

# MAGISTERARBEIT

Titel der Magisterarbeit

„Zur Nachhaltigkeit von Energiepfaden bei der  
Herstellung und Distribution von Wasserstoff als  
Treibstoff“

Verfasser

Frank Benda, Bakk. rer. soc. oec

angestrebter akademischer Grad

Magister der Sozial- und Wirtschaftswissenschaften (Mag. rer. soc. oec.)

Wien, 2012

Studienkennzahl lt. Studienblatt:  
Studienrichtung lt. Studienblatt:  
Betreuer:

A 066 915  
Magisterstudium Betriebswirtschaft  
O. Univ.-Prof. Dr. Kurt Heidenberger



# Inhaltsverzeichnis

<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>VII</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>VIII</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>IX</b>
<b>1 Einführung</b>	<b>1</b>
1.1 Problem- und Fragestellung . . . . .	1
1.2 Zielsetzung . . . . .	6
<b>2 Definitionen und Dimensionen der Nachhaltigkeit</b>	<b>8</b>
2.1 Definition des Begriffs Nachhaltigkeit . . . . .	8
2.1.1 Der Begriff der Nachhaltigkeit im Sinne des österreichischen Gesetzgebers . . . . .	9
2.1.2 Deutsche Gesetze zur Bestimmung des Begriffes der Nachhaltig- tigkeit . . . . .	10
2.1.3 Der Begriff der Nachhaltigkeit im Sinne des Brundtland-Berichts	12
2.1.4 Zusammenfassende Betrachtung des Begriffes der Nachhaltigkeit	13
2.2 Das Drei-Säulen-Modell – Die Dimensionen der Nachhaltigkeit . . . .	14
2.3 Ökologische Kriterien . . . . .	16
2.3.1 Treibhauseffekt . . . . .	17
2.3.2 Versauerung und Eutrophierung . . . . .	19
2.3.3 Ozon und Staub . . . . .	23
2.3.4 Reststoffe . . . . .	25
2.3.5 Abwasser . . . . .	27
2.3.6 Fläche . . . . .	31
2.3.7 Kumulierter Energieverbrauch . . . . .	31
2.3.8 Kumulierter Energieaufwand . . . . .	32
2.3.9 Kumulierter Stoffaufwand . . . . .	32
2.3.10 Zusammenfassung der Kriterien- und Indikatoren zur Bewer- tung der Nachhaltigkeit . . . . .	33

2.4	Ökonomische Kriterien . . . . .	33
2.4.1	Beschäftigungseffekte . . . . .	35
2.4.2	Kosten . . . . .	35
2.5	Sozio-kulturelle Kriterien . . . . .	36
2.5.1	Beeinträchtigung des Lebensraumes . . . . .	37
2.5.2	Unfallgefahr und -auswirkungen . . . . .	41
<b>3</b>	<b>Grundlagen des Werkzeugs zur Beurteilung von Nachhaltigkeit</b>	<b>43</b>
3.1	Grundlagen des Bewertungswerkzeuges . . . . .	43
3.1.1	GEMIS–Eine Datenbank zur Lebenszyklusanalyse . . . . .	43
3.1.2	Prozessketten . . . . .	44
3.1.3	Datensammlung und Datenqualität . . . . .	45
3.2	Aufbau des Werkzeugs zur Bewertung von Nachhaltigkeit . . . . .	46
3.2.1	Bewertungsgraph . . . . .	46
3.2.2	Genauer Ablaufplan zur Erstellung einer Nachhaltigkeitsana- lyse mit Hilfe des Bewertungswerkzeuges . . . . .	50
3.3	Erklärendes Beispiel anhand der Erzeugung von Nahrung für Deutsch- land . . . . .	54
3.3.1	Schritt 1: Fragestellung und Zielsetzung . . . . .	54
3.3.2	Schritt 2: Datensätze der Prozessketten auswählen . . . . .	55
3.3.3	Schritt 3: Datensätze mit GEMIS auswerten lassen . . . . .	55
3.3.4	Schritt 4: Referenz-, Grenz- und Zielwerte festlegen . . . . .	56
3.3.5	Schritt 5: Ergebnisse in das Bewertungswerkzeug übertragen . . . . .	56
3.3.6	Schritt 6: Gewichtung festlegen . . . . .	56
3.3.7	Schritt 7: Analyse . . . . .	57
3.4	Zusammenfassung . . . . .	58
<b>4</b>	<b>Nachhaltigkeitsbewertung der Energieerzeugung zur Herstellung von Wasserstoff</b>	<b>60</b>
4.1	Fragestellung und Zieldefinierung . . . . .	60
4.1.1	Die Grundlagen des HyWays-Projektes . . . . .	61
4.1.2	Der “German Electricity Mix 2020” . . . . .	64
4.2	Datensätze der Prozessketten auswählen . . . . .	65
4.3	Referenz-, Grenz- und Zielwerte bestimmen . . . . .	66
4.3.1	Referenz-, Grenz- und Zielwertbestimmung für die Indikatoren der ökologischen und ökonomischen Dimension . . . . .	66
4.3.2	Referenz-, Grenz- und Zielwertbestimmung für die Indikatoren der sozio-kulturellen Dimension . . . . .	66
4.4	Gewichtungen festlegen . . . . .	67

4.4.1	Szenario 1: CO <sub>2</sub> -Äquivalente . . . . .	67
4.4.2	Szenario 2: Alle Äquivalente . . . . .	67
4.4.3	Szenario 3: Gleichgewichtung aller Kriterien . . . . .	67
4.4.4	Szenario 4: Beschäftigungseffekte . . . . .	67
4.4.5	Szenario 5: Spezielle Gewichtung . . . . .	68
4.5	Analyse der Gewichtungsszenarien . . . . .	68
4.5.1	Analyse Szenario 1 . . . . .	68
4.5.2	Analyse Szenario 2 . . . . .	69
4.5.3	Analyse Szenario 3 . . . . .	70
4.5.4	Analyse Szenario 4 . . . . .	70
4.5.5	Analyse Szenario 5 . . . . .	71
4.6	Ergebnis . . . . .	71
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>74</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>XI</b>
<b>A</b>	<b>Appendix</b>	<b>XXIV</b>
A.1	Gewichtungen im Einführungsbeispiel (Szenario 4) . . . . .	XXIV
A.2	Gewichtungen im Anwendungsfall (Szenario 5) . . . . .	XXV
A.3	Ausgewählte Kraftwerke für den Anwendungsfall . . . . .	XXVI
A.4	Detaillierte Beschreibung der erreichten Punkteanzahl der Indikatoren in der sozio-kulturellen Dimension . . . . .	XXVII
A.4.1	Bewertung der Auswirkungen auf das Landschaftsbild . . . . .	XXVII
A.4.2	Bewertung der Auswirkungen auf die direkte Umgebung . . . . .	XXXII
A.4.3	Bewertung des Widerstandes in der Bevölkerung . . . . .	XXXVII
A.4.4	Bewertung der Auswirkungen eines Unfalls . . . . .	XL
A.4.5	Bewertung der Dauer der Schadensbehebung . . . . .	XLVI
A.5	Zusammenfassung . . . . .	XLIX
A.6	Lebenslauf . . . . .	LI

# Tabellenverzeichnis

2.1	Die verschiedenen Dimensionen des Drei-Säulen-Modells . . . . .	14
2.2	Zielgrößen und -indikatoren des Green Cabinets . . . . .	15
2.3	Ökologische Kriterien zur Beurteilung von Nachhaltigkeit . . . . .	17
2.4	Überblick über die wichtigsten Treibhausgase und deren Wirkung auf den Treibhauseffekt . . . . .	18
2.5	Indikatoren zur Messung der Versauerung und Eutrophierung . . . . .	21
2.6	Indikatoren zur Messung der Belastung durch Ozon und Staub . . . . .	24
2.7	Indikatoren zur Messung der anfallenden Reststoffe . . . . .	25
2.8	Indikatoren zur Messung der Belastung durch Abwasser . . . . .	27
2.9	Indikatoren zur Bestimmung des KEV . . . . .	32
2.10	Indikatoren zur Bestimmung des KEA . . . . .	32
2.11	Indikatoren zur Bestimmung des KSA . . . . .	33
2.12	Überblick über die ökologischen Kriterien und Indikatoren zur Bewer- tung von Nachhaltigkeit . . . . .	34
2.13	Überblick über die ökonomischen Kriterien und Indikatoren zur Be- wertung von Nachhaltigkeit . . . . .	35
2.14	Überblick über die sozio-kulturellen Kriterien und Indikatoren zur Bewertung von Nachhaltigkeit . . . . .	37
2.15	Skala zur Bewertung der Beeinträchtigung des Landschaftsbildes . . . . .	38
2.16	Skala zur Bewertung der Auswirkungen auf die Umgebung . . . . .	39
2.17	Skala zur Beurteilung von Widerständen gegen Projekte oder Tech- nologien . . . . .	40
2.18	Skala zur Bewertung der Auswirkungen eines Unfalls . . . . .	42
2.19	Skala zur Bewertung der Dauer der Schadens- bzw Störfallbeseitigung . . . . .	42
3.1	Qualität der Datensätze in GEMIS . . . . .	45
3.2	Punkteverteilung für alle Indikatoren außer Beschäftigungseffekt . . . . .	47
3.3	Punkteverteilung für Indikator Beschäftigungseffekt . . . . .	47
3.4	Ablaufplan zur Erstellung einer Nachhaltigkeitsanalyse mit Hilfe des Bewertungswerkzeuges . . . . .	51

4.1	Selektierte Energiepfade des HyWays-Projektes für Deutschland . . .	63
4.2	Ausgewählte Prozesse zur Energieerzeugung für Deutschland im Jahr 2020 . . . . .	65
4.3	Nach erreichten Punkten sortierte Reihung der Optionen . . . . .	72
A.1	Überblick über die ausgewählten Kraftwerke für den Anwendungsfall	XXVI
A.2	Bewertung der Auswirkungen auf das Landschaftsbild . . . . .	XXVII
A.3	Bewertung der Auswirkungen auf die direkte Umgebung . . . . .	XXXII
A.4	Bewertung des Widerstandes in der Bevölkerung . . . . .	XXXVII
A.5	Bewertung der Auswirkungen eines Unfalls . . . . .	XL
A.6	Bewertung der Dauer der Schadensbehebung . . . . .	XLVI

# Abbildungsverzeichnis

3.1	Beispiel einer Prozesskette für den Anbau von ökologisch erzeugten Kartoffeln . . . . .	45
3.2	Beispiel für einen Bewertungsgraphen . . . . .	47
3.3	Erreichte Punktzahl der einzelnen Szenarien im Einführungsbeispiel	57
4.1	Erreichte Punktzahl der einzelnen Energieerzeugungsoptionen im Anwendungsfall . . . . .	69
A.1	Gewichtung der Indikatoren des Einführungsbeispiels (Szenario 4) . .	XXIV
A.2	Gewichtung der Indikatoren des Anwendungsfall (Szenario 5) . . . . .	XXV

# Abkürzungsverzeichnis

Abs.	Absatz
AOX	Adsorbierbare, organisch gebundene Halogene
ARGEMUC	Arbeitsgemeinschaft am Flughafen München
As	Arsen
BiomasseV	Verordnung über die Erzeugung von Strom aus Biomasse
BioSt-NachV	Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung
BMELV	Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
BNatSchG	Bundesnaturschutzgesetz
BNB	Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen
BSB	Biologischer Sauerstoffbedarf
C	Celsius
Cd	Cadmium
CGH <sub>2</sub>	Druckwasserstoff
CH <sub>4</sub>	Methan
CO	Kohlenmonoxid
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
Cr	Chrom
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
DFIU	Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung
DIN EN ISO	Deutsches Institut für Normung, europäische Normen, Internationale Organisation für Normung
EU	Europäische Union
ForstG	Österreichisches Forstgesetz
G	Grenzwert
GEMIS	Globales Emissions-Modell integrierter Systeme
GG	Grundgesetz für die Bundesrepublik Deutschland

GWh	Gigawattstunde
H <sub>2</sub>	Wasserstoff
H <sub>2</sub> S	Schwefelwasserstoff
HCl	Chlorwasserstoff
HF	Fluorwasserstoff
Hg	Quecksilber
IAA	Internationale Automobil-Ausstellung
IEA	International Energy Agency (Internationale Energieagentur)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Weltklimarat der Vereinten Nationen)
IPHE	International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy (Internationale Partnerschaft für Wasserstoff und Brennstoffzellen in der Wirtschaft)
ISI	Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung
KEA	Kumulierter Energieaufwand
KEV	Kumulierter Energieverbrauch
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
kg	Kilogramm
km	Kilometer
km <sup>2</sup>	Quadratkilometer
KSA	Kumulierter Stoffaufwand
kWh	Kilowattstunde
LCGH <sub>2</sub>	Gasförmiger Wasserstoff aus flüssigem Wasserstoff
LH <sub>2</sub>	Flüssigwasserstoff
m	Meter
Mio.	Millionen
Mrd.	Milliarden
MOREHyS	Model for Optimisation of Regional Hydrogen Supply (Modell zur Optimierung der regionalen Wasserstoffversorgung)
MW	Megawatt
N	Stickstoff
N <sub>2</sub> O	Lachgas
NH <sub>3</sub>	Ammoniak
Nm <sup>3</sup>	Normkubikmeter
NMVOC	Non-methane volatile organic compounds (Flüchtige Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe)
NO <sub>x</sub>	Stickoxid
Nr.	Nummer

O <sub>3</sub>	Ozon
Öko-Institut e.V.	Institut für angewandte Ökologie
P	Phosphor
Pb	Blei
R	Referenzwert
REA	Rauchgasentschwefelungsanlage
SO <sub>2</sub>	Schwefeldioxid
swb AG	Stadtwerke Bremen Aktiengesellschaft
TOPP	Tropospheric ozone precursor potential (troposphärisches Ozon-Vorläufer-Äquivalent)
UN	United Nations (Vereinte Nationen)
USA	United States of America (Vereinigten Staaten von Amerika)
UVPG	Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz
V	Vergleichswert
Z	Zielwert

# 1 Einführung

Die Debatte um die Nutzung alternativer Treibstoffe für Fahrzeuge rückt immer mehr in den Fokus einer breiten Öffentlichkeit. Dabei wird deutlich, wie vielschichtig die Gründe für einen Wechsel hin zu umweltschonenderen Antriebsmitteln als Benzin oder Diesel sind. Der Klimawandel zwingt Entscheidungsträger auch aufgrund einer stark wachsenden Erdbevölkerung dazu, Lösungen für die immer problematischere Verschmutzung zu finden, deren Konsequenzen überall auf der Erde spürbar werden. Hierfür gilt vor allem der Mensch selbst als der Hauptverursacher. So stieg etwa der Ausstoß an Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) zwischen den Jahren 1970 und 2004 um ungefähr 80%. Der  $\text{CO}_2$ -Ausstoß des Verkehrssektors machte im Jahr 2004 weltweit etwa 25,9% aus. Mit der folgenden Problem- und Fragestellung sollen die Hauptproblematiken umrissen werden, die die Suche nach Alternativen zu fossilen Brennstoffen notwendig machen und warum dabei auf nachhaltige Optionen gesetzt werden sollte (Bernstein u. a., 2008, S. 5).

## 1.1 Problem- und Fragestellung

Die Gründe für einen Wechsel von Benzin und Diesel als Antriebsmittel hin zu verschiedenen Alternativen sind vielseitig. Als einer der Hauptgründe lässt sich jedoch die immens steigende Nachfrage nach dem Rohstoff Öl anführen. Denn zum einen benötigen einstige Schwellenländer, wie etwa China oder Indien—mit einer addierten Einwohnerzahl von etwa 2,5 Milliarden (Mrd.) (Fischer Weltalmanach, 2012a,b) Einwohnern—immer mehr vom knappen Gut Öl. Zum anderen ist absehbar, dass dieser stetig wachsende Bedarf in naher Zukunft nicht mehr von den heute geförderten Ölmengen gedeckt werden kann. In diesem Abschnitt soll nun näher auf diese Problematiken—verbunden mit steigenden Kosten und der aus dem steigenden Verbrauch von Erdöl resultierenden Verschmutzung—eingegangen werden, um die Notwendigkeit zur Suche nach Alternativen zum Rohstoff Öl aufzuzeigen.

Abhängig von der Definition des Begriffes Schwellenland umfasst diese Gruppierung teilweise mehr als 40 Länder. Die Weltbank legt den Maßstab des Pro-Kopf-

Einkommens an. Einige Merkmale jedoch lassen sich in allen Definitionen finden: einerseits überdurchschnittliche Wachstumsraten, andererseits etwa stark ausgeprägte soziale und regionale Disparitäten (Müller, 2010, S. 1). So zählen auch heute noch China und Indien zu den Schwellenländern. Die Hälfte der Nachfrage nach Energieträgern entfällt dabei laut der Internationalen Energieagentur (IEA) auf fossile Brennstoffe (IEA, 2010, S. 5).

So ist es nur logisch, dass die Preise für diese fossilen Energieträger an den internationalen Märkten in den letzten Jahren stark gestiegen sind. Das Schwellenland China hat bereits im Jahr 2009 die Vereinigten Staaten von Amerika (USA) als größter Energieverbraucher der Welt abgelöst. Bedenkt man, dass China im Jahr 2000 erst einen halb so großen Energieverbrauch wie die USA aufwies, wird klar, welch enormes Wachstum solche Schwellenländer mittlerweile erreicht haben. Der Energiebedarf wuchs zwischen 2000 und 2008 um das Vierfache und hat sein Maximum bei Weitem noch nicht erreicht. Bereits jetzt muss ein großer Teil dieser fossilen Brennstoffe importiert werden (IEA, 2010, S. 5).

Auch Indiens wirtschaftliches Wachstum trägt zur Verschärfung der Problematik bei. Und auch die Konsequenzen für die Weltgemeinschaft sind die gleichen: mit der Nachfrage nach fossilen Brennstoffen steigt auch der Preis für diese. Indien hat sich mittlerweile zum sechstgrößten Energieverbraucher weltweit entwickelt. Jährliche Steigerungsraten des Energiebedarfs von etwa 3,6% (Wojczewski u. Hanif, 2008, S. 2) werden erwartet. Auch im Transportwesen steigt der Bedarf an fossilen Brennstoffen dementsprechend (IEA, 2007, S. 7 f.). Schließlich lässt sich die Armut in solchen Schwellenländern nur dann bekämpfen, wenn als Basis dafür ein gut funktionierendes und ausgebautes Transportwesen errichtet wurde. Sowohl in China als auch in Indien wächst dabei vor allem die Anzahl der im Individualverkehr benutzten Fahrzeuge (Autos, Mopeds, etc.). Mehr als 90% der hierfür benötigten Energie im Verkehr wird in diesen Ländern aus Erdöl gewonnen. Daran wird deutlich, dass neben den steigenden Kosten für die entsprechenden Brennstoffe auch die Verschmutzung zu einem globalen Problem wird. Laut eines Berichts der IEA werden die Kohlendioxid-Emissionen allein aus dem Sektor Verkehr bis zum Jahr 2030 weltweit um etwa 170% steigen (KfW Entwicklungsbank, 2011).

Ein weiterer Punkt neben den steigenden Rohstoffpreisen beschäftigt bereits seit mehreren Jahren die Wissenschaft. Es stellt sich die Frage, wann das Ölfördermaximum<sup>1</sup> denn erreicht sei. Dabei wird der voraussichtliche Zeitpunkt immer wieder

---

<sup>1</sup>Das Ölfördermaximum bezeichnet den Zeitpunkt, ab dem die weltweite Nachfrage nach Erdöl nicht mehr von der weltweiten Förderung gedeckt werden kann (Wesselak u. Schabbach, 2009, S. 7).

an die neuen Gegebenheiten, wie etwa das Wirtschaftswachstum in den Schwellenländern und den Preis für Rohöl, angepasst. Allerdings ist die Vorhersage, wann ein Land sein Fördermaximum erreicht hat, erst im Nachhinein möglich. Zudem gibt es verschiedene Ansätze und Theorien zur Angabe eines Zeitraums, innerhalb dessen dieser Zeitpunkt erreicht sein könnte. Laut des Berichts “World Energy Outlook” der IEA aus dem Jahr 2010 wurde dieser Zeitpunkt für konventionelles Erdöl<sup>2</sup> bereits im Jahr 2006 erreicht. Für die Förderung inklusive unkonventionellem Erdöl<sup>3</sup> wird der Zeitraum zwischen 2020 und 2030 angegeben (IEA, 2010, S. 6 f.).

Dass Alternativen zu fossilen Brennstoffen als Antriebsmittel im modernen Transportwesen gefunden werden müssen, wurde in den vorigen Absätzen dargestellt. Eine dieser Alternativen stellt nun die Verwendung von Wasserstoff (H<sub>2</sub>) in diesem Sektor dar. Eine steigende Nutzung von Wasserstoff könnte dabei helfen, nicht nur die ökologischen, sondern auch die ökonomischen Probleme zu lösen. So ließen sich z.B. neben den CO<sub>2</sub>-Emissionen auch die Kosten reduzieren. Sicher gilt hierbei aber auch zu beachten, dass die heutige Technologie noch keine Serienreife erreicht hat und noch viele technischen Weiterentwicklungen nötig sein werden. Dass es aber möglich sein könnte, die Wasserstofftechnologie als ernsthafte Alternative zu Rohöl im Transportsektor in naher Zukunft zu installieren, soll nun kurz dargestellt werden (Meyer u. Winebrake, 2009, S. 78).

Die Tatsache, dass verschiedene Institute und Unternehmen bereits seit Jahren an der Entwicklung von serienreifen Wasserstofffahrzeugen arbeiten, ist einer der Gründe, warum Wasserstoff als zukunftsfähige Alternative in Betracht gezogen werden kann. So wurde bereits im Jahre 1997 von Daimler-Benz und Toyota die Produktion von Wasserstofffahrzeugen für das Jahr 2004 angekündigt. Die Anzahl der mit Wasserstoff betriebenen Autos betrug 2008 allerdings lediglich etwa 1.000 Stück (Wietzel u. a., 2009, S. 256). Ein weiterer wichtiger Schritt in der Entwicklung der Wasserstofffahrzeuge ist das Bekenntnis vom Vorstandsvorsitzenden der Daimler-AG, Dieter Zetsche, zu dieser Technologie auf der Internationale Automobil-Ausstellung (IAA) im Jahr 2011 (Kaiser u. Wintzenburg, 2011) :

“Wasserstoff ist heute das bessere Öl, deswegen ist es Zeit für einen Ölwechsel.”

Nicht ohne Grund unterstreicht Zetsche die Wichtigkeit von Wasserstofffahrzeugen im Transportwesen. Setzt sein Unternehmen doch wie kaum ein zweiter Automobilhersteller auf diese Technologie. Andererseits hat die IAA im Jahr 2011 aber

---

<sup>2</sup>Konventionelles Erdöl ist Erdöl, das leicht förderbar ist (IEA, 2010, S. 6).

<sup>3</sup>Unkonventionelles Erdöl ist Erdöl, dass nur mit hohem Aufwand (energetisch, ökonomisch, etc.) gefördert werden kann (IEA, 2010, S. 7).

auch gezeigt, dass die Markt- und Serienreife von Wasserstofffahrzeugen noch in weiter Ferne liegt. Die erste Phase eines flächendeckenden Infrastrukturaufbaus in Kooperation mit dem Unternehmen Linde soll erst im Jahr 2017 mit einer Anzahl von 1.000 Wasserstoffzapfsäulen abgeschlossen sein. Fragwürdig bleibt allerdings, ob sich mit dieser Herangehensweise das ‐Henne-Ei-Problem‐<sup>4</sup> lösen lässt (Kaiser u. Wintzenburg, 2011).

Auch wenn gerade Deutschland noch weit von einem flächendeckenden Netz an Tankstellen, die Wasserstoff anbieten, entfernt ist, so wurde doch bereits vor einigen Jahren der Grundstein für weitere Entwicklungen im Bereich der Wasserstofftechnologie gelegt. Bereits im Jahr 1997 wurde mit dem Bau der ersten öffentlichen Wasserstofftankstelle der Welt begonnen. Die in Kooperation mit der Arbeitsgemeinschaft am Flughafen München (ARGEMUC) errichtete Tankstelle wurde schließlich im Mai 1999 eröffnet. Nach und nach wurden in immer mehr Großstädten Deutschlands ebenfalls solche Wasserstofftankstellen gebaut (ARGEMUC, 2012). Jedoch gab es trotz vieler Bemühungen unterschiedlichster Projekte zur Mitte des Jahres 2011 deutschlandweit nur zwölf öffentlich zugängliche Tankstellen. Europaweit wurden zum gleichen Zeitpunkt in Tschechien, Niederlande, Island, Griechenland, Spanien, Frankreich, Belgien, Italien und Großbritannien insgesamt 67 Wasserstofftankstellen betrieben (Ludwig-Bölkow-Systemtechnik u. TÜV Süd, 2011).

Mit dem Umstieg von Benzin und Diesel auf einen umweltschonenderen Treibstoff kann ein großer Beitrag zur Reduzierung des globalen CO<sub>2</sub>-Ausstoßes gelingen. Unbestritten bleibt allerdings, dass diese Umstellung nicht sofort global umgesetzt werden kann. Der Grundstein hierfür muss vielmehr in denjenigen Ländern gesetzt werden, die das ambitionierte Ziel nicht nur durch die Entwicklung der nötigen Technologien in den entsprechenden Unternehmen möglich machen, sondern vor allem auch die benötigte Infrastruktur bereitstellen könnten.

Heute gibt es bereits viele ambitionierte Projekte, die genau dies als Ziel haben. So sieht das HyWays-Projekt etwa nicht nur den Aufbau der Infrastruktur für mit Wasserstoff betriebene Automobile vor, sondern beleuchtet ebenso die gesamtgesellschaftlichen Auswirkungen einer solchen Implementierung. Es zeigt nicht nur auf, welches Potenzial in Alternativen wie Wasserstoff steckt, sondern auch, welche Schritte notwendig sind, um eine solche Wasserstoffinfrastruktur in diversen europäischen Ländern aufzubauen (Ball u. a., 2009, S. 385 ff.).

---

<sup>4</sup>Mit dem Henne-Ei-Problem soll verdeutlicht werden, dass ohne eine bestehende Infrastruktur (z.B. Tankstellen) kein Konsument ein Wasserstoffauto kaufen würde und umgekehrt kein Tankstellenbetreiber eine Wasserstoffzapfsäule installieren würde, ohne die Sicherheit zu haben, dass bereits eine gewisse Anzahl an Wasserstofffahrzeugen verkauft wurde (Bertram, 2011, S. 295).

Dass dem Transportsektor in Europa in naher Zukunft eine große Veränderung bevorsteht, war bereits vor mehreren Jahren zu erkennen. So begann die Suche nach möglichen alternativen Antriebsmitteln zu Benzin und Diesel. Diverse Automobilhersteller beschäftigten sich wie bereits erwähnt mit der Wasserstofftechnologie und dem Versuch, mit dieser neuen Technologie Serienreife zu erlangen (Ball u. a., 2009, S. 385 ff.). Im Jahr 2006 wurde vom Unternehmen FORD die Hoffnung geweckt, bis 2010 diese Serienreife erreichen zu können (Kietzmann, 2006). Doch das in vorigen Abschnitten erläuterte Henne-Ei-Problem würde sich keinesfalls durch die Verfügbarkeit von Wasserstofffahrzeugen am Markt alleine lösen. Aus diesem Grund musste über die Art und Weise, wie ein Infrastrukturaufbau aussehen könnte, nachgedacht werden. Aus dieser Notwendigkeit heraus wurde ein Modell zur Simulation eines solchen Infrastrukturaufbaus in Europa entwickelt—es entstand das oben erwähnte HyWays-Projekt (Ball u. a., 2009, S. 385 ff.).

Mit Hilfe der für das HyWays-Projekt aufgestellten Roadmap sollten die Vorteile, die die Europäische Union mit sich bringt, genutzt werden. Das in Europa vorhandene Wissen, die Technologien und Kompetenzen verschiedenster Institutionen konnten dadurch vereinigt werden (Ball u. a., 2009, S. 435). Als Ergebnis stand am Ende die European Hydrogen Energy Roadmap, die darstellt, wie der Wasserstoff in naher Zukunft vom Produzent zum Konsument an der Tankstelle gelangen könnte. Berücksichtigt wurden dabei vor allem die Bedürfnisse der Kunden, sowie die der Produzenten. Auch die Kosten, die bei einem solchen Infrastrukturaufbau investiert werden müssten, liefert das HyWays-Modell (Ball u. a., 2009, S. 385). Die Roadmap entstand dabei zunächst für zehn europäische Länder (Norwegen, Finnland, England, Spanien, Frankreich, Italien, Deutschland, Polen, Griechenland und Niederlande). Die Länder wurden hauptsächlich deshalb ausgewählt, weil sie durch ihre Größe und Einwohnerzahl weite Teile Europas abdecken könnten (Ball u. a., 2009, S. 435).

Doch Wasserstoff muss erst produziert werden, da er als Abfallprodukt verschiedener Branchen nicht die gesamte Nachfrage decken kann. Hier gilt es zu bedenken, dass die hierfür notwendige Energie eine saubere Energie sein muss, da sonst z.B. die bei der Verbrennung eingesparten CO<sub>2</sub>-Emissionen bereits bei der Bereitstellung von Energie zur Wasserstoffproduktion wieder egalisiert bzw. sogar übertroffen würden (Ball u. a., 2009, S. 385 ff.).

Wie kann also Wasserstoff nachhaltig genug gefördert, transportiert, weiterverarbeitet, zur Verfügung gestellt und letztendlich verbraucht werden? Es stellt sich die Frage, was nachhaltig eigentlich bedeutet und wie verschiedene Herstellungsverfahren im Sinne der Nachhaltigkeit bewertet werden könnten.

## 1.2 Zielsetzung

Im vorangegangenen Abschnitt wurden diverse Gründe dafür genannt, warum Benzin und Diesel als Hauptantriebsmittel im Transportwesen ihre Bedeutung in naher Zukunft verlieren werden. Das bereits erwähnte HyWays-Projekt war einer der ersten Meilensteine in der Implementierung einer Wasserstoffinfrastruktur in Deutschland und anderen europäischen Ländern, um Lösungsansätze für die bevorstehende Problematik aufzuzeigen.

Ziel dieser Arbeit ist es, einen Schritt weiterzugehen. Die Grundlage bildet das HyWays-Projekt, welches für Deutschland verschiedene Herstellungsformen für Wasserstoff vorsieht. In den folgenden Kapiteln geht es darum, zu untersuchen, wie diese Wasserstofferzeugung noch umweltschonender vorgenommen werden kann. Für dieses Ziel ist es notwendig, den Begriff Nachhaltigkeit zunächst zu erfassen und dann vergleichbar zu machen, sodass verschiedene Prozesse der Wasserstofferzeugung gegenübergestellt werden können. Aus Gründen der Komplexität beschränkt sich diese Arbeit allerdings auf lediglich einen Schritt in der gesamten Prozesskette: die Bereitstellung von Energie, die während des Prozesses der Herstellung von Wasserstoff benötigt wird.

Im zweiten Kapitel wird hierfür der Begriff Nachhaltigkeit zunächst definiert. Um eine möglichst umfassende und detaillierte Bewertung vornehmen zu können, werden in diesem Kapitel eine Reihe von Kriterien und Indikatoren aufgelistet, mit deren Hilfe eine wertemäßige Erfassung der Nachhaltigkeit möglich wird. Das Ziel liegt also darin, eine gesamtheitlichere Nachhaltigkeitsbewertung vorzunehmen und nicht nur einzelne Indikatoren, wie etwa die CO<sub>2</sub>-Emissionen, zu betrachten.

Für die Bewertung wird das in Kapitel 3 vorgestellte Werkzeug verwendet. Hier findet sich eine detaillierte Beschreibung, wie dieses funktioniert, woher die Daten stammen und wie die Ergebnisse interpretiert werden. Ein Einführungsbeispiel soll dabei helfen, die Funktionsweise des Werkzeuges besser zu verstehen.

Die mit dem Werkzeug berechnete Nachhaltigkeitsbewertung gibt in Kapitel 4 darüber Aufschluss, wie nachhaltig diese verschiedenen Energieerzeugungsformen<sup>5</sup> tatsächlich sind. Es wird dabei der gesamte Energiepfad<sup>6</sup> berücksichtigt (Hey u. a.,

---

<sup>5</sup>Als Energieerzeugung wird in weiterer Folge immer die Erzeugung des während der Herstellung von Wasserstoff benötigten Stroms verstanden.

<sup>6</sup>Auch: Energiekette; "Die Multiplikation aller Einzelwirkungsgrade von Förderung, Umwandlung, Verteilung, Motor und Transport liefert den Gesamtwirkungsgrad, aus dem sich Verbrauch und Abgasemission für die Gesamtkette errechnen läßt." Eine Energiekette umfasst die Förderung der Primärenergie, die Umwandlung, Speicherung im Fahrzeug und die Umwandlung in Antriebsenergie (Wahrig-Burfeind, 2007, S. 380 f., Stichwort Energiekette).

2011, S. 15).

Der Fokus dieser Arbeit liegt aus verschiedenen Gründen auf Deutschland. Zum einen befinden sich in Deutschland viele innovative Unternehmen, die das Potenzial haben, den Markt der erneuerbaren Energien entscheidend zu verändern. Zum anderen ist durch die Zielvorgabe der Bundesregierung, bis zum Jahr 2020 mindestens 20% des jährlichen Strombedarfs in Deutschland aus erneuerbaren Energien zu gewinnen, die Basis dafür geschaffen, dass die in dieser Branche operierenden Unternehmen in Deutschland in naher Zukunft einen stark wachsenden Markt vorfinden. Deutschland gilt somit als Vorbild in Bezug auf nachhaltige Stromgewinnung aus erneuerbaren Energien (Rehfeldt u. a., 2007, S. 3).

# 2 Definitionen und Dimensionen der Nachhaltigkeit

In der Einführung wurde aufgezeigt, dass die Berücksichtigung von Nachhaltigkeit bei der Auswahl von Energiepfaden im Prozess der Herstellung von Wasserstoff eine entscheidende Rolle spielen sollte. In diesem Kapitel wird nun der Begriff Nachhaltigkeit näher definiert. Mit Hilfe des in Abschnitt 2.2 vorgestellten Drei-Säulen-Modells wird anschließend die Grundlage dafür gelegt, den Begriff Nachhaltigkeit wertemäßig erfassbar zu machen und somit eine Vergleichbarkeit herzustellen. Hierzu werden in den darauffolgenden Abschnitten Kriterien und Indikatoren herausgearbeitet, anhand derer eine Bewertung der Zielerreichung in Hinblick auf Nachhaltigkeit möglich wird. Um diese Kriterien und Indikatoren aufstellen zu können, muss der Begriff der Nachhaltigkeit im folgenden Abschnitt zunächst definiert werden.

## 2.1 Definition des Begriffs Nachhaltigkeit

Im 18. Jahrhundert wurde der Begriff der Nachhaltigkeit das erste Mal nachweislich verwendet (Miller, 2003, S. 30 f.). Im Zusammenhang mit der Forstwirtschaft war damit gemeint, dass nur diejenige Menge an Holz geerntet werden durfte, die zwischen zwei Durchforstungen wieder nachwuchs. Auf diese Art und Weise konnte sichergestellt werden, dass der Holzbestand auch für nachfolgende Generationen erhalten blieb. Zudem wird das Adverb nachhaltig mit den Synonymen verantwortungsbewusst und rücksichtsvoll beschrieben. Ein Energieträger kann dabei aber nicht selbst als nachhaltig bezeichnet werden. Vielmehr ist es die Wechselbeziehung zwischen Natur und Mensch, die auf eine nachhaltige Art und Weise gestaltet werden muss. Überträgt man dies auf den in der Einleitung beschriebenen Problemkomplex, sollte demnach die Energie im Herstellungsprozess von Wasserstoff auf eine Art und Weise gewonnen werden, dass alle kommenden Generationen auch weiterhin mit der gleichen Lebensqualität leben können, wie wir dies heute tun. Ebenso muss in dieser

Betrachtung auch die nachhaltige Entsorgung der bei der Nutzung dieser Energieformen entstehenden Abfälle berücksichtigt werden (Bossel, oJ, S. 1).

Ein ähnlicher Ansatz mit der Beschreibung der Nachhaltigkeit als verantwortungsbewusste Aufgabe findet sich in diversen Gesetzestexten verschiedener Länder—etwa im Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz (UVPG) der Bundesrepublik Deutschland. In dieser Arbeit werden verschiedene Gesetzestexte aufgegriffen, die den Begriff der Nachhaltigkeit umreißen. Der Fokus liegt hier zum einen auf Österreich. Dieses Land fand aus diversen Gründen<sup>1</sup> zwar keine Beachtung im HyWays-Projekt, trotzdem soll an dieser Stelle ein Blick auf den österreichischen Gesetzgeber geworfen werden. Zum anderen werden deutsche Gesetze zu dieser Thematik präsentiert, da Deutschland nicht nur ein Mitgliedsstaat des HyWays-Projektes ist, sondern sich als Vorreiter beim Einsatz erneuerbarer Energien—und somit auch in Bezug auf Nachhaltigkeit—versteht, etwa durch Marktanreizprogramme für den Einsatz von erneuerbaren Energien in Kleinanlagen (Rosenbaum u. Mautz, 2011, S. 411).

### 2.1.1 Der Begriff der Nachhaltigkeit im Sinne des österreichischen Gesetzgebers

Der österreichische Gesetzgeber erwähnt Nachhaltigkeit an diversen Stellen. Als Beispiel sei hier §1 Abs. 2 Ziffer 3 des österreichischen Forstgesetzes (ForstG) erwähnt, wo angeführt wird, wie die österreichische Waldbewirtschaftung zu erfolgen hat:

“Ziel dieses Bundesgesetzes ist ... die Sicherstellung einer nachhaltigen Waldbewirtschaftung.”

Die Voraussetzung für eine Waldbewirtschaftung ist somit die Berücksichtigung der Nachhaltigkeit. Was der Gesetzgeber unter dieser nachhaltigen Waldbewirtschaftung genauer versteht, ergibt sich aus §1 Abs. 3 des ForstG:

“Nachhaltige Waldbewirtschaftung im Sinne dieses Bundesgesetzes bedeutet die Pflege und Nutzung der Wälder auf eine Art und in einem Umfang, dass deren biologische Vielfalt, Produktivität, Regenerationsvermögen, Vitalität sowie Potenzial dauerhaft erhalten wird, um derzeit

---

<sup>1</sup>Es gibt in Österreich große Bemühungen, die Technologien beim Einsatz erneuerbarer Energien in der Energieversorgung und im Transportsektor voranzutreiben, sodass Österreich ein interessanter Kandidat für das HyWays-Projekt gewesen wäre. Ausschlaggebend für die Entscheidung, Österreich nicht als Mitgliedsstaat in das Projekt aufzunehmen, war lediglich die Tatsache, dass viele der relevanten, positiven Eigenschaften bereits von anderen Mitgliedsstaaten repräsentiert und erfüllt wurden (Bünger, 2005, S. 6).

und in Zukunft ökologische, ökonomische und gesellschaftliche Funktionen auf lokaler, nationaler und globaler Ebene, ohne andere Ökosysteme zu schädigen, zu erfüllen. Insbesondere ist bei Nutzung des Waldes unter Berücksichtigung des langfristigen forstlichen Erzeugungszeitraumes und allenfalls vorhandener Planungen vorzusorgen, dass Nutzungen entsprechend der forstlichen Zielsetzung den nachfolgenden Generationen vorbehalten bleiben.“

Herausheben lässt sich hier der Aspekt der Generationengerechtigkeit, dass nachfolgende Generationen die gleichen Bestände vorfinden sollen wie die heutige. Zudem werden die ökologischen, ökonomischen und gesellschaftlichen Funktionen erwähnt, die es zu erfüllen gilt. Diese drei Dimensionen finden sich auch im weiter unten dargestellten Drei-Säulen-Modell wieder. Der österreichische Gesetzgeber gibt hier bereits strenge, durchzuführende Vorgaben bei der Bewirtschaftung des Waldes auf dem Bundesgebiet vor. Beim Blick auf den deutschen Gesetzgeber soll nun im folgenden Abschnitt gezeigt werden, wie der Begriff der Nachhaltigkeit auch auf andere Bereiche ausgeweitet wird.

### 2.1.2 Deutsche Gesetze zur Bestimmung des Begriffes der Nachhaltigkeit

Im Gutachten des Sachverständigenrates für Umweltfragen mit dem Titel “Wege zur 100% erneuerbaren Stromversorgung” (Hey u. a., 2011) wird die Notwendigkeit zur Beachtung von Nachhaltigkeit mit dem Artikel 20a des Grundgesetzes für die Bundesrepublik Deutschland (GG) begründet:

“Der Staat schützt auch in Verantwortung für die künftigen Generationen die natürlichen Lebensgrundlagen und die Tiere im Rahmen der verfassungsmäßigen Ordnung durch die Gesetzgebung und nach Maßgabe von Gesetz und Recht durch die vollziehende Gewalt und die Rechtsprechung.“

Auch hier wird Bezug genommen auf die nachfolgenden Generationen, die es zu schützen gilt. Dieses Gesetz ist eine so genannte Staatszielbestimmung. Es besteht eine rechtlich bindende Wirkung für Amtsinhaber. Diese müssen bei sämtlichen Staatstätigkeiten die Vorgabe stets beachten und werden durch diesen Artikel zur Erfüllung diverser Aufgaben verpflichtet (Hey u. a., 2011, S. 16). Der Gegenstand, den es für nachfolgende Generationen zu schützen gilt, wird im §20a GG zwar nicht

näher konkretisiert, allerdings lässt sich an anderer Gesetzestextstelle eine genauere Umschreibung dieses schützenswerten Gegenstandes finden. So hat der Deutsche Bundestag verfügt, dass die natürliche Lebensgrundlage derjenigen der Umwelt zu entsprechen hat (Deutscher Bundestag, 1993, S. 65 ff.). Die Definition der Grundlagen des Lebens beschränkt sich dabei nicht nur auf die des Menschen. So zählt der Gesetzgeber etwa Luft, Böden und Wasser ebenso hinzu wie das Klima, da diese ebenfalls als Grundlage des Lebens benötigt bzw. behutsam gepflegt werden müssen, um die Lebensgrundlage erhalten zu können (Hey u. a., 2011, S. 18). Es lassen sich somit im §1 Abs. 1 des Bundesnaturschutzgesetzes (BNatSchG) drei weitere Konkretisierungen des Begriffs und des Schutzgegenstandes des Gesetzes erkennen:

“Natur und Landschaft sind auf Grund ihres eigenen Wertes und als Grundlage für Leben und Gesundheit des Menschen auch in Verantwortung für die künftigen Generationen im besiedelten und unbesiedelten Bereich nach Maßgabe der nachfolgenden Absätze so zu schützen, dass

1. die biologische Vielfalt,
2. die Leistungs- und Funktionsfähigkeit des Naturhaushalts einschließlich der Regenerationsfähigkeit und nachhaltigen Nutzungsfähigkeit der Naturgüter sowie
3. die Vielfalt, Eigenart und Schönheit sowie der Erholungswert von Natur und Landschaft

auf Dauer gesichert sind ...”

Auch das Gesetz über die UVPG §2 Abs. 1 S. 2 Nr. 1 und Nr. 2 beinhaltet Informationen darüber, was im Artikel 20a GG als Schutzgegenstand verstanden wird:

“Die Umweltverträglichkeitsprüfung umfasst die Ermittlung, Beschreibung und Bewertung der unmittelbaren und mittelbaren Auswirkungen eines Vorhabens auf

1. Menschen, einschließlich der menschlichen Gesundheit, Tiere, Pflanzen und die biologische Vielfalt,
2. Boden, Wasser, Luft, Klima und Landschaft ...”

Der schützenswerte Gegenstand besteht hier aus der Gesamtheit, der als Begriff Umwelt zu verstehen ist. Weitere Deutungen des Begriffs Nachhaltigkeit, die vom Gesetzgeber in Gesetzen und Verordnungen aufgestellt wurden, finden sich etwa in

der von der Enquete-Kommission<sup>2</sup> zum Schutz des Menschen und der Umwelt vom Deutschen Bundestag umrissenen Definition des Begriffs Nachhaltigkeit:

“Darin sind vielfältige ökonomische, ökologische, demographische, soziale und kulturelle Problemdimensionen enthalten, die ein globales, regionales, lokales und zugleich in die Zukunft gerichtetes Handeln erfordern.”  
(BMELV, 2008, S. 6)

Wie bereits weiter oben im österreichischen ForstG gesehen, lassen sich auch an dieser Stelle die folgenden drei Zieldimensionen ableiten, die nachhaltiges Handeln als

1. ökonomisch tragfähig,
2. ökologisch verantwortungsvoll und
3. sozial ausgeglichen verstehen (Wreesmann u. a., 2010, S. 2).

Diese drei Verhaltensweisen nachhaltigen Handelns bilden die übergeordneten Dimensionen zur Analyse und Bewertung der Nachhaltigkeit der verschiedenen Einsatzenergien (Herkommer u. Bartol, 2004, S. 2). Die vorgestellten Gesetze stellen somit die Umwelt, zukünftige Generationen bzw. die natürliche Lebensgrundlage unter die Schutzpflicht des jetzigen menschlichen Handelns. Die lebenden, handelnden und entscheidenden Akteure sind somit gesetzlich dazu angehalten, diese Verantwortung zu übernehmen (Hey u. a., 2011, S. 19).

### 2.1.3 Der Begriff der Nachhaltigkeit im Sinne des Brundtland-Berichts

Der im Jahr 1987 von der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung—Brundtland-Kommission<sup>3</sup>—unter dem Titel “Our Common Future” veröffentlichte Bericht, beinhaltete unter anderem das Konzept zur nachhaltigen Entwicklung (Hauff, 1987). Nachhaltigkeit wurde von der Brundtland-Kommission auf zwei verschiedene Arten definiert:

---

<sup>2</sup>Eine Enquete-Kommission wird dann vom Deutschen Bundestag eingesetzt, wenn mindestens ein Viertel der Mitglieder des Bundestages für den Antrag auf Einsetzung der Kommission stimmen. In solch einer Kommission werden bei Entscheidungen über umfangreiche Sachkomplexe Empfehlungen erarbeitet, die dann bei den politischen Entscheidungen berücksichtigt werden (Heyer u. Liening, 2004, S. 3 ff.).

<sup>3</sup>Die Vereinten Nationen (UN) riefen im Jahr 1983 mit der norwegischen Ministerpräsidentin Gro Harlem Brundtland als Vorsitzende, die Kommission ins Leben. In dieser Kommission wurden erstmals konkrete Strategien zur Umsetzung einer nachhaltigen Entwicklung erarbeitet (Grunwald u. Kopfmüller, 2006, S. 20).

1. "Dauerhafte Entwicklung ist Entwicklung, die die Bedürfnisse der Gegenwart befriedigt, ohne zu riskieren, daß [sic!] künftige Generationen ihre eigenen Bedürfnisse nicht befriedigen können." (Hauff, 1987, S. 46)
2. "Im wesentlichen ist dauerhafte Entwicklung ein Wandlungsprozeß [sic!], in dem die Nutzung von Ressourcen, das Ziel von Investitionen, die Richtung technologischer Entwicklung und institutioneller Wandel miteinander harmonieren und das derzeitige und künftige Potential vergrößern, menschliche Bedürfnisse und Wünsche zu erfüllen." (Hauff, 1987, S. 49)

Beide Aussagen beinhalten im Grunde dasselbe Ziel, wie es in §20a GG beschrieben wurde: Es soll im Sinne zukünftiger Generationen nicht mehr abgebaut, verbraucht, geerntet, etc. werden, als nachwächst. Anders formuliert geht es darum, dass die heutige Generation von den Erträgen leben soll, nicht von der Substanz.

### 2.1.4 Zusammenfassende Betrachtung des Begriffes der Nachhaltigkeit

Betrachtet man die zuvor genannten Versuche, zu erfassen, was Nachhaltigkeit eigentlich bedeutet, lassen sich folgende Schlagwörter auflisten, die sich in nahezu jeder Beschreibung des Begriffes wiederfinden. Nachhaltigkeit wird dabei als der

- rücksichtsvolle,
- verantwortungsbewusste,
- zukunftsorientierte,
- erhaltende Umgang mit Ressourcen verstanden, der
- die Chance ermöglicht, Ressourcen nachwachsen zu lassen,
- die Substanz schont,
- den Lebensstandard auch für zukünftige Generationen sichert und
- generationengerecht ist (Fleury, 2005, S. 9 ff.).

Hier zeigt sich auch deutlich die Abgrenzung zum Begriff erneuerbar, der ja im Grunde lediglich das Schlagwort nachwachsend beinhaltet. Nachhaltigkeit greift deutlich weiter als reine Erneuerbarkeit. Projiziert man nun diese Schlagwörter auf den Wasserstoffherstellungs-, -verarbeitungs und verbrauchsprozess, kann beleuchtet werden,

wie stark in den einzelnen Energiepfaden die Nachhaltigkeit umgesetzt bzw. erreicht wird. Der folgende Abschnitt gibt einen Überblick über die weitere Konkretisierung des Begriffes der Nachhaltigkeit, indem dort Kriterien und Indikatoren zur Bewertung von Nachhaltigkeit auf- und das Drei-Säulen-Modell vorgestellt werden.

## 2.2 Das Drei-Säulen-Modell – Die Dimensionen der Nachhaltigkeit

Die grundlegende Frage dieser Arbeit ist, wie die zur Herstellung von Wasserstoff als Antriebsmittel benötigte Energie erzeugt werden muss, um als nachhaltig eingestuft werden zu können. Das weiter oben erwähnte und in Tabelle 2.1 dargestellte Drei-Säulen-Modell (Herkommer u. Bartol, 2004, S. 2), welches Nachhaltigkeit anhand von ökologischen (Umwelt), ökonomischen (Wirtschaft) und sozio-kulturellen (Gesellschaft) Dimensionen versucht zu bewerten, ist insofern problematisch, als dass es dazu führt, dass Nachhaltigkeitsziele unabhängig voneinander für die jeweiligen Dimensionen vorgeschlagen werden (dos Santos Bernardes u. a., 2002, S. 18). Sie stehen aber absolut gleichwertig und gleichberechtigt nebeneinander (Herkommer u. Bartol, 2004, S. 2). Zudem besitzen die drei Dimensionen eine Wechselwirkung, sodass Nachhaltigkeitsziele für die ökologische Dimension abhängig von den anderen beiden Dimensionen getroffen werden müssen. Einerseits sollte eine Reihung in Bezug auf die Wichtigkeit dieser drei Dimensionen zueinander nicht vorgenommen werden. Andererseits wird solch eine Reihung durch die Gewichtung der drei Dimensionen trotzdem aufgestellt, um mit Hilfe des Ergebnisses Analysen—etwa wo Verbesserungspotenziale zu finden sind—erstellen zu können. Das vordergründige Ziel dieser Arbeit ist es daher nicht, nur die einzelnen Dimensionen mit einer speziellen Gewichtung zu versehen, sondern vielmehr den Fokus auf die Gesamtheit aller Kriterien und Indikatoren zu lenken (dos Santos Bernardes u. a., 2002, S. 18).

Tabelle 2.1: Die verschiedenen Dimensionen des Drei-Säulen-Modells

Dimension	Beschreibung
Ökologische Dimension	Funktionsfähigkeit der Ökosysteme aufrechterhalten
Ökonomische Dimension	Lebensqualität gewährleisten
Sozio-kulturelle Dimension	Chancengleichheit verbessern, Sicherung der Gesundheit

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Fleury, 2005, S. 9).

Diese drei Dimensionen bilden die Basis im Bewertungswerkzeug, für welche jeweils

wiederum Kriterien und Indikatoren hergeleitet werden, die die Dimensionen wertemäßig erfassbar machen.

Eine weitere Aufteilung in Dimensionen erfolgte im Zuge der Entwicklung einer Nachhaltigkeitsstrategie für Deutschland, welche vom so genannten Green Cabinet<sup>4</sup> erarbeitet wurde. Diese besteht aus vier verschiedenen Zielebenen mit diversen Indikatoren, die die Zielerreichung messen sollen (Hake u. Eich, 2002, S. 15). In der folgenden Tabelle 2.2 sind diese Dimensionen dargestellt.

Tabelle 2.2: Zielgrößen und -indikatoren des Green Cabinets

Generationen-gerechtigkeit	Lebensqualität	Sozialer Zusammenhalt	Internationale Verantwortung
Ressourcenschonung	Wirtschaftlicher Wohlstand	Beschäftigung	Entwicklungszusammenarbeit
Klimaschutz	Mobilität	Perspektiven für Familien	Märkte öffnen
Erneuerbare Energien	Ernährung	Gleichberechtigung	
Flächeninanspruchnahme	Luftqualität	Integration ausländischer Mitbürger	
Artenvielfalt	Gesundheit		
Staatsverschuldung	Kriminalität		
Wirtschaftliche Zukunftsvorsorge			
Innovation			
Bildung			

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Hake u. Eich, 2002, S. 15).

Im Gegensatz zum Drei-Säulen-Modell liegt in dieser Gliederung der Fokus stark auf den sozialen Aspekten (Hake u. Eich, 2002, S. 15). Verschiedene Indikatoren lassen sich jedoch einfach in das Drei-Säulen-Modell übertragen, sodass bereits erste, allgemein formulierte Kriterien zur Bewertung der Nachhaltigkeit festgehalten werden können:

- Ressourcenschonung,
- Klimaschutz,

<sup>4</sup>Zunächst wurde von der deutschen, rot-grünen Bundesregierung im Jahr 2000 ein Rat für Nachhaltige Entwicklung einberufen. Kurz darauf setzte die Regierung zusätzlich einen Staatssekretärsausschuss ein. Dieser erhielt in Bezug auf die in Großbritannien ernannten "Green Ministers" die Bezeichnung "Green Cabinet" (Eich u. Hake, 2003, S. 75).

- erneuerbare Energien,
- Flächeninanspruchnahme,
- Artenvielfalt,
- Luftqualität und
- Gesundheit.

Auch für die Bewertung der Nachhaltigkeit der Energieversorgung zur Herstellung von Wasserstoff lässt sich ein ähnliches Drei-Säulen-Modell herleiten. Überträgt man die ökologische Dimension auf diese Branche, so muss die Versorgung umweltfreundlich gestaltet sein, um den Zielen der Nachhaltigkeit entsprechen zu können. Die ökonomische Dimension lässt sich mit dem Begriff effizient umschreiben. Hier ist der Bezug zur Wirtschaft zu erkennen. Die sozio-kulturelle Dimension wird hier vor allem durch die zu gewährleistende Sicherheit der eingesetzten Technologien zu bewerten sein (Hake u. Eich, 2002, S. 20). Ziel des folgenden Abschnitts ist es, diese Dimensionen mit weiteren Beurteilungskriterien aufzufüllen, bevor die Indikatoren festgelegt werden.

### 2.3 Ökologische Kriterien

Nachdem nun die Basis der Bewertung—die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit—feststehen, werden in den folgenden Abschnitten die Kriterien mit ihren Indikatoren festgelegt, mit deren Hilfe die wertemäßige Erfassung zur Bewertung der Zielerreichung in Bezug auf Nachhaltigkeit möglich sein soll. Dabei spielt auch die zuvor aufgestellte Schlagwortliste zur Umschreibung des Begriffes der Nachhaltigkeit—rücksichtsvoll, verantwortungsbewusst, zukunftsorientiert, erhaltend, nachwachsend, die Substanz schonend, den Lebensstandard sichernd, ressourcenschonend, generationengerecht—eine große Rolle, da diese Schlagworte bereits erste Kriterien darstellen. In weiterer Folge werden die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit mit entsprechenden Kriterien versehen. Um die ökologische Dimension der Nachhaltigkeit erfassen und letztendlich bewerten zu können, bedarf es einer Vielzahl von Kriterien. Tabelle 2.3 soll zunächst einen Überblick über die ausgewählten Kriterien geben.

Die folgenden Abschnitte bieten eine detaillierte Beschreibung der aufgeführten Kriterien zur Bewertung der ökologischen Dimension der Nachhaltigkeit.

Tabelle 2.3: Ökologische Kriterien zur Beurteilung von Nachhaltigkeit

Nummer	Bezeichnung
1.1	Treibhauseffekt
1.2	Versauerung und Eutrophierung
1.3	Ozon und Staub
1.4	Reststoffe
1.5	Abwasser
1.6	Fläche
1.7	Kumulierter Energieverbrauch (KEV)
1.8	Kumulierter Energieaufwand (KEA)
1.9	Kumulierter Stoffaufwand (KSA)

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Klöpffer u. Grahl, 2009, S. 58), (Musiol u. a., 2011, S. 15), (Fritsche u. Schmidt, 2008, S. 5) und (Öko-Institut e.V., 2010).

### 2.3.1 Treibhauseffekt

Als Treibhauseffekt werden Vorgänge bezeichnet, die als Konsequenz die Erwärmung des globalen Klimas nach sich ziehen. Strittig ist dabei immer noch, in welchem Maß der Mensch durch die von ihm verursachte Verschmutzung einen Anteil an der Erwärmung der Atmosphäre trägt. Unstrittig ist aber, dass gewisse Luftschadstoffe vom Menschen emittiert werden, die zum Treibhauseffekt beitragen (Keppler, 2002, S. 905 ff.). Vor allem bei der Verbrennung fossiler Energieträger werden den Treibhauseffekt fördernde Emissionen freigesetzt. Der Effekt wirkt sich dabei nicht nur regional aus, sondern ist global spürbar. Der steigende Meeresspiegel führt zu Überschwemmungen vieler Landstriche in Küstennähe und zu erhöhten Kosten für Schutzmaßnahmen, die dies verhindern sollen. Zudem steigt bei zunehmender Anzahl an Hitzewellen das Sterblichkeitsrisiko und die Gefahr, dass sich ansteckende Krankheiten in Regionen ausbreiten, die vorher von diesen Krankheiten noch nicht betroffen waren. Des Weiteren wirkt sich die durch den Treibhauseffekt verursachte Klimaveränderung negativ auf die Nahrungsmittelproduktion aus, was bei einer stetig wachsenden Weltbevölkerung zu einem großen Problem werden kann (Krewitt, 2002, S. 997). Dies ist nur eine kleine Auswahl an negativen Auswirkungen des Treibhauseffektes, um zu zeigen, wie wichtig es ist, bei der Herstellung eines Produktes bzw. einer Dienstleistung genau diese Aspekte zu berücksichtigen. Daher werden in der Bewertung von Nachhaltigkeit die in Tabelle 2.4 aufgeführten, wichtigsten, da schädlichsten Gase, die aktiv zum Treibhauseffekt beitragen, berücksichtigt. Die Tabelle zeigt deren Erwärmungspotenzial—also deren Beitrag zum Treibhauseffekt—im Vergleich zu einer Einheit  $\text{CO}_2$ , sowie die Verweildauer in der Atmosphäre und den Wirkungsfaktor bei 20 bzw. 100 Jahren in Bezug auf eine Einheit  $\text{CO}_2$ . Das

Kriterium 1.1.1 CO<sub>2</sub>-Äquivalente wird in dieser Tabelle nicht angeführt, da diese lediglich einen Vergleichswert darstellen.

Tabelle 2.4: Überblick über die wichtigsten Treibhausgase und deren Wirkung auf den Treibhauseffekt

	1.1.2 Kohlenstoffdioxid CO <sub>2</sub>	1.1.3 Methan CH <sub>4</sub>	1.1.4 Lachgas N <sub>2</sub> O
Beitrag zum Treibhauseffekt [%]	77	14	8
Verweildauer in der Atmosphäre [Jahre]	5-200	9-15	120
Wirkungsfaktor bei 20 Jahren	1	56	280
Wirkungsfaktor bei 100 Jahren	1	21	310

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Erdmann u. Zweifel, 2008, S. 350).

Anhand dieser drei Indikatoren kann eine Bewertung der jeweiligen Energieversorgungssysteme in Hinblick auf deren Beitrag zum Treibhauseffekt vorgenommen werden. Ein weiterer wichtiger Indikator zur Bewertung der ökologischen Dimension ist das bereits erwähnte CO<sub>2</sub>-Äquivalent, da dieser Wert den Beitrag einer festgelegten Menge eines Treibhausgases zum Treibhauseffekt angibt (Kappas, 2009, S. 284).

### CO<sub>2</sub>-Äquivalent

Das CO<sub>2</sub>-Äquivalent gibt an, wie viel CO<sub>2</sub> im Betrachtungszeitraum von 100 Jahren die gleiche Treibhauswirkung erzielt wie das Vergleichsgas CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O (Musiol u. a., 2011, S. 97).

### Kohlenstoffdioxid

Das CO<sub>2</sub> gilt mit 77% Anteil als Hauptverursacher des Treibhauseffektes. In den letzten 150 Jahren hat mit der Industrialisierung die Konzentration an CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre stark zugenommen. CO<sub>2</sub> entsteht vor allem bei der durch den Menschen verursachten Verbrennung von kohlenstoffhaltigem Material oder etwa auf natürliche Art und Weise bei Vulkanausbrüchen oder Waldbränden. Ein Großteil der durch den Menschen produzierten CO<sub>2</sub>-Emissionen entsteht dabei im Bereich der Energieerzeugung. Aufgrund des hohen Anteils am Beitrag zum Treibhauseffekt und der Tatsache, dass ein Großteil des Gases während des Prozesses der Energieerzeugung emittiert wird, gilt es vor allem diesen Indikator in die Bewertung der Nachhaltigkeit mit einfließen zu lassen (Erdmann u. Zweifel, 2008, S. 350).

## Methan

Zu den Quellen der Methanentstehung zählen neben natürlichen auch anthropogene<sup>5</sup> Entstehungsformen. Die größte anthropogene Methanquelle ist der Steinkohlebergbau, da das dort entweichende Grubengas aus Kostengründen oft nur ab einer bestimmten Methankonzentration abgefackelt wird. Die zweitgrößte Quelle für die Freisetzung von Methan war lange Zeit die Erdgasnutzung. Aufgrund der Tatsache, dass ein Pipeline-Netzwerk mit mehreren Millionen Kilometern Länge niemals gänzlich abgedichtet sein kann, entwich hier früher bis zu 5% des transportierten Erdgases und somit ein beachtlicher Anteil Methan. Zwar wurden diese Leckagen verringert, jedoch bleibt auch heute noch ein großer Anteil an Emissionen vorhanden. Ein weiterer großer Teil der globalen Methanfreisetzung lässt sich auch auf die stark veränderten Essgewohnheiten der Menschen zurückführen, die immer häufiger Fleisch verzehren. So macht etwa die Methanproduktion durch Wiederkäuer stattliche 15% am gesamten Emissionsvolumen aus (Keppler, 2002, S. 940 f.). Methan trägt—wie in Tabelle 2.4 dargestellt—zu 14% zum Treibhauseffekt bei und ist damit ein wichtiger Indikator zur Bewertung von Nachhaltigkeit (Erdmann u. Zweifel, 2008, S. 350).

## Lachgas

Distickstoffoxid, auch Lachgas genannt, wird hauptsächlich bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe freigesetzt. Aber auch bei der Düngung landwirtschaftlich genutzter Felder entstehen diese Oxide. Zwar besitzt Lachgas einen kleineren Anteil am Treibhauseffekt als Methan oder Kohlenstoffdioxid, dennoch muss eine Bewertung von Nachhaltigkeit auch diese Emission berücksichtigen (Bockhorst, 2002, S. 445).

### 2.3.2 Versauerung und Eutrophierung

Neben Gasen, die den Treibhauseffekt negativ beeinflussen, gibt es auch solche Emissionen, die Säurebildung zur Folge haben und zur Versauerung beitragen. Luftverunreinigungen werden dabei in terrestrische oder aquatische Ökosysteme eingetragen und stellen eine große Belastung für diese dar. So werden etwa in Verbrennungsanlagen Säurebildner emittiert, die in höheren Schichten der Atmosphäre in Wassertropfchen gelöst werden und schließlich als saurer Regen auf die Erde abregnen. Dort werden die Oxide dann von Pflanzen, Menschen und Tieren aufgenommen. Über die

---

<sup>5</sup>“Vom Menschen geschaffen, von ihm beeinflusst.” (Wahrig-Burfeind, 2007, S. 70; Stichwort anthropogen).

Verarbeitung belasteter Pflanzen und Tiere gelangen sie so in den Nahrungskreislauf des Menschen (Keppler, 2002, S. 901).

Ein weiteres Problem besteht darin, dass die Versauerung des Bodens ein irreversibler Vorgang ist, der selbst mit Säureneutralisationszufuhr—etwa durch Kalke und Dünger—nicht rückgängig gemacht werden kann und die Eigenschaften des Ausgangsgesteins dauerhaft verändert. Dabei wird die Versauerung neben nutzungsbedingter Stoffzufuhr und verwitterungsbedingter chemischer Reaktionen, auch durch Einträge direkt aus der Atmosphäre hervorgerufen. Unterschieden wird hierbei zwischen der nassen und der trockenen Deposition. Während bei der nassen Deposition die Schadstoffe mit fallendem Niederschlag in das Ökosystem eingetragen werden, geschieht dies bei der trockenen Deposition durch gasförmige und partikuläre Bindungsformen. Verringerung von Populationsdichten, Artenverarmung und Veränderung der Vorkommen einzelner Arten sind die Folgen einer solchen Versauerung. Zudem deutet der Blatt- und Nadelverlust in Wäldern darauf hin, dass auch hier enorme Schäden an Baumbeständen entstehen. In Tabelle 2.5 sind die wichtigsten Schadstoffe, die zur Versauerung beitragen, aufgelistet. Aufgrund der Komplexität und der vorhandenen Daten, beschränkt sich die Analyse auf die aufgeführten Stoffe (Schimming, 2011, S. 270 ff.).

Beim Nährstoffeintrag (Eutrophierung) hingegen werden Biotope zusätzlich mit Stickstoff über den für diese Biotope tolerierbaren Wert hinaus versorgt. Als Konsequenz daraus kann es zu Artenverschiebung hin zu nitrophilen<sup>6</sup> Pflanzen kommen (Ihle u. a., 2001, S. 15).

Es ist daher wichtig, in der Bewertung von Nachhaltigkeit neben dem Aspekt der Treibhausgase auch den des Versauerungs- und Eutrophierungspotenzials mitzuberechnen. Tabelle 2.5 listet die wichtigsten Säurebildner auf und zeigt deren relatives Versauerungspotenzial in Bezug auf  $\text{SO}_2$ . Ein "X" kennzeichnet, ob die Schadstoffe zur Versauerung, Eutrophierung oder zu beidem beitragen.

Betrachtet man die Versauerungspotenziale von  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  und  $\text{NH}_3$ , zeigt sich, dass eine Tonne  $\text{NH}_3$  ein um 88% höheres Versauerungspotenzial als  $\text{SO}_2$  und  $\text{SO}_2$  wiederum ein um 43% höheres Versauerungspotenzial als  $\text{NO}_x$  besitzt (Deutscher Bundestag, 1998, S. 54). Die Indikatoren und deren Wirkungsweisen werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

---

<sup>6</sup>"Auf nitratreichem Boden gedeihend, Nitrate speichernd" (Wahrig-Burfeind, 2007, S. 674; Stichwort nitrophil).

Tabelle 2.5: Indikatoren zur Messung der Versauerung und Eutrophierung

Nummer	Bezeichnung	Abkürzung	Versauerung Versauerungspotenzial	Eutrophierung
1.2.1	SO <sub>2</sub> -Äquivalent	-	-	-
1.2.2	Schwefeldioxid	SO <sub>2</sub>	X 1	
1.2.3	Ammoniak	NH <sub>3</sub>	X 3,762	X
1.2.4	Stickoxid	NO <sub>x</sub>	X 0,696	X
1.2.5	Chlorwasserstoff	HCl	X 0,878	
1.2.6	Fluorwasserstoff	HF	X 1,601	
1.2.7	Schwefelwasserstoff	H <sub>2</sub> S	X 0,983	

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Klöpffer u. Grahl, 2009, S. 173) und (Öko-Institut e.V., 2010).

### SO<sub>2</sub>-Äquivalent

Ähnlich wie das CO<sub>2</sub>-Äquivalent gibt das SO<sub>2</sub>-Äquivalent das auf SO<sub>2</sub> bezogene Versauerungspotenzial einzelner Stoffe an. Mit Hilfe dieses Indikators lässt sich die Umweltwirkung in dieser Kategorie leicht vergleichen (Öko-Institut e.V., 2010).

### Schwefeldioxid

Schwefeldioxid wirkt toxisch auf Pflanzen, indem es Prozesse biochemischer und physiologischer Wirkungen auslöst, die die Schädigung von Pflanzen zur Folge hat. SO<sub>2</sub> hat dabei eine stark negative Umweltwirkung in diesem Schädigungsprozess, wobei vor allem das bei der Stromerzeugung generierte Schwefeldioxid eine entscheidende Rolle spielt, dem diese negative Auswirkung auf Feldpflanzen in diversen Experimenten nachgewiesen werden konnte (Krewitt, 2002, S. 994 f.).

### Ammoniak

Ammoniak entsteht hauptsächlich aus organischen Stickstoffverbindungen, wie sie etwa in der Landwirtschaft und in tierischen Exkrementen. Kommt Ammoniak mit anderen Luftschadstoffen in Kontakt—etwa Schwefelsäure oder Salpetersäure—, so entsteht Ammonium. Wird dieses Ammonium in den Boden eingetragen, entsteht in

einem Nitrifizierungsprozess Nitrat, welches so zur Versauerung von Böden beiträgt (Matthes u. a., 1998, S. 4).

### **Stickoxid**

Bei Verbrennungsprozessen z.B. in Kraftfahrzeugen entstehen Stickoxide einerseits weil der in Brennstoffen enthaltene Stickstoff mit dem atmosphärischen Sauerstoff reagiert und andererseits oxidiert der in der Luft enthaltene Stickstoff bei hohen Prozesstemperaturen zu Stickoxid (Matthes u. a., 1998, S. 4). Stickoxide wirken zudem versauernd auf Böden (Fritsche u. Schmidt, 2008, S. 54). Ein weiteres Problem ist, dass Stickoxide in der Atmosphäre durch die intensive Sonneneinstrahlung Ozon ( $O_3$ ) bilden. Dieses bodennahe Ozon verursacht den Sommersmog, der in Abschnitt 2.3.3 erläutert wird (Quaschnig, 2008, S. 50). Der Sommersmog wiederum, wirkt sich negativ auf die Gesundheit des Menschen, der Tiere und der Pflanzenwelt aus (Sandermann, 2001, S. 13).

### **Chlorwasserstoff**

Chlorwasserstoff, auch Salzsäure genannt, wirkt—ebenso wie die oben genannten Stoffe—durch trockene und nasse Deposition versauernd (Klöpffer u. Grahl, 2009, S. 274). Die Emission erfolgt hauptsächlich durch Kohlekraftwerke, Müllverbrennungsanlagen und als Nebenprodukt bei diversen Produktionsprozessen. Aufgrund seiner ätzenden Eigenschaft kann Chlorwasserstoff die Atmungsorgane von Mensch und Tier schädigen. Bei Pflanzen können Braunfärbungen an den Blatträndern durch die Einwirkung des Schadstoffes auftreten (Bahadir u. a., 2000, S. 269).

### **Fluorwasserstoff**

Auch der Luftschadstoff Fluorwasserstoff wirkt versauernd (Fritsche u. Schmidt, 2008, S. 47). Neben dieser versauernden Wirkung ist er zudem gesundheitsgefährdend, da er beim Menschen die Schleimhäute reizt und stark giftig auf die Lunge wirkt. Emissionsschwerpunkte sind vor allem Verarbeitungsprozesse in der chemischen Industrie und Metallindustrie und die Benutzung fluorhaltiger Kohle (Bahadir u. a., 2000, S. 448 f.).

## Schwefelwasserstoff

Schwefelwasserstoff hat eine toxische Wirkung sowohl auf den Menschen als auch auf Tiere (Schneider u. a., 2002, S. 25). Zudem trägt der Schadstoff zur Versauerung der Böden bei, sodass er in der Indikatorliste berücksichtigt wird. Er gelangt etwa als Nebenprodukt bei der Verbrennung von Öl und Kohle in die Luft (Keppler, 2002, S. 946). Das Gas führt aufgrund seines nach faulen Eiern riechenden Geruchs zu Geruchsbelästigungen und kann beim Einatmen zu Schleimhautreizungen führen. In schweren Fällen können sogar Nervenschädigungen auftreten. Vor allem durch Kokereien und Raffinerien wird das Gas durch den Menschen emittiert (Bahadir u. a., 2000, S. 1051).

### 2.3.3 Ozon und Staub

Dieser Abschnitt beschreibt Schadstoffe, die für die Bildung bodennahen Ozons—der wiederum zur Smogbildung führt—hauptsächlich verantwortlich sind. Zum einen wird das Ozonbildungspotenzial, zum anderen die einzelnen Stoffe erfasst. (Fritsche u. Schmidt, 2008, S. 55). Als Smog werden erhöhte Konzentrationen von Abgasen verschiedener Verursacher bezeichnet. So tragen etwa die Industrie, Haushalte, Gewerbe und Verkehr stark zur Förderung dieser Konzentrationen bei (Bockhorst, 2002, S. 421). Gerade dann, wenn die in Bodennähe gebildeten Schadstoffe nicht mehr in die höheren Luftschichten entweichen können, entsteht Smog. Man unterscheidet dabei zwischen dem Smog vom “London-Typ” und dem “Los-Angeles-Typ”—auch bekannt unter dem Namen Sommersmog. Der Smog vom London-Typ entsteht vor allem im Winter, wenn hohe Konzentrationen von Staub und Schwefeldioxid vorliegen. Der Smog vom Los-Angeles-Typ entsteht im Sommer bei hohen Konzentrationen von Photooxidantien<sup>7</sup> (Keppler, 2002, S. 902 f.). Tabelle 2.6 führt die Indikatoren an, die eine wertmäßige Bewertung ermöglichen und die in weiterer Folge detaillierter beschrieben werden.

### TOPP-Äquivalent

Mit Hilfe des TOPP-Äquivalentes kann angegeben werden, welches Ozonbildungspotenzial ein Stoff besitzt und somit zur Bildung von Sommersmog beiträgt. Mit Hilfe

---

<sup>7</sup>“Bezeichnung für .. atmosphärische Spurengase mit oxidierenden Eigenschaften.” Diese sind hauptverantwortlich für die Bildung des Smogs vom Los-Angeles-Typ (Bahadir u. a., 2000, S. 902).

Tabelle 2.6: Indikatoren zur Messung der Belastung durch Ozon und Staub

Nummer	Bezeichnung	Abkürzung
1.3.1	Ozonbildungspotenzial	TOPP-Äquivalent
1.3.2	Staub	-
1.3.3	Kohlenmonoxid	CO
1.3.4	Flüchtige Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe	NMVOC

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Fritsche u. Schmidt, 2008, S. 55 ff.).

dieses Wertes kann die negative Auswirkung auf die Ozonbildung besser verglichen werden (Fritsche u. Schmidt, 2008, S. 55).

### **Staub**

Mit dem Begriff Staub—genauer: Feinstaub—wird hier eine feste bzw. flüssige Form von Schwebstoff bezeichnet, der in giftigen Gasen enthalten ist. Gelangen etwa krebserregende Chemikalien oder giftige Schwermetalle, die z.B. bei Verbrennungsprozessen entstehen, in Form von Feinstaub in die Atemwege von Mensch und Tier, so liegt hier eine hohe Gesundheitsgefährdung vor. Daher ist es von enormer Wichtigkeit, den emittierten Staub als Indikator zur Bewertung der Nachhaltigkeit zu berücksichtigen (Fonk, 2009, S. 44 f.).

### **Kohlenmonoxid**

Kohlenmonoxid entsteht bei unvollständiger Verbrennung und trägt zur Smogbildung erheblich bei (Fritsche u. Schmidt, 2008, S. 55). Der Mensch nimmt Kohlenmonoxid durch die Lunge auf, wo es sich im Blut fest an Hämoglobin bindet, sodass dieses keinen Sauerstoff mehr transportieren kann. Es wirkt wie ein Gift auf den Menschen, da es zu schweren Schäden durch Sauerstoffunterversorgung kommen kann. Im schlimmsten Fall endet dies gar tödlich (Bockhorst, 2002, S. 351).

### **Flüchtige Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe**

NMVOC gehört zu den flüchtigen organischen Verbindungen, wobei Methan hier ausgeschlossen ist. Die anthropogene Emission von NMVOC geschieht etwa bei industriellen Fertigungsprozessen, bei Freisetzung des Abgases bei unvollständiger Verbrennung oder etwa bei der Herstellung von lösemittelhaltigen Produkten (Friedrich u. Obermeier, 2000, S. 129 f.). Trifft genügend Sonnenlicht auf NMVOC, so entsteht daraus Ozon und in weiterer Folge der Sommersmog. Aus diesem Grund wird der

Ausstoß an NMVOC während der Herstellung eines Produktes oder einer Dienstleistung in das Bewertungsverfahren mit aufgenommen (Weinreich, 2004, S. 202).

### 2.3.4 Reststoffe

In der Beurteilung, wie nachhaltig eine Dienstleistung oder ein Produkt hergestellt werden kann, darf der Fokus nicht nur auf den in der Literatur oft erwähnten Schadstoffen liegen, wie sie weiter oben aufgeführt wurden. Vielmehr muss ebenso betrachtet werden, welche Rückstände bei der Produktion entstehen. Das Programm Globales Emissions-Modell integrierter Systeme (GEMIS)—welches in Abschnitt 3.1.1 detailliert erläutert wird—des Instituts für angewandte Ökologie (Öko-Institut e.V.) in Darmstadt, listet hierfür die in Tabelle 2.7 aufgeführten Stoffe auf (Fritsche u. Schmidt, 2008, S. 37).

Tabelle 2.7: Indikatoren zur Messung der anfallenden Reststoffe

Nummer	Bezeichnung
1.4.1	Asche
1.4.2	Produktionsabfall
1.4.3	Abraum
1.4.4	Rauchgasentschwefelungsanlage (REA)-Reststoffe
1.4.5	Klärschlamm
1.4.6	Radioaktiv hochaktiver Müll

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Fritsche u. Schmidt, 2008, S. 37 ff.).

#### Asche

Auch Asche entsteht bei Verbrennungsprozessen. Es gilt zu berücksichtigen, dass diese Asche durch Entsorger behandelt werden kann. Zwar besteht somit die Option der Entsorgung, jedoch ist fraglich zu welchem Anteil dies bei den einzelnen Prozessen der Fall ist. Aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit, wird im Bewertungsverfahren die von GEMIS angegebene Menge an Ascherückständen verwendet (Fritsche u. Schmidt, 2008, S. 37).

#### Produktionsabfall

Neben Asche entsteht ein nicht zu vernachlässigender Anteil an Produktionsabfall bei der Herstellung eines Produktes bzw. einer Dienstleistung. Mit Hilfe dieses Indikators wird der Tatsache Rechnung getragen, dass möglichst wenige Abfälle bei der

Produktion entstehen sollten. In Hinblick z.B. auf den Aspekt der Generationengerechtigkeit fließt dieser Indikator mit in die Bewertung der Nachhaltigkeit ein, da ein großer Anteil des Produktionsabfalls nur schwierig und aufwändig zu entsorgen ist (Fritsche u. Schmidt, 2008, S. 19).

### **Abraum**

Im Bergbau und beim Abbau von Erden und Steinen fällt nicht weiter nutzbares Material an. Es wird daher als Abfall bezeichnet. Zudem können in diesem Abraum Schadstoffe enthalten sein. Ein weiteres Problem ergibt sich daraus, dass für dieses Material Halden- bzw. Deponieflächen eingerichtet werden müssen (Lünser, 1999, S. 88 f.).

### **REA-Reststoff**

Bei der Rauchgasentschwefelungsanlage handelt es sich um eine spezielle Emissionsminderungstechnik einer Chemieanlage, die einem Kraftwerk nachgeschaltet ist (Heimann, 2008, S. 285). Der REA-Reststoff ist dabei ein Reaktionsprodukt, dass in einer solchen Anlage entsteht (Fritsche u. Schmidt, 2008, S. 57).

### **Klärschlamm**

Bei der regelgerechten, ordnungsgemäßen Behandlung des Abwassers werden darin enthaltene Schadstoffe möglichst vollständig entnommen. Zu diesem Zweck werden Schad- und Nährstoffe, die bei der Abwasserreinigung anfallen, in Klärschlämmen aufkonzentriert. Wie andere Abfälle, müssen auch diese Klärschlämme entsorgt werden. Dabei ist es nicht Ziel dieser Arbeit, Problemlösungen zur umweltverträglichen Entsorgung oder hochwertigen Verwertung vorzustellen, sondern den beim Prozess der Herstellung eines Gutes bzw. Dienstleistung anfallenden Klärschlamm als Indikator für die Messbarkeit der Nachhaltigkeit zu berücksichtigen (Friedrich, 2002, S. 271).

### **Radioaktiv hochaktiver Müll**

GEMIS bietet die Möglichkeit, die Menge des innerhalb einer Prozesskette anfallenden radioaktiv hochaktiven Müll ausgeben zu lassen. Die Miteinbeziehung dieses Indikators ist aus vielerlei Gründen von großer Bedeutung. Einer dieser Gründe ist

der der Generationengerechtigkeit. Es ist höchst bedenklich, den anfallenden radioaktiven Müll in Lagerstätten in Gesteinsschichten unterhalb der Erde zu vergraben. Zwar lassen diese Schichten kein Wasser durch und es gelangt somit nicht mehr Radioaktivität von diesem Endlager in die Biosphäre als dies etwa in natürlichen Lagerstätten der Fall ist. Jedoch entsteht hier eine unterirdische Endlagerungsstätte, die noch viele Generationen überdauern würde. Daher muss es das Ziel sein, den anfallenden radioaktiven Müll in einer Prozesskette so gering wie möglich zu halten (Heinloth, 2002, S. 1135).

### 2.3.5 Abwasser

Sollen Prozessketten auf ihre Nachhaltigkeit hin überprüft werden, ist auch die Analyse der in das Abwasser eingeleiteten Schadstoffe wichtig. Das Schmutzwasser, welches mit vielen verschiedenen Inhaltsstoffen in unterschiedlichen Konzentrationen von der Industriebranche in eine Mischkanalisation eingeleitet wird, nennt man industrielles Abwasser. Wie groß die Belastung des Abwassers durch die eingeleiteten Stoffe zur Herstellung eines Produktes oder Dienstleistung ist, soll mit Hilfe der in Tabelle 2.8 aufgelisteten Indikatoren, ermittelt werden. In industriellem Schmutzwasser finden sich noch eine Vielzahl anderer Schadstoffe, die es aus dem Abwasser zu klären gilt. Aufgrund der Komplexität bleiben diese jedoch in dieser Arbeit unberücksichtigt (Koppe u. Stozek, 1999, S. 3).

Tabelle 2.8: Indikatoren zur Messung der Belastung durch Abwasser

Nummer	Bezeichnung	Abkürzung
1.5.1	Phosphor	P
1.5.2	Stickstoff	N
1.5.3	Adsorbierbare, organisch gebundene Halogene	AOX
1.5.4	Chemischer Sauerstoffbedarf	CSB
1.5.5	Anorganische Salze	-
1.5.6	Arsen	As
1.5.7	Cadmium	Cd
1.5.8	Chrom	Cr
1.5.9	Quecksilber	Hg
1.5.10	Blei	Pb
1.5.11	Biologischer Sauerstoffbedarf	BSB

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Fritsche u. Schmidt, 2008, S. 37 ff.).

Eine ausführliche Beschreibung dieser Indikatoren findet sich in den folgenden Abschnitten.

## Phosphor

Phosphatprodukte werden unter anderem bei der Herstellung von Düngemitteln, zur Tierfuttermittelproduktion oder in der Reinigungs- und Waschmittelherstellung verwendet. Diese drei Bereiche machen etwa 97% aus. Gewerblich-industrielle Anwendungsbereiche kommen dabei auf 3% (Baumann, 2003, S. 8). Aufgrund seiner hohen Reaktionsfähigkeit tritt Phosphor in der Natur nie elementar auf, sondern als Bestandteil anorganischer und organischer Verbindungen. Düngstoffe mit phosphorhaltigen Anteilen, wie sie in der Landwirtschaft—etwa zum Anbau von Biomasse—benutzt werden, sind ein Beispiel dafür, wie die Verunreinigungen in das Abwasser gelangen können. In den Kläranlagen liegt die Eliminationsrate löslicher Phosphate im biologischen Teil zwischen lediglich 15 und 30% (Koppe u. Stozek, 1999, S. 267 ff.). Eine derart niedrige Eliminationsrate kann die Gefahr der Überdüngung langsam fließender und stehender Gewässer nicht entscheidend beseitigen (Herrmann, 1993, S. 223). Hieraus ergibt sich eine Notwendigkeit zur Überprüfung des während des Ablaufes einer Prozesskette eingeleiteten, mit Phosphorverbindungen verschmutzten Abwassers.

## Stickstoff

Stickstoff wird bei industriellen oder landwirtschaftlichen Prozessen als Nitrat, Nitrit oder organische Verbindung in das Schmutzwasser eingeleitet. Nach dem Klärprozess und der Überführung in die Gasphase entweicht der Stickstoff dann in die Atmosphäre. Dort wirkt wiederum die in Abschnitt 2.3.2 erwähnte Eutrophierung, da der Stickstoff in Böden und Gewässer eingetragen wird und zu einem Nährstoffungleichgewicht und somit zu einer Gefährdung der Artenvielfalt führen kann (Kunz, 1992, S. 183).

## Adsorbierbare, organisch gebundene Halogene

Die in organischen Verbindungen enthaltenen Halogene (Brom, Jod, Chlor), die an Aktivkohle adsorbierbar<sup>8</sup> sind, werden als adsorbierbare, organisch gebundene Halogene bezeichnet (Koppe u. Stozek, 1999, S. 51). AOX werden laut Abwasserabgabengesetz als stark belastend für die Gewässer bewertet. Der Grund ist die toxische Wirkung z.B. auf Pflanzen, Tiere oder Mikroorganismen (Koppe u. Stozek, 1999, S. 228 f.). Mit Hilfe dieses Indikators kann die Belastung des Abwassers mit

---

<sup>8</sup>“Auf der Oberfläche fester Stoffe verdichten, anlagern.” (Wahrig-Burfeind, 2007, S. 32; Stichwort adsorbieren).

halogenorganischen Verbindungen gemessen werden (Fritsche u. Schmidt, 2008, S. 37).

### **Chemischer Sauerstoffbedarf**

Mit Hilfe des CSB ist es möglich, die Belastung des Abwassers mit chemisch abbaubaren Substanzen zu messen und als Indikator in die Bewertung der Nachhaltigkeit mit einfließen zu lassen (Fritsche u. Schmidt, 2008, S. 41). Zur Messung gibt es zwei verschiedene Methoden. Eine davon sei hier vorgestellt: Die Bestimmung des chemischen Sauerstoffbedarfs mit Kaliumdichromat. Die Bestimmung des chemischen Sauerstoffbedarfs des Abwassers erfolgt mit Hilfe des Kaliumdichromats, da die "volumenbezogene Masse an Sauerstoff, .. der Masse an Kaliumdichromat äquivalent ist, die ... mit den im Wasser enthaltenen oxidierbaren Stoffen reagiert." (Imhoff u. Imhoff, 2007, S. 123).

### **Anorganische Salze**

Im Übermaß in das Abwasser eingeführte anorganische Salze—wie etwa Nitrate, Phosphate oder Ammoniumsalze—können zur Folge haben, dass die Lebensvorgänge in Gewässern aus dem Gleichgewicht geraten. Hierdurch kann das Algenwachstum stark gefördert werden. Diese sterben ab, sinken auf den Seeboden und beeinflussen schließlich den Sauerstoffhaushalt des Sees negativ. Zwar werden diese Stoffe durch chemische Behandlung in den Kläranlagen aus dem Abwasser entfernt, jedoch muss das Ziel sein, die Salzfracht des Abwassers durch Chemikalien möglichst gering zu halten (Schmidkonz, 2002, S. 39).

### **Arsen**

Arsenverbindungen finden ihren Einsatz als Schädlingsbekämpfungs- und Desinfektionsmittel. Seine Giftigkeit ist durch die Verwendung als Tatwaffe in diversen Krimis bekannt. So ist bereits eine Dosis von 100 bis 300 mg für den Menschen tödlich. Problematisch ist, dass auch nach der Klärung des Abwassers im Klärschlamm Reststoffe von bis zu 9 mg pro kg gefunden wurden. Aufgrund seiner Giftigkeit wird Arsen in der Indikatorenliste berücksichtigt (Koppe u. Stozek, 1999, S. 316 f.).

## **Cadmium**

Cadmium ist ein ausschließlich toxisches Element, das weder von Pflanzen noch von Tieren zum Leben benötigt wird. Die Eliminationsrate durch eine Klärung liegt bei etwa 50%, sodass Rückstände des gefährlichen Stoffes bleiben. Es finden sich etwa 10 mg Cadmium pro kg Klärschlamm, sodass ein Augenmerk auf die Reduktion an Cadmium-Ausstoß in der Prozesskette gelegt werden sollte (Koppe u. Stozek, 1999, S. 343 f.).

## **Chrom**

Der Eintrag von Chrom ins Abwasser durch häusliches Schmutzwasser geschieht hauptsächlich durch die Reinigung veredelter Metalloberflächen (z.B. verchromte Armaturen) oder bei der Gerbung von Leder. Die Verschmutzung des industriellen Schmutzwassers wird vor allem durch die metallverarbeitende Industrie verursacht. Die Eliminationsrate liegt bei ca. 50% während des Klärprozesses. Auch Chrom kann für den Menschen tödlich wirken. So liegt die tödliche Dosis bei 3 g pro Tag und z.B. für Fische bei 50 mg pro Liter (Koppe u. Stozek, 1999, S. 348 f.).

## **Quecksilber**

Wie Cadmium ist auch Quecksilber ein rein toxisches Element. Der Grenzwert an Quecksilber, das im Klärschlamm nach der Klärung vorhanden sein darf, liegt bei 8 mg Quecksilber pro Kilogramm Klärschlamm. Die Eliminationsrate erreicht hier immerhin 70%. Ziel muss es dennoch sein, den Quecksilbereintrag in Schmutzwasser so gering wie möglich zu halten (Koppe u. Stozek, 1999, S. 343 f.).

## **Blei**

Bleiverbindungen weisen beim Menschen eine mittlere akute Toxizität bei etwa 50 g und eine chronische Toxizität bei 1 mg pro Tag auf. Als besonders problematisch erweist sich die im Gewebe von Tier und Mensch stattfindende Anreicherung von Blei. Der Mensch nimmt den Schadstoff in der Nahrungskette etwa über den Verzehr von bleiverseuchtem Fisch auf. Im Klärschlamm kommt Blei mit etwa 300 mg pro kg vor (Koppe u. Stozek, 1999, S. 336 f.).

## Biologischer Sauerstoffbedarf

Unter Verwendung des BSB kann die Belastung des Schmutzwassers mit biologisch abbaubaren Substanzen bestimmt werden (Fritsche u. Schmidt, 2008, S. 40). Koppe (Koppe u. Stozek, 1999, S. 48) beschreibt den BSB wie folgt:

“Unter dem biochemischen Sauerstoffbedarf (BSB) versteht man die Menge an Sauerstoff, die von Mikroorganismen verbraucht wird, um die im Wasser enthaltenen organischen Verbindungen bei einer vorgegebenen Temperatur (in der Regel 20° C) oxidativ abzubauen.”

### 2.3.6 Fläche

In einem dicht besiedelten Land wie Deutschland mit 231 Einwohnern pro Quadratkilometer (km<sup>2</sup>) (Destatis, 2010) ist es von großer Bedeutung, das Ausmaß an—während des Herstellungsprozesses eines Produktes oder einer Dienstleistung—beanspruchter Fläche, so gering wie möglich zu halten. Zur Bestimmung des Flächenbedarfes gibt es zwei Methoden. Die erste berücksichtigt nur die Anlage zur Herstellung des Endproduktes bzw. der Dienstleistung selbst—etwa den Platz, den ein Kraftwerk zur Energieerzeugung benötigt. Die zweite Methode bezieht die gesamte Prozesskette mit ein. Diese beinhaltet zusätzlich auch den Abbau und Transport von Rohstoffen (z.B. per Pipeline), zur Aufbereitung der Primärenergie, Transporte zur Umwandlungsanlage, die Umwandlungsanlage selbst, die Entsorgung der Abfälle und den benötigten Platz zur Endfertigung (Schauer, 1995, S. 47). Da diese Arbeit einen umfassenden Blick auf die Nachhaltigkeit von Prozessketten werfen soll und die Daten in GEMIS vorhanden sind, bezieht sich der Flächenbedarf immer auf die gesamte Prozesskette. Dabei ist das Kriterium gleichzeitig der Indikator: die in Anspruch genommene Fläche ist ein Indikator zur Bewertung der Nachhaltigkeit. Zu beachten gilt hier, dass GEMIS berechnet, welche Fläche von der jeweiligen Prozesskette jährlich beansprucht wird (Fritsche u. Schmidt, 2008, S. 23).

### 2.3.7 Kumulierter Energieverbrauch

Der kumulierte Energieverbrauch gibt an, wie hoch der gesamte Aufwand an Energieressourcen (Primärenergie) zur Herstellung eines Produktes bzw. einer Dienstleistung ist. Es erfolgt hierbei eine Unterteilung in Anteile von erneuerbaren und nicht erneuerbaren Ressourcen, wobei die Konzentration auf die nicht erneuerbaren Ressourcen gelegt wird, da diese unwiderbringlich nach deren Benutzung und

Verwendung verloren sind. Je niedriger diese Werte sind, desto besser fällt die Bewertung aus. Die folgende Tabelle 2.9 zeigt die zugeordnete Nummerierung und Einteilung des kumulierten Energieverbrauchs (Fritsche u. Schmidt, 2008, S. 50).

Tabelle 2.9: Indikatoren zur Bestimmung des KEV

Nummer	Bezeichnung
1.7.1	Erneuerbare Ressourcen
1.7.2	Nicht erneuerbare Ressourcen

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Fritsche u. Schmidt, 2008, S. 50).

### 2.3.8 Kumulierter Energieaufwand

Der kumulierte Energieaufwand ist, ähnlich wie der KEV, ein Instrument zur Messung des Aufwandes an Energieressourcen (Primärenergie) zur Erzeugung eines Produktes oder Dienstleistung und ebenfalls unterteilt in die Verwendung erneuerbarer und nicht erneuerbarer Ressourcen. Im Gegensatz zum KEV werden hier aber die bei stofflich verwendeten Energieträger als Heizwert auftretenden Energieanteile mit einbezogen. Als Beispiel ließe sich Holz mit seiner alternativen Verwendung als Baumaterial oder Brennstoff anführen. Die Aufteilung und Nummerierung der Indikatoren, wie in Tabelle 2.10 dargestellt, ist analog zur der des KEV (Fritsche u. Schmidt, 2008, S. 49 f.).

Tabelle 2.10: Indikatoren zur Bestimmung des KEA

Nummer	Bezeichnung
1.8.1	Erneuerbare Ressourcen
1.8.2	Nicht erneuerbare Ressourcen

Quelle. Eigene Darstellung in Anlehnung an (Fritsche u. Schmidt, 2008, S. 50).

### 2.3.9 Kumulierter Stoffaufwand

Der Aufwand an Rohstoffen, der zur Herstellung eines Produktes oder einer Dienstleistung nötig ist, wird durch den KSA abgebildet. Wie bereits beim KEV und KEA erfolgt die Unterteilung in die in Tabelle 2.11 dargestellten Indikatoren (Fritsche u. Schmidt, 2008, S. 50).

Tabelle 2.11: Indikatoren zur Bestimmung des KSA

Nummer	Bezeichnung
1.9.1	Erneuerbare Ressourcen
1.9.2	Nicht erneuerbare Ressourcen

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Fritsche u. Schmidt, 2008, S. 50).

### 2.3.10 Zusammenfassung der Kriterien- und Indikatoren zur Bewertung der Nachhaltigkeit

Die letzten Abschnitte haben Kriterien und Indikatoren der ökologischen Dimension aufgestellt, mit deren Hilfe die Nachhaltigkeit eines Prozesses zur Herstellung einer Produktes oder einer Dienstleistung möglich werden soll. Allerdings ist es aus Komplexitätsgründen nicht möglich alle existierenden Schadstoffe bzw. Indikatoren zu berücksichtigen. Jedoch ist eine relativ detaillierte Bewertung unter Verwendung der aufgeführten Kriterien und Indikatoren möglich. Zur besseren Veranschaulichung gibt Tabelle 2.12 einen genaueren Überblick über die oben besprochenen Kriterien und Indikatoren, bevor in Abschnitt 2.4 und 2.5 die Kriterien und Indikatoren der ökonomischen und sozio-kulturellen Dimension vorgestellt werden.

## 2.4 Ökonomische Kriterien

Bezug nehmend auf das oben genannte Drei-Säulen-Modell gibt es neben den ökologischen Kriterien zur Bewertung der Nachhaltigkeit auch ökonomische. Im bereits erwähnten HyWays-Projekt wurden unter anderem die Auswirkungen der Implementierung einer Wasserstoffinfrastruktur auf ökonomische, volkswirtschaftliche Aspekte und Größen untersucht. Auch in diesem Bewertungsverfahren sollen zwei der wichtigsten Kriterien ausgewählt werden, um sie in die Beurteilungsliste aufzunehmen. Zum einen ist dies der Blick auf die Beschäftigungseffekte, zum anderen sind dies die Kosten, die für eine gewisse Einheit eines Produktes oder einer Dienstleistung entstehen (Seydel u. Wietschel, 2004, S. 5).

Die folgenden Abschnitte zeigen detailliert auf, was die Indikatoren hierfür sind. Bevor die Indikatoren in den folgenden Abschnitten detaillierter beschrieben werden, gibt Tabelle 2.13 einen Überblick über die ausgewählten Indikatoren.

Tabelle 2.12: Überblick über die ökologischen Kriterien und Indikatoren zur Bewertung von Nachhaltigkeit

1.1 Treibhauseffekt	1.1.1	CO <sub>2</sub> -Äquivalente
	1.1.2	CO <sub>2</sub>
	1.1.3	CH <sub>4</sub>
	1.1.4	N <sub>2</sub> O
1.2 Versauerung und Eutrophierung	1.2.1	SO <sub>2</sub> -Äquivalente
	1.2.2	NH <sub>3</sub>
	1.2.3	SO <sub>2</sub>
	1.2.4	NO <sub>x</sub>
	1.2.5	HCl
	1.2.6	HF
	1.2.7	H <sub>2</sub> S
1.3 Ozon und Staub	1.3.1	TOPP-Äquivalente
	1.3.2	Staub
	1.3.3	CO
	1.3.4	NMVOG
1.4 Reststoffe	1.4.1	Asche
	1.4.2	Produktionsabfall
	1.4.3	Abraum
	1.4.4	REA-Reststoff
	1.4.5	Klärschlamm
	1.4.6	Radioaktiver Müll
1.5 Abwasser	1.5.1	Phosphor
	1.5.2	Stickstoff
	1.5.3	AOX
	1.5.4	CSB
	1.5.5	Anorganische Salze
	1.5.6	Arsen
	1.5.7	Cadmium
	1.5.8	Chrom
	1.5.9	Quecksilber
	1.5.10	Blei
	1.5.11	BSB
1.6 Fläche	1.6.1	Beanspruchte Fläche
1.7 KEV	1.7.1	Erneuerbare Ressourcen
	1.7.2	Nicht erneuerbare Ressourcen
1.8 KEA	1.8.1	Erneuerbare Ressourcen
	1.8.2	Nicht erneuerbare Ressourcen
1.9 KSA	1.9.1	Erneuerbare Ressourcen
	1.9.2	Nicht erneuerbare Ressourcen

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Öko-Institut e.V., 2010).

Tabelle 2.13: Überblick über die ökonomischen Kriterien und Indikatoren zur Bewertung von Nachhaltigkeit

2.1	Beschäftigungseffekte	2.1.1	Summe der Beschäftigungseffekte
2.2	Kosten	2.2.1	Summe der Kosten

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Öko-Institut e.V., 2010).

### 2.4.1 Beschäftigungseffekte

Da lediglich die Summe der Beschäftigungseffekte gewertet wird, besteht dieses Kriterium nur aus einem Indikator: 2.1.1 Summe der Beschäftigungseffekte. Diese setzen sich aus den direkten und den indirekten Effekten zusammen. Die direkten Effekte erfassen dabei die Arbeitsplätze im Energiesystem und den Vorketten dieser Systeme. Die indirekten Effekte berücksichtigen hingegen die Arbeitsplätze der Investitionsgüterindustrie, z.B. dem Maschinenbau (Fritsche u. Schmidt, 2008, S. 38).

Es ist wichtig diesen Indikator miteinzubeziehen, da das weiter oben erwähnte Green Cabinet als Zielgrößen unter anderem die Perspektive für Familien, wirtschaftliche Zukunftsvorsorge, Beschäftigung, Lebensqualität und den wirtschaftlichen Wohlstand ausgegeben hat. Diese können durchaus ganz (Beschäftigung) oder teilweise (z.B. wirtschaftliche Zukunftsvorsorge) durch die Berücksichtigung der Beschäftigungseffekte abgebildet werden. Schließlich führt eine höhere Beschäftigungsrate zu einer gesicherteren wirtschaftlichen Zukunftsvorsorge oder fördert etwa den wirtschaftlichen Wohlstand. Daher ist dies der einzige Indikator bei dem ein höherer Wert eine positivere Auswirkung auf die Bewertung hat, als ein niedrigerer Wert. Auch hier werden die Beschäftigungseffekte der gesamten Prozesskette betrachtet, nicht nur die der Endfertigung (Hake u. Eich, 2002, S. 15).

### 2.4.2 Kosten

Die Kosten stellen den monetären Ausdruck eines ökonomischen Wertes des Produktes oder der Dienstleistung dar. Zur Vereinfachung werden in dieser Arbeit lediglich die gesamten Kosten als Indikator angeführt. Diese setzen sich aus den Investitionskosten, fixen Jahreskosten, variablen Kosten und den Brennstoffkosten zusammen (Fritsche u. Schmidt, 2008, S. 50). Die Investitionskosten sind diejenigen Kosten, die zur Errichtung und Beschaffung von Prozessschritten aufgebracht werden müssen. Diese beinhalten u.a. Steuern, Bauzeitinsen und Grundstücks- und Planungskosten (Fritsche u. Schmidt, 2008, S. 48). Die fixen Jahreskosten hingegen bilden sich aus den Wartungs-, Betriebs-, Personal und Instandhaltungskosten inklusive der Ausgaben für Reparaturen und Ersatzteile, die pro Leistungseinheit und Jahr anfallen

(Fritsche u. Schmidt, 2008, S. 45). Aus den laufenden Ausgaben ergeben sich die variablen Kosten, die mit der Betriebsweise einer Dienstleistung oder eines Prozesses direkt verbunden sind (Fritsche u. Schmidt, 2008, S. 63). Mit den Brennstoffkosten wird der monetäre Aufwand zur Beschaffung der notwendigen Brennstoffe, die für einen Prozess benötigt werden, beziffert. Dieser Wert bezieht sich dabei immer auf eine Energieeinheit unter Berücksichtigung der Transportkosten (Fritsche u. Schmidt, 2008, S. 39).

Warum die Kosten in der Bewertung von Nachhaltigkeit eines Prozesses betrachtet werden müssen, kann—analog zu den Beschäftigungseffekten—aus den Ausarbeitungen des Green Cabinets hergeleitet werden. Schließlich spielen die Kosten in Bezug auf die Staatsverschuldung bei der Generationengerechtigkeit eine große Rolle. Schließlich müssten diese Schulden nachfolgende Generationen wieder zurückzahlen. So gilt es beispielsweise zu überlegen, ob und in welcher Höhe ein Staat Schulden aufnehmen müsste, um die Energiewende hin zu erneuerbaren Energien zu bewältigen, wie dies in Deutschland gerade der Fall ist (Hake u. Eich, 2002, S. 15). Im Jahr 2009 förderte der deutsche Staat erneuerbare Energien im Jahre 2009 mit 3 Mrd. Euro (BMU, 2010, S. 32). Auch dieses Kriterium besitzt lediglich einen Indikator, der in die Bewertung mit einfließt: 2.2.1 Summe der Kosten.

## 2.5 Sozio-kulturelle Kriterien

Die dritte Säule des Drei-Säulen-Modells stellt die sozio-kulturelle Dimension dar. Diese bringt gesellschaftliche Aspekte ein (Herkommer u. Bartol, 2004, S. 2). In diese Dimension lassen sich die vom Green Cabinet ausgearbeiteten Indikatoren, wie z.B. die Gesundheit, Kriminalität, Gleichberechtigung und Integration ausländischer Mitbürger, einordnen (Hake u. Eich, 2002, S. 15). Da es sich bei dem Werkzeug aber um ein Hilfsmittel zur Bewertung von Prozessketten zur Herstellung von Produkten und Dienstleistungen handelt und aus Gründen der Komplexität, werden in weiterer Folge unter anderem nur die Auswirkungen von Unfällen auf die Gesundheit berücksichtigt werden.

Von ebenso großer Bedeutung ist die Bewertung der Beeinträchtigung des Lebensraumes, die die Herstellung eines Produktes oder einer Dienstleistung mit sich bringt. Die folgenden Abschnitte geben eine detailliertere Beschreibung der Kriterien und welche Indikatoren zur Bewertung dieser Kriterien herangezogen werden sollen. Da das Ziel dieser Arbeit die Bewertung der Nachhaltigkeit von Energieerzeugungsprozessen zur Herstellung von Wasserstoff ist, wurde die Auswahl der Indikatoren auf

dieses Ziel hin, getroffen. Zudem handelt es sich hier—im Gegensatz zu den Indikatoren der beiden anderen Dimensionen—um weiche Indikatoren, die im Bewertungsvorgang beschrieben werden und dann eine Punktzahl erhalten. Die folgende Tabelle 2.14 zeigt die ausgewählten Kriterien und Indikatoren zur Bewertung der sozio-kulturellen Dimension.

Tabelle 2.14: Überblick über die sozio-kulturellen Kriterien und Indikatoren zur Bewertung von Nachhaltigkeit

3.1	Beeinträchtigung Lebensraum	3.1.1	Landschaftsbild
		3.1.2	Auswirkung auf Umgebung
		3.1.3	Widerstand der Bevölkerung
3.2	Unfallgefahr und -auswirkung	3.2.1	Auswirkungen eines Unfalls
		3.2.2	Dauer Schadens- bzw- Störfallbeseitigung

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Fleury, 2005, S. 23 ff.).

### 2.5.1 Beeinträchtigung des Lebensraumes

Es gilt zu berücksichtigen, dass die verschiedenen Prozesse einer Prozesskette den Lebensraum teilweise stark verändern. Wie stark die Eingriffe entlang der Prozesskette in die Natur sind, wie stark das Landschaftsbild verändert wird, wie groß die Auswirkungen auf die Umgebung im regionalen Maßstab sind und wie hoch die Technologieakzeptanz innerhalb der Bevölkerung ist, gilt es bei der Bewertung zu berücksichtigen. Welche Indikatoren ausgewählt wurden, lässt sich Tabelle 2.14 entnehmen.

#### Landschaftsbild

Der Eingriff in die Landschaft ist aufgrund der Generationengerechtigkeit ein wichtiger Indikator. Abgetragene Landschaften beim Abbau von Kohle, in den Himmel ragende Schornsteine und Windräder, Pipelines, die sich tausende Kilometer durch Europa ziehen oder riesige Staudämme sind nur einige Beispiele, wie die Landschaft durch Prozesse bei der Energieerzeugung beeinträchtigt und dauerhaft zerstört werden kann. Meist spielen für negative Auswirkungen auf das Landschaftsbild ästhetische Aspekte die Hauptrolle, wie etwa bei Windrädern, die die Landschaft nicht direkt verändern oder zerstören (z.B. durch abgetragene Erde beim Tagebau), jedoch das Landschaftsbild an sich (z.B. durch ein Windrad). Um diesen weichen Indikator mit Werten zu füllen, zeigt Tabelle 2.15 die Skala zur Bewertung der Beeinträchtigung des Landschaftsbildes. Die Skala reicht dabei von minimum 10 Punkten bis

zur maximal erreichbaren Anzahl von 100 Punkten. Genaueres über die Punkteskala findet sich im Abschnitt 3.2 dieser Arbeit. Mit Hilfe dieser Skala lassen sich Prozessketten bewerten (Fleury, 2005, S. 23 ff.).

Tabelle 2.15: Skala zur Bewertung der Beeinträchtigung des Landschaftsbildes

Beschreibung	Punkte
Die Beeinträchtigung ist weithin sichtbar und von großem Ausmaß. Dabei wirken sich mehrere Prozesse innerhalb der Prozesskette sehr negativ auf das Landschaftsbild aus.	10 bis 28
Die Beeinträchtigung ist weithin sichtbar und von großem Ausmaß. Dabei wirken sich aber nur wenige Prozesse innerhalb der Prozesskette sehr negativ auf das Landschaftsbild aus.	29 bis 46
Die Beeinträchtigung ist deutlich sichtbar und von mittlerem Ausmaß. Dabei wirkt sich nur ein oder nur sehr wenige Prozesse innerhalb der Prozesskette negativ auf das Landschaftsbild aus.	47 bis 64
Die Beeinträchtigung ist sichtbar und von kleinerem Ausmaß. Dabei wirkt sich lediglich ein Prozess innerhalb der Prozesskette negativ auf das Landschaftsbild aus.	65 bis 82
Die Beeinträchtigung ist nahezu nicht sichtbar und von verschwindend geringem Ausmaß. Dabei wirkt sich nur ein Prozess leicht oder kein Prozess innerhalb der Prozesskette negativ auf das Landschaftsbild aus.	83 bis 100

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Fleury, 2005, S. 23).

### **Auswirkungen auf die Umgebung**

Neben den landschaftlichen Auswirkungen diverser Prozesse innerhalb einer Prozesskette müssen auch die Auswirkungen auf die direkte Umgebung beachtet werden. Als Beispiel ließe sich die Beeinflussung des Kleinklimas um ein Kraftwerk herum, anführen oder der Vogelschlag bei Windrädern. In Tabelle 2.16 ist die Auflistung der Punktevergabe dargestellt. Mit dem Begriff Umwelt sind in diesem Zusammenhang allerdings nicht die ökologischen Auswirkungen gemeint, sondern etwa Lärmemissionen, die beim Betrieb eines Offshore-Windrades entstehen oder weitere Auswirkungen auf Flora und Fauna in direkter Umgebung des Prozesses (Fleury, 2005, S. 23 ff.).

### **Widerstand in der Bevölkerung**

Immer wieder kommt es beim Einsatz neuer Technologien zu Protesten. Besonders bei einschneidenden Veränderungen kann dies bei den Bewohnern, die davon betroffen sind, folgende Abfolge an Verhaltensweisen hervorrufen:

Tabelle 2.16: Skala zur Bewertung der Auswirkungen auf die Umgebung

Beschreibung	Punkte
Viele Prozesse innerhalb der Prozesskette wirken sich sehr negativ auf die Umgebung, das Kleinklima und die Umwelt aus. Die Auswirkung ist in einem großen Radius nachweisbar.	10 bis 28
Einige wenige Prozesse innerhalb der Prozesskette wirken sich sehr negativ auf die Umgebung, das Kleinklima und die Umwelt aus. Die Auswirkung ist in einem mittleren Radius nachweisbar.	29 bis 46
Nur wenige Prozesse innerhalb der Prozesskette wirken sich negativ auf die Umgebung, das Kleinklima und die Umwelt aus. Die Auswirkung ist in einem stark eingeschränkten Radius nachweisbar.	47 bis 64
Nur ein Prozess innerhalb der Prozesskette wirken sich leicht negativ auf die Umgebung, das Kleinklima und die Umwelt aus. Die Auswirkung ist in nur in direkter Umgebung nachweisbar.	65 bis 82
Kein oder nur ein Prozess innerhalb der Prozesskette wirken sich leicht negativ auf die Umgebung, das Kleinklima und die Umwelt aus. Die Auswirkung ist dabei nahezu vernachlässigbar und nur in unmittelbarer Umgebung nachweisbar.	83 bis 100

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Fleury, 2005, S. 23).

1. Schock,
2. Ablehnung,
3. rationale Einsicht,
4. emotionale Akzeptanz,
5. lernen,
6. Erkenntnis und
7. Integration (Kostka u. Mönch, 2006, S. 11).

Dieser Prozess lässt sich anhand der Errichtung eines Windrades in der Nähe eines Naturschutzgebietes erläutern. Nachdem die Einwohner möglicherweise relativ spät oder gar erst direkt vor Baubeginn über eben diesen Bau informiert wurden, reagieren diese zunächst mit Unverständnis (Schock) auf die Situation. Aus vielerlei Gründen kann es zu Protesten gegen die Baumaßnahmen kommen (Ablehnung). Gründe für eine ablehnende Haltung gegenüber einem solchen Bauprojekt könnte etwa das Empfinden des Verlustes eines schönen Landschaftsbildes, ein starker Eingriff in das Wohlempfinden der Einwohner oder Unvereinbarkeiten mit eigenen Ansichtsweisen und Prinzipien sein—etwa beim Bau eines Atomkraftwerkes in der Umgebung. Dabei spielt der räumliche Aspekt eine eher untergeordnete Rolle, da

Widerstände gegen den Einsatz von Gentechnik oder die Endlagerung von Atom-  
müll nicht nur bei denjenigen Menschen hervorgerufen werden, die in der Umgebung  
der Felder oder der Lagerstätten wohnen. Vielmehr kann es bei solch kontroversen  
Thematiken auch bundesweit zu Protesten kommen. Die weiteren Schritte können  
durch Aufklärungskampagnen vorangetrieben werden, sodass letztendlich der Bau  
des Windrades akzeptiert wird (Kostka u. Mönch, 2006, S. 12).

So sind es vor allem gesetzliche Regelungen zur Einhaltung von Abständen zu be-  
bauten Gebieten oder etwa Auslassen von Naturschutzgebieten beim Bau neuer  
Windräder, die solch einen Widerstand abdämpfen könnten. Zudem ist der Umgang  
der Medien mit einer neuen Technologie bzw. einem Bauprojekt von nicht zu unter-  
schätzender Wichtigkeit, da die Medien als Informationsquelle und meinungsbilden-  
des Organ vieler Menschen dienen. Tabelle 2.17 zeigt die Verteilung der Punkte in  
Bezug auf diesen Indikator (Kostka u. Mönch, 2006, S. 12).

Tabelle 2.17: Skala zur Beurteilung von Widerständen gegen Projekte oder  
Technologien

Beschreibung	Punkte
Die Proteste und Widerstände regen sich seit vielen Jahren gegen die eingesetzte Technologie oder das Bauprojekt und sind teils sehr heftig. Sie sind nicht nur regional beschränkt, sondern finden in der ganzen Republik statt. Die Medien greifen die Problematiken häufig auf und hegen ein negatives Bild.	10 bis 28
Die Proteste und Widerstände regen sich seit ein paar Jahren gegen die eingesetzten Technologien oder das Bauprojekte und sind teils heftig. Sie sind eher regional beschränkt, weiten sich aber teilweise auch auf größere Gebiete aus. Die Medien greifen die Problematiken häufig auf und hegen ein eher negatives Bild.	29 bis 46
Die Proteste und Widerstände regen sich seit kurzer Zeit gegen die eingesetzte Technologie oder das Bauprojekt und sind stark. Sie sind regional beschränkt und weiten sich nicht auf größere Gebiete aus. Die Medien greifen die Problematiken eher selten auf und fördern ein leicht negatives Bild.	47 bis 64
Die Proteste und Widerstände regen sich erst seit kurzer Zeit gegen die eingesetzte Technologie oder das Bauprojekte und sind eher schwach und vereinzelt. Sie sind stark regional beschränkt. In den Medien ist die Problematik kaum vertreten und wenn doch mit einem gemischten Bild.	65 bis 82
Proteste gibt es so gut wie gar nicht, vielmehr wird die Technologie oder das Projekt als vorteilhaft angesehen. Medien berichten äußerst positiv darüber.	83 bis 100

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Kostka u. Mönch, 2006, S. 12).

## 2.5.2 Unfallgefahr und -auswirkungen

Aus den Argumenten der Gesundheit und Generationengerechtigkeit lässt sich die Berücksichtigung der Unfallgefahr und der Auswirkungen eines solchen Unfalls herleiten. Die Gesundheit betreffend gilt es zu beurteilen, wie schwer die Folgen eines größten anzunehmenden Unfalls sind und die Konsequenzen, die ein solcher in einem gewissen Umkreis für die Menschen, Tiere und Pflanzen hat. Dabei spielt die Wahrscheinlichkeit eines solchen Unfalls aus Komplexitätsgründen nur eine untergeordnete Rolle. Auch die Einbindung der Zeit, die es benötigt die Folgen eines Unfalls zu beseitigen, lässt sich auf die Generationengerechtigkeit zurückführen. Besonders dann, wenn Technologien verwendet werden, die zwar als sicher gelten, bei Unfällen jedoch einen kaum behebbaren, überregionalen Schaden verursachen, der noch viele nachfolgende Generationen betreffen würde. Als Beispiel sei hier der Reaktorunfall von Tschernobyl angeführt, der zu einer Unbewohnbarkeit eines großen Areals führte. In Tabelle 2.14 findet sich die Auflistung der Indikatoren zur Bewertung der Unfallgefahr und der Auswirkungen (Keppler, 2002, S. 959).

### Auswirkungen eines Unfalls

Wie bereits im vorigen Abschnitt erläutert, muss auch das Risiko eines Unfalls durch die Verwendung diverser Technologien während einer Prozesskette, berücksichtigt werden. Die Bestimmung der Wahrscheinlichkeit eines solchen wird allerdings nur am Rande betrachtet. Ausgegangen wird dabei immer von den schlimmsten anzunehmenden Unfällen und den Folgen, die solche Unfälle auf die Gesundheit von Mensch und Tier haben und inwieweit diese weitere Zerstörungen mit sich bringt. Eine genauere Beschreibung dieses Indikators findet sich in Tabelle 2.18 (Fleury, 2005, S. 25).

### Dauer der Schadens- bzw Störfallbeseitigung

Im Zuge der Bewertung der Generationengerechtigkeit kann die Dauer der Schadens- bzw. Störfallbeseitigung herangezogen werden. Tabelle 2.19 gibt Aufschluss darüber, wie die Skala zur Bewertung eines solchen Vorfalls angelegt ist (Fleury, 2005, S. 25).

Tabelle 2.18: Skala zur Bewertung der Auswirkungen eines Unfalls

Beschreibung	Punkte
Ein Unfall führt zur Unbewohnbarkeit eines großen Gebietes, hat noch andere erhebliche negative Auswirkungen auf die Gesundheit der in einem großen Radius um den Unfallort befindlichen Menschen und Tiere und fordert einen immensen Einsatz an Menschen und Maschinen während des Rettungseinsatzes.	10 bis 28
Ein Unfall führt zu erheblichen Schäden innerhalb eines großen Gebietes oder hat andere erhebliche negative Auswirkungen auf die Gesundheit der in einem großen Radius um den Unfallort befindlichen Menschen und Tiere und fordert einen großen Einsatz an Menschen und Maschinen während des Rettungseinsatzes.	29 bis 46
Ein Unfall führt zu mittleren Schäden innerhalb eines kleineren Gebietes oder hat andere mittlere negative Auswirkungen auf die Gesundheit der in einem mittleren Radius um den Unfallort befindlichen Menschen und Tiere und fordert einen mittleren Einsatz an Menschen und Maschinen während des Rettungseinsatzes.	47 bis 64
Ein Unfall führt lediglich zu kleineren Schäden innerhalb eines stark begrenzten Gebietes oder hat andere leicht negative Auswirkungen auf die Gesundheit der in einem kleineren Radius um den Unfallort befindlichen Menschen und Tiere und erfordert hauptsächlich Spezialisten zur Behebung.	65 bis 82
Ein Unfall führt lediglich zu marginalen Schäden nur innerhalb kurzer Distanz zum Unfallort oder hat kaum negative Auswirkungen auf die Gesundheit der in einem kleinen Radius um den Unfallort befindlichen Menschen und Tiere und fordert lediglich wenige Spezialisten zur Behebung.	83 bis 100

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Fleury, 2005, S. 25).

Tabelle 2.19: Skala zur Bewertung der Dauer der Schadens- bzw Störfallbeseitigung

Beschreibung	Punkte
Eine Behebung ist kaum bis ganz unmöglich, etwa aufgrund von Unbewohnbarkeit.	10 bis 28
Ein Unfall zieht eine monate- bis jahrelange Schadensbekämpfung nach sich.	29 bis 46
Ein Unfall zieht eine wochen- bis monatelange Schadensbekämpfung nach sich.	47 bis 64
Der durch den Unfall verursachte Schaden kann innerhalb weniger Wochen beseitigt werden.	65 bis 82
Der durch den Unfall verursachte Schaden kann innerhalb weniger Tage oder gar am gleichen Tag beseitigt werden.	83 bis 100

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Fleury, 2005, S. 23).

# 3 Grundlagen des Werkzeugs zur Beurteilung von Nachhaltigkeit

Nachdem nun einerseits der Begriff der Nachhaltigkeit erfasst und sowohl Kriterien als auch Indikatoren zu dessen Beurteilung aufgestellt wurden, geht es in diesem Kapitel um den Prozess der Bewertung. In den folgenden Abschnitten wird zunächst das Werkzeug vorgestellt, mit dessen Hilfe eine Bewertung der Nachhaltigkeit bei der Herstellung eines Produktes oder einer Dienstleistung ermöglicht werden soll. Ein konkretes Einführungsbeispiel soll dann zeigen, wie dieses Werkzeug genauer funktioniert. Das Beispiel wurde dabei bewusst so gewählt, dass es zunächst nichts mit dem ursprünglichen Thema dieser Arbeit zu tun hat. Es soll die Aufmerksamkeit rein auf die Funktionsweise des Werkzeuges lenken und veranschaulichen, welche Möglichkeiten der Analyse sich mit diesem ergeben.

## 3.1 Grundlagen des Bewertungswerkzeuges

Dieser Abschnitt gibt Aufschluss darüber, woher die für die Indikatoren benötigten Daten bezogen werden können und welche Qualität diese aufweisen. Desweiteren wird aufgezeigt, in welchem Umfang die Daten zur Verfügung stehen müssen, in dem Sinne, dass nicht einzelne Prozesse, sondern ganze Prozessketten berechnet werden sollten. Zum Zwecke der Bewertung der Nachhaltigkeit von Energieerzeugung bei der Herstellung von Wasserstoff werden die Daten für diese Arbeit dem Programm GEMIS entnommen.

### 3.1.1 GEMIS–Eine Datenbank zur Lebenszyklusanalyse

Die vom Öko-Institut in Darmstadt entwickelte, kostenlos verfügbare Datenbank GEMIS, dient dazu, die Lebenszyklen von Stoff-, Energie- und Transportprozessen zu bilanzieren und analysieren. Diese Prozesse können in jedweder Kombination zusammengesetzt und betrachtet werden. Die Kriterien und Indikatoren zur Analyse

der Nachhaltigkeit eines Prozesses wurden dabei unter anderem in Hinblick auf die in GEMIS verfügbaren Daten ausgewählt. GEMIS stellt neben Umwelteffekten auch die Daten über die entstehenden Kosten bereit. In den 80er Jahren wurde das Hauptaugenmerk solcher Analysen lediglich auf die Stoffe  $\text{SO}_2$  und  $\text{NO}_x$  gelegt. Erst in den 90er Jahren wurde auch die Entsorgung und der Stoffaufwand, der zur Herstellung nötig war in einer so genannten Ökobilanz betrachtet. Berücksichtigt werden in Ökobilanzen möglichst alle wichtigen physikalisch-chemischen Aktivitäten, die bei der Herstellung auftreten und die hierfür benötigten Transportprozesse. Ein weiterer wichtiger Faktor, der in der Bilanzierung ebenfalls miteinbezogen wird, ist die Analyse der benötigten Materialien und Hilfsprodukte (Fritsche u. Schmidt, 2008, S. 2 f.).

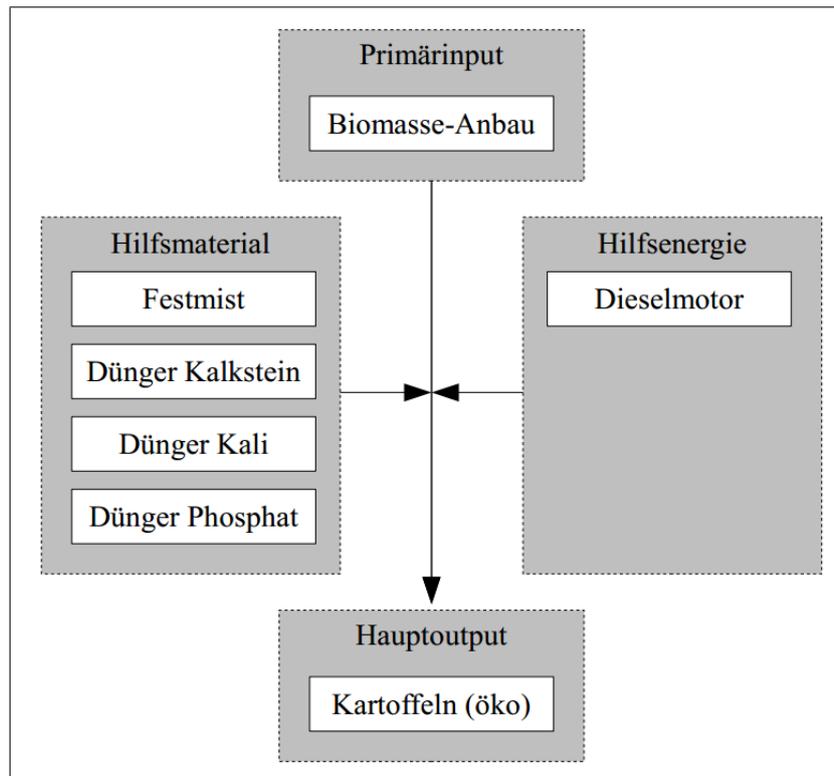
Mit GEMIS ist es also möglich eine Stoffstromanalyse zu erstellen und die Umwelteffekte der Herstellung eines Produktes oder einer Dienstleistung von der Primär- und Rohstoffgewinnung bis zur Entsorgung bzw. Recycling zu betrachten. Die Verknüpfung all dieser Prozesse, bildet einen Lebensweg. Wie genau ein solcher Lebensweg—genannt Prozesskette—aussieht, wird im folgenden Abschnitt erklärt (Fritsche u. Schmidt, 2008, S. 51).

### 3.1.2 Prozessketten

GEMIS berücksichtigt alle Prozesse, die zur Bereitstellung eines Produktes oder einer Dienstleistung benötigt werden, anhand einer Prozesskette (Fritsche u. Schmidt, 2008, S. 2). Von der Herstellung aller benötigten Materialien, Transporte, Hilfsprodukte und -prozesse bis zur Entsorgung verschiedener Stoffe werden diese Prozesse erfasst (Fritsche u. Schmidt, 2008, S. 7). Ein einfaches Beispiel soll dies verdeutlichen. Abbildung 3.1 zeigt die Prozesskette des Anbaus von Kartoffeln aus ökologischem Anbau. Dieses Beispiel hat zwar keine Verbindung zur Frage- und Problemstellung, jedoch wird daran der einfache Aufbau einer solchen Prozesskette, wie sie GEMIS ausgibt, verdeutlicht (Öko-Institut e.V., 2010).

In diesem Beispiel besteht der primäre Input, der im oberen Kästchen angezeigt wird, aus Biomasse. Für den Anbau von Kartoffeln aus ökologischer Landwirtschaft werden weitere Hilfsmittel benötigt. Diese haben wiederum eigene, vorgelagerte Prozessketten. Durch einen Dieselmotor wird zusätzlich Hilfsenergie zugeführt. Die Reihenfolge der Prozesse bei Hilfsmaterial und -energie stellt dabei keine chronologische dar, sondern lediglich eine Auflistung der anfallenden Vorgänge. Mit Hilfe dieser Übersicht können nun weitergehende Analysen vorgenommen werden. Wie dies ge-

Abbildung 3.1: Beispiel einer Prozesskette für den Anbau von ökologisch erzeugten Kartoffeln



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Öko-Institut e.V., 2010).

schieht, wird in Abschnitt 3.2.2 bei der Anwendung des Werkzeuges detaillierter beschrieben (Öko-Institut e.V., 2010).

### 3.1.3 Datensammlung und Datenqualität

Die in GEMIS bereitgestellten Daten weisen unterschiedliche Qualitätsstufen auf. Diese sind in Tabelle 3.1 dargestellt und kurz erläutert.

Tabelle 3.1: Qualität der Datensätze in GEMIS

Qualitätsstufe	Erläuterung
Vorläufig	Nicht fertiggestellt
Einfach	Einfache Schätzungen
Mittel	Sekundäre bzw. abgeleitete Daten
Gut	Primärdaten
Sehr gut	Validierte Daten

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Öko-Institut e.V., 2010).

Um eine gute Vergleichbarkeit der Daten gewährleisten zu können, werden in weite-

rer Folge nur Datensätze verwendet, die mindestens die Qualitätsstufe “einfach” aufweisen. Die Vergleichbarkeit der Daten ist auch dadurch gegeben, dass GEMIS alle Daten in gleichen Relationen—etwa Kilogramm (kg) pro Kilowattstunde (kWh)—ausgibt. Die Daten werden somit stets mit der gleichen Bezugsgröße berechnet. Für viele verschiedene Prozessketten stellt GEMIS die Daten der Ökobilanz zur Verfügung. Es berechnet Luftschadstoffe, Abwassereinleitungen, Kosten, etc., die während der gesamten Prozesskette entstehen und setzt die Gesamtmenge ins Verhältnis zu der hergestellten Menge eines Gutes oder der Dienstleistung—etwa die ausgestoßene Menge an CO<sub>2</sub> in kg pro kWh Output Strom bei der Energieerzeugung (Öko-Institut e.V., 2010).

## 3.2 Aufbau des Werkzeuges zur Bewertung von Nachhaltigkeit

Nachdem nun Datenquellen gefunden wurden, die zur Analyse herangezogen werden können, geht es in diesem Abschnitt darum, die Verwendung dieser Daten zu beschreiben. Mit Hilfe des Werkzeugs zur Bewertung von Nachhaltigkeit ist es möglich, die von GEMIS ausgegebenen Daten verschiedener Prozessketten nicht nur zu analysieren, sondern unter der Verwendung einer selbst gewählten Gewichtung aller Dimensionen, Kriterien und Indikatoren auch auf deren Nachhaltigkeit hin zu vergleichen. Wie dieser Bewertungsvorgang abläuft, wird in den folgenden Abschnitten näher erläutert (BMVBS, 2011, S. 12 ff.).

### 3.2.1 Bewertungsgraph

Das der Bewertung zugrunde liegende Prinzip ist dem “Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen” (BNB) nachempfunden (BMVBS, 2011, S. B1). Dieses baut darauf auf, dass die exakte Erreichung eines Referenzwertes<sup>1</sup> (R) (etwa für den Ausstoß an SO<sub>2</sub>) mit 50 Punkten bewertet wird. Wird ein festgelegter Zielwert<sup>2</sup> (Z) erreicht oder gar unterschritten, so werden hierfür 100 Punkte vergeben, während das Erreichen oder Überschreiten eines Grenzwertes<sup>3</sup> (G) mit lediglich 10 Punkten verbucht wird. Dies bedeutet, dass die maximal erreichbare Punktzahl 100 und die minimale Punktzahl 10 beträgt. Eine Übersicht über die genaue Punkteaufteilung geben Tabelle

---

<sup>1</sup>Der Referenzwert ist der Wert, der als Vergleichswert dient und zwischen dem Ziel- und Grenzwert liegt.

<sup>2</sup>Der Zielwert ist derjenige Wert, den es zu erreichen gilt.

<sup>3</sup>Der Grenzwert sollte nicht überschritten werden.

3.2 und 3.3. Die zwischen Grenz- und Referenzwert bzw. Referenz- und Zielwert liegenden Vergleichswerte (V) der einzelnen Indikatoren werden abschnittsweise linear interpoliert. Ein möglicher Bewertungsgraph ist in Abbildung 3.2 dargestellt. Zu einer abweichenden Berechnung beim Beschäftigungseffekt kommt es, da nur für diesen gilt: Je mehr desto besser. Für jeden Indikator wird ein eigener Bewertungsgraph mit eigenen Referenz-, Grenz- und Zielwerten angelegt. Wie sich die Vergleichswerte festlegen lassen, wird weiter unten genauer dargelegt (BMVBS, 2011, S. B1).

Tabelle 3.2: Punkteverteilung für alle Indikatoren außer Beschäftigungseffekt

Bedingung	$V \leq Z$	$Z < V < R$	$V = R$	$R < V < G$	$V \geq G$
Punkte	100	99 - 51	50	49 - 11	10

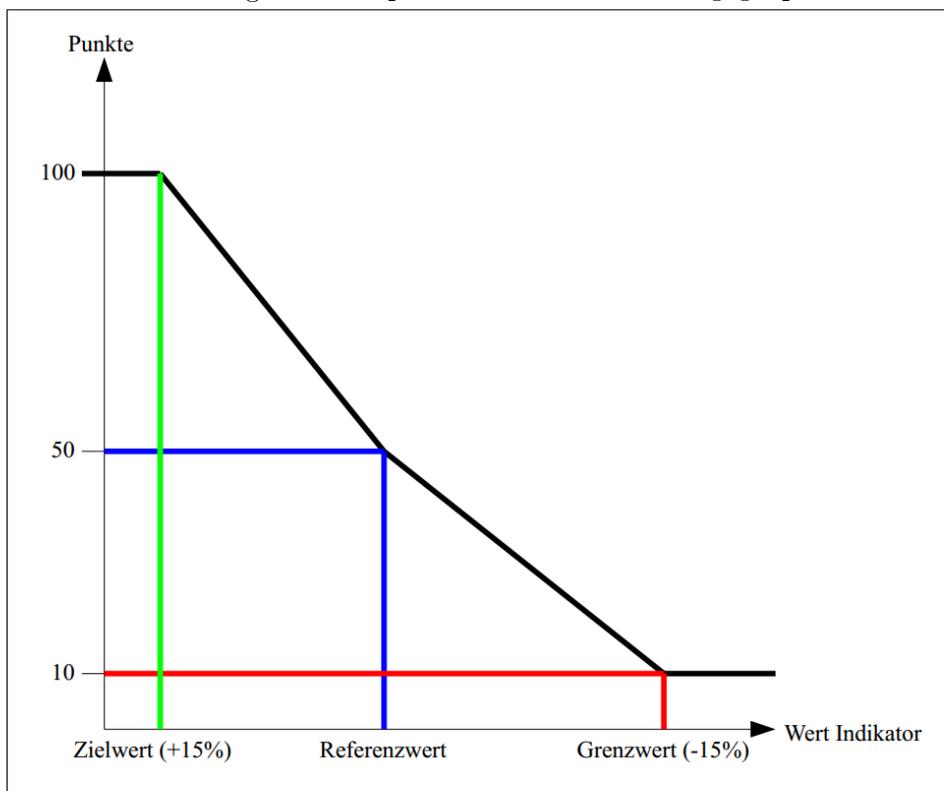
Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (BMVBS, 2011, S. 12 ff.).

Tabelle 3.3: Punkteverteilung für Indikator Beschäftigungseffekt

Bedingung	$V \geq Z$	$R < V < Z$	$V = R$	$G < V < R$	$V \leq G$
Punkte	100	99 - 51	50	49 - 11	10

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (BMVBS, 2011, S. 12 ff.).

Abbildung 3.2: Beispiel für einen Bewertungsgraphen



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (BMVBS, 2011, S. B1).

Der Ziel- und Grenzwert werden mit einer Toleranzgrenze von 15% versehen. Die un-

terschiedlichen Steigungen entstehen aus der Tatsache, dass der Abstand zwischen Ziel- und Referenzwert ein anderer sein kann als zwischen Referenz- und Grenzwert. Da jeder Indikator andere Referenz-, Grenz- und Zielwerte besitzt, wird für jeden Indikator ein individueller Bewertungsgraph berechnet. wird folgende Abfrage durchgeführt:

1. Für  $V = R$  werden 50 Punkte als Ergebnis ausgegeben.
2. Für  $V \leq Z$  werden 100 Punkte als Ergebnis ausgegeben.
3. Für  $V \geq G$  werden 10 Punkte als Ergebnis ausgegeben (BMVBS, 2011, S. 12 ff.).

Liegt der Vergleichswert nun zwischen Ziel- und Referenzwert bzw. zwischen Referenz- und Grenzwert, wird mit der Geradengleichung der Punktwert berechnet:

$$y = m * x + n \tag{3.1}$$

$m$  Steigung der Geraden

$n$  y-Achsenabschnitt

$x$  Werte (Vergleichs-, Ziel-, Referenz- oder Grenzwert)

$y$  Punkte der Bewertungsskala von 10 bis 100

Die Steigung  $m$  für  $R < V < G$  ergibt sich aus:

$$m = \frac{y2 - y1}{x2 - x1} \tag{3.2}$$

$x1$  = Referenzwert

$x2$  = Grenzwert

$y1$  = 50 Punkte

$y2$  = 10 Punkte

Für  $Z < V < R$  ergibt sich die Steigung  $m$  aus:

$$m = \frac{y2 - y1}{x2 - x1} \tag{3.3}$$

$x1$  = Zielwert

$x2$  = Referenzwert

$y1$  = 100 Punkte

$y2$  = 50 Punkte

Als Letztes wird  $n$  für  $Z < V < R$  mit der folgenden Formel bestimmt:

$$n = 50 - (m * R) \tag{3.4}$$

Bzw. für  $R < V < G$  mit:

$$n = 10 - (m * G) \tag{3.5}$$

Nun kann für jedes beliebige  $x$  (Vergleichswert) der entsprechende  $y$ -Wert (erreichte Punkteanzahl bei diesem Indikator) ausgegeben werden (BMVBS, 2011, S. 12 ff.).

Für den Beschäftigungseffekt gilt im Gegensatz zu den anderen Indikatoren: Je mehr desto besser. Daher wird für diesen zur Berechnung wie folgt vorgegangen:

1. Für  $V = R$  werden 50 Punkte als Ergebnis ausgegeben.
2. Für  $Z \leq V$  werden 100 Punkte als Ergebnis ausgegeben.
3. Für  $G \geq V$  werden 10 Punkte als Ergebnis ausgegeben (BMVBS, 2011, S. 12 ff.).

Befindet sich der Vergleichswert zwischen Referenz- und Zielwert bzw. Grenz- und Referenzwert, muss die erreichte Punktzahl auch hier anhand der Geradengleichung bestimmt werden:

$$y = m * x + n \tag{3.6}$$

Die Steigung  $m$  für  $G < V < R$  ergibt sich aus:

$$m = \frac{y2 - y1}{x2 - x1} \tag{3.7}$$

- $x1$  = Grenzwert
- $x2$  = Referenzwert
- $y1$  = 10 Punkte
- $y2$  = 50 Punkte

Für  $R < V < Z$  ergibt sich die Steigung  $m$  aus:

$$m = \frac{y2 - y1}{x2 - x1} \tag{3.8}$$

$x1$  = Referenzwert

$x2$  = Zielwert

$y1$  = 50 Punkte

$y2$  = 100 Punkte

Als Letztes wird  $n$  für  $R < V < Z$  mit der folgenden Formel bestimmt:

$$n = 50 - (m * R) \quad (3.9)$$

Bzw. für  $G < V < R$  mit:

$$n = 10 - (m * G) \quad (3.10)$$

Auch hier kann nun die erreichte Punktzahl beim Indikator Beschäftigungseffekt in Bezug auf den Vergleichswert ausgegeben werden (BMVBS, 2011, S. 12 ff.).

Die Steigungen der Geraden können dabei stark variieren. Es ist sinnvoll, diese zu betrachten und bei zu starken Steigungen zu überprüfen, ob die Auswahl der Referenz-, Grenz- oder Zielwerte neu vorgenommen werden muss. Für die Indikatoren, die in dieser Arbeit verwendet wurden, war eine Anpassung nicht nötig.

### **3.2.2 Genauer Ablaufplan zur Erstellung einer Nachhaltigkeitsanalyse mit Hilfe des Bewertungswerkzeuges**

Im Abschnitt 3.1.1 wurde bereits auf die Lebenszyklusanalyse eingegangen. Mit Hilfe der DIN EN ISO 14040 ist es möglich, eine solche Lebenszyklusanalyse durchzuführen. Sie gibt vor, dass eine solche Bilanz aus

1. der Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens,
2. der Sachbilanz,
3. der Wirkungsabschätzung und
4. der Auswertung bestehen muss (DIN, 2006).

Die Vorgehensweise in dieser Arbeit von der Datenerhebung bis zur letztendlichen Bewertung und Analyse der Nachhaltigkeit ist an die Vorgehensweise der DIN EN ISO 14040 angelehnt (DIN, 2006).

Bevor in den folgenden Abschnitten genauere Erläuterungen zu den einzelnen Schritten vorgenommen werden, die notwendig sind, um mit Hilfe der Daten aus GEMIS eine zuverlässige Bewertung der Nachhaltigkeit einzelner Prozesse zu erhalten, werden in Tabelle 3.4 die einzelnen Schritte überblicksmäßig dargestellt (DIN, 2006).

Tabelle 3.4: Ablaufplan zur Erstellung einer Nachhaltigkeitsanalyse mit Hilfe des Bewertungswerkzeuges

Schritt 1	Fragestellung und Zieldefinierung
Schritt 2	Datensätze der zu vergleichenden Prozessketten auswählen
Schritt 3	Datensätze mit GEMIS auswerten
Schritt 4	Referenz-, Grenz- und Zielwerte festlegen
Schritt 5	Ergebnisse in das Bewertungswerkzeug übertragen
Schritt 6	Gewichtungen festlegen
Schritt 7	Analyse

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (BMVBS, 2011, S. 4 ff.).

Jede Bewertung besteht aus diesen sieben Schritten. Im Gegensatz zu vielen anderen Ökobilanzanalysen ist es hier möglich, anhand der Gewichtung verschiedene Analyseszenarien zu erstellen. Mit Hilfe dieser Szenarien lässt sich sehen, wie der Bewertungswert sich verändert. Mit einem Blick in die von GEMIS bereitgestellten Prozessketten kann nun eine tiefgehendere Analyse vorgenommen werden, etwa was der Grund für den hohen Ausstoß an Methan ist und wo Verbesserungsmöglichkeiten durch neue Technologien vorhanden sind. Die in dieser Arbeit verwendeten Daten stammen aus GEMIS und werden bei den einzelnen Prozessen zur Analyse der Energieerzeugungsformen verwendet. Jedoch kann das Werkzeug auch für diverse andere Analysen von Prozessketten jeglicher Art herangezogen werden—es müssen lediglich die Daten vorhanden sein. Ein Vorteil dieses Werkzeuges ist es zudem, dass gewisse Indikatoren ausgeschaltet werden können, indem deren Gewichtung auf 0% festgelegt wird. So können fehlende Daten ausgeglichen werden. Die folgenden Abschnitte zeigen, wie die genaue Abfolge der oben genannten Schritte aussieht (BMVBS, 2011, S. 4 ff.).

### **Schritt 1: Fragestellung und Zieldefinierung**

Zunächst gilt es die Zieldefinition zu erstellen. Hierin wird festgelegt, welche Produkte bzw. Dienstleistungsprozesse miteinander verglichen werden sollen. Dabei muss die Vergleichbarkeit gegeben sein, etwa in Hinblick auf die Datenqualität. Es besteht z.B. auch die Möglichkeit zwei oder mehrere Herstellungsmöglichkeiten eines neuen

Produktes zu vergleichen und den erreichten Grad an Nachhaltigkeit in den Entscheidungsprozess einfließen zu lassen, auf welche Art und Weise das neue Produkt künftig hergestellt werden soll (Beucker, 2005, S. 3).

### **Schritt 2: Datensätze der Prozessketten auswählen**

In Bezug auf die Zieldefinition werden nun die zu vergleichenden Prozessketten ausgewählt. Es ist sinnvoll, Prozesse zu vergleichen, die dem gleichen Produktions- bzw. Dienstleistungsbereich entstammen (Fritsche u. Schmidt, 2008, S. 53).

### **Schritt 3: Datensätze mit GEMIS auswerten**

Nachdem in GEMIS ein oder mehrere Prozesse zur Herstellung eines Produktes oder einer Dienstleistung ausgewählt wurden, werden die Emissionen, Abwassereinträge, etc. berechnet. Die Daten können auch aus anderen Quellen als GEMIS stammen (Öko-Institut e.V., 2010).

### **Schritt 4: Referenz-, Grenz- und Zielwerte festlegen**

Eine Punktevergabe zur Bewertung der Nachhaltigkeit ist nur dann möglich, wenn für jeden Indikator ein Ziel-, Grenz- und Referenzwert bestimmt wurde, anhand denen der tatsächliche Wert verglichen und somit bewertet werden kann. Der Referenzwert wird mit 50 Punkten bewertet und dient als Orientierungspunkt. Er könnte etwa aus einem arithmetischen Mittel oder mit Hilfe eines Referenzszenarios berechnet werden. Wie dies möglich ist, wird zum einen beim Einführungsbeispiel in diesem Kapitel und zum anderen beim Anwendungsfall, genauer dargelegt (BMVBS, 2011, S. B1).

Der Grenzwert sollte nicht überschritten werden, da sonst nur die Minimalpunktzahl von 10 Punkten gegeben würde. Auch hier kann eine Anpassung sinnvoll sein, sodass die Grenzwerte in dieser Arbeit um 15% verringert wurden, um Toleranzgrenzen abzubilden. Übertrifft der Wert eines Indikators den vorgegebenen Grenzwert, können anhand der Prozesskette in GEMIS Gründe für das schlechte Abschneiden in dieser Kategorie ausgemacht und Ansätze zur Verbesserung aufgestellt werden. Ein Grenzwert kann beispielsweise auch aus gesetzlichen Vorgaben zur maximalen Belastung mit Luftschadstoffen gebildet werden (BMVBS, 2011, S. B1).

Vor allem bei Schadstoffen sollte der Zielert angestrebt oder unterboten werden, um eine bestmögliche Bewertung von 100 Punkten zu erzielen. Um einen gewissen Spielraum an Toleranz zu ermöglichen, kann es durchaus sinnvoll sein, den ursprünglichen Zielwert um einen gewissen Faktor zu erhöhen, sodass seine Erreichung realistischer wird. Im Anwendungsfall in Kapitel 4 wird der Zielwert um 15% erhöht. Ein solcher Zielwert kann sich etwa aus Vorgaben zur Erreichung von Subventionen ergeben (BMVBS, 2011, S. B1).

### **Schritt 5: Ergebnisse in das Bewertungswerkzeug übertragen**

Die für eine Prozesskette von GEMIS berechneten Umweltauswirkungen lassen sich nun in das Werkzeug übertragen, wo sie automatisch ausgewertet werden. Unter Berücksichtigung der bereits festgelegten Referenz-, Grenz- und Zielwerte und der noch zu bestimmenden Gewichtung der Indikatoren, berechnet das Werkzeug anschließend automatisch die entsprechende Punktzahl.

### **Schritt 6: Gewichtungen festlegen**

Zwar sind einige Kriterien und Indikatoren nicht unabhängig voneinander, sodass diese in der Regel nicht unabhängig voneinander gewichtet werden können, aber aus Gründen der Komplexität und weiterem Recherchebedarfs wird dies in dieser Arbeit dennoch auf diese Art und Weise vorgenommen. Mit Hilfe der Gewichtungen kann man sowohl den Dimensionen, als auch den Kriterien und Indikatoren individuell Gewicht verleihen. Von der Gleichgewichtung aller Indikatoren bis hin zu Einzelgewichtungen eines einzigen Indikators sind alle denkbaren Gewichtungen möglich. Jeder der drei Dimensionen (ökologisch, ökonomisch und sozio-kulturell) kann eine eigene Gewichtung gegeben werden, die in der Summe wiederum 100% ergeben muss. So kann etwa eine Dimension alleine mit 100% gewertet oder eine andere Aufteilung der Prozentpunkte erfolgen (BMVBS, 2011, S. 12 ff.).

Je nachdem, ob man das Hauptaugenmerk auf einzelne Kriterien (etwa 1.1 Treibhauseffekt) legen, eine Gleichverteilung oder eine individuelle Gewichtung vornehmen möchte, bietet das Werkzeug die Möglichkeit diese Gewichtungen zu berücksichtigen. Auch hier ergibt die Summe aller Kriterien innerhalb einer Dimension 100% (BMVBS, 2011, S. 12 ff.).

Jeder einzelne Indikator (z.B. SO<sub>2</sub>) kann mit in die Bewertung eingebaut oder ausgelassen werden, indem man die Gewichtung auf 0% festlegt. Das bedeutet, dass so viele Indikatoren in die Bewertung mit einfließen, wie vom Benutzer gewünscht wird.

Dabei kann sich eine eventuelle Gewichtung etwa an der Schädlichkeit der einzelnen Stoffe orientieren. Beachtet werden muss, dass der Beschäftigungseffekt der einzige Indikator ist, bei dem gilt: Je mehr desto besser. Ein höherer Wert führt hier zu einer besseren Bewertung. Er hat—im Gegensatz zu Schadstoffen oder Kosten—eine positive Wirkung auf die Volkswirtschaft (BMVBS, 2011, S. 12 ff.).

### **Schritt 7: Analyse**

Für einer bessere Übersicht zur Analyse der ausgegebenen Punktezahlen dient eine Farbskala als Orientierung. Das untere Ende der Skala wird tief rot eingefärbt und umfasst den Bereich von 10 bis 50 Punkten. Mit weiß ist die Punktezahl 75 und mit tief grün der Bereich von 90 bis 100 gekennzeichnet. Werte die zwischen 51 und 89 liegen, nehmen eine Farbmischung zwischen rot – weiß – grün an. Nun bieten sich vielfältige Analysemöglichkeiten. Eine tief rot eingefärbte Prozesskette lässt sich mittels GEMIS näher analysieren, da das Programm die Möglichkeit bietet, eine detaillierte Abbildung über alle Inputs und Outputs der Prozesskette aufzurufen. So ließen sich etwa Hauptverursacher für Verschmutzungen ausfindig machen, wie im anschließenden Einführungsbeispiel deutlich wird.

## **3.3 Erklärendes Beispiel anhand der Erzeugung von Nahrung für Deutschland**

Dieser Abschnitt soll anhand eines konkreten Einführungsbeispiels die oben beschriebene Funktionsweise des Werkzeugs zur Beurteilung von Nachhaltigkeit demonstrieren. Es wurde bewusst ein Beispiel gewählt, dass mit der ursprünglichen Problem- und Fragestellung nichts zu tun hat, um den Fokus auf den Ablauf zu legen. Es werden verschiedene Prozessketten ausgewählt, die dem Produktionsbereich der Nahrungserzeugung entstammen. Alle Prozessketten bilden verschiedene Arten der Nahrungserzeugung für den deutschen Markt ab.

### **3.3.1 Schritt 1: Fragestellung und Zielsetzung**

Die Fragestellung dieses Beispiels lautet: Wie nachhaltig werden verschiedene Nahrungsmittel für den Konsum in Deutschland produziert? Das Ziel ist es, aus einer kleinen Anzahl verschiedener Nahrungsmittel den nachhaltigsten Produktionsprozess zu bestimmen, wobei verschiedene Gewichtungsszenarien benutzt werden. Die

Auswahl der Prozessketten wird für dieses Beispiel zufällig getroffen, wie der folgende Abschnitt zeigen wird.

### 3.3.2 Schritt 2: Datensätze der Prozessketten auswählen

Die Datensätze werden, wie bereits erwähnt, nur in Hinblick auf Vergleichbarkeit ausgewählt. Sie haben alle einen vergleichbaren Zeit- (2010) und Ortsbezug (Deutschland). Zwar unterscheidet sich die Qualität der Daten, doch die Datenbasis kann bei allen Prozessen als ausreichend nachvollziehbar und fundiert bezeichnet werden, um eine Vergleichbarkeit gewährleisten zu können. Es wurden folgende Prozessketten aus GEMIS ausgewählt:

- tiefgekühltes Rindfleisch aus ökologischer Landwirtschaft,
- tiefgekühltes Rindfleisch aus normaler Landwirtschaft,
- Masthähnchen aus ökologischer Landwirtschaft,
- Masthähnchen aus Bodenhaltung,
- in die EU importierter Fisch,
- Kartoffeln aus normaler Landwirtschaft,
- Kartoffeln aus ökologischer Landwirtschaft,
- Feldgemüse aus normaler Landwirtschaft und
- Feldgemüse aus ökologischer Landwirtschaft (Öko-Institut e.V., 2010).

### 3.3.3 Schritt 3: Datensätze mit GEMIS auswerten lassen

Nachdem festgelegt wurde, welche Prozesse betrachtet werden sollen, kann GEMIS nun die Umweltwirkungen dieser Prozesse berechnen. Aus Gründen der Komplexität, die in diesem Einführungsbeispiel stark begrenzt werden soll, werden die weichen, sozio-kulturellen Kriterien an dieser Stelle nicht berücksichtigt (Öko-Institut e.V., 2010).

### 3.3.4 Schritt 4: Referenz-, Grenz- und Zielwerte festlegen

Nun gilt es die Referenz-, Grenz- und Zielwerte festzulegen. Hierfür gibt es vielerlei Möglichkeiten. So könnten etwa gesetzliche Regelungen als Vorlage dienen. Für dieses Beispiel soll jedoch lediglich das arithmetische Mittel der einzelnen Umweltwirkungen aller ausgewählten Prozesse als Referenzwert, die Höchst- und Niedrigstwerte als Grenz- bzw. Zielwerte—unter Berücksichtigung einer 15%-igen Toleranz—herangezogen werden. Es wird z.B. der Mittelwert für CO<sub>2</sub>-Emissionen berechnet, in dem die CO<sub>2</sub>-Emissionen aller Prozessketten durch die Anzahl der Prozessketten geteilt wird. Dieser Wert bildet den Referenzwert für den Indikator CO<sub>2</sub>-Emissionen. Erneut gilt es zu beachten, dass nur bei den Beschäftigungseffekten gilt: je mehr desto besser. Hier ist der höchste Wert der Zielwert und der niedrigste der Grenzwert (BMVBS, 2011, S. 12 ff.).

### 3.3.5 Schritt 5: Ergebnisse in das Bewertungswerkzeug übertragen

Die von GEMIS ausgegebenen Daten werden nun in das Werkzeug übertragen und Bewertungsgraphen—auf deren Steigung hin—überprüft.

### 3.3.6 Schritt 6: Gewichtung festlegen

Mit der Festlegung der Gewichtung der Dimensionen, Kriterien und Indikatoren können einzelne Szenarien betrachtet werden. Zunächst sollen lediglich die CO<sub>2</sub>-Äquivalente mit 100% gewichtet werden, um einen ersten Überblick über die Umweltwirkung dieses Indikators zu bekommen. Im folgenden Szenario werden dann die anderen Äquivalente—SO<sub>2</sub>- und TOPP-Äquivalent—zusätzlich mit einbezogen. In diesem Fall wird das CO<sub>2</sub>-Äquivalent mit 50%, das SO<sub>2</sub>-Äquivalent mit 30% und das TOPP-Äquivalent mit 20% gewichtet, sodass in Summe wieder 100% erreicht werden. Das dritte Szenario berücksichtigt nur die Beschäftigungseffekte der einzelnen Prozesse und gewichtet daher die Summe der Beschäftigungsfaktoren mit 100%. Eine detailliertere Gewichtung der Indikatoren wird schließlich im Szenario 4 vorgenommen. In der Abbildung im Anhang A.1 findet sich ein Überblick über die einzelnen Gewichtungen in Szenario 4 (BMVBS, 2011, S. 12 ff.).

### 3.3.7 Schritt 7: Analyse

Nachdem auch die Gewichtungen festgelegt wurden, lassen sich nun die Ergebnisse anhand der rot–weiß–grün eingefärbten Punkte analysieren. Abbildung 3.3 zeigt die Punkteanzahl der jeweiligen Prozessketten für die einzelnen Szenarien.

Abbildung 3.3: Erreichte Punktzahl der einzelnen Szenarien im Einführungsbeispiel

Bezeichnung	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4
	Nur CO <sub>2</sub> -Äquivalent	CO <sub>2</sub> -, SO <sub>2</sub> - & TOPP Äquivalente	Nur Beschäftigungseffekte	Gleichgewichtung
Rindfleisch, ökologische Landwirtschaft	10,00	22,31	47,13	34,28
Rindfleisch, normale Landwirtschaft	10,00	19,03	59,22	24,29
Masthähnchen Auslauf	66,13	60,68	100,00	51,88
Masthähnchen Bodenhaltung	60,22	60,31	100,00	49,75
Fisch Import	48,29	29,14	39,47	40,88
Kartoffeln, normale Landwirtschaft	98,71	98,85	13,21	93,09
Kartoffeln, ökologische Landwirtschaft	99,43	99,26	12,74	93,45
Feldgemüse, normale Landwirtschaft	99,96	99,97	10,00	94,57
Feldgemüse, ökologische Landwirtschaft	100,00	99,67	11,21	93,20

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Öko-Institut e.V., 2010).

Unter Verwendung dieser Ergebnisse lassen sich nun Analysen der einzelnen Szenarien vornehmen.

#### Analyse Szenario 1

In Szenario 1 wird deutlich, dass vor allem bei der Erzeugung von Rindfleisch ein hohes Maß an treibhauswirksamen Gasen freigesetzt wird, während der Anbau von Gemüse einen ausgezeichneten Punktwert erreicht. Mit dieser Erkenntnis ist es möglich, den Ursachen für die schlechte Bewertung für die Erzeugung von Rindfleisch nachzugehen. Wirft man einen Blick in die von GEMIS automatisch erstellten Prozessketten, findet sich auch sofort der Hauptverursacher dieser Gase: es sind die Rinder selbst, die während ihrer Lebenszeit ein hohes Maß an Methan ausstoßen. Somit lässt sich die negative Auswirkung auf die Bewertung schnell erläutern.

#### Analyse Szenario 2

Bezieht man nun auch die anderen Äquivalente mit ein, verbessert sich zwar die Bewertung bei der Erzeugung von Rindfleisch, die bei importierten Fisch hinge-

gen, verschlechtert sich drastisch. Auch hier bietet sich die Möglichkeit, bei einem Blick in die Prozessketten in GEMIS Verbesserungspotenziale (z.B. in Hinblick auf geringeren Schadstoffausstoß) aufzudecken.

### **Analyse Szenario 3**

Aufschlussreich ist auch der Blick auf die Beschäftigungseffekte. Während diese bei der Gemüseerzeugung nicht sehr hoch sind, hat vor allem die Erzeugung von Hähnchenfleisch einen sehr hohen positiven Einfluss auf die Beschäftigung, da hier viele verschiedene Branchen involviert sind.

### **Analyse Szenario 4**

Werden nun alle Äquivalente und diverse andere Indikatoren in der Bewertung berücksichtigt, lässt sich ein umfassenderes Bild der Nachhaltigkeit in den Erzeugungsprozessen zeichnen. Auffällig ist, dass die ökologischen Varianten immer besser bewertet sind, als die entsprechenden normalen Erzeugungsprozesse. Führend in der erreichten Punkteanzahl sind aber wieder die Optionen der Erzeugung von Kartoffeln und Feldgemüse.

Das Ergebnis könnte hier etwa das eigene Konsumverhalten sein, öfter auf Fleisch zu verzichten und stattdessen Gemüse zu verzehren oder tiefgehendere Analysen der Prozessketten vorzunehmen, um Potenzial technologischer Verbesserungsmöglichkeiten zur Reduzierung des Schadstoffausstoßes aufzuzeigen.

## **3.4 Zusammenfassung**

In diesem Kapitel wurde gezeigt, wie das Werkzeug zur Bewertung von Nachhaltigkeit unter Verwendung eines gegebenen Bewertungsschemas und der von GEMIS gelieferten Daten bei Berücksichtigung individuell einstellbarer Gewichtungen der Dimensionen, Kriterien und Indikatoren ein vergleichbares Ergebnis liefern kann. Mit Hilfe dieses Ergebnisses können Rückschlüsse auf Verbesserungsmöglichkeiten im Herstellungsprozess gezogen werden, etwa durch den Einsatz neuer Technologien. Es bietet aber ebenso eine Möglichkeit zur Kontrolle über den tatsächlich erreichten Nachhaltigkeitswert und kann somit als Argumentationsgrundlage in Entscheidungsfindungen dienen. Im folgenden Kapitel wird der Bezug zum Thema Wasserstoff

gespannt, da hier betrachtet werden soll, wie die Energie zur Herstellung von Wasserstoff möglichst nachhaltig erzeugt werden kann.

# 4 Nachhaltigkeitsbewertung der Energieerzeugung zur Herstellung von Wasserstoff

In der Einführung wurde dargestellt, dass Wasserstoff als Antriebsmittel in naher Zukunft eine entscheidende Rolle spielen kann. Das HyWays-Projekt sollte den Grundstein zur Implementierung einer Wasserstoffinfrastruktur in Europa legen. Mit dem Wechsel von fossilen Brennstoffen als Antriebsmittel für das Transportwesen hin zu umweltfreundlicheren Mitteln, erwächst eine große Chance, die Umweltprobleme ein wenig einschränken zu können. Daher ist es von äußerster Wichtigkeit, bereits bei der Entwicklung der Infrastruktur zur Bereitstellung von Wasserstoff auf Nachhaltigkeit zu achten. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit die Nachhaltigkeit im Herstellungsprozess von Wasserstoff fokussiert und überprüft, wie die Energie zur Erzeugung von Wasserstoff möglichst nachhaltig gewonnen werden kann. Im Folgenden wird der in Abschnitt 3.2.2 beschriebene Ablaufplan zur Bewertung von Nachhaltigkeit auf die Thematik der Energieerzeugung zur Herstellung von Wasserstoff angewendet (Ball u. a., 2009, S. 385 ff.).

## 4.1 Fragestellung und Zieldefinierung

Wie im Einführungsbeispiel in 3.3 vorgeführt, gilt es vor der Bewertung zunächst die grundlegenden Ziele einer Bewertung festzulegen. Ziel dieser Bewertung ist es, verschiedene Energieerzeugungsformen zu vergleichen, die bei der Herstellung von Wasserstoff zum Einsatz kommen. Das HyWays-Projekt berücksichtigt in der Modellierung zur Erstellung eines Plans zum Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur in Europa hauptsächlich ökonomische Aspekte. Ökologische Kriterien werden meist nur durch den CO<sub>2</sub>-Ausstoß, die CO<sub>2</sub>-Äquivalente und den Energiebedarf abgebildet (Weindorf, 2006, S. 5).

Eines der Hauptziele der Einführung einer solchen Infrastruktur ist aber die Verminderung von Umweltverschmutzungen. Daher ist die Eingrenzung auf einige wenige ökologische Faktoren zwar aus Gründen der Komplexität nachvollziehbar, aber dennoch nicht weitreichend genug. Hier setzt diese Arbeit an, die viele zusätzliche Indikatoren—wie sie in Kapitel 2 aufgelistet wurden—in die Bewertung mit einfließen lässt. Dabei liegt der Fokus auf der Energieerzeugung, die im HyWays-Projekt während des Herstellungsprozesses für Wasserstoff benötigt wird. Die folgenden Abschnitte sollen zunächst einen detaillierteren Überblick über das HyWays-Projekt geben (Weindorf, 2006, S. 5).

### **4.1.1 Die Grundlagen des HyWays-Projektes**

Für die Umsetzung der HyWays-Vision eines europäischen Fahrplans zur Implementierung einer Wasserstoffinfrastruktur, bedurfte es eines Modells anhand welchem die formulierten Ziele und Visionen umgesetzt werden konnten. Die folgenden Abschnitte sollen einen kurzen Überblick über die Zielsetzungen, Vorgehensweisen zum Aufstellen des Modells und die vorläufigen Ergebnisse geben (Seydel u. Wietschel, 2007, S. 2).

#### **Das Ziel**

Das Ziel des HyWays-Projektes war es, einen europäischen Ansatz zur Lösung für die entstehende Problematik in der Beschaffung der für das heutige Transportwesen notwendigen Rohstoffe zu finden (Seydel u. Wietschel, 2007, S. 2). Um das ambitionierte Ziel eines Wasserstoffinfrastrukturaufbaus für Europa umsetzen zu können, wurden in der Roadmap die technologischen Anforderungen in den Bereichen

- Produktion,
- Transport,
- Distribution und
- Speicherung des Wasserstoffs, berücksichtigt (Seydel u. Wietschel, 2007, S. 2).

Nur unter der Berücksichtigung der für einen Wechsel von fossilen Brennstoffen hin zu Wasserstoff benötigten Kombination verschiedener Technologien und deren Anwendbarkeit, ist eine Marktpenetration sowohl der in Tankstellen als auch der in Fahrzeugen verwendeten neuen Technologie möglich (Seydel u. Wietschel, 2007, S. 3).

Das Model for Optimisation of Regional Hydrogen Supply (Modell zur Optimierung der regionalen Wasserstoffversorgung) (MOREHyS) wurde vom Deutsch-Französischen Institut für Umweltforschung DFIU in Kooperation mit dem Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) entwickelt. Es sollte den Aufbau der Versorgungsinfrastruktur—in Zusammenhang mit einem dadurch entstehenden Zeitablauf—optimieren und gleichzeitig ökonomische und ökologische Auswirkungen und Gegebenheiten berücksichtigen (Ball u. a., 2009, S. 390 f.).

### **Die Methodik**

In drei Schritten sollte dabei der vorgesehene Aktionsplan umgesetzt werden. Im ersten Schritt wurde die Langzeit-Vision erstellt. Durch ein Auswahlverfahren wurden zunächst sechs verschiedene, europäische Staaten selektiert, für die jeweils einzelne, eigene Roadmaps erstellt und diese in einem späteren Schritt zu einer ganzheitlichen, europäischen Roadmap weiterentwickelt werden sollten (Seydel u. Wietschel, 2007, S. 3).

Im zweiten Schritt wurde nun ausgelotet, welche Technologien in den oben genannten Bereichen benötigt werden, um die Marktpenetration der neuen Wasserstofftechnologie voranzutreiben. Aus diesen Überlegungen und Analysen sollte die Technologie-Roadmap entstehen. Zugleich mussten sozio-ökonomische Aspekte mittels einer sozio-ökonomischen Roadmap mit in die Erstellung einfließen. Vor allem die Berücksichtigung von Faktoren, wie etwa der Investitionen in den Infrastrukturaufbau, Beschäftigung oder des Bruttoinlandsproduktes der jeweiligen Länder mussten hier in die Überlegungen mit eingebaut werden (Seydel u. Wietschel, 2007, S. 3).

Im dritten und letzten Schritt wurden diese Ergebnisse in einem EU Action Plan zusammengefasst. Dieser Action Plan beinhaltete für jeden Mitgliedsstaat eine eigene Roadmap. In den spezifischen Roadmaps wurden die notwendigen Schritte zur Implementierung einer Wasserstoffinfrastruktur in den Ländern dargelegt (Seydel u. Wietschel, 2007, S. 3).

### **Die Energiepfade des HyWays-Projektes**

Im Verlauf der Erstellung des HyWays-Projektes ging es auch um die Frage, auf welche Art und Weise die Energie zur Herstellung von Wasserstoff gewonnen werden sollte. Es wurde ersichtlich, dass es anfänglich notwendig war, die benötigte Energie aus hinsichtlich der Umweltschonung fragwürdigen Quellen zu beziehen, wie etwa

der Atomkraft oder durch Kohlekraftwerke. Die Forderung kann somit lauten: wenn schon ein revolutionärer Umbruch im Transportsektor angestrebt wird, warum sollte dann nicht auch ein revolutionärer Umbruch in der Energieerzeugung vorgenommen werden? Die folgende Abbildung 4.1 listet alle selektierten Energiepfade zur Herstellung von Wasserstoff für die Bereitstellungen an Tankstellen in Deutschland auf. Der Energiepfad beschreibt dabei den Weg von der Primärenergie- bzw. der Quelle, aus welcher Wasserstoff gewonnen werden soll, über die Verarbeitung und die Transporte, hin zur Bereitstellungsform beim Endverbraucher (Wahrig-Burfeind, 2007, S. 380 f.).

Tabelle 4.1: Selektierte Energiepfade des HyWays-Projektes für Deutschland

Elektrizität bzw. H <sub>2</sub> - Gewinnung	Transport 1	Verarbeitungs- ort	Transport 2	Endprodukt
Erdgas	Pipeline	Zentraler Dampfreform- er	H <sub>2</sub> -Pipeline	Druckwasser- stoff (CGH <sub>2</sub> )
Erdgas	Pipeline	Zentraler Dampfre- former und Verflüssigung	Flüssig- wasserstoff (LH <sub>2</sub> )-Truck	Gasförmiges H <sub>2</sub> aus flüssi- gem Wasser- stoff (LCGH <sub>2</sub> )
Erdgas	Pipeline	Dampfre- former vor Ort		CGH <sub>2</sub>
Elektrizitätsmix		Zentrale Elektrolyse	H <sub>2</sub> -Pipeline	CGH <sub>2</sub>
Elektrizitätsmix		Elektrolyse vor Ort		CGH <sub>2</sub>
Offshore-Wind- elektrizität		Zentrale Elektrolyse	H <sub>2</sub> -Pipeline	CGH <sub>2</sub>
Offshore-Wind- elektrizität		Elektrolyse vor Ort		CGH <sub>2</sub>
Onshore-Wind- elektrizität		Elektrolyse vor Ort		CGH <sub>2</sub>
Biomasse (Holz)	Truck	Dezentrale Vergasung		CGH <sub>2</sub>
H <sub>2</sub> als Neben- produkt	Pipeline			CGH <sub>2</sub>
Steinkohle		Vergasung und Verflüs- sigung	LH <sub>2</sub> -Truck	LCGH <sub>2</sub>
Steinkohle		Vergasung	H <sub>2</sub> -Pipeline	CGH <sub>2</sub>

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Stiller, 2007, S. 20).

Ziel muss es sein, diese Pfade so nachhaltig wie möglich zu gestalten. Um die Komplexität einzuschränken, soll in dieser Arbeit der Fokus auf der Energiezufuhr in Form von Elektrizität gelegt werden. Es stellt sich die Frage, wie diese Energie nachhaltig genug gewonnen werden kann.

#### 4.1.2 Der “German Electricity Mix 2020”

In nahezu allen für Deutschland ausgewählten Energiepfaden des HyWays-Projektes wird die in den jeweiligen Pfaden benötigte Energie für die einzelnen Prozesse aus einem Elektrizitätsmix generiert, der als “German Electricity Mix 2020” bezeichnet wird. Dieser Mix setzt sich aus den für das Jahr 2020 prognostizierten Energiegewinnungsformen für Deutschland zusammen. Im Jahr 2020 wird die Gesamtenergie für Deutschland (640.072 Gigawattstunden (GWh)) aus den aufgelisteten Energieträgern wie folgt erzeugt:

- Kohle: 262.322 GWh,
- Gas: 150.531 GWh,
- Wind: 103.009 GWh,
- Biomasse und -müll: 36.112 GWh,
- Atomenergie: 34.576 GWh,
- Wasser: 22.349 GWh,
- Sonne: 18.230 GWh,
- Öl: 12.229 GWh und
- Geothermie: 714 GWh (Capros u. a., 2009, S. 87, Anhang 2A).

Da nun feststeht, woher die Energie zur Herstellung von Wasserstoff bezogen wird, lässt sich ein genauerer Blick auf die Nachhaltigkeit der einzelnen Energiegewinnungsformen werfen (Capros u. a., 2009, S. 87, Anhang 2A) und somit die Prozessketten in GEMIS auswählen.

## 4.2 Datensätze der Prozessketten auswählen

Da nun bereits zuvor festgelegt wurde, was der Untersuchungsgegenstand sein soll, können nun in GEMIS die entsprechenden Datensätze ausgewählt werden. Bereits voreingestellt ist ein Szenario mit dem Namen PRIMES, welches die Energieerzeugung für Deutschland im Jahr 2020 analog zum “German Electricity Mix” abbilden soll. Dieses Szenario wird als Grundlage dienen, um die Nachhaltigkeit der einzelnen Energieerzeugungsprozesse bewerten zu können. Um aber neben den für das PRIMES-Szenario ausgewählten Kraftwerke auch andere Technologien zu analysieren, wurde für diese Arbeit das PRIMES-Szenario um weitere Energieerzeugungsformen erweitert. Tabelle 4.2 listet die letztendlich ausgewählten Prozesse auf. Eine kurze Beschreibung der einzelnen Kraftwerke findet sich zudem in Anhang A.3.

Tabelle 4.2: Ausgewählte Prozesse zur Energieerzeugung für Deutschland im Jahr 2020

Nummer	Beschreibung	Datensatz
1	Steinkohlekraftwerk 1	PRIMES
2	Steinkohlekraftwerk 2	PRIMES
3	Braunkohlekraftwerk	PRIMES
4	Atomkraftwerk	PRIMES
5	Wasserkraftwerk	PRIMES
6	Windpark onshore	PRIMES
7	Windpark offshore	PRIMES
8	Solarzellen	PRIMES
9	Geothermiekraftwerk	PRIMES
10	Biomasse Altholz	PRIMES
11	Ballaststeinkohlekraftwerk	PRIMES
12	Gichtgaskraftwerk	PRIMES
13	Schwerölkraftwerk	PRIMES
14	Erdgaskraftwerk 1	PRIMES
15	Erdgaskraftwerk 2	Zusätzlich
16	Müllkraftwerk	Zusätzlich
17	Deponiegaskraftwerk	Zusätzlich
18	Klärgaskraftwerk	Zusätzlich
19	Biogaskraftwerk Mais	Zusätzlich
20	Biomasse Rapsöl	Zusätzlich

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Öko-Institut e.V., 2010).

## 4.3 Referenz-, Grenz- und Zielwerte bestimmen

Im nächsten Schritt müssen nun für alle Indikatoren die Referenz-, Grenz- und Zielwerte ermittelt werden. Für die sozio-kulturelle Dimension sind die weichen Kriterien anhand eigener Einschätzungen und unter Berücksichtigung der in Abschnitt 2.5 vorgestellten Skalen, zu bewerten. Diese werden im Folgenden besprochen.

### 4.3.1 Referenz-, Grenz- und Zielwertbestimmung für die Indikatoren der ökologischen und ökonomischen Dimension

Das um sechs Energieerzeugungsoptionen erweiterte Datenset des PRIMES-Szenarios aus GEMIS dient als Grundlage zur Bestimmung der Referenz-, Grenz- und Zielwerte. Verschiedene Kraftwerkstypen haben verschiedene prozentuale Anteile an der Energiegewinnung für Deutschland im Jahr 2020. GEMIS berechnet die Werte aller Indikatoren in Bezug auf die Anteile, die diese am Elektrizitätsmix haben, sodass ein einzelner, bestimmter Wert für jeden Indikator gegeben ist. Dieser stellt etwa den CO<sub>2</sub>-Ausstoß des PRIMES-Szenarios (plus der sechs zusätzlichen Optionen) dar. Diese Werte werden für die weitere Analyse als Referenzwerte herangezogen.

Nun werden die Kraftwerkstypen nicht als Gesamtheit, sondern jedes einzeln betrachtet. Für jeden Indikator wird der Höchst- und Niedrigstwert gesucht. Diese werden als Grenz- bzw. Zielwerte—unter Berücksichtigung einer 15%-igen Toleranz—für die Indikatoren verwendet. Zu beachten gilt, dass der Indikator Beschäftigungseffekte als einziger den höchsten Wert als Ziel- und den niedrigsten Wert als Grenzwert erhält (Öko-Institut e.V., 2010).

### 4.3.2 Referenz-, Grenz- und Zielwertbestimmung für die Indikatoren der sozio-kulturellen Dimension

Bei den Indikatoren der sozio-kulturellen Dimension kann nicht auf konkrete Werte zurückgegriffen werden, die GEMIS ausgibt. Vielmehr war es hier nötig, anhand der Punkteinteilung, die bereits in Abschnitt 2.5 aufgelistet wurden, eine Bewertung selbst vorzunehmen. Eine Aufschlüsselung welche Option welche Bewertung bei welchem Indikator erhalten hat, kann Anhang A.4 entnommen werden.

## 4.4 Gewichtungen festlegen

Nun geht es darum, mit Hilfe verschiedener Gewichtungen diverse Analysen vorzunehmen. Analog zum Einführungsbeispiel in Abschnitt 3.3, werden verschiedene Gewichtungsszenarien erstellt, die helfen sollen, die verschiedenen Umweltwirkungen der Prozessketten besser analysieren zu können. In den folgenden Abschnitten sind die Gewichtungen der einzelnen Szenarien detaillierter beschrieben.

### 4.4.1 Szenario 1: CO<sub>2</sub>-Äquivalente

Analog zum Einführungsbeispiel werden zunächst nur die CO<sub>2</sub>-Äquivalente gewichtet. Somit ergibt sich eine Gewichtung von 100% für die ökologische Dimension, 100% für Kriterienliste der Treibhausgase und 100% für den Indikator CO<sub>2</sub>-Äquivalente (Erdmann u. Zweifel, 2008, S. 350).

### 4.4.2 Szenario 2: Alle Äquivalente

Zusätzlich zu den CO<sub>2</sub>-Äquivalenten werden nun auch die SO<sub>2</sub>- und TOPP-Äquivalente miteinbezogen. Weiterhin wird die ökologische Dimension mit 100% gewichtet. Da das CO<sub>2</sub>-Äquivalent die schädlichste Umweltwirkung besitzt, wird dieses mit 50%, das SO<sub>2</sub>-Äquivalent entsprechend mit 30% und das TOPP-Äquivalent mit 20% gewichtet (Fritsche u. Schmidt, 2008, S. 40 ff.).

### 4.4.3 Szenario 3: Gleichgewichtung aller Kriterien

Vernachlässigt man die Tatsache, dass die Indikatoren jeweils unterschiedliche Umweltwirkungen besitzen, so kann auch ein Szenario der Gleichgewichtung aller Indikatoren erstellt werden. Hierfür besitzt jeder Indikator der drei Dimensionen eine Gewichtung von 2,86% (Öko-Institut e.V., 2010).

### 4.4.4 Szenario 4: Beschäftigungseffekte

Aus ökonomischer Sicht ist es durchaus von Interesse, sich die Beschäftigungseffekte der einzelnen Prozessketten zur Erzeugung von Energie anzusehen. Daher wird in diesem Szenario die Gewichtung der ökonomischen Dimension und des Indikators der Beschäftigungseffekte auf 100% festgelegt. So lassen sich Branchen finden, die

eine höhere oder niedrigere Auswirkung auf die Beschäftigung haben (Öko-Institut e.V., 2010).

#### 4.4.5 Szenario 5: Spezielle Gewichtung

In diesem Szenario werden nun fast alle<sup>1</sup> Indikatoren gewichtet. Es bedarf weiterer Untersuchungen, wie genau die einzelnen Indikatoren im Verhältnis zueinander gewichtet werden müssten. In dieser Arbeit werden die unterschiedlichen Umweltwirkungen versucht in etwa nachzubilden, ohne zu detailliert auf die Verhältnismäßigkeit einzugehen. Die Dimensionen werden mit 57,50% (ökologische Dimension), 5% (ökonomische Dimension) und 37,50% (sozio-kulturelle Dimension) gewichtet. In Anhang A.2 findet sich die Gewichtungsverteilung der Indikatoren (Fritsche u. Schmidt, 2008, S. 37 ff.).

### 4.5 Analyse der Gewichtungsszenarien

Um den Grad der Nachhaltigkeit bestimmen zu können, wurden nun vom Werkzeug die Bewertungspunkte für jedes einzelne Szenario mit der rot–weiß–grünen Skalierung ausgegeben. Ein genauerer Blick auf einzelne Ergebnisse bietet vielfältige Analysemöglichkeiten wie die verschiedenen Gewichtungsszenarien zeigen werden. Abbildung 4.1 liefert die erreichten Punkte (von mindestens 10 bis maximal 100 Punkte) aller Optionen in den jeweiligen Szenarien in Bezug auf deren Zielerreichung von Nachhaltigkeit.

Unter Verwendung dieses Bewertungsergebnisses können nun nähere Analysen vorgenommen werden.

#### 4.5.1 Analyse Szenario 1

Auffällig bei den Ergebnissen in Szenario 1 ist, dass die Energieerzeugung mittels Atomkraftwerk eine ausgezeichnete Bewertung in Bezug auf das CO<sub>2</sub>-Äquivalent erhält. Weniger überraschend ist hingegen, dass Kraftwerke, welche fossile Brennstoffe verwenden, entweder sehr schlecht (Steinkohlekraftwerk 1, Erdgaskraftwerke 1 und 2, etc.) oder gar die schlechtest mögliche Bewertung (Braunkohlekraftwerk)

---

<sup>1</sup>Manche Indikatoren werden bereits bei der Berechnung der Äquivalente berücksichtigt. So fließen in die Berechnung des SO<sub>2</sub>-Äquivalentes etwa die Indikatoren NO<sub>x</sub>, HCl, HF, etc. mit ein. Diese bleiben in Szenario 5 daher als einzelne Indikatoren außen vor (Fritsche u. Schmidt, 2008, S. 59).

Abbildung 4.1: Erreichte Punktzahl der einzelnen Energieerzeugungsoptionen im Anwendungsfall

Bezeichnung	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4	Szenario 5
	CO <sub>2</sub> -Äquivalente	CO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> - & TOPP-Äquivalente	Gleichgewichtung	Beschäftigungseffekte	Spezielle Gewichtung
Steinkohlekraftwerk 1	14,84	28,88	65,60	29,11	64,82
Braunkohlekraftwerk	10,00	36,89	67,76	17,15	60,26
Erdgaskraftwerk 1	62,29	62,95	78,45	13,52	74,67
Erdgaskraftwerk 2	63,93	60,31	78,72	10,00	74,61
Atomkraftwerk	97,39	94,66	74,68	43,43	60,57
Wasserkraftwerk	96,56	97,14	83,20	50,48	79,50
Steinkohlekraftwerk 2	10,00	30,56	70,30	29,03	68,56
Windpark onshore	98,03	99,01	83,42	50,06	84,32
Windpark offshore	97,97	98,99	85,25	50,37	83,02
Solarzellen	87,00	73,52	67,86	50,76	79,32
Geothermiekraftwerk	94,01	94,78	73,94	51,33	73,53
Biomasse Altholz	98,75	73,45	65,83	50,22	75,47
Ballaststeinkohlekraftwerk	11,37	28,82	69,97	16,38	67,99
Schwerölkraftwerk	16,91	30,50	52,86	36,99	38,73
Gichtgaskraftwerk	10,00	23,74	78,21	30,13	80,98
Deponiegaskraftwerk	99,99	77,00	87,63	23,49	89,84
Klärgaskraftwerk	100,00	78,42	88,14	42,52	91,06
Biogaskraftwerk Mais	82,09	60,77	66,37	50,56	65,46
Biomasse Rapsöl	66,56	43,29	60,89	50,47	62,68
Müllkraftwerk	86,88	62,94	75,61	52,09	79,48

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Öko-Institut e.V., 2010).

erreichen. Ebenso beachtenswert ist, dass auch die Verwendung von Gichtgas in diesem Zusammenhang mit der schlechtesten Bewertung versehen wird. Dies ließe darauf schließen, Atomkraft als saubere Energie anzupreisen. In weiterer Folge—unter Berücksichtigung anderer Indikatoren—wird diese Annahme allerdings widerlegt. Bestätigen lässt sich hingegen, dass die allgemein als umweltfreundlich bzw. nicht umweltfreundlich geltenden Energieerzeugungsoptionen in diesem Szenario auch erwartungsgemäß eine sehr gute bzw. sehr schlechte Bewertung erhalten (Öko-Institut e.V., 2010).

#### 4.5.2 Analyse Szenario 2

Werden nun neben dem CO<sub>2</sub>-Äquivalent auch die anderen beiden Äquivalente berücksichtigt, so verschlechtert sich die Bewertung von Biogas aus Mais (von 82,09

auf 60,77 Punkte) deutlich. Es wird ersichtlich, dass dieser Energieträger zwar keine großen, negativen Umweltwirkungen auf den Treibhauseffekt hat, dafür jedoch umso größere, negative bei der Versauerung und Eutrophierung. Gleiches gilt z.B. auch für das Müllkraftwerk (von 86,88 auf 62,94 Punkte). Einige wenige Optionen werden aber deutlich besser bewertet, da die schlechte Umweltwirkung beim Treibhauseffekt durch bessere Umweltwirkungen bei den anderen beiden Äquivalenten kompensiert wird. Im grünen Bereich der Bewertungsskala befinden sich diese dennoch nicht, wie etwa das Braunkohlekraftwerk (von 10,00 auf 36,89 Punkte) (Öko-Institut e.V., 2010).

### **4.5.3 Analyse Szenario 3**

Gibt man allen Indikatoren die gleiche Gewichtung, ergeben sich einige Verschiebungen vom roten in den grünen Bereich. Erdgaskraftwerk 1 und 2, Steinkohlekraftwerk 2, Gichtgaskraftwerk und das Müllkraftwerk wechseln vom (leicht) roten in den (leicht) grünen Bereich. Der Grund beim Gichtgaskraftwerk liegt bei den sozio-kulturellen Indikatoren, die bei dieser Option mit einer hohen Punkteanzahl bewertet werden. Eine Erkenntnis hieraus wäre, dass beim Einsatz eines Gichtgaskraftwerkes Technologien zur Reduzierung des Ausstoßes an treibhauswirksamen Gasen die Bewertung noch weiter verbessern würden (Öko-Institut e.V., 2010).

Vom (leicht) grünen in den (leicht) roten Bereich wechseln hingegen die Biomasse aus Altholz und das Müllkraftwerk. Zwar sind hier die sozio-kulturellen Kriterien mit sehr hohen Punktzahlen bewertet, jedoch werden bei diesen Optionen relativ viele Schadstoffe in das Abwasser eingeleitet, die die Bewertung nach unten fallen lassen. Auch hier könnte ein möglicher Ansatz die Verbesserung der Technologie zur Verminderung des Eintrages von Schadstoffen in das Abwasser sein (Öko-Institut e.V., 2010).

### **4.5.4 Analyse Szenario 4**

Bei der ausschließlichen Betrachtung der Beschäftigungseffekte, schneiden viele Optionen mit knapp über 50 erreichten Punkten ab. Diese Werte weisen auf nicht befriedigende Beschäftigungswirkungen hin. Kaum positiv auf die Beschäftigung wirkt sich das Erdgaskraftwerk 1 und 2, sowie das Ballaststeinkohlekraftwerk aus. Hier sind nicht so viele verschiedene Branchen entlang der Prozesskette involviert, wie es bei den anderen Optionen der Fall ist (Öko-Institut e.V., 2010).

### 4.5.5 Analyse Szenario 5

Dieses Szenario kann als umfassende Analyse der Nachhaltigkeit der verschiedenen Optionen angesehen werden, da nahezu alle Indikatoren darin berücksichtigt wurden. Klar ersichtlich ist hier, dass die Option Atomkraftwerk vom ehemals grün eingefärbten Wert in Szenario 1 nun nur noch einen leicht roten erreicht (von 97,39 auf 60,57 Punkte). Die sozio-kulturellen Kriterien spielen hierbei eine große Rolle, da die Technologie der Atomkraft hier teilweise die schlechtestmögliche Bewertung erhielt. Aus den gleichen Gründen fiel auch bei beim Biogaskraftwerk (Mais) die Bewertung in den roten Bereich. Der mögliche Einsatz von Gentechnik und die Entstehung von Monokulturen waren hier die ausschlaggebenden Argumente (Öko-Institut e.V., 2010).

Erheblich verbessert hat sich hingegen der Einsatz von Erdgas (von 62,29 bzw. 63,93 auf 74,67 bzw. 74,61). Die sozio-kulturellen Indikatoren wirken hier—im Gegensatz zu den oben erwähnten Optionen—positiv. Vor allem der Sicherheitsaspekt hat einen stark positiven Einfluss (Öko-Institut e.V., 2010).

Den größten Sprung nach vorne macht aber das Gichtgaskraftwerk (von 10,00 auf 80,98 Punkte). Hatte es bei den CO<sub>2</sub>-Äquivalenten in Szenario 1 noch den schlechtesten Wert, so ist es jetzt im oberen Drittel der Bewertungsskala. Die positiven Werte bei der Abwassereinleitung und der sozio-kulturellen Kriterien, sorgten hier für eine erhebliche Verbesserung (Öko-Institut e.V., 2010).

Die Energieerzeugung unter der Verwendung von Schweröl hingegen, verbessert sich zwar leicht, bleibt aber dennoch im tiefroten Bereich. Die Auswirkungen eines Unfalls und die negative Technologieakzeptanz verhindern eine höhere Bewertung. Gleiches gilt für das Braunkohle- und Steinkohlekraftwerk 1. Beide behalten ihre rote Farbmarkierung. Allerdings spielt hier nicht der Sicherheitsfaktor die ausschlaggebende Rolle, sondern vielmehr die Verschmutzung und Zerstörung der Umwelt, die durch den Abbau und Einsatz von Kohle während des Prozesses entsteht (Öko-Institut e.V., 2010).

## 4.6 Ergebnis

Die vorherigen Abschnitte haben gezeigt, wie durch eine individuelle Gewichtung verschiedener Indikatoren verschiedene Analysen der Energieerzeugungsformen in Hinblick auf Nachhaltigkeit vorgenommen werden können. Die folgende Tabelle 4.3 reiht nun die verschiedenen Optionen nach den in Szenario 5 erreichten Punkten

auf, wobei die Trennlinien jeweils den Bereich von 100 bis 80, 79 bis 50 und 49 bis 10 Punkte markieren.

Tabelle 4.3: Nach erreichten Punkten sortierte Reihung der Optionen

Platz	Option	Punkte
1	Klärgaskraftwerk	91,06
2	Deponiegaskraftwerk	89,84
3	Windpark onshore	84,32
4	Windpark offshore	83,02
5	Gichtgaskraftwerk	80,98
6	Wasserkraftwerk	79,50
7	Müllkraftwerk	79,48
8	Solarzellen	79,32
9	Biomasse Altholz	75,47
10	Erdgaskraftwerk 1	74,67
11	Erdgaskraftwerk 2	74,61
12	Geothermiekraftwerk	73,53
13	Steinkohlekraftwerk 2	68,56
14	Ballaststeinkohlekraftwerk	67,99
15	Biogaskraftwerk Mais	65,46
16	Steinkohlekraftwerk 1	64,82
17	Biomasse Rapsöl	62,68
18	Atomkraftwerk	60,57
19	Braunkohlekraftwerk	60,26
20	Schwerölkraftwerk	38,73

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Öko-Institut e.V., 2010).

Aus dieser Aufteilung ergeben sich folglich drei Kategorien. Die erste ist der Bereich von 100 bis 80 Punkten, mit Optionen, die nahezu unbedenklich eingesetzt werden können und als nachhaltig einzustufen sind.

Im zweiten Bereich hingegen, ist die Bezeichnung nachhaltig durchaus fragwürdiger, da diese Technologien teilweise große Probleme aufwerfen können (79 bis 50 Punkte). Beispielhaft sei hier die Atomkraft erwähnt, deren ökologische Dimension zwar durchaus positiv bewertet wurde, aber eine insgesamt eher schlechte Gesamtpunktezahl aufgrund der sozio-kulturellen Indikatoren erreicht.

Die dritte Kategorie umfasst den Bereich von 49 bis 10 Punkte. Optionen, die dieser Gruppe zugeordnet sind, können nicht als nachhaltig bezeichnet werden, da zu viele Indikatoren die Bewertung insgesamt zu negativ beeinflussen. Eine Bewertung schlechter als 50 Punkte stellt ein Ausschlusskriterium dar.

Für die Verwendung dieser Optionen im Kontext der Energieerzeugung zur Herstel-

lung von Wasserstoff bedeutet dies, dass es das Ziel sein muss, die Energie hauptsächlich aus den nachhaltigen Optionen (100 bis 80 Punkte) zu erzeugen. Sicher ist dies aus vielerlei Gründen schwierig (z.B. Speicherapazität der Energie, Leistung des Kraftwerks, etc.), dennoch muss ein Versuch unternommen werden, die Anteile dieser Kraftwerke an der gesamten Stromproduktion zu erhöhen, um einen insgesamt nachhaltigeren Strommix für das Jahr 2020 gewährleisten zu können.

## 5 Diskussion

Als Basis dieser Arbeit diente das HyWays-Projekt, welches zeigte, wie ein Wechsel von fossilen Brennstoffen zu alternativen Antriebsmitteln gelingen kann. Dass dabei auch der Aspekt der Nachhaltigkeit seine Berücksichtigung finden muss, ergab sich aus der Zielformulierung. Ein Wechsel sollte nicht nur aufgrund der Verknappung des Rohstoffs Öl vorgenommen werden, sondern auch um gleichzeitig umweltfreundlichere, neue Antriebstechnologien zu implementieren. Den Begriff Nachhaltigkeit mit messbaren Attributen zu füllen, ist komplex. Unter Verwendung der in dieser Arbeit vorgestellten Kriterien und Indikatoren gelang es, die Optionen zur Energieerzeugung im Herstellungsprozess von Wasserstoff zu beurteilen und aufzuzeigen, welche Alternativen als nachhaltig angesehen werden und welche nicht. Entscheidungsträger könnten mit diesem Ergebnis bestimmen, welche Optionen etwa Fördergelder oder Subventionen erhalten. Für das HyWays-Projekt bedeutet dieses Ergebnis, dass die Stromerzeugung nicht als eigene Einheit im Sinne des “German Electricity Mix” angesehen werden sollte, sondern vielmehr versucht werden muss, in Modellen die Energie aus nachhaltigen Optionen zu beziehen. Hier besteht noch Entwicklungspotenzial, wenngleich auch zu berücksichtigen gilt, dass andere Aspekte—z.B. dass ein Windrad bei Windstille kein Strom erzeugt und dieser Ausfall von anderen Optionen aufgefangen werden muss—auch eine entscheidende Rolle spielen, die in dieser Arbeit außen vor gelassen wurden.

Es gibt noch eine Reihe anderer Faktoren, die bei einer noch detaillierteren Analyse der Nachhaltigkeit von Prozessen einzuarbeiten sind. Dies ist die Aufgabe weiterer Rechercharbeit. Der Vorteil des in Kapitel 3 vorgestellten Werkzeuges, liegt darin, dass die Indikatorenliste beliebig erweitert werden kann. So sind noch umfassendere Analysen der Zielerreichung von Nachhaltigkeit möglich. Auch die Auswahl der Referenz-, Grenz- und Zielwerte sollte in einem noch verfeinerteren Verfahren vorgenommen werden. Das ausgewählte Verfahren ist für diese Arbeit aber dennoch ausreichend und zielführend.

Auch bei der Optionenauswahl bei der Energieerzeugung im Herstellungsprozess von Wasserstoff für den deutschen Markt, die sich in dieser Arbeit auf 20 Alternativen

beschränkte, besteht weiterer Recherchebedarf. Eine Möglichkeit der Erweiterung wäre etwa Kraftwerke mit neueren, moderneren Technologien z.B. bei der Filtertechnik, auszuwählen.

Ein weiterer Ansatzpunkt für etwaige Verbesserungen am Werkzeug stellt die Gewichtung dar. Hier sollten einerseits die Wechselwirkungen zwischen den Indikatoren und andererseits die Umweltwirkungen besser berücksichtigt werden

Das Ergebnis lieferte einen aufschlussreichen Einblick, inwiefern die Energieerzeugung verschiedener Kraftwerkstypen als nachhaltig bzw. eher nicht nachhaltig anzusehen ist. Sowohl das Einführungsbeispiel als auch die konkrete Anwendung des Bewertungswerkzeuges haben gezeigt, welche Analysemöglichkeiten sich durch dessen Verwendung ergeben. Zudem kann es die Entscheidungsfindung eines Unternehmens unterstützen, das dem nachhaltigen Herstellungsprozess—etwa aus Imagegründen—eine große Rolle zuspricht. Sind ausreichend Daten für Herstellungsprozesse vorhanden, kann jegliche Art von Prozessen innerhalb kurzer Zeit verglichen werden. Hieraus ergibt sich eine Vielzahl von Anwendungs-, Analyse- und Vergleichsmöglichkeiten. Abschließend lässt sich konstatieren, dass das Werkzeug zur Beurteilung von Nachhaltigkeit einerseits noch viel Potenzial für Verbesserungen und Erweiterungen besitzt, aber andererseits bereits gute Ergebnisse erzielt, unter deren Verwendung tiefgehende Analysen der Prozessketten zur Verbesserung derselbigen ermöglicht werden.

# Literaturverzeichnis

- [Aden 2012] ADEN, Harmut ; EHRHART, Hans-Georg (Hrsg.) ; FREVEL, Bernhard (Hrsg.) ; SCHUBERT, Klaus (Hrsg.) ; SCHÜTTELMEYER, Suzanne S. (Hrsg.): *Umweltpolitik: Elemente der Politik*. 1. Auflage. Wiesbaden : VS Verlag für Sozialwissenschaften, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2012
- [ARGEMUC 2012] ARGEMUC: *Meilensteine seit 1994*. <http://argemuc.de/de/index.php?id=5&subId=3>. Version: April 2012
- [Bahadir u. a. 2000] BAHADIR, M. ; PARLAR, H. ; SPITELLER, M. ; BAHADIR, M. (Hrsg.) ; PARLAR, H. (Hrsg.) ; SPITELLER, M. (Hrsg.): *Springer Umweltlexikon*. 2. Auflage. Heidelberg : Springer-Verlag, 2000
- [Ball u. a. 2009] BALL, Michael ; SEYDEL, Philipp ; WIETSCHEL, Martin ; STILLER, Christoph: Hydrogen-infrastructure build-up in Europe. In: BALL, Michael (Hrsg.) ; WIETSCHEL, Martin (Hrsg.): *Hydrogen economy - oportunities and challenges*. 1. Auflage. Cambridge : Cambridge University Press, 2009, S. 385–453
- [Banse 2012] BANSE, Valerie: *Bürger beschwerten sich über Gestank rund um Müllverbrennungsanlage Endenich*. <http://www.general-anzeiger-bonn.de/lokales/bonn/Buerger-beschwerten-sich-ueber-Gestank-rund-um-Muellverbrennungsanlage-Endenich-article17188.html>. Version: April 2012
- [Baumann 2003] BAUMANN, P.: *Studie zum Phosphorrecycling aus kommunalem Abwasser in Baden-Württemberg - Möglichkeiten und Grenzen*. 2003. – Im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg
- [Bernstein u. a. 2008] BERNSTEIN, Lenny ; BOSCH, Peter ; CANZIANI, Osvaldo ; CHEN, Zhenlin ; CHRIST, Renate ; DAVIDSON, Ogunlade ; HARE, William ; HUQ, Saleemul ; KAROLY, David ; KATSOV, Vladimir ; KUNDZEWICZ, Zbigniew ; LIU, Jian ; LOHMANN, Ulrike ; MANNING, Martin ; MATSUNO, Taroh ; MENNE, Betina ; METZ, Bert ; MIRZA, Monirul ; NICHOLLS, Neville ; NURSE, Leonard ; PACHAURI, Rajendra ; PALUTIKOF, Jean ; PARRY, Martin ; QIN, Dahe ; RAVINDRANATH, Nijavalli ; REISINGER, Andy ; REN, Jiawen ; RIAHI, Keywan ;

- ROSENZWEIG, Cynthia ; RUSTICUCCI, Matilde ; SCHNEIDER, Stephen ; SOKONA, Youba ; SOLOMON, Susan ; STOTT, Peter ; STOUFFER, Ronald ; SUGIYAMA, Taishi ; SWART, Rob ; TIRPAK, Dennis ; VOGEL, Coleen ; YOHE, Gary: Klimaänderung 2007: Synthesebericht / Deutsche Intergovernmental Panel on Climate Change-Koordinierungsstelle. 2008. – Forschungsbericht
- [Bertram 2011] BERTRAM, Björn: *Innovationsprozesse wissenschaftlicher Technologien - Beispiel der PEM-Brennstoffzelle*, Universität Karlsruhe, Diss., 2011
- [Bethge u. Lauenstein 2009] BETHGE, Philip ; LAUENSTEIN, Christian: Das Beben von Landau. In: *Der Spiegel* (2009), Nr. 39, S. 132–133
- [Beucker 2005] BEUCKER, Severin: *Ein Verfahren zur Bewertung von Lieferanten auf der Grundlage von Umweltwirkungen unter Berücksichtigung von Prozessketten*, Universität Stuttgart, Diss., 2005
- [BMELV 2008] BMELV: *Nachhaltigkeit konkret: Nachhaltigkeitskonzept des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz*. Dezember 2008
- [BMU 2010] BMU: Erneuerbare Energien in Zahlen: Nationale und internationale Entwicklung / Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Berlin, 2010. – Forschungsbericht
- [BMVBS 2011] BMVBS: Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) - Neubau Büro- und Verwaltungsgebäude / Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. 2011. – Forschungsbericht
- [Bockhorst 2002] BOCKHORST, Michael: *ABC Energie - Eine Einführung mit Lexikon: Energieerzeugung und Energienutzung, Probleme und Lösungsansätze*. Nordstedt : Books on Demand GmbH, 2002
- [Bontrup u. Marquardt 2010] BONTRUP, Heinz-J. ; MARQUARDT, Ralf-M.: *Kritisches Handbuch der deutschen Elektrizitätswirtschaft - Branchenentwicklung, Unternehmensstrategien, Arbeitsbeziehungen*. 1. Auflage. Berlin : Edition Sigma, 2010
- [Bossel oJ] BOSSEL, Ulf: Nachhaltige Energiepolitik: erneuerbar und effizient, European Fuel Cell Forum, o.J.
- [Brinker 2010] *Kapitel Versorgungssicherheit aus der Perspektive eines Regionalversorgers*. In: BRINKER, Werner: *Energiewirtschaft in Europa - Im Spannungsfeld zwischen Klimapolitik, Wettbewerb und Versorgungssicherheit*. Heidelberg : Springer-Verlag, 2010, S. 151–168

- [Bünger 2005] BÜNGER, Ulrich: Evaluation results for proposals responding to the competitive call for additional contractors in the EU 6<sup>th</sup> Framework programme project / Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH. 2005. – Forschungsbericht
- [Burkhard u. a. 1987] BURKHARD, Thilo ; JENEWEIN, Dorothee ; JORDAN, Gerd ; SCHWENSEN, Jörg ; SCHWILLING, Thomas: Die Auswirkungen der geplanten Müllverbrennungsanlage sowie die Entwicklung und Bewertung eines alternativen Abfallkonzeptes für Berlin-West / Institut für Ökologische Wirtschaftsforschung. 1987. – Forschungsbericht
- [Capros u. a. 2009] CAPROS, P. ; MANTZOS, L. ; TASIOS, N. ; VITA, A. D. ; KOUVARITAKIS, N.: EU energy trends to 2030 / European Commission. 2009. – Forschungsbericht
- [Destatis 2010] DESTATIS: *Korrektur: Die kleinste Gemeinde Deutschlands liegt in Schleswig-Holstein.* [https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/zdw/2010/PD10\\_003\\_p002.html](https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/zdw/2010/PD10_003_p002.html). Version: Januar 2010
- [Deutscher Bundestag 1993] DEUTSCHER BUNDESTAG: *Bericht der Gemeinsamen Verfassungskommission vom 05.11.1993.* November 1993
- [Deutscher Bundestag 1998] DEUTSCHER BUNDESTAG: Abschlussbericht der Enquete-Kommission, Schutz des Menschen und der Umwelt - Ziele und Rahmenbedingungen einer nachhaltig zukunftsverträglichen Entwicklung / Deutscher Bundestag - Referat für Öffentlichkeitsarbeit. Bonn, 1998. – Drucksache 13/11200
- [Diembeck 2006] DIEMBECK, Doris: Ökologische Auswirkungen von Offshore-Windparks in der deutschen ausschließlichen Wirtschaftszone der Nordsee. In: *Forum Geoökologie* 17 (2006), Nr. 2, S. 20–23
- [DIN 2006] DIN: DIN EN ISO 14040:2006-10: Umweltmanagement - Ökobilanz - Prinzipien und allgemeine Anforderungen / Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag. Berlin, 2006. – Forschungsbericht
- [Echo! Online 2010] ECHO! ONLINE: *Tiefengeothermie-Widerstand: Planer setzen auf Dialog.* <http://www.geothermie-nachrichten.de/widerstand-gegen-tiefengeothermie-planer-setzen-auf-dialog>. Version: April 2010
- [Eich u. Hake 2003] *Kapitel Nachhaltige Entwicklung und Energieversorgung.* In: EICH, Regina ; HAKE, Jürgen-Friedrich: *Umwelt und Technik im Gleichklang - Technikforschung und Systemanalyse in Deutschland.* Heidelberg : Springer-Verlag, 2003, S. 61–106

- [Erdmann u. Zweifel 2008] ERDMANN, Georg ; ZWEIFEL, Peter: *Energieökonomik - Theorie und Anwendungen*. 1. Auflage. Heidelberg : Springer-Verlag, 2008
- [FAZ.NET 2004] FAZ.NET: *Grubenunglücke - China zahlt einen hohen Preis für seine Kohle*. <http://www.faz.net/aktuell/gesellschaft/ungluecke-und-katastrophen/grubenungluecke-china-zahlt-einen-hohen-preis-fuer-seine-kohle-1189624.html>. Version: Dezember 2004
- [Feldt 2008] FELDT, Heidi: *Konfliktregelung in der Erdölindustrie im ecuadorianischen Amazonasgebiet und venezolanischen Orinokobecken*, Universität Kassel, Diss., 2008
- [Felleisen 2001] FELLEISEN, Michael: *Prozeßleittechnik für die Verfahrensindustrie*. München : Oldenbourg Industrieverlag, 2001
- [Fiedler 2011] FIEDLER, Peter: *Arbeit in Lünen - Akzeptanz für das Trianel-Kraftwerk wächst*. <http://www.ruhrnachrichten.de/lokales/luenen/Akzeptanz-fuer-das-Trianel-Kraftwerk-waechst;art928,1314792>. Version: 2011
- [Fischer 2001] FISCHER, Kristian: *Strategien im Kreislaufwirtschafts- und Abfallrecht - Unter besonderer Berücksichtigung der Produktverantwortung der Wirtschaft*. Heidelberg : C.F. Müller Verlag, Hüthig GmbH & Co. KG, 2001 ( 26)
- [Fischer Weltalmanach 2012a] FISCHER WELTALMANACH: *Indien*. <http://www.weltalmanach.de/staaten/details/Indien>. Version: Januar 2012
- [Fischer Weltalmanach 2012b] FISCHER WELTALMANACH: *Volksrepublik China*. [http://www.weltalmanach.de/staaten/details/china\\_volksrepublik/](http://www.weltalmanach.de/staaten/details/china_volksrepublik/). Version: Januar 2012
- [Fleury 2005] FLEURY, Aurélie: *Eine Nachhaltigkeitsstrategie für den Energieversorgungssektor*, Universität Karlsruhe, Diplomarbeit, 2005
- [Fonk 2009] FONK, Christian F.: *Schriften zum internationalen und zum öffentlichen Recht*. Bd. 78: *Europäische Luftqualitätsziele und nationale Erfüllungsverantwortung*. Frankfurt am Main : Peter Lang GmbH Internationaler Verlag der Wissenschaften, 2009
- [Franke u. Kauertz 2008] FRANKE, Bernd ; KAUERTZ, Benedikt: *Umweltverträglichkeitsuntersuchung zum geplanten Kohlekraftwerk am Standort Brunsbüttel / Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH. 2008. – Forschungsbericht*

- [Franzenburg 2010] FRANZENBURG, Anja: *Gute Gründe gegen Gentechnik*. [http://www.greenpeace.de/themen/gentechnik/gefahren\\_risiken/artikel/gute\\_gruende\\_gegen\\_gentechnik-1/](http://www.greenpeace.de/themen/gentechnik/gefahren_risiken/artikel/gute_gruende_gegen_gentechnik-1/). Version: Januar 2010
- [Friedrich 2002] *Kapitel Umweltrelevanz der Klärschlamm Entsorgung in Nordrhein-Westfalen*. In: FRIEDRICH, Harald: *Landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm, Gülle und anderen Düngern unter Berücksichtigung des Umwelt- und Verbraucherschutzes: BMU/BMVEL Wissenschaftliche Anhörung, 25.-26. Oktober 2001 in Bonn*. Darmstadt : Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., 2002 (KTBL-Schrift), S. 271–273
- [Friedrich u. Obermeier 2000] *Kapitel Emissionen von Spurenstoffen*. In: FRIEDRICH, R. ; OBERMEIER, A.: *Handbuch der Umweltveränderungen und Ökotoxikologie*. Bd. 1A: *Atmosphäre - Anthropogene und biogene Emissionen, Photochemie der Troposphäre, Chemie der Stratosphäre und Ozonabbau*. Heidelberg : Springer-Verlag, 2000, S. 61–194
- [Fritsche u. Schmidt 2008] FRITSCHKE, Uwe R. ; SCHMIDT, Klaus: *Handbuch zu GEMIS 4.5*. Darmstadt: Öko-Institut, August 2008
- [Ganteför 2010] GANTEFÖR, Gerd: *Klima - Der Weltuntergang findet nicht statt*. 1. Auflage. Weinheim : Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2010
- [Giesecke u. a. 2005] GIESECKE, Jürgen ; MOSONYI, Emil ; HEIMERL, Stephan: *Wasserkraftanlagen - Planung, Bau und Betrieb*. 4. Auflage. Heidelberg : Springer-Verlag, 2005
- [Görisch u. Helm 2007] GÖRISCH, Uwe ; HELM, Markus: *Biogasanlagen - Planung, Errichtung und Betrieb von landwirtschaftlichen und industriellen Biogasanlagen*. 2. Auflage. Stuttgart : Eugen Ulmer KG, 2007
- [Grunwald u. Kopfmüller 2006] GRUNWALD, Armin ; KOPFMÜLLER, Jürgen: *Nachhaltigkeit*. Frankfurt am Main : Campus Verlag GmbH, 2006 (Campus Einführungen)
- [Hake u. Eich 2002] *Kapitel Die Auswirkungen von Nachhaltiger Entwicklung auf den Energiesektor*. In: HAKE, Jürgen-Friedrich ; EICH, Regina: *Erneuerbare Energien: Ein Weg zu einer nachhaltigen Entwicklung? Vorlesungsmanuskripte des 8. Ferienkurses "Energieforschung" vom 23. bis 27. September 2002 in der Jakob-Kaiser-Stiftung, Königswinter*. Forschungszentrum Jülich GmbH, 2002, S. 6–39
- [Hau 2008] HAU, Erich: *Windkraftanlagen - Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit*. 4. Auflage. Heidelberg : Springer-Verlag, 2008

- [Hauff 1987] HAUFF, Volker ; HAUFF, Volker (Hrsg.) ; BRUNDTLAND, Gro H. (Hrsg.): *Unsere gemeinsame Zukunft - Der Brundtland-Bericht der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung*. Greven : Eggenkamp Verlag, 1987
- [Heier 2009] HEIER, Siegfried: *Windkraftanlagen - Systemauslegung, Netzintegration und Regelung*. 5. Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner, 2009
- [Heimann 2008] *Kapitel Hochlegierte Stähle - Nichtrostende und hitzebeständige Stähle*. In: HEIMANN, Winfried: *Handbuch Konstruktionswerkstoffe - Auswahl, Eigenschaften, Anwendung*. München : Carl Hanser Verlag, 2008, S. 251–290
- [Heinloth 2002] *Kapitel Energie im 21. Jahrhundert - Zukunftsperspektiven*. In: HEINLOTH, Klaus: *Energiehandbuch - Gewinnung, Wandlung und Nutzung von Energie*. Heidelberg : Springer-Verlag, 2002 (VDI-Buch)
- [Herkommer u. Bartol 2004] HERKOMMER, Erwin ; BARTOL, Arne: Nachhaltigkeit. In: *Der aktuelle Begriff* (2004), April, Nr. 06, S. 1–2
- [Herrmann 1993] *Kapitel Fällern und Flocken - Praxis und Theorie*. In: HERRMANN, V.: *Wassernutzung und Abwasserreinigung in Betrieb und Kommune - Grundlagen für betriebliche und kommunale Entscheidungen*. Bd. 1. Ehningen bei Böblingen : Expert Verlag, 1993, S. 223–239
- [Hey u. a. 2011] HEY, Christian ; SIMON, Christian ; BARON, Mechthild ; BOHM, Sönke ; BUDDE, Johanna ; DAHMS, Henriette ; DOYLE, Ulrike ; DROSS, Miriam ; GLAHN, Felix ; HERTIN, Julia ; HÖFLING, Holger ; LEIPPRAND, Anna ; OHLHORST, Dörte ; SALOMON, Markus ; SCHICK, Susanne ; SCHMID, Elisabeth ; STOCKHAUS, Heidi ; WEBER, Michael: *Wege zur 100% erneuerbaren Stromversorgung - Sondergutachten / Sachverständigenrat für Umweltfragen*. Berlin : Sachverständigenrat für Umweltfragen, 2011. – Forschungsbericht
- [Heyer u. Liening 2004] HEYER, Christian ; LIENING, Stephan: *Enquete-Kommissionen des Deutschen Bundestages - Schnittstellen zwischen Politik und Wissenschaft / Deutscher Bundestag - Referat für Öffentlichkeitsarbeit*. Berlin, 2004 (2. Auflage). – Forschungsbericht
- [IEA 2007] IEA: *World Energy Outlook 2007 / International Energy Agency*. 2007. – Forschungsbericht
- [IEA 2010] IEA: *World Energy Outlook 2010 / International Energy Agency*. 2010. – Forschungsbericht

- [Ihle u. a. 2001] *Kapitel* Das Depositionsmessnetz des Umweltbundesamtes (Aufbau, Betrieb und Ergebnisse). In: IHLE, Peter ; BIEBER, Elke ; KALLWEIT, Dagmar: *Atmosphärische Depositionen in der Bundesrepublik Deutschland*. 1. Auflage. Stuttgart : B. G. Teubner GmbH, 2001 (Schriftenreihe des Instituts für Energetik und Umwelt, Leipzig), S. 13–73
- [Imhoff u. Imhoff 2007] IMHOFF, Karl ; IMHOFF, Klaus R.: *Taschenbuch der Stadtentwässerung*. 30. Auflage. München : Oldenbourg Industrieverlag, 2007
- [Ingenieurbüro Roth & Partner GmbH 1995] INGENIEURBÜRO ROTH & PARTNER GMBH: Sicherung von bestehenden Bauten gegen Gefahren durch Deponiegas - Objektschutz / Landesanstalt für Umweltschutz, Baden-Württemberg. 1995 (21). – Forschungsbericht
- [Ingensiep 2007] *Kapitel* Nachwachsender Rohstoff Pflanze – vom Paradies zum Rohstoffgarten. In: INGENSIEP, Hans W.: *Jahrbuch Ökologie 2008*. München : C. H. Beck oHG, 2007 (Beck'sche Reihe), S. 100–107
- [Kaiser u. Wintzenburg 2011] KAISER, Harald ; WINTZENBURG, Jan B.: *IAA 2011 - Wachstum und Wasserstoff*. <http://www.stern.de/auto/news/iaa-2011-wachstum-und-wasserstoff-1727212.html>. Version: September 2011
- [Kaltschmitt 2001] *Kapitel* Einleitung und Zielsetzung. In: KALTSCHMITT, Martin: *Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren*. Heidelberg : Springer-Verlag, 2001, S. 1–34
- [Kaltschmitt u. a. 2005] KALTSCHMITT, Martin ; STREICHER, Wolfgang ; WIESE, Andreas ; WIESE, Andreas (Hrsg.): *Erneuerbare Energien - Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte*. 4. Auflage. Heidelberg : Springer-Verlag, 2005
- [Kanning 2008] *Kapitel* Neue Energielandschaften - Chancen und Herausforderungen zur Pflege und Inwertsetzung von Kulturlandschaften. In: KANNING, Helga: *Stadt und Region als Handlungsfeld*. Bd. 5: *Kulturlandschaften - Analyse und Planung*. Frankfurt am Main : Peter Lang GmbH Internationaler Verlag der Wissenschaften, 2008, S. 161–176
- [Kappas 2009] KAPPAS, Martin: *Klimatologie - Klimaforschung im 21. Jahrhundert - Herausforderung für Natur- und Sozialwissenschaften*. 1. Auflage. Heidelberg : Spektrum Akademischer Verlag, 2009
- [Kappet 2006] KAPPET, Liliane C.: *Tankerunfälle und der Ersatz ökologischer Schäden*. Hamburg : LIT Verlag, 2006 (Schriften zum Seehandelsrecht 18)

- [Kasperek 2001] KASPEREK, Gerwin: Landschaftsökologische Aspekte von Braunkohletagebau und Rekultivierung im Rheinischen Revier. In: *Geographische Rundschau* 53 (2001), September, Nr. 9, S. 28–33
- [Keppler 2002] *Kapitel* Ökologische Auswirkungen der Energienutzung. In: KEPPLER, Erhard: *Energiehandbuch - Gewinnung, Wandlung und Nutzung von Energie*. Heidelberg : Springer-Verlag, 2002 (VDI-Buch), S. 897–985
- [KfW Entwicklungsbank 2011] KfW ENTWICKLUNGSBANK: *Verkehr und Transport - Frühzeitig die Weichen stellen*. [http://www.kfw-entwicklungsbank.de/bank/DE\\_Home/Klima\\_und\\_Umwelt/Engagement\\_und\\_Kompetenzfelder\\_der\\_KfW\\_Entwicklungsbank/Verkehr\\_und\\_Transport/index.jsp](http://www.kfw-entwicklungsbank.de/bank/DE_Home/Klima_und_Umwelt/Engagement_und_Kompetenzfelder_der_KfW_Entwicklungsbank/Verkehr_und_Transport/index.jsp). Version: Juli 2011
- [Kietzmann 2006] KIETZMANN, Matthias: *Wasserstoff-Autos - 2010 kommen erste Modelle auf den Markt*. [http://www.focus.de/auto/autoaktuell/wasserstoff-autos\\_aid\\_19786.html](http://www.focus.de/auto/autoaktuell/wasserstoff-autos_aid_19786.html). Version: Februar 2006
- [Klaus 2008] KLAUS, Thorsten: *Windenergienutzung in Deutschland – Potenziale und Grenzen*, Universität zu Köln, Diplomarbeit, 2008
- [Kleemann 2002] *Kapitel* Windenergie, Wasserkraft, Gezeitenenergie und Erdwärme. In: KLEEMANN, Manfred: *Energiehandbuch - Gewinnung, Wandlung und Nutzung von Energie*. Heidelberg : Springer-Verlag, 2002 (VDI-Buch), S. 365–400
- [Klöpffer u. Grahl 2009] KLÖPFFER, Walter ; GRAHL, Birgit: *Ökobilanz (LCA): Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf*. 1. Auflage. Weinheim : WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009
- [Knauff 1998] *Kapitel* Braunkohleplanung. In: KNAUFF, Manfred: *Braunkohletagebau und Rekultivierung: Landschaftsökologie, Folgenutzung, Naturschutz*. Heidelberg : Springer-Verlag, 1998, S. 19–41
- [Konersmann u. a. 2009] KONERSMANN, Rainer ; KÜHL, Christiane ; LUDWIG, Jörg: Zu den Risiken des Transports flüssiger und gasförmiger Energieträger in Pipelines / Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung. Berlin, 2009 (285). – Forschungsbericht
- [Koppe u. Stozek 1999] KOPPE, Paul ; STOZEK, Alfred: *Kommunales Abwasser - Seine Inhaltsstoffe nach Herkunft, Zusammensetzung und Reaktionen im Reinigungsprozeß einschließlich Klärschlämme*. 4. Auflage. Essen : Vulkan-Verlag GmbH, 1999

- [Kosinowski 2002] *Kapitel* Energievorräte, Energiegewinnung und Energiebedarf. In: KOSINOWSKI, Michael: *Energiehandbuch - Gewinnung, Wandlung und Nutzung von Energie*. Heidelberg : Springer-Verlag, 2002 (VDI-Buch), S. 67–106
- [Kostka u. Mönch 2006] KOSTKA, Claudia ; MÖNCH, Annette ; KAMISKE, Gerd F. (Hrsg.): *Change Management - 7 Methoden für die Gestaltung von Veränderungsprozessen*. 3. Auflage. München : Carl Hanser Verlag, 2006
- [Krewitt 2002] *Kapitel* Externe Kosten der Stromgewinnung. In: KREWITT, Wolfgang: *Energiehandbuch - Gewinnung, Wandlung und Nutzung von Energie*. Heidelberg : Springer-Verlag, 2002 (VDI-Buch), S. 986–1007
- [Kunz 1992] KUNZ, Peter: *Behandlung von Abwasser - emissionsarme Produktionsverfahren, mechanisch-physikalische, biologische, chemisch-physikalische Abwasserbehandlung, technische Realisierung, rechtliche Grundlagen*. 3. Auflage. Würzburg : Vogel Verlag und Druck GmbH & Co. KG, 1992
- [Lewandowski 2001] *Kapitel* Energiepflanzenproduktion. In: LEWANDOWSKI, Iris: *Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren*. Heidelberg : Springer-Verlag, 2001, S. 57–94
- [Ludwig-Bölkow-Systemtechnik u. TÜV Süd 2011] LUDWIG-BÖLKOW-SYSTEMTECHNIK ; TÜV SÜD: *Hydrogen Filling Stations Worldwide*. <http://www.h2stations.org>. Version: Dezember 2011
- [Lünser 1999] LÜNSER, Heiko: *Ökobilanzen im Brückenbau - Eine umweltbezogene, ganzheitliche Bewertung*. Basel : Birkhäuser Verlag, 1999
- [Maier u. a. 2007] *Kapitel* ORC-Technologie zur Steigerung des elektrischen Wirkungsgrades bei Blockheizkraftwerken. In: MAIER, W. ; KEICHER, K. ; SCHNEIDER, U.: *Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft*. Bd. 191: *Innovative Energiekonzepte für Kläranlagen*. München : Oldenbourg Industrieverlag GmbH, 2007, S. 105–112
- [Matthes u. a. 1998] MATTHES, Felix C. ; HEROLD, Anke ; SOMMER, Karsten ; STRECK, Charlotte ; ENQUETE-KOMMISSION “SCHUTZ DES MENSCHEN UND DER UMWELT” DES 13. DEUTSCHEN BUNDESTAGES (Hrsg.): *Bodenbelastungen durch Luftschadstoffe - Perspektiven eines umweltpolitischen Handlungsfeldes*. 1. Auflage. Heidelberg : Springer-Verlag, 1998
- [Meyer u. Winebrake 2009] MEYER, Patrick E. ; WINEBRAKE, James J.: Modeling technology diffusion of complementary goods: The case of hydrogen vehicles and refueling infrastructure. In: *Technovation* 29 (2009), Nr. 2, S. 77 – 91

- [Miller 2003] MILLER, J.: Nachhaltigkeit - ein moderner Begriff, der aus der Forstwirtschaft kommt. In: *LWF aktuell* (2003), Nr. 37, S. 30–33
- [Müller 2010] MÜLLER, Inga: Schwellenländer: Zukünftige Zentren des globalen Wohlstands?! In: *kfw Entwicklungsbank* (2010), Nr. 8, S. 1–2
- [Musiol u. a. 2011] MUSIOL, Frank ; NIEDER, Thomas ; RÜTHER, Thorsten ; MARK, Kerstin van: Erneuerbare Energien in Zahlen - Internet-Update ausgewählter Daten / Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. 2011. – Forschungsbericht
- [Öko-Institut e.V. 2010] ÖKO-INSTITUT E.V.: *GEMIS 4.7*. Darmstadt, 2010
- [Podbregar 2011] *Kapitel* “Deepwater Horizon”: eine Ölkatastrophe als Zeugnis technischer Ohmacht. In: PODBREGAR, Nadja: *Im Fokus: Bodenschätze - Auf der Suche nach Rohstoffen*. Heidelberg : Springer-Verlag, 2011 (Naturwissenschaften im Fokus), S. 77–80
- [Pontenagel u. a. 1995] PONTENAGEL, Irm ; HAU, Erich ; KÖHLER, Martin ; LEHMANN, Harry ; SCHULTE-TIGGES, Gotthard ; PONTENAGEL, Irm (Hrsg.): *Das Potential erneuerbarer Energien in der Europäischen Union - Ansätze zur Mobilisierung erneuerbarer Energien bis zum Jahr 2020*. 1. Auflage. Heidelberg : Springer-Verlag, 1995
- [Quaschnig 2008] QUASCHNING, Volker: *Erneuerbare Energien und Klimaschutz - Hintergründe, Techniken, Anlagenplanung, Wirtschaftlichkeit*. München : Carl Hanser Verlag, 2008
- [Rehfeldt u. a. 2007] REHFELDT, Knud ; PASCHEDAG, Udo ; BÖMER, Jens: Entwicklung der Offshore-Windenergienutzung in Deutschland / Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. 2007. – Forschungsbericht
- [Rosenbaum u. Mautz 2011] *Kapitel* Energie und Gesellschaft: Die soziale Dynamik der fossilen und der erneuerbaren Energien. In: ROSENBAUM, Wolf ; MAUTZ, Rüdiger: *Handbuch Umweltsoziologie*. 1. Auflage. VS Verlag für Sozialwissenschaften, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2011, S. 399–420
- [Rucht 2008] *Kapitel* Anti-Atomkraftbewegung. In: RUCHT, Dieter: *Die sozialen Bewegungen in Deutschland seit 1945 - Ein Handbuch*. Frankfurt am Main : Campus Verlag GmbH, 2008, S. 245–266
- [Sander mann 2001] SANDERMANN, Heinrich: *Beck'sche Reihe*. Bd. 2150: *Ozon - Entstehung, Wirkung, Risiken*. München : C.H. Beck oHG, 2001

- [dos Santos Bernardes u. a. 2002] SANTOS BERNARDES, Marco dos ; BRIEM, Sebastian ; KREWITT, Wolfram ; NILL, Motiz ; RATH-NAGEL, Stefan ; VOSS, Alfred: Grundlagen zur Beurteilung der Nachhaltigkeit von Energiesystemen in Baden-Württemberg / Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung der Universität Stuttgart. 2002. – Forschungsbericht
- [Schappei 2005] SCHAPPEI, Axel: Die deutsche Steinkohle: Fakten – Analysen – Argumente / Gesamtverband des deutschen Steinkohlebergbaus. 2005. – Forschungsbericht
- [Schauer 1995] SCHAUER, Kurt: *Ein nachhaltiges Energiesystem für Österreich*, Technische Universität Graz, Diss., 1995
- [Schimming 2011] *Kapitel Säurebelastung*. In: SCHIMMING, C.-G.: *Handbuch des Bodenschutzes - Bodenökologie und Bodenbelastung, vorbeugende und abwehrende Schutzmaßnahmen*. 4. Auflage. Weinheim : WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2011, S. 270–286
- [Schmidkonz 2002] SCHMIDKONZ, Bertram: *Praktikum Anorganische Analyse - qualitativer und quantitativer Teil - Ein Lehr- und Experimentierbuch*. 1. Auflage. Frankfurt am Main : Wissenschaftlicher Verlag Harri Deutsch GmbH, 2002
- [Schneider u. a. 2002] SCHNEIDER, Ralf ; QUICKER, P. ; ANZER, T. ; PRECHTL, S. ; FAULSTICH, M.: Grundlegende Untersuchungen zur effektiven, kostengünstigen Entfernung von Schwefelwasserstoff aus Biogas. In: *Biogasanlagen - Anforderungen zur Luftreinhaltung (Fachtagung am 17. Oktober 2002)*. Augsburg : Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, 2002, S. 25–41
- [Schwarz 2002] *Kapitel Moderne Kernspaltungskraftwerke*. In: SCHWARZ, Dietrich: *Energiehandbuch - Gewinnung, Wandlung und Nutzung von Energie*. Heidelberg : Springer-Verlag, 2002 (VDI-Buch), S. 245–289
- [Seydel u. Wietschel 2004] SEYDEL, Philipp ; WIETSCHEL, Martin: Definition of model data exchange and model interfaces / Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research. 2004. – Forschungsbericht
- [Seydel u. Wietschel 2007] SEYDEL, Philipp ; WIETSCHEL, Martin: HyWays - Toolbox / Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research. 2007. – Forschungsbericht
- [Spiegel Online 2009] SPIEGEL ONLINE: *Erdrutsch in Sachsen-Anhalt - Nachertedtet am Abgrund*. <http://www.spiegel.de/panorama/0,1518,636933,00.html>. Version: Juli 2009

- [Stiller 2007] STILLER, Christoph: *HyWays - The European Hydrogen Energy Roadmap: Current status*. 2007. – IEA/IPHE Workshop “Building the Hydrogen Economy”, 3. April 2007
- [swb 2011] SWB: Umweltbericht 2011: Auf Grundlage der Umweltdaten des Jahres 2010 / swb AG. 2011. – Forschungsbericht
- [Thiele 2008] THIELE, Simone: *Elektrizitätserzeugung durch Windenergie: Von Onshore- zu Offshore-Standorten*. Hamburg : Diplomica Verlag GmbH, 2008
- [Wahrig-Burfeind 2007] WAHRIG-BURFEIND, Renate: *Wahrig - Fremdwörterlexikon*. 6. Auflage. Gütersloh/München : Wissen Media Verlag GmbH, 2007
- [Weindorf 2006] WEINDORF, Werner: Modelling of hydrogen supply chains for Germany in the E3-database / Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH. 2006. – Forschungsbericht
- [Weinreich 2004] WEINREICH, Sigurd ; BÖHRINGER, Christoph (Hrsg.): *Nachhaltige Entwicklung im Personenverkehr - Eine quantitative Analyse unter Einbezug externer Kosten*. Heidelberg : Physica-Verlag, 2004 (Schriftenreihe des Zentrums für Europäische Wirtschaftsforschung)
- [Werner u. Pfisterer 2002] *Kapitel Photovoltaik*. In: WERNER, Jürgen H. ; PFISTERER, Fritz: *Energiehandbuch - Gewinnung, Wandlung und Nutzung von Energie*. Heidelberg : Springer-Verlag, 2002 (VDI-Buch), S. 316–365
- [Wesselak u. Schabbach 2009] WESSELAK, Viktor ; SCHABBACH, Thomas: *Regenerative Energietechnik*. Heidelberg : Springer-Verlag, 2009
- [Wietschel u. a. 2009] WIETSCHEL, Martin ; BALL, Michael ; SEYDEL, Philipp: Hydrogen today. In: BALL, Michael (Hrsg.) ; WIETSCHEL, Martin (Hrsg.): *Hydrogen economy - oportunities and challenges*. 1. Auflage. Cambridge : Cambridge University Press, 2009, S. 254–270
- [Wojczewski u. Hanif 2008] WOJCZEWSKI, Thorsten ; HANIF, Melanie: Indiens neue Energiepolitik und ihre geostrategische Bedeutung. In: *GIGA Focus* (2008), Nr. 9. [http://www.giga-hamburg.de/dl/download.php?d=/content/publikationen/pdf/gf\\_asien\\_0809.pdf](http://www.giga-hamburg.de/dl/download.php?d=/content/publikationen/pdf/gf_asien_0809.pdf)
- [Wolf 2011] WOLF, Sarah ; BOGDANDY, Armin von (Hrsg.) ; WOLFRUM, Rüdiger (Hrsg.): *Unterseeische Rohrleitungen und Meeresumweltschutz - Eine völkerrechtliche Untersuchung am Beispiel der Ostsee*. Heidelberg : Springer-Verlag, 2011 (Max-Planck-Institut für ausländisches öffentliches Recht und Völkerrecht: Beiträge zum ausländischen öffentlichen Recht und Völkerrecht 226)

- [Wreesmann u. a. 2010] WREESMANN, Jan ; SEEDLER, Guido ; KAPTOUOM, Patricia: *Nachhaltigkeit in der Agrarwirtschaft: Definitionen - Akteure - Bewertungsmaßstäbe*. Mai 2010
- [Yamac 2011] YAMAC, Onur: *Was der Kraftwerksneubau in Mittelsbüren alles kann*. [http://weser-ems.business-on.de/bremen-mittelsbueren-bremer-swb-wirkungsgrad-energie-\\_id17350.html](http://weser-ems.business-on.de/bremen-mittelsbueren-bremer-swb-wirkungsgrad-energie-_id17350.html). Version: März 2011
- [Zahoransky 2009] ZAHORANSKY, Richard A.: *Energietechnik - Systeme zur Energieumwandlung. Kompaktwissen für Studium und Beruf*. 4. Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner, 2009
- [Zichy u. a. 2011] ZICHY, Michael ; DÜRNBERGER, Christian ; FORMOWITZ, Beate ; UHL, Anne: *Energie aus Biomasse – ein ethisches Diskussionsmodell*. 1. Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner, 2011
- [Zilch u. a. 2002] ZILCH, Konrad ; DIEDERICHS, C. J. ; KATZENBACH, Rolf ; KATZENBACH, Rolf (Hrsg.): *Handbuch für Bauingenieure*. Heidelberg : Springer-Verlag, 2002

# A Appendix

## A.1 Gewichtungen im Einführungsbeispiel (Szenario 4)

Abbildung A.1: Gewichtung der Indikatoren des Einführungsbeispiels (Szenario 4)

<b>1.1 Treibhauseffekt</b>												
Kriterien	CO <sub>2</sub> -Äquivalent	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O								
Anteil an Gesamtgewichtung	9,00%	0,00%	0,00%	0,00%								
<b>1.2 Versauerung &amp; Eutrophierung</b>												
Kriterien	SO <sub>2</sub> -Äquivalent	NH <sub>3</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	HCl	HF	H <sub>2</sub> S					
Anteil an Gesamtgewichtung	9,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%					
<b>1.3 Ozon &amp; Staub</b>												
Kriterien	TOPP-Äquivalent	Staub	CO	NM <sub>1</sub> VOC								
Anteil an Gesamtgewichtung	9,00%	5,94%	5,94%	6,12%								
<b>1.4 Reststoffe</b>												
Kriterien	Asche	Produktionsabfall	Abraum	REA-Reststoff	Klärschlamm	Müll-atomar						
Anteil an Gesamtgewichtung	2,70%	2,70%	2,70%	2,70%	2,70%	4,50%						
<b>1.5 Abwässer</b>												
Kriterien	Phosphor	Stickstoff	AOX	CSB	anorg. Salze	Arsen	Cadmium	Chrom	Quecksilber	Blei	BSB <sub>5</sub>	
Anteil an Gesamtgewichtung	1,75%	1,75%	1,11%	1,11%	1,11%	1,11%	1,11%	1,11%	1,11%	1,11%	1,11%	1,11%
<b>1.6 Fläche</b>												
Kriterien	lokal											
Anteil an Gesamtgewichtung	2,70%											
<b>1.7 KEV</b>												
Kriterien	erneuerbar	nicht erneuerbar										
Anteil an Gesamtgewichtung	1,35%	2,25%										
<b>1.8 KEA</b>												
Kriterien	erneuerbar	nicht erneuerbar										
Anteil an Gesamtgewichtung	1,35%	2,25%										
<b>1.9 KSA</b>												
Kriterien	erneuerbar	nicht erneuerbar										
Anteil an Gesamtgewichtung	1,35%	2,25%										
<b>2.1 Beschäftigungseffekte</b>												
Kriterien	Beschäftigung											
	6,00%											
<b>2.2 Kosten</b>												
Kriterien	Kosten											
	4,00%											

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Öko-Institut e.V., 2010).

## A.2 Gewichtungen im Anwendungsfall (Szenario 5)

Abbildung A.2: Gewichtung der Indikatoren des Anwendungsfall (Szenario 5)

<b>1.1 Treibhauseffekt</b>											
Kriterien	CO <sub>2</sub> -Äquivalent	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O							
Anteil an Gesamtgewichtung	8,00%	0,00%	0,00%	0,00%							
<b>1.2 Versauerung &amp; Eutrophierung</b>											
Kriterien	SO <sub>2</sub> -Äquivalent	NH <sub>3</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	HCl	HF	H <sub>2</sub> S				
Anteil an Gesamtgewichtung	6,00%	6,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%				
<b>1.3 Ozon &amp; Staub</b>											
Kriterien	TOPP-Äquivalent	Staub	CO	NM <sub>10</sub> VOC							
Anteil an Gesamtgewichtung	7,00%	2,50%	0,00%	0,00%							
<b>1.4 Reststoffe</b>											
Kriterien	Asche	Produktionsabfall	Abraum	REA-Reststoff	Klärschlamm	Müll-atomar					
Anteil an Gesamtgewichtung	3,00%	3,00%	3,00%	3,00%	3,00%	5,00%					
<b>1.5 Abwässer</b>											
Kriterien	Phosphor	Stickstoff	AOX	CSB	anorg. Salze	Arsen	Cadmium	Chrom	Quecksilber	Blei	BSB5
Anteil an Gesamtgewichtung	5,50%	5,50%	3,50%	3,50%	3,50%	3,50%	3,50%	3,50%	3,50%	3,50%	3,48%
<b>1.6 Fläche</b>											
Kriterien	lokal										
Anteil an Gesamtgewichtung	2,00%										
<b>1.7 KEV</b>											
Kriterien	erneuerbar	nicht erneuerbar									
Anteil an Gesamtgewichtung	1,50%	2,50%									
<b>1.8 KEA</b>											
Kriterien	erneuerbar	nicht erneuerbar									
Anteil an Gesamtgewichtung	1,50%	2,50%									
<b>1.9 KSA</b>											
Kriterien	erneuerbar	nicht erneuerbar									
Anteil an Gesamtgewichtung	1,50%	2,50%									
<b>2.1 Beschäftigungseffekte</b>											
Kriterien	Beschäftigung										
Anteil an Gesamtgewichtung	50,00%										
<b>2.2 Kosten</b>											
Kriterien	Kosten										
Anteil an Gesamtgewichtung	50,00%										
<b>3.1 Beeinträchtigung Lebensraum</b>											
Kriterien	Landschaftsbild	Auswirkung auf Umgebung	Widerstand								
Anteil an Gesamtgewichtung	30,00%	30,00%	20,00%								
<b>3.2 Unfallgefahr- &amp; auswirkungen</b>											
Kriterien	Auswirkung Unfall	Dauer Schadensbehebung									
Anteil an Gesamtgewichtung	15,00%	5,00%									

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Öko-Institut e.V., 2010).

## A.3 Ausgewählte Kraftwerke für den Anwendungsfall

Tabelle A.1: Überblick über die ausgewählten Kraftwerke für den Anwendungsfall

Bezeichnung	Hauptinput	Leistung (in MW)
Steinkohlekraftwerk 1	Importierte Steinkohle	800
Steinkohlekraftwerk 2	Steinkohle aus Deutschland	700
Braunkohlekraftwerk	Braunkohle aus deutschem, rheinischem Tagebau	600
Atomkraftwerk	Importiertes, angereichertes Uran	1250
Wasserkraftwerk	Wasserkraft	50
Windpark onshore	Windkraft	34
Windpark offshore	Windkraft	50
Solarzellen	Sonnenenergie	0,03
Geothermiekraftwerk	Geothermie	1
Biomasse Altholz	Altholz Kategorie A1-A4	20
Ballaststeinkohlekraftwerk	Ballaststeinkohle	700
Gichtgaskraftwerk	Gichtgas	150
Schwerölkraftwerk	Importiertes Schweröl	450
Erdgaskraftwerk 1	Importiertes Erdgas	450
Erdgaskraftwerk 2	Importiertes Erdgas	100
Müllkraftwerk	Hausmüll	10
Deponiegaskraftwerk	Deponiegas	1
Klärgaskraftwerk	Klärgas	0,2
Biogaskraftwerk Mais	Biogas aus Mais	0,5
Biomasse Rapsöl	Rapsöl	0,1

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Öko-Institut e.V., 2010).

## A.4 Detaillierte Beschreibung der erreichten Punkteanzahl der Indikatoren in der sozio-kulturellen Dimension

### A.4.1 Bewertung der Auswirkungen auf das Landschaftsbild

Tabelle A.2: Bewertung der Auswirkungen auf das Landschaftsbild

Option	Auswirkung Kraftwerk	Auswirkung Rohstoffabbau	Punkte	Quelle
Steinkohlekraftwerk 1	Kesselhaus: ca. 100m Höhe, Kühlturm: ca. 60m, Schornstein: ca. 180m, hohe Beeinträchtigung	Wird hauptsächlich unter Tage abgebaut, Minen weithin sichtbar	55	(Franke u. Kauerz, 2008, S. 178)
Braunkohlekraftwerk	Kesselhaus: ca. 100m Höhe, Kühlturm: ca. 60m, Schornstein: ca. 180m, hohe Beeinträchtigung	Wird hauptsächlich über Tage abgebaut, enorme Eingriffe in die Natur beim Abbau des Rohstoffes	10	(Franke u. Kauerz, 2008, S. 178) & (Erdmann u. Zweifel, 2008, S. 252 f.)
Erdgaskraftwerk 1	Schornsteinhöhe: ca. 60m	Pipelines ziehen sich teilweise tausende Kilometer durch Europa, Erdgasförderanlagen weithin sichtbar	50	(Yamac, 2011) & (Bockhorst, 2002, S. 284 f.)

Erdgaskraftwerk 2	Schornsteinhöhe: ca. 60m	Pipelines ziehen sich teilweise tausende Ki- lometer durch Europa, Erdgas- förderanlagen weithin sichtbar	50	(Yamac, 2011) & (Bockhorst, 2002, S. 284 f.)
Atomkraftwerk	Reaktorgebäude: ca. 60m Höhe	Endlagerstät- tenproblematik und Uranabbau	30	(Bockhorst, 2002, S. 339) & (Schwarz, 2002, S. 288 f.)
Wasserkraftwerk	Je nach Bau- werkshöhe starke Beein- trächtigung, weithin sichtbar (Aufstauung)	Aufgestautes Wasser kann Naherholungsge- biet werden	70	(Kleemann, 2002, S. 391)
Steinkohlekraft- werk 2	Kesselhaus: ca. 100m Höhe, Kühlturm: ca. 60m, Schorn- stein: ca. 180m, hohe Beein- trächtigung	Wird haupt- sächlich unter Tage abgebaut, Minen weithin sichtbar	55	(Franke u. Kau- ertz, 2008, S. 178)
Windpark on- shore	Starke Beein- trächtigung des Landschaftsbil- des, da weithin sichtbar, abhän- gig davon ob einzeln oder in Parks	Hauptinput Wind	80	(Kleemann, 2002, S. 382 f.)

Windpark offshore	Bei Bau nahe Küstenregion wird Landschaftsbild beeinträchtigt, vor allem im flachen Norden von Deutschland weithin sichtbar, teilweise riesige Parks	Hauptinput Wind	75	(Kleemann, 2002, S. 382 f.)
Solarzellen	Keine große Beeinträchtigung (wenn auf Dach montiert)	Hauptinput Sonne	98	(Bockhorst, 2002, S. 436 ff.)
Geothermie	Eher unauffällige Kraftwerke, nicht weithin sichtbar	Hauptinput kommt direkt aus Erde	85	(Kleemann, 2002, S. 1093)
Deponiegaskraftwerk	Eher kleinere Kraftwerke (ca. 45m <sup>2</sup> ), werden meist dort errichtet wo sie nicht stören (direkt an Deponie)	Hauptinput kommt von der Deponie	90	(Öko-Institut e.V., 2010) & (Bockhorst, 2002, S. 247 f.)
Klärgaskraftwerk	Eher kleinere Kraftwerke (ca. 45m <sup>2</sup> ), werden meist dort errichtet wo sie nicht stören (direkt an Kläranlage)	Hauptinput kommt von der Deponie	90	(Öko-Institut e.V., 2010) & (Felleisen, 2001, S. 352 ff.)

Biogaskraftwerk Mais	Kraftwerk eher unauffällig	Mais braucht beim Anbau viel Platz, Mo- nokulturen schädigen das Landschaftsbild	60	(Lewandowski, 2001, S. 91 ff.) & (Kanning, 2008, S. 170 f.)
Müllkraftwerk	Schornstein: teilweise über 100m Höhe	Hauptinput wird aus Müll bezogen	75	(Burkhard u. a., 1987, S. 3) & (Zahoransky, 2009, S. 342 ff.)
Biomasse Raps- öl	Kraftwerk eher unauffällig	Raps braucht beim Anbau viel Platz, Mo- nokulturen schädigen das Landschaftsbild	60	(Lewandowski, 2001, S. 73) & (Kanning, 2008, S. 170 f.)
Biomasse Alt- holz	Kraftwerk eher unauffällig	Nur bestimm- tes Holz darf verwendet wer- den, eher keine Rodungen, Roh- stoff an sich verschönert Landschaftsbild	90	(Kaltschmitt, 2001, S. 11)
Ballaststeinkoh- lekraftwerk	Kesselhaus: ca. 100m Höhe, Kühlturm: ca. 60m, Schorn- stein: ca. 180m, hohe Beein- trächtigung	Wird haupt- sächlich unter Tage abgebaut, Minen weithin sichtbar	55	(Franke u. Kau- ertz, 2008, S. 178)

Schwerölkraftwerk	Kraftwerk weit- hin sichtbar	Förderung mit Bohrtürmen weithin sicht- bar, Pipelines tausende Ki- lometer durch Europa, meist rücksichtsloser Eingriff in die Natur	20	(Kosinowski, 2002, S. 70 ff.)
Gichtgaskraftwerk	Errichtung in direkter Um- gebung von Hochöfen, kein allzu großer Eingriff, da be- reits Industrie vorhanden	Hauptinput wird abgezogen und muss nicht aufwändig ab- oder angebaut werden	90	(swb, 2011, S. 13 f.)

Quelle: Eigene Darstellung.

## A.4.2 Bewertung der Auswirkungen auf die direkte Umgebung

Tabelle A.3: Bewertung der Auswirkungen auf die direkte Umgebung

Option	Auswirkungen auf die direkte Umgebung	Punkte	Quelle
Steinkohlekraftwerk 1	Auswirkungen auf Flora und Fauna beim Bau des Kraftwerkes können durch Landschaftspflege wieder ausgeglichen werden, nur geringe Auswirkungen auf das Kleinklima, sonst normale Auswirkungen eines Kraftwerkes dieser Art	65	(Franke u. Kauerz, 2008, S. 191 ff.)
Braunkohlekraftwerk	Beim Rohstoffabbau: Grundwasserabsenkung, Staubeentwicklung, Auswirkung auf Kleinklima, Restlöcher; beim Kraftwerk: Auswirkungen auf Flora und Fauna beim Bau des Kraftwerkes können durch Landschaftspflege wieder ausgeglichen werden, nur geringe Auswirkungen auf das Kleinklima, sonst normale Auswirkungen eines Kraftwerkes dieser Art	48	(Franke u. Kauerz, 2008, S. 191 ff.) & (Kasperek, 2001, S. 28 ff.) & citelit-Metzger2002
Erdgaskraftwerk 1	Auswirkungen auf Flora und Fauna beim Bau des Kraftwerkes können durch Landschaftspflege wieder ausgeglichen werden, nur geringe Auswirkungen auf das Kleinklima, sonst normale Auswirkungen eines Kraftwerkes dieser Art	70	(Franke u. Kauerz, 2008, S. 191 ff.) & (Kosinowski, 2002, S. 79) & (Kaltschmitt u. a., 2005, S. 27 ff.)

Erdgaskraftwerk 2	Auswirkungen auf Flora und Fauna beim Bau des Kraftwerkes können durch Landschaftspflege wieder ausgeglichen werden, nur geringe Auswirkungen auf das Kleinklima, sonst normale Auswirkungen eines Kraftwerkes dieser Art	70	(Franke u. Kauertz, 2008, S. 191 ff.) & (Kosinowski, 2002, S. 79) & (Kaltschmitt u. a., 2005, S. 27 ff.)
Atomkraftwerk	Strahlung durch Brennstabtransporte: aus 2m Entfernung etwa dieselbe wie bei Fernflug (S. 265), Strahlung bei Zwischenlagern und Endlager, unabsehbare Folgen der Lagerung radioaktiver Abfälle im Erdinneren, Probleme bei Endlagerung (ausfallende Ernten, erhöhtes Krebsrisiko, etc.), erhöhte Strahlung im Umkreis eines Atomkraftwerkes	20	(Schwarz, 2002, S. 265 ff.)

Wasserkraftwerk	Beeinflussung der Sohlenerosion durch Sedimentablagerungen entlang der unterhalb der Sperre liegenden Strecke, Reduktion der Artenvielfalt und Änderung der Altersstruktur bei Fischen, verminderter Sauerstoffeintrag kann durch diverse Faktoren ausgeglichen werden, starker Stau des Wassers, woraus neue Ökosysteme entstehen (Gefahr), Konzentration von Schwebstoffen kann sich bilden, die Algenwachstum, Eutrophierung und Sedimentation zur Folge hat, oft Verlust von Ackerböden, Ökosystemen (z.B. Auwälder), Kulturgütern, insbesondere durch Umsiedlungen, aber: neue Freizeitmöglichkeiten	50	(Giesecke u. a., 2005, S. 711, 721 & 727) & (Kleemann, 2002, S. 391 f.)
Steinkohlekraftwerk 2	Auswirkungen auf Flora und Fauna beim Bau des Kraftwerkes können durch Landschaftspflege wieder ausgeglichen werden, nur geringe Auswirkungen auf das Kleinklima, sonst normale Auswirkungen eines Kraftwerkes dieser Art	65	(Franke u. Kauerz, 2008, S. 191 ff.)
Windpark onshore	Statistisch etwa ein halber Vogel pro Anlage pro Jahr (32 Vögel bei 69 Anlagen), Beeinträchtigung der Brut- und Rastplätze für Vögel, Luftgeräusche durch Rotordrehung	75	(Kleemann, 2002, S. 382 f.)

Windpark offshore	Während Bau: Aufwirbelung von Sediment, erhöhter Lärm beim Rammen, Tötung von Organismen die nicht schnell genug fliehen, hohe Belastung durch Schiff- und Flugverkehr, schwer absehbare Langzeitfolgen, während Betrieb: Lärm verstört Meerestiere	60	(Kleemann, 2002, S. 382 f.) & (Diembeck, 2006, S. 20 ff.)
Solarzellen	Keine große Auswirkungen	98	(Werner u. Pfisterer, 2002, S. 316 ff.)
Geothermie	Nicht hinreichend erforscht, aber wahrscheinlich Bodenabsenkung oder Einfluss auf Erdbeben-tätigkeit durch längerfristige Wasserentnahme, diverse Kleinaktivitäten, die zur Einstellung führten, Erde beruhigt sich nach solchen Vorfällen nur sehr langsam, viele kleinere, regional begrenzte Erdstöße	60	(Kosinowski, 2002, S. 100 f.) & (Bethge u. Lauenstein, 2009, S. 132 f.)
Deponiegaskraftwerk	Keine größeren Problematiken bei Nutzung von Deponiegas bekannt, die nicht sowieso durch das auf einer Deponie entweichende Gas entstehen würden	90	(Ingenieurbüro Roth & Partner GmbH, 1995, S. 5 ff.)
Klärgaskraftwerk	Keine größeren Problematiken, keine Geruchsbelästigungen	95	(Maier u. a., 2007, S. 105 ff.)
Biogaskraftwerk Mais	Flächenkonkurrenz, Nahrungskonkurrenz, Monokulturen, Gentechnik	60	(Ingensiep, 2007, S. 103 f.) & (Zichy u. a., 2011, S. 92 f.)
Müllkraftwerk	Nur schwache bis gar keine Geruchsbelästigung	70	(Zilch u. a., 2002, S. 242)

Biomasse Raps- öl	Flächenkonkurrenz, Nahrungs- konkurrenz, Monokulturen, Gentechnik	60	(Ingensiep, 2007, S. 103 f.) & (Zichy u. a., 2011, S. 92 f.)
Biomasse Alt- holz	Kein Baumschlag, da nur Ge- brauchtholz oder Industrierest- holz verwendet wird	90	§2 Abs. 3 Ziffer 1 Verordnung über die Erzeu- gung von Strom aus Biomas- se (BiomasseV)
Ballaststeinkoh- lekraftwerk	Auswirkungen auf Flora und Fauna beim Bau des Kraftwerkes können durch Landschaftspflege wieder ausgeglichen werden, nur geringe Auswirkungen auf das Kleinklima, sonst normale Auswirkungen eines Kraftwerkes dieser Art	65	(Franke u. Kau- ertz, 2008, S. 191 ff.)
Schwerölkraft- werk	Große Verschmutzungen in Erd- ölfördergebieten und negative Einflüsse auf die Bevölkerung bei Förderung an Land	10	(Feldt, 2008, S. 79 ff.)
Gichtgaskraft- werk	Keine größeren Auswirkungen, da Gichtgas aus Hochöfen abge- zogen wird	95	(swb, 2011, S. 13 f.)

Quelle: Eigene Darstellung.

### A.4.3 Bewertung des Widerstandes in der Bevölkerung

Tabelle A.4: Bewertung des Widerstandes in der Bevölkerung

Option	Widerstand in der Bevölkerung	Punkte	Quelle
Steinkohlekraftwerk 1	Vereinzelter Widerstand gegen den Betrieb oder den Neubau eines Kraftwerkes, aber zumeist nur in direkter Umgebung, Kohlekraftwerke gelten als Umweltverschmutzer	60	(Bontrup u. Marquardt, 2010, S. 250 ff.) & (Brinker, 2010, S. 154 f.)
Braunkohlekraftwerk	Vereinzelter Widerstand gegen den Betrieb oder den Neubau eines Kraftwerkes, aber zumeist nur in direkter Umgebung, Kohlekraftwerke gelten als Umweltverschmutzer, zudem müssen wegen des Tagebaus immer wieder Zwangsumsiedlungen vorgenommen werden, gegen die es immer wieder Proteste gibt	35	(Bontrup u. Marquardt, 2010, S. 250 ff.) & (Brinker, 2010, S. 154 f.) & (Knauff, 1998, S. 26)
Erdgaskraftwerk 1	Kaum Widerstand vorhanden	70	(Fiedler, 2011)
Erdgaskraftwerk 2	Kaum Widerstand vorhanden	70	(Fiedler, 2011)
Atomkraftwerk	Jahrzehntelanger, bundesweiter Protest gegen die Technologie an sich, CASTOR-Transporte und Endlager, Dauerpräsenz in den Medien	10	(Rucht, 2008, S. 246 ff.)
Wasserkraftwerk	Widerstand aufgrund starken Eingreifens in die Natur durch Staumauer und Stausee, gering und regional begrenzt, in Medien kaum präsent	70	(Ganteför, 2010, S. 163)

Steinkohlekraftwerk 2	Vereinzelter Widerstand gegen den Betrieb oder den Neubau eines Kraftwerkes, aber zumeist nur in direkter Umgebung, Kohlekraftwerke gelten als Umweltverschmutzer	60	(Bontrup u. Marquardt, 2010, S. 250 ff.) & (Brinker, 2010, S. 154 f.)
Windpark onshore	Proteste wegen Verschandelung des Landschaftsbildes, Lärm und Eingriffs in die Vogelwelt, trotzdem weithin akzeptierte Technologie	80	(Thiele, 2008, S. 20)
Windpark offshore	Widerstand hauptsächlich von Naturschutzverbänden, sonst stark begrenzter Protest	80	(Pontenagel u. a., 1995, S. 33)
Solarzellen	Aufgrund freier Entscheidung, ob Anlage installiert werden soll oder nicht, sind keine nennenswerten Proteste bekannt	98	
Geothermie	Skepsis und Verunsicherung über die Sicherheit aufgrund von leichten Erschütterungen in der Nähe von Geothermiekraftwerken, kleinere, regionale Proteste, relativ präsent in den Medien	55	(Echo! Online, 2010)
Deponiegaskraftwerk	Kein nennenswerter Widerstand, in Medien nicht präsent	95	
Klärgaskraftwerk	Kein nennenswerter Widerstand, in Medien nicht präsent	95	
Biogaskraftwerk Mais	Proteste gegen Einsatz von Gentechnik (vor allem durch Greenpeace) beim Anbau	60	(Franzenburg, 2010)
Müllkraftwerk	Kleinere Proteste gegen Gestank, ansonsten eher positiv, da Müllabbau	80	(Banse, 2012)
Biomasse Rapsöl	Proteste gegen Einsatz von Gentechnik (vor allem durch Greenpeace) beim Anbau	60	(Franzenburg, 2010)

Biomasse Alt- holz	Kein nennenswerter Widerstand, in Medien nicht präsent	95	
Ballaststeinkoh- lekraftwerk	Vereinzelter Widerstand gegen den Betrieb oder den Neubau eines Kraftwerkes, aber zumeist nur in direkter Umgebung, Kohlekraftwerke gelten als Um- weltverschmutzer	60	(Bontrup u. Marquardt, 2010, S. 250 ff.) & (Brinker, 2010, S. 154 f.)
Schwerölkraft- werk	Teils großer Widerstand gegen die Nutzung des Rohstoffs Öl, da mit der Nutzung beträchtliche Umweltverschmutzungen bei Förderung und Endverbrauch einher gehen	10	(Kosinowski, 2002, S. 69 f.)
Gichtgaskraft- werk	Kein nennenswerter Widerstand, in Medien nicht präsent	95	

Quelle: Eigene Darstellung.

### A.4.4 Bewertung der Auswirkungen eines Unfalls

Tabelle A.5: Bewertung der Auswirkungen eines Unfalls

Option	Unfall in Kraftwerk	Unfall bei Rohstoffabbau	Punkte	Quelle
Steinkohlekraftwerk 1	Normalübliche Unfälle durch unglückliche Verstrickungen oder menschliches Versagen, Schaden überschaubar	Unfälle im Untertagebau, Unfallgefahr auf Stollen begrenzt	80	(Schappei, 2005) & (FAZ.NET, 2004)
Braunkohlekraftwerk	Normalübliche Unfälle durch unglückliche Verstrickungen oder menschliches Versagen, Schaden überschaubar	Abrutschende Erdmassen	85	(Spiegel Online, 2009)
Erdgaskraftwerk 1	Normalübliche Unfälle durch unglückliche Verstrickungen oder menschliches Versagen, Schaden überschaubar	Explosion an Pipelines	75	(Konersmann u. a., 2009, S. 10 ff.)
Erdgaskraftwerk 2	Normalübliche Unfälle durch unglückliche Verstrickungen oder menschliches Versagen, Schaden überschaubar	Explosion an Pipelines	75	(Konersmann u. a., 2009, S. 10 ff.)

Atomkraftwerk	Unfälle wie Tschernobyl könnten in Zukunft zwar verhindert werden, aber unglückliche Verkettungen, wie in Fukushima oder Terroranschläge sind weiterhin ein enormes Sicherheitsrisiko	verbrauchter Rohstoff: unabsehbare Folgen der Lagerung radioaktiver Abfälle im Erdinneren	10	(Schwarz, 2002, S. 250 & 286 f.) & (Aden, 2012, S. 47)
Wasserkraftwerk	Wahrscheinlichkeit eines Staudammbruches sehr gering, Gefährdung von Anglern, Schwimmern, etc. bei Spülvorgängen, Schwellbetrieb durch Abflussänderung innerhalb kurzer Zeit	-	85	(Giesecke u. a., 2005, S. 735) & (Quaschnig, 2008, S. 230)
Steinkohlekraftwerk 2	Normalübliche Unfälle durch unglückliche Verstrickungen oder menschliches Versagen, Schaden überschaubar	Unfälle im Untertagebau, Unfallgefahr auf Stollen begrenzt	80	(Schappei, 2005) & (FAZ.NET, 2004)

Windpark onshore	Ermüdungsbruch, Unfall durch Überdrehzahl, Flugunfall, Unfälle nur im Umkreis des Windrades, keine erheblichen Auswirkungen	-	95	(Kleemann, 2002, S. 374) & (Heier, 2009, S. 454 f.) & (Hau, 2008, S. 681)
Windpark offshore	Ermüdungsbruch, Unfall durch Überdrehzahl, Flugunfall, Unfälle nur im Umkreis des Windrades, keine erheblichen Auswirkungen, Öltankerkollisionen mit Ölpest als Folge (aber eher unwahrscheinlich)	-	85	(Kleemann, 2002, S. 374) & (Heier, 2009, S. 454 f.) & (Hau, 2008, S. 681) & (Klaus, 2008, S. 37)
Solarzellen	Unfallgefahr hauptsächlich für am Netz arbeitende Personen	-	98	(Werner u. Pfisterer, 2002, S. 345)
Geothermie	Normalübliche Unfälle durch unglückliche Verstrickungen oder menschliches Versagen, Schaden überschaubar	Durch Bodenabsenkung oder Erdbebentätigkeit verursachte Risse an Gebäuden, etc.	50	(Kosinowski, 2002, S. 100 f.) & (Bethge u. Lauenstein, 2009, S. 132 f.)

Deponiegas- kraftwerk	Normalübliche Unfälle durch unglückliche Verstrickungen oder mensch- liches Versa- gen, Schaden überschaubar, Erstickungs- und Explosions- gefahr innerhalb des Kraftwerkes	-	90	(Görisch u. Helm, 2007, S. 82 f.)
Klärgaskraft- werk	Normalübliche Unfälle durch unglückliche Verstrickungen oder mensch- liches Versa- gen, Schaden überschaubar, Erstickungs- und Explosions- gefahr innerhalb des Kraftwerkes	-	90	(Görisch u. Helm, 2007, S. 82 f.)
Biogaskraftwerk Mais	Normalübliche Unfälle durch unglückliche Verstrickungen oder mensch- liches Versa- gen, Schaden überschaubar, Erstickungs- und Explosions- gefahr innerhalb des Kraftwerkes	Unabschätzbare Folgen des Einsatzes von Gentechnik	70	(Görisch u. Helm, 2007, S. 82 f.) & (Zichy u. a., 2011, S. 92 f.)

Müllkraftwerk	Normalübliche Unfälle durch unglückliche Verstrickungen oder menschliches Versagen, Schaden überschaubar, evtl. Schäden durch den Austritt giftiger Stoffe	-	85	(Fischer, 2001, S. 32 f.)
Biomasse Rapsöl	Normalübliche Unfälle durch unglückliche Verstrickungen oder menschliches Versagen, Schaden überschaubar, Erstickungs- und Explosionsgefahr innerhalb des Kraftwerkes	Unabschätzbare Folgen des Einsatzes von Gentechnik	70	(Görisch u. Helm, 2007, S. 82 f.) & (Zichy u. a., 2011, S. 92 f.)
Biomasse Altholz	Normalübliche Unfälle durch unglückliche Verstrickungen oder menschliches Versagen, Schaden überschaubar	-	90	(Görisch u. Helm, 2007, S. 82 f.)

Ballaststeinkohlekraftwerk	Normalübliche Unfälle durch unglückliche Verstrickungen oder menschliches Versagen, Schaden überschaubar	Unfälle im Untertagebau, Unfallgefahr auf Stollen begrenzt	80	(Schappei, 2005) & (FAZ.NET, 2004)
Schwerölkraftwerk	Normalübliche Unfälle durch unglückliche Verstrickungen oder menschliches Versagen, Schaden überschaubar	Verheerende Folgen bei Unfällen bei Tiefseebohrungen (z.B. Bohrin sel “Deepwater Horizon”), Tankerunglücken und Explosionen an Pipelines	15	(Konersmann u. a., 2009, S. 10 ff.) & (Podbregar, 2011, S. 77 ff.) & (Kappet, 2006, S. 190)
Gichtgaskraftwerk	Normalübliche Unfälle durch unglückliche Verstrickungen oder menschliches Versagen, Schaden überschaubar	-	90	(Görisch u. Helm, 2007, S. 82 f.)

Quelle: Eigene Darstellung.

### A.4.5 Bewertung der Dauer der Schadensbehebung

Tabelle A.6: Bewertung der Dauer der Schadensbehebung

Option	Dauer Schadensbehebung	Punkte	Quelle
Steinkohlekraftwerk 1	Behebung im Kraftwerk innerhalb kurzer Zeit, Behebung der Schäden bei Grubenunglücken hingegen dauert länger	75	(Schappei, 2005) & (FAZ.NET, 2004)
Braunkohlekraftwerk	Behebung im Kraftwerk innerhalb kurzer Zeit, seltene Erdbeben hingegen können nicht so schnell behoben werden	80	(Spiegel Online, 2009)
Erdgaskraftwerk 1	Behebung im Kraftwerk innerhalb kurzer Zeit, Reparatur unterseeischer Pipelines erfordert hohen Zeitaufwand	50	(Wolf, 2011, S. 289)
Erdgaskraftwerk 2	Behebung im Kraftwerk innerhalb kurzer Zeit, Reparatur unterseeischer Pipelines erfordert hohen Zeitaufwand	50	(Wolf, 2011, S. 289)
Atomkraftwerk	Im schlimmsten Fall werden Gebiete rund um den Unfallort unbewohnbar (z.B. Tschernobyl)	10	(Keppler, 2002, S. 959)
Wasserkraftwerk	Behebung der Schäden eines eventuellen Dammbrochs dauert Monate	70	(Quaschnig, 2008, S. 230)
Steinkohlekraftwerk 2	Behebung im Kraftwerk innerhalb kurzer Zeit, Behebung der Schäden bei Grubenunglücken hingegen dauert länger	75	(Schappei, 2005) & (FAZ.NET, 2004)
Windpark onshore	Reparaturen schnell möglich, bei Materialbruch wird längere Zeit benötigt	90	(Kleemann, 2002, S. 374) & (Heier, 2009, S. 454 f.) & (Hau, 2008, S. 681)

Windpark offshore	Reparaturen schnell möglich, bei Materialbruch wird längere Zeit benötigt	90	(Kleemann, 2002, S. 374) & (Heier, 2009, S. 454 f.) & (Hau, 2008, S. 681) & (Klaus, 2008, S. 37)
Solarzellen	Schadensbehebung sehr schnell möglich	98	(Werner u. Pfisterer, 2002, S. 345)
Geothermie	Die Ausbesserung der Risse kann lange dauern, aufgrund eventueller neuer Erdstöße kann die Behebungsdauer empfindlich verlängert werden	30	(Kosinowski, 2002, S. 100 f.) & (Bethge u. Lauenstein, 2009, S. 132 f.)
Deponiegaskraftwerk	Behebung im Kraftwerk innerhalb kurzer Zeit, größere Probleme bei Deponiegasexplosionen	90	(Görisch u. Helm, 2007, S. 82 f.)
Klärgaskraftwerk	Behebung im Kraftwerk innerhalb kurzer Zeit	95	(Görisch u. Helm, 2007, S. 82 f.)
Biogaskraftwerk Mais	Behebung im Kraftwerk innerhalb kurzer Zeit, Folgen der Gentechnik schwer absehbar	80	(Zichy u. a., 2011, S. 92 f.)
Müllkraftwerk	Behebung im Kraftwerk innerhalb kurzer Zeit, Schaden durch Austreten giftiger Stoffe schwer behebbar	85	(Fischer, 2001, S. 32 f.)
Biomasse Rapsöl	Behebung im Kraftwerk innerhalb kurzer Zeit, Folgen der Gentechnik schwer absehbar	80	(Zichy u. a., 2011, S. 92 f.)
Biomasse Altholz	Behebung im Kraftwerk innerhalb kurzer Zeit	90	

Ballaststeinkohlekraftwerk	Behebung im Kraftwerk innerhalb kurzer Zeit, Behebung der Schäden bei Grubenunglücken hingegen dauert länger	75	(Schappei, 2005) & (FAZ.NET, 2004)
Schwerölkraftwerk	Schadensbehebung einer Ölpest dauert teilweise Jahre	15	(Konersmann u. a., 2009, S. 10 ff.) & (Podbregar, 2011, S. 77 ff.) & (Kappet, 2006, S. 190)
Gichtgaskraftwerk	Behebung im Kraftwerk innerhalb kurzer Zeit	95	(Görisch u. Helm, 2007, S. 82 f.)

Quelle: Eigene Darstellung.

## A.5 Zusammenfassung

Die Benutzung von fossilen Brennstoffen im Transportsektor verursacht eine enorme Umweltverschmutzung. Daher ist der Wechsel zu Alternativen, wie mit Wasserstoff betriebene Fahrzeuge, eine wichtige Zielsetzung, die es in der nahen Zukunft umzusetzen gilt. Um aber eine entscheidende Reduzierung der Emittierung von Schadstoffen zu erreichen, muss die gesamte Prozesskette zur Herstellung von Wasserstoff auf Nachhaltigkeit hin überprüft und optimiert werden.

In dieser Arbeit geht es darum, einen Schritt in dieser Prozesskette zu betrachten: Die nachhaltige Erzeugung von Strom, welcher im Herstellungsprozess von Wasserstoff in Deutschland benötigt wird. Die ökologische, ökonomische und sozio-kulturelle Dimension bildeten die Basis zur Erfassung des Begriffs der Nachhaltigkeit. Unter der Verwendung von Kriterien und Indikatoren konnte die Nachhaltigkeit mess- und vergleichbar gemacht werden. 20 verschiedene Energieerzeugungsoptionen wurden anhand eines Referenzszenarios (PRIMES) für den Vergleich ausgewählt. Mit Hilfe eines Bewertungswerkzeuges wurden diese Optionen untersucht. Das Werkzeug zur Bewertung der Nachhaltigkeit lieferte dabei verschiedene Analysemöglichkeiten, da die Kriterien und Indikatoren verschieden stark gewichtet werden konnten. Die zum Vergleich benötigten Daten wurden aus dem Programm GEMIS bezogen. Aus diesen Daten wurden zudem die Ziel-, Grenz- und Referenzwerte für jeden einzelnen Indikator gebildet.

Das Ergebnis liefert einen einzigen Wert für jede Option. Dieser Wert gibt die Zielerreichung in Hinblick auf die Nachhaltigkeit an. Der Wertebereich liegt dabei zwischen 10 und 100 Punkten, wobei dieser sich wiederum in drei verschiedene Unterbereiche gliedert. Als nachhaltig gilt eine Option dann, wenn sie einen Wert von 100 bis 80 Punkten erreicht. Problematisch ist eine Bewertung zwischen 79 und 50 Punkten, da die Option hier nicht mehr unbedingt als nachhaltig bezeichnet werden kann. Liegt die Bewertung unterhalb von 50 Punkten, so gilt die Option als nicht nachhaltig. Hieraus lassen sich diverse Entscheidungen ableiten, etwa in Bezug auf die Verteilung von Subventionen.

Am besten schneidet dabei das Klärgaskraftwerk (91,06 Punkte) ab, gefolgt von der Option Deponiegaskraftwerk (89,84 Punkte) und den Windkraftanlagen (84,32 Punkte onshore, 83,02 Punkte offshore). Als ebenfalls nachhaltig kann die Option Gichtgaskraftwerk bezeichnet werden (80,98 Punkte). Einen extrem niedrigen Zielerreichungsgrad erreicht das Schwerölkraftwerk, welches mit nur 38,73 Punkten als einzige Option in die dritte, als nicht nachhaltig zu bezeichnende Kategorie fällt. Ziel der Implementierung einer Wasserstoffinfrastruktur in Deutschland muss es

sein, einen möglichst großen Anteil an Strom aus diesen nachhaltigen Optionen zu beziehen, um eine signifikante Verbesserung der Umweltverschmutzung bewirken zu können.

Der Vorteil des Werkzeuges zur Beurteilung von Nachhaltigkeit liegt darin, dass es nicht nur auf die Stromerzeugung im Herstellungsprozess von Wasserstoff beschränkt bleibt, sondern beliebige Prozessketten miteinander vergleichen kann, solange ausreichend Daten für die Kriterien und Indikatoren zur Verfügung stehen, um ein umfassendes Bild der Nachhaltigkeit abgeben zu können.

## A.6 Lebenslauf

### Frank Benda

Adresse: Nußdorfer Platz 1-2a/4/6  
1190 Wien  
Österreich

Telefon: 0650/277 222 1

Geboren am: 17. Dezember 1982

Ort: Grünstadt, Deutschland

Familienstand: Ledig

Nationalität: Deutsch

### Schule

1993 - 2003 Abitur am Leininger Gymnasium, Grünstadt

1989 - 1993 Dekan-Ernst-Grundschule, Grünstadt

### Studium

03/2010 - 06/2012 Magisterstudium "Betriebswirtschaft" an der Universität Wien

10/2006 - 01/2010 Bakkalaureatsstudium "Betriebswirtschaft" an der Universität Wien

09/2003 - 06/2006 Diplomstudium "Volkswirtschaft" an der Universität Heidelberg

### Beruflicher Werdegang

10/2007 - heute Technischer Zeichner (ACAD) im Zeichenbüro Benda in Grünstadt, Deutschland

10/2010 - 06/2011 Studienassistent am Lehrstuhl für Innovations- und Technologiemanagement an der Universität Wien

## **Fremdsprachen**

Englisch            Verhandlungssicher in Wort und Schrift

Spanisch            Gute Kenntnisse

Französisch        Gute Grundkenntnisse

Chinesisch         Gute Grundkenntnisse

## **Besondere Kenntnisse**

MS Office            Ausgezeichnete Kenntnisse

ACAD                Ausgezeichnete Kenntnisse

LCA-Software        Ausgezeichnete Kenntnisse in GEMIS, GaBi und Optiresource

LaTex                Ausgezeichnete Kenntnisse

Wien, am 29. Mai 2012

# Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit ohne Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Wien, am 29. Mai 2012

(Frank Benda)

