

**Bringt die Energiewende emissionsärmeren Strom?**  
**- eine modellbasierte Untersuchung auf Grundlage von Lebenszyklusanalysen**

Masterarbeit

für die Prüfung zum Master of Science (M. Sc.) Economics

eingereicht beim Prüfungsausschuss für den Masterstudiengang Economics

der

Fakultät für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften

Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg

2019

Tobias Philipp Erckmann

geboren am 22.07.1987 in Stuttgart

Matrikelnummer: 3211276

Datum der Abgabe: 13.05.2019

Betreuer: Prof. Dr. Florian Diekert

Lehrstuhl für Umwelt- und Ressourcenökonomik

## **Eidesstattliche Erklärung**

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe verfasst habe und dass alle wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen entnommenen Stellen dieser Arbeit unter Quellenangabe einzeln kenntlich gemacht sind.

Karlsruhe, den 13.05.2019

Tobias Erckmann

**Bringt die Energiewende  
emissionsärmeren Strom?  
- eine modellbasierte Untersuchung auf  
Grundlage von Lebenszyklusanalysen**

Tobias Erckmann

13.05.2019

## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	6
Formelverzeichnis.....	7
Tabellenverzeichnis.....	8
Abkürzungsverzeichnis.....	9
Formelzeichen.....	10
Indizes.....	11
Zusammenfassung.....	13
1. Einleitung.....	14
1.1. Definition „Energiewende“ .....	17
1.2. Darstellung der Energiewende .....	18
2. Methodische Grundlagen.....	19
2.1. Wichtigste Aspekte von Lebenszyklusanalysen.....	19
2.2. Zeitliche Entwicklung von Lebenszyklusanalysen.....	21
2.3. Alternative Methoden zu Lebenszyklusanalysen.....	23
2.3.1. Carbon Accounting .....	23
2.3.2. Ganzheitliche Bilanzierung .....	24
2.4. Forschungsbericht Marheineke, 2002 .....	24
2.5. Einordnung der vorliegenden Arbeit.....	27
3. Emissionen von Stromerzeugungstechniken.....	27
3.1. Definition der Sachbilanz einer Stromerzeugungstechnik.....	27
3.2. Sachbilanzen aus Marheineke, 2002.....	29
3.3. Ergänzung der Sachbilanz für Mineralöl .....	30
3.4. Ergänzung der Sachbilanz für Biomasse .....	32
3.5. Sachbilanz mit repräsentativen Werten .....	32
4. Berechnung des Strommix 2015-2050.....	35
4.1. Definition „Strommix“ .....	35
4.2. Auswahl eines Strommix zur Modellierung der Energiewende.....	37
4.3. Auswahl eines Strommix zur Modellierung des aktuellen Trends .....	41
5. Emissionen und entnommenen Rohstoffe 2015-2050.....	44
5.1. BAU vs. EW: Unterschiede hinsichtlich der Emissionen 2015-2050.....	44
5.2. Differenzierte Betrachtung der Emissionen und benötigten Rohstoffe.....	46

5.3. Vergleich der Ergebnisse mit anderen Studien .....	53
6. Sensitivitätsanalyse .....	54
6.1. Sensitivitätsanalyse Sachbilanz.....	54
6.2. Sensitivitätsanalyse Strommix.....	56
7. Schlussteil.....	59
7.1. Zusammenfassung .....	59
7.2. Ausblick.....	59
Anhang .....	68
A. Erstellen der Schadstoffbilanz.....	68
A.1. Schadstoffbilanz Biomasse.....	68
A.2. Weitere Ergänzungen der Sachbilanzen .....	70
B. Berechnung des Strommix 2015-2050.....	72
B.1. Aufbereitung zusammengetragener Messdaten.....	73
B.2. Standardisierung des Greenpeace-Szenarios .....	74
B.3. Stromerzeugung der Szenarien 2.1 bis 3.2 (Modelle „Zukunft Stromsystem“) .....	75
B.4. Anpassung des Szenarios Energiewende-Transformation .....	76
C. Differenzierte Betrachtung der Emissionen und benötigten Rohstoffe .....	77
C.1. Szenario EW und BAU .....	77
C.2. Szenario <b>EW</b> und BAU.....	79
D. Sensitivitätsanalyse .....	86

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Stufen einer Lebenszyklusanalyse (ISO, 2006, S. 8, zitiert nach Schmitz & Paulini, 1999, S. 3,).....	21
Abbildung 2: Formale Beschreibung eines Prozesses (Marheineke, 2002; S. 20).....	25
Abbildung 3: Input-Output-Tabelle (Statistisches Bundesamt, kein Datum; zitiert nach Marheineke, 2002).....	25
Abbildung 4: Kopplung von Input-Output-Analyse und Prozesskettenanalyse (Marheineke, 2002, S.27).....	26
Abbildung 5: Beispiel eines Strommix (BMW 2019, Tabellenblatt 22).....	36
Abbildung 6: Vergleich der Szenarien BAU und EW.....	43
Abbildung 7: CO <sub>2</sub> -Reduktion durch Szenario EW.....	47
Abbildung 8: SO <sub>2</sub> -Reduktion durch Szenario EW.....	48
Abbildung 9:NO <sub>x</sub> -Reduktion durch Szenario EW.....	48
Abbildung 10: CH <sub>4</sub> -Reduktion durch Szenario EW.....	49
Abbildung 11: N <sub>2</sub> O-Reduktion durch Szenario EW.....	49
Abbildung 12: Partikel-Reduktion durch Szenario EW.....	50
Abbildung 13: Bauxit-Einsparung durch Szenario EW.....	51
Abbildung 14: Fe-Einsparung durch Szenario EW.....	51
Abbildung 15: Cu-Einsparung durch Szenario EW.....	52
Abbildung 16: K-Einsparung durch Szenario EW.....	52
Abbildung 17: PM10-Reduktion durch Szenario EW.....	77
Abbildung 18: Rn-222Reduktion durch Szenario EW.....	78
Abbildung 19: C14-Reduktion durch Szenario EW.....	78
Abbildung 20: IS-Reduktion durch Szenario EW.....	79
Abbildung 21: CO <sub>2</sub> -Reduktion durch Szenario EW.....	79
Abbildung 22: NO <sub>x</sub> -Reduktion durch Szenario EW.....	80
Abbildung 23: SO <sub>2</sub> -Reduktion durch Szenario EW.....	80
Abbildung 24_ CH <sub>4</sub> -Reduktion durch Szenario EW.....	81
Abbildung 25: N <sub>2</sub> O-Reduktion durch Szenario EW.....	81
Abbildung 26: Partikel-Reduktion durch Szenario EW.....	82

Abbildung 27: PM <sub>10</sub> -Reduktion durch Szenario <i>EW</i> .....	82
Abbildung 28: Rn-222-Reduktion durch Szenario <i>EW</i> .....	83
Abbildung 29: C-14-Reduktion durch Szenario <i>EW</i> .....	83
Abbildung 30: IS-Reduktion durch Szenario <i>EW</i> .....	84
Abbildung 31: BX-Einsparung durch Szenario <i>EW</i> .....	84
Abbildung 32: FE-Einsparung durch Szenario <i>EW</i> .....	85
Abbildung 33: Cu-Einsparung durch Szenario <i>EW</i> .....	85
Abbildung 34: K-Einsparung durch Szenario <i>EW</i> .....	86

## Formelverzeichnis

Formel 1 - Sachbilanzmatrix: Emissionen und entnommenen Rohstoffe pro erzeugte kWh <sub>el</sub> durch Technik <i>i</i> .....	29
Formel 2: Anteilige Sachbilanzmatrix.....	34
Formel 3: Darstellung eines Strommix in Matrixform.....	36
Formel 4: Strommix als Zusammenfassung der zeitlichen Verläufe aller Erzeugungstechniken.....	36
Formel 5: Lineare Ergänzung des Greenpeace-Szenario .....	39
Formel 6: Lineare Ergänzung der Zukunft Strommarkt-Szenarien .....	39
Formel 7: Differenz zwischen Messdaten und Werten der Szenarien .....	40
Formel 8: Berechnung der Matrix für Emissionen und entnommene Rohstoffe.....	44
Formel 9: Summe der Emissionen des Szenarios SZ bis zum Jahr <i>j</i> .....	44
Formel 10: Angleichen der Gesamtproduktion-EW an Gesamtproduktion-BAU.....	45
Formel 11: Berechnung der Matrix für Emissionen und entnommene Rohstoffe des Strommix <i>XEW</i> .....	45
Formel 12: Summe der Emissionen und entnommenen Rohstoffe des angepassten Strommix <i>XEW</i> bis Jahr <i>j</i> .....	45
Formel 13: Differenz der Emissionen und entnommenen Rohstoffe im Zeitverlauf.....	47
Formel 14: Anteil der Produktion von Technologie <i>i</i> an der Gesamtproduktion des Jahres <i>j</i> .....	69
Formel 15: Berechnung der Sachbilanzwerte für Biomasse und PM <sub>10</sub> .....	70

Formel 16: Berechnung der Sachbilanzwerte für Biomasse und PM10 .....	71
Formel 17: Berechnung der Sachbilanzwerte für Biomasse und Kupfer.....	71
Formel 18: Berechnung der Sachbilanzwerte für Biomasse und Kalkstein.....	71
Formel 19: Berechnung der Sachbilanzwerte für Biomasse und ionisierende Strahlung	71
Formel 20: Berechnung der Sachbilanzwerte für Mineralöl und IS, BX, FE, CU und K.....	72
Formel 21: Lineare Fortschreibung der Verluste der Stromerzeugung.....	74
Formel 22: Standardisierter Strommix (Greenpeace-Szenario).....	75
Formel 23: Standardisierter Strommix (Stromerzeugung, Zukunft Stromsystem-Szenario) .....	76
Formel 24: Berechnung der Nettostromerzeugung (Energiewende-Szenario).....	76

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Auflistung der Emissionen und entnommenen Rohstoffe .....	28
Tabelle 2: Sachbilanz Mineralöl - Schadstoffe und entnommene Rohstoffe pro erzeugte kWh.....	31
Tabelle 3: Sachbilanz für Biomasse: Schadstoffe und entnommene Rohstoffe pro erzeugte kWhel .....	32
Tabelle 4: Sachbilanz: Schadstoffe und entnommene Rohstoffe pro kWhel je Erzeugungstechnik.....	33
Tabelle 5: Prozentuale Wirkung einer Technologie (Zahlen stark gerundet).....	34
Tabelle 6: Abweichungen zwischen Werten und Messdaten.....	40
Tabelle 7: Gesamte Differenz von Emissionen und entnommenen Rohstoffen 2015-2050 .....	46
Tabelle 8: Gesamterzeugung der Technologien je Szenarien EW & BAU.....	55
Tabelle 9: Auswirkung von Veränderung der Sachbilanz auf relative Einsparungen der Szenarien EW und BAU.....	55
Tabelle 10: Auswirkung von Veränderung des Strommix um 10% auf Differenzen der Szenarien EW und BAU.....	57
Tabelle 11: Auswirkung von Veränderung des Strommix um 20% auf Differenzen der Szenarien EW und BAU.....	58



Tabelle 12: Übersicht der Technologien zur Bildung der Sachbilanz Biomasse .....	69
Tabelle 13: Sachbilanz für Biomasse: Schadstoffe und entnommene Rohstoffe pro erzeugte kWh.....	70
Tabelle 14: Szenario zur Abbildung der Energiewende - Übersicht der ausgeschlossenen Studien.....	72
Tabelle 15: Wesentliche Unterschiede der Prognoseszenarien .....	73
Tabelle 16: Wesentliche Unterschiede der Prognoseszenarien für das EW und BAU .....	76
Tabelle 17: Sensitivitätsanalyse der Sachbilanz - Zuordnung der Kraftwerksvarianten...	86

## Abkürzungsverzeichnis

AEE	Agentur für erneuerbare Energien e.V.
AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V.
BAU	Szenario Business-as-Usual
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (bzw. -Reaktorschutz)
CCS	Carbon Capture and Storage
DKW	Dampfkraftwerk
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EWI	Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln
EW	Szenario Energiewende
Fraunhofer ISE	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme
GWS	Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung mbH
ifeu	Institut für Energie- und Umweltforschung
IOA	Input-Output-Analyse
LZA	Lebenszyklusanalyse
SRU	Sachverständigenrat für Umweltfragen
THG	Treibhausgas(e)

## Formelzeichen

$A_{EBM}$	Vektor aus Anteilen der Erzeugungstechniken der Kategorie Biomasse)
$a_{i,j}$	Anteil von Erzeugungstechnik i an der gesamten Erzeugung in Jahr j
$asb_{q,i}$	Skalar der anteiligen Sachbilanzmatrix
ASB	Anteilige Sachbilanzmatrix
E	Menge der Erzeugungstechniken
$E_{BM}$	Menge der Erzeugungstechniken des Biomasse-Mix
$eer_{q,j}$	Gesamte Emissionen/entnommene Rohstoffe q in Jahr j
EER	Matrix der Emissionen und entnommenen Rohstoffe
$geer_q^{SZ}$	Summe der Emissionen bzw. entnommenen Rohstoffe q des Szenarios SZ im Zeitraum 2015-2050
i	$i \in E$ : Variable für Erzeugungstechnik
q	$q \in S$ : Variable für Emission bzw. entnommenen Rohstoff
S	Menge der Emissionen
SB	Sachbilanzmatrix
$sb_{qi,i}$	Skalar einer Sachbilanzmatrix zu Emission bzw. entnommener Ressource q und Erzeugungstechnik i
$SB_i$	Spalte der Matrix SB: Emissionen und entnommene Rohstoffe pro kWh <sub>el</sub> der Technik i
$S_{BM}$	Menge der Emissionen für Biomasse-Technik
$s_j^1$	Summe der Endenergie in Jahr j (Greenpeace-Szenario)
$s_j^{ZS}$	Summe des Stromaufkommens in Jahr j (Zukunft Stromsystem-Szenario)
$s_j^{*BAU}$	Summe der Nettostromerzeugung in Jahr j (Szenario BAU)
$s_j^{*EW}$	Summe der Nettostromerzeugung in Jahr j (Szenario EW)
$sb_{BM,q}^{**}$	Ergänzte Sachbilanzwerte für Biomasse durch Berechnung aus bestehenden Sachbilanzwerten aus Marheineke (2002)

$sb_{MO,q}^*$	Ergänzte Sachbilanzwerte für Mineralöl durch Berechnung aus bestehenden Sachbilanzwerten aus Marheineke (2002)
T	Bezogen auf Szenarien: Menge der Zeitpunkte j, welche in Quellen erfasst sind
$v_j$	Verluste in Jahr j (Eigenbedarf der Kraftwerke, Übertragungsverluste, Pumpstromverbrauch)
$x_{i,j}$	Skalar einer Matrix des Strommix: Erzeugter Strom der Erzeugungstechnik i in Jahr j
X	Matrix des Strommix aus Schätzwerten (kurz: Werte)
$\widehat{X}^{EW}$	Angepasste Matrix: Anteile der E-Technik aus EW, Produktionsmenge aus Szenario BAU
Y	Matrix des Strommix aus Messdaten (kurz: Daten)
Z	Menge der Zeiträume eines Strommix
$ZVE_q^{BAU-EW}$	Matrix: zeigt Differenz zwischen Szenarien BAU und EW für Emission bzw. entnommenen Rohstoff q

## Indizes

^	Linear ergänzte Matrix bzw. Skalar einer linear ergänzten Matrix
*	Standardisierte Matrix
ADT	Altholz Dampfturbine (Erzeugungstechnik der Kategorie Biomasse)
BAU	Business-as-Usual (Szenario)
BG	Biogas (Erzeugungstechnik der Kategorie Biomasse)
BR	Biogas Reststoffe (Erzeugungstechnik der Kategorie Biomasse)
BK	Braunkohle (Erzeugungstechnik)
BM	Biomasse (Erzeugungstechnik)
BX	Bauxit (Entnommener Rohstoff)
C14	Isotop des Kohlenstoffs C-14 (Emission)
CH4	Methan (Emission)
CO2	Kohlenstoffdioxid (Emission)

CU	Kupfer (Entnommener Rohstoff)
DKG	Deponie-/ Klärgas/Schlamm (Erzeugungstechnik der Kategorie Biomasse)
EG	Erdgas (Erzeugungstechnik)
FE	Eisen (Entnommener Rohstoff)
IS	Ionisierte Strahlung (Emission)
KK	Kernkraft (Erzeugungstechnik)
K	Kalkstein (Entnommener Rohstoff)
KZS	Kurzzeitspeicher
MO	Mineralöl (Erzeugungstechnik)
Mt	Megatonnen
N2O	Distickstoffmonoxid (Emission)
NOX	Stickoxide (Emission)
P	Partikel gesamt (Schadstoff)
PM10	Feinstaub der Partikelgröße PM <sub>10</sub> (Emission)
PV	Photovoltaik (Erzeugungstechnik)
RN222	Radon-222 (Emission)
SK	Steinkohle (Erzeugungstechnik)
SO2	Schwefeldioxid (Emission)
SZ	Szenario, aus welchem Daten entnommen werden
^T	Transformierte Matrix oder transformierter Vektor
WAK	Wasserkraft (Erzeugungstechnik)
WK	Windkraft (Erzeugungstechnik)

## Zusammenfassung

Die Reduzierung von Schadstoffen ist eines der Hauptziele der deutschen Energiewende. Der stetige Ausbau erneuerbarer Energien im Bereich der Stromerzeugung bildet einen wichtigen Baustein. Kritiker bemängeln, dass die Anlagen für erneuerbare Energien zwar während des Betriebs weniger Schadstoffe ausstoßen, aber in der Errichtung wesentlich mehr Ressourcen benötigen als Anlagen konventioneller Energieträger. Zwecks einer vollständigen Beurteilung des gesamten Schadstoffausstoßes wurden bereits Lebenszyklusanalysen für Anlagen der Elektrizitätserzeugung durchgeführt. In der Tat liefern diese Untersuchungen in manchen Schadstoffkategorien höhere Emissionswerte für Anlagen erneuerbarer Energien als für Anlagen konventioneller Erzeugungsmethoden. Jedoch hängen die Ergebnisse stark von den getroffenen technischen Annahmen ab. Bisher wurden Studien zur zukünftigen Entwicklung des Strommix meistens an festgelegten Zielen ausgerichtet. Die vorliegende Arbeit beurteilt hingegen die voraussichtliche Schadstoffentwicklung und Kombinationen von Erzeugungstechniken aus heutiger Sicht. Zu diesem Zweck werden Daten vorhandener Lebenszyklusanalysen mit der prognostizierten Entwicklung der Energiewirtschaft verknüpft. Anschließend werden die jährlichen Emissionen einer Infrastruktur gemäß der Agenda der Energiewende mit den Emissionen einer Infrastruktur ohne die Energiewende verglichen. Es stellt sich heraus, dass regenerative Erzeugungsanlagen zwar dabei helfen können, einen Teil der Emissionen zu vermeiden, jedoch geht dies zu Lasten höherer Emissionswerte in anderen Bereichen und eines teilweise deutlich gesteigerten Ressourcenbedarfs.

## 1. Einleitung

*“Raus aus den konventionellen, rein in die erneuerbaren Energien (...) Die Energieversorgung in Deutschland soll umweltverträglich und weitgehend klimaneutral werden.”*

(Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, (BMWi) 2017)

*“Our investigation shows clear benefits of moving from fossil to renewable energy technologies in terms of a reduction of a wide range of pollution impacts. These benefits come at the price of increase material demand.”*

(Gibon & Hertwich, 2014)

Obenstehende Zitate verdeutlichen das Dilemma, vor welcher sich die Energiewende auch in Deutschland befindet. Die vorliegende Arbeit untersucht Vor- und Nachteile der Umstrukturierung des Stromsektors anhand ausgewählter Emissionen und entnommener Rohstoffe.

Die deutsche Energiewende ist eines der größten wirtschaftspolitischen Projekte seit der Wiedervereinigung. Auch im internationalen Vergleich handelt es sich um eine der umfassendsten Transformationen eines Energiesektors (Quitrow, et al., 2016). Die Umstellung von fossilen und nuklearen auf erneuerbare Energiequellen bildet den Kernprozess der Energiewende (Hake, et al., 2015). In Deutschland vollzieht sich dieser Prozess bereits seit über 25 Jahren und dient primär der Reduktion umweltschädlicher Emissionen sowie der geringeren Abhängigkeit von endlichen Ressourcen. Zwecks der Reduktion von Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2050 um 80-95% (Referenzjahr 1990) wurden im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) entsprechende Ziele festgelegt (BMWi, 2012). U.a. soll der Bruttoenergieverbrauch bis zum Jahr 2050 um 60% gesenkt und der Anteil erneuerbarer Energien an der Stromversorgung auf 80% gesteigert werden. Die Maßnahmen beschränken sich jedoch nicht auf die Elektrizitätserzeugung,

sondern umfassen auch die Bereiche Mobilität und Primärenergie/Wärme. Z.B. soll im Rahmen der Sektorkopplung Strom aus erneuerbaren Energiequellen intensiver im Verkehr oder zu Zwecken der Klimatisierung eingesetzt werden, um auch in diesen Bereichen Emissionen zu verringern (BMWi, 2017). Trotz der komplexen Prozesse sollen gleichzeitig der Strompreis möglichst stabil gehalten und die Stromversorgung sichergestellt werden (BMWi, 2011). Die gesetzten Ziele wurden durch die Nuklearkatastrophe von Fukushima ab dem 11. März 2011 stark beeinflusst: Am 06. Juni 2011 beschloss das Bundeskabinett aufgrund einer erhöhten Risikoeinschätzung die schrittweise Abschaltung aller Atomkraftwerke in Deutschland bis zum Jahr 2022 (BMWi, 2011). Dieser Schritt führte zu einer Reihe von Gesetzesänderungen, welche den schnelleren Ausbau erneuerbarer Energien begünstigten. Außerdem wurde die rasche Fertigstellung bisheriger im Bau befindlicher fossiler Kraftwerke forciert und ein Programm zur Förderung flexibler Kraftwerke erlassen, um die Versorgungssicherheit weiterhin zu gewährleisten. Diese Entwicklung wird durch den „Kohleausstieg“ vom 26. Januar 2019 unterstützt: bis zum Jahr 2038 soll die Stromerzeugung aus Kohlekraftwerken eingestellt werden (Kommission „Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung“, 2019). Mittlerweile ist der Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung auf 40,4% angewachsen (Fraunhofer ISE (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme), 2019) und das BMWi berichtet von einer positiv voranschreitenden Energiewende mit stabilen Strompreisen sowie einer hohen Versorgungssicherheit (BMWi, 2017). Die Umstrukturierung der deutschen Energiewirtschaft scheint somit erfolgreich zu verlaufen.

Die Maßnahmen der Energiewende werden häufig intensiver Kritik ausgesetzt, was angesichts der zahlreichen beteiligten Interessengruppen nicht verwunderlich ist. Einige Kritiker bemängeln, dass zur Errichtung der Anlagen für erneuerbare Energien verhältnismäßig viele Rohstoffe benötigt werden (Bräutigam, 2013; Vidal, et al., 2013). Es wird z.B. angemerkt, dass die benötigten Mengen an Zement für Wasserkraftanlagen wesentlich höher seien als für Atomkraftwerke mit vergleichbarer Leistung (vgl. ebd.). Sicherlich spielt der Ressourcenbedarf im Rahmen der Beurteilung von Nachhaltigkeit (i.S.v. Ressourcenschonung und Emissionsvermeidung) einer Technologie eine wichtige

Rolle. Vor allem die Emissionen, welche bei der Rohstoffgewinnung zur Errichtung von Anlagen und bei der Produktion entstehen, werden seitens des BMWi im Rahmen der Beurteilung von erneuerbaren Energien in der öffentlichen Berichterstattung kaum aufgeführt. Außerdem liegt der Fokus der umweltwirksamen Aspekte fast ausschließlich auf klimawirksamen Emissionen. Dies birgt die Gefahr einer einseitigen Betrachtung. Um die Infrastruktur der Energiewende hinsichtlich ihrer nachhaltigen Ausrichtung vollständig beurteilen zu können, ist es notwendig, Erzeugungsmethoden ganzheitlich zu betrachten. Außerdem sollten Emissionen und benötigte Rohstoffe in breitem Umfang erfasst werden. Die vorliegende Arbeit betrachtet folgende Emissionen und Rohstoffe:

- Emissionen
  - ♦ Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>)
  - ♦ Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>)
  - ♦ Stickoxide (NO<sub>x</sub>)
  - ♦ Methan (CH<sub>4</sub>)
  - ♦ Distickstoffmonoxid (N<sub>2</sub>O)
  - ♦ Partikel gesamt
  - ♦ Feinstaub der Partikelgröße PM<sub>10</sub>
  - ♦ Radon-222 (Rn-222)
  - ♦ Isotop des Kohlenstoffs C-14
  - ♦ Ionisierte Strahlung
- Entnommene Rohstoffe
  - ♦ Bauxit
  - ♦ Eisen
  - ♦ Kupfer
  - ♦ Kalkstein

Für die Beurteilung der Energiewende in Deutschland werden Daten einer Lebenszyklusanalyse (LZA) von Marheineke (2002) herangezogen. Dabei werden die Emissionen einer Infrastruktur gemäß der Energiewende (Szenario EW) mit den Emissionen einer Infrastruktur ohne den Einfluss der Energiewende (Szenario „Business-as-Usual“) für den Zeitraum 2015-2050 verglichen. Das weitere Vorgehen gliedert sich wie folgt: In Kapitel 2 findet eine Einführung zu Lebenszyklusanalysen statt. Anschließend wird ein Modell von Marheineke in Kapitel 3 vorgestellt. Da dieses Modell keine Betrachtung der Stromerzeugungstechniken aus Öl und Biomasse vornimmt, müssen entsprechende Daten aus anderen Quellen herangezogen und angepasst werden. Dies wird in Kapitel 4 beschrieben. Die Technologie zur Stromerzeugung hat maßgeblichen



Einfluss auf die Stärke und Art der Emissionen. Daher wird der Strommix der energiewirtschaftlichen Infrastruktur Deutschlands bis 2050 in Kapitel 5 geschätzt. In Kapitel 6 wird die Berechnung der Emissionen beider Modelle (EW und BAU<sup>1</sup>) für die Jahre 2015-2050 durchgeführt. Anschließend erfolgt eine Interpretation der Ergebnisse. In Kapitel 7 wird eine Sensitivitätsanalyse der Sachbilanz durchgeführt. Kapitel 8 behandelt alternative Gestaltungsmöglichkeiten des Strommix durch die Energiewende. Anschließend folgen eine Zusammenfassung und ein Ausblick.

## **1.1. Definition „Energiewende“**

Der Begriff „Energiewende“ wird im Zusammenhang mit aktuellen Umbrüchen häufig verwendet, kann aber auf sehr unterschiedliche Art und Weise interpretiert werden. Die Definition der Energiewende als Prozess der Abkehr von fossilen Energieträgern und der Kernkraft zu Gunsten regenerativer Erzeugungsmethoden (Hake, et al., 2015) dürfte sehr weit verbreitet sein, lässt jedoch viel Interpretationsspielraum. Der Beginn der Energiewende ließe sich gemäß dieser Definition zeitlich auf den Beginn der Anti-Atomkraft-Bewegung in den 1970er Jahren oder auch das Inkrafttreten des EEG-Gesetzes im Jahr 2000 (Bundesanzeiger Verlag GmbH, 2000) legen. Zurzeit werden rund 180 Ziele zu unterschiedlichen Themengebieten im Rahmen der Energiewende verfolgt (BMWi, 2018), (BMWi, 2019). Dies verdeutlicht zusätzlich den großen Umfang dieses Begriffs.

Die vorliegende Arbeit hat das Ziel, die ökologischen Auswirkungen der Umgestaltung des Stromsektors einzuschätzen. Daher wird die Energiewende als eine enge Auswahl aktuell geplanter Maßnahmen zum Erreichen von Emissionszielen definiert. Diese Maßnahmen sind u.a.:

1. Ausstieg aus der Kernkraft bis zum Jahr 2022
2. Kohleausstieg bis zum Jahr 2038
3. 2025: 40-45 % Anteil erneuerbarer Energieträger am Stromverbrauch

---

<sup>1</sup> Angelehnt an (Barzantny, et al., 2009)

## 1.2. Darstellung der Energiewende

Die Energiewende wird in dieser Arbeit ausschließlich durch ein Variieren des Strommix dargestellt. Das EEG bietet Möglichkeiten, mittelfristig Einfluss auf die Entwicklung unterschiedlicher Technologien zu nehmen (Hohmeyer, 2001). Daher ist diese Annahme durchaus plausibel.

Instrumente der Bereiche Sektorkopplung und Energieeffizienz beziehen sich hauptsächlich auf Einzelanwendungen, wie z.B. Haushaltsgeräte oder Vorschriften für Unternehmen unterschiedlicher Sektoren (BMW, 2018). Diese Änderungen betreffen andere Sektoren, wirken sich jedoch durch eine Veränderung der Nachfrage nach Elektrizität und somit über eine erhöhte Produktion aus. Grund für einen höheren Strombedarf können z.B. Maßnahmen zur Elektrifizierung von Raumheizung und Mobilität sein (Matthes, et al., 2018). Diese Effekte sind Teil einer sektorübergreifenden Energiewende, haben ihren Ursprung jedoch nicht im Stromsektor und werden in dieser Arbeit daher als externe Effekte behandelt. Somit ist ein Szenario, welches eine höhere Stromproduktion unter der Energiewende als ohne die Energiewende prognostiziert, gerechtfertigt.

Um erzeugten Strom liefern zu können, müssen neue Kraftwerke an das Stromnetz angeschlossen werden. Somit bringt eine Umstrukturierung des Strommix unweigerlich Veränderungen des Stromnetzes mit sich. Außerdem müssen für Kraftwerke mit stark volatiler Einspeisung (z.B. Windkraft und Photovoltaik) Speicher für die Überproduktion bzw. Reservekraftwerke für Zeiten geringer Einspeisung betrieben werden (Barzantny, et al., 2009). Die Datenlage hinsichtlich der Emissionen, welche der Ausbau des Netzes und die Bereitstellung von Reserven betreffen, ist äußerst dürftig. Daher wird dieser Aspekt in der vorliegenden Arbeit nicht in die Berechnung aufgenommen. Eine Studie der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Rahmen des Netzanschlusses von Offshore-Windkraftanlagen zeigt, dass die zusätzlichen Emissionen gering ausfallen (Pehnt, et al., 2008). Z.B. beträgt der zusätzliche CO<sub>2</sub>-Ausstoß durch den Netzausbau (2-3%) und den Betrieb fossiler Reservekraftwerke (3-8%) einen relativ kleinen Anteil der eingesparten CO<sub>2</sub>-Menge durch

abgeschaltete Kohlekraftwerke. Somit kann der Effekt des Netzausbaus im Vergleich zum Effekt der Veränderung der Stromproduktion als gering eingeschätzt werden.

## **2. Methodische Grundlagen**

Dieses Kapitel gibt einen kurzen Überblick über die wichtigsten verwendeten Methoden, auf welchen die nachfolgenden Kapitel aufbauen.

### **2.1. Wichtigste Aspekte von Lebenszyklusanalysen**

Lebenszyklusanalysen verfügen über eine hohe Bandbreite von Anwendungsfeldern und haben eine Entwicklungszeit von über 40 Jahren durchlaufen. Daher würde eine vollumfassende Beschreibung den Rahmen dieser Arbeit überschreiten. Dieses Kapitel soll einen schnellen Einstieg in die Thematik ermöglichen. Im deutschsprachigen Raum wird die Lebenszyklusanalyse häufig als Ökobilanz bezeichnet. Diese beinhaltet genau genommen nicht die Betrachtung ökonomischer und gesellschaftlicher Faktoren (Raschke, 2015). Jedoch werden beide Begriffe in der ISO 14044 parallel verwendet (DIN EN ISO 14044, 2009). Daher wird im Folgenden auf eine genauere Unterscheidung verzichtet.

Die ISO-Norm 14040 (2006) liefert einige Definitionen des Begriffs Lebenszyklusanalyse und dient als primäre Quelle der folgenden Beschreibung. Ein Lebenszyklus wird als Menge aufeinanderfolgender und untereinander verbundener Stufen eines Produktsystems definiert, was als „Cradle-to-Grave“-Ansatz bezeichnet wird (vgl. ebd.). Dieses System reicht von der Rohstoffgewinnung bis hin zur Entsorgung des Produktes. Die Lebenszyklusanalyse untersucht sämtliche im Rahmen dieser Stufen auftretende Umwelteinflüsse und liefert eine relativ umfassende Perspektive. Lebenszyklusanalysen werden meistens entweder als Entscheidungshilfe oder als Datengrundlage genutzt (de Haes & Heijungs, 2007).

Die Durchführung einer Lebenszyklusanalyse umfasst vier Phasen: Definition des Ziels und des Umfangs, Erstellung einer Sachbilanz, Durchführung einer Wirkungsabschätzung und die Interpretation der Ergebnisse. Besonders die Auswahl des Umfangs stellt

Anwender vor eine große Herausforderung, da häufig entschieden werden muss, welche Prozesse ausgewählt und wie viele Prozessschritte erfasst werden (Suh, et al., 2004). Diese Entscheidungen müssen oftmals ohne genaue Kenntnisse der Prozesse oder gar wissenschaftliche Maßstäbe getroffen werden (Suh, et al., 2004, S. 657). Außerdem erschweren unterschiedlich definierte Prozesse die Vergleichbarkeit von Ergebnissen (vgl. ebd.). Ein wichtiger Schritt einer Lebenszyklusanalyse ist die Definition einer funktionellen Einheit, an welcher sämtliche Umwelteinflüsse gemessen werden. Für die Betrachtung eines Stromsektors wird häufig die funktionelle Einheit kWh<sub>el</sub> verwendet; so auch in dieser Arbeit. Die Sachbilanz ist eine quantitative, modellhafte Beschreibung der ein- und ausgehenden Stoffe des Produktsystems. Betrachtet man z.B. die Stromerzeugung eines Kohlekraftwerks, kann die Sachbilanz z.B. Daten zu Emissionen, aber auch die verbrauchte Kohle oder Rohstoffe zur Errichtung der Anlage enthalten. Die Wirkungsabschätzung leitet aus umweltwirksamen Einflüssen Schadenskategorien ab, um einen besseren Eindruck von der Bedeutung einzelner Emissionen zu ermöglichen (ISO , 2006). Z.B. kann von den Emissionen aus Biomasseanlagen auf Treibhauseffekte oder Versauerung geschlossen werden (Nitsch, et al., 2004, S. 114). Die Interpretation der Ergebnisse einer Lebenszyklusanalyse betrachtet sowohl Aspekte der Sachbilanz als auch der Wirkungsabschätzung und ist als iterativer Prozess zu verstehen (ISO , 2006), wobei der Umfang der LZA unter Umständen mehrmals verändert wird. Abbildung 1 dient der Verdeutlichung:

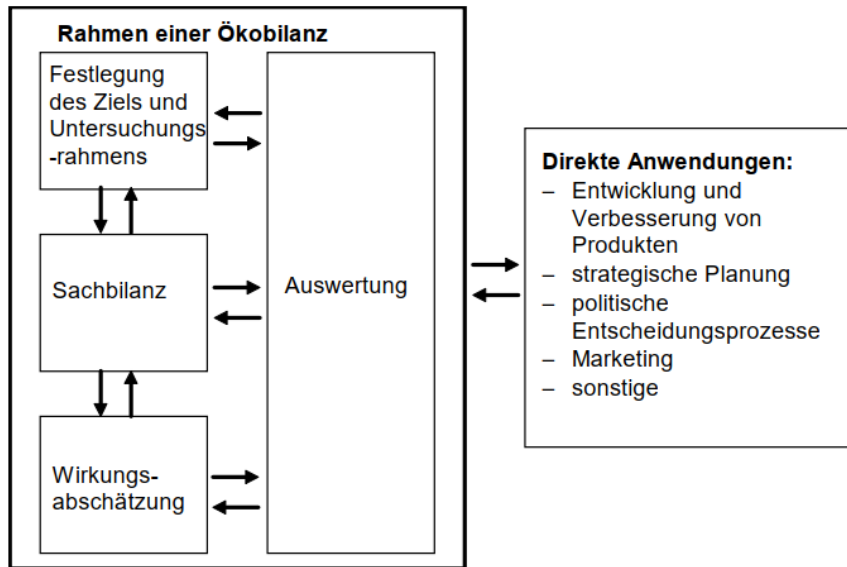


Abbildung 1: Stufen einer Lebenszyklusanalyse (ISO, 2006, S. 8, zitiert nach Schmitz & Paulini, 1999, S. 3,)

Es fließen durchaus subjektive Entscheidungen bei der Durchführung von Lebenszyklusanalysen ein, z.B. hinsichtlich der Auswahl des Umfangs (Miettinen & Hämäläinen, 1997). Die Ergebnisse innerhalb der Wirkungseinschätzung lassen sich zudem mit ausschließlich naturwissenschaftlichen Methoden nicht gegeneinander abwägen (Schmitz & Paulini, 1999). Beispielsweise handelt es sich bei 321 m<sup>2</sup> Flächenversiegelung der Kategorie Naturraumbeanspruchung und 123 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente der Kategorie Treibhauseffekt um komplett unterschiedliche Kategorien und Einheiten, welche nicht unmittelbar vergleichbar sind (vgl. ebd.). Zu diesem Zweck wurden Methoden zur Aggregation, Bewertung und Hierarchisierung entwickelt, wie z.B. CML<sup>2</sup> 2000, Eco Indicator 99, EDIP<sup>3</sup> 96, EPS<sup>4</sup>, Ecopoints 97 oder die Wirkungsindikatoren des Umweltbundesamtes (UBA) (Renou, et al., 2008; Schmitz & Paulini, 1999).

## 2.2. Zeitliche Entwicklung von Lebenszyklusanalysen

Eine der ersten Lebenszyklusanalysen wurde 1969 durch das Midwest Research Institute im Auftrag der Coca-Cola Company durchgeführt und behandelte u.a. die Emissionen

<sup>2</sup> CML: Centre of Environmental Studies, Universität Leiden

<sup>3</sup> Environmental Design of Industrial Products

<sup>4</sup> EPS: Environmental Priority Strategy in product design

sowie den Ressourcenbedarf unterschiedlicher Getränkebehälter (Guinée, et al., 2011). Eine 1984 von der Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt veröffentlichte Studie, welche benötigte Daten für die Durchführung von Lebenszyklusanalysen lieferte und eine breitere Anwendung von Lebenszyklusanalyse ermöglichte, verstärkte das Interesse an Lebenszyklusanalysen (Bundesamt für Umweltschutz, 1984; zitiert nach (Guinée, et al., 2011); (Assies, 1991, 1992; zitiert nach Guinée, et al., 2011). Insgesamt wurden in der Zeit 1970-1990 Lebenszyklusanalysen ohne theoretische Grundlage und mit sehr unterschiedlichen Methoden entwickelt (Guinée, et al., 2011). Es fehlte an einer wissenschaftlichen Grundlage und Plattformen des Austauschs (vgl. ebd.). Hinsichtlich der Ergebnisse gab es erhebliche Abweichungen, was einer weiten Verbreitung von Lebenszyklusanalysen im Weg stand (Guinée, et al., 1993). Dieser Misstand wurde durch die koordinierende Arbeit von SETAC und die seitens der ISO gesetzten Standards in der Zeit 1990-2000 beseitigt (Guinée, et al., 2011). Seit dieser Zeit existieren eine einheitliche Terminologie und einheitliche Rahmenbedingungen sowie Plattformen des Austauschs (vgl. ebd.). Für die Zeit 2000-2010 kann eine höhere Divergenz der Methoden sowie ein bis heute bestehender Anstieg der Nutzung an Lebenszyklusanalysen verzeichnet werden, welcher sich u.a. durch die Gründung verschiedener Netzwerke auf nationaler sowie auf europäischer Ebene auszeichnet (Europäische Kommission, o.d.; zitiert nach Guinée, et al., 2011; Guinée, et al., 2011). In diesem Zeitraum haben sich auch die drei wichtigsten Ansätze zur Vereinfachung der zu identifizierenden Prozessketten herausgebildet: Direkte Vereinfachung der Prozesse, LZA auf Basis einer Input-Output-Analyse (IOA) und eine hybride Methode, welche die ersten beiden Varianten verbindet (Rebitzer, et al., 2004).

Das Modell THEMIS<sup>5</sup>, welches von Hertwicht et al. (2015b) entwickelt wurde, stellt das umfassendste Modell zur Lebenszyklusanalyse eines Stromsektors dar, welches in der einschlägigen wissenschaftlichen Forschungsliteratur bekannt ist. THEMIS verbindet technische Prozesse der Stromproduktion, welche direkt mit der funktionellen Einheit verbunden sind, mit LZA-Hintergrundprozessen sowie mit einer multiregionalen Input-

---

<sup>5</sup> Technology Hybridized Environmental-economic Model with Integrated Scenarios

Output-Analyse. Dadurch ist es möglich, Auswirkungen technischen Fortschritts der Stromerzeugung auf die funktionelle Einheit zurückzuführen (vgl. ebd.). Z.B. würde eine Wirkungsgradsteigerung bei der Stromproduktion durch Solaranlagen dazu führen, dass der verwendete Strom bei der Herstellung der Solaranlagen besser bewertet wird – vorausgesetzt, er fließt in den entsprechenden Strommix ein.

## **2.3. Alternative Methoden zu Lebenszyklusanalysen**

Neben Lebenszyklusanalysen existieren weitere Möglichkeiten, Anlagen der Stromerzeugung durch einen holistischen Ansatz zu beurteilen. Einige dieser Methoden werden in diesem Abschnitt vorgestellt und mit der Methodik von Lebenszyklusanalysen verglichen. Auf die Produktlinienanalyse und ganzheitliche Betrachtung von Energiesystemen wird nicht eingegangen, da diese Methoden in der gegenwärtigen Literatur nicht mehr adressiert werden.

### **2.3.1. Carbon Accounting**

Carbon Accounting scheint noch nicht als einheitlicher Begriff etabliert zu sein, wird jedoch mehrfach in bestehender Literatur erwähnt und kann sich auch auf treibhauswirksame Emissionen generell beziehen (Stechemesser & Guenther, 2012). Der Begriff wird einerseits verwendet, um die Auswirkungen von CO<sub>2</sub>-bezogenen Regulierungen im Rahmen eines Finanzberichts zu beschreiben (Hespenheide, et al., 2010). Andererseits stellt er eine umgangssprachliche Bezeichnung für das Sammeln von verursachten und vermiedenen CO<sub>2</sub>-Emissionen innerhalb einer Bilanz dar (vgl. ebd.). Die Methode Carbon Accounting befindet sich offensichtlich auf einem anderen Entwicklungsstand wie Methoden der Lebenszyklusanalysen, da noch keine einheitlichen Definitionen, wie sie seitens der ISO bereitgestellt werden, existieren. Außerdem steht hinsichtlich Carbon Accounting kein umfassender Ansatz wie durch die Cradle-to-Grave-Betrachtung der Lebenszyklusanalyse zur Verfügung. Letztlich stellt eine Lebenszyklusanalyse einen wesentlich umfassenderen Ansatz dar, welcher sich zudem nicht auf einen einzelnen Rohstoff bzw. eine einzelne Rohstoffklasse begrenzt.

### **2.3.2. Ganzheitliche Bilanzierung**

Ganzheitliche Bilanzierung ist für Produktionsprozesse in Unternehmen konzipiert und vor allem auf eine umfassende Analyse ausgelegt, worin auch die Abgrenzung zu Ökobilanzen hervorgehoben wird (Eyerer, et al., o.d.). Das Konzept wurde entwickelt, um einer einseitigen Betrachtungsweise von z.B. Bauteilen entgegenzuwirken (vgl. ebd.). Entsprechend wird die Verwendung technischer, wirtschaftlicher und umweltlicher Pflichtenhefte thematisiert (vgl. ebd.). Neben der Untersuchung von Produkten behandelt die ganzheitliche Bilanzierung auch Prozesse und Projekte, was durch Erfassung von Daten wie Personalkosten, Werkstoffeigenschaften oder Verfahrenstechniken erfolgt (Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde, 1999; zitiert nach Marheineke, 2002). Im Gegensatz zu Lebenszyklusanalysen ist das Anwendungsfeld als deutlich auf produzierende Unternehmen beschränkt einzuschätzen.

### **2.4. Forschungsbericht Marheineke, 2002**

Marheineke (2002) führt eine Verknüpfung von Input-Output-Analyse und prozessorientierter Lebenszyklusanalyse durch, um die Auswirkungen der Stromerzeugung auf Menschen und Umwelt zu messen. Im Anschluss an die Erstellung der Sachbilanz erfolgt eine Wirkungsabschätzung mit anschließender monetärer Auswertung sowie eine parallel durchgeführte Wirkungskettenanalyse.

Der Forschungsbericht von Marheineke (2002) wurde auf Grund der relativ großen Bandbreite von unterschiedlichen Erzeugungstechniken und Umweltaspekten für diese Arbeit ausgewählt. Die Betrachtung von vier benötigten Rohstoffen sowie der Bezug auf den deutschen Stromsektor sind weitere Vorteile dieses Forschungsberichts. Da die Daten der Sachbilanz genutzt werden, erfolgt eine genauere Beschreibung der Erstellung der Sachbilanz. Es folgen (basierend auf Marheineke (2002)) kompakte Beschreibungen von Prozesskettenanalyse, Input-Output-Analyse und der Verknüpfung beider Methoden.

Im Rahmen der Prozesskettenanalyse werden komplexe Systeme in einzelne Prozesse unterteilt (Marheineke, 2002). Für jeden Prozess werden die Auswirkungen auf die Umwelt sowie Vorleistungen erfasst (vgl. ebd.). Durch ein solches System ist ein hoher



Detailierungsgrad möglich, jedoch steigt auch der Aufwand mit jedem weiteren erfassten Prozess (vgl. ebd.). Zu diesem Zweck werden Abbruchkriterien gebildet, welche den Aufwand reduzieren, jedoch keine wichtigen Aspekte der Untersuchung ausgeschlossen werden. Die folgende Abbildung dient der Veranschaulichung eines Kraftwerksprozesses.

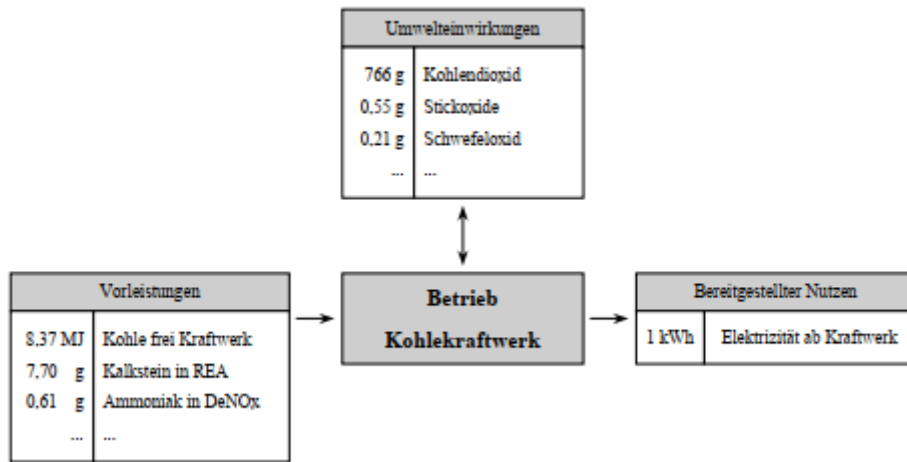


Abbildung 2: Formale Beschreibung eines Prozesses (Marheineke, 2002; S. 20)

Das Konzept der Input-Output-Analyse basiert auf Wassily Leontief (Leontief, 1966).

		beziehende Produktionsbereiche										
		1	...	n								
liefernde Produktionsbereiche	1	$x_{1,1}$	...	$x_{1,n}$	.	.	.	$g_1$	$h_1$	.	.	$z_1$
	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	n	$x_{n,1}$	...	$x_{n,n}$	.	.	.	$g_n$	$h_n$	.	.	$z_n$
$\Sigma$ bezogene Vorleistg.		...										
Abschreibungen		$b_1$	...	$b_n$								
Produktionswerte		$q_1$	...	$q_n$								
Importe		...										
Ges. Aufkommen		$z_1$	...	$z_n$								

$X = (x_{ij})$ :	Produktionsverflechtungsmatrix
$\underline{b} = (b_j)$ :	Vektor der Abschreibungen
$\underline{g} = (g_j)$ :	Vektor der Investitionsnachfrage nach Ausrüstungen
$\underline{h} = (h_j)$ :	Vektor der Investitionsnachfrage nach Bauten
$\underline{q} = (q_j)$ :	Vektor der Produktionswerte
$\underline{z} = (z_j)$ :	Vektor des gesamten Güteraufkommens bzw. der gesamten Güterverwendung

Abbildung 3: Input-Output-Tabelle (Statistisches Bundesamt, kein Datum; zitiert nach Marheineke, 2002)

Eine Input-Output-Matrix lässt sich in drei Quadranten aufteilen (Marheineke, 2002). Im ersten Quadranten befindet sich eine Input-Output-Tabelle, im zweiten Quadranten ein Lieferungs- und Produktionsbereich und im dritten Quadranten befinden sich die primären Inputs (vgl. ebd.). Marheineke (2002) bildet zur weiteren Verwendung eine Input-Koeffizienten-Matrix  $A_{IOA}$ , welche Auskunft über die notwendigen Inputs aus Sektor  $i$  an Sektor  $j$  für die Herstellung eines Outputs liefert. Im nächsten Schritt des Forschungsberichts werden die Umwelteinflüsse, welche bei der Herstellung eines Outputs entstehen, als  $V_{D,IOA} = (v_{D,IOA i,j}) i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n + 1$  definiert (vgl. ebd.). Mit Hilfe von  $A_{IOA}$  und  $V_{D,IOA}$  kann die kumulierte Einwirkung  $V_{C,IOA}$  durch die Produktion einer Einheit  $Y_{IOA} = (y_{IOA j}) j = 1, \dots, n + 1$  über Addition der indirekten Wirkungen berechnet werden. Anschließend beschreibt Marheineke (2002) die Verknüpfung von Input-Output-Analyse, welche er in folgender Abbildung zusammenfasst.

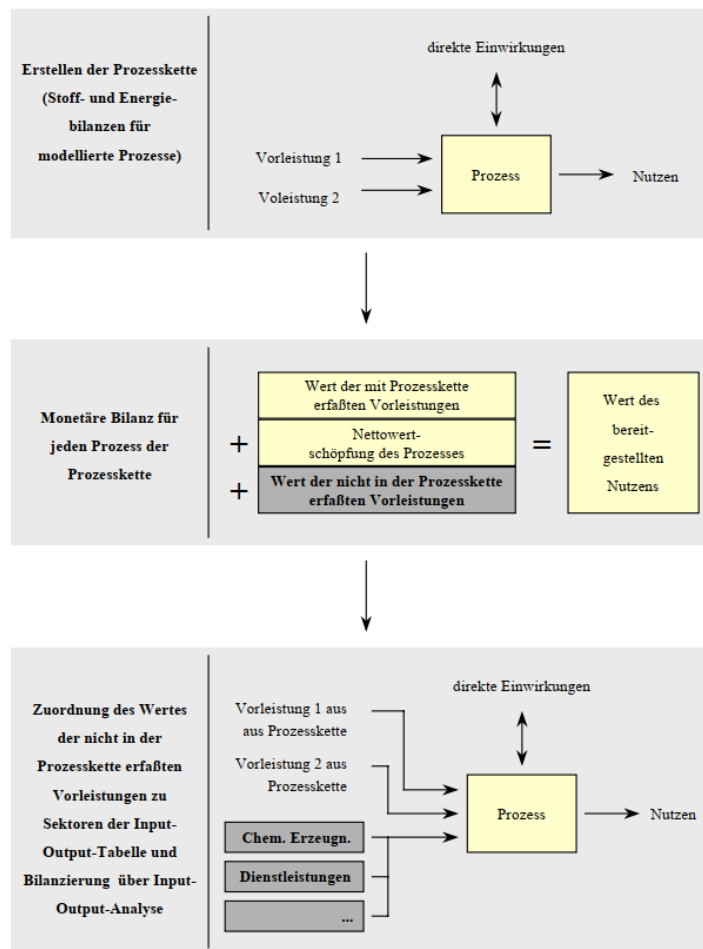


Abbildung 4: Kopplung von Input-Output-Analyse und Prozesskettenanalyse (Marheineke, 2002, S.27)

## **2.5. Einordnung der vorliegenden Arbeit**

Die vorliegende Arbeit wurde durch eine Studie von Hertwich, et al. (2015a) motiviert und hat das Ziel, eine entsprechende Untersuchung des deutschen Stromsektors durchzuführen. Hertwich et al. (2015a) vergleicht ein Szenario BLUE-Map der International Energy Agency (2010), welches die bisherige Entwicklung der Erzeugungsmethoden bis 2050 fortführt mit einem BASELINE-Szenario, welches den Weg zu einer Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien beschreibt. Die beiden Modelle wurden mit Hilfe einer komplexen Lebenszyklusanalyse verglichen (vgl. ebd.). Entsprechend diesem Vorgehen wurden für diese Arbeit Modelle zur Entwicklung der Stromerzeugungsstruktur identifiziert und mit den Sachbilanzen aus Marheineke, (2002) kombiniert. Somit stellt dieses Vorgehen eine starke Vereinfachung der Vorgehensweise von Hertwich et al. (2015a) dar. Vor allem ist zu beachten, dass mit konstanten Werten der Sachbilanz gerechnet wird und technische Verbesserungen wie z.B. ein in Zukunft höherer Wirkungsgrad nicht berücksichtigt werden.

Aktuell liegt keine Studie vor, welche ebenfalls den Vergleich von Szenarien in Kombination mit einer breiten Betrachtung von Schadstoffen und entnommenen Rohstoffen im Hinblick auf den deutschen Stromsektor durchführt.

Die Einflüsse des Aufbaus und des Abrisses von Kraftwerken fließen bei Marheineke (2002) in die Sachbilanz ein und werden über die Arbeit des jeweiligen Kraftwerks in kWh<sub>el</sub> ausgedrückt. Daher ist eine separate Betrachtung der installierten Leistung im Rahmen der Auswahl eines Strommix oder bei der Berechnung umweltwirksamer Effekte nicht notwendig.

## **3. Emissionen von Stromerzeugungstechniken**

### **3.1. Definition der Sachbilanz einer Stromerzeugungstechnik**

Als Bezugsgröße wird Stromerzeugung in elektrischen Kilowattstunden (kWh<sub>el</sub>) definiert. Folgende Schadstoffe und entnommene Rohstoffe pro kWh<sub>el</sub> werden betrachtet:

	Bezeichnung	Summenformel	Notation	Einheit
Emissionen	Kohlenstoffdioxid	CO <sub>2</sub>	CO2	g/kWh <sub>el</sub>
	Schwefeldioxid	SO <sub>2</sub>	SO2	mg/kWh <sub>el</sub>
	Stickoxide	NO <sub>x</sub>	NOX	mg/kWh <sub>el</sub>
	Methan	CH <sub>4</sub>	CH4	mg/kWh <sub>el</sub>
	Distickstoffmonoxid	N <sub>2</sub> O	N2O	mg/kWh <sub>el</sub>
	Partikel gesamt	-	P	mg/kWh <sub>el</sub>
	Feinstaub der Partikelgröße PM <sub>10</sub>	-	PM10	mg/kWh <sub>el</sub>
	Radon-222	-	RN222	kBq/kWh <sub>el</sub>
	Isotop des Kohlenstoffs C-14	-	C14	Bq/kWh <sub>el</sub>
	Ionisierte Strahlung	-	IS	(10 <sup>-12</sup> PersSv) /kWh <sub>el</sub>
Entnommene Rohstoffe	Bauxit	-	BX	mg/kWh <sub>el</sub>
	Eisen	Fe	FE	mg/kWh <sub>el</sub>
	Kupfer	Cu	CU	mg/kWh <sub>el</sub>
	Kalkstein	-	K	mg/kWh <sub>el</sub>

Tabelle 1: Auflistung der Emissionen und entnommenen Rohstoffe

Die Menge der Emissionen und Rohstoffe ist wie folgt als S definiert:

$$S = (CO_2, SO_2, NOX, CH_4, N_2O, P, PM_{10}, RN_{222}, C_{14}, IS, BX, FE, CU, K)$$

mit  $q \in S$  und  $r = |S| = 14$

Folgende Erzeugungstechniken werden betrachtet:

- Steinkohle (SK)
- Braunkohle (BK)
- Mineralöl (MO)
- Erdgas (EG)
- Kernkraft (KK)
- Wasserkraft (WAK)
- Windkraft (WK)
- Biomasse (BM)
- Photovoltaik (PV)

E ist als Menge der untersuchten Erzeugungstechniken definiert:

$$E = (SK, BK, MO, EG, KK, WAK, WK, BM, PV) \quad \text{mit } i \in E \text{ und } n = |E| = 9$$

Die Sachbilanz lässt sich als Matrix SB mit, r Zeilen und n Spalten darstellen.

$$SB = \begin{bmatrix} sb_{CO_2,SK} & \cdots & sb_{CO_2,PV} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ sb_{K,SK} & \cdots & sb_{K,PV} \end{bmatrix} \text{ mit } sb_{q,i} \in SB \quad (1)$$

*Formel 1 - Sachbilanzmatrix: Emissionen und entnommenen Rohstoffe pro erzeugte kWh<sub>el</sub> durch Technik i*

$sb_{q,i}$  beschreibt die Emission/den entnommenen Rohstoff für eine erzeugte Kilowattstunde Elektrizität der Technik i. Entsprechend listet eine Spalte von SB<sub>i</sub> sämtliche Emissionen bzw. entnommene Rohstoffe für eine erzeugte kWh<sub>el</sub> der Erzeugungstechnik i auf. Eine Zeile SB'<sub>q</sub> listet die Emission bzw. den entnommene Rohstoff q aller Erzeugungstechniken auf.

### 3.2. Sachbilanzen aus Marheineke, 2002

Marheineke stellt pro Erzeugungstechnik mehrere Sachbilanzen zur Verfügung (Marheineke, 2002). Er listet innerhalb einer Erzeugungstechnik mehrere Varianten auf, welche sich z.B. hinsichtlich des Wirkungsgrads, der Technologie oder der Herkunftsregion der Brennstoffe unterscheiden (Marheineke, 2002, S. 167-77). Es wurden für das weitere Vorgehen jeweils arithmetische Mittel aller verfügbaren Erzeugungstechniken gebildet, um eine möglichst repräsentative Sachbilanz zu erhalten. Da es sich laut Marheineke bereits um eine repräsentative Auswahl an Varianten handelt, wurde auf ein komplexeres Auswahlverfahren verzichtet. Alternative Sachbilanzen werden in Kapitel 6 im Rahmen der Sensitivitätsanalyse behandelt.

SO<sub>x</sub> wird als SO<sub>2</sub> gelistet, da die Schadstoffe im Rahmen der Vergleiche mit anderen Studien identisch gelistet wurden. Nähere Informationen dazu waren in dem Forschungsbericht nicht zu finden. Durch diesen Schritt kann die Sachbilanz mit Werten für SO<sub>2</sub> aus anderen Sachbilanzen für fehlende Erzeugungstechniken ergänzt werden.

Für Steinkohle erfolgt eine getrennte Auflistung von in Deutschland geförderter Steinkohle und importierter Steinkohle. Die arithmetischen Mittel der Sachbilanzen werden gemäß dem Importanteil von Steinkohle des Jahres 2000 gewichtet (ca. 44%).

Hinsichtlich Photovoltaik wird zwischen Dachanlagen, Photovoltaik-Kraftwerken sowie aus Dachanlagen, bei deren Produktion Photovoltaik-Strom eingesetzt wird, unterschieden. Die ersten beiden dieser Varianten wurden mit 2/5 gewichtet, die letzte Variante mit 1/5, da die Wahrscheinlichkeit einer konsequenten Durchsetzung als gering eingeschätzt wird.

Bezogen auf die Windkraft wird lediglich auf die Anlagengruppe mit der variierenden Leistung und nicht auf die Anlagengruppe mit der variierenden Windgeschwindigkeit für eine 1MW-Anlage eingegangen, da letztere Gruppe der Veranschaulichung diene.

Insgesamt fällt bei regenerativen Erzeugungsmethoden auf, dass größere Anlagen geringere Schadstoffwerte pro MWh erreichen. Dieser Effekt tritt besonders stark bei Windkraftanlagen auf. Bei Wasserkraftanlagen lässt sich hingegen kein linearer Effekt feststellen.

### **3.3. Ergänzung der Sachbilanz für Mineralöl**

Die Schadstoffbilanz für Öl wurde aus einem Bericht der Europäischen Kommission abgeleitet (Europäische Kommission, 1999). Ziel dieser Studie ist es, Externalitäten unterschiedlicher Erzeugungstechniken innerhalb europäischer Länder vergleichbar zu machen. Separate Daten für Deutschland sind in Tabelle 6.1 (Europäische Kommission, 1999, S. 123) aufgelistet. Ein Ölkraftwerk mit Gasturbine diene dabei als repräsentatives Kraftwerk. Der Großteil des in Deutschland verwendeten Öls stammte zum Zeitpunkt der Studie aus OPEC-Ländern, Osteuropa, Norwegen und Großbritannien. Entsprechende Annahmen wurden hinsichtlich der Lieferkette getroffen. Auffällig ist der hohe Wert für Stickoxide NO<sub>x</sub>. Würde dieser direkt in die Sachbilanz übernommen, würde der Ausstoß von Stickoxiden bei gleichverteilter Erzeugung zu fast hundert Prozent durch die Technik Mineralöl hervorgebracht (bezogen auf Tabelle 5 der vorliegenden Arbeit). Vergleicht man die Werte von Erdgas und Öl in Tabelle 6.1 wird deutlich, dass eine so starke Wirkung

von Mineralöl sehr unwahrscheinlich ist. In einer späteren Studie der Reihe ExternE werden für Mineralöl Werte in einer ähnlichen Größenordnung wie für Steinkohle, Braunkohle und Erdgas ermittelt (Dones, et al., 2005, S. 17). Vermutlich wurde in Tabelle 6.1 (Europäische Kommission, 1999, S. 123) Gramm (g) statt Milligramm (mg) eingetragen. Daher wird der Wert in mg/kWh<sub>el</sub> übernommen.

Die ExternE-Methode ist keine Lebenszyklusanalyse im klassischen Sinne, jedoch wird die Sachbilanz ebenfalls mit der Cradle-to-grave-Methode gebildet (Europäische Kommission, 1999). Die Unterschiede zur Lebenszyklusanalyse bestehen hauptsächlich im Bereich der Wirkungsabschätzung (vgl. ebd.). Wie bei Marheineke (2002) wird ein Bottom-up-Ansatz durchgeführt, jedoch wird auf eine Input-Output-Analyse (IOA) verzichtet (Europäische Kommission, 1999). Marheineke gibt an, dass der Beitrag der IOA zur Schadstoffbilanz für Kraftwerke fossiler Energieträger im Vergleich zu regenerativen Energien relativ gering sei (Marheineke, 2002, S. 147). Grund seien dominierende Prozesse in der regenerativen Erzeugung, welche bereits abgebildet sind. Genaue Zahlen zu allen Technologien werden leider nicht aufgeführt. Für Photovoltaik beträgt der Beitrag der IOA ca. 20% der gesamten Schadstoffbilanz (Marheineke, 2002, S. 146). Angesichts der geringeren Effekte für fossile Erzeugungstechniken wird daher für die Ergänzung der Sachbilanz angenommen, dass der Anteil der IOA 10% der ursprünglichen Sachbilanzwerte beträgt. Daher werden für die untenstehende Sachbilanz die Werte der Studie der Europäischen Kommission um 10% erhöht.

CO <sub>2</sub> (g)	SO <sub>2</sub> (mg)	NO <sub>x</sub> (mg)	CH <sub>4</sub> (mg)	N <sub>2</sub> O (mg)	P (mg)	PM <sub>10</sub> (mg)	Rn-222 (kBq)	C-14 (Bq)
944	1197	895	39	66	19	-	-	-

IS (10 <sup>-12</sup> PersSv)	Bauxit	Eisen	Kupfer	Kalkstein
-	-	-	-	-

Tabelle 2: Sachbilanz Mineralöl - Schadstoffe und entnommene Rohstoffe pro erzeugte kWh

### 3.4. Ergänzung der Sachbilanz für Biomasse

Die Schadstoffbilanz für Biomasse ist an Tabelle 3.10 einer Studie von Nitsch angelehnt (Nitsch, et al., 2004, S. 114). Diese Studie hat das Ziel, einen umweltfreundlichen Ausbau der Energieerzeugung zu fördern. Um die Auswirkungen unterschiedlicher Technologien aufzuzeigen, wurden dynamische Lebenszyklusanalysen durchgeführt. Dabei wurden sowohl direkte Prozesse als auch ein sogenanntes „Hintergrundsystem“ gebildet. Die direkten Prozesse beschreiben die entsprechende Produktion und die Hintergrundprozesse die daran anknüpfenden Vorgänge. „Dynamik“ wird erzeugt, indem die Entwicklung regenerativer Technologien auch die Hintergrundprozesse beeinflussen. Z.B. führen Effizienzsteigerungen im Bereich Biomasse zu weniger Schadstoffausstoß bei der Produktion von Aluminium – vorausgesetzt es fließt Strom aus Biokraftanlagen in diese Produktion ein. Da unterschiedliche Varianten von Erzeugungstechniken der Biomasse aufgeführt werden, ist eine Zusammenfassung erforderlich, um die Werte im Rahmen der Verrechnung mit dem Strommix verwenden zu können. Die Schritte dieses Verfahrens werden im Anhang beschrieben.

Die folgende Tabelle zeigt das Ergebnis dieser Berechnung.

CO <sub>2</sub> (g)	SO <sub>2</sub> (mg)	NO <sub>x</sub> (mg)	CH <sub>4</sub> (mg)	N <sub>2</sub> O (mg)	P (mg)	PM <sub>10</sub> (mg)	Rn-222 (kBq)	C-14 (Bq)
15	356	741	-15357	-575	54	-	-	-

IS (10 <sup>-12</sup> PersSv)	Bauxit	Eisen	Kupfer	Kalkstein
-	32	2767	-	-

Tabelle 3: Sachbilanz für Biomasse: Schadstoffe und entnommene Rohstoffe pro erzeugte kWhel

### 3.5. Sachbilanz mit repräsentativen Werten

Die direkten Quellen, aus welchen die Sachbilanzen entnommen wurden, stammen aus den Jahren 1999 - 2004 (Europäische Kommission, 1999), (Marheineke, 2002), (Nitsch, et al., 2004). Somit handelt es sich um Datensätze mit einem Alter von mindestens 15 bis 20 Jahren. Da der Fokus der vorliegenden Arbeit auf dem Vergleich zweier Stromsektoren



anstatt auf der Präsentation aktueller Zahlen über Emissionen und entnommenen Rohstoffe liegt, besteht dadurch kein Nachteil. Für einen Vergleich sind die Werte der Sachbilanzen sehr gut geeignet, da sie drei Gemeinsamkeiten aufweisen. Erstens beträgt die maximale zeitliche Differenz zwischen den Studien fünf Jahre. Dadurch kann angenommen werden, dass sich die zur Erstellung der Sachbilanz herangezogenen repräsentativen Kraftwerke in einem vergleichbaren technischen Entwicklungsstand befinden. Zweitens verwenden alle drei Studien Vorder- und Hintergrundprozesse. Leidglich die Studie der Europäischen Kommission verzichtet auf eine Input-Output-Analyse, was sich jedoch ausgleichen lässt. Drittens führen alle drei Quellen eine Betrachtung des deutschen Stromsektors durch. Dadurch kann angenommen werden, dass für den deutschen Stromsektor repräsentative Kraftwerke zur Berechnung der jeweiligen Sachbilanz herangezogen wurden. Durch den Vergleich mit der Sachbilanz aus Marheineke (2002) konnten fehlende Werte für die Erzeugungstechniken Mineralöl und Biomasse ergänzt werden. Die genauen Schritte werden ebenfalls im Anhang beschrieben. Die dadurch erhaltene Sachbilanz hat folgende Form:

	SK	BK	MO	EG	KK	WK	WAK	BM	PV
CO <sub>2</sub> (g)	829	934	944	391	17	39	30	15	210
SO <sub>2</sub> (mg)	725	313	1197	140	70	98	53	356	531
NO <sub>x</sub> (mg)	840	38	895	376	46	69	63	741	228
CH <sub>4</sub> (mg)	3956	95	39	1312	0	185	130	-15357	694
N <sub>2</sub> O (mg)	45	38	66	5	0	3	2	-575	18
P (mg)	100	235	20	44	25	61	31	54	217
PM10 (mg)	66	84	11	25	14	29	16	31	118
Rn-222 (kBq)	0	0	0	0	18	0	0	0	0
C-14 (Bq)	0	0	0	0	19	0	0	0	0
IS (10 <sup>-12</sup> PersSv)	20	7	12	10	3672	10	5	12	123
Entn. Rohstoffe	SK	BK	MO	EG	KK	WK	WAK	BM	PV
BX (mg)	38	19	24	15	28	63	13	32	2166
FE (mg)	2953	2126	2123	1292	458	5450	2336	2767	10618
CU (mg)	4	8	5	3	7	81	9	3	328
K (mg)	10741	11024	9894	7917	841	2829	5847	9581	16353

Tabelle 4: Sachbilanz: Schadstoffe und entnommene Rohstoffe pro kWhel je Erzeugungstechnik

Auffällig sind die negativen Werte bei CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O der Erzeugungstechnik Biomasse. Diese Unterschiede sind auf eine Besonderheit der Unterkategorie Biogas zurückzuführen: durch Unterschiede in der Lagerung wird bei Erzeugung von Elektrizität weniger Methan und Distickstoffmonoxid freigesetzt werden, als wenn die Gülle konventionell gelagert wird (Nitsch, 2016, S. 78,103), (Edelmann, et al., 2001).

Um die prozentuale Wirkung einer produzierten kWh<sub>el</sub> durch Technologie i beurteilen zu können, wird Sachbilanzmatrix umgeformt. Sei ASB die anteilige Sachbilanzmatrix, welche sich wie folgt berechnen lässt:

$$ASB = \begin{bmatrix} asb_{CO_2,SK} & \cdots & asb_{CO_2,PV} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ asb_{K,SK} & \cdots & asb_{K,PV} \end{bmatrix} \text{ mit } asb_{q,i} \in SB \text{ und } asb_{q,i} = \frac{sb_{q,i}}{SB'_q} \quad (2)$$

Formel 2: Anteilige Sachbilanzmatrix

Die folgende Tabelle zeigt die anteilige Sachbilanzmatrix, welche aus Tabelle 4 berechnet wurde. Würde der Strom durch alle Technologien zu gleichen Anteilen bereitgestellt werden, hätte die Emissions- und Rohstoffbilanz folgende Zusammensetzung.

Emissionen	SK	BK	MO	EG	KK	WK	WAK	BM	PV
CO <sub>2</sub> (g)	24%	27%	28%	11%	0%	1%	1%	0%	6%
SO <sub>2</sub> (mg)	21%	9%	34%	4%	2%	3%	2%	10%	15%
NO <sub>x</sub> (mg)	26%	1%	27%	11%	1%	2%	2%	22%	7%
CH <sub>4</sub> (mg)	18%	0%	0%	6%	0%	1%	1%	-71%	3%
N <sub>2</sub> O (mg)	6%	5%	9%	1%	0%	0%	0%	-76%	2%
P (mg)	13%	30%	3%	6%	3%	8%	4%	7%	28%
PM10 (mg)	17%	21%	3%	6%	4%	7%	4%	8%	30%
Rn-222 (kBq)	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%
C-14 (Bq)	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%
IS (10 <sup>-12</sup> PersSv)	1%	0%	0%	0%	95%	0%	0%	0%	3%
Entn. Rohstoffe	SK	BK	MO	EG	KK	WK	WAK	BM	PV
BX (mg)	2%	1%	1%	1%	1%	3%	1%	1%	90%
FE (mg)	10%	7%	7%	4%	2%	18%	8%	9%	35%
CU (mg)	1%	2%	1%	1%	1%	18%	2%	1%	74%
K (mg)	14%	15%	13%	11%	1%	4%	8%	13%	22%

Tabelle 5: Prozentuale Wirkung einer Technologie (Zahlen stark gerundet)

Der rote Bereich links oben in Tabelle 5 zeigt, dass fossile Kraftwerke pro erzeugte Kilowattstunde im Schnitt mehr Emissionen erzeugen als Kraftwerke erneuerbarer Energien. Außerdem ist ein höherer Rohstoffbedarf pro kWh<sub>el</sub> auf Seiten der regenerativen Erzeugungsmethoden festzustellen. Kernkraft verursacht mit Abstand die meisten Emissionen in den Kategorien Radon-222, C-14 und Ionisierende Strahlung. Auffällig sind auch die hohen Emissionswerte für Photovoltaik.

Ohne die Berechnung mit Werten eines Strommix hat diese Sachbilanz einen sehr begrenzten Aussagewert, da sich die Erzeugungstechniken nicht nach Belieben untereinander kombinieren lassen. Diese Berechnung wird im nächsten Kapitel durchgeführt.

## **4. Berechnung des Strommix 2015-2050**

In diesem Kapitel wird zuerst der Begriff „Strommix“ definiert. Anschließend erfolgt die Herleitung des Strommix unter den Auswirkungen der Energiewende. Um diese Auswirkungen besser beurteilen zu können, wird ein zweiter Strommix „Business-As-Usual“-Szenario (BAU) vorgestellt, welcher den Trend der vergangenen Jahre beschreibt.

### **4.1. Definition „Strommix“**

Ein Strommix beschreibt den Beitrag unterschiedlicher Kraftwerkstypen zur Gesamterzeugung einer Elektrizitätswirtschaft (Ménard, et al., 1998). Da die entsprechende Erzeugungskategorie sehr unterschiedliche Kraftwerke enthalten kann, handelt es sich um eine stark vereinfachte Darstellung.

Bruttostromerzeugung nach Energieträgern - in TWh											
	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Steinkohlen	140,8	149,8	141,9	146,2	144,6	147,1	152,7	143,1	153,4	143,1	143,1
Braunkohlen	170,9	158,3	154,5	147,5	146,1	142,6	144,3	141,7	139,4	136,0	148,3
Mineralöl	10,8	14,8	13,2	10,1	10,1	9,1	8,2	7,4	6,7	6,3	5,9
Erdgas	35,9	36,3	33,0	32,8	36,1	41,1	45,6	48,1	50,7	51,8	49,2
Kernenergie	152,5	147,4	158,8	153,5	151,2	154,1	161,6	170,3	161,6	170,0	169,6
Windkraft		0,1	0,3	0,6	0,9	1,5	2,0	3,0	4,5	5,5	9,5
Wasserkraft	19,7	19,5	22,4	23,6	25,1	27,0	24,3	23,5	24,2	24,7	29,4
davon regenerativ		15,9	18,6	19,0	20,2	21,6	18,8	19,0	19,0	20,7	24,9
übrige Energieträger	19,3	14,1	14,1	12,8	14,3	14,3	14,1	15,2	16,7	18,9	21,5
Biomasse		0,3	0,3	0,4	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1	1,2	1,6
Photovoltaik		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Müll		1,2	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,4	1,6	1,7	1,8
andere		12,6	12,6	11,2	12,4	12,2	11,9	12,9	14,0	16,0	18,0
<b>Insgesamt</b>	<b>549,9</b>	<b>540,2</b>	<b>538,2</b>	<b>527,1</b>	<b>528,5</b>	<b>536,8</b>	<b>552,7</b>	<b>552,3</b>	<b>557,2</b>	<b>556,3</b>	<b>576,6</b>

Abbildung 5: Beispiel eines Strommix (BMWi 2019, Tabellenblatt 22)

Ein Strommix lässt sich als Matrix  $X$  mit  $n$  Zeilen und  $m$  Spalten darstellen, wobei  $n$  der Anzahl der betrachteten Erzeugungstechniken und  $m$  der Anzahl der betrachteten Zeiträume entspricht.  $E$  ist als Menge der untersuchten Erzeugungstechniken Steinkohle (SK), Braunkohle (BK), Mineralöl (MO), Erdgas (EG), Kernkraft (KK), Wasserkraft (WAK), Windkraft (WK), Biomasse (BM) und Photovoltaik (PV) definiert:

$$E = \{SK, BK, MO, EG, KK, WAK, WK, BM, PV\} \quad i \in E \quad n = |E| = 9$$

$Z$  ist als Menge der untersuchten Zeiträume definiert und enthält äquidistante Jahreszahlen in aufsteigender Reihenfolge.

$$Z = \{t_1, \dots, t_j, \dots, t_m\} \quad j \in Z \quad t_{j+1} - t_j = t_j - t_{j-1} \text{ und } t_{j-1} < t_j < t_{j+1} \forall j \in Z \quad m = |Z|$$

$$X = \begin{bmatrix} x_{SK,t1} & \dots & x_{SK,tm} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{PV,t1} & \dots & x_{PV,tm} \end{bmatrix} \text{ mit } x_{i,j} \in X \quad (3)$$

Formel 3: Darstellung eines Strommix in Matrixform

Eine Matrix kann als Auflistung der zeitlichen Verläufe der jeweiligen Erzeugungstechnik interpretiert werden:

$$X = \begin{pmatrix} X'_{SK} \\ \vdots \\ X'_{PV} \end{pmatrix} \text{ mit } X'_i = (x_{i,t1} \quad \dots \quad x_{i,tm}) \quad (4)$$

Formel 4: Strommix als Zusammenfassung der zeitlichen Verläufe aller Erzeugungstechniken

Ein Blick auf eine einzige Spalte hingegen liefert die Zusammensetzung des Strommix eines einzelnen Jahres. Matrizen aus Messdaten werden im Folgenden mit Y gekennzeichnet.

Es existieren zahlreiche Studien, welche die Entwicklung des Energiesektors behandeln. Methodisch lassen sich dabei Zielszenarien und Referenzprognosen unterscheiden (AEE (Agentur für Erneuerbare Energien e.V.), 2012). Zielszenarien beschreiben die Voraussetzungen, um vorgegebene Parameter (z.B. Emissionswerte) zu erreichen. Referenzprognosen hingegen modellieren eine Entwicklung durch zuvor festgelegte Rahmenbedingungen. Hinsichtlich der Rechenmethode kann man Bottom-up-Modelle und Top-down-Modelle unterscheiden (SRU (Sachverständigenrat für Umweltfragen), 2011). Erstere bilden die technische Seite von Energiesystemen detailgetreu ab und ermöglichen somit eine bessere Analyse von Kosten- und Reduktionspotentialen. Allerdings können Änderungen von Markt- und Preisanpassungen nicht adäquat erfasst werden (Clapp, et al., 2009). Top-down-Modelle sind dagegen sehr gut geeignet, um makroökonomische Effekte wie Preisänderungen auszuwerten und benötigen hierfür keine umfangreichen technischen Datensätze (Kahouli-Brahmi, 2008). Technische Veränderungen zu erfassen, ist jedoch mit Top-down-Modellen nicht möglich. Durch hybride Modelle wird versucht, die Vorteile beider Ansätze zu kombinieren.

## **4.2. Auswahl eines Strommix zur Modellierung der Energiewende**

Um die Transformation des deutschen Stromsektors im Rahmen der Energiewende zu modellieren, ist eine Prognose der Entwicklung des Strommix bis zum Jahr 2050 nötig, welche die gesteckten Ziele der Bundesregierung erfüllt. Zu diesem Zweck wurden zahlreiche Studien gesichtet. Eine Auswahl der ausgeschlossenen Studien befindet sich im Anhang. Die meisten der verbleibenden Studien betrachten die europäische Energiewirtschaft. Um geeignete Modelle auszuwählen, wurden folgende Kriterien für die Auswahl geeigneter Szenarios definiert:

1. Herleitung des Strommix auf einer modellbasierten Betrachtung des deutschen Stromsektors
2. Betrachtungshorizont bis 2050
3. Maximaler Abstand von 15 Jahren zwischen den Zeitpunkten des Strommix
4. Keine Stromerzeugung aus Steinkohle oder Braunkohle ab dem Jahr 2038
5. Keine Stromerzeugung aus Atomkraftwerken ab dem Jahr 2022
6. Entstehung der Studie nach 2008

Punkt 1) soll sicherstellen, dass die Ergebnisse der Szenarios auf technisch realisierbaren Annahmen beruhen und die Eigenschaften des deutschen Stromsektors berücksichtigt werden. Punkt 3) gewährleistet, dass die Anzahl zu ergänzender Werte für fehlende Zeitpunkte überschaubar bleibt. Punkt 5) soll ermöglichen, dass in der Studie die Reformen zur Liberalisierung des europäischen Energiemarkts bis 2009 berücksichtigt werden (Samadi & Merten, 2013).

Es wurden sieben Szenarien aus drei Quellen<sup>6</sup> identifiziert, welche diese Kriterien erfüllten. Alle Szenarien lassen sich der Gruppe der Zielszenarien zuordnen und alle drei Quellen verwenden Top-down-Modelle.

1. (Barzantny, et al., 2009): Greenpeace-Szenario
2. (Matthes, et al., 2017):
  - 2.1. Schnellausstiegs-Szenario
  - 2.2. Laufzeitbegrenzungs-Szenario für 20 Jahre mit Ausbau der erneuerbaren Energien nach EEG 2017
  - 2.3. Laufzeitbegrenzungs-Szenario für 20 Jahre mit ambitioniertem Ausbau der erneuerbaren Energien
  - 2.4. Transformations-Szenario mit ambitioniertem Ausbau der erneuerbaren Energien
3. (Matthes, et al., 2018):
  - 3.1. Energiewende-Referenz
  - 3.2. Fokus Solar

---

<sup>6</sup> Die Quellen 2 und 3 weisen eine sehr hohe Ähnlichkeit hinsichtlich der Methodik und der Ergebnisse auf

Aus Gründen der Einfachheit werden Zahlenwerte aus den zusammengetragenen Messungen ( (BMW, 2019) (BMW, 2019) (Fraunhofer ISE, 2019) (AGEB (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V.), 2019) (AGEB, 2019) als „Daten“ bezeichnet. Zahlenwerte aus Szenarios (Barzantny, et al., 2009)( (Matthes, et al., 2017) (Matthes, et al., 2018)) werden als „Werte“ bezeichnet. Eine Matrix  $X$ , welche Werte aus einem Szenario  $SZ \in \{1, 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 3.1, 3.2\}$  enthält, wird als  $X^{SZ}$  notiert.

Die untersuchten Szenarien liefern Werte mit einem zeitlichen Abstand von zehn Jahren (Barzantny, et al., 2009) bzw. fünf Jahren (Matthes, et al., 2017) (Matthes, et al., 2018). Daher wurden Werte innerhalb dieser zeitlichen Lücken um die durchschnittliche Änderungsrate ergänzt. Seien  $T$  die Zeitpunkte, welche in den Szenarien erfasst sind und sei  $\widehat{X}^{SZ}$  die Matrix mit den ergänzten Werten.

Für  $SZ=1$  gilt:

$$\widehat{X}^1 = \begin{bmatrix} \widehat{x_{SK,2015}^1} & \cdots & \widehat{x_{SK,2050}^1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \widehat{x_{PV,2015}^1} & \cdots & \widehat{x_{PV,2050}^1} \end{bmatrix} \text{ mit}$$

$$\widehat{x_{i,j}^{SZ}} = \begin{cases} x_{i,j}^1 \text{ für } j \in T & (5) \\ \widehat{x_{i,j-1}^1} + \frac{x_{i,j+k}^1 - x_{i,j-l}^1}{10} \text{ und } \frac{j+k}{10}, \frac{j-l}{10} \in \mathbb{N}, j+l=10 \text{ für } j > 20 \wedge j \in Z \setminus T \\ \widehat{x_{i,j-1}^1} + \frac{x_{i,j+k}^1 - x_{i,j-l}^1}{13} \text{ und } \frac{j+k}{13}, \frac{j-l}{13} \in \mathbb{N}, j+l=13 \text{ für } j < 20 \wedge j \in Z \setminus T \end{cases}$$

Formel 5: Lineare Ergänzung des Greenpeace-Szenario

Für  $SZ \in \{2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 3.1, 3.2\}$  gilt:

$$\widehat{X}^{SZ} = \begin{bmatrix} \widehat{x_{SK,2015}^{SZ}} & \cdots & \widehat{x_{SK,2050}^{SZ}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \widehat{x_{PV,2015}^{SZ}} & \cdots & \widehat{x_{PV,2050}^{SZ}} \end{bmatrix} \text{ mit}$$

$$\widehat{x_{i,j}^{SZ}} = \begin{cases} x_{i,j}^{SZ} \text{ für } j \in T \\ \widehat{x_{i,j-1}^{SZ}} + \frac{x_{i,j+k}^{SZ} - x_{i,j-l}^{SZ}}{5} \text{ und } \frac{j+k}{5}, \frac{j-l}{5} \in \mathbb{N}, j+l=5 \text{ für } j \in Z \setminus T \end{cases} \quad (6)$$

Formel 6: Lineare Ergänzung der Zukunft Strommarkt-Szenarien

Es existieren außerdem Unterschiede hinsichtlich der Definition der Erzeugungstechnik, als auch der Berechnung der erbrachten Arbeit. Um Werte der Szenarien untereinander sowie mit Messdaten vergleichen zu können, wurden die Ergebnisse standardisiert (Details s. Anhang). Standardisierte Matrizen werden mit einem \* gekennzeichnet:  $X^*$  bzw.  $Y^*$

Im nächsten Schritt erfolgte ein Vergleich der Erzeugung der sieben Szenarien für die Jahre 2015 bis 2018 mit den zusammengetragenen Messdaten für 2015 bis 2018 (AGEB (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V.), 2019) (BMW, 2019) (AGEB, 2019). Zu diesem Zweck wurde für jedes Szenario die Differenz  $D$  zwischen den Werten und den gemessenen Daten ermittelt und zusammengeführt:

$$D = (|X^{*SZ} - Y^*|) \text{ mit } d_{i,j} = (x_{i,j}^{*SZ} - y^*) \text{ und } D_j^i = \sum_{i=1}^n d_{i,j} \quad (7)$$

*Formel 7: Differenz zwischen Messdaten und Werten der Szenarien*

Tabelle 6 zeigt das Ergebnis dieser Berechnung sowie die Summe der Abweichungen von 2015-2018:

$D_j^i$	j=2015	j=2016	j=2017	j=2018	Summe
Greenpeace	164	170	228	252	<b>814</b>
Schnellausstieg	106	88	99	110	<b>402</b>
Laufzeitbegrenzung: 20a, gem. EEG	106	85	94	112	<b>397</b>
Laufzeitbegrenzung: ambitioniert	106	85	94	112	<b>397</b>
Transformation	106	86	99	98	<b>389</b>
Energiewende-Referenz	106	96	118	127	<b>447</b>
Fokus Solar	106	97	120	129	<b>451</b>

*Tabelle 6: Abweichungen zwischen Werten und Messdaten*

Das Szenario „Transformation“ weist die geringsten Abweichungen zu den Daten auf und wird daher im Folgenden unter der Bezeichnung „Energiewende-Szenario“ (EW) verwendet, um den Strommix der Energiewende zu repräsentieren.



### 4.3. Auswahl eines Strommix zur Modellierung des aktuellen Trends

Im Anschluss an die Auswahl eines Strommix zur Modellierung der Energiewende wird nach einem Strommix gesucht, welcher die Entwicklung der vergangenen Jahre beschreibt. Dies schafft die Möglichkeit einer Gegenüberstellung der Auswirkungen der Energiewende und einer Entwicklung ohne entsprechende Maßnahmen. Folgende Kriterien wurden bei der Auswahl herangezogen:

1. Auslegung des Szenarios als Referenzprognose
2. Herleitung der Prognose auf umfassender Datengrundlage
3. Numerische Darstellung der Entwicklung für Stromerzeugung
4. Spätester Beginn des Strommix ab dem Jahr 2015
5. Maximaler Abstand von 15 Jahren zwischen den Zeitpunkten des Strommix
6. Möglichst hohe Ähnlichkeit der Aufteilung der Erzeugungstechniken mit dem Szenario Transformation

Es wurden fünf Szenarien gefunden, welche diese Anforderungen erfüllen:

- a. Referenzszenario in (Beer, et al., 2009)
- b. Referenzszenario mit Carbon Capture and Storage (CCS) in (Kirchner, et al., 2009)
- c. Referenzszenario ohne CCS in (Kirchner, et al., 2009)
- d. Szenario TREND in (Nitsch, 2016)
- e. Referenzszenario in (Schlesinger, et al., 2010)

Bei allen Szenarien handelt es sich um Prognosen, welche zwecks eines Vergleichs mit Zielszenarien erstellt wurden. Szenario a erfüllt Punkt 3 nur unzureichend. Die Referenzszenarien b, c und e erfüllen Punkt 6. am besten. Es wird im Folgenden Szenario c verwendet, da Kirchner, et al. (2009) eine gesonderte Betrachtung der CCS-Technologie durchführen und kein weiterer Rechenschritt zur Umwandlung von der Produktion mit CCS-Technologie in eine Produktion ohne CCS-Technologie durchgeführt werden muss.

In den folgenden Diagrammen werden die Szenarien EW (blau) und BAU (orange) gegenübergestellt.

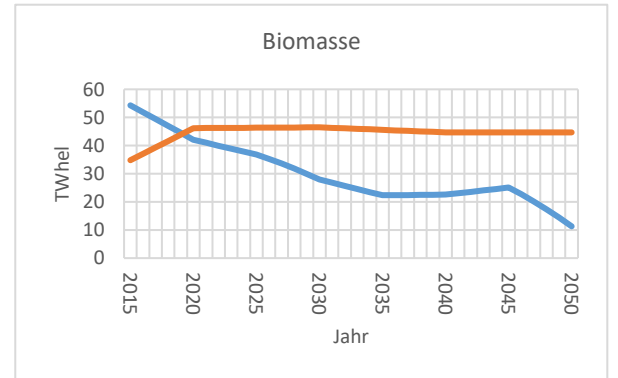
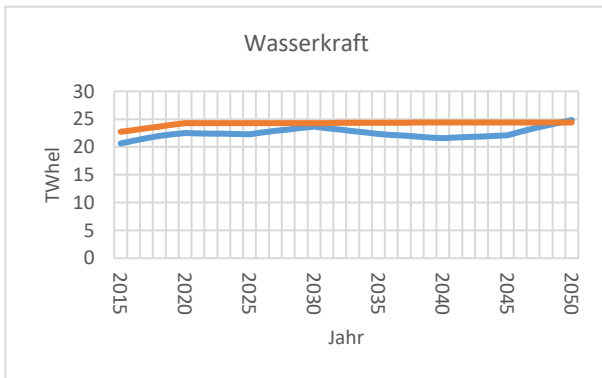
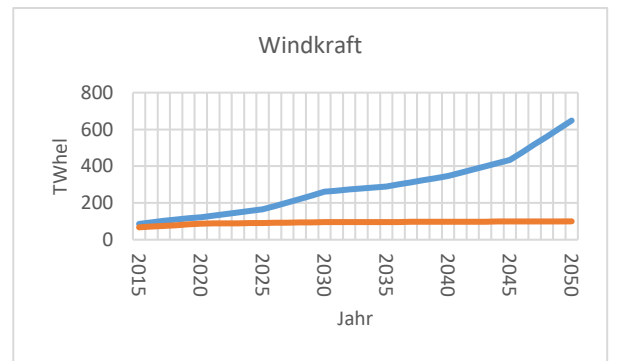
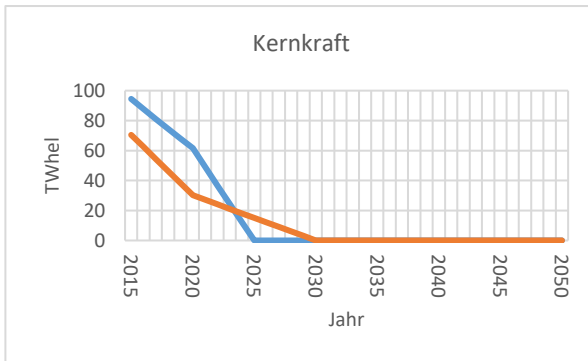
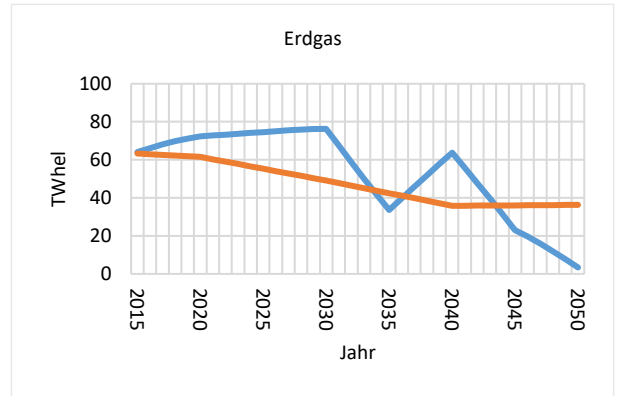
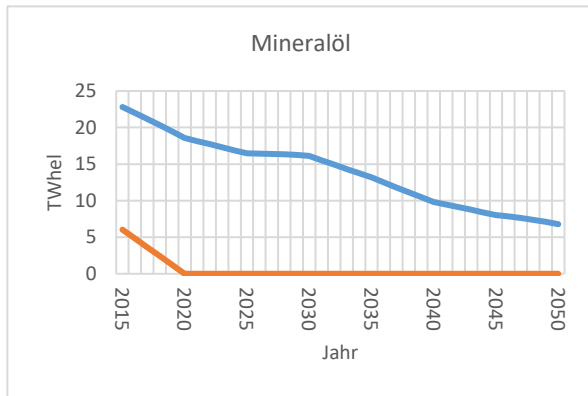
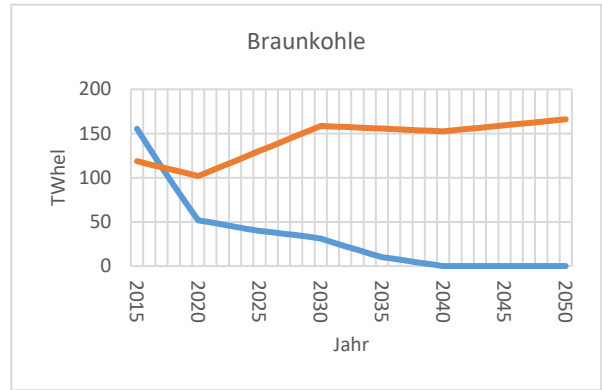
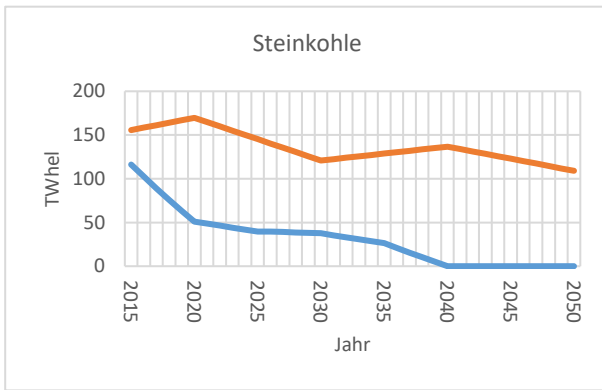




Abbildung 6: Vergleich der Szenarien BAU und EW

Die Entwicklungen verlaufen -abgesehen von den Techniken Kernkraft und Wasserkraft<sup>7</sup> - sehr unterschiedlich. Die Erzeugungstechniken Steinkohle, Braunkohle, Windenergie und Photovoltaik haben den größten Anteil der aggregierten Differenzen zwischen den beiden Szenarien. Abgesehen von der Technologie Biomasse werden im Szenario EW die erneuerbaren Energien stark ausgebaut, während die Stromgewinnung aus fossilen Energieträgern zurückgeht. Im Szenario BAU hingegen stagniert der Ausbau regenerativer Erzeugungsmethoden, während die Stromgewinnung aus Steinkohle langsamer abnimmt und aus Braunkohle zunimmt. Vor allem die ab 2040 höhere Gesamterzeugung des Szenarios EW ist auffällig.

Im Startjahr 2015 werden im Szenario EW ca. 106 TWh<sub>el</sub> mehr produziert als im Szenario BAU. Dies steht jedoch einem Vergleich nicht im Weg. Nimmt man an, beide Strommixe haben eine identische Ausgangsbasis und die Messung wird erst ab 2015 durchgeführt, so ist ein Vergleich durchaus plausibel.

<sup>7</sup> Die Schwankungen bei Wasserkraft im Szenario EW sind durch den relativ starken Einfluss der Nettoimporte zu erklären. Eigentlich würden die Diagrammlinien nahezu parallel verlaufen.

## 5. Emissionen und entnommenen Rohstoffe 2015-2050

### 5.1. BAU vs. EW: Unterschiede hinsichtlich der Emissionen 2015-2050

Durch Multiplikation der Sachbilanzwerte mit den Werten des Strommix können die jährlichen Emissionen und entnommene Rohstoffe aufgezeigt, welche im Rahmen des entsprechenden Strommix entstehen, aufgezeigt werden. Die Matrix für Emissionen und entnommene Rohstoffe der Szenarien EW und BAU ist wie folgt definiert:

$$EER^{SZ} = SB X^{SZ} = \begin{bmatrix} eer_{CO_2,2015}^{SZ} & \cdots & eer_{CO_2,2050}^{SZ} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ eer_{K,2015}^{SZ} & \cdots & eer_{K,2050}^{SZ} \end{bmatrix} \quad (8)$$

und  $eer_{q,j}^{SZ} = sb_{q,i} * x_{i,j}^{SZ}$  mit  $SZ \in \{EW, BAU\}$

Formel 8: Berechnung der Matrix für Emissionen und entnommene Rohstoffe

$eer_{q,j}^{SZ}$  liefert die Gesamthöhe der Emission/des entnommenen Rohstoffs q in Jahr j. Mit folgender Summe können die gesamten Emissionen bzw. entnommenen Rohstoffe von 2015 bis 2050 des Szenarios  $SZ \in \{EW, BAU\}$  berechnet werden:

$$geer_q^{SZ} = \sum_j^m eer_{q,j}^{SZ} \quad (9)$$

Formel 9: Summe der Emissionen des Szenarios SZ bis zum Jahr j

Berechnet man  $geer_q^{BAU} - geer_q^{EW}$  erhält man die gesamten vermiedenen Emissionen bzw. eingesparten Rohstoffe, welche die Durchführung der Energiewende mit sich bringt – vorausgesetzt,  $(geer_q^{BAU} - geer_q^{EW}) > 0$ . Für den Fall  $(geer_q^{BAU} - geer_q^{EW}) < 0$ , werden im Szenario EW mehr Emissionen q freigesetzt bzw. mehr Rohstoffe q verbraucht als im Szenario BAU. Ist  $(geer_q^{BAU} - geer_q^{EW}) > 0$ , wird dem Szenario EW ein Vorteil hinsichtlich q zugesprochen. Ist  $(geer_q^{BAU} - geer_q^{EW}) < 0$ , liegen Vorteile bezüglich q seitens des Szenarios BAU.

Die Ausgangsfrage dieser Arbeit lautet, ob die Energiewende zu weniger Emissionen bzw. verbrauchten Ressourcen führt. Möchte man den kompletten Stromsektor betrachten, liefert die Berechnung von  $geer_q^{BAU} - geer_q^{EW}$  aussagekräftige quantitative Werte. Die

höhere Stromproduktion des Szenarios EW wird in diesem Fall als Ergebnis der sektorübergreifenden Energiewende interpretiert. Möchte man hingegen zwei Strommixe von identischer Größe, aber unterschiedlicher Zusammensetzung oder z.B. die durchschnittlichen Emissionen und entnommenen Rohstoffe einer produzierten TWh<sub>el</sub> Strom betrachten, würde die Berechnung mit  $geer_q^{BAU} - geer_q^{EW}$  einen verzerrten Wert liefern, da im Szenario EW ein höhere Gesamtproduktion angenommen wird. Daher wird für einen zweiten Vergleich der Strommix  $X^{\widetilde{EW}}$  für das Szenario  $X^{\widetilde{EW}}$  gebildet, welcher die Erzeugungstechnologien E zu gleichen Anteilen wie  $X^{EW}$  enthält, jedoch die gleiche Gesamtjahreserzeugung wie Szenario BAU aufweist. Es seien  $s_j^{*BAU} = \sum_i^n x_{i,j}^{*BAU}$  und  $s_j^{*EW} = \sum_i^n x_{i,j}^{*EW}$ . Die angepasste Matrix  $X^{\widetilde{EW}}$  ist folgendermaßen definiert:

$$X^{\widetilde{EW}} = \begin{bmatrix} x_{SK,t1}^{*EW} & \dots & x_{SK,tm}^{*EW} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{PV,t1}^{*EW} & \dots & x_{PV,tm}^{*EW} \end{bmatrix} \text{ mit } x_{i,j}^{\widetilde{EW}} \in X^{\widetilde{EW}} \text{ und } x_{i,j}^{\widetilde{EW}} = \frac{s_j^{*BAU}}{s_j^{*EW}} x_{i,j}^* \quad (10)$$

Formel 10: Angleichen der Gesamtproduktion-EW an Gesamtproduktion-BAU

Es gilt außerdem:

$$EER^{\widetilde{EW}} = SB X^{\widetilde{EW}} = \begin{bmatrix} eer_{CO2,2015}^{*EW} & \dots & eer_{CO2,2050}^{*EW} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ eer_{K,2015}^{*EW} & \dots & eer_{K,2050}^{*EW} \end{bmatrix} \quad (11)$$

und  $eer_{q,j}^{*EW} = sb_{q,i} * x_{i,j}^{*EW}$

Formel 11: Berechnung der Matrix für Emissionen und entnommene Rohstoffe des Strommix  $X^{\widetilde{EW}}$

$$geer_q^{\widetilde{EW}} = \sum_j^m eer_{q,j}^{*EW} \quad (12)$$

Formel 12: Summe der Emissionen und entnommenen Rohstoffe des angepassten Strommix  $X^{\widetilde{EW}}$  bis Jahr j

Die Tabelle 7 zeigt eine Übersicht der Differenz zwischen den gesamten Emissionen und entnommenen Rohstoffe zwischen den Szenarien EW und BAU bzw. dem angepassten Szenario EW und BAU.

	q	$geer_q^{BAU} - geer_q^{EW}$	$geer_q^{BAU} - geer_{q,j}^{EW}$	Differenz
Emissionen	CO2 (Mt)	5,58E+06	5,76E+09	-5,75E+09
	SO2 (Mt)	1,59E+06	1,96E+06	-3,73E+05
	NOX (Mt)	2,17E+06	2,42E+06	-2,45E+05
	CH4 (Mt)	4,03E+06	3,93E+06	1,02E+05
	N2O (Mt)	-7,63E+04	-8,88E+04	1,25E+04
	P (Mt)	3,74E+05	5,41E+05	-1,68E+05
	PM10 (Mt)	9,99E+04	1,85E+05	-8,53E+04
	RN222 (Bq)	-2,78E+03	-2,58E+00	-2,78E+03
	C14 (Bq)	-2,86E+03	-2,65E+03	-2,03E+02
	IS (PersSv)	-8,31E+05	-7,33E+05	-9,78E+04
Entnommene Rohstoffe	BX (Mt)	-5,56E+06	-4,72E+03	-5,56E+06
	FE (Mt)	-4,42E+07	-3,27E+04	-4,41E+07
	CU (Mt)	-1,33E+06	-1,11E+03	-1,33E+06
	K (Mt)	2,38E+07	3,47E+04	2,37E+07

Tabelle 7: Gesamte Differenz von Emissionen und entnommenen Rohstoffen 2015-2050

Unter Szenario EW werden weniger CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CH<sub>4</sub> und weniger Partikel (inkl. PM10) emittiert werden. Außerdem sinkt der Verbrauch von Kalkstein. Hingegen wird im Szenario EW mehr N<sub>2</sub>O, Radon 222, Kohlenstoff C-14 und ionisierte Strahlung freigesetzt. Außerdem werden mehr Bauxit, Eisen und Kupfer benötigt. Die Transformation von Szenario EW zu  $\widetilde{EW}$  hat zwar einen quantitativen Effekt; führt jedoch nicht zu einer Neuausrichtung von Vorteilen.

## 5.2. Differenzierte Betrachtung der Emissionen und benötigten Rohstoffe

Diagramme, welche die Zusammensetzung der Erzeugungstechniken für jeden Emissionstyp bzw. Rohstoff separat betrachten, verdeutlicht die Zusammenhänge zwischen der Sachbilanz, den Entwicklungen der Strommixe und den Emissionen bzw. benötigten Rohstoffen. Da sich die Szenarien EW und  $\widetilde{EW}$  lediglich quantitativ unterscheiden, wird ausschließlich ein Vergleich zwischen den Szenarien EW und BAU durchgeführt. Die Idee der Darstellung orientiert sich an Abbildung 2 in (Hertwich, et al.

2015a, S. 6). Die Diagramme beruhen auf folgender Rechnung. Sei  $ZVE_q$  eine Matrix, welche die Differenz der Emission/des entnommen Rohstoffs  $q$  zwischen Szenario BAU und EW im Zeitverlauf aufzeigt.  $ZVE_q^{BAU-EW}$  berechnet sich wie folgt:

$$ZVE_q^{BAU-EW} = (X^{*BAU} - X^{*EW})^T S B_q'^T \quad (13)$$

Formel 13: Differenz der Emissionen und entnommenen Rohstoffe im Zeitverlauf

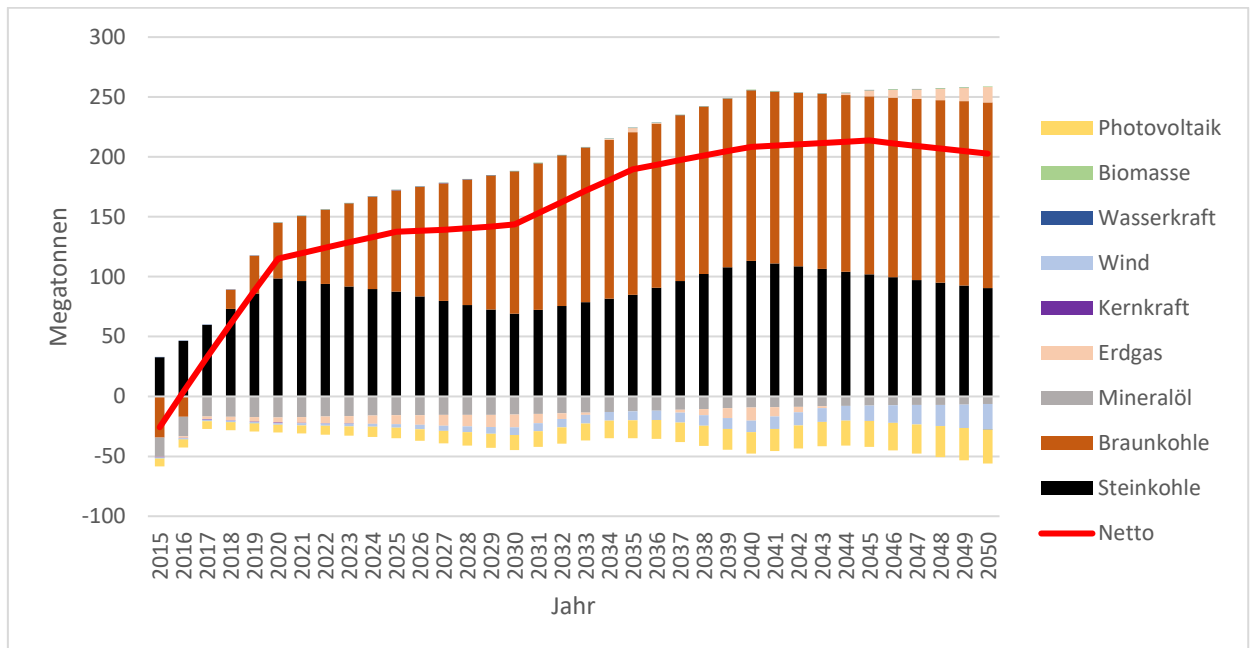


Abbildung 7: CO<sub>2</sub>-Reduktion durch Szenario EW

Das Diagramm verdeutlicht die hohe Gewichtung von Braun- und Steinkohle bei der CO<sub>2</sub>-Emission. Durch den Rückbau der Kohlekraftwerke im EW-Szenario kann eine entsprechend hohe Reduktion erreicht werden. Angesichts des starken prozentualen Einflusses von Kohlekraft in der Sachbilanz (vergl. Tabelle 5, prozentuale Wirkung einer Technologie) und des hohen Anteils von Kohlekraftwerken am Strommix des BAU-Szenarios ist diese Entwicklung nicht verwunderlich.

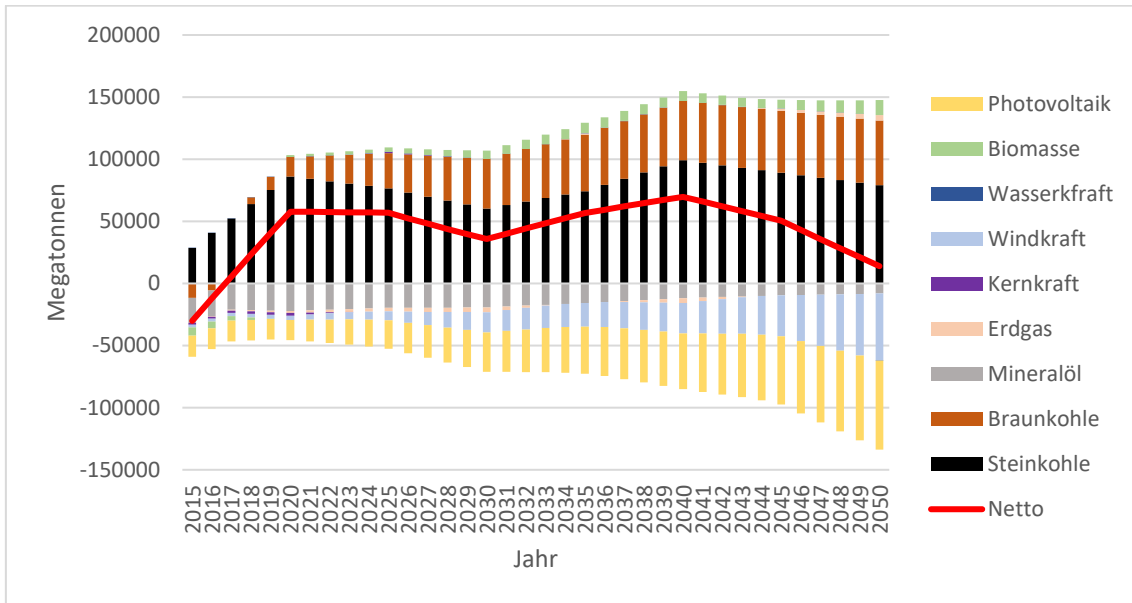


Abbildung 8: SO<sub>2</sub>-Reduktion durch Szenario EW

Die Entwicklung der SO<sub>2</sub>-Einsparung wird in erster Linie durch die Technologien Steinkohle, Braunkohle, Windkraft und Photovoltaik bestimmt. Würden nach 2050 weitere Photovoltaik- und Windkraftwerken gebaut werden, wäre der Ausstoß nach einigen Jahren vermutlich höher als zu Beginn der Messung. Allerdings muss auch das allgemein höhere Produktionsniveau im EW-Szenario beachtet werden.

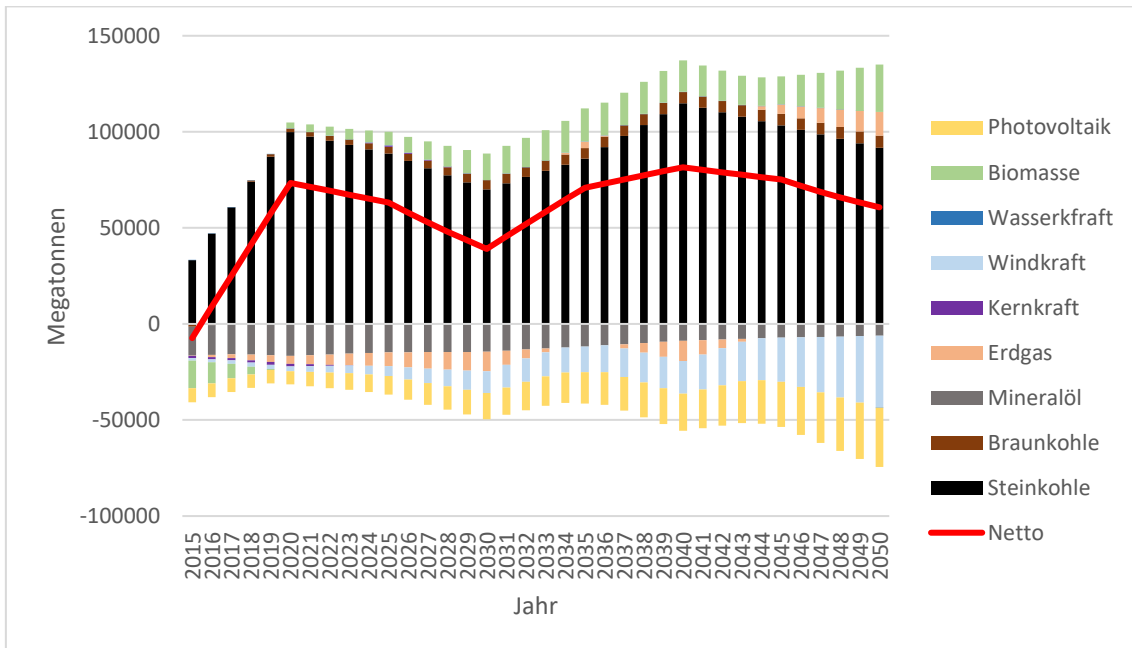


Abbildung 9: NO<sub>x</sub>-Reduktion durch Szenario EW



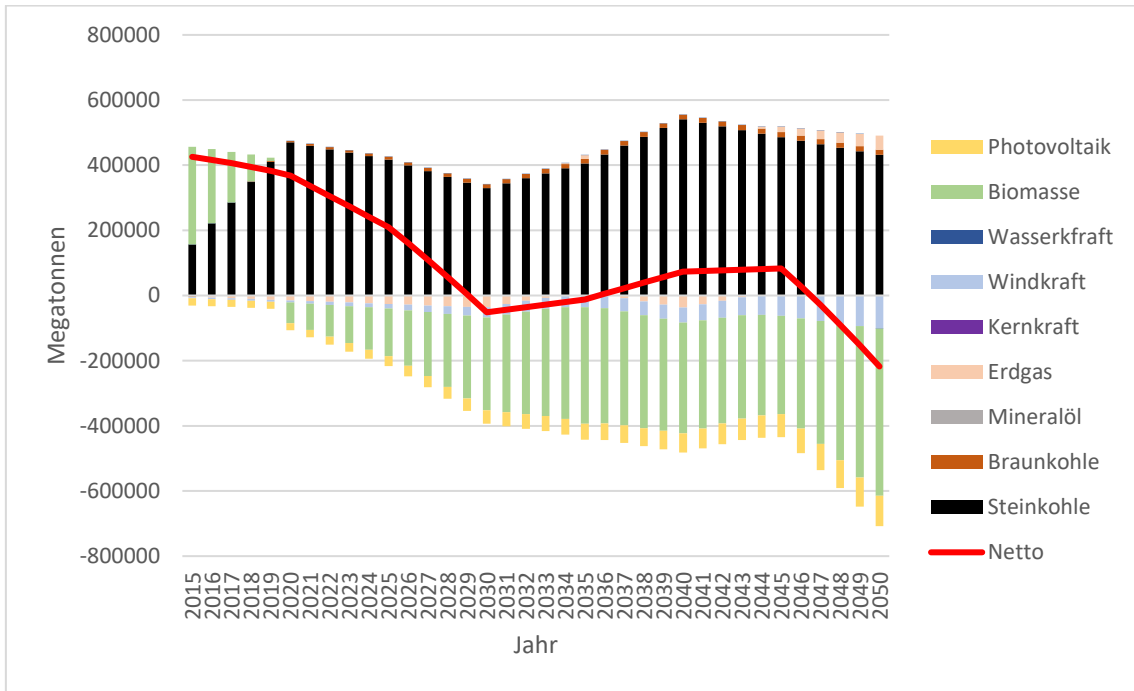


Abbildung 10: CH<sub>4</sub>-Reduktion durch Szenario EW

Steinkohle und Biomasse sind die entscheidenden Erzeugungstechniken hinsichtlich der Emission von Methan. Die höheren Emissionen ab dem Jahr 2046 sind auf die Reduktion der Biomasse im BAU-Szenario zurückzuführen. Da  $sb_{CH_4, BM} < 0$ , werden im Szenario EW durch die Reduktion des Biomasse-Anteils Emissionsvermeidungspotentiale abgebaut.

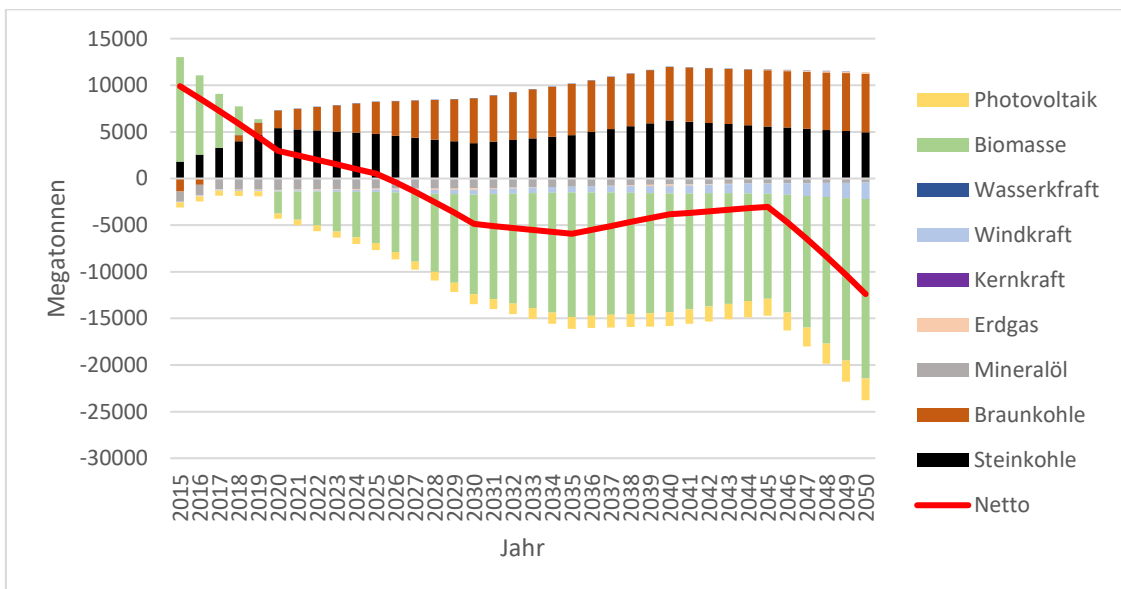


Abbildung 11: N<sub>2</sub>O-Reduktion durch Szenario EW

Hinsichtlich N<sub>2</sub>O tritt ein ähnlicher Effekt wie bei Methan ein: durch den Abbau von Biomasseanlagen werden Vermeidungspotentiale reduziert. Wie Tabelle 7 zu entnehmen ist, wird im Szenario EW mehr N<sub>2</sub>O emittiert als im Szenario BAU.

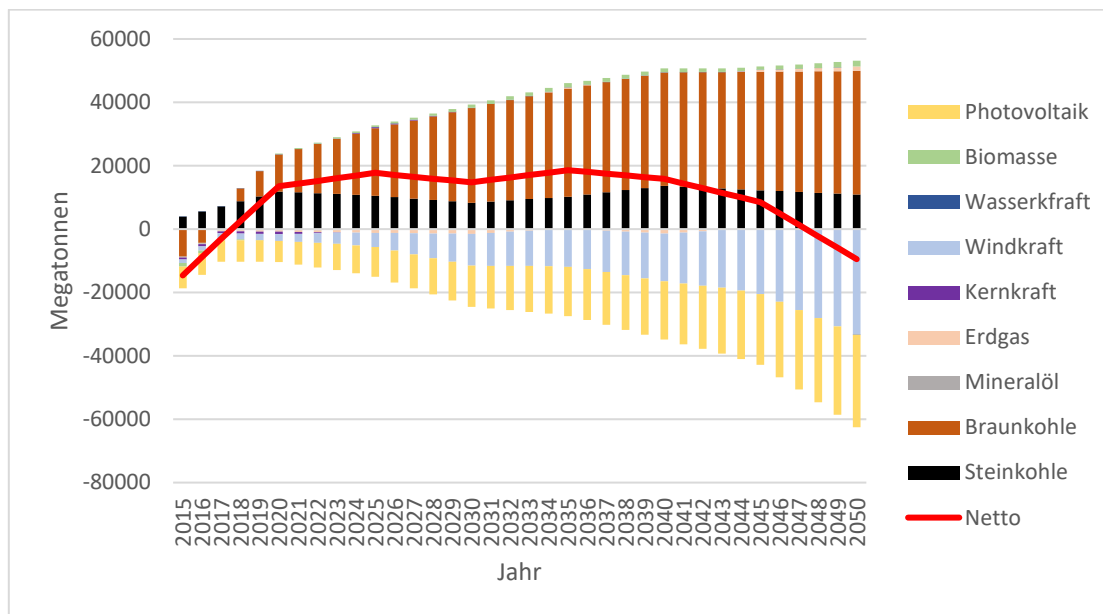


Abbildung 12: Partikel-Reduktion durch Szenario EW

Hinsichtlich der Partikelreduktion kann durch das Szenario EW insgesamt ein Vorteil erreicht werden (vergl. Tabelle 7). Nach 2047 werden im EW-Szenario mehr Partikel emittiert als im BAU-Szenario. Jedoch muss die höhere Gesamtproduktion des Szenarios EW berücksichtigt werden. Beim Szenario  $\widetilde{EW}$  verläuft die Netto-Linie beinahe parallel zur Nullachse (s. Anhang). Die Entwicklung zu PM<sub>10</sub> verläuft sehr ähnlich zur Entwicklung von allgemeinen Partikeln. Die Grafiken zu PM<sub>10</sub>, Rn222 und C-14 sind im Anhang aufgelistet.

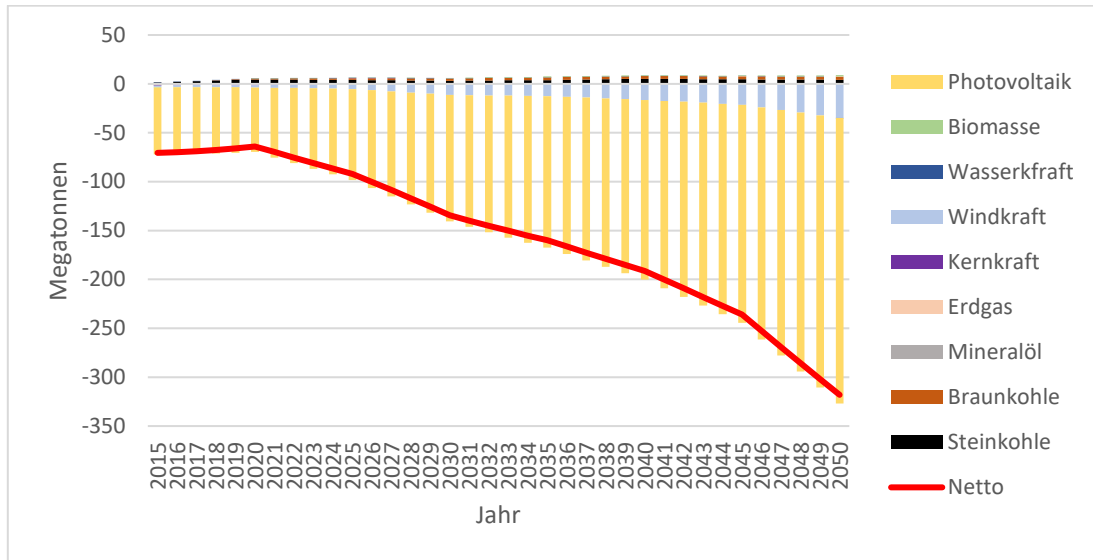


Abbildung 13: Bauxit-Einsparung durch Szenario EW

Tabelle 7 ist zu entnehmen, dass Photovoltaik bei gleichverteilten Erzeugungstechniken 90% der Bauxit-Entnahme verursacht. Entsprechend hoch ist der Bauxit-Verbrauch unter dem intensiven Ausbau der Photovoltaik im Szenario EW.

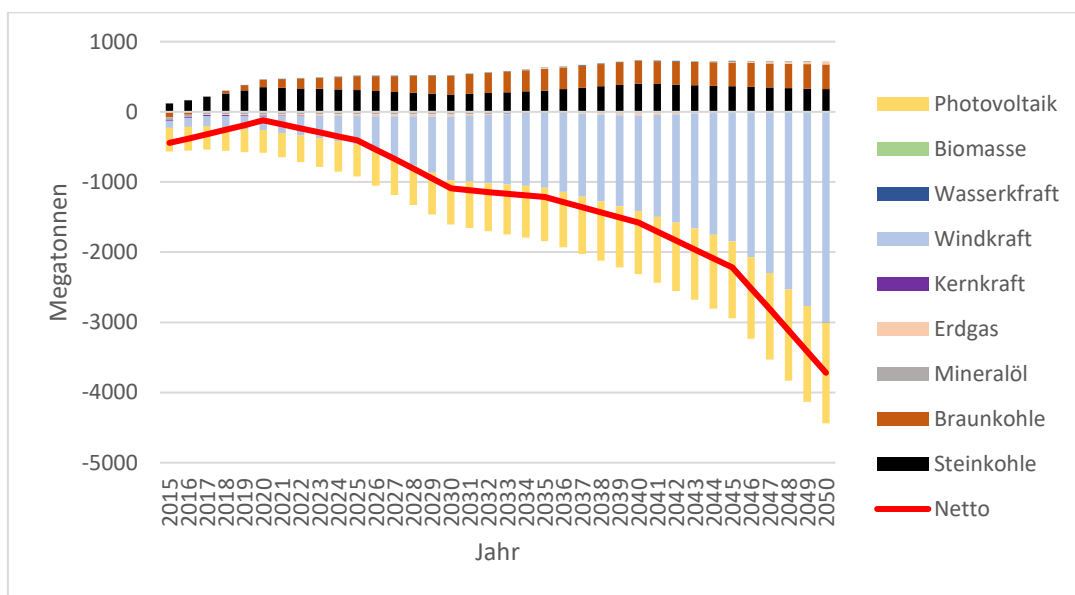


Abbildung 14: Fe-Einsparung durch Szenario EW

Einflussreichste Faktoren für den höheren Eisenverbrauch in Szenario EW sind der Ausbau von Photovoltaik und vor allem Windkraft.

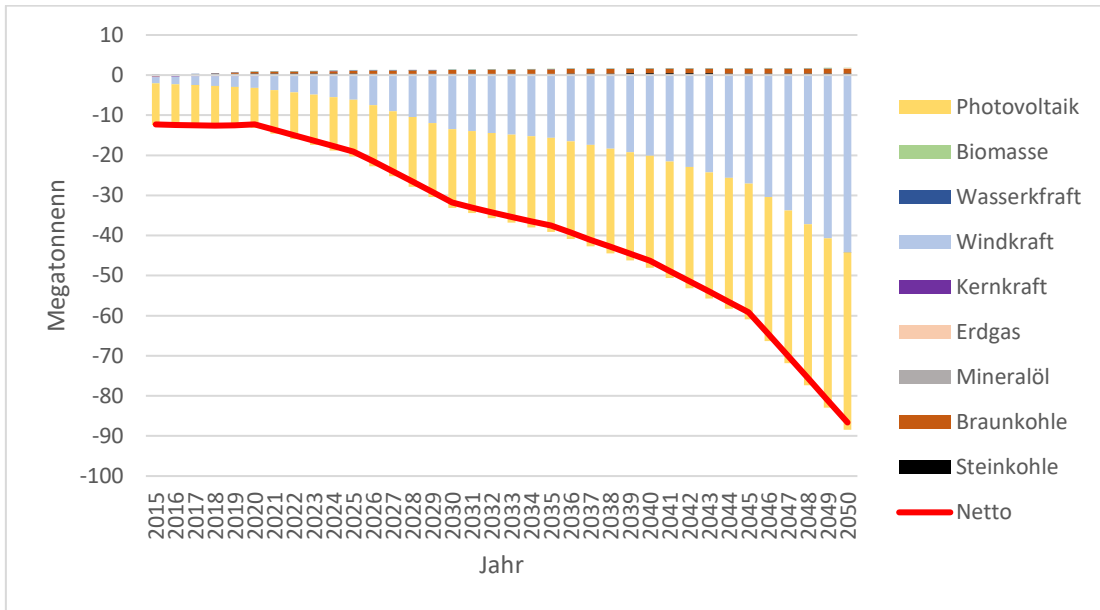


Abbildung 15: Cu-Einsparung durch Szenario EW

Ähnlich wie bei Eisen, ist auch bei Kupfer der starke Ausbau von Photovoltaik- und Windkraftanlagen im Szenario EW die treibende Kraft für den höheren Rohstoffbedarf.

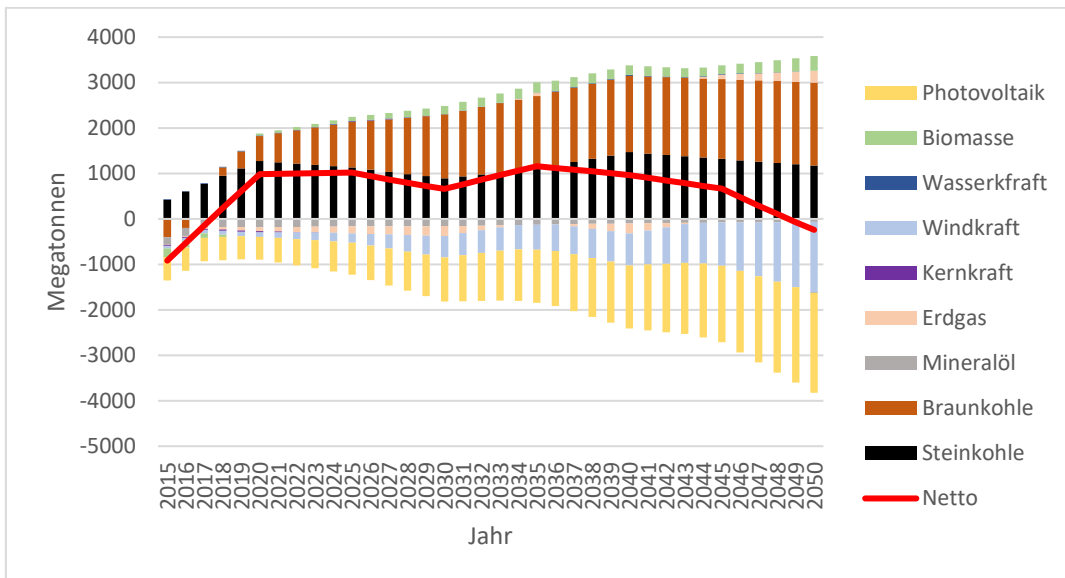


Abbildung 16: K-Einsparung durch Szenario EW

Kalkstein ist der einzige der vier betrachteten Rohstoffe, welcher unter dem Szenario EW weniger beansprucht wird als unter dem Szenario BAU. Dieser geringere Bedarf besteht auf Grund des hohen Kalksteinbedarfs der Produktion von Kohlekraft, welche in weitaus höherem Umfang im Szenario BAU zum Einsatz kommt. Es muss auch beachtet werden,

dass die Techniken Photovoltaik und Windkraft einen hohen Bedarf an Kalkstein haben, welcher mit der Zeit stark steigt. Das Szenario  $\widetilde{EW}$  weist im Vergleich zum Szenario EW keinen abfallenden Pfad des Nettobedarfs auf.

### **5.3. Vergleich der Ergebnisse mit anderen Studien**

Ein Vergleich mit Nitsch, et al. (2004) ist nur bedingt möglich, da lediglich Werte für Eisen und Kupfer aufgelistet werden und Angaben der Grafiken 6.34 und 6.35 nicht aus dem Vergleich zweier Szenarien herrühren (Nitsch, et al., 2004, S. 212).

Hertwich et al. (2015 b) verwenden Zement anstatt von Kalkstein oder Beton, daher ist ein grober Vergleich möglich. Bauxit besteht hauptsächlich aus Aluminium (Gow & Lozej, 1993) und wird daher auch für den Vergleich herangezogen. Hertwich et al (2015b) stellen die Modelle Baseline und BLUE-Map-Szenario der International Energy Agency (International Energy Agency, 2010, S. 106) gegenüber. Genaue Unterschiede können auf Grund einer unzureichenden Datenlage über die Werte seitens Hertwich et al. (2015b) nicht ermittelt werden, jedoch lassen sich aus den Diagrammen grobe Gemeinsamkeiten und starke Unterschiede durchaus entnehmen. Hinsichtlich Bauxit, Eisen und Kupfer fällt auf, dass der Einfluss der Erzeugungstechniken auf die entsprechenden Rohstoffe bei Hertwich et al. (2015a) wesentlich ausgeglichener verteilt ist, jedoch auch eine Zunahme der Rohstoffentnahme bei Kupfer und Zement/Kalkstein zu verzeichnen ist. Bei Hertwich et al. (2015a) ist auch für die Kategorie Kalkstein eine ständig wachsende Entnahme festzustellen, wohingegen die Differenz in der Entnahme in der vorliegenden Untersuchung bis 2050 wieder zurückgeht. Es ist auffällig, dass Erzeugungstechniken der Kohle bei Hertwich et al. (2015a) wesentlich mehr Einfluss hinsichtlich des Rohstoffverbrauchs einnehmen und Windkraft sowie Photovoltaik deutlich weniger Einfluss haben. Dies könnte an geringeren Anteilen von Photovoltaik und Windkraft im BLUE-Map Szenario als im EW-Szenario liegen. Außerdem hat im BLUE-Map-Szenario Kohle einen Anteil von über zehn Prozent im Jahr 2050, wohingegen im EW-Szenario ab 2035 nicht mehr auf Kohle zurückgegriffen wird. Hinzu kommt der Einfluss von Kohle mit CCS-Technologie. Daten der Sachbilanz aus Hertwich et al. (2015b) könnten einen umfassenderen Einblick ermöglichen.

## 6. Sensitivitätsanalyse

Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wird der Einfluss von Schwankungen innerhalb der Sachbilanz sowie des Strommix auf die gesamten Differenzen je Emission bzw. entnommenem Rohstoff (Tabelle 7) betrachtet.

### 6.1. Sensitivitätsanalyse Sachbilanz

Zwecks einer Sensitivitätsanalyse der Sachbilanz wurden die unterschiedlichen Kraftwerke in Marheineke (2002), aus welchen zuvor das arithmetische Mittel gebildet wurde, entsprechend ihres größtmöglichen Effekts ausgesucht. Für Biomasse erfolgte ein entsprechendes Verfahren, welches die Anlagen aus Nitsch, et al.(2004, S. 114) auswählt. Für Mineralöl ist leider nur eine Anlage aufgeführt (Europäische Kommission, 1999). Daher wird der bisherige Sachbilanzwert für Mineralöl beibehalten.

Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse werden Kombinationen für minimale und maximale Auswirkungen gemäß folgendem Vorgehen berechnet. Sei  $sb_{q,iv}$  der Sachbilanzwert von Variante  $v$  der Erzeugungstechnologie  $i$  und der Emission bzw. des entnommenen Rohstoffs  $q$ . Für Wasserkraft ist das z.B.:  $sb_{q,WK v} \in \{300 \text{ kW Laufwasser}, 500\text{kW Laufwasser}, 2,2 \text{ MW Laufwasser}, 3,1 \text{ MW Laufwasser}\}$  (s. Marheineke; 2002; S. 177).  $sb_{q,iv}$  wird nun so gewählt, dass  $\sum_{q=SK}^{q=K} sb_{q,iv} asb_{q,i}$  maximal bzw. minimal ist. Es werden somit die Anteile, welche eine Erzeugungstechnik zu den jeweiligen Emissionen bzw. entnommenen Rohstoffen beitragen kann, maximiert bzw. minimiert.

Wird eine Erzeugungstechnik  $q$  in der Sachbilanz mit niedrigeren Werten angesetzt, stellt dies einen Vorteil für das Szenario dar, welches mit der Erzeugungstechnik  $q$  über den gesamten Zeitraum mehr Strom produziert. Abhängig von der Technologie profitieren die Szenarien BAU und EW unterschiedlich von der Auswahl hoher bzw. niedriger Werte der Sachbilanz. Um einen möglichst breiten Korridor an Veränderungen abzudecken, wurden zwei Aufteilungen der Varianten vorgenommen, welche entweder das Szenario EW oder das Szenario BAU in maximalem Umfang bevorzugt (s. Anhang).

	Summe Erzeugung 2015-2050 (TWh)		Vorteil höherer SB-Werte	
	EW	BAU	EW	BAU
<b>Steinkohle</b>	1118	4915	X	
<b>Braunkohle</b>	1124	5142	X	
<b>Mineralöl</b>	500	18		X
<b>Erdgas</b>	1926	1700		X (geringfügig)
<b>Kernkraft</b>	590	438		X (geringfügig)
<b>Windkraft</b>	10295	3300		X
<b>Wasserkraft</b>	810	872	X (geringfügig)	
<b>Biomasse</b>	1084	1609	X	
<b>Photovoltaik</b>	3048	582		X

Tabelle 8: Gesamterzeugung der Technologien je Szenarien EW & BAU

Eine Berechnung der gesamten Differenzen der Emissionen und entnommenen Rohstoffen zwischen den Szenarien führt zu folgenden Werten.

$geer_q^{BAU} - geer_q^{EW}$	„Neutrale“ Sachbilanz (Referenz)	Vorteil EW	Vorteil BAU
CO2 (Mt)	5,58E+06	6,17E+09	5,06E+09
SO2 (Mt)	1,59E+06	1,44E+06	-6,08E+05
NOx (Mt)	2,17E+06	2,16E+06	1,83E+05
CH4 (Mt)	4,03E+06	7,54E+06	1,27E+07
N2O (Mt)	-7,63E+04	-9,04E+04	2,06E+05
P (Mt)	3,74E+05	6,41E+05	1,62E+04
PM10 (Mt)	9,99E+04	2,18E+05	-9,25E+04
Rn-222 (kBq)	-2,78E+03	-2,89E+03	-2,59E+00
C-14 (Bq)	-2,86E+03	-1,22E+03	-4,72E+03
IS (PersSv)	-8,31E+05	-4,70E+05	-1,45E+06
BX (Mt)	-5,56E+06	-3,76E+03	-3,29E+04
Fe (Mt)	-4,42E+07	-3,14E+04	-3,41E+04
Cu (Mt)	-1,33E+06	-1,03E+03	-4,58E+04
K (Mt)	2,38E+07	8,11E+04	1,05E+03

Tabelle 9: Auswirkung von Veränderung der Sachbilanz auf relative Einsparungen der Szenarien EW und BAU

Die Tabelle zeigt Veränderungen hinsichtlich der Differenzen der gesamten Emissionen bzw. entnommenen Rohstoffe zwischen den Szenarien. Ein Vorzeichenwechsel zwischen dem Referenzwert und einem Wert aus der gleichen Zeile bedeutet, dass unter Verwendung der neuen Sachbilanz nun ein anderes Szenario weniger Emissionen produziert bzw. Rohstoffe verbraucht. Es wurde z.B. unter der Variante „Referenz“ mehr SO<sub>2</sub> im Szenario BAU als im Szenario EW emittiert. Allerdings muss beachtet werden, dass die Auslegung „Vorteil“ nicht automatisch für alle Emissionen bzw. Rohstoffe einen Vorteil für ein Szenario bedeutet. Vergleicht man z.B. die Werte zu SO<sub>2</sub>, fällt auf, dass im Szenario EW mit der Referenz-Sachbilanz weniger SO<sub>2</sub> emittiert wurde. Der Grund dafür liegt in der Bildung der Sachbilanz durch  $\sum_{q=SK}^{q=K} sb_{q,iv} asb_{q,i}$ , da es durch die Summenbildung zu einer Abwägung zwischen unterschiedlichen Emissionen bzw. entnommenen Rohstoffen kommt. Insgesamt stellt sich lediglich bei den drei Emissionen SO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O und PM10 ein neuer Vorteil für das Szenario BAU ein.

## 6.2. Sensitivitätsanalyse Strommix

Um die Auswirkung des Strommix auf die Emissionen und entnommenen Rohstoffe zu testen, werden die Werte des Strommix in den Szenarien EW und BAU um jeweils zehn Prozent gesenkt und angehoben. Der Vergleich erfolgt immer mit dem unveränderten Gegenmodell.



$geer_q^{BAU}$ – $geer_q^{EW}$	Referenz	EW neg	EW pos	BAU neg	BAU pos
CO <sub>2</sub> (Mt)	5,58E+06	6,01E+06	5,15E+06	4,59E+06	6,56E+06
SO <sub>2</sub> (Mt)	1,59E+06	2,10E+06	1,08E+06	9,17E+05	2,26E+06
NO <sub>x</sub> (Mt)	2,17E+06	2,62E+06	1,73E+06	1,51E+06	2,83E+06
CH <sub>4</sub> (Mt)	4,03E+06	3,49E+06	4,58E+06	4,18E+06	3,89E+06
N <sub>2</sub> O (Mt)	-7,63E+04	-1,16E+05	-3,65E+04	-2,88E+04	-1,24E+05
P (Mt)	3,74E+05	5,59E+05	1,88E+05	1,51E+05	5,96E+05
PM10 (Mt)	9,99E+04	1,93E+05	6,41E+03	-3,58E+03	2,03E+05
Rn-222 (kBq)	-2,78E+03	-1,70E+03	-3,86E+03	-3,58E+03	-1,98E+03
C-14 (Bq)	-2,86E+03	-1,75E+03	-3,96E+03	-3,68E+03	-2,03E+03
IS (PersSv)	-8,31E+05	-5,58E+05	-1,10E+06	-1,02E+06	-6,42E+05
BX (Mt)	-5,56E+06	-4,82E+06	-6,30E+06	-5,75E+06	-5,37E+06
Fe (Mt)	-4,42E+07	-3,39E+07	-5,45E+07	-5,00E+07	-3,83E+07
Cu (Mt)	-1,33E+06	-1,14E+06	-1,51E+06	-1,38E+06	-1,27E+06
K (Mt)	2,38E+07	3,77E+07	9,86E+06	7,48E+06	4,01E+07

Tabelle 10: Auswirkung von Veränderung des Strommix um 10% auf Differenzen der Szenarien EW und BAU

Einzig für die Emission PM10 zeigt sich eine entscheidende Änderung. Würde im Szenario Bau die Stromproduktion um 10% sinken, würde im Szenario EW nun mehr emittiert werden als im Szenario BAU. Betrachtet man ausschließlich den absoluten Vorteil eines Szenarios hinsichtlich einzelner Emissionen oder Rohstoffe, sind die Ergebnisse gegen eine Änderung des Strommix von zehn Prozent oder weniger relativ robust.

Die negativen Sachbilanzwerte der Biomasse für NO<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub> bewirken, dass sich eine Erhöhung bzw. Reduktion der Szenarien EW und BAU mit umgekehrter Änderungsrichtung auswirken als bei den anderen Emissionen bzw. entnommenen Rohstoffen.

Für eine Veränderung von zwanzig statt zehn Prozent ergeben sich nachfolgende Ergebnisse.

$geer_q^{BAU}$ – $geer_q^{EW}$	Referenz	EW neg	EW pos	BAU neg	BAU pos
CO <sub>2</sub> (Mt)	5,58E+06	6,43E+06	4,72E+06	3,60E+06	7,41E+06
SO <sub>2</sub> (Mt)	1,59E+06	2,61E+06	5,63E+05	2,45E+05	2,85E+06
NO <sub>x</sub> (Mt)	2,17E+06	3,06E+06	1,29E+06	8,52E+05	3,41E+06
CH <sub>4</sub> (Mt)	4,03E+06	2,95E+06	5,12E+06	4,32E+06	3,82E+06
N <sub>2</sub> O (Mt)	-7,63E+04	-1,56E+05	3,30E+03	1,86E+04	-1,64E+05
P (Mt)	3,74E+05	7,44E+05	3,09E+03	-7,16E+04	7,86E+05
PM10 (Mt)	9,99E+04	2,87E+05	-8,71E+04	-1,07E+05	2,92E+05
Rn-222 (kBq)	-2,78E+03	-6,25E+02	-4,93E+03	-4,38E+03	-1,18E+03
C-14 (Bq)	-2,86E+03	-6,42E+02	-5,07E+03	-4,50E+03	-1,21E+03
IS (PersSv)	-8,31E+05	-2,86E+05	-1,37E+06	-1,21E+06	-4,56E+05
BX (Mt)	-5,56E+06	-4,08E+06	-7,04E+06	-5,93E+06	-5,22E+06
Fe (Mt)	-4,42E+07	-2,36E+07	-6,47E+07	-5,59E+07	-3,33E+07
Cu (Mt)	-1,33E+06	-9,55E+05	-1,70E+06	-1,44E+06	-1,23E+06
K (Mt)	2,38E+07	5,16E+07	-4,06E+06	-8,81E+06	5,41E+07

Tabelle 11: Auswirkung von Veränderung des Strommix um 20% auf Differenzen der Szenarien EW und BAU

Durch eine höhere Änderung des Strommix um 20 Prozent ergeben sich vereinzelt weitere Änderungen gegenüber der Änderung um 10 Prozent. Absolute Vorteile für das Szenario BAU entstehen hinsichtlich der Partikel P und des Verbrauchs von Kalkstein durch eine reduzierte Produktion des Szenarios BAU. Weitere absolute Vorteile für das Szenario BAU entstehen hinsichtlich der Emission von PM10 und der Entnahme von Kalkstein, was auf eine gesteigerte Produktion im Szenario EW zurückzuführen ist. Für das Szenario EW ergeben sich absolute Vorteile hinsichtlich der Emission von N<sub>2</sub>O durch eine geringere Produktion in Szenario BAU oder eine höhere Produktion in Szenario EW.

Es fällt auf, dass deutlich mehr Vorteile für das Szenario BAU durch eine Variation der Strommixe entstehen.

## **7. Schlussteil**

### **7.1. Zusammenfassung**

Die vorliegende Arbeit untersucht die Veränderung von Emissionen und benötigten Rohstoffen durch den Umbau der Kraftwerksstruktur im Rahmen der Energiewende. Es zeigt sich, dass die Energiewende zu einer Reduktion der Emissionen von Kohlenstoffdioxid, Schwefeldioxid, Stickoxiden, Methan sowie Feinstaub und einem geringeren Verbrauch an Kalkstein beitragen kann. Auf der anderen Seite ist mit einem höheren Ausstoß von Stickoxiden, einer höheren Strahlenbelastung sowie einem größeren Bedarf an Bauxit, Eisen und Kupfer zu rechnen.

### **7.2. Ausblick**

Die vorangegangene Betrachtung bietet sowohl methodisches wie auch thematisches Potential für weitere Untersuchungen.

Die in dieser Arbeit verwendete Sachbilanz setzt sich aus Sachbilanzen anderer Studien zusammen, welche nach Möglichkeit vereinheitlicht wurden. Eine Studie, welche einen breiten Umfang von Emissionen und verbrauchten Rohstoffen für sämtliche relevante Erzeugungstechniken einheitlich untersucht, würde methodenbasierte Abweichungen in der Sachbilanz eliminieren. Für den deutschen Stromsektor existiert solch eine Studie noch nicht. Eine Dynamisierung der Sachbilanz durch Abbilden technologischen Fortschritts würde außerdem Möglichkeiten für weitere Untersuchungen bieten. Eine Wirkungseinschätzung sowie eine Aggregation könnten die Betrachtung deutlich bereichern und dabei helfen, die Emissionen und entnommenen Rohstoffe in Relation zu setzen.

Thematisch ließe sich diese Arbeit auf weitere Gebiete der Energiewende wie z.B. Stromnetze, Gebäude bzw. Wärme und Verkehr ausweiten. Die Wechselwirkungen zwischen diesen Sektoren stellen ein weiteres vielversprechendes Anwendungsfeld für Lebenszyklusanalysen dar.

## Literaturverzeichnis

AEE (Agentur für Erneuerbare Energien e.V.), 2012. *Einzelansicht - Forschungsradar*

*Energiewende*. [Online] Weblink:

<http://www.forschungsradar.de/metaanalysen/einzelansicht/news/studienvergleich-entwicklung-der-stromerzeugung-aus-erneuerbaren-energien-und-des-strommixes-in-deu.html>>

AGEB (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V.), 2019. *AG Energiebilanzen e.V. |*

*Zusatzinformationen*. [Online] Weblink:

[https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article\\_id=29&fileName=20181214\\_brd\\_stromerzeugung1990-2018.xlsx](https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=20181214_brd_stromerzeugung1990-2018.xlsx)>

AGEB, 2019. *AG Energiebilanzen e.V. | Bilanzen 1990-2016*. [Online] Weblink:

<https://ag-energiebilanzen.de/7-0-Bilanzen-1990-2016.html>> [Zugriff am 9 Mai 2019].

Assies, J., 1991, 1992. *Introduction paper to SETAC-Europe workshop on environmental life cycle analysis of products*. Leiden, Brüssel, SETAC-Europe.

Barzantny, K., Achner, S. & Vomberg, S., 2009. *Klimaschutz: Plan B 2050 -*

*Energiekonzept für Deutschland (Langfassung) Bericht von Eutech Energie und Management GmbH*, Hamburg: s.n.

Beer, M., Corradini, R., Fieger, C., Gobmaier, T., Köll, L., Podhajsky, R., Steck, M., Zotz, M.,

Karl, H.-D., 2009. *Energiezukunft 2050 - Teil II - Szenarien*, München: EnBW, E.ON

Energie, RWE Power, Vattenfall Europe.

Blesl, M., Bruchof, D., Fahl, U., Kober, T., Kuder, R., Götz, B., Foß, A., 2011. *Integrierte*

*Szenarioanalyse zu Energie- und Klimaschutzstrategien in einem Post-Kyoto\_Regime*,

Stuttgart: s.n.

BMWi, 2012. *Die Energiewende in Deutschland*. [Online]

Available at: [http://digital.bib-bvb.de/view/bvb\\_single/single.jsp?dvs=1546822524](http://digital.bib-bvb.de/view/bvb_single/single.jsp?dvs=1546822524)

[837~509&locale=de&VIEWER\\_URL=/view/bvb\\_single/single.jsp?&DELIVERY\\_RULE\\_ID=39&bfe=view/action/singleViewer.do?dvs=&frameId=1&usePid1=true&usePid2=true](http://digital.bib-bvb.de/view/bvb_single/single.jsp?dvs=1546822524&locale=de&VIEWER_URL=/view/bvb_single/single.jsp?&DELIVERY_RULE_ID=39&bfe=view/action/singleViewer.do?dvs=&frameId=1&usePid1=true&usePid2=true)>

BMWi, 2017. *Die Energiewende: unsere Erfolgsgeschichte - energiewende-beileger.pdf*.

[Online] Weblink:

<https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energiewende-beileger.pdf? blob=publicationFile&v=33>>

BMWi, 2017. *Strom 2030: Langfristige Trends - Aufgaben für die kommenden Jahre*.

[Online] Weblink: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/strom-2030-ergebnispapier.pdf? blob=publicationFile&v=32>>

BMWi, 2018. *BMWi - Sechster Monitoring-Bericht "Energie der Zukunft"*. [Online]

Weblink: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/sechster-monitoring-bericht-zur-energiewende.html>>

BMWi, 2019. *BMWi - Energiedaten: Gesamtausgabe*. [Online]

Weblink: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Binaer/Energiedaten/energiedaten-gesamt-xls.xlsx? blob=publicationFile&v=95>>

BMWi, 2019. *BMWi - Strommarkt der Zukunft*. [Online]

Weblink: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/strommarkt-der-zukunft.html>>

[Zugriff am 23 April 2019].

BMWi, 2019. *BMWi - Unsere Energiewende: sicher, sauber, bezahlbar*. [Online]

Weblink: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/energiewende.html>>

[Zugriff am 2 Mai 2019].

Bräutigam, T., 2013. *Knappe Rohstoffe: Wann bauen wir das letzte Windrad?*. [Online]

Weblink: <https://www.wiwo.de/technologie/green/knappe-rohstoffe-wann-bauen-wir-das-letzte-windrad/13547618.html>>

[Zugriff am 07 Januar 2019].

Bundesanzeiger Verlag GmbH, 2000. *Bundesgesetzblatt Online*. [Online] Weblink:

[http://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger\\_BGBI&jumpTo=bgbl100s0305.pdf](http://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBI&jumpTo=bgbl100s0305.pdf)>

Clapp, C., Karousakis, K., Buchner, B. & Château, J., 2009. *National and Sectoral GHG Mitigation Potential: A Comparison Across Models*, Paris: OECD/IEA.

de Haes, H. A. U. & Heijungs, R., 2007. Life-cycle assessment for energy analysis and management. *Applied Energy*, Issue 84, pp. 817-827.

DIN EN ISO 14044, 2009. *Umweltmanagement – Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

Donaldson, K., Gilmou, I. M. & MacNee, W., 2001. Asthma and PM10. *Respir Res*, Band 1, pp. 12-15.

Dones, R., Heck, T., Bauer, C., Hirschberg, S., Bickel, P., Preiss, P., Panis, L. I., De Vlieger, I., 2005. *Externalities of energy: Extension of accounting framework and policy applications*, Villigen, Stuttgart, s.l.: s.n.

Edelmann, W., Schleiss, K., Engeli, H. & Baier, U., 2001. *Ökobilanz der Stromgewinnung aus landwirtschaftlichem Biogas*, Bern: s.n.

Europäische Kommission, 1999. *ExternE Externalities of Energy - Vol. XX: National Implementation*, s.l.: s.n.

Europäische Kommission, o.D. *Joint Research Centre Life Cycle Thinking and Assessment Website*. [Online] Weblink: <http://lct.jrc.ec.europa.eu/>  
[Zugriff am 29 März 2010].

Eyerer, P., Dekorsy, T. & Schuckert, M., kein Datum *Ganzheitliche Bilanzierung - technisch, wirtschaftlich, umweltfreundlich*, Stuttgart: s.n.

Fraunhofer ISE (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme), 2019. *Stromerzeugung | Energy Charts*. [Online]

Weblink: [https://www.energy-charts.de/energy\\_pie\\_de.htm?year=2018](https://www.energy-charts.de/energy_pie_de.htm?year=2018)

Fraunhofer ISE, 2019. *Installierte Leistung | Energy Charts*. [Online]

Weblink: [https://www.energy-](https://www.energy-charts.de/power_inst_de.htm?year=2018&period=annual&type=power_inst)

[charts.de/power\\_inst\\_de.htm?year=2018&period=annual&type=power\\_inst](https://www.energy-charts.de/power_inst_de.htm?year=2018&period=annual&type=power_inst)

[Zugriff am 22 April 2019].

Fritsche, U. R., Dehoust, G., Jenseit, W., Hünecker, K., Rausch, L., Schüler, D., Wiegmann, K., Heinz, A., Hiebel, M., Ising, S., Unger, C., Thrän, D., Fröhlich, N., Scholwin, F., Reinhard, G., Gärtner, S., Patyk, A., Bauer, F., Bemmann, U., Groß, B., Heib, M., Ziegler, C., Flake, M., Schmehl, M., Simon, S., 2004. *Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse*, Darmstadt, Berlin, Oberhausen, Leipzig, Heidelberg, Saarbrücken, Braunschweig, München: Bundesministerium für Umwelt.

Gibon, T. & Hertwich, E., 2014. A global environmental assessment of electricity generation technologies with low greenhouse gas emissions. *Procedia CRIP*, 15(0), pp. 3-7.

Gow, N. N. & Lozej, G. P., 1993. Bauxite. *Geoscience Canada*, 20(1), pp. 9-16.

Guinée, J. B., de Haes, U. H. & Huppés, G., 1993. Quantitative life cycle of products 1: Goal definition and products. *Journal of Cleaner Production*, 1(1), pp. 3-13.

Guinée, J. B., Reinout, H., Huppés, G., Zamagni, A., Masoni, P., Buonamici, R., Etkal, T., Rydberg, T., 2011. Life Cycle Assessment: Past, Present and Future. *Environmental Science and Technology*, 45(1), pp. 90-96.

Hake, J.-F., Fischer, W., Venghaus, S. & Weckenbrock, C., 2015. The German Energiewende - History and status quo. *Energy*, 92(3), pp. 532-546.

Henning, H.-M. & Palzer, A., 2012. *100 %ERNEUERBARE ENERGIEN FÜR STROM UND WÄRME IN DEUTSCHLAND*, Freiburg: s.n.

Henning, H.-M. & Palzer, A., 2013. *Energiesystem Deutschland 2050*, Freiburg: s.n.

Hertwich, E. G., Gibon, T., Bouman, E.A., Arvesen, A., Suh, S., Heath, G. A., Bergesen, J.A., Ramirez, A., Vega, M. I., Shi, L., 2015. Integrated life-cycle assessment of electricity-supply scenarios confirms global environmental benefit of low-carbon technologies. *Proceeding of the National Academy of Science of the United States of America*, 19 Mai, pp. 6277-6282.

Hertwich, E. G., Gibon, T., Bouman, E.A., Arvesen, A., Suh, S., Heath, G. A., Bergesen, J.A., Ramirez, A., Vega, M. I., Shi, L., 2015. Integrated life-cycle assessment of electricity-

supply scenarios confirms global environmental benefit of low-carbon technologies (Supporting Information). *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, 19 Mai, S. 1-6.

Hespenheide, E., Pavlovsky, K. & McElroy, M., 2010. Accounting for Sustainability Performance. *financial executive*, März, 26(2), S. 52-58.

Hohmeyer, O., 2001. *Vergleich externer Kosten der Stromerzeugung in Bezug auf das Erneuerbare Energien Gesetz*, Flensburg: Kuhbier und Fouquet.

Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde, 1999. [Online]

Weblink: [http://www.gabi-software.com/deutsch/gabi1\\_deutsch.shtml](http://www.gabi-software.com/deutsch/gabi1_deutsch.shtml)

International Energy Agency, 2010. *Energy technology perspectives 2010: Scenarios*, Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development/ International Energy Agency.

ISO , 2006. *ISO 14040 - Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*. Genf: International Organization of Standardization.

Kahouli-Brahmi, S., 2008. Technological learning in energy–environment–economy modelling: A survey. *Energy Policy*, Band 36, S. 138-162.

Kirchner, A., M. Schlesinger, Weinmann, B., Hofer, P., Rits, V., Wunsch, M., Koepp, M., Kemper, L., Zweers, U., Straßburg, S., Matthes, F.-C., Busche, J., Graichen, V., Zimmer, W., Hermann, H., Penninger, G., Mohr, L., Ziesing, H.-J., 2009. *Modell Deutschland - Klimaschutz bis 2050: Vom Ziel her denken*, Basel/Berlin: WWF Deutschland.

Klaus, T., Vollmer, C., Werner, K., Lehmann, H., Müschen, K., 2010. *Energieziel 2050: 100%Strom aus erneuerbaren Quellen*, Dessau-Roßlau: BMU.

Kommission „Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung“, 2019. *Abschlussbericht*, Berlin: s.n.

Leontief, W., 1966. *Input-Output-Economics*.

Lüers, S., Wallasch, A.-K. & Vogelsang, K., 2017. *Status des Windenergieausbaus an Land in Deutschland, Gesamtjahr 2016.pdf*. [Online] Weblink:



[https://www.windguard.de/veroeffentlichungen.html?file=files/cto\\_layout/img/unternehmen/veroeffentlichungen/2017/Status%20des%20Windenergieausbaus%20an%20Land%20in%20Deutschland%2C%20Gesamtjahr%202016.pdf](https://www.windguard.de/veroeffentlichungen.html?file=files/cto_layout/img/unternehmen/veroeffentlichungen/2017/Status%20des%20Windenergieausbaus%20an%20Land%20in%20Deutschland%2C%20Gesamtjahr%202016.pdf)

Marheineke, T., 2002. *Lebenszyklusanalyse fossiler, nuklearer und regenerativer Stromerzeugungstechniken*, Stuttgart: IER, Forschungsbericht Band 87.

Matthes, F. C., Emele, L., Hauke, H., Loreck, C., Peter, F., Ziegenhagen, I. Cook, V., 2017. *Zukunft Stromsystem: Kohleausstieg 2035*, s.l.: s.n.

Matthes, F. C., Flachsbarth, F., Loreck, C., Hauke, H., Falkenberg, H., Cook, V., 2018. *Zukunft Stromsystem Teil 2: Regionalisierung der erneuerbaren Stromerzeugung*, s.l.: s.n.

Ménard, M., Dones, R. & Gantner, U., 1998. *Strommix in Ökobilanzen. Auswirkung der Strommodellwahl für Produkt- und Betriebs-Ökobilanzen*, Villigen: Paul Scherrer Institut.

Miettinen, P. & Hämäläinen, R. P., 1997. How to benefit from decision analysis in environmental life cycle assessment (LCA). *European Journal Of Operational Research*, 2(102), S. 279-294.

Nagl, S., Fürsch, M., Paulus, M., Richter, J., Trüby, J., Lindenberger, D., 2011. Energy policy scenarios to reach challenging climate protection targets in the German electricity sector until 2050. *Utilities Policy*, Band 19, S. 185-192.

Nitsch, J., 2016. *Die Energiewende nach COP 21 - Aktuelle Szenarien der deutschen Energieversorgung*, Stuttgart: s.n.

Nitsch, J., Dürschmidt, W. & Büsgen, U., 2009. *Leitstudie 2009 - Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau erneuerbarer Energien in Deutschland*, Stuttgart: BMU.

Nitsch, J., Krewitt, W., Nast, M., Viebahn, P., Gärtner, S., Phent, M., Reinhardt, G., Schidt, R., Uihlein, A., Scheurlen, K., Barthel, C., Fishedick, M., Merten, F., 2004. *Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland*, Stuttgart, Heidelberg, Wuppertal: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.

Nitsch, J., Pregger, T., Naegler, T., Heide, D., de Tene, D. L., Trieb, F., Scholz, Y., Nienhaus, K., Gerhardt, N., Sterner, M., Trost, T., van Oehsen, A., Schwinn, R., Pape, C., Hahn, H., Wickert, M. Wenzel, B., 2012. *Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global - Leiststudie 2010*, Stuttgart, Kassel, Teltow: BMU.

Paschotta, R., 2018. *RP-Energielexikon - Primärenergie, Sekundärenergie, Endenergie, Jahresprimärenergiebedarf, Primärenergiefaktor*. [Online]

Weblink: <https://www.energie-lexikon.info/primaerenergie.html>

[Zugriff am 24 April 2019].

Pehnt, M., Oeser, M. & Swider, D. J., 2008. Consequential environmental system analysis of expected offshore wind electricity production in Germany. *Energy*, 33(5), S. 747-759.

Quitow, L., Canzler, W., Grundmann, P., Leibenrath, M., Moss, T., Raver, T., 2016. The German Energiewende - What's happening? Introducing the special issue. *Utilities Policy*, August, S. 163-171.

Raschke, J., 2015. *Lexikon der Nachhaltigkeit | Wirtschaft | Ökobilanz DIN-Norm 33926*.

[Online] Weblink:

[https://www.nachhaltigkeit.info/artikel/oekobilanz\\_din\\_norm\\_33926\\_1295.htm](https://www.nachhaltigkeit.info/artikel/oekobilanz_din_norm_33926_1295.htm)

[Zugriff am 2 Mail 2019].

Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G., Rydberg, T., Schmidt, W.-P., Suh, S., Weidema, B., Pennigton, D. W., 2004. Life cycle assessment - Part 1:

Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. *Environment International*, 30(5), S. 701-720.

Renou, S., Thomas, J., Aoustin, E. & Pons, M. N., 2008. Influence of impact assessment methods in wastewater treatment LCA. *Journal of Cleaner Production*, 16(10), S. 1098-1105.

Repenning, J., Matthes, F., Blanck, R., Emele, L., Döring, U., Förster, H., Haller, M., Harhan, R., Henneberg, K., Hermann, H., Jörß, W., Kasten, P., Ludig, S., Loreck, C., Margarehte, S., Schumacher, K., Eichhammer, W. Braungardt, S., Elsland, S., Fleiter, T., Hartwig, J., Kockat,

- J. Pfluger, B., Schade, W., Schlomann, B., Sensfuß, F., Athmann, U., Ziesing, H.-J., 2014. *Klimaschutzszenario 2050 - 1.Modellierungsrunde*, Berlin, Karlsruhe: BMU.
- Samadi, S. & Merten, F., 2013. *Restore 2050 - Szenarioauswahl und Metaanalyse*, Wuppertal: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie.
- Schlesinger, M., Hofer, P., Kemmler, A., Kirchner, A., Koziel, S., Ley, A., Piégsa, A., Seefeldt, F., Straßburg, S., Weinert, K., Lindenberger, D., Knaut, A., Malischek, R., Nick, S., Panke, T., Paulus, S., Tode, C., Wagner, J., Lutz, C., Lehr, U., Ulrich, P., 2014. *Entwicklung der Energiemärkte - Energieprognose*, Basel, Köln, Osnabrück: BMWi.
- Schlesinger, M., Lindengerger, D. & Lutz, C., 2010. *Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung*, Basel/Köln/Osnabrück: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie.
- Schmitz, S. & Paulini, I., 1999. *Bewertung in Ökobilanzen. Methode des Umweltbundesamtes zur Normierung von Wirkungsindikatoren, Ordnung(Rangbildung) von Wirkungskategorien und zur Auswertung nach ISO 14042 und 14043. (Version '99)*, Berlin: UBA-Texte 92/99.
- SRU (Sachverständigenrat für Umweltfragen), 2011. *Wege zur 100 % erneuerbaren Stromversorgung, Sondergutachten*, Berlin: s.n.
- Statistisches Bundesamt, kein Datum s.l.:s.n.
- Stechemesser, K. & Guenther, E., 2012. Carbon accounting: a systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, Band 36, S. 17-38.
- Suh, S., Lenzen, M., Treolar, G. J., Hondo, H., Horvath, A., Huppes, G., Jolliet, O., Klann, U., Krewitt, U., Moriguchi, Y., Munksgaard, J., Norris, G., 2004. System Boundary Selection in Life-Cycle Inventories Using Hybrid Approaches. *ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY*, 38(3), S. 657-664.
- Vidal, O., Goeffé, B. & Arndt, N., 2013. Metals for a low-carbon society. *Nature Geoscience*, Oktober, S. 894-896.

Wiley Information Services GmbH, 2016. *Netto-Stromerzeugung - Chemgapedia*.

[Online] Weblink:

[www.chemgapedia.de/vsengine/glossary/de/netto\\_00045stromerzeugung.glos.html](http://www.chemgapedia.de/vsengine/glossary/de/netto_00045stromerzeugung.glos.html)

[Zugriff am 1 Mai 2019].

## **Anhang**

### **A. Erstellen der Schadstoffbilanz**

#### **A.1. Schadstoffbilanz Biomasse**

Die Werte der Sachbilanz für Biomasse wurden einer Studie von Nitsch et al. (2004, S. 114) entnommen. Diese Aufstellung enthält acht unterschiedliche Varianten von Stromerzeugungstechniken aus Biomasse. Da die Strommische zur Berechnung der gesamten Emissionen lediglich einen Wert für Biomasse enthalten, müssen die Sachbilanzen der acht Erzeugungstechniken entsprechend zu einer einzelnen Sachbilanz für Biomasse kombiniert werden.

Eine parallel zu (Nitsch, et al., 2004) durchgeführte Studie listet den Mix sieben unterschiedlicher Erzeugungstechniken aus Biomasse auf (Fritsche, et al., 2004). Für die Modellierung eines Biomasse-Mix wurden Werte aus dem Jahr 2000 des Szenarios REFERENZ (Fritsche, et al., 2004, S. 215) ausgewählt. Dadurch soll eine Ähnlichkeit der Sachbilanz für Biomasse zu den Sachbilanzen der anderen Erzeugungstechniken erreicht werden, da alle bisher dargestellten Techniken auch den aktuellen Stand der jeweiligen Quellen wiedergeben und keine zukünftige Entwicklung abbilden. Die Technologien der beiden Studien wurden entsprechend der Zeilen folgender Tabelle verknüpft:

Technik des Biomasse-Mix (Fritsche, et al., 2004), Tabelle 143	Sachbilanz (Nitsch, et al., 2004, S. 114), Tabelle 3.10
Biogas Reststoffe (BR) Deponie-/ Klärgas/Schlamm (DKG) Biogas-Anbau (aus Energiepflanzen)	Biogas (BG)
Altholz (AH)	Altholz Dampfturbine (ADT)
Waldholz	Waldholz Dampfturbine Waldholz Mitverbrennung Waldholz BHKW
Stroh KUP <sup>8</sup> /Miscanthus	SRF <sup>9</sup> Dampfturbine SRF Mitverbrennung SRF KWK

Tabelle 12: Übersicht der Technologien zur Bildung der Sachbilanz Biomasse

Da Waldholz, Stroh und KUP/Miscanthus im Jahr 2000 nicht in den Biomasse-Mix einfließen, werden sie nicht in die Berechnung einbezogen. Die Zeilen 4 und 5 der Tabelle können somit ignoriert werden. Das gilt auch für Biogas-Anbau.

Im Folgenden werden die Werte der Sachbilanz aus (Nitsch, et al., 2004) mit den Anteilen ihrer in Tabelle A5 zugeordneten Technologie des Biomasse-Mix aus (Fritsche, et al., 2004, S. 215) zugeordnet.  $a_{i,j}$  sei als Anteil der Technologie  $i$  an der Gesamtproduktion in Jahr  $j$  definiert:

$$a_{i,j} = \frac{x_{i,j}}{\sum_i^n x_{i,j}} \quad (14)$$

Formel 14: Anteil der Produktion von Technologie  $i$  an der Gesamtproduktion des Jahres  $j$

Es sei  $E_{BM} = (BR, DKG, AH)$  die Menge der Techniken des Biomasse-Mix.  $A_{EBM}$  ist ein Vektor aus den drei Anteilen der jeweiligen Technik an der gesamten Stromproduktion durch Biomasse des Jahres 2000:  $a_{EBM,2000} = \frac{X_{EBM,2000}}{S_{EBM,2000}}$ . Die Sachbilanz mit Werten aus (Nitsch, et al., 2004, S. 114) ist definiert als  $SB_{BM}^* = (BG, BG, ADT)$  mit  $BG = (BG_{CO_2}, \dots; BG_K)'$  und  $ADT = (ADT_{CO_2}, \dots; ADT_K)'$ . Für  $q = \{PM10, Rn-222, C-14, IS, CU, K\}$

<sup>8</sup> KUP: Kurzumtriebsplantage

<sup>9</sup> SRF: short rotation forestry, entspricht KUP

können keine Werte ausgelesen werden und wird 0 eingetragen.  $SB_{BM}^{**} = SB_{BM}^* A_{EBM}$  und  $sb_{q,BM}^{**} = a_{EBM,2000} s_{BM}^*$  ist die Sachbilanz des Biomasse-Mix, welche in die Sachbilanz SB aller Erzeugungstechniken übernommen wird. Die Sachbilanz der Biomasse enthält folgende Werte:

CO <sub>2</sub> (g)	SO <sub>2</sub> (mg)	NO <sub>x</sub> (mg)	CH <sub>4</sub> (mg)	N <sub>2</sub> O (mg)	P (mg)	PM <sub>10</sub> (mg)	Rn-222 (kBq)	C-14 (Bq)	IS (10 <sup>-12</sup> PersSv)
15	356	741	-15357	-575	54	-	-	-	-

Bauxit (mg)	Eisen (mg)	Kupfer (mg)	Kalkstein (mg)
32,4	2767	0,0	0,0

Tabelle 13: Sachbilanz für Biomasse: Schadstoffe und entnommene Rohstoffe pro erzeugte kWh

## A.2. Weitere Ergänzungen der Sachbilanzen

Ziel weiter Ergänzungen ist es, eine Verzerrung durch eine unvollständig ausgefüllte Sachbilanz zu vermeiden. Würde für fehlende Werte eine Null eingetragen, würde dies zu einer Unterschätzung der Emissionen und betrachteten Rohstoffe des Strommix führen, welcher den größeren Anteil der ergänzten Technik aufweist. Daher werden mit den Ergänzungen dieses Abschnitts Werte gesucht, welche die Sachbilanz um ein möglichst geringes Maß verzerren und gleichzeitig durch eine plausible Herleitung anhand ähnlicher Erzeugungstechniken berechnet werden können.

Nitsch et. al (2004) machen lediglich Angaben zu den Emissionen von Partikeln bzw. Staub generell, jedoch nicht zu PM<sub>10</sub>. PM<sub>10</sub> bildet eine Unterkategorie von Staub (Donaldson, et al., 2001) und kann somit daraus abgeleitet werden. Auf Grund eines hohen Anteils an Biogas im Strommix für Biomasse werden große Ähnlichkeiten zwischen den beiden Erzeugungstechniken Biomasse und Erdgas angenommen. Unter der Annahme, dass PM<sub>10</sub> und Partikel für beide Techniken im gleichen Verhältnis stehen, wird folgende Berechnung durchgeführt:

$$sb_{BM,PM10}^{**} = \frac{sb_{EG,PM10}}{sb_{EG,P}} sb_{BM,P} \quad (15)$$

Formel 15: Berechnung der Sachbilanzwerte für Biomasse und PM10

Die Werte für Mineralöl werden entsprechend mit den Werten der Verbrennungstechniken Steinkohle, Braunkohle und Erdgas verglichen. Für beide Techniken liegen die Sachbilanzwerte für P in der gleichen Größenordnung, wohingegen zu den Werten aus Kohle relativ große Abweichungen bestehen. Daher wurde Formel 15 entsprechend auf die Werte von Mineralöl angewendet:

$$sb_{MO,PM10}^* = \frac{sb_{EG,PM10}}{sb_{EG,P}} sb_{MO,P} \quad (16)$$

*Formel 16: Berechnung der Sachbilanzwerte für Biomasse und PM10*

Seitens der Biomasse liegen bereits Daten für Eisen und Bauxit in der Quelle vor. Vergleicht man die entsprechenden Werte mit den Sachbilanzwerten der anderen Verbrennungstechniken Steinkohle, Braunkohle und Erdgas, gleichen die Werte am meisten den Werten von Steinkohle. Daher wurden die verbleibenden Daten aus den arithmetischen Mitteln der Relationen der Werte für Bauxit und Eisen für Steinkohle und Biomasse gebildet:

$$sb_{BM,CU}^{**} = \left( \left( \frac{sb_{BM,BX}}{sb_{SK,BX}} + \frac{sb_{BM,FE}}{sb_{SK,FE}} \right) / 2 \right) * sb_{SK,CU} \quad (17)$$

*Formel 17: Berechnung der Sachbilanzwerte für Biomasse und Kupfer*

$$sb_{BM,K}^{**} = \left( \left( \frac{sb_{BM,BX}}{sb_{SK,BX}} + \frac{sb_{BM,FE}}{sb_{SK,FE}} \right) / 2 \right) * sb_{SK,K} \quad (18)$$

*Formel 18: Berechnung der Sachbilanzwerte für Biomasse und Kalkstein*

Da hinsichtlich ionisierender Strahlung keine Vergleichswerte existieren, wurde für Biomasse der Durchschnitt aus den Sachbilanzwerten der anderen Verbrennungstechniken Steinkohle, Braunkohle und Erdgas gewählt:

$$sb_{BM,IS}^{**} = \frac{sb_{SK,IS} + sb_{BK,IS} + sb_{EG,IS}}{3} \quad (19)$$

*Formel 19: Berechnung der Sachbilanzwerte für Biomasse und ionisierende Strahlung*

Für Mineralöl existieren für ionisierende Strahlung und alle vier Rohstoffe keine Vergleichswerte. Daher wurden auch hier die Durchschnittswerte der drei Verbrennungstechniken Steinkohle, Braunkohle und Erdgase verwendet:

$$sb_{MO,q}^* = \frac{sb_{SK,q} + sb_{BK,q} + sb_{EG,q}}{3} \text{ für } q = \{IS, BX, FE, CU, K\} \quad (20)$$

*Formel 20: Berechnung der Sachbilanzwerte für Mineralöl und IS, BX, FE, CU und K*

Für Radon-222 und Kohlenstoff C-14 wurden keine Werte ermittelt, da diese ausschließlich für Kernkraft vorlagen.

## B. Berechnung des Strommix 2015-2050

Im Folgenden wird die Vorgehensweise zur Auswahl von Szenarien, welche den Strommix 2015-2050 für das Szenario EW und das Szenario BAU beschreiben, erläutert.

Die Quellen, welche während der Recherche für einen Strommix des Szenarios EW ausgeschlossen wurden, sind in Tabelle 14 aufgelistet. Es wird jedoch nur jeweils ein Ausschlussgrund pro Quelle aufgelistet.

Quelle	Grund des Ausschlusses
(Beer, et al., 2009)	Kohle und Kernkraft 2050 in Strommix enthalten
(Blesl, et al., 2011)	Kohle und Kernkraft 2050 in Strommix enthalten
(Henning & Palzer, 2012)	Mangelhafte Datengrundlage
(Henning & Palzer, 2013)	Kohle ist nach 2038 in Strommix enthalten
(Kirchner, et al., 2009)	Kohle ist nach 2038 in Strommix enthalten
(Klaus, et al., 2010)	Mangelhafte Datengrundlage
(Nagl, et al., 2011)	Kohle ist nach 2038 in Strommix enthalten
(Nitsch, et al., 2009)	Kohle ist nach 2038 in Strommix enthalten
(Nitsch, et al., 2012)	Kohle ist nach 2038 in Strommix enthalten
(Repenning, et al., 2014)	Kernkraft ist nach 2024 in Strommix enthalten
(Schlesinger, et al., 2010)	Kohle ist nach 2038 in Strommix enthalten
(Schlesinger, et al., 2014)	Kohle ist nach 2038 in Strommix enthalten

*Tabelle 14: Szenario zur Abbildung der Energiewende - Übersicht der ausgeschlossenen Studien*



Folgende Szenarien wurden für einen genauen Vergleich ausgewählt:

1. (Barzantny, et al., 2009): Greenpeace-Szenario
2. (Matthes, et al., 2017):
  - 2.1. Schnellausstiegs-Szenario
  - 2.2. Laufzeitbegrenzungs-Szenario für 20 Jahre mit Ausbau der erneuerbaren Energien nach EEG 2017
  - 2.3. Laufzeitbegrenzungs-Szenario für 20 Jahre mit ambitioniertem Ausbau der erneuerbaren Energien
  - 2.4. Transformations-Szenario mit ambitioniertem Ausbau der erneuerbaren Energien
3. (Matthes, et al., 2018):
  - 3.1. Energiewende-Referenz
  - 3.2. Fokus Solar

Die Szenarien unterscheiden sich in folgenden wichtigen Punkten:

	Entstehungsjahr der Studie	Beginn der Prognose	Darstellung der Stromerzeugung
Szenario 1	2009	2008	Endenergie
Szenarien 2.1 bis 3.2	2017 & 2018	2016	Stromaufkommen

*Tabelle 15: Wesentliche Unterschiede der Prognoseszenarien*

## **B.1. Aufbereitung zusammengetragener Messdaten**

Online bereitgestellte Daten des BMWi (BMWi, 2019) dienen als Grundlage zur Überprüfung der Prognosewerte und wurden durch vorläufige Daten der Bruttostromerzeugung (BMWi, 2019) des Jahres 2018 ergänzt. Es lagen vereinzelt kleine Abweichungen in den Messdaten vor, welche sich auf unterschiedliche Messzeitpunkte und Schwankungen hinsichtlich der An- oder Entkoppelung von Einspeisern zurückführen lassen (Lüers, et al., 2017). Die meisten dieser Abweichungen sind geringer als ein GW bzw. eine GW/h und sollten keinen großen Einfluss auf die Ergebnisse haben. Um einen möglichst unverfälschten Vergleich der Szenarien zu erhalten, wurden die

Erzeugungsmethoden umstrukturiert, sodass in den Ausgangsjahren der Prognoseszenarien (2007 und 2015) die Differenz zwischen den Werten der Szenarien und den Messdaten möglichst gering ausfällt. Die Umstrukturierung umfasste folgende Schritte:

1. Verwendung des regenerativen Anteils der Wasserkraft<sup>10</sup> ohne den künstlichen Zufluss von Pumpspeicherwerken
2. Addition von Bioenergie und Müll<sup>11</sup>

Da sich die Messung der Emissionen auf die Erzeugungstechniken Steinkohle, Braunkohle, Mineralöl, Erdgas, Kernkraft, Wasserkraft, Windkraft, Biomasse und Photovoltaik beschränkt, wurden auch nur diese Technologien für den Vergleich der Szenarien herangezogen. Die entsprechenden Messdaten sind in Excel unter „Messdaten angepasst“ („Bruttostromerzeugung“/P2 und „Installierte Leistung“/O2) aufgeführt.

Zwischen den Szenarien 1 und 2.1-3.2 gibt es, bedingt durch unterschiedliche Messgrößen, Abweichungen bei der Berechnung des standardisierten Strommix.

## **B.2. Standardisierung des Greenpeace-Szenarios**

Die Angaben des Greenpeace-Szenarios werden in Endenergie ausgedrückt. Per Definition ist Endenergie die Energie, welche Verbraucher abnehmen (Paschotta, 2018). Die Bruttostromerzeugung kann durch Addition von Endenergie, Umwandlungs- und Übertragungsverlusten gewonnen werden. Die Werte zu den Verlusten 1993-2015 sind in (BMWi, 2019; AGEB, 2019) aufgeführt und unterliegen nur geringen Schwankungen. Die Daten für das Jahr 2018 wurden durch folgende Berechnung ergänzt.

$$v_{2018} = v_{2017} + \frac{v_{2017} - v_{2007}}{2017 - 2007} \quad (21)$$

*Formel 21: Lineare Fortschreibung der Verluste der Stromerzeugung*

---

<sup>10</sup> (BMWi, 2019), Tabellenblatt 21, Zeile 38

<sup>11</sup> ein Vergleich von (AGEB (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V.), 2019) und (BMWi, 2019) zeigt, dass es sich um den biogenen Anteil des Mülls handelt

Da keine exakten Daten zur Verteilung der Verluste innerhalb der unterschiedlichen Erzeugungstechniken vorlagen, wurden die Verluste für jedes Jahr separat entsprechend des Anteils der jeweiligen Erzeugungstechnik an der Stromerzeugung verteilt. Sei  $s_j^1$  die Summe der Endenergie in Jahr  $j$  und  $x_{i,j}^1$  ein entsprechender Wert der Endenergie aus dem Greenpeace-Szenario. Die standardisierte Matrix  $X_1^*$  ist wie folgt definiert:

$$X^{*1} = \begin{bmatrix} x_{SK,2015}^{*1} & \cdots & x_{SK,2018}^{*1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{PV,2015}^{*1} & \cdots & x_{PV,2018}^{*1} \end{bmatrix} \text{ mit } x_{i,j}^* = (\widehat{x}_{i,j}^1 + v_j * \frac{\widehat{x}_{i,j}^1}{s_j^1}) \quad (22)$$

Formel 22: Standardisierter Strommix (Greenpeace-Szenario)

### B.3. Stromerzeugung der Szenarien 2.1 bis 3.2 (Modelle „Zukunft Stromsystem“)

Die Modelle „Zukunft Stromsystem“ verwenden die Messgröße Stromaufkommen. Die Nettostromimporte für die Jahre 2016-2018 wurden gemäß Formel (21) ergänzt. Ähnlich wie im für das Greenpeace-Szenario wurden die Nettostromimporte entsprechend des Beitrags zur gesamten Erzeugung auf die einzelnen Technologien aufgeteilt. Außerdem werden die Werte für Windkraft an Land und Windkraft auf See zusammengefasst. Es sind  $n_j$  als die Nettoimporte und  $v_j$  als die Verluste des jeweiligen Jahres definiert. Die Differenz der beiden Werte wird zum Stromaufkommen addiert, um die Bruttostromerzeugung zu erhalten (Wiley Information Services GmbH, 2016).  $x_{i,j}^{ZS}$  ist ein entsprechender Wert des Stromaufkommens aus einem der Zukunft Stromsystem-Szenarios  $SZ \in \{2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 3.1, 3.2\}$ .  $s_j^{ZS}$  ist die Summe des Stromaufkommens in Jahr  $j$ . Die standardisierte Matrix  $X_{ZS}^*$  ist wie folgt definiert:

$$X^{*SZ} = \begin{bmatrix} x_{SK,2015}^{*SZ} & \cdots & x_{SK,2018}^{*SZ} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{PV,2015}^{*SZ} & \cdots & x_{PV,2018}^{*SZ} \end{bmatrix} \text{ mit } x_{i,j}^{*SZ} = \begin{cases} \left( \widehat{x_{i,j}^{SZ}} + (v_j - n_j) * \frac{\widehat{x_{i,j}^{SZ}}}{s_j^{SZ}} \right), i \in \{SK, BK, MO, EG, WAK, KK, BM, PV\} \\ \left( \widehat{x_{WKL,j}^{SZ}} + (v_j - n_j) * \frac{\widehat{x_{WKL,j}^{SZ}}}{s_j} \right) + \left( \widehat{x_{WKS,j}^{SZ}} + (v_j - n_j) * \frac{\widehat{x_{WKS,j}^{SZ}}}{s_j^{SZ}} \right), i = WK \end{cases} \quad (23)$$

Formel 23: Standardisierter Strommix (Stromerzeugung, Zukunft Stromsystem-Szenario)

#### B.4. Anpassung des Szenarios Energiewende-Transformation

	Entstehungsjahr der Studie	Beginn der Prognose	Darstellung der Stromerzeugung
Energiewende- Transformation	2017	2015	Nettostromaufkommen
Referenzszenario ohne CCS	2009	2005	Nettostromerzeugung

Tabelle 16: Wesentliche Unterschiede der Prognoseszenarien für das EW und BAU

Da die Nettostromerzeugung als Summe aus Nettostromaufkommen und Stromimporten definiert ist (Wiley Information Services GmbH, 2016), werden zu den Werten des Szenarios Energiewende-Transformation die Nettostromimporte addiert. Es seien  $n_{i,j}^{2,4}$  die Nettostromimporte in Jahr  $j$ , und  $x_{i,j}^{EWZ}$  ein entsprechender Wert des Stromaufkommens des Szenarios Transformation:

$$X^{*EW} = \begin{bmatrix} x_{SK,2015}^{EW} & \cdots & x_{SK,2050}^{EW} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{PV,2015}^{EW} & \cdots & x_{PV,2050}^{EW} \end{bmatrix} \text{ mit } x_{i,j}^{EW} = \widehat{x_{i,j}^{3,1}} - n_{i,j}^{2,4} * \frac{\widehat{x_{i,j}^{3,1}}}{s_j^{3,1}} \quad (24)$$

Formel 24: Berechnung der Nettostromerzeugung (Energiewende-Szenario)

## C. Differenzierte Betrachtung der Emissionen und benötigten Rohstoffe

### C.1. Szenario EW und BAU

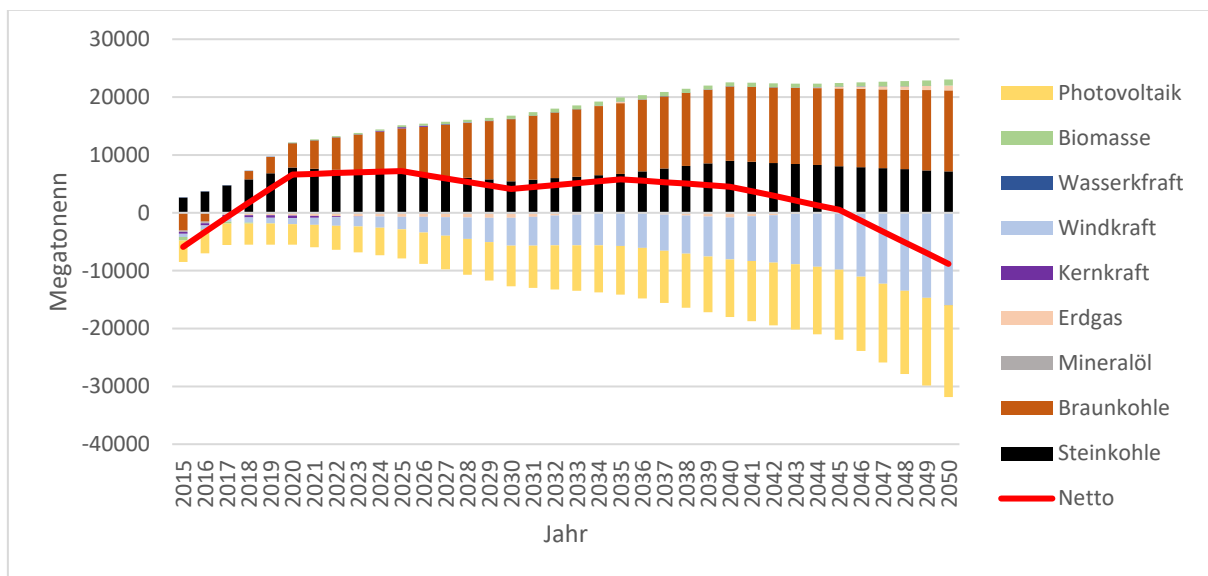


Abbildung 17: PM10-Reduktion durch Szenario EW

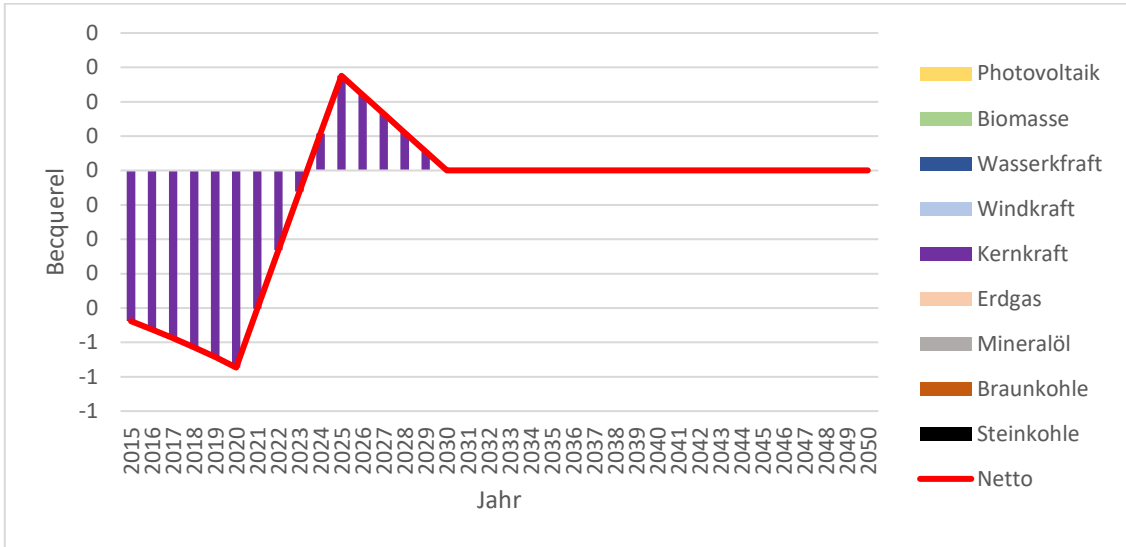


Abbildung 18: Rn-222-Reduktion durch Szenario EW

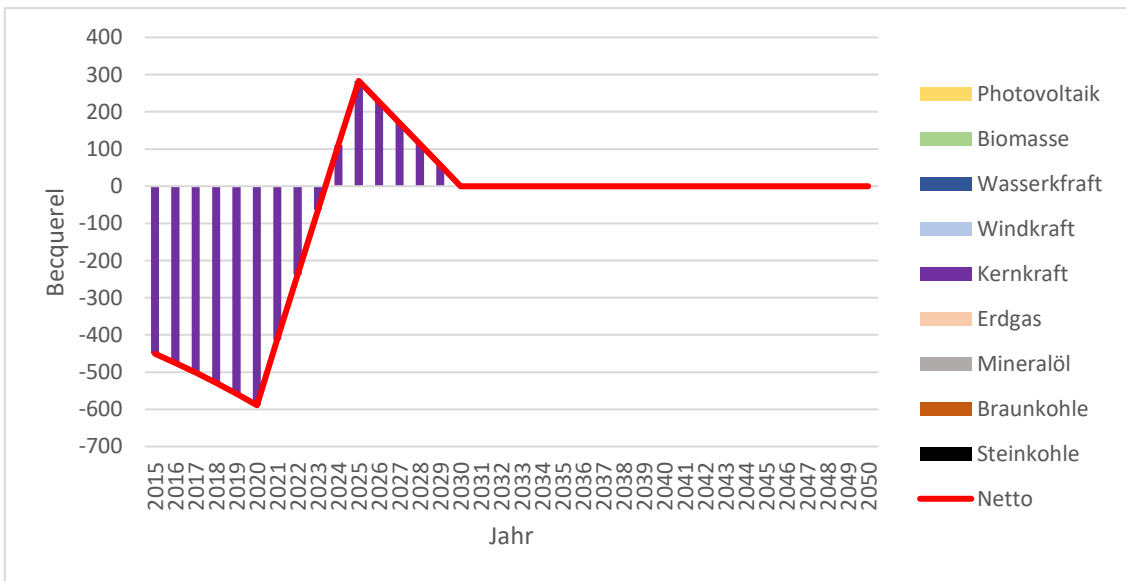


Abbildung 19: C14-Reduktion durch Szenario EW

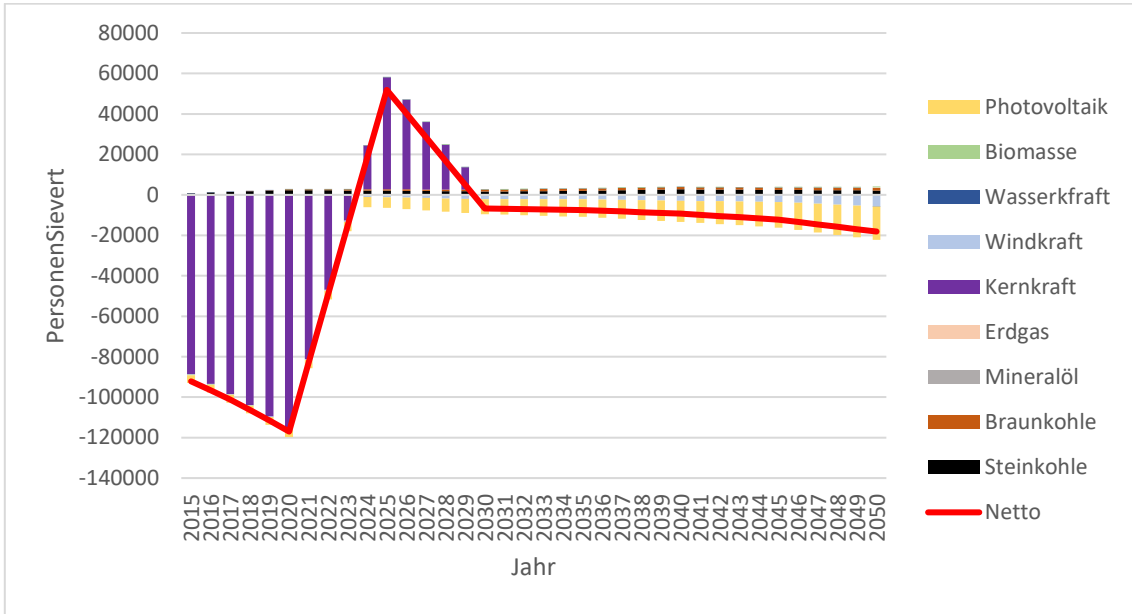


Abbildung 20: IS-Reduktion durch Szenario EW

## C.2. Szenario $\widetilde{EW}$ und BAU

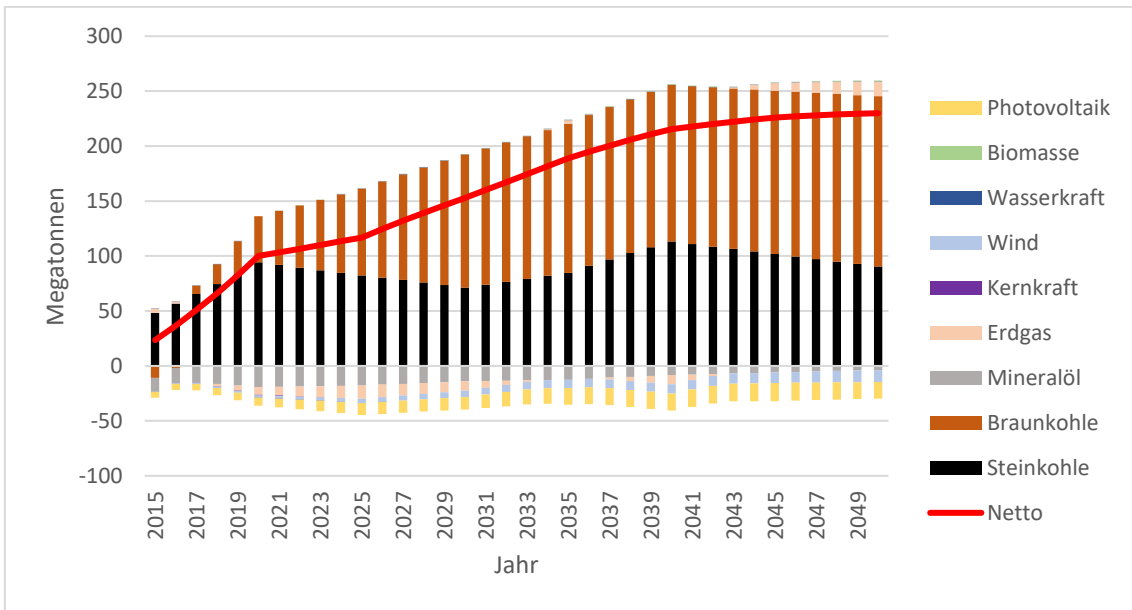


Abbildung 21: CO<sub>2</sub>-Reduktion durch Szenario  $\widetilde{EW}$

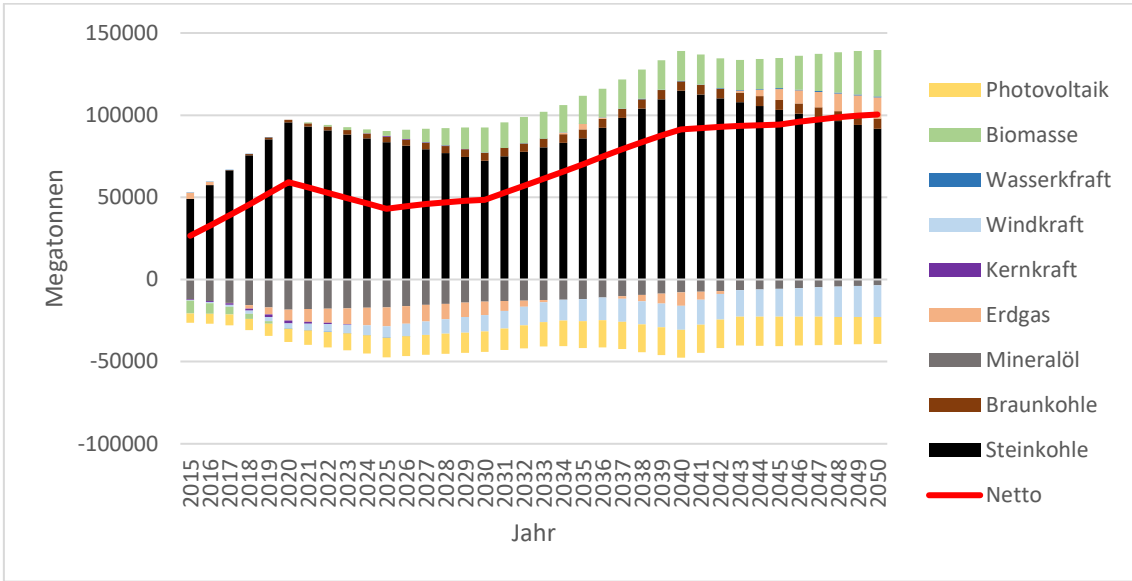


Abbildung 22: NO<sub>x</sub>-Reduktion durch Szenario  $\widehat{EW}$

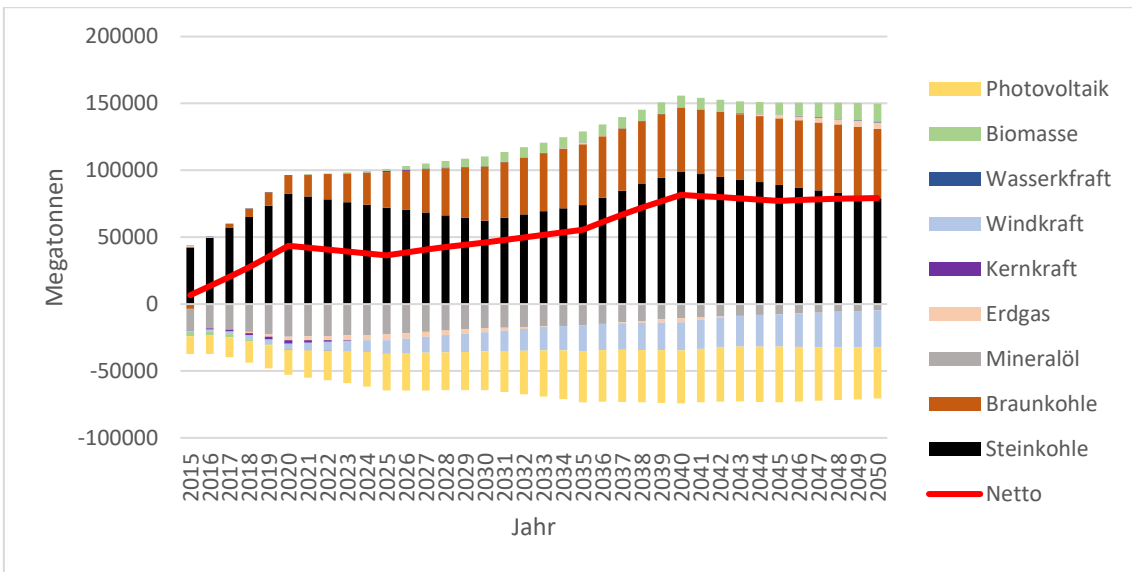


Abbildung 23: SO<sub>2</sub>-Reduktion durch Szenario  $\widehat{EW}$



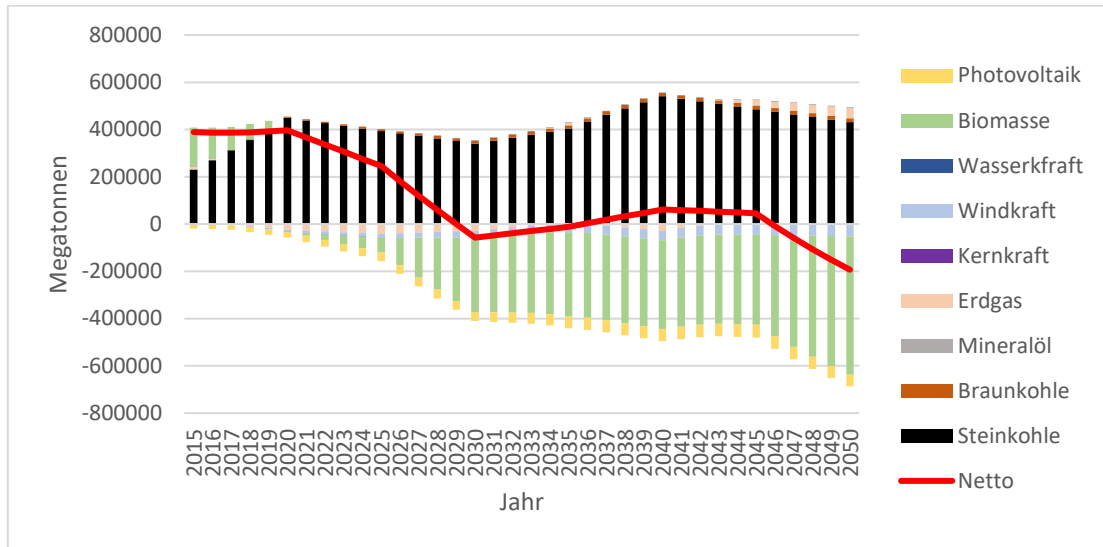


Abbildung 24: CH<sub>4</sub>-Reduktion durch Szenario  $\bar{E}\bar{W}$

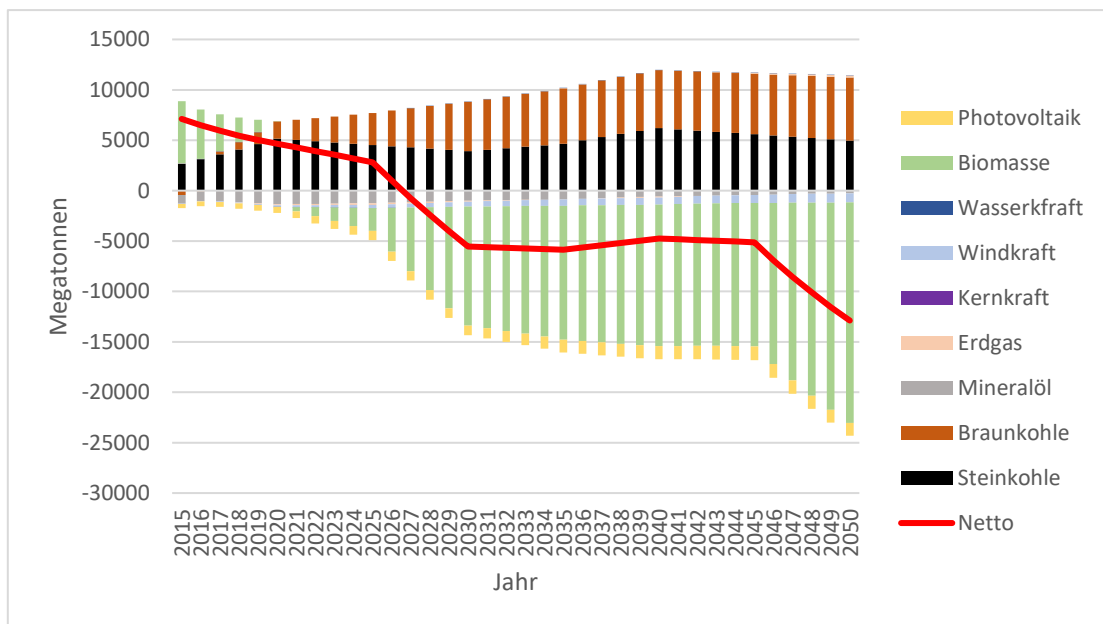


Abbildung 25: N<sub>2</sub>O-Reduktion durch Szenario  $\bar{E}\bar{W}$

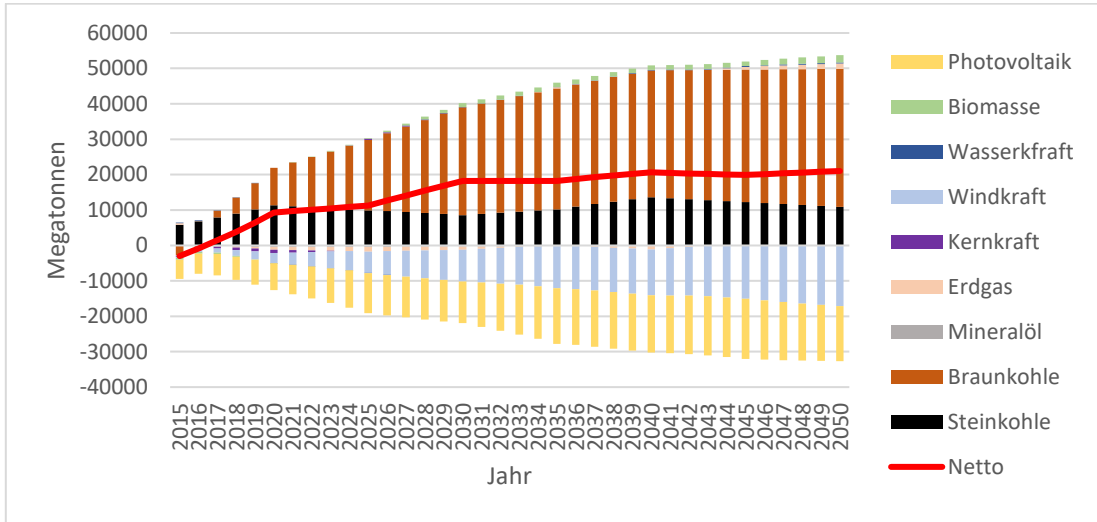


Abbildung 26: Partikel-Reduktion durch Szenario  $\tilde{E}\tilde{W}$

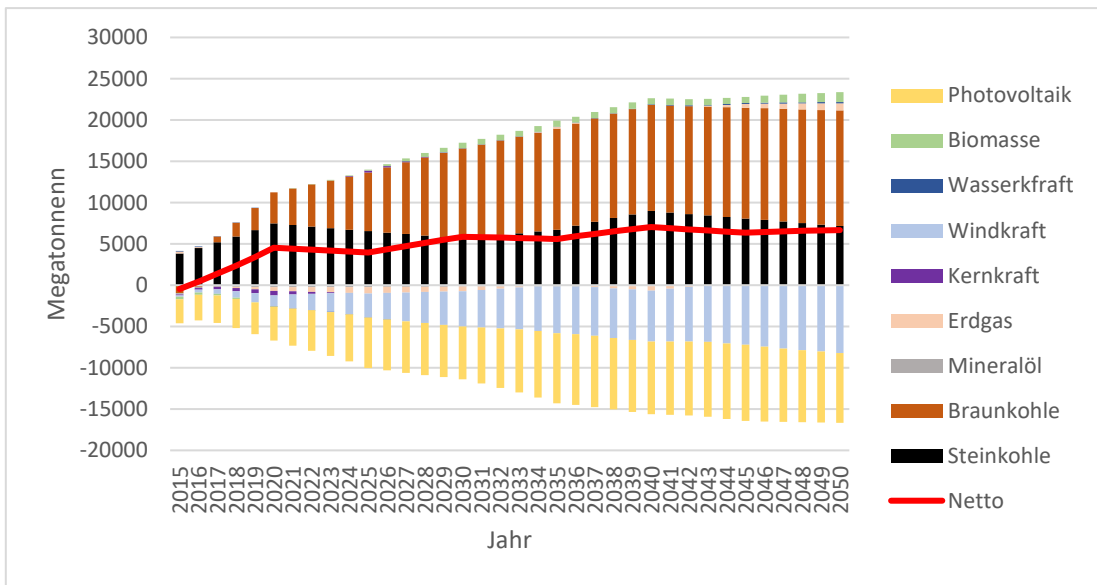


Abbildung 27:  $PM_{10}$ -Reduktion durch Szenario  $\tilde{E}\tilde{W}$

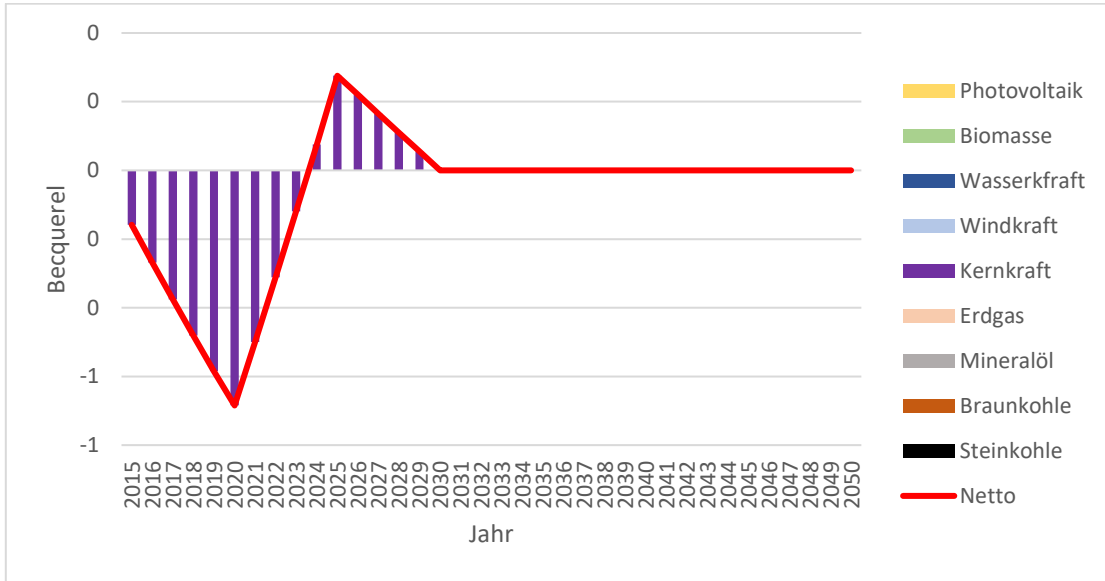


Abbildung 28: Rn-222-Reduktion durch Szenario EW

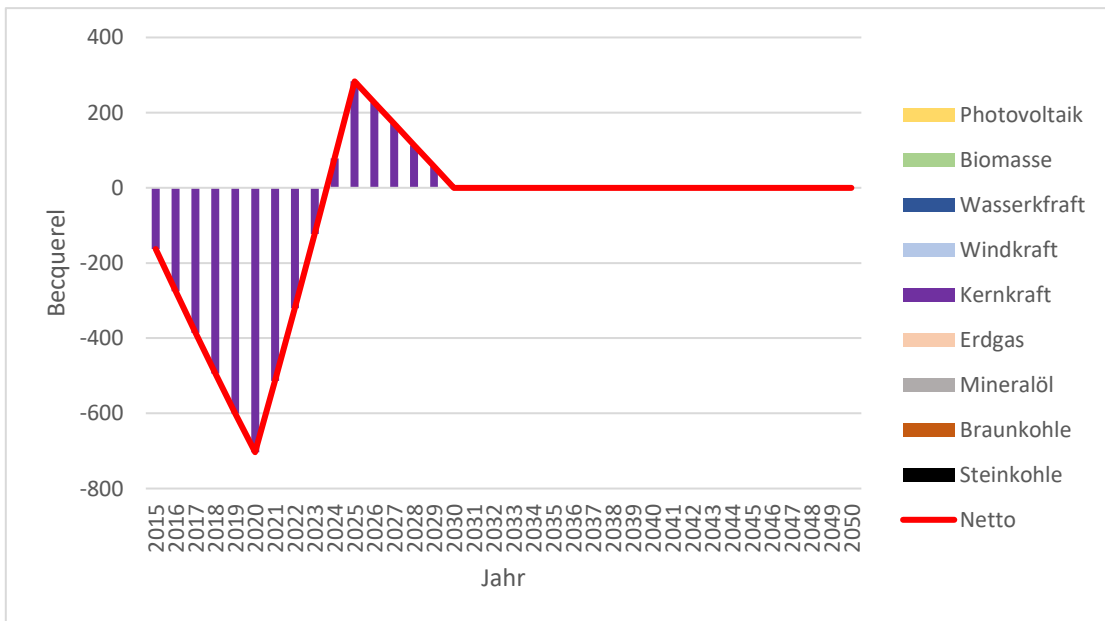


Abbildung 29: C-14-Reduktion durch Szenario EW

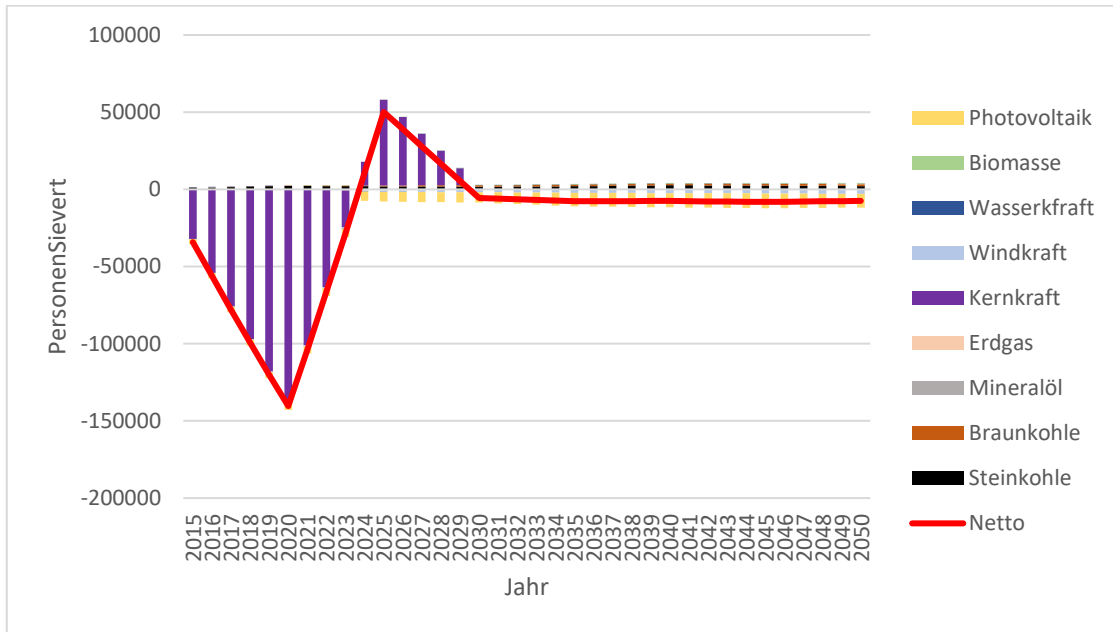


Abbildung 30: IS-Reduktion durch Szenario  $\widetilde{EW}$

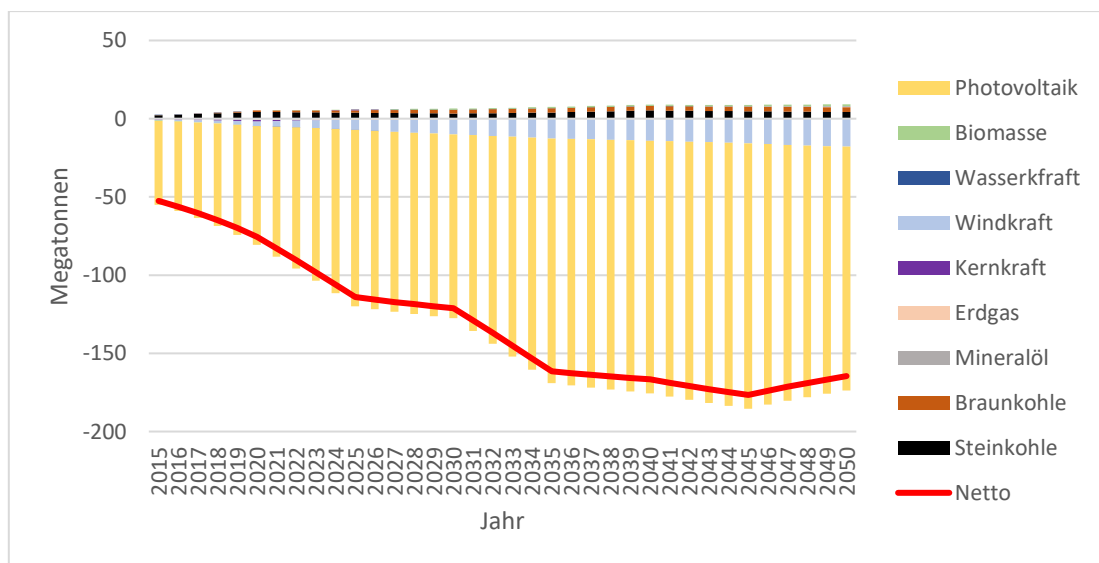


Abbildung 31: BX-Einsparung durch Szenario  $\widetilde{EW}$

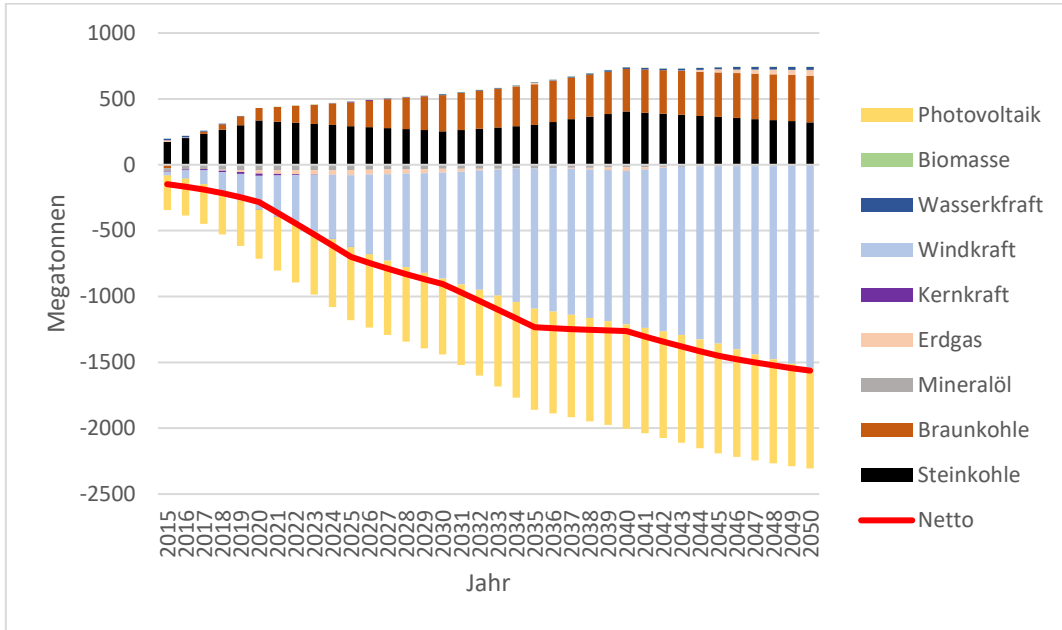


Abbildung 32: FE-Einsparung durch Szenario  $\bar{E}\bar{W}$

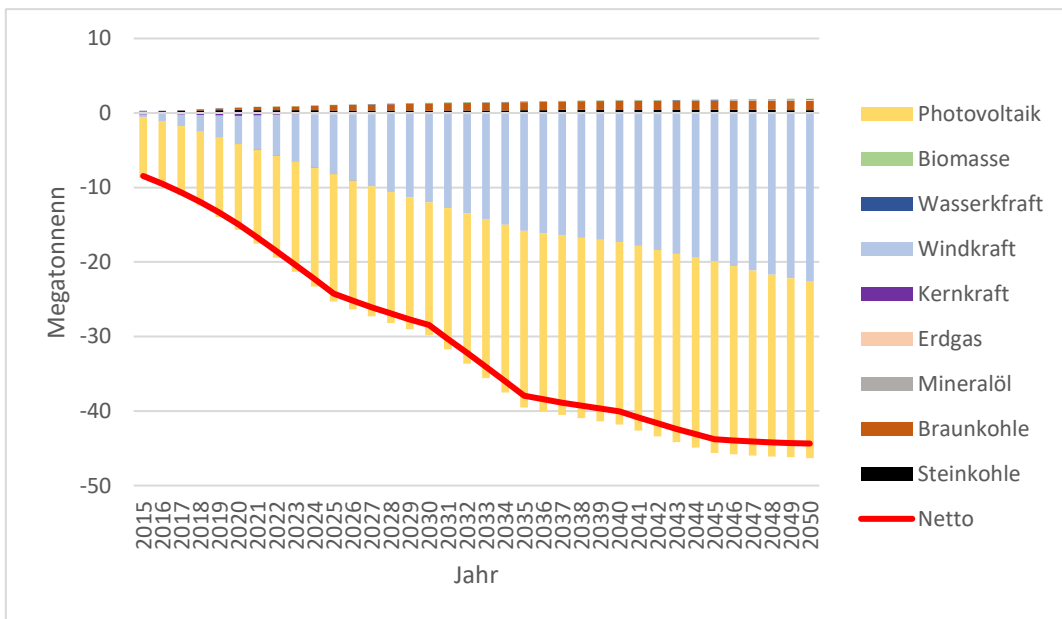


Abbildung 33: Cu-Einsparung durch Szenario  $\bar{E}\bar{W}$

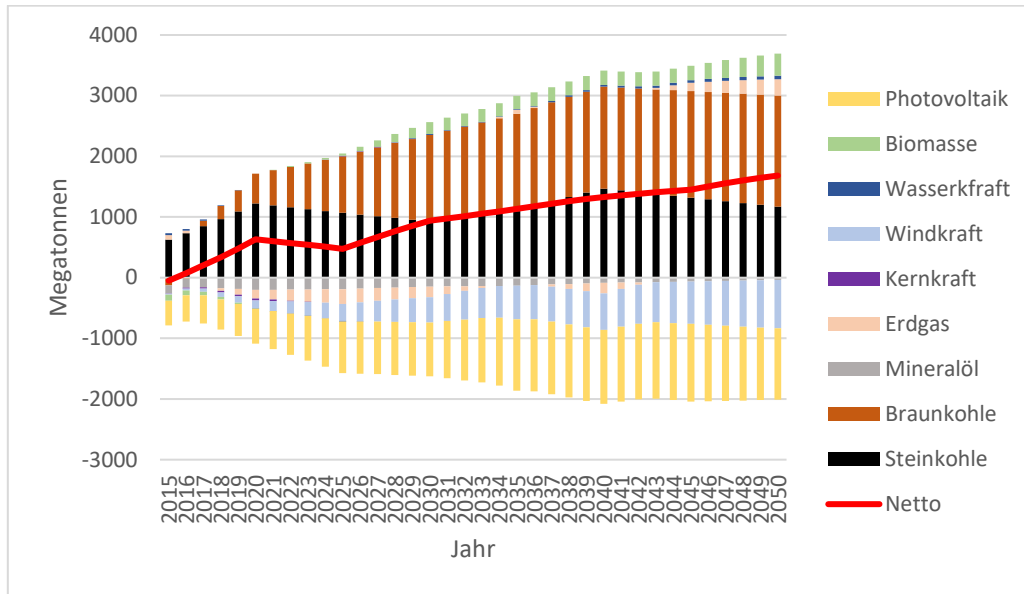


Abbildung 34: K-Einsparung durch Szenario  $\tilde{E}\tilde{W}$

## D. Sensitivitätsanalyse

Erzeugungstechnik	Vorteil EW	Vorteil BAU
Steinkohle	Dampfkraftwerk 43% Dampfkraftwerk 43% POL	GuD Kraftwerk 48,5% GuD Kraftwerk 43% USA
Braunkohle	DKW 43%	GuD Kraftwerk 50,5%
Mineralöl	Mineralöl	Mineralöl
Erdgas	Erdgas Westeuropa	Erdgas GUS
Kernkraft	EPR <sup>12</sup> direkte Endlagerung	DWR mit WAA
Windkraft	1,5 MW, 5,5 m/s	270 kW, 5,5 m/s
Wasserkraft	2,2 MW Laufwasser	500 kW Laufwasser
Biomasse	Biogas	SRF <sup>13</sup> Mitverbrennung
Photovoltaik	5 kW multikristallin 1 MW monokristallin 5 kW multikristallin	5 kW amorph 1 MW amorph 5 kW monokristallin

Tabelle 17: Sensitivitätsanalyse der Sachbilanz - Zuordnung der Kraftwerksvarianten

<sup>12</sup> EPR = European Pressurized Water Reactor

<sup>13</sup> SRF: short rotation forestry (Kurzumtrieb)