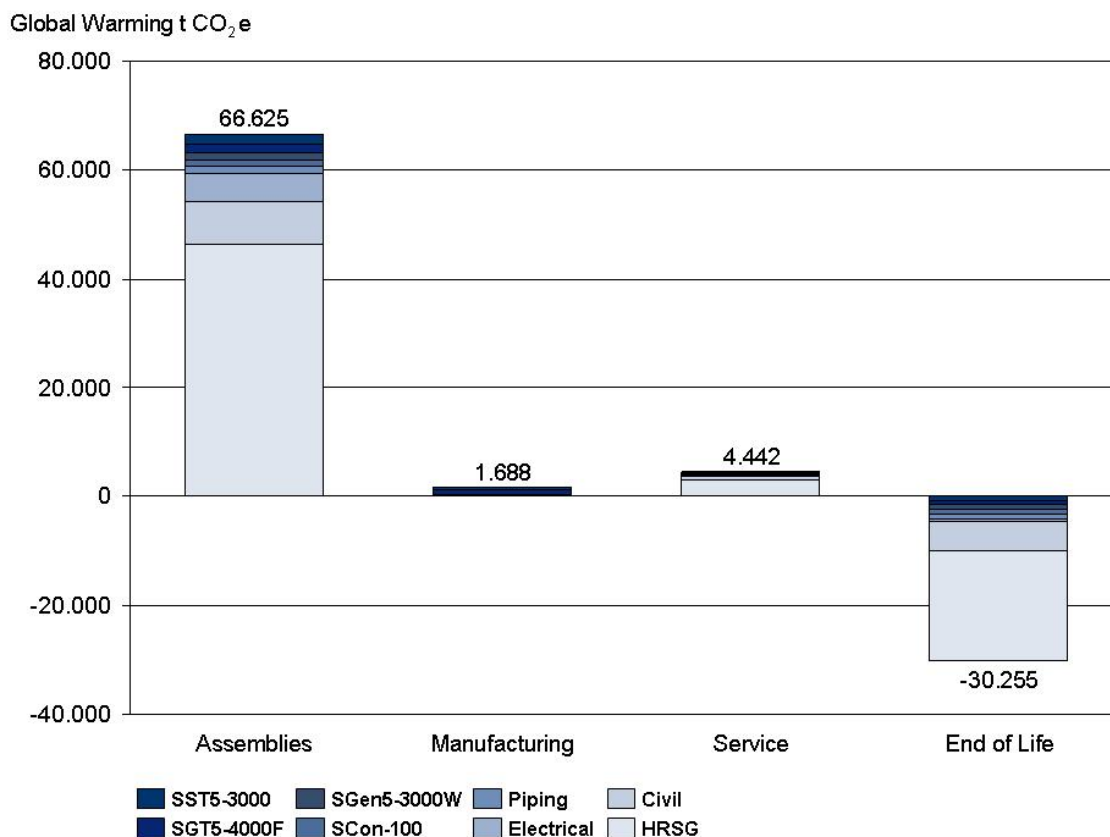


Abbildung 5.6: Ergebnisse der Wirkungsabschätzung der Komponenten in t CO₂e

In den folgenden Abbildungen sind die dargestellten Farben wie folgt zu lesen:

Auf oberster Ebene kennzeichnet ein gelber Kasten einen vollständigen Lebenszyklus einer Komponente. Dieser besteht aus einem oder mehreren hellblauen Kästchen, welcher eine Baugruppe kennzeichnet. Darunter in den grau dargestellten Kästchen sind die Werkstoffe und Prozesse dargestellt. Das End of Life Szenario ist durch die in rot gehaltenen Kästchen und das Abfallszenario darunter in lila dargestellt.

Es werden nun die Ergebnisse der Ökobilanz für die Hauptkomponenten in t CO₂e gegeben. Für die Gasturbine haben sich die in Abbildung 5.7 gezeigten Emissionen ergeben.

Global Warming in t CO₂e

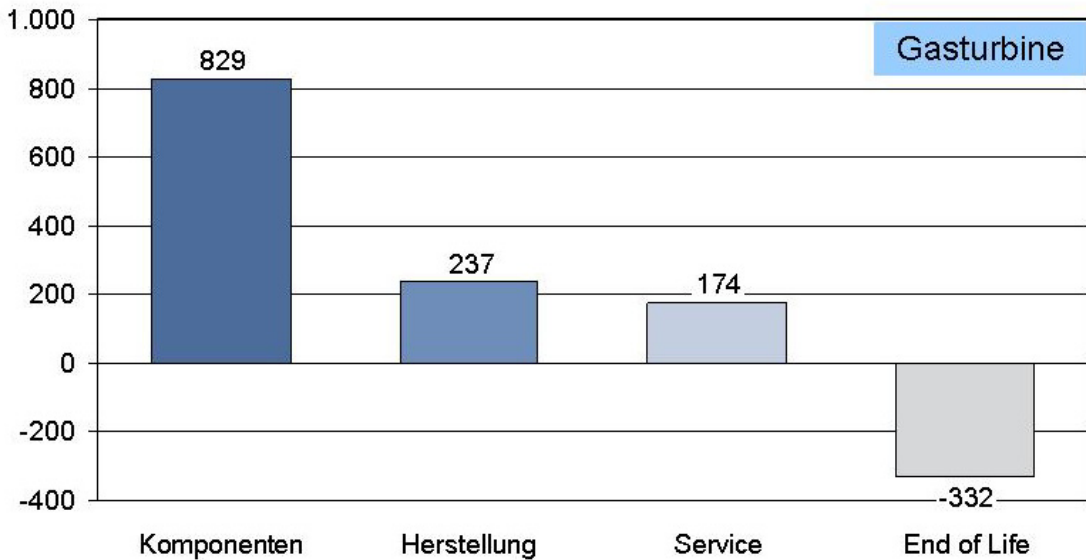


Abbildung 5.7: Ergebnisse der Wirkungsabschätzung SGT5-4000F

Die Struktur der modellierten Komponenten der Gasturbine ist in Abbildung 5.8 gegeben.

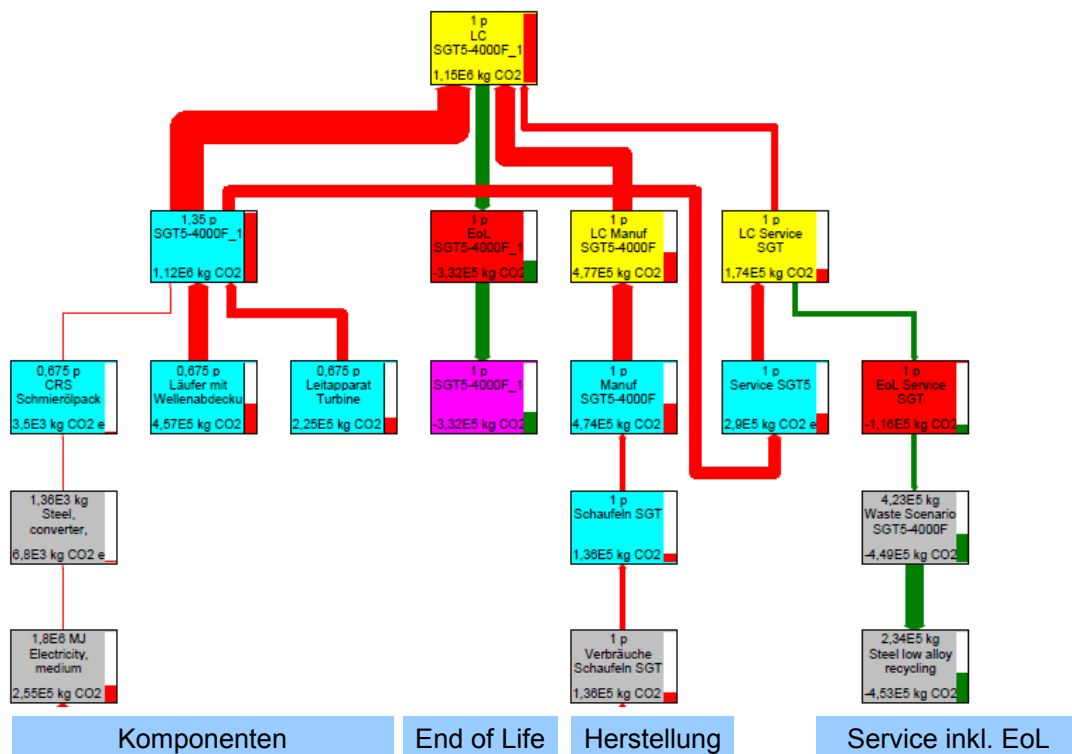


Abbildung 5.8: Lebenszyklus SGT5-4000F in CO₂e (cut-off 15 %)

Abbildung 5.9 zeigt die Emissionen als Ergebnisse der Lebensphasen für die Dampfturbine. Auch hier wird der überwiegende Anteil durch die Werkstoffe beigetragen.

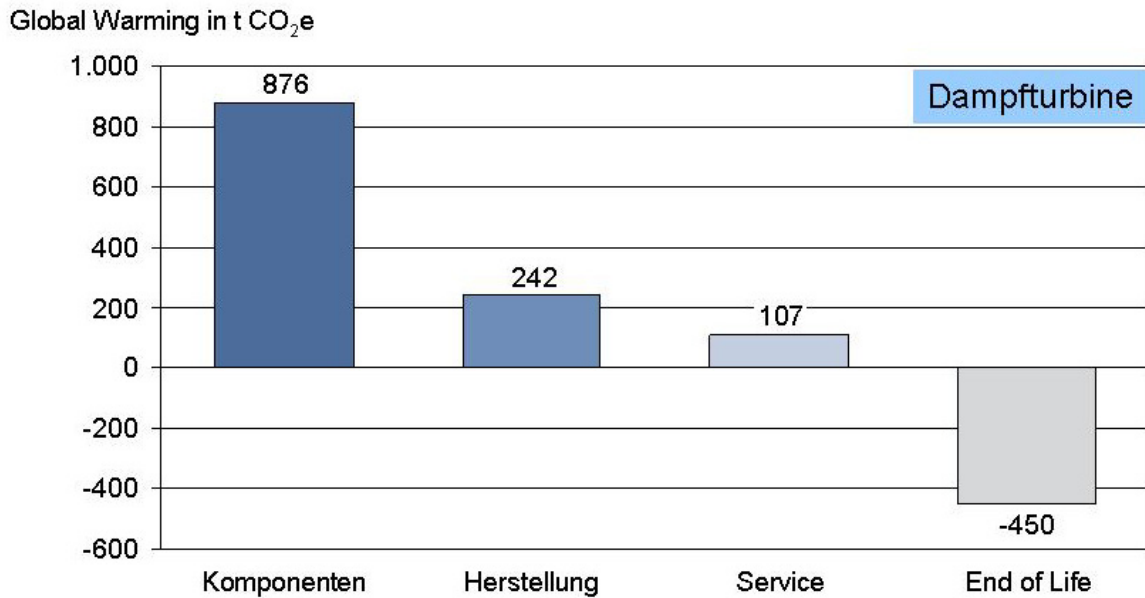


Abbildung 5.9: Ergebnisse der Wirkungsabschätzung SST5-3000

Die Fertigung macht, in Abbildung 5.10 dargestellt, nur einen Anteil von 20 % aus.

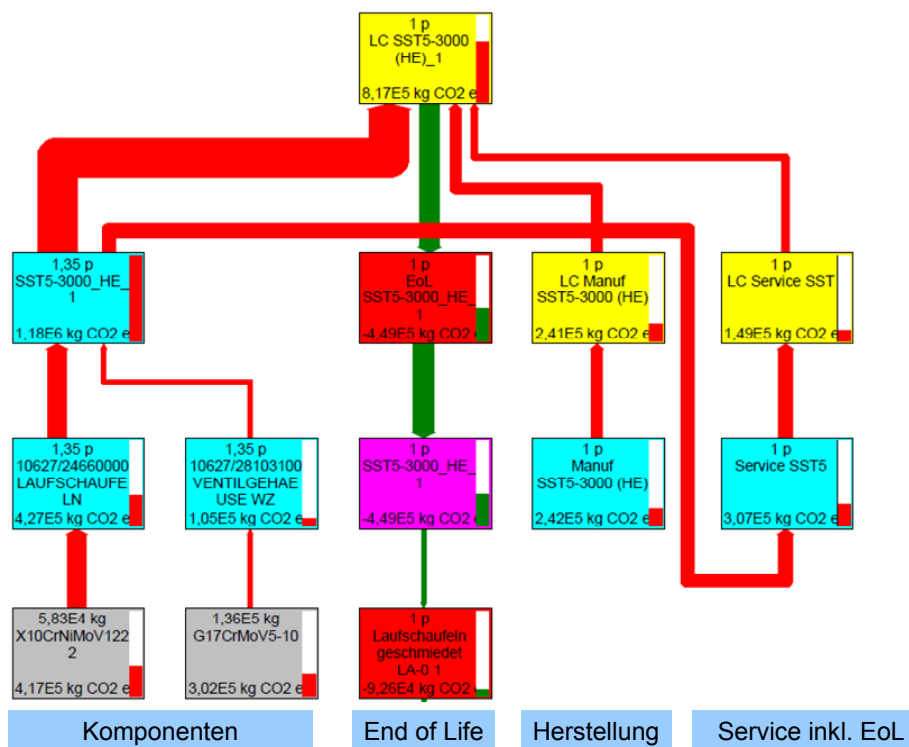


Abbildung 5.10: Lebenszyklus SST5-3000 HE in CO₂e (cut-off 20 %)

Die in Abbildung 5.11 dargestellten Ergebnisse für den Generator sind von der Verteilung der Beiträge der Emissionen her analog zu den beiden vorherigen Komponenten.

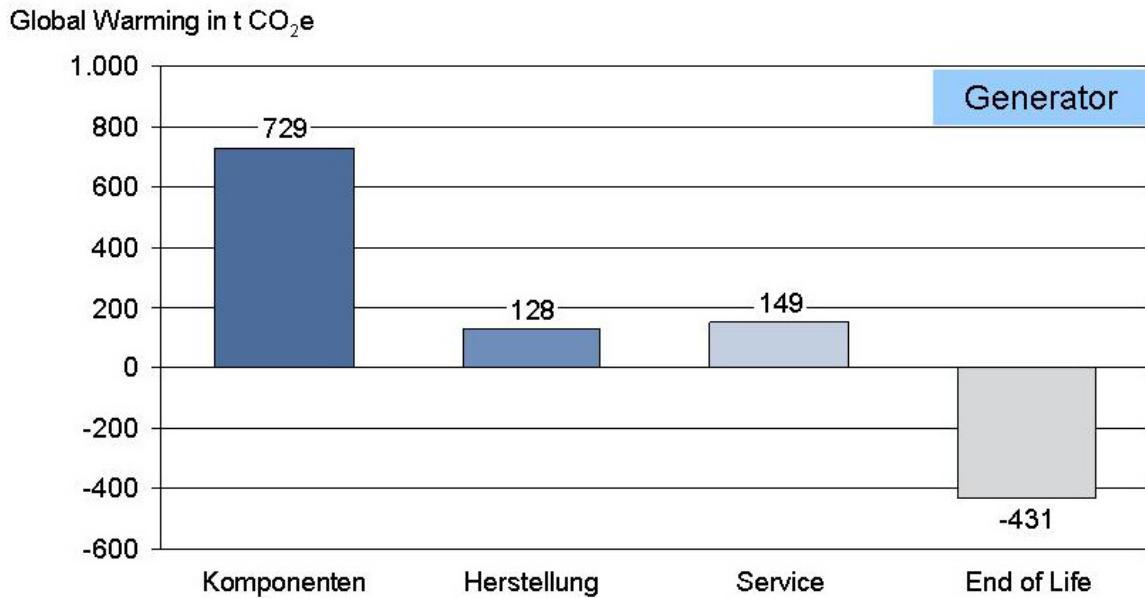


Abbildung 5.11: Ergebnisse der Wirkungsabschätzung SGen5-3000W

Die Modellierung des Systems in Abbildung 5.12 zeigt die Beiträge der Komponenten (72 %), des Service (15 %) und der Fertigung (12 %).

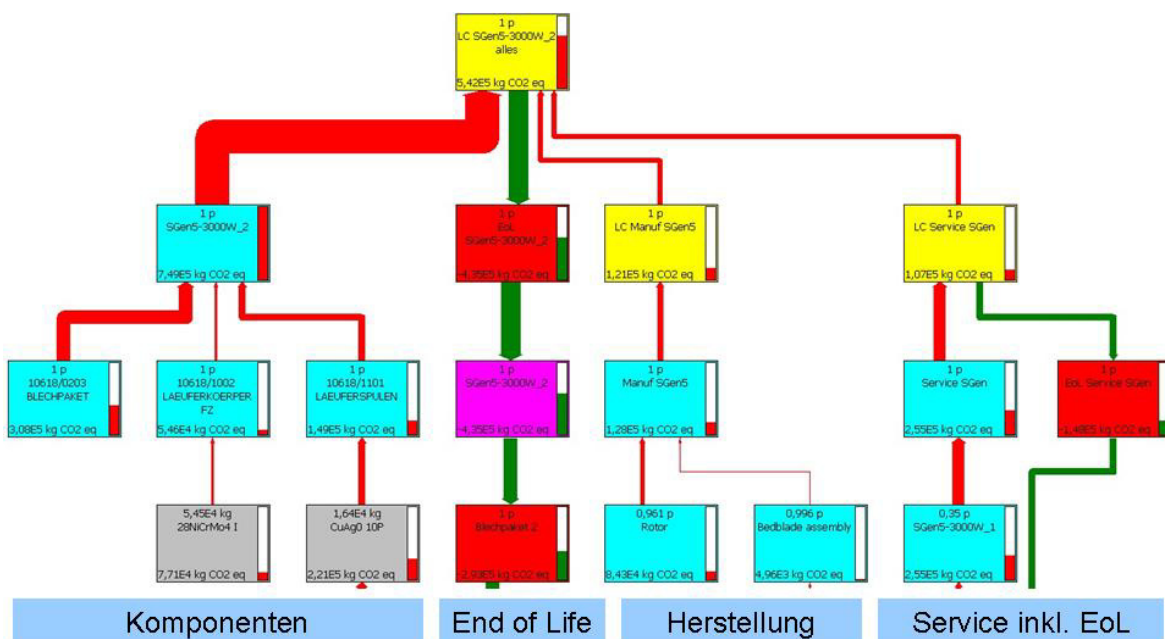


Abbildung 5.12: Lebenszyklus SGen5-3000W in CO₂e (cut-off 10 %)

5.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

In der Übersicht der modellierten Hauptkomponenten wird für die Gasturbine, die Dampfturbine und den Generator eine ähnliche Verteilung der Beiträge zur Kategorie Global Warming deutlich. Der geringere Beitrag für die Komponenten des Generators mit 729 t CO₂ im Vergleich zur Gasturbine mit 829 t CO₂ bzw. der Dampfturbine mit 876 t CO₂ wird durch den geringeren Anteil an hochlegiertem Stahl verursacht und setzt sich auch in den geringeren Emissionen während der Fertigung fort.

Im Folgenden werden nun spezifische Kennzahlen zur energetischen und Emissionsbewertung gegeben. Es wurde deutlich, dass die Ergebnisse in direkter Abhängigkeit zum Betrieb des betrachteten Zeitraums stehen, da die Emissionen der Betriebsphase naturgemäß die Gesamtbilanz dominieren.

Eine typische Kennzahl stellt der Erntefaktor für die Herstellung EF_H dar, da er die physikalische Nettostromerzeugung während des Lebenszyklus mit dem kumulierten Energieverbrauch für die Herstellung ins Verhältnis setzt.

$$EF_H = \frac{140 \text{ TWh}}{1128 \text{ TJ}} = 448$$

Der Wert lässt sich mit der Detailtiefe und damit umfassenden Modellierung und Berücksichtigung der Inputs sowie dem Lastregime plausibel einordnen.

Für die sogenannte ‚Energy Payback Time‘ – die Zeit, bis die gesamte zur Herstellung aufgewendete Energie durch das Kraftwerk im Betrieb wieder erzeugt worden ist, ergibt sich:

$$\text{Energy Payback Time} = 36 \text{ d}$$

Der Erntefaktor inklusive der Bereitstellung des Brennstoffs, sowie der Aufwendungen und Gutschriften für Rückbau und Recycling ergibt sich aus:

$$EF_{total} = \frac{140 \text{ TWh}}{892 \text{ PJ}} = 0,556$$

Damit liegt EF_{total} in der Größenordnung des GuD-Wirkungsgrades und ist nur deshalb niedriger, da der Wert inklusive der Aufwendungen für die Herstellung, Betrieb, Wartung und Rückbau berechnet wurde.

Die Emissionsfaktoren für CO₂ und CO₂e über den gesamten Lebenszyklus ergeben sich aus den gewichteten Faktoren der einzelnen Betriebsphasen zu:

$$\text{Emissionsfaktor } CO_2 = \frac{50,0 \text{ Mt } CO_2}{140,4 \text{ TWh}} = 350,6 \frac{\text{kg}}{\text{MWh}}$$

$$\text{Emissionsfaktor } CO_{2e} = \frac{60,6 \text{ Mt } CO_{2e}}{140 \text{ TWh}} = 422,2 \frac{\text{kg}}{\text{MWh}}$$

Analog der in Abbildung 2.13 gegebenen Schadenskategorien der Wirkungsabschätzungsmethode IMPACT2002+, sowie der im Anhang in Tabelle 9.3 gegebenen Charakterisierungsfaktoren resultiert das Gesamtergebnis für das SCC5-4000F wie in Tabelle 5.2 dargestellt.

Tabelle 5.2: Gesamtergebnis für die alle Wirkungskategorien SCC5-4000F

SCC5-4000F	Einheit	Schadenskategorie
448.526.705	kg C2H3Cl	Carcinogens
32.026.040	kg C2H3Cl	Non-Carcinogens
8.773.203	kg PM2.5	Respiratory inorganics
17.248.625.932	Bq C-14	Ionizing radiation
6.520	kg CFC-11	Ozone layer depletion
8.389.204	kg ethylene	Respiratory organics
488.241.197.854	kg TEG water	Aquatic ecotoxicity
120.937.207.935	kg TEG soil	Terrestrial ecotoxicity
302.392.927	kg SO2	Terrestrial acid/nutrication
9.616.723	m2org.arable	Land occupation
55.214.108	kg SO2	Aquatic acidification
107.950	kg PO4 P-lim	Aquatic eutrophication
60.574.828.331	kg CO2e	Global Warming
959.301.356.253	MJ primary	Non-renewable energy
312.314.597	MJ surplus	Mineral extraction

Die beiden relevanten Kategorien ‚Global Warming‘ und ‚Non-renewable Energy‘ bzw. KEA sind hervorgehoben. Wichtig festzuhalten ist, dass diese Ergebnisse zur Berechnung spezifischer Emissionsfaktoren unabdingbar sind, da sie den Referenzwert für jede zukünftige Optimierung des Produktsystems darstellen.

6 Diskussion

Die größte Stärke der Methodik der Lebenszyklusanalyse ist ihr ganzheitlicher Ansatz. Gleichzeitig ist dies auch ihre größte Einschränkung, denn es stellt sich in der Realität als schwierig dar, den vollständigen Lebenszyklus eines Produkts oder Produktsystems zu analysieren, ohne dabei den Detaillierungsgrad an bestimmten Stellen aufgrund von Datenlücken verringern zu müssen. Je nach benötigter Detailtiefe resultiert eine gute Qualität und Transparenz der Daten zur Dokumentation und Nachvollziehbarkeit in einem ressourcen- und zeitintensiven Prozess. Weiterhin bedingt in vielen Fällen die mangelnde Verfügbarkeit von belastbaren Daten eine Zunahme der Unsicherheit durch die Zuhilfenahme von Annahmen. Eine Ökobilanz kann des Weiteren auch nur bedingt Aussagen zu einer spezifischen Örtlichkeit treffen, da in vielen Fällen regionale Durchschnittsdaten als Grundlage dienen.

Die Aussagen der Ergebnisse einer Lebenszyklusanalyse sind hinsichtlich ihrer zeitlichen Gültigkeit begrenzt, da es sich um eine statische Momentaufnahme handelt. Es wird daher von potentiellen Auswirkungen gesprochen, wenn die Ergebnisse einer LCA bewertet werden, da auch die verschiedenen Bewertungsmethoden nicht vollständig objektiv sind.

In der praktischen Anwendung treten häufig Probleme dadurch auf, dass es sich um eine zeitintensive, und damit kostspielige Methodik handelt. Es wurde als weiteres Ergebnis dieser Arbeit ein ‚screening tool‘ entwickelt (siehe Abbildung 6.6 und Abbildung 6.7) und auch bereits in die Produktentwicklung integriert, welches die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung relevanter Materialien und Werkstoffe beinhaltet und vergleichend darstellt. Durch diese Einbindung in einer frühen Phase der Produktentwicklung wurde eine Möglichkeit der Bewertung der Auswirkungen der Designentscheidungen auf das Umweltprofil über den gesamten Lebenszyklus geschaffen, ohne dass es eines Expertenwissens zur Modellierung aller Stoffströme bedarf.

Wie im Folgenden beschrieben, konnte gezeigt werden, dass die Modellierung sowohl der Sachbilanz als auch der Wirkungsabschätzung für alle Komponenten in der entsprechenden Detailtiefe über den gesamten Lebenszyklus in dieser Form aussagekräftige Ergebnisse liefern. Die größere Bilanzierungstiefe der vorliegenden Arbeit erklärt auch die Abweichungen mit den im Folgenden gegebenen Vergleichsstudien, da sie zum überwiegenden Teil auf Primärdaten und gemessenen Werten und nicht auf einem generalisierten Mengengerüsten basiert.

6.1 Vergleich mit anderen Studien

Für den weiteren Vergleich wurde das Ergebnis dieser Arbeit (Szenario 0) mit zwei Szenarien (Szenario 1 und 2), sowie mit vergleichbaren Studien [IER 2007], [Marheinke 2002] und [Frischknecht 1996] verglichen. Ferner konnte so das erstellte Modell dieser Arbeit unter Annahme verschiedener Parameter plausibilisiert und getestet werden. Zum Vergleich sind die Emissionsfaktoren in Tabelle 6.1 dargestellt.

Tabelle 6.1: Vergleich der spezifischen Emissionsfaktoren

	CO ₂ [kg/kWh]	CO [kg/kWh]	NO _x [mg/kWh]	SO ₂ [mg/kWh]	Partikel [mg/kWh]
Szenario 0	351	419	257	25	10
Szenario 1	365	1320	276	25	10
Szenario 2	357	102	248	25	10
IER 2007	377	194	391	100	14
Marheinke 2002	386	-	351	125	38
Frischknecht 1996	607	-	1340	420	111

Zur Interpretation ist zu sagen, dass [Marheinke 2002] von einem Wirkungsgrad von 57,6 % ausgeht und [Frischknecht 1996] von 43 %. Dadurch erklären sich die Unterschiede für die CO₂ und CO Emissionen. Der Vergleich der energetischen Kennzahl des spezifischen kumulierten Energieaufwandes in MJ/kWh in Abbildung 6.1 zeigt, dass sich für diese Arbeit ein Wert in der gleichen Größenordnung wie für die Vergleichsstudien ergibt, der jedoch von den über den Lebenszyklus erzeugten kWh abhängt.

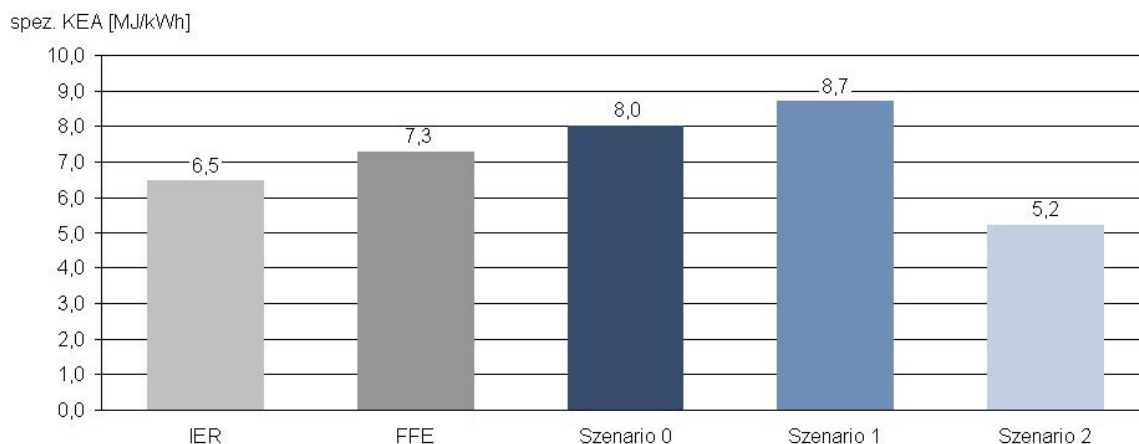


Abbildung 6.1: Vergleich des spezifischen KEA der Szenarien in MJ/kWh

In den folgenden Tabellen werden die zur Modellierung und Berechnung verwendeten Parameter beschrieben. Für die Ergebnisse dieser Arbeit wird im Folgenden weiterhin Szenario 0 verwendet.

Tabelle 6.2: Parameter Szenario 0

Beschreibung	Einheit	U10	U20
Lebensdauer	a	35	35
Jährliche Betriebsstunden	h	4.684	5.040
Starts heiß	#	65	35
Starts warm	#	26	18
Starts kalt	#	9	15
Shutdowns	#	100	68
EOHs	h	5.684	5.720

Tabelle 6.3: Parameter Szenario 1 – Spitzenlast

Beschreibung	Einheit	U10	U20
Lebensdauer	a	35	35
Jährliche Betriebsstunden	h	4.480	4.480
Starts heiß	#	200	200
Starts warm	#	50	50
Starts kalt	#	2	2
Shutdowns	#	252	252
EOHs	h	7.000	7.000

Tabelle 6.4: Parameter Szenario 2 – Grundlast

Beschreibung	Einheit	U10	U20
Lebensdauer	a	35	35
Jährliche Betriebsstunden	h	7490	7490
Starts heiß	#	1	1
Starts warm	#	0	0
Starts kalt	#	0	0
Shutdowns	#	1	1
EOHs	h	7.500	7.500

6.2 Einflussfaktoren der Produktgestaltung

Die Optimierung des Gesamtsystems hängt zum einen von den zu optimierenden Parametern und zum anderen von der Vergleichbarkeit der Ergebnisse der Wirkungskategorien ab. Für die Szenarien wurden die Basiskonfiguration des SCC5-4000F, sowie die in Tabelle 22 und Tabelle 23 definierten Parameter zugrunde gelegt:

Tabelle 6.5: Vergleich der CO₂ Emissionsfaktoren über den Lebenszyklus

Phase	Einheit	Szenario 0	Szenario 2	Szenario 1
Herstellung	kg/MWh	0,5	0,3	0,5
Betrieb	kg/MWh	350,6	348,2	356,4
End of Life	kg/MWh	-0,1	-0,1	-0,1
Lifecycle total	kg/MWh	351,0	348,5	356,8

Die Differenzen für die CO₂ Emissionsfaktoren ergeben sich durch die unterschiedlichen Betriebsarten und damit der unterschiedlichen Nettostromerzeugung als Berechnungsgrundlage der Emissionsfaktoren. Abbildung 6.2 zeigt weiter den Beitrag der CO₂ Emissionen am Gesamtwert der Kategorie ‚Global Warming‘ in kg CO₂e/MWh. Es wird deutlich, dass im Szenario 0 der Beitrag der CO₂ Emissionen des Betriebs über den gesamten Lebenszyklus mit 351 kg/MWh einen Anteil von 83 % am Treibhausgaspotential ausmachen. Den restlichen Beitrag von 17 % leisten in diesem Fall hauptsächlich direkte und indirekte CO und CH₄ Emissionen.

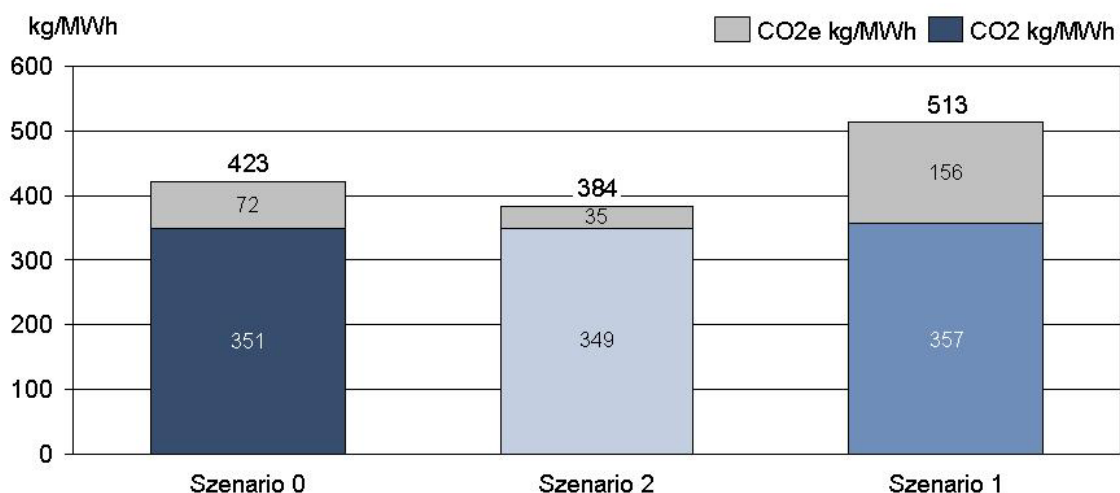


Abbildung 6.2: Darstellung des CO₂ Beitrags zu den THG-Emissionen im Betrieb

Im Vergleich der CO Emissionsfaktoren wird deutlich, dass sich auch hier für das Szenario 1 ein signifikant höherer Wert ergibt. Die Unterschiede für die CO Emissionen (vgl. Abbildung 6.3) liegen in der Anzahl der Starts des modellierten Lastregimes und den damit entsprechend niedrigeren Wirkungsgraden begründet.

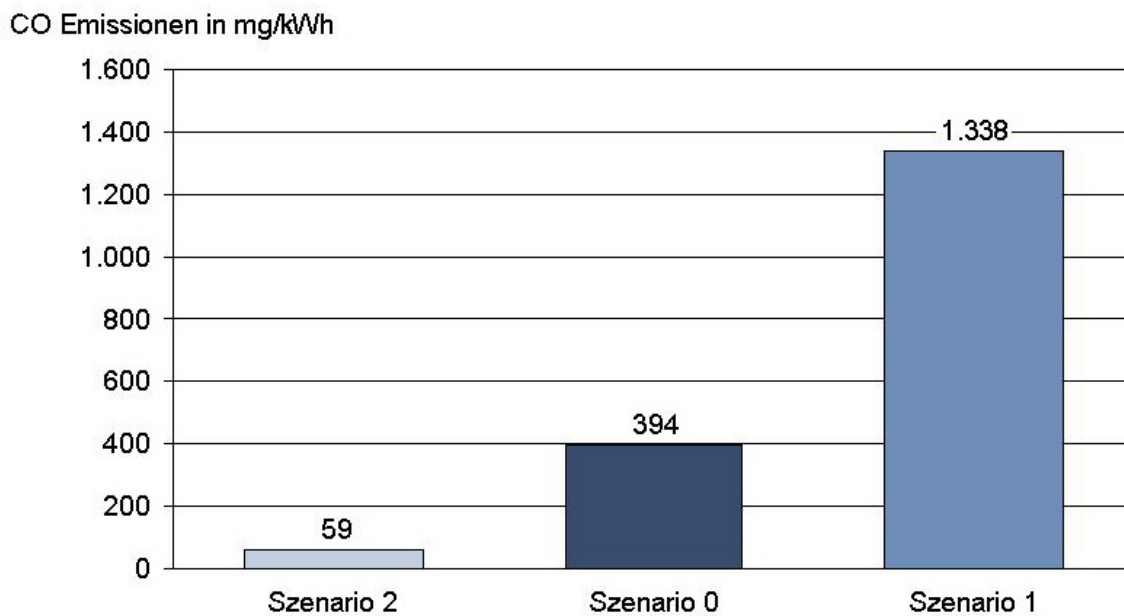


Abbildung 6.3: Vergleich der CO Emissionsfaktoren in mg/kWh

Die Ursache für die unterschiedlich hohen CO Emissionen sind die in Tabelle 6.6 gegebenen spezifischen Wirkungsgrade der Betriebsphasen und die zugrunde liegende unvollständige Verbrennung des Brennstoffs bei geringerer Last.

Tabelle 6.6: Durchschnittliche Wirkungsgrade der Betriebsphasen

Betriebsphase	Wirkungsgrad [%]
Start kalt	38,7 %
Start warm	40,9 %
Start heiß	43,2 %
Betrieb	57,5 %
Shutdown	38,7 %

Ein bereits bestehendes Konzept, um schnellere Anfahrzeiten zu erreichen wird advanced fast cycling (advanced facy) genannt. Durch das abgestimmte, schnellere Synchronisieren von Gasturbine und Dampfturbine kann die Anfahrzeit, d.h. die Betriebsphase mit einem niedrigeren Wirkungsgrad, von im Durchschnitt 100 min auf bis zu 40 min in etwa halbiert werden.

Für diesen Fall bestehen die Aufwendungen in Form von zusätzlichen Komponenten und dem Einbau eines Benson Verdampfers in der Hochdrucksektion (vgl. Abbildung 9.2 im Anhang), um damit höhere Temperatur- und Druckgradienten erreichen zu können. Außerdem muss eine Kondensataufbereitung integriert werden, um die notwendigen Dampfparameter rechtzeitig zu erreichen.

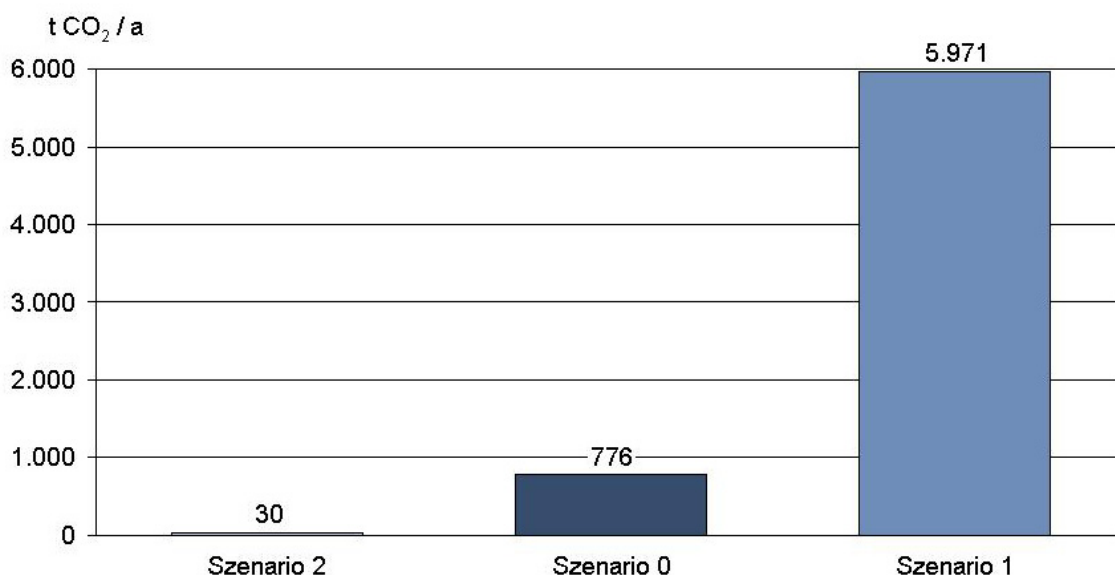


Abbildung 6.4: Einsparung in t CO₂/a durch Steigerung Wirkungsgrad Start (+10 %)

Da durch die kürzere Anfahrzeit ein um ca. 10 % gesteigerter Wirkungsgrad für die Startphase erreicht wird, ergeben sich pro Jahr für das jeweilige Szenario die in Abbildung 6.4 berechneten Emissionen. Die Steigerung des Wirkungsgrades der Startphase kann, wie ersichtlich, einen signifikanten Beitrag zur Reduktion der Emissionen und damit einen positiven Einfluss auf das Umweltprofil. Emissionsseitig amortisiert sich der Austausch der Hochdrucksektion (ca. 100 t hochlegierter Stahl) nach 3,3 h Vollastbetrieb oder 3 Starts.

Neben der Reduktion von Emissionen führt dieses Konzept auch zu einer besseren Verfügbarkeit und damit einem höheren monetären Erlös, da kurzfristig und flexibel auf Marktanforderungen reagiert werden kann.

Ein weiterer Ansatzpunkt zur Steigerung des Wirkungsgrades der Gesamtanlage liegt insbesondere in der Weiterentwicklung der Heißgassektion der Gasturbine. Da eine höhere Turbineneintrittstemperatur direkt zu einer Wirkungsgradsteigerung der Gesamtanlage führt, ist dieser Ansatz in der Vergangenheit stetig verfolgt worden und hat zur heute verfügbaren Entwicklungsstufe geführt. Da die Temperaturbeständigkeit herkömmlicher Stahllegierungen begrenzt ist (vgl. Abbildung 6.5), wurden Nickelbasislegierungen entwickelt, die auch bei einer Turbineneintrittstemperatur von bis zu 1450 °C und einer daraus resultierenden Oberflächentemperatur der Schaufeln von ca. 1000 °C bestehen.

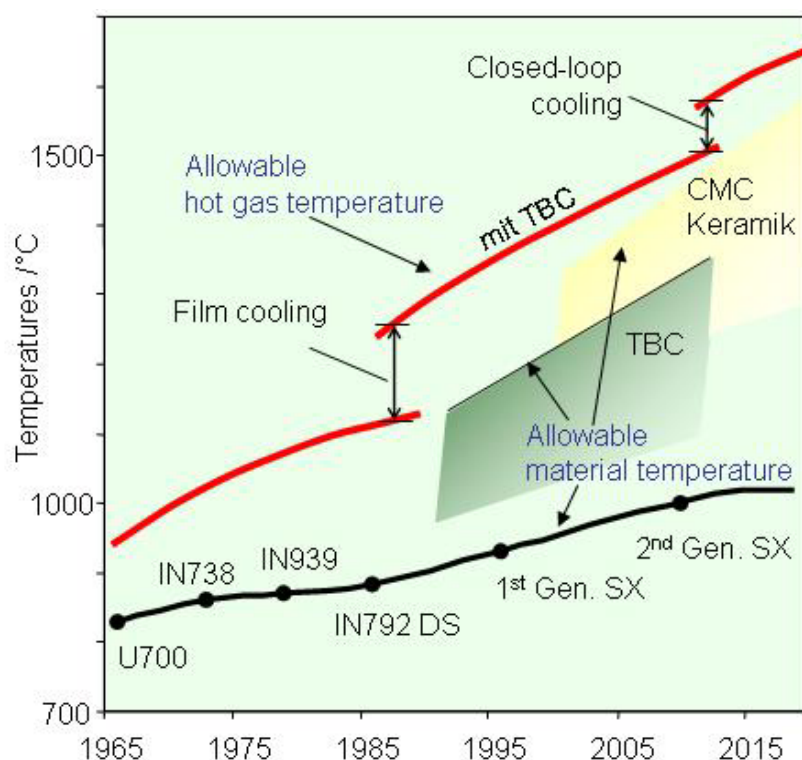


Abbildung 6.5: Entwicklung von Werkstoffen und Temperaturen [Siemens AG]

Zusätzlich findet neben dem Einsatz von Sekundärluft zur Kühlung der Schaufeln auch die Beschichtung mit einer thermischen Schutzschicht Anwendung. Wie in der Sachbilanz der Gasturbine in Kapitel 4.2.1 dargestellt, besteht die Gasturbine SGT5-4000F ohne die Komponenten aus Gusseisen aus insgesamt 242 t Stahl. Davon beträgt der Anteil hoch- und niedriglegierten Stahls 193 t.

Werden nun zur Steigerung des Wirkungsgrades Komponenten aus hochlegiertem Stahl durch Nickelbasislegierungen ausgetauscht, müssen für den gesteigerten Wirkungsgrad unterschiedliche hohe Aufwendungen für die neuen Werkstoffe, neue Fertigungsverfahren und geänderte Serviceintervalle berücksichtigt werden.

Zum Vergleich sind in Abbildung 6.6 die Emissionen (in kg CO₂e) für die Herstellung von unlegierten und niedriglegierten Stahlsorten auf der linken Seite bis hin zu Nickelbasislegierungen auf der rechten Seite gegeben.

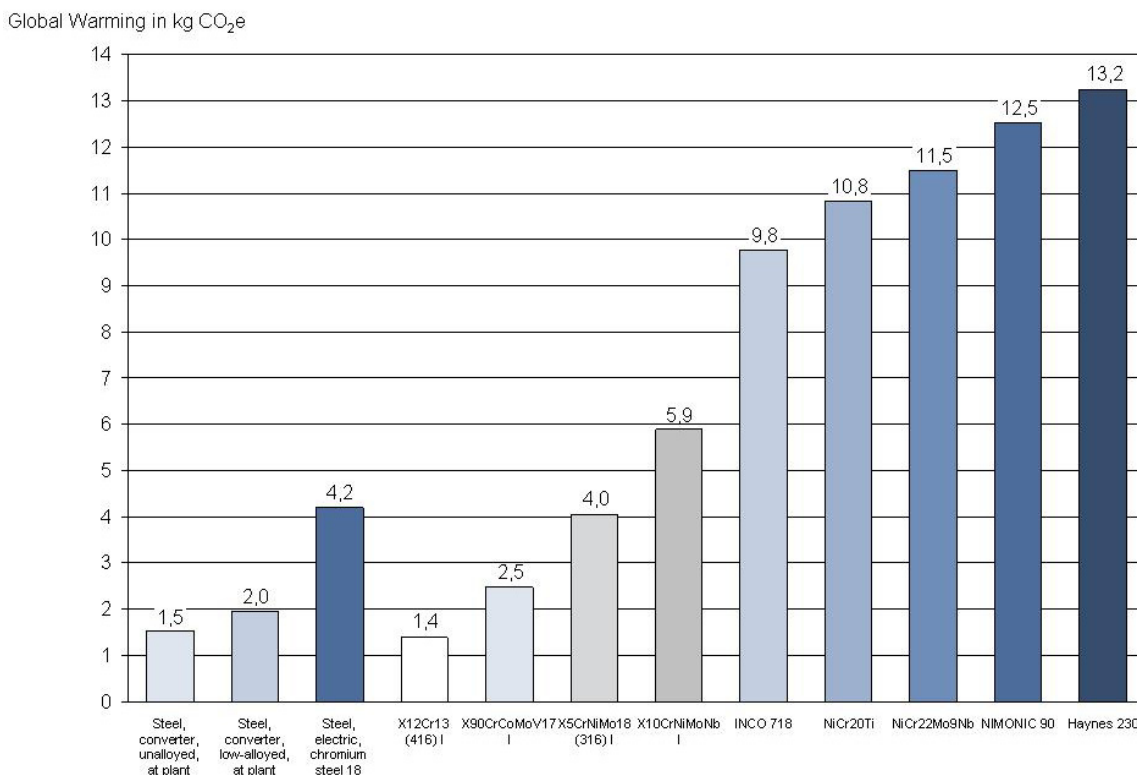


Abbildung 6.6: Spezifische Emissionen in kg CO₂e für 1 kg [ecoinvent]

Entsprechend sind in Abbildung 6.7 die Aufwendungen für die gleichen Werkstoffe für den kumulierten Energiebedarf in MJ Primärenergie gegeben.

Für den Referenzfall belaufen sich die CO₂e Emissionen einer SGT5-4000F auf 892 t CO₂e (vgl. Abbildung 5.7) und für den KEA auf 13.749 MJ.

Der Ersatz aller Komponenten aus hochlegiertem Stahl durch Nickelbasislegierungen würde damit also zu einer Steigerung der Aufwendungen und Emissionen für die Unterkomponenten um die in Tabelle 6.7 gegebenen Faktoren verursachen. Diese Annahmen stellen zur Verbesserung der Anschaulichkeit den Höchstwert der möglichen Änderung, also den ‚worst case‘ dar.

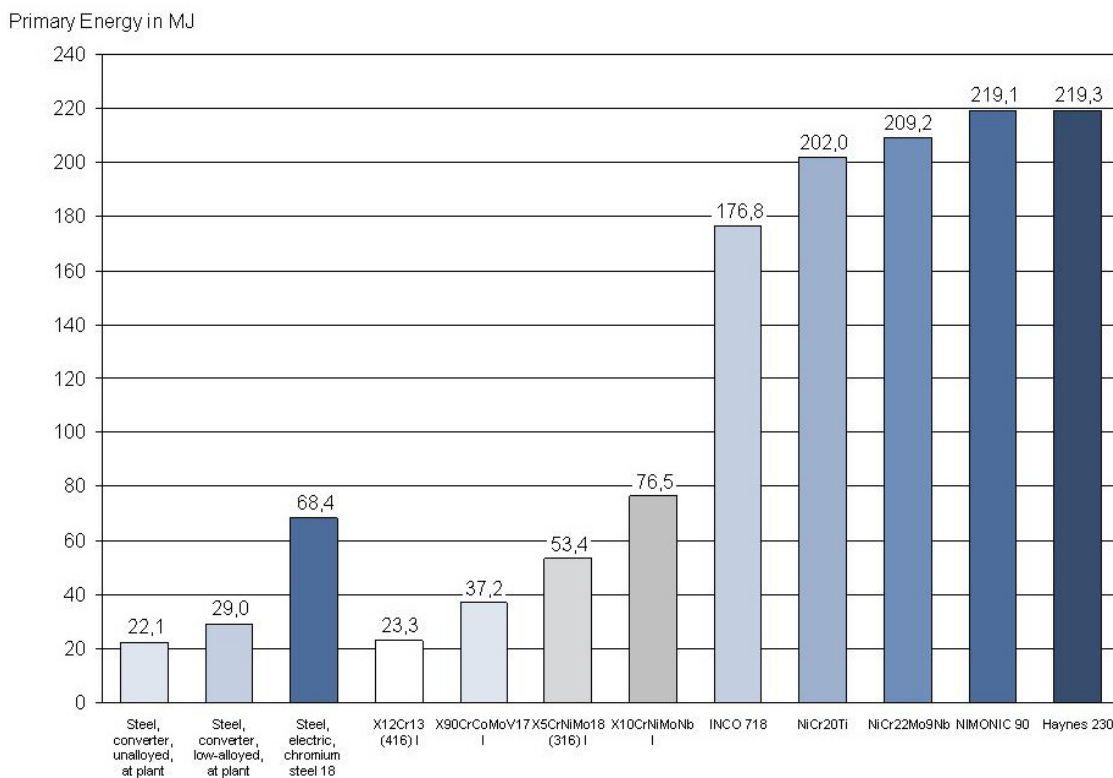


Abbildung 6.7: Spezifische Aufwendungen in MJ Primärenergie für 1 kg [ecoinvent]

Tabelle 6.7: Vergleich der Emissionsfaktoren für Fe-X und Ni-Basis [ecoinvent]

Kategorie	Einheit	Fe-X max	Ni-Basis max	Faktor
Carcinogens	kg C2H3Cl e	0,02	0,30	17
Non-carcinogens	kg C2H3Cl e	0,6	1,9	3,3
Respiratory inorganics	kg PM2.5 e	0,02	0,02	1,6
Ionizing radiation	Bq C-14 e	157	590	3,8
Ozone layer depletion	kg CFC-11 e	0,0000003	0,000009	3,3
Respiratory organics	kg C2H4 e	0,0001	0,0004	3,4
Aquatic ecotoxicity	kg TEG water	626	34.690	55
Terrestrial ecotoxicity	kg TEG soil	578	982	1,7
Terrestrial acid/nutrif.	kg SO2 e	0,25	0,34	1,3
Land occupation	m2org.arable	0,06	0,07	1,1
Aquatic acidification	kg SO2 e	0,19	0,12	0,6
Aquatic eutrophication	kg PO4 P-lim	0,0001	0,00004	5,0
Global warming	kg CO2 e	5,9	12,5	2,1
Non-renewable energy	MJ primary	77	219	2,9
Mineral extraction	MJ surplus	9,4	1,0	0,1

Die größte Steigerung durch den Einsatz Ni-basierter Legierungen und den damit verbundenen Emissionen ergibt sich in der Kategorie ‚Aquatic Ecotoxicity‘, also insbesondere in den Auswirkungen der Toxizität von Nickel auf aquatische Lebewesen.

Für die Kategorie globale Erwärmung würde der Austausch der Werkstoffe eine Verdoppelung der Emissionen in der Herstellung bedeuten. Es wird jedoch auch deutlich, dass dies nicht die einzige zu betrachtenden Kategorie ist, sondern eine unter Mehreren. Die Analyse ermöglicht also einen Vergleich der Umweltauswirkungen der verschiedenen Werkstoffe über alle Wirkungskategorien.

Die Gegenüberstellung der resultierenden Umweltprofile für eine SGT5-4000F ist in Tabelle 6.8 gegeben. Mit den gegebenen Faktoren würde sich somit also eine Änderung der Aufwendungen um die in Tabelle 6.7 in der letzten Spalte gegebenen Werte ergeben.

Tabelle 6.8: Vergleich der Umweltprofile SGT5-4000F

Kategorie	Einheit	SGT5-4000F Fe-X	SGT5-4000F Ni-Basis
Carcinogens	kg C2H3Cl e	21.524	365.916
Non-carcinogens	kg C2H3Cl e	103.685	342.159
Respiratory inorganics	kg PM2.5 e	1.885	3.016
Ionizing radiation	Bq C-14 e	22.488.776	85.457.349
Ozone layer depletion	kg CFC-11 e	0,04	0,12
Respiratory organics	kg C2H4 e	444	1.508
Aquatic ecotoxicity	kg TEG water	1.152.007.600	63.360.418.000
Terrestrial ecotoxicity	kg TEG soil	77.694.964	132.081.439
Terrestrial acid/nutrif.	kg SO2 e	24.535	31.895
Land occupation	m2org.arable	9.632	10.595
Aquatic acidification	kg SO2 e	8.069	4.841
Aquatic eutrophication	kg PO4 P-lim	17,37	86,85
Global warming	kg CO2 e	829.166	1.741.248
Non-renewable energy	MJ primary	13.749.149	39.872.532
Mineral extraction	MJ surplus	372.013	37.201

Diese für fast alle Kategorien zutreffende Steigerung der Umweltauswirkungen muss für jede Anpassung ins Verhältnis zum erzielten und erzielbaren Nutzen gesetzt werden, um eine Aussage über die Relevanz des Beitrags der Änderung treffen zu können.

Die erreichbare Reduktion der CO₂ Emissionen wurde für eine Steigerung des Wirkungsgrades durch den Austausch von Werkstoffen im Folgenden berechnet und ist in Abbildung 6.8 dargestellt.

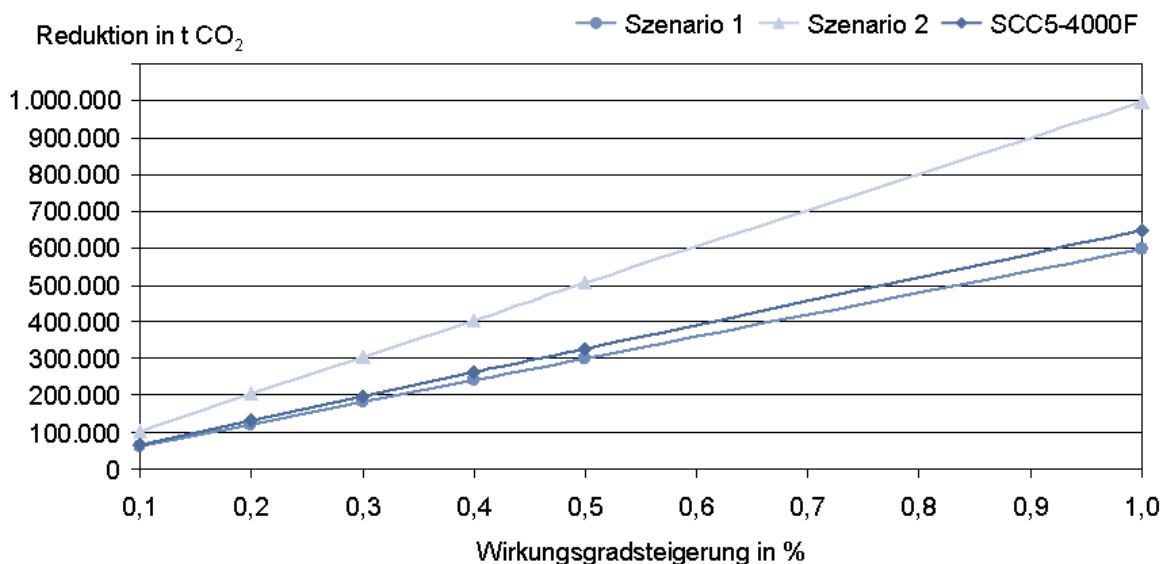


Abbildung 6.8: Reduktion der CO₂ Emissionen durch Wirkungsgradsteigerung

Für das Szenario 0 ergibt sich für eine Steigerung des Wirkungsgrades um 0,1 % eine Reduktion um 67.772 t CO₂ für den Betrieb in einem Jahr. Daraus folgt eine Amortisationszeit des Austauschs der Werkstoffe der Gasturbine für die CO₂ Emissionen nach 6,4 h Vollastbetrieb.

Grundsätzlich ist zu sagen, dass der höhere energetische Aufwand bei der Gewinnung und Verarbeitung der unterschiedlichen Werkstoffe im Vergleich der spezifischen Emissionsfaktoren deutlich wird. Dieser höhere Aufwand beeinflusst damit auch alle in Tabelle 6.8 genannten Kategorien.

Die detaillierte Übersicht der Emissionsfaktoren für jeweils 1 kg Werkstoff in kg CO₂e und MJ Primärenergie sind in der Ecoinvent Datenbank [Frischknecht 2005] enthalten.

6.3 Corporate Sustainability

Das Ziel der vorangegangenen Kapitel bestand darin, eine ‚ganzheitliche Bilanzierung des Produktsystems Kraftwerk aus Sicht eines Herstellers‘ durchzuführen, und dabei und dadurch die Elemente und Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse in einem weiteren Kontext zu analysieren und bewerten, sowie eine nachhaltige Optimierung zu ermöglichen.

Die Motivation zur Analyse in dieser Arbeit kann knapp aber präzise mit ‚*Creating more with less*‘ [Schmidheiny 1992] und [EE Konferenz Leiden, 2004] beschrieben werden; nämlich einen Mehrwert für und durch ein Produkt mit gleichzeitig niedrigeren Umweltauswirkungen zu erzielen. Im ‚World Business Council on Sustainable Development‘ (WBCSD) wurden schon 1992 die Vorteile bzw. positiven Auswirkungen des Strebens nach Ökoeffizienz postuliert.

Die 6 Gründe für Ökoeffizienz:

- Kunden verlangen noch sauberere Produkte
- Umweltgesetze sind streng und werden noch strenger werden
- Mitarbeiter, insbesondere die Besten, bevorzugen Firmen, die Ihrer Verantwortung gegenüber der Umwelt gerecht werden
- Banken bewilligen Kredite eher an Firmen, die Umweltverschmutzung vorbeugen und vermeiden
- Versicherungskonzerne sind eher gewillt, Firmen zu versichern, die ein Umweltbewusstsein haben
- neue ökonomische Instrumente – Steuern, Abgaben und Verschmutzungszertifikate – belohnen umweltfreundliche Firmen

Die ultimative Rechtfertigung zur Durchführung einer Lebenszyklusanalyse, nämlich eine Kundenforderung, wird auch hier an erster Stelle genannt und es ist zu beobachten, dass sich der Trend von den kleineren Produkten mit einer leichter zu erstellenden Ökobilanz hin zur Forderung einer solchen bei allen Produkten des Portfolios einer Firma entwickelt.

Anschaulich kann dies anhand der Produkte der Siemens AG gemacht werden, für die bereits seit mehreren Jahren Ökobilanzen von Haushaltsgeräten gemacht werden und von denen sich der Trend über Mobiltelefone und Computertomographen bis hin zu Nahverkehrsziügen entwickelt hat.

Diese Arbeit schließt eine Lücke und bildet die Grundlage für eine Analyse der Produkte des Energy Sectors.

Weiterhin wurde mit dieser Arbeit die konzeptionelle Grundlage für eine Analyse und Optimierung der Nachhaltigkeitsindikatoren gelegt. Die hier adressierte so genannte interne Lernkurve oder auch das organisational learning ermöglichen eine fundamentale Optimierung des Produkts vom Design, über die Auslegung, die Herstellung und den Betrieb bis hin zum End of Life. In der 1998 vom World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) und dem World Resource Institute (WRI) gemeinsam gegründeten ‚Greenhouse Gas Protocol Initiative‘ (GHG Protocol) wurden die Richtlinien für die konsistente Erfassung und Berichterstattung von Treibhausgasemissionen (engl. GHG) festgelegt. Die Kriterien, nach denen die Berichterstattung erfolgen muss sind Relevanz, Vollständigkeit, Konsistenz, Transparenz und Genauigkeit.

Als Referenz für die Berichterstattung wird nach [WRI/WBCSD 2004] (vgl. Abbildung 6.9) zwischen

- Scope 1 (direkte Emissionen z. B. Fertigung)
- Scope 2 (indirekte Emissionen durch selbstgenutzte Elektrizität) und
- Scope 3 (Emissionen aus Vorketten, Lieferanten, usw.) unterschieden.

Weiterhin wurden diese Vorgaben in der ISO 14064- 1 *“Specification with Guidance at the Organization Level for Quantification and Reporting of Greenhouse Gas Emissions and Removals”* international übernommen und standardisiert.

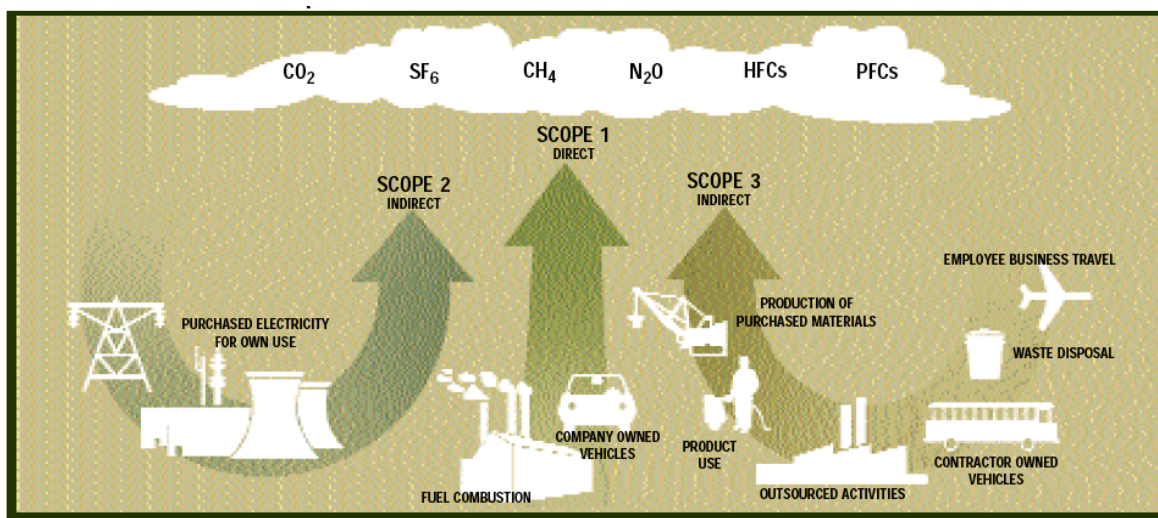


Abbildung 6.9: Übersicht über Berichtsrahmen und Emissionen [WRI/WBCSD 2004]

Den Kern der Vorgabedokumente bilden die ‚Sustainability Reporting Guidelines‘, die die zu berichtenden Inhalte zu den Themenkomplexen Ökonomie, Umwelt und Soziales definieren.

Die Richtlinien, die erstmalig 2002 auf dem World Summit for Sustainable Development veröffentlicht wurden, wurden im Jahr 2006 aktualisiert und sind jetzt als „G3“ bekannt.

Auf internationaler Ebene nimmt die Darstellung des Kundennutzens in Verbindung mit dem erzielten Beitrag zum Klimaschutz einen sehr hohen Stellenwert ein. Im Rahmen der Global Reporting Initiative (GRI) wurde auch der Corporate Sustainability Report der Siemens AG für das Jahr 2007 publiziert.

In Abbildung 6.10 sind die beiden relevanten Kenngrößen für das sogenannte Umweltportfolio der Siemens AG gegeben. Eine Säule bildet der Umsatz mit effizienten und umweltfreundlichen Produkten und Umwelttechnik auf der linken Seite. Die andere Säule bildet der Beitrag zur erzielten Einsparung von CO₂ Emissionen auf der rechten Seite. Die Quantifizierung der Beiträge der einzelnen Produkte, Anlagen und Lösungen werden hierbei gegen die durchschnittlichen, weltweiten Emissionen der Strom- und Elektrizitätserzeugung nach dem World Energy Outlook (WEO) der Internationalen Energie Agentur [IEA 2007] gerechnet - lediglich die installierten Windkraftanlagen werden nur gegen den fossilen Anteil des Strommix gerechnet.

Es sind weiterhin die direkten Emissionen an Treibhausgasen der Siemens AG (5,1 Mt im Jahr 2007), sowie die durch den Einsatz effizienter Produkte und Lösungen vermiedenen CO₂ Emissionen pro Jahr angegeben.

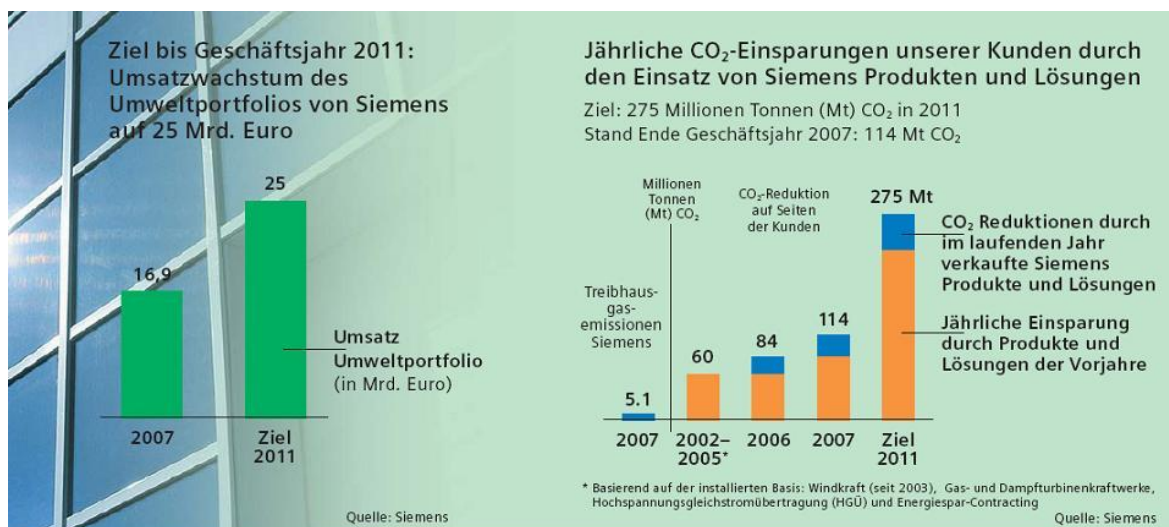


Abbildung 6.10: Umweltportfolio der Siemens AG [Siemens AG 2009]

Die Kommunikation und Berichterstattung dieser Kennzahlen stellt einen Teil der Grundlage für die Notierung im Nachhaltigkeitsindex der US-amerikanischen Börse (DJSI) dar. Dieser Index wurde 1999 gegründet und war der Erste seiner Art, und stellt die Wertentwicklung und Entwicklung der Nachhaltigkeitsdimension der aufgenommenen Unternehmen dar [DJSI 2008].

Für die dargestellte Berechnung wurden die Emissionen der im aktuellen Jahr installierten Kraftwerke mit dem zugehörigen Emissionsfaktor gegen den fossilen Weltjahresdurchschnitt gerechnet. In Abbildung 6.11 sind zum Vergleich diese Emissionsfaktoren für die hier betrachteten Szenarien, sowie für ein GuD mit einem Wirkungsgrad von 60 %.

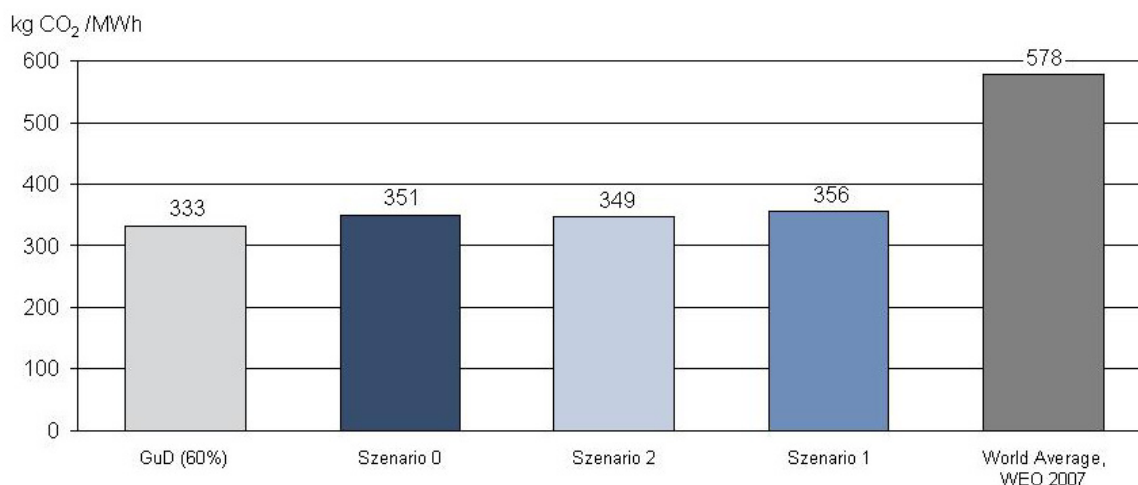


Abbildung 6.11: Vergleich der spezifischen Emissionsfaktoren in kg CO₂/MWh

Die Bewertung von Unternehmen erfolgt in einem jährlichen Rhythmus und findet zum Teil als Selbstauskunft und als Recherche der veröffentlichten Kennzahlen statt. Der überwiegende Teil der Unternehmen weltweit berichtet nach dem GHG Protocol Scope 1 und 2, gleichzeitig nimmt jedoch der Anteil an Scope 3 stetig zu.

Der Beitrag dieser Arbeit besteht also auch in der Bilanzierung der Emissionen nach Scope 3 für den Kraftwerksanteil des Umweltportfolios der Siemens AG.

Es wurde im Weiteren auf eine explizite Darstellung der so genannten Ökoeffizienz verzichtet, da die damit verbundene Kombination von Umweltwirkung und Kosten als Koordinaten einer Portfoliodarstellung durch die nicht einheitliche Festlegung der Achsen und Einheiten einen Vergleich verschiedener Ergebnisse per definitionem erschwert, wenn nicht in einigen Fällen sogar unmöglich macht.

In der vorliegenden Arbeit wurden also durch die Erstellung eine Ökobilanz analog ISO 14040 alle Pflichtelemente der Norm adressiert. Durch die Modellierung der in der Sachbilanz erhaltenen Daten konnte ein vollständiges Mengengerüst dargestellt werden.

Die Wirkungsabschätzung ergab eine Übersicht über die absoluten Emissionen, sowie den spezifischen Emissionsfaktor für das Szenario 0 für die CO₂ Emissionen von 351 kg/MWh und für CO₂e von 423 kg/MWh bei einer angenommenen Betriebsdauer von 35 Jahren.

Es wurden weiterhin unterschiedliche Szenarien wie Spitzenlast und Grundlast, sowie Wirkungsgradsteigerungen im Betrieb und während der Startphase mit den dafür notwendigen Aufwendungen verglichen und bewertet. Es ergab sich eine energetische Amortisation des für eine angenommene Steigerung des Wirkungsgrades um 0,1 % notwendigen Materialaufwandes von 6,4 h im Vollastbetrieb.

Durch diesen Vergleich konnte eine verbesserte Entscheidungsgrundlage für zukünftige Designentscheidungen geschaffen werden.

Die Ergebnisse dieser Lebenszyklusanalyse werden als Typ II Produktumwelterklärung nach ISO 14021 veröffentlicht. Eine Umweltprodukterklärung nach ISO 14020ff kann also, wie in Kapitel 2.6 beschrieben, ein sehr guter Indikator für den Reifegrad einer Organisation sein, da der inhärente Informationsgehalt in dieser kondensierten Form eine detaillierte Analyse der Lebensphasen und den damit assoziierten Aufwendungen und Emissionen des Produkts und den verbundenen Prozessen voraussetzt.

Der Mehrwert der Darstellung des Produkts in dieser Form muss als Positivum erkannt und als solches kommuniziert werden. Im Idealfall kann eine EPD dann eine Hülle für die Lebenszyklusanalyse darstellen.

7 Ausblick

Die vorgestellte Methodik bietet wie beschrieben die Möglichkeit, eine vollständige und ganzheitliche Bewertung von Systemen zur Strom- und Wärmeerzeugung vorzunehmen. Damit wird ein Beitrag zum Einsatz effizienter Technik und damit zur effizienten Nutzung der verfügbaren Ressourcen und der Reduktion der unvermeidlichen Emissionen zur Sicherstellung einer nachhaltigen Entwicklung. Die Endlichkeit der fossilen Brennstoffe wird damit, genau wie der Klimawandel, im besten Fall höchstens verzögert.

Die entscheidende Tatsache aber ist der Einfluss des Wirkungsgrades auf das Nachhaltigkeitsprofil von Kraftwerken. Unter Berücksichtigung dieser Tatsache und auf Basis der in dieser Arbeit erstellten Modellierung des Produktsystems kann ein erweiterter Handlungsspielraum durch die Berücksichtigung aller relevanten Parameter gewonnen werden.

Es ist weiter zu sagen, dass eine inhärente Limitierung der Methodik der Lebenszyklusanalyse ihre Linearität ist. Es werden zwar alle Phasen des Lebenswegs betrachtet, jedoch nur als Momentaufnahme, unter Verwendung von notwendigen Annahmen für die Zukunft. Weiterhin ist die Lebenszyklusanalyse und die darin integrierte Methodik der Wirkungsabschätzung für einzelne Kategorien zwar schon wissenschaftlich detailliert erforscht und belegt, gleichzeitig kann der Anspruch einer ganzheitlichen Bewertung jedoch noch nicht vollständig erfüllt werden.

Es fehlt insbesondere an der Bewertung und Integration von sozioökonomischen Faktoren wie z. B. Sicherheit der Arbeitsplätze oder Anzahl der Arbeitsunfälle, die bisher noch nicht in diese Form der Bewertung eingehen, wohl aber einen wesentlichen Bestandteil einer nachhaltigen Bewertungsmatrix ausmachen sollten.

Um diese Rolle eines noch belastbareren Hilfsmittels zur Entscheidungsfindung vollständig ausfüllen zu können, muss außerdem eine nachvollziehbare Verknüpfung zu Methoden wie Risikobewertung und Life Cycle Costing (LCC) geschaffen werden.

Auf Firmenebene kann eine nachhaltige Produktgestaltung nur durch eine konsequente Integration in die spezifischen Prozesse unter Berücksichtigung der relevanten Parameter und Einflussfaktoren erreicht werden.

Die entscheidende Voraussetzung dafür ist jedoch gerade ein gesteigertes Bewusstsein und die damit verbundene Wahrnehmung und Interpretation als ein Wettbewerbsvorteil.

8 Literaturverzeichnis

BMU 2006a

Nationaler Allokationsplan 2008-2012 für die Bundesrepublik Deutschland, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin, 28. Juni 2006,
http://www.bmu.de/files/emissionshandel/downloads/application/pdf/nap_2008_2012.pdf, (Abruf 30.5.2009)

BMU 2006b

Hintergrundpapier zum Nationalen Allokationsplan 2008-2012, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin, 28. Juni 2006, (Abruf 30.5.2009)

de Beaufort 1993

Angeline S. H. de Beaufort-Langeveld [et al.] Code of life cycle inventory practice / edited by Pensacola, FL : Society of Environmental Toxicology and Chemistry, 2003. - XX, 136 S. + CD-ROM (12 cm) Autor: A de Beaufort-Langeveld ISBN 1-880611-58-9 Jahr:2003 Verlag Pensacola, FL, Society of Environmental Toxicology

dena 2008

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Kurzanalyse der Kraftwerks- und Netzplanung in Deutschland bis 2020 (mit Ausblick auf 2030), Berlin, April 2008

DJSI 2008

<http://www.sustainability-index.com>, (Abruf 30.5.2009)

Dones 2003

Dones R., Bauer C., Bolliger R., Burger B., Faist Emmenegger M., Frischknecht R., Heck T., Jungbluth N., Röder A. (2003) *Sachbilanzen von Energiesystemen*. Ecoinvent Bericht Nr. 6. Schweizer Zentrum für Ökoinventare, Dübendorf, 2003, pp. 15

Dreyer 1997

Philipp Dreyer, Ökologisches Life Cycle Assessment (LCA) als Instrument des Umweltmanagements, Integration in betriebliche Abläufe und Strukturen, Volkswirtschaftliche Schriften, Universität Kaiserslautern, Bd. 10, ISBN 3-86016-062-1, 1997

EE Konferenz Leiden, 2004

International Conference on Eco-Efficiency, www.eco-efficiency-conf.org

Ehrenfeld & Lenox 1997

Ehrenfeld John & Michael Lenox (1997). „The development and implementation of DfE programmes“. Journal of Sustainable Product Design, issue 1, pp 12-27

EIPPCB 2005

Integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung (IVU), Zusammenfassung, Merkblatt über die besten verfügbaren Techniken für Großfeuerungsanlagen, Mai 2005, <http://eippcb.jrc.es/pages/FActivities.htm>, (Abruf 30.5.2009)

EIPPCB 2006

European IPPC Bureau, <http://eippcb.jrc.es/about>, (Abruf 30.5.2009)

ElektroG 2005

Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten (Elektro- und Elektronikgerätegesetz), <http://bundesrecht.juris.de/elektrog/BJNR076200005.html>, (Abruf 30.5.2009)

Ertel 2008

Ertel, J., Clesle, F.-D., Bauer, J., 2008: Umweltkonforme Produktgestaltung – Handbuch für Entwicklung, Beschaffung Management und Vertrieb. Erlangen: Publicis Corporate Publishing, 2008

EU 1992

EU and the follow- up on the World Summit in Sustainable Development http://ec.europa.eu/environment/wssd/index_en.html, (Abruf 30.5.2009)

EU 2005

European Commission Climate Change, http://ec.europa.eu/environment/climat/home_en.htm, (Abruf 30.5.2009)

EU 2006a

EU Sustainable Development, <http://ec.europa.eu/environment/eussd/>, (Abruf 30.5.2009)

EU 2006b

First Report of the high level Group on Competitiveness, Energy and the environment, http://ec.europa.eu/enterprise/environment/hlg/hlg_en.htm, (Abruf 30.5.2009)

EU 2006c

The Sixth Environment Action Programme of the European Community 2002-2012
<http://ec.europa.eu/environment/newprg/intro.htm>, (Abruf 30.5.2009)

EU IPP 2001

Grünbuch zur Integrierten Produktpolitik
http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/site/de/com/2001/com2001_0068de01.pdf,
(Abruf 30.5.2009)

EU IPP 2003

Integrated Product Policy, Building on Environmental Life-Cycle Thinking,
http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/site/en/com/2003/com2003_0302en01.pdf,
(Abruf 30.5.2009)

FFE 1996

Ganzheitliche energetische Bilanzierung der Energiebereitstellung (GaBiE), Teil V,
1996

Frankl und Rubik 2000

Frankl, P.; Rubik, F.: Life Cycle Assessment in Industry and Business. Berlin, Germany, Springer, 2000

Fraunhofer ISI, 2004

Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung, Werkstoffeffizienz – Einsparpotentiale bei der Herstellung und Verwendung energieintensiver Grundstoffe, Studie, Fraunhofer IRB Verlag, 2004 Metal Construction Association 2004

Frischknecht 1996

Frischknecht, R., Bollens, S., Ciot, M., Ciseri, L., Doka, G., Dones, R., Gantner, U., Hirschier, R., Martin, A.: Ökoinventare von Energiesystemen. Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Bezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz, Gruppe Energie-Stoffe-Umwelt der ETH Zürich (CH) und Sektion Ganzheitliche Systemanalysen des PSI Villigen (CH), 1997

Frischknecht 2005

Frischknecht R., Jungbluth N., Althaus H.J., Doka G., Dones R., Heck T., Hellweg S., Hirschier R., Nemecek T., Rebitzer G. and Spielmann M., The ecoinvent Database: Overview and Methodological Framework, Int J LCA 10 (1) 3 – 9 (2005)
siehe auch www.ecoinvent.ch

Frischknecht 2007

Frischknecht R., Althaus H.-J., Doka, G., Dones, R., Heck T., Hellweg, S., Hirsch, R., Jungbluth N., Nemecek, T., Rebitzer, G., Spielmann, M. (2007), *Overview and Methodology*. Final report ecoinvent v2.0 No. 1, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Duebendorf, CH

Goedkoop und Spriensma 2000

The Eco-indicator 99; A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment, Methodology Report, Second revised edition, Pré Consultants B.V. Amersfoort

Graedel und Allenby 1995

Graedel, T. E./ Allenby, B. R. *Industrial Ecology*. New Jersey/USA: Prentice Hall, 1995. 412p

Guidice et al. 2006

F. Guidice, F., La Rosa, G., Risitano, A., *Product Design for the Environment, A Life Cycle Approach*, Boca Raton FL, CRC Press, 2006

Guinée 2001

Guinée, J.B. (ed.): *Life Cycle Assessment, an operational guide to the ISO standards, part 2a, guide; final report*, May 2001

IEA 2004

World Energy Outlook 2004, IEA PUBLICATIONS, 9, rue de la Fédération, 75739 PARIS CEDEX 15, (61 2004 25 1P1) ISBN 92-64-1081-73 – 2004

IEA 2007

Energy Policies of IEA Countries - Germany -- 2007 Review, 184 pages, ISBN 978-92-64-02223-2

IER 2007

Lebenszyklusanalyse ausgewählter zukünftiger Stromerzeugungstechniken
http://www.ier.uni-stuttgart.de/forschung/projektwebsites/lci_bmw/ergebnisse/-fossil_gefeuerte_kraftwerke.pdf, (Abruf 30.5.2009)

IPPC 2007

Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA., 851 pp

ISO 14040

DIN EN ISO 14040:2006-10 Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen, Berlin, Beuth Verlag, 2006

ISO 14044

DIN EN ISO 14044:2006-10 Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen, Beuth Verlag, 2006

ISO/TR 14047

ISO/Technical Report 14047: Illustrative examples on how to apply ISO 14042 – Life Cycle assessment – Life Cycle impact assessment. ISO/TC 207/SC 5/WG4/TG 14047. Committee draft, 2001

ISO TR 14062

Umweltmanagement - Integration von Umweltaspekten in Produktdesign und – entwicklung, DIN ISO Fachbericht: TR 14062. Beuth Vertrieb, Berlin, Germany, 2003

Jensen und Remmen 2004

Jensen, A. A.; Remmen, A.: Background report for UNEP Guide to Life Cycle Management – A bridge to sustainable products. Final draft 30 December 2004. UNEP/SETAC Life Cycle Initiative

Jolliet 2003

Jolliet O, Margni M, Charles R, Humbert S, Payet J, Rebitzer G and Rosenbaum R (2003) IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology, Industrial Ecology & Life Cycle Systems Group; Lausanne, 2003

Lundie 1999

Lundie, S., Lüneburg, Univ., Diss., u.d.T.: Ökobilanzierung und Entscheidungstheorie - Praxisorientierte Produktbewertung auf der Basis gesellschaftlicher Werthaltungen ISBN:3-540-65042-3 Springer Verlag (Univ. Bibliothek Göttingen)

Marheinke 2002

Lebenszyklusanalyse fossiler, nuklearer und regenerativer Stromerzeugungstechniken, Dissertation, IER Stuttgart, 2002

McKinsey 2007

Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland, Studie von McKinsey & Company, Inc., im Auftrag von „BDI initiativ – Wirtschaft für Klimaschutz“ Herausgeber: McKinsey & Company, Inc, 2007, http://www.bdi-online.de/Dokumente/Umweltpolitik/Klimastudie_BDIundMcKinsey_KostenundPotenzialederVermeidungvonTreibhausgasemiss.pdf, (Abruf 30.5.2009)

ProMechG 2007

Gesetz über projektbezogene Mechanismen nach dem Protokoll von Kyoto zum Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen vom 11. Dezember 1997, <http://bundesrecht.juris.de/promechg/index.html>, (Abruf 30.5.2009)

Quella 2003

Quella, F. and Schmidt, W.F. 2003. The new ISO TR 14062. Life Cycle Management – Design for Environment. February 17 th (1st part) and March 17 th (2nd part). Ecomed publishers (Landsberg, Germany)

Schmidtheiny 1992

Stefan Schmidtheiny, Kurswechsel: globale unternehmerische Perspektiven für Entwicklung und Umwelt, Knaur, München, 1992

Siemens AG 2007

Siemens Norm SN 36350, Umweltverträgliche Produkte und Anlagen, 2007, http://w1.siemens.com/responsibility/en/environment/management/environmental_management.htm#toc-3 (Abruf 30.5.2009)

Siemens AG 2009

Siemens Corporate Sustainability Report 2008, <http://w1.siemens.com/responsibility/report/08/de/index.htm>

Stern 2006

The Economics of Climate Change, The Stern Review, Nicholas Stern, ISBN number: 0-521-70080-9

TEHG 2007

Gesetz über den Handel mit Berechtigungen zur Emission von Treibhausgasen, Treibhausgas-Emissionshandelsgesetz – TEHG, 10. August 2007, <http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/tehg.pdf>, (Abruf 30.5.2009)

UN 1992

Report of the United Nations Conference on Environment and Development, A/CONF.151/26/Rev.I (Vol. I), United Nations publication, Sales No. E.93.1.

UN 1994

UNFCCC, Rahmenabkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen, <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/convger.pdf>, (Abruf 30.5.2009)

UN 1998

Kyoto Protocol to the UNFCCC <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>, (Abruf 30.5.2009)

UN 2001

SN 200/1/01 REV 1, Presidency Conclusions, Göteborg Summit http://ue.eu.int/ueDocs/cms_Data/docs/pressData/en/ec/00200-r1.en1.pdf, (Abruf 30.5.2009)

UN 2002

Johannesburg Declaration on Sustainable Development, <http://www.un-documents.net/jburgdec.htm>, (Abruf 30.5.2009)

UN 2005

UNFCCC 2005, Key GHG Data: Greenhouse Gas Emissions Data for 1990-2003, http://unfccc.int/resource/docs/publications/key_ghg.pdf, (Abruf 30.5.2009)

UN 2006

Trends in Sustainable Development, United Nations publication, http://www.un.org/esa/sustdev/publications/trends2006/trends_rpt2006.pdf, (Abruf 30.5.2009)

UNDESA-DSD 2005

based on World Bank, World Development Indicators 2005. For Sulphur: Stern, D. (2005), Rensselaer Polytechnic Institute, <http://www.rpi.edu/~sternd/datasite.html> (Abruf 30.5.2009)

UNEP/SETAC 2005

United Nation Environment Programme, Sustainable Consumption and Production
<http://www.unep.fr/scp/> , (Abruf 30.5.2009)

Viebahn 2007

Viebahn, P.; Fritsche, U.; Patyk, A.; Bauer, Ch. 2007: Development of a Methodology to Create Standardized, Quality Tested, and Updatable LCI Datasets by Way of the German Electricity Mix. Proceedings of SETAC Europe 2007, Porto www.netzwerk-lebenszyklusdaten.de, (Abruf 30.5.2009)

WBCSD 2000

World Business Council for Sustainable Development (WBCSD): Eco-Efficiency – Creating more Value with Less Impact, 2000. Available from: www.wbcscd.ch
(Abruf 30.5.2009)

WBCSD/WRI 2004

The Greenhouse Gas Protocol, A Corporate Accounting and Reporting Standard, March 2004, verfügbar unter <http://www.ghgprotocol.org/standards/corporate-standard>, (Abruf 30.5.2009)

WCED 1987

WCED (World Commission on Environment and Development), Our Common Future, Oxford University Press, Oxford, UK 1987, verfügbar unter <http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm>, (Abruf 30.5.2009)

ZuG 2012

Gesetz zur Änderung der Rechtsgrundlagen zum Emissionshandel im Hinblick auf die Zuteilungsperiode 2008 bis 2012, Bundesgesetzblatt, Teil I, vom 10. August 2007 (S. 1788), http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/zug_2012/gesamt.pdf, (Abruf 30.5.2009)

ZuV 2012

Verordnung über die Zuteilung von Treibhausgas-Emissionsberechtigungen in der Zuteilungsperiode 2008 bis 2012, (Zuteilungsverordnung 2012 – ZuV 2012), Bundesgesetzblatt, Teil I, vom 17.08.2007, Seite 1941, <http://www.bgblportal.de/BGBl/bgbl1f/bgbl107s1941.pdf>, (Abruf 30.5.2009)

Züst 1997

Züst, Rainer, Einstieg ins Systems Engineering: Systematisch denken, handeln und umsetzen, Verlag Industrielle Organisation, Zürich 1997

88/609/EWG

Richtlinie 88/609/EWG des Rates vom 24. November 1988 zur Begrenzung von Schadstoffemissionen von Großfeuerungsanlagen in die Luft, <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:1999:0611:FIN:DE:PDF> (Abruf 30.5.2009)

94/66/EG

Richtlinie 94/66/EG des Rates vom 15. Dezember 1994 zur Änderung der Richtlinie 88/609/EWG zur Begrenzung von Schadstoffemissionen von Großfeuerungsanlagen in die Luft

96/61/EG

Richtlinie 96/61/EG des Rates vom 24. September 1996 über die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung, Amtsblatt Nr. L 257 vom 10/10/1996 S. 0026 – 0040 (sogenannte IPPC Richtlinie), <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CONSLEG:1996L0061:20060224:DE:PDF>, (Abruf 30.5.2009)

2000/53/EC

ELV – Altkraftfahrzeug-Verordnung, <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2000:269:0034:0042:EN:PDF>, (Abruf 30.5.2009)

2001/80/EG

RICHTLINIE 2001/80/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 23. Oktober 2001 zur Begrenzung von Schadstoffemissionen von Großfeuerungsanlagen in die Luft, <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2001:309:0001:0021:DE:PDF> (Abruf 30.5.2009)

2002/96/EC

„Waste Electric and Electronic Equipment (WEEE), <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32002L0095:EN:NOT>, (Abruf 30.5.2009)

2002/358/EG

Entscheidung des Rates vom 25. April 2002 über die Genehmigung des Protokolls von Kyoto zum Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen im Namen der Europäischen Gemeinschaft sowie die gemeinsame Erfüllung der daraus erwachsenden Verpflichtungen, <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32002D0358:DE:HTML>, (Abruf 30.5.2009)

2003/87/EG

Richtlinie 2003/87/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Oktober 2003 über ein System für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten in der Gemeinschaft und zur Änderung der Richtlinie 96/61/EG des Rates, <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2003:275:0032:0046:DE:PDF> (Abruf 30.5.2009)

2004/101/EG

Richtlinie 2004/101/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27. Oktober 2004 zur Änderung der Richtlinie 2003/87/EG über ein System für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten in der Gemeinschaft im Sinne der projektbezogenen Mechanismen des Kyoto-Protokolls, <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2004:338:0018:0023:DE:PDF>, (Abruf 30.5.2009)

2005/32/EC

Ecodesign requirements for energy-using products - EuP Directive, <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2005:191:0029:0058:EN:PDF> (Abruf 30.5.2009)

2008/1/EC

Aktualisierung der Richtlinie 96/61/EG des Rates vom 24. September 1996 über die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung, Amtsblatt Nr. L 257 vom 10/10/1996 S. 0026 – 0040 (sogenannte IPPC Richtlinie), <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:024:0008:0029:en:PDF> (Abruf 30.5.2009)

9 Anhang

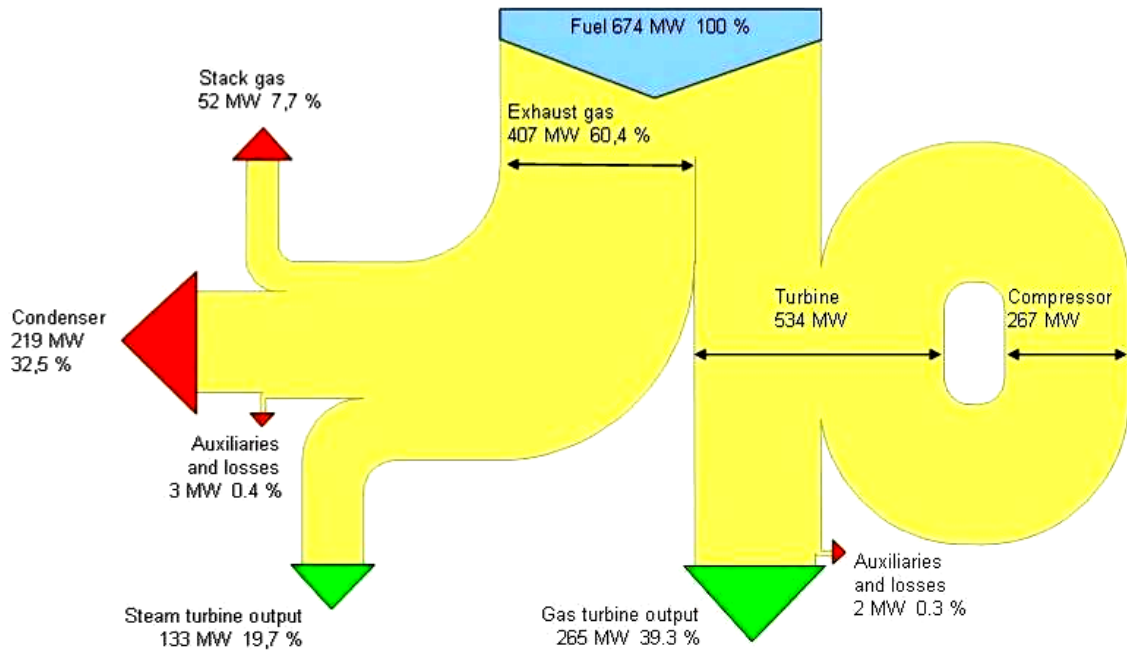


Abbildung 9.1: Sankey Diagramm SCC5-4000F

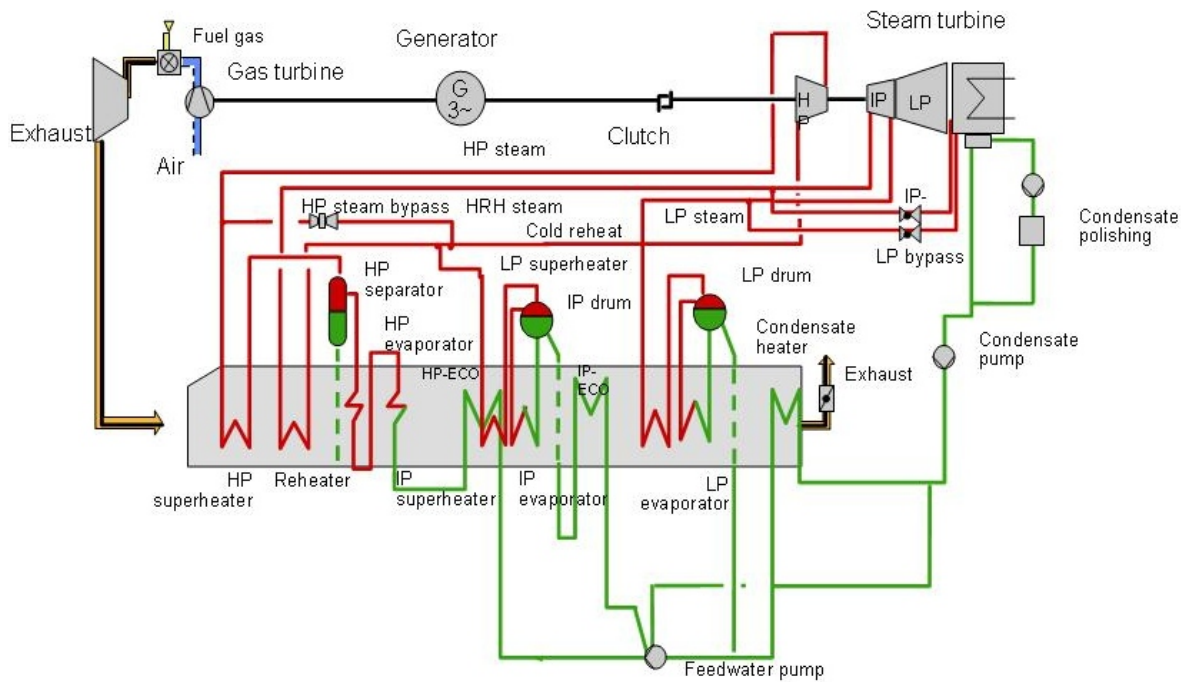
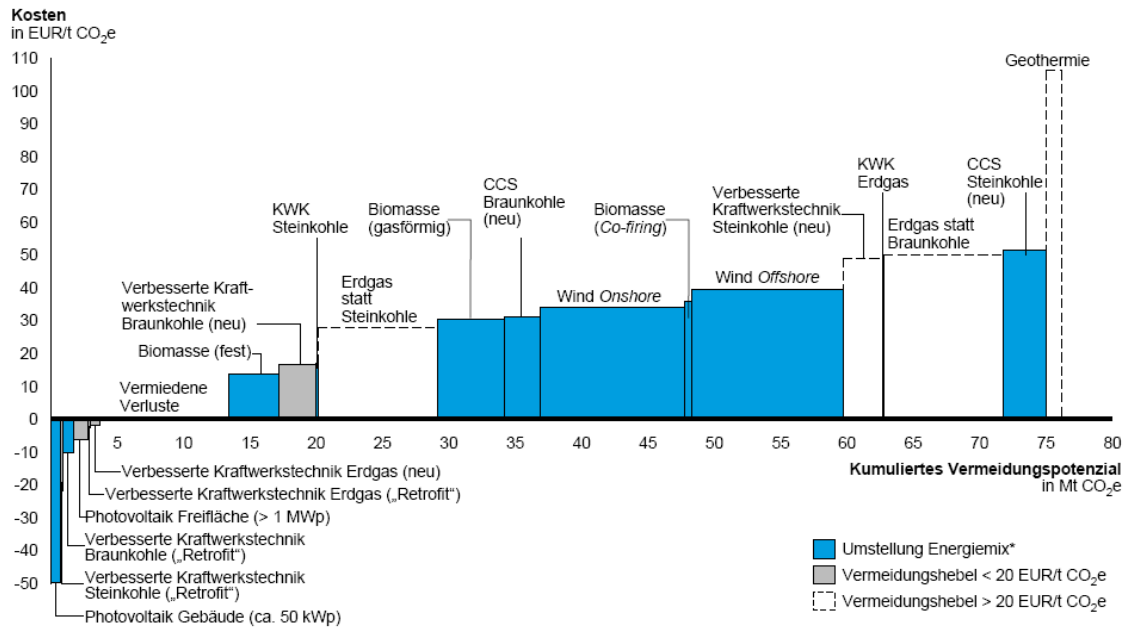


Abbildung 9.2: Schematische Darstellung AHDE mit Benson Hochdrucksektion

Energiesektor: Vermeidungskostenkurve – Deutschland 2020*

ENTSCHEIDER-PERSPEKTIVE
BASISSZENARIO 2020



* Bei Beibehaltung Kernkraftausstieg und unter Berücksichtigung von Fördermitteln für erneuerbare Energien (EEG)

Quelle: Studie „Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland“ von McKinsey & Company, Inc. im Auftrag von „BDI initiativ Wirtschaft für Klimaschutz“ – AG Energie

Abbildung 9.3: Vermeidungskostenkurve Energiesektor für 2020 [McKinsey 2007]

Tabelle 9.1: Übersicht über die in SimaPro 7 enthaltenen Datenbanken

Datenbank	Datenbankinhalt	Erstellung	Datengrundlage
Ecoinvent Unit Ecoinvent Sys- tem	Energieversorgung, Baumaterial, Chemika- lien, Metalle, Abfallent- sorgung und Transport für Europa	Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2007	Ecoinvent besteht aus mehreren Datenbanken, entwickelt von verschie- denen Schweizer Institu- ten
Japanese Input Output databa- se	Betriebswirtschaftliche Datenbank der japani- schen Wirtschaft	Environmental Tech- nology Laboratory of the Corporate Re- search & Develop- ment centre of To- shiba Corp., 2004	Basierend auf japani- schen Input Output Da- ten und Statistiken aus dem Jahr 2000
US Input Out- put database	Datenbank von 481 Be- reichen der US amerika- nischen Wirtschaft	CML, University of Leiden, 1998	Daten der Energy Infor- mation Administration, des US Department of Energy and Commerce, National Center for Food and Agricultural Policy und des WRI
Danish Input Output databa- se	Datenbank der dänischen Wirtschaft	Danish ministry of the environment	Datengrundlage sind statistische Daten des Jahrs 1999 aus Däne- mark
Dutch Input Output databa- se	Generelle ökonomische Daten über OECD und nicht OECD Regionen	RPé Consultants, 1995	Durch RPé Consultants selbst gesammelte Daten als Projekt für die nieder- ländische Regierung
Industry data	Industriedaten	Verschiedene	Von der Industrie zur Verfügung gestellte Da- ten
LCA food data- base	Nahrungsmittelproduktion	LCA Food project	Daten der dänischen Lebensmittelproduktion
ETH-ESU 96	Energieerzeugung sowie Transport, Entsorgung	ETH-ESU, Switzer- land	-

BUWAL 250	Verpackungsmaterial mit Energie, Transport, Abfallentsorgung	Schweizerische Eidgenossenschaft	-
IDEMAT 2001	Konstruktionsmaterialien sowie Energie und Transport	Dr. Han Remmerswaal, Faculty of Industrial Design	Verschieden Daten, gesammelt von Dr. Han Remmerswaal, Faculty of Industrial Design Engineering, Delft Technical University
Franklin US LCI database	Daten zu Energie, Transport, Materialien und Prozessen aus dem Raum Nordamerika	Franklin Associates, USA	Gesammelte Daten der Franklin Associates
IVAM database	Material, Transport, Energie und Abfallentsorgung im niederländischen Raum	-	Gesammelte Daten des IVAM Environmental Research und des ETH/BUWAL und PRé

Tabelle 9.2: Übersicht über die Wirkungsabschätzungsmethoden

Methoden	Erstellung	Wirkungskategorien
Eco-indicator 99	Goedkoop and Spriensma 1999, Version V2.04 June 2007	Climate change, Minerals, Respiratory organics, Ecotoxicity, Land use, Respiratory inorganics, Radiation, Ozone layer, Fossile fuels Carcinogens Acidification/ Eutrophication
Eco-indicator 95	PRé consultants, Philips Consumer Electronics, NedCar, weitere, Amsterdam	Greenhouse, Ozone layer, Acidification, Eutrophication, Heavy Metals, Carcinogens, Winter smog, Solid Waste Summer smog, Pesticides, Energy resources
CML 92 (Center for Environmental Studies)	Centre for Environmental Studies, University of Leiden, 1992, Interpreted by PRé Consultants	Ecotoxicity, Ozone layer, Solid waste Eutrophication, Acidification, Summer smog, Human toxicity, Energy resources, Greenhouse Gases

EDIP/UMIP (Environmental Design of Industrial Products)	Institute for Product Development, Denmark (1996), Version V2.03 August 2005	Global Warming, Ozone depletion,, Acidification, Eutrophication, Photochemical smog, Ecotox. water chronic, Ecotox. water acute, Ecotox. soil chronic, Human toxicity air, , Human toxicity soil, Bulk waste, Human toxicity water, Hazardous waste, Radioactive waste, Slags/ashes, Resources (all)
EPS 2000 (Environmental Priority Strategies in product design)	Chalmers University of Technology	Life expectancy, Severe morbidity, Morbidity, Severe nuisance, Nuisance, Crop growth capacity, Irrigation water, Soil acidification, Species extinction, Depletion of reserves, Wood growth capacity, Prod. cap. drinking water, Fish and meat production
Ecopoints 97	A. Braunschweig et al., Bewertung in Ökobilanzen mit der Methode der ökologischen Knappheit, Ökofaktoren 1997	Cu (water), Hg (water), Pb (water), Ni (water), AOX (water), Cr (water), Zn (water), Nitrate (soil), Metals (soil), Pesticide soil, Waste, Waste (special), LMRAD, HRAD, Energy Ozone layer, NMVOC, Dust PM10, Pb (air), Cd (air), Zn (air) Hg (air), NOx, SOx, CO ₂ , COD, P, N, NH ₃
IMPACT 2002+	Jolliet O, Margni M, Charles R, Humbert S, Payet J, Rebitzer G and Rosenbaum R (2003)	Carcinogens, Non-Carcinogens, Respiratory inorganics, Ionizing radiation, Aquatic exotoxicity, Ozone layer depletion, Global warming, Mineral extraction, Terrestrial ecotoxicity, Terrestrial acid/nutri, Land Occupation, Aquatic acidification, Non-renewable energy, Aquatic eutrophication
EPD method (Environmental Product Declarations)	Based on Revision of the EPD® system from Swedish Environmental Management Council (SEMC), (2007)	Global warming, Acidification, Ozone layer depletion, Eutrophication, Photochem. oxidation, Non renewable fossiles
CED (Cumulative Energy Demand)	This method is an update from the CML 1992 method. This version is based on version 2.7 (April 2004).	Abiotic depletion, Global warming, Ozone layer depletion, Human toxicity, Eutrophication, Water aquatic exotox., Acidification, Photochem.oxidation, Terrestrial ecotoxicity, Marine aquatic exotoxicity
IPCC Greenhouse gas emissions	Swiss Centre for LCI, Duebendor	IPCC GWP 100 a
CML 2 (2000)	Guinée et al. 2002; This method is an update from the CML 1992 method, Netherland, 1997	Abiotic depletion, Global warming, Ozone layer depletion, Human toxicity, Eutrophication, Water aquatic exotox., Acidification, Photochem.oxidation, Terrestrial ecotoxicity, Marine aquatic exotoxicity

Tabelle 9.3: Wirkungskategorien in IMPACT 2002+ mit Äquivalenzeinheiten

Midpointcategories	Wirkungskategorien	Äquivalenzeinheit der Wirkungskategorie
Human toxicity (carcinogens, non-carcinogens)	Humantoxische Wirkung (krebserregende, nicht krebserregende)	kg _{Äq} C ₂ H ₃ Cl in Luft
Respiratory inorganics	anorganische Stoffe, die die Atemwege betreffen	kg _{Äq} PM2.5 in Luft
Ionizing radiation	Ionisierende Stoffe	Bq _{Äq} C-14 in Luft
Ozone layer depletion	Stratosphärischer Ozonabbau	kg _{Äq} CFC-11 in Luft
Photochemical oxidation	Photooxidantenbildung	kg _{Äq} Ethylen in Luft
Aquatic ecotoxicity	Schädigung von Wasser-Ökosystemen	kg _{Äq} TEG in Wasser
Terrestrial ecotoxicity	Schädigung von Land-Ökosystemen	kg _{Äq} TEG in Boden
Terrestrial acidification/ nitrification	Versauerung (Bodenemissionen)	kg _{Äq} SO ₂ in Boden
Aquatic acidification	Versauerung (Luftemissionen)	kg _{Äq} SO ₂ in Luft
Aquatic eutrophication	Überdüngung von Gewässern	kg _{Äq} PO ₄ ³⁻ in Wasser
Land occupation	Bodenversiegelung	m ² _{Äq} kulturfähiges Land
Global warming	Globale Erwärmung	kg _{Äq} CO ₂ in Luft
Non-renewable energy	Verbrauch nicht-regenerativer Energien	kg _{Äq} Erdöl
Mineral extraction	Gewinnung von Mineralien	MJ zusätzlicher Energie oder kg _{Äq} Eisen (im Erz)

Tabelle 9.4: Vollständige Sachbilanz SCC5-4000F 2x1S

Stoffgruppe	[kg]
Eisen, Eisenlegierungen	13.176.770
Eisenlegierungen	12.563.466
Stähle	12.725.234
Unlegiert	9.589.610
Niedriglegiert	773.483
Hochlegiert	1.945.574
mit Chrom	236.163
mit Chrom-Nickel	303.473
Gusseisen	328.465
Nichteisenmetalle, Nichteisenmetalllegierungen	241.762
Aluminium	23.281
Kupfer	137.300
Kupferlegierungen	91.795
Blei	22.050
Zink	759
Sonstige Metalle und Halbmetalle	21
Anorganische Werkstoffe, Keramik	297.339
Glaswerkstoffe	1.356
Keramikwerkstoffe	1.090
Künstliche Mineralfasern	294.893
Kunststoffe	90.661
Thermoplaste	78.300
Polyethylen	3.833
Polypropylen	3.921
Polyvinylchlorid	12.319
Polymethylmethacrylat	5.368
Polyethersulfon	389
Polytetrafluorethylen	103
Sonstige Thermoplaste	52.367
Duroplaste (Duromere)	12.361
Epoxidharz	7.836
Phenol-Formaldehyd-Harz	570
Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk	3.760
Nitrilkautschuk	61
Fluorkautschuk	99
Silikonkautschuk	25
Sonstige Elastomere	11
Sonstige Werkstoffe	38.254
Holz	31.209
Textilien	31
Sonstige	7.014

Organische Stoffe	2.898
Sonstige organische Stoffe	2.898
Baustoffe	39.784.023
Beton, Mörtel, Putz	38.385.952
Bitumen, Asphalt	410.373
Kies	985.000
Sand	2.215
Schalung	122
Gips	359

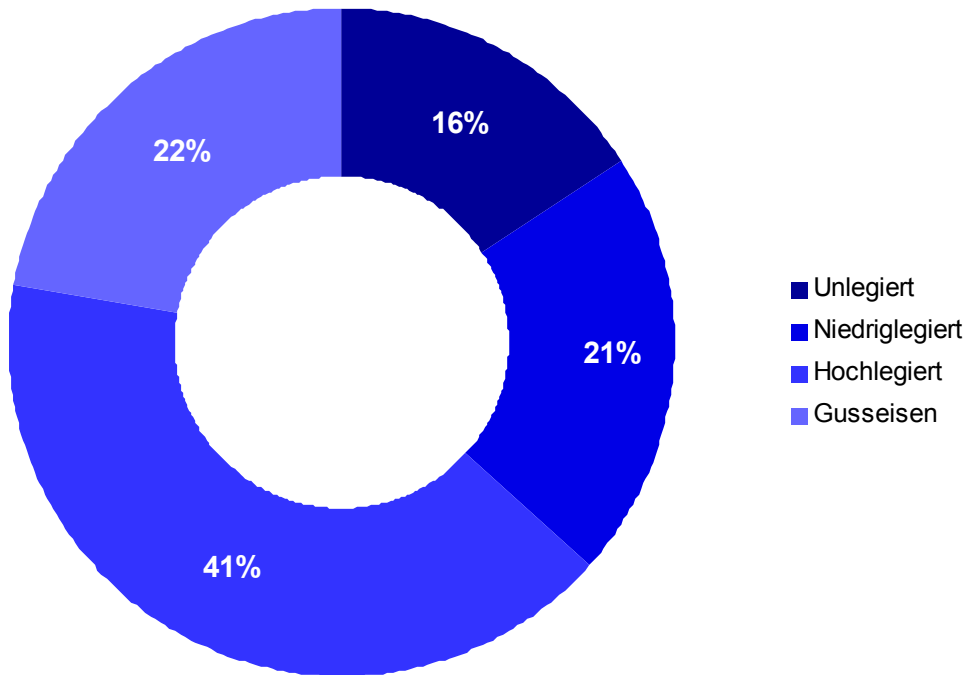


Abbildung 9.4: Materialzusammensetzung der Gasturbine

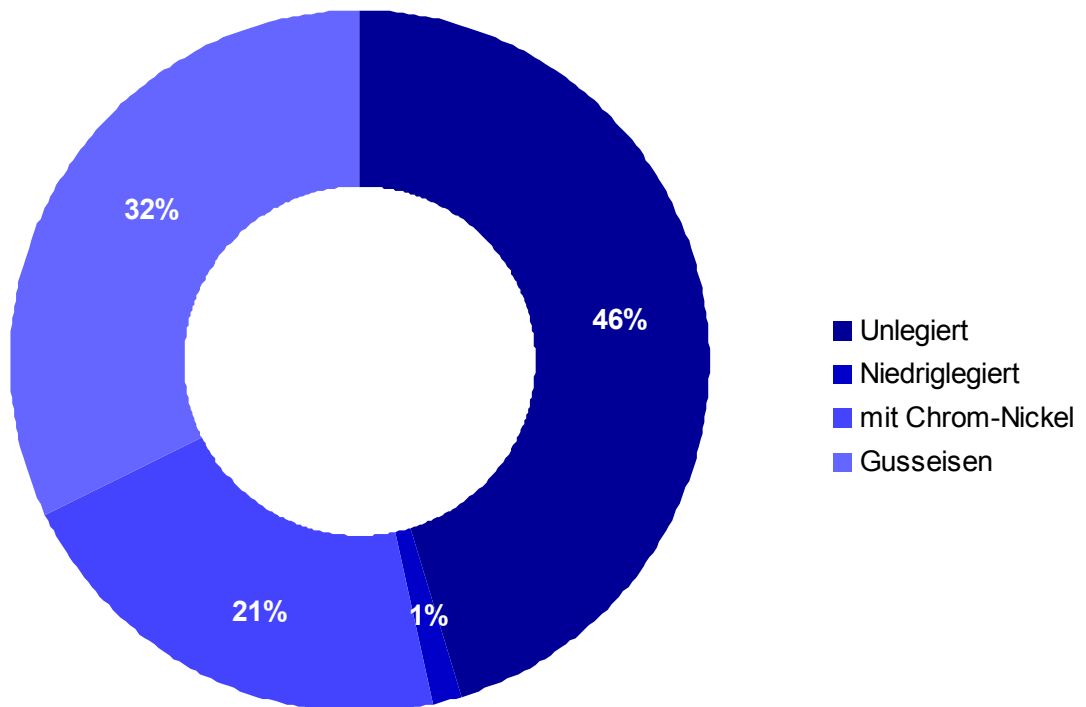


Abbildung 9.5: Materialzusammensetzung der Dampfturbine SST5-3000

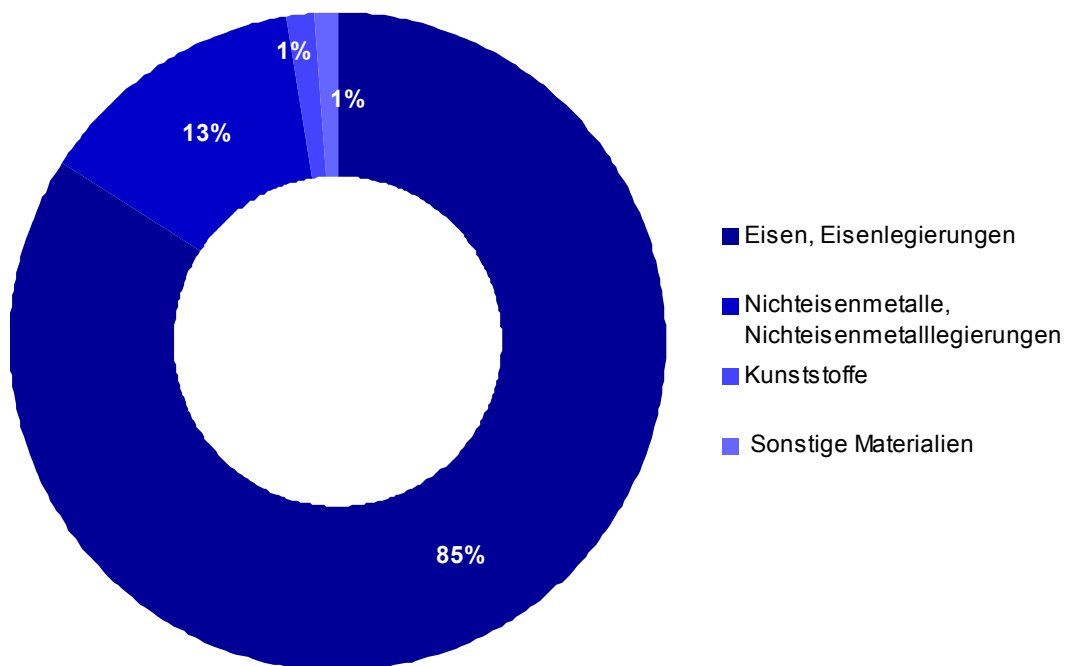


Abbildung 9.6: Materialzusammensetzung SGen5-3000W

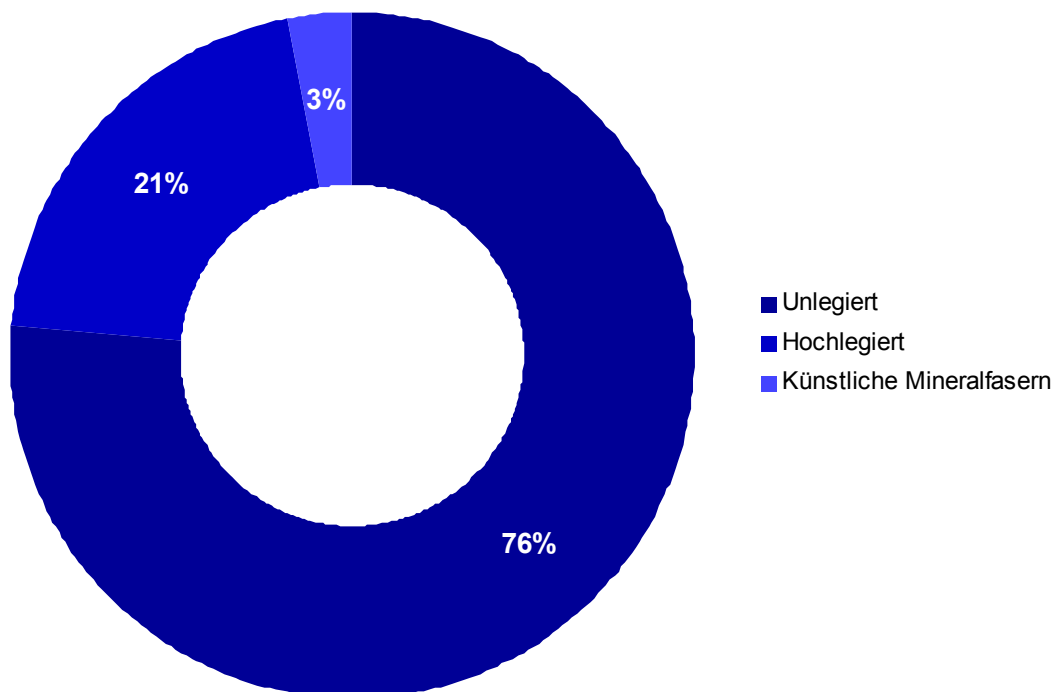


Abbildung 9.7: Materialzusammensetzung AHDE

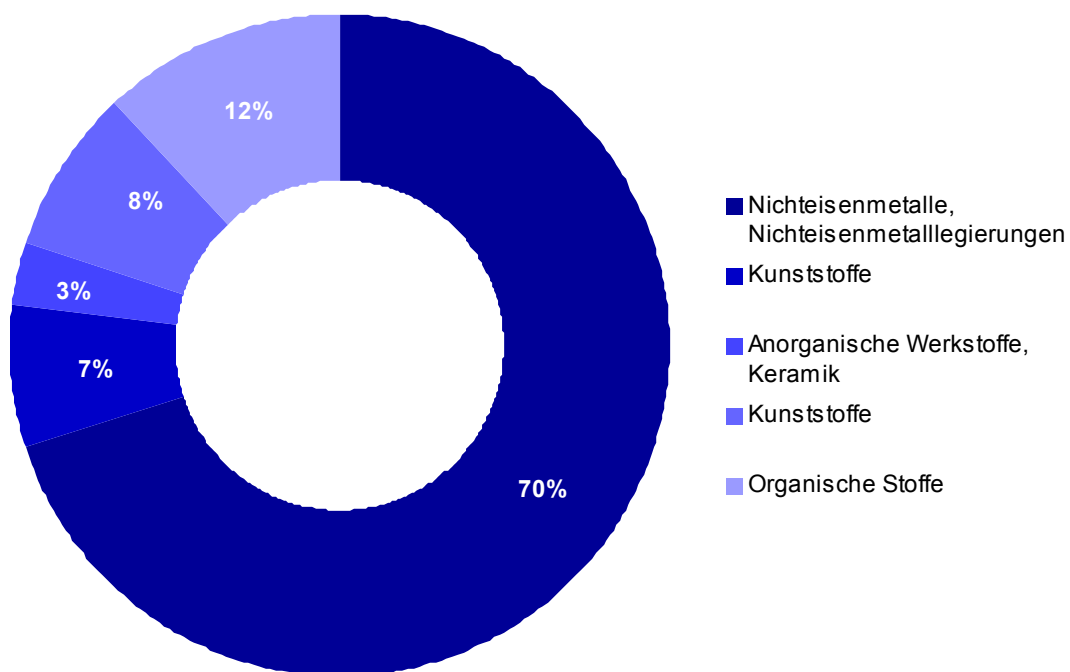


Abbildung 9.8: Materialzusammensetzung übrige Maschinenteknik

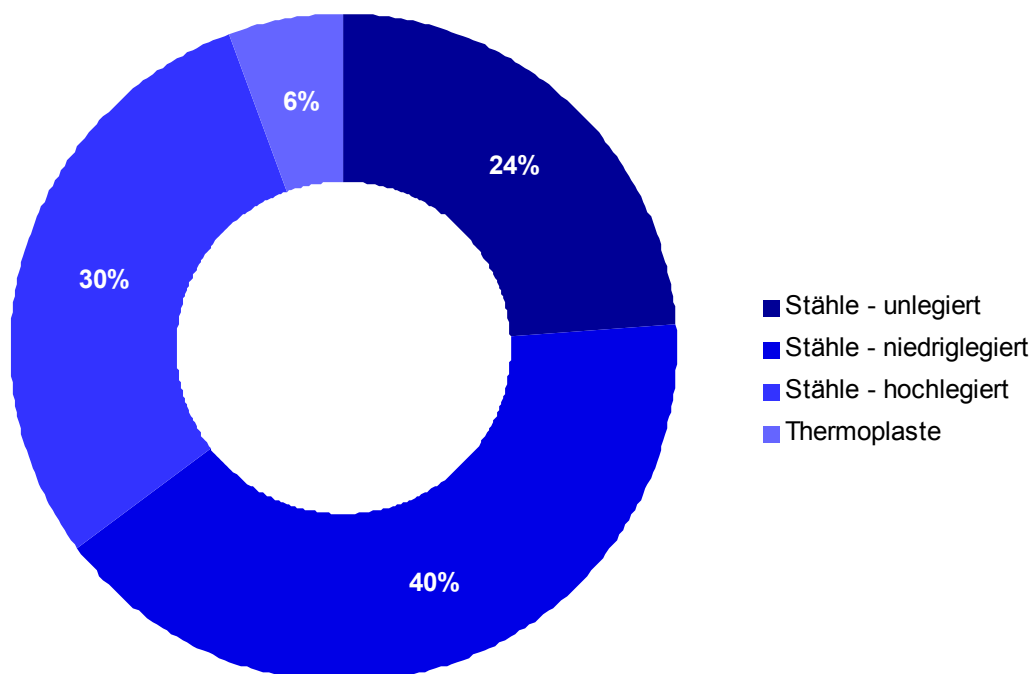


Abbildung 9.9: Materialzusammensetzung Rohrleitungen und Armaturen

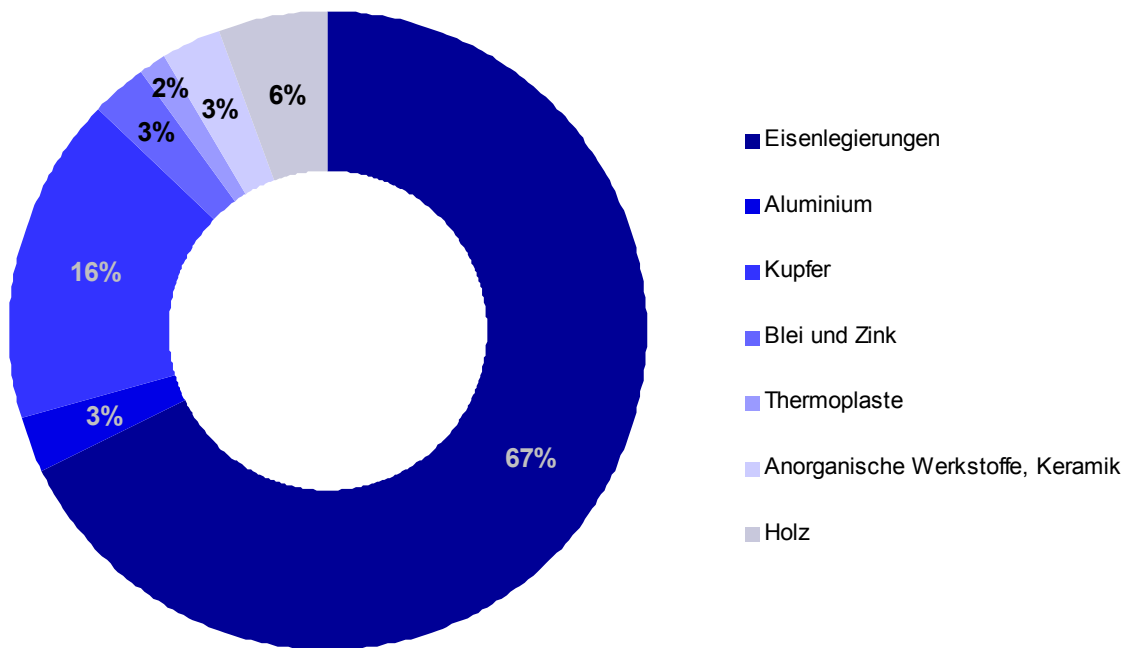


Abbildung 9.10: Materialzusammensetzung Elektrotechnik

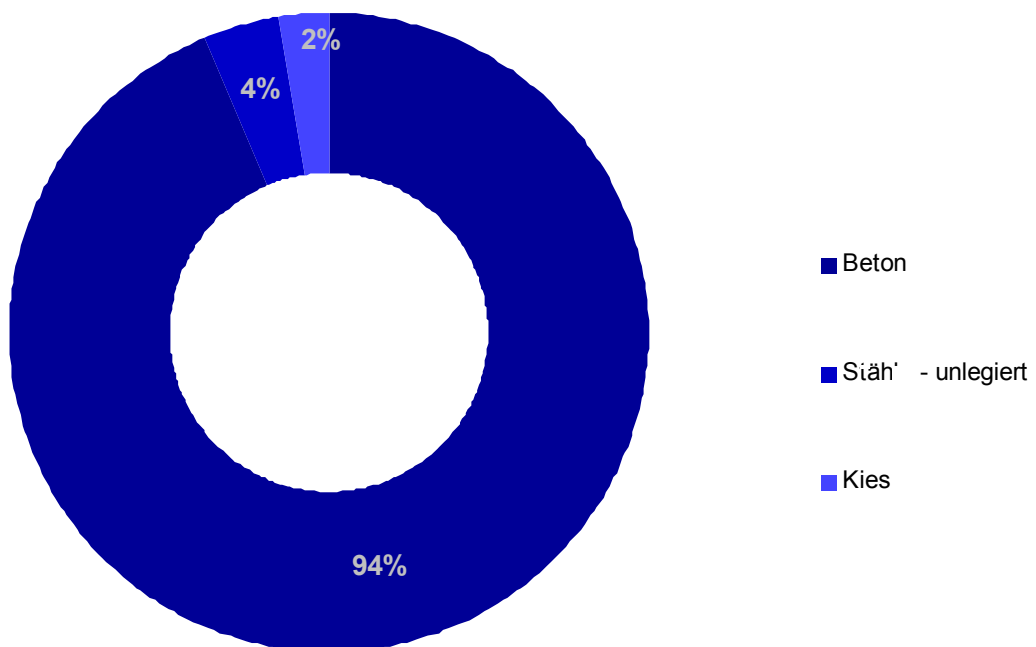


Abbildung 9.11: Materialzusammensetzung Bautechnik

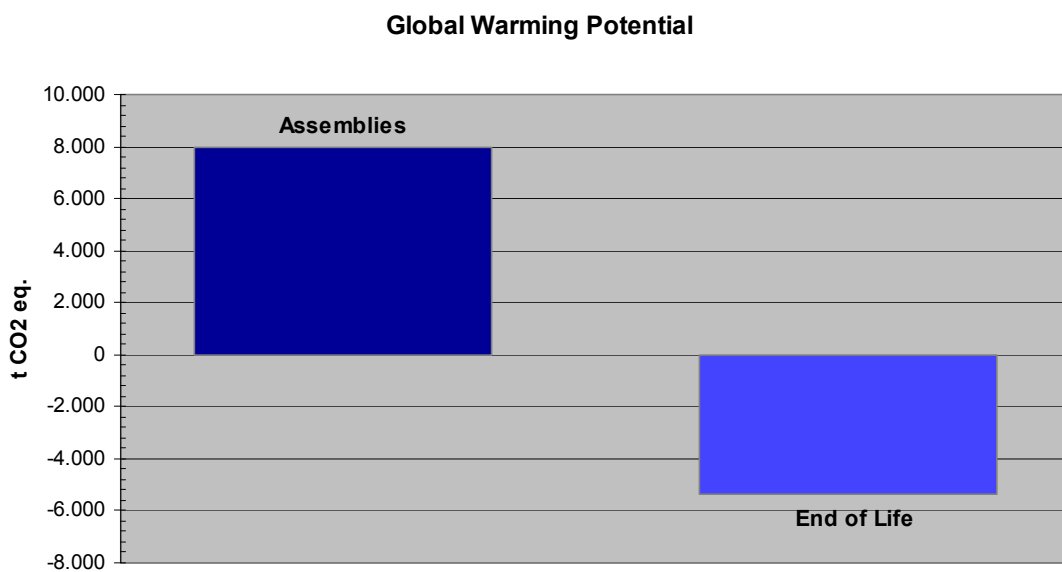


Abbildung 9.12: Ergebnisse der Wirkungsabschätzung Bautechnik

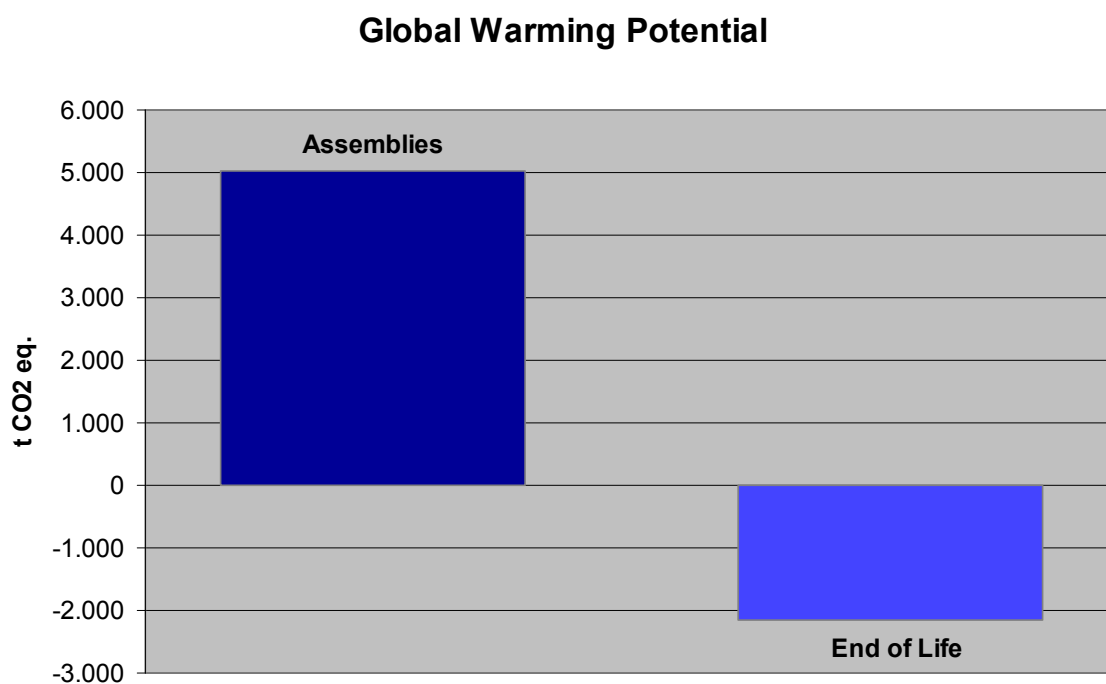


Abbildung 9.13: Ergebnisse der Wirkungsabschätzung Elektrotechnik

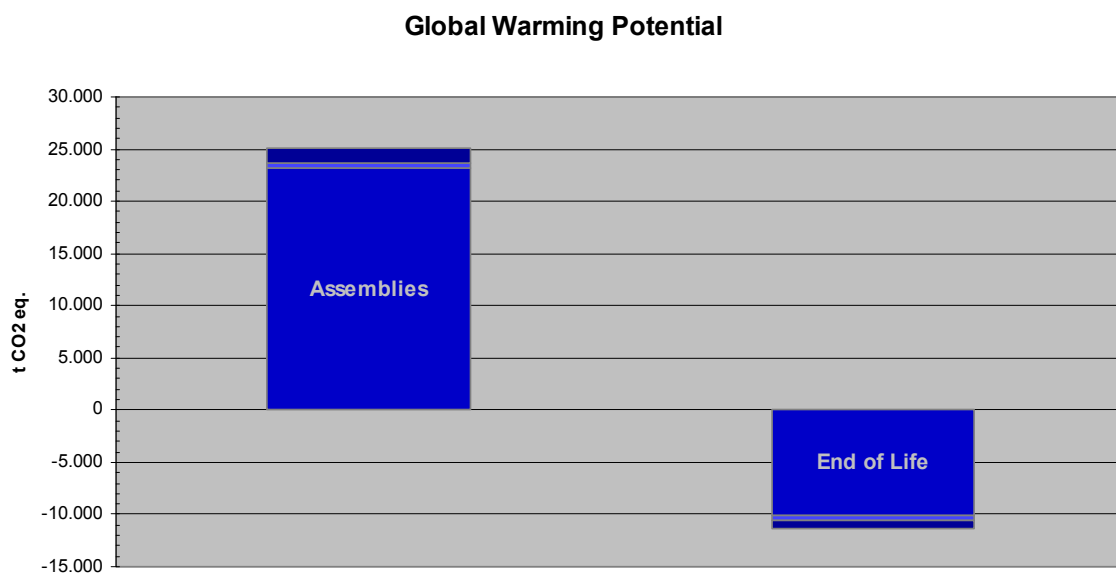


Abbildung 9.14: Ergebnisse der Wirkungsabschätzung übrige Maschinentechnik

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides Statt, dass die vorliegende Dissertation in allen Teilen von mir selbstständig angefertigt wurde und die benutzten Hilfsmittel vollständig angegeben worden sind.

Veröffentlichungen von irgendwelchen Teilen der vorliegenden Dissertation sind von mir **nicht** vorgenommen worden. Weiter erkläre ich, dass ich **nicht** schon anderweitig einmal die Promotionsabsicht angemeldet oder ein Promotionseröffnungsverfahren beantragt habe.

Falko Parthey