

Beitrag der Kreislaufwirtschaft zur Energiewende

Klimaschutzpotenziale auch unter geänder-
ten Rahmenbedingungen optimal nutzen

AUFTRAGGEBER: BDE BUNDESVERBAND DER DEUTSCHEN
ENTSORGUNG-, WASSER- UND ROHSTOFF-
WIRTSCHAFT E.V. [WWW.BDE.DE](http://www.bde.de)

ÖKO-INSTITUT E.V. [HTTP://WWW.OEKO.DE](http://www.oeko.de)

GÜNTER DEHOUST
RALPH O. HARTHAN
DR. HARTMUT STAHL
HAUKE HERMANN
DR. FELIX CHR. MATTHES
ALEXANDRA MÖCK

BERLIN, 15. JANUAR 2014

Öko-Institut e.V.
Geschäftsstelle Freiburg
Postfach 1771
D-79017 Freiburg
Hausadresse
Merzhauser Str. 173
D-79100 Freiburg
Tel. +49 (0) 761 – 45 295-0
Fax +49 (0) 761 – 4 52 95 288

Büro Darmstadt
Rheinstraße 95
D-64295 Darmstadt
Tel. +49 (0) 6151 – 81 91 - 0
Fax +49 (0) 6151 – 81 91 133

Büro Berlin
Schicklerstraße 5-7
D-10179 Berlin
Tel. +49 (0) 30 – 4050 85-0
Fax +49 (0) 30 – 4050 85-388

Inhaltsverzeichnis

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	4
TABELLENVERZEICHNIS	6
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	7
1 EINLEITUNG	9
2 EINFLUSS DER ENERGIEWENDE AUF DIE KREISLAUFWIRTSCHAFT.....	10
2.1 EINLEITUNG	10
2.2 DIE ROLLE DER BIOMASSE.....	12
2.3 REFERENZSYSTEME	13
2.3.1 STROMERZEUGUNG.....	13
2.3.2 WÄRMEERZEUGUNG.....	17
2.4 BEREITSTELLUNG VON RESERVEKAPAZITÄTEN	18
2.5 EMISSIONEN DER STROMERZEUGUNG UND LANGFRISTIGE ZIELE	21
3 ANFORDERUNGEN AN DIE KREISLAUFWIRTSCHAFT UND IHRE POTENZIALE.....	23
3.1 STEIGERUNG DER RECYCLINGANTEILE	23
3.1.1 SITUATION DES RECYCLINGS BEI KUNSTSTOFFEN.....	23
3.1.2 VERWERTUNG GEMISCHTER GEWERBEABFÄLLE	29
3.1.3 GETRENNTE ERFASSUNG VON ELEKTROKLEINGERÄTEN	31
3.2 OPTIMIERUNG DES UMGANGS MIT ABFALLBIOMASSE	31
3.3 FLEXIBILISIERUNG DER ENERGIEBEITRÄGE AUS DER KREISLAUFWIRTSCHAFT	33
4 KLIMABILANZ DER ZUKÜNFTIGEN POTENZIALE IM VERGLEICH ZU 2011	36
4.1 METHODIK	36
4.2 ABFALLSTRÖME.....	37
4.3 SACHBILANZDATEN.....	39

4.4	GEGENÜBERSTELLUNG DER ERGEBNISSE.....	39
4.4.1	LENKUNG DER STOFFFLÜSSE	39
4.4.2	STROMBEREITSTELLUNG	41
4.4.3	SPEZIFISCHE EMISSIONSFAKTOREN	42
4.4.4	BEITRAG ZUR REDUZIERUNG VON TREIBHAUSGASEMISSIONEN	44
5	ANREIZE UND MAßNAHMEN	48
5.1	STEIGERUNG DER RECYCLINGANTEILE	48
5.2	OPTIMIERUNG DES UMGANGS MIT ABFALLBIOMASSE	50
5.3	FLEXIBILISIERUNG DER ENERGIEBEITRÄGE AUS DER KREISLAUFWIRTSCHAFT	50
6	ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN	52
7	LITERATURVERZEICHNIS	55
	ANHANG.....	61

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1	Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung; [Quellen: AG Energiebilanzen, Bundesregierung 2011, CDU/CSU/SPD 2013, Darstellung Öko-Institut]	11
Abbildung 2.2	Strommix der inländischen Stromerzeugung [Quelle: Aktuelle Modellierungsarbeiten des Öko-Instituts 2013]	14
Abbildung 2.3	Durchschnittliche CO ₂ -Emissionen der inländischen Stromerzeugung [Quelle: Aktuelle Modellierungsarbeiten des Öko-Instituts 2013]	16
Abbildung 2.4	Spezifische CO ₂ -Emissionen der Wärmeerzeugung [Quelle: Annahmen und Berechnungen Öko-Institut]	18
Abbildung 2.5	Residuallast bei einem verstärkten Ausbau erneuerbarer Energien [Quelle: Harthan, Seebach, Böttger, Bruckner 2012]	19
Abbildung 2.6	Stromerzeugung in Biomasse- und Braunkohlekraftwerken im Jahr 2010 (Quelle: 50 Hertz Transmission, EEX, Annahmen und Berechnungen Öko-Institut)	20
Abbildung 3.1	Materialstrom für Kunststoffabfälle in Deutschland im Jahr 2007 [INTECUS 2012]	24
Abbildung 3.2	Vergleich der Klimaauswirkungen der energetischen Verwertung von Kunststoff in einer durchschnittlichen MVA heute (2010/2011), 2030 und 2050 bei sinkenden Stromgutschriften aufgrund der beschriebenen Veränderung der Strommixe	27
Abbildung 3.3	Vergleich der Klimaauswirkungen der energetischen Verwertung von Kunststoff in sehr effizienten MVAn und EBS-HKWs heute (2010/2011), 2030 und 2050	28
Abbildung 3.4	Vergleich der Klimabilanz des Recycling von Kunststofffolien unter den Rahmenbedingungen eines sich wandelnden Energiemarktes	29
Abbildung 3.5	Spezifische THG-EF für die Bioabfallverwertung (Biotonneninhalte) mit und ohne Berücksichtigung der C-Senke, aufgeschlüsselt nach wichtigen Beiträgen. [Öko-Institut/IFEU 2010]	32
Abbildung 3.6	Vergleich der Klimaauswirkungen der energetischen Verwertung von Restmüll in einer durchschnittlichen MVA heute (2010/2011), 2030 und 2050	34
Abbildung 3.7	Vergleich der Klimaauswirkungen der energetischen Verwertung von Kunststoff in EBS-HKWs heute (2010/2011), 2030 und 2050	35

Abbildung 4.1	Stoffflüsse in den Status Quo Szenarien 2011, 2030 und 2050 (oben) sowie in den optimierten Szenarien 2030 und 2050 (unten)	40
Abbildung 4.2	Gegenüberstellung der Gesamtergebnisse für GWP 2011 (links), 2030 Status Quo (SQ - Mitte) und 2030 optimiert (opt. - rechts), mit Angabe der wichtigsten Einzelbeiträge.....	45
Abbildung 4.3	Gegenüberstellung der Gesamtergebnisse für GWP 2011 (links), 2050 Status Quo (SQ - Mitte) und 2050 optimiert (opt. - rechts), mit Angabe der wichtigsten Einzelbeiträge.....	47

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1	Stromerzeugung im Klimaschutzszenario 80 (KS 80) und im Klimaschutzszenario 90 (KS 90), Erreichung einer Treibhausgas-Minderung von 80 % bzw. 90% bis 2050 (gegenüber 1990).....	15
Tabelle 3.1	Übersicht der wichtigsten Verwertungswege für Kunststoffabfälle im Jahr 2007 nach [INTECUS, 2012]	25
Tabelle 4.1	Abfallströme für 2011/2030/2050 (Status Quo) und dem optimierten Szenario für 2030 und 2050	38
Tabelle 4.2	Bereitgestellte Sekundärrohstoffmengen	41
Tabelle 4.3	Spezifische Emissionsfaktoren für GWP für 2011, 2030, 2050.....	43
Tabelle 4.4	Gesamtergebnis GWP 2011 und 2030 und Differenzen zu 2011, mit Angabe der wichtigsten Einzelbeiträge.....	44
Tabelle 4.5	Gesamtergebnis GWP 2011 und 2050 und Differenzen zu 2011, mit Angabe der wichtigsten Einzelbeiträge.....	46

Abkürzungsverzeichnis

APME	Association of P lastics M anufacturers in E urope - Plastics Europe - www.plasticseurope.de/
AS	Abfallschlüssel
BA	Bioabfall
BAV	Bundesverband der Altholzaufbereiter und -verwerter e.V. www.altholzverband.de
BDE	Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Rohstoffwirtschaft e.V. www.bde.de
BGK	Bundesgütegemeinschaft Kompost - www.kompost.de
BHKW	Blockheizkraftwerk
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit – www.bmu.de - seit 2014 BMUB (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit)
C	Fossiler Anteil am Kohlenstoffgehalt
Cges	Gesamter Kohlenstoff
Creg	Regenerativer biogener Anteil am Kohlenstoffgehalt
CH ₄	Methan
CO ₂	Kohlendioxid
CO ₂ eq	CO ₂ -Äquivalente
EAV	Europäisches Abfallschlüsselverzeichnis
EBS	Ersatzbrennstoffe
EBS-HKW	Ersatzbrennstoff-Heizkraftwerk
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EEWärmeG	Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz
EF	Emissionsfaktor
E-Gerät	Elektrogroßgerät
el Nettowirkungsgrad	elektrischer Nettowirkungsgrad
eta	Wirkungsgrad
FEFCO	European Corrugated Packaging Association in Brussels www.fefco.org
Fe-Metalle	Eisenmetalle
FKN	Flüssigkeitskarton
FS	Frischsubstanz
GA	Grünabfall
GDA	Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V. www.aluinfo.de
GEMIS	Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme, www.gemis.de
GewAbfV	Gewerbeabfallverordnung
GR	Gärrest
GWP	Global Warming Potential (Treibhausgaspotenzial)
HKW	Heizkraftwerk
HM	Hausmüll

HMG	Hausmüllähnlicher Gewerbeabfall
Holz-HKW	Holz-Heizkraftwerk
Hu	Unterer Heizwert
hwr	Heizwertreich
iLUC	indirect land use change (indirekte Landnutzungsänderung)
IPCC	Intergovernmental Panel of Climate Change www.ipcc.ch
KEA	Kumulierter Energieaufwand
kJ	Kilojoule
KW	Kraftwerk
kWh _{el}	Kilowattstunde elektrisch
kWh _{th}	Kilowattstunde thermisch
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LVP	Leichtverpackungen
LW	Landwirtschaft
M(B)An	Sammelbegriff für MA, MBA, MBS, MPS
MA	Mechanische Abfallaufbereitungsanlage
MBA	Mechanisch-Biologische Abfallbehandlungsanlage
MBS	Mechanisch-Biologische Stabilisierungsanlage
Mg	Megagramm (= 1.000 kg = 1.000.000 g)
MKS	Mischkunststoffe
MPS	Mechanisch-Physikalische Abfallbehandlungsanlage
MVA	Müllverbrennungsanlage
N ₂ O	Lachgas
NE-Metalle	Nichteisenmetalle
PE	Polyethylen
PET	Polyethylenterephthalat
PP	Polypropylen
PPK	Papier/Pappe/Karton
SML	Sammlung
StNVP	Stoffgleiche Nichtverpackungen
th Nettowirkungsgrad	Thermischer Nettowirkungsgrad
THG	Treibhausgas
THGE	Treibhausgasemissionen
TSP	Transport
UBA	Umweltbundesamt – www.umweltbundesamt.de
UFO-Plan	Umweltforschungsplan

1 Einleitung

Die Kreislaufwirtschaft leistet seit Jahren einen bedeutenden Beitrag zum Klima- und Ressourcenschutz. Den Hauptanteil an der Einsparung klimarelevanter Gase, insbesondere der Methanemissionen, hatte die Abkehr von der Deponierung unbehandelter Abfälle. Aber auch das Recycling von trockenen Wertstoffen, die Bioabfallverwertung und die effiziente Gewinnung und Nutzung von Ersatzbrennstoffen (EBS) leisten wesentliche Beiträge [Öko-Institut/IFEU 2005a, Öko-Institut/IFEU 2010].

In vorliegender Studie wird aufgezeigt, welche Potenziale für die Kreislaufwirtschaft bestehen, zu der Energiewende beizutragen und welche Änderungen durch die Energiewende wiederum auf die Kreislaufwirtschaft Einfluss nehmen werden. Hierzu werden die Änderungen der Rahmenbedingungen für die Kreislaufwirtschaft, die der Energiemarkt der Zukunft mit sich bringen wird, genauso aufgezeigt wie die notwendigen bzw. möglichen Änderungen zur Ausschöpfung dieser Potenziale.

Aus den politischen Vorgaben und der sich damit abzeichnenden Entwicklung des Energiemarktes ergeben sich für die Kreislaufwirtschaft drei zentrale Konsequenzen:

- Die Rolle der Biomasse wird sich im Rahmen der Energiewende deutlich ändern (Abschnitt 2.2).
- Der Strommix wird künftig einen stark steigenden Anteil erneuerbarer Energien aufweisen. Damit sinken auch die für die Kreislaufwirtschaft anzurechnenden CO₂-Gutschriften für die Bereitstellung von Strom aus der energetischen Nutzung von Abfällen sowie die CO₂-Lastschriften für den Stromverbrauch bei der Abfallbehandlung deutlich. Dies wird im Abschnitt 2.3 erörtert.
- Bedingt durch den Ausbau der erneuerbaren Energien sinkt die Auslastung konventioneller Kraftwerke, weil in immer mehr Stunden die Last zu größeren Teilen durch erneuerbare Energien gedeckt werden kann. Grundlastkraftwerke werden damit immer weniger benötigt. Die Rolle von konventionellen Kraftwerken ändert sich. In Zukunft werden tendenziell Kraftwerke benötigt, die kurzfristig Reservekapazität bereitstellen, wenn erneuerbare Energien nicht verfügbar sind. Dies soll in Abschnitt 2.4 weiter untersucht werden.

Abschnitt 2.5 beleuchtet den Beitrag der Kreislaufwirtschaft zu den gesamten Treibhausgasemissionen und setzt diese in den Kontext einer auf Dekarbonisierung beruhenden Politik.

Kapitel 3 stellt die Anforderungen an die Kreislaufwirtschaft aus der Perspektive der Energiewirtschaft dar.

In Szenarien wird für die Jahre 2030 und 2050 bilanziert und gegenübergestellt, welche Potenziale eine den Erfordernissen der Energiewende angepasste Kreislaufwirtschaft gegenüber dem Status Quo hat (Kapitel 4).

Schließlich werden notwendige Anreize und Maßnahmen zum Anstoß und zur Umsetzung der erforderlichen Weichenstellungen in der Kreislaufwirtschaft empfohlen (Kapitel 5).

2 Einfluss der Energiewende auf die Kreislaufwirtschaft

2.1 Einleitung

Als Konsequenz aus der Reaktorkatastrophe in Fukushima im Frühling 2011 hat die Bundesregierung entschieden, bis zum Jahr 2022 aus der Nutzung der Kernenergie zur Stromerzeugung auszusteigen [Bundesregierung 2011]. Dies bedeutet, dass eine wesentliche Stromerzeugungsoption, die 2010 noch 22 % der Stromerzeugung ausmachte, in der nächsten Dekade vollständig verschwunden sein wird.

Darüber hinaus hat die Bundesregierung im Rahmen ihres Energiekonzepts im Jahr 2010 weitere zentrale Weichenstellungen für die Energiewirtschaft vorgenommen. So soll der Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung 35 % im Jahr 2020, 50 % im Jahr 2030, 65 % im Jahr 2040 und 80 % im Jahr 2050 betragen. Des Weiteren sieht das Energiekonzept vor, dass der Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttoendenergieverbrauch auf 18 % im Jahr 2020, 30 % im Jahr 2030, 45 % im Jahr 2040 und 60 % im Jahr 2050 steigen soll. Die Stromnachfrage soll gegenüber 2008 um 10 % (2020) bzw. 25 % (2050) sinken. Die Treibhausgas-Emissionen sollen in Bezug auf das Jahr 1990 um 40 % (2020), 55 % (2030), 70 % (2040) sowie 80 % bis 95 % bis 2050 sinken [Bundesregierung 2011, BMU 2012].

Im Bereich der Wärmeerzeugung sieht das Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG) einen Anteil der erneuerbaren Energien an der Wärmeerzeugung von 14 % im Jahr 2020 vor [EEWärmeG 2011].

In ihrem aktuellen Koalitionsvertrag haben sich CDU/CSU/SPD des Weiteren auf Ausbaukorridore für die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien geeinigt, die im Wesentlichen die Ziele des Energiekonzepts abbilden [CDU/CSU/SPD 2013]. Abbildung 2.1 vergleicht die Entwicklung des Anteils erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung bis zum Jahr 2050 im Energiekonzept mit dem Ausbaukorridor, der im Koalitionsvertrag von CDU/CSU/SPD für den Zeitraum bis 2035 festgelegt wurde.

Aus den bisherigen Vorgaben der Bundesregierung und den Plänen der künftigen Regierungsfractionen kann damit geschlossen werden, dass die Stromerzeugung bis zum Jahr 2050 weitgehend von heute noch vorhandenen konventionellen Grundlastkraftwerken (vor allem Kernenergie und Kohle) auf überwiegend erneuerbare und vor allem fluktuierende (Wind, Sonne) Energieträger umgestellt wird.

In einem solchen Energiesystem werden fossile Kraftwerke immer mehr die Rolle von Backup-Kraftwerken übernehmen. Dies bedeutet, dass sie nur noch dann einspringen müssen, wenn gerade der Wind nicht weht oder die Sonne nicht scheint. Um auf das schwankende Angebot an Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien reagieren zu können, muss jedoch die Flexibilität möglichst aller Kraftwerke erhöht, d. h. der Betrieb von Anlagen in Grundlast zurückgefahren werden.

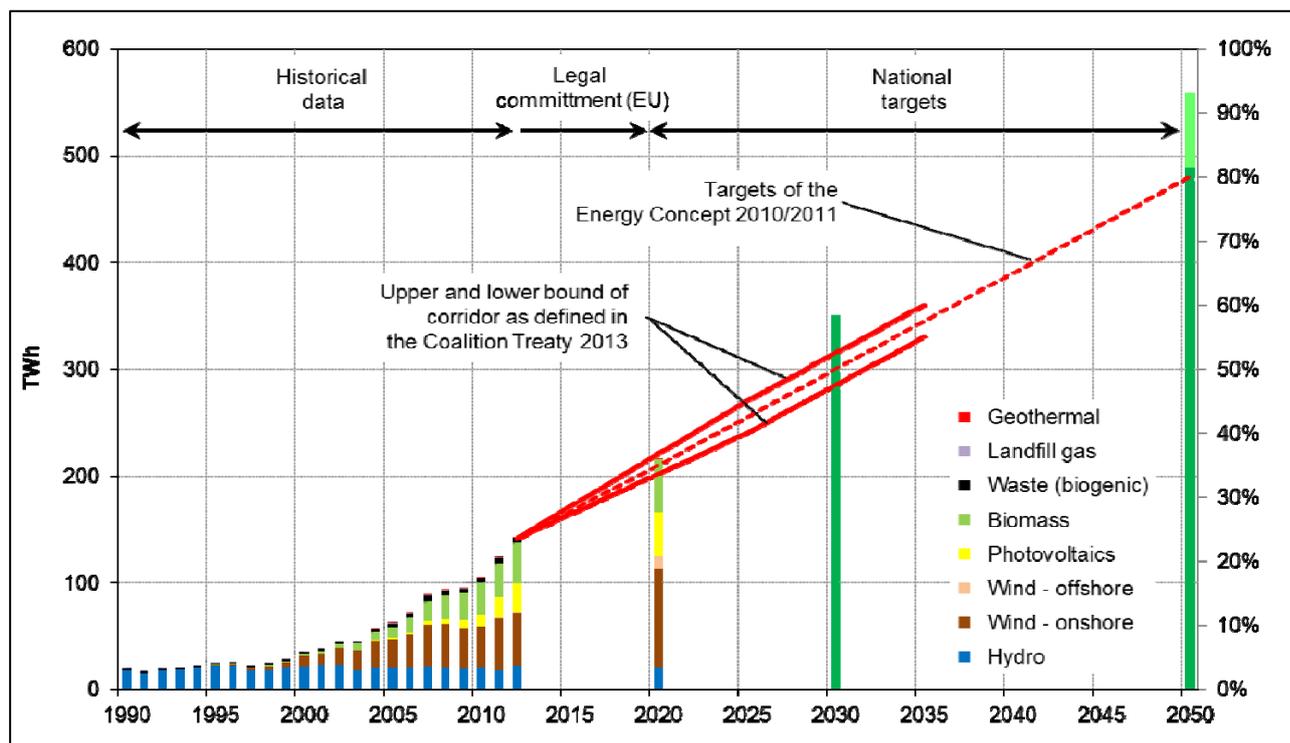


Abbildung 2.1 Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung; [Quellen: AG Energiebilanzen, Bundesregierung 2011, CDU/CSU/SPD 2013, Darstellung Öko-Institut]

Die Politik hat diese Notwendigkeit erkannt. So ist im Koalitionsvertrag von CDU/CSU/SPD ein eigener Abschnitt unter der Überschrift „Strommarktdesign – Neue Rolle für konventionelle Kraftwerke“ enthalten. Im Koalitionsvertrag ist außerdem festgehalten, dass mittelfristig ein Kapazitätsmechanismus zu entwickeln ist [CDU/CSU/SPD 2013].

Zahlreiche wissenschaftliche Studien beschäftigen sich zurzeit damit, wie ein solcher Kapazitätsmechanismus ausgestaltet werden kann, um sicherzustellen, dass in Deutschland zu jedem Zeitpunkt ausreichend Reservekapazitäten vorhanden sind. So hat das Öko-Institut einen fokussierten Kapazitätsmarkt für das konventionelle Kraftwerkssegment [Öko-Institut et al. 2012] vorgeschlagen. Ziel ist es, einen Markt für gesicherte Kapazität zu schaffen, um ausreichend Reservekapazität zur Verfügung zu haben, wenn Wind und Photovoltaik nicht verfügbar sind. In diesem Markt werden Kraftwerke gesicherte Leistung anbieten. Um den Anforderungen der Energiewende gerecht zu werden, ist für neue Kraftwerke, die am Markt für gesicherte Leistung teilnehmen möchten, vorgesehen, dass sie Emissionsgrenzwerte für CO₂ einhalten (600 g CO₂/kWh_{el}) müssen und flexibel einsetzbar sind (Kaltstartfähigkeit von kleiner einer Stunde und eine Mindestlast von höchstens 20 % der Nennlast). Für Anlagen der Kreislaufwirtschaft ist vorstellbar, dass z. B. neue Ersatzbrennstoffkraftwerke mit KWK-Wärmeauskopplung sich an den Ausschreibungen für den Kapazitätsmarkt beteiligen, wenn sie die Emissionsgrenzwerte einhalten.

Alle Bestandsanlagen, die in der Grundlast betrieben werden, beispielsweise auch klassische Müllverbrennungsanlagen oder EBS-Heizkraftwerke, sollen in einem Kapazitätsmarkt keine Kapazitätszahlung erhalten. Bestandsanlagen sollen nur am Kapazitätsmarkt teilnehmen können, wenn sie stilllegungsbedroht sind, also nicht wirtschaftlich betrieben werden können. Analysen in [Öko-Institut et al. 2012] haben ergeben, dass insbesondere Anlagen, die weniger als 2.000 Stunden im Jahr betrieben werden, stilllegungsbedroht sind. Grundsätzlich ist die Teilnahme am Kapazitätsmarkt freiwillig. Betreiber, die ihre Bestandsanlagen weiterhin in der Grundlast betreiben möchten, können dies tun, müssen aber auf die Kapazitätszahlung verzichten. Auch für Neuanlagen ist die Teilnahme am Kapazitätsmarkt freiwillig. Anlagen, die die Flexibilitätsanforderungen nicht einhalten, können betrieben werden. Sie erhalten aber keine Kapazitätszahlung.

Auch in Bezug auf die Förderung der erneuerbaren Energien ergibt sich Veränderungsbedarf. So schlägt das Öko-Institut eine werthaltige EEG-Reform [Öko-Institut 2013] vor. Zentraler Gegenstand dieses Vorschlages ist es, dass auch Anlagen zur Erzeugung erneuerbarer Energien systemdienlicher ausgelegt und betrieben werden sollen. Dies bedeutet, dass sich die Fahrweise erneuerbarer Stromerzeuger verstärkt an den Erfordernissen des Strommarkts orientiert. Dies soll durch entsprechende Preissignale vom Strommarkt bei der Vergütung für die Anlagen umgesetzt werden. Für die Kreislaufwirtschaft ist hierbei insbesondere die Stromerzeugung aus Biomasse relevant. Biomasse-Kraftwerke sollen künftig, wie die anderen thermischen Kraftwerke, vor allem in den Stunden eingesetzt werden, in denen keine Einspeisung fluktuierender Erzeuger vorliegt.

2.2 Die Rolle der Biomasse

Der durch das EEG angereizte Technologiewettbewerb hat mit der Photovoltaik und der Windenergie zwei Sieger produziert. Im Vergleich dazu ist die Stromerzeugung aus Biomasse deutlich teurer. Außerdem wird die Rolle der Anbaubiomasse mittlerweile deutlich kritischer eingeschätzt. Auch durch das Umweltbundesamt [Jering et al. 2012] wird die Nutzung von Anbaubiomasse in Frage gestellt und empfohlen, die Flächenbelegung durch Bioenergiesubstrate in Deutschland auf die gut 2 Mio. ha im Jahr 2010 einzufrieren und stattdessen verstärkt die Potenziale an Abfall- und Reststoffen zu erschließen. Weil dadurch weniger Biomasse zur Verfügung steht, sollte auf eine hohe Effizienz bei der Nutzung von Abfall- und Reststoffen geachtet werden.

Für eine Fokussierung auf Abfall- und Reststoffe spricht auch das Problem der Flächenkonkurrenzen [vgl. z. B. Alexandratos, N. & Bruinsma, J. 2012 und UNCTAD, 2013]. Wird Biomasse von landwirtschaftlichen Flächen energetisch oder stofflich genutzt, so besteht die Gefahr, dass die Nachfrage nach Anbauflächen steigt. Die Ausdehnung von Anbaufläche ist keine nachhaltige Option, denn diese ist oft mit Landnutzungsänderungen (z. B. Waldabholzung und Grünlandumbruch) verbunden [WBGU 2009]. Diese Effekte können auch indirekter Art sein, was derzeit auf EU-Ebene unter dem Stichwort iLUC (indirect land-use change) intensiv diskutiert wird [Laborde 2011; Searchinger 2013]. Des Weiteren fallen Emissionen für Vorkettenprozesse wie z.B. Düngung und Transport an. Insgesamt sind die entstehenden

Treibhausgas-Emissionen bei Anbaubiomasse oft deutlich höher als die Einsparung, die man durch die Substitution fossiler Energieträger durch Biomasse erzielt¹.

Da der Grundlastbedarf in der Stromerzeugung bedingt durch den Ausbau der fluktuierenden erneuerbaren Energien (Wind und Photovoltaik) immer stärker abnimmt (Abschnitt 2.4), ist es in Zukunft nicht sinnvoll, Biomassekraftwerke in Grundlast zu betreiben.

Im Koalitionsvertrag haben CDU/CSU/SPD festgelegt, dass die Stromerzeugung aus Biomasse überwiegend auf Abfall- und Reststoffe beschränkt werden soll [CDU/CSU/SPD 2013]. Dies soll im Rahmen der für Anfang 2014 anstehenden Reform des EEG umgesetzt werden und illustriert, dass die Rolle der Kreislaufwirtschaft bei der Umsetzung der Energiewende zunehmen wird. In diesem Zusammenhang schlägt das Öko-Institut eine werthaltige EEG-Reform [Öko-Institut 2014] vor. Zentraler Gegenstand dieses Vorschlages ist es, dass auch Anlagen zur Erzeugung erneuerbarer Energien systemdienlicher ausgelegt und betrieben werden sollen, womit Stromerzeugung aus Biomasse in Grundlast künftig nicht mehr gefördert werden sollte.

2.3 Referenzsysteme

2.3.1 Stromerzeugung

In verschiedenen Studien wurde die Auswirkung der Energiewende auf die deutsche Energieversorgung untersucht [Prognos/EWI/GWS 2010, Prognos/EWI/GWS 2011, Prognos 2011, DLR/IWES/IFNE 2012, Bundesregierung 2013]. Das Öko-Institut erarbeitet zurzeit im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) das Projekt „Klimaschutzszenarien 2050“, in dem folgende Szenarien untersucht werden:

- Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (AMS (2012)): Fortschreibung aktueller Politik (Stand 2012), keine weiteren energie- und klimapolitischen Maßnahmen;
- Klimaschutzszenario 80 (KS 80): Erreichung der Ziele des Energiekonzepts (Treibhausgas-Minderung², Erneuerbare Energien, Energieeffizienz);
- Klimaschutzszenario 90 (KS 90): Erreichung einer Treibhausgas-Minderung von 90 % bis 2050 (ggü. 1990) und damit eine weitgehend CO₂-freie Stromerzeugung.

Für die Realisierung dieser Szenarien und das Gelingen der Energiewende ist eine Stärkung des europäischen Emissionshandelssystems insgesamt von großer Bedeutung. In den Szenarien wurde unterstellt, dass durch eine Anpassung der Rahmenbedingungen ein adäquater Preis für CO₂ sichergestellt wird. Der angenommene CO₂-Zertifikatspreis erreicht dabei im Jahr 2050 50 €/t im Szenario AMS, 130 €/t im Szenario KS 80 und 200 €/t im KS 90.

¹ [Rausch/Fritsche 2012] analysiert die Lebenszyklus-Emissionen verschiedener erneuerbarer Energieträger und Nutzungsformen. Für die Stromerzeugung aus biogenen Brennstoffen zeigt die Studie beispielsweise, dass die Lebenszyklus-Emissionen für die Stromerzeugung in einem BHKW mit Biogas aus Mais oder mit Palmöl bereits in der Größenordnung eines Erdgas-Kraftwerks liegen.

² Um 80 % ggü. 1990.

Abbildung 2.2 zeigt die Entwicklung des Strommixes bis zum Jahr 2050 in den drei untersuchten Szenarien. Zum einen nimmt die Stromerzeugung aus Kernenergie (roter Balken) deutlich ab und ist im Rahmen des Atomausstiegs nach 2022 nicht mehr vorhanden. Fossile Energieträger (Braunkohle (braun), Steinkohle (schwarz), Erdgas (gelb)) spielen noch bis 2030 eine wichtige Rolle mit ca. 25 % bis 40 % der Stromerzeugung. Im Jahr 2040 und 2050 nimmt die Rolle der fossilen Energieträger weiter stark ab und erreicht im Szenario KS 80 (Erreichung der Energiekonzeptziele) im Jahr 2050 lediglich einen Wert von ca. 10 %³. Damit wird deutlich, dass die fossile Stromerzeugung sich langfristig nur noch auf die Funktion von Reservekraftwerken zum Ausgleich der erneuerbaren Energien beschränken wird. Der Anteil der erneuerbaren Energien steigt von unter 20 % im Jahr 2010 auf über 70 % (AMS (2012): Fortschreibung aktueller Politik) bis über 80 % (KS 80: Erreichung der Energiekonzeptziele) bzw. sogar über 90 % (KS 90: Treibhausgasminderung um 90 % bis 2050) an.

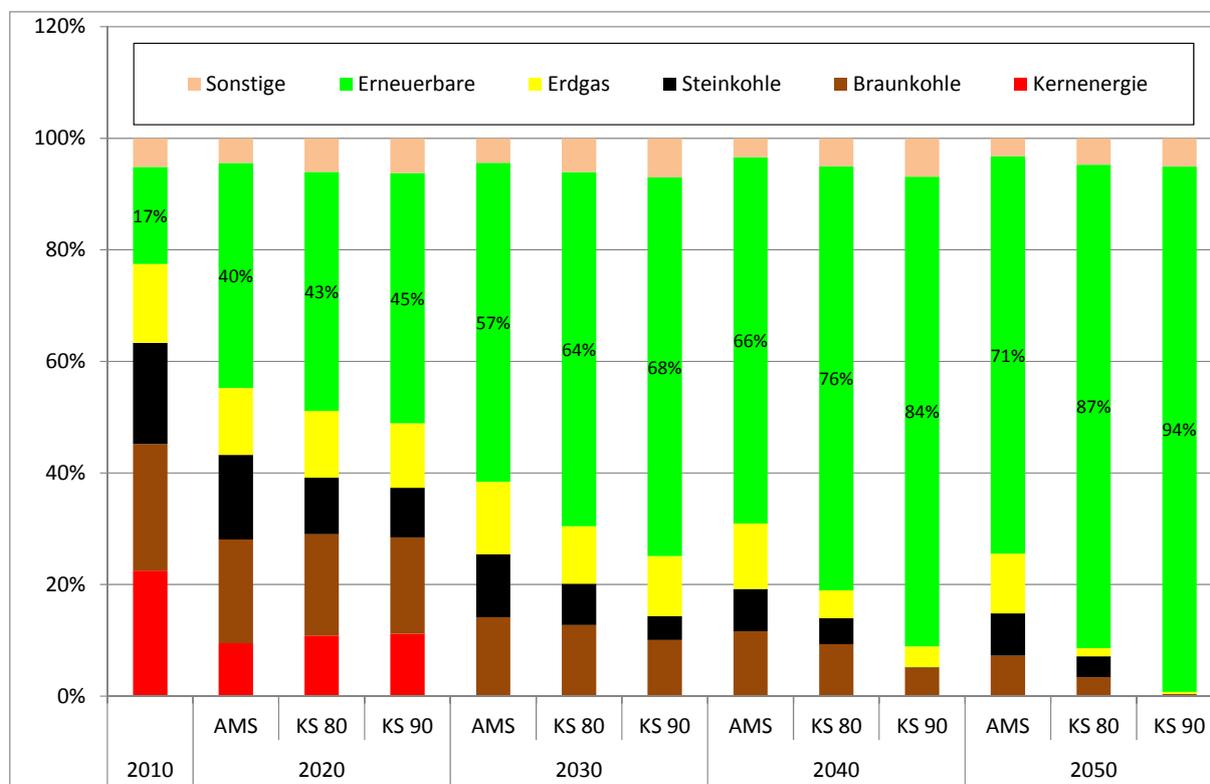


Abbildung 2.2 Strommix der inländischen Stromerzeugung [Quelle: Aktuelle Modellierungsarbeiten des Öko-Instituts 2013]

Die Ziele des Energiekonzepts sowie der im Koalitionsvertrag enthaltene Zubaukorridor erneuerbarer Energien (Abbildung 2.1) machen deutlich, dass eine Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in der Größenordnung von über 80 % im Jahr 2050 als durchaus rea-

³ Darüber hinaus gibt es einen kleinen Beitrag durch die Stromerzeugung aus sonstigen Brennstoffen („Sonstige“), die sich im Szenarienvorlauf jedoch nicht stark ändert. Hierbei handelt es sich beispielsweise um die Stromerzeugung aus Hochofen-, Kokerei- oder Raffineriegas.

listisch bzw. konservativ eingeschätzt werden kann. Andere Studien gehen sogar von einer im Jahr 2050 vollständig auf erneuerbaren Energien basierenden Stromversorgung aus [UBA 2010].

Der steigende Anteil der erneuerbaren Energien führt dazu, dass der Anteil der fossilen Stromerzeugung sehr stark abnimmt (Tabelle 2.1).

Tabelle 2.1 Stromerzeugung im Klimaschutzscenario 80 (KS 80) und im Klimaschutzscenario 90 (KS 90), Erreichung einer Treibhausgas-Minderung von 80 % bzw. 90% bis 2050 (gegenüber 1990)

	Stromerzeugung (TWh)								
	2010	2020		2030		2040		2050	
		KS 80	KS 90						
	TWh								
Kernenergie	133	56	55	0	0	0	0	0	0
Braunkohle	134	95	85	61	46	44	23	16	2
Steinkohle	107	52	44	35	20	22	1	17	0
Erdgas	84	62	57	49	49	24	17	7	2
Erneuerbare	103	223	222	303	309	359	389	403	507
davon Wasser	21	22	22	23	23	24	24	25	25
davon Wind	38	114	114	178	172	225	231	258	324
davon Biogas	18	14	14	16	15	16	12	16	11
davon Biomasse	15	26	26	27	26	27	23	28	21
davon Solar	12	45	45	55	68	59	91	64	114
davon sonstige	0	1	1	4	4	8	8	12	12
Sonstige	24	25	25	20	20	15	14	12	11
Pumpspeicher	6	6	6	8	9	7	13	5	12
Backup-Kraftwerke	0	0	0	1	2	2	4	5	4
Import	0	0	0	25	23	51	48	76	74
Summe	591	520	494	502	479	523	510	540	612
Davon einlastbar	491	307	282	189	158	134	80	89	40

Mit der stark sinkenden Erzeugung in konventionellen Kraftwerken (Kernenergie, Braunkohle, Steinkohle, Erdgas) nimmt auch die Stromerzeugung ab, die flexibel hoch- und runtergefahren werden kann (einlastbare Stromerzeugung). Zwar übernehmen thermische Kraftwerke auf Basis von Biogas und Biomasse ein Teil dieser Funktion. Darüber hinaus können in einzelnen Spitzenstunden zusätzliche Backup-Kraftwerke genutzt werden⁴. Dennoch sinkt der Anteil der einlastbaren Stromerzeugung an der gesamten benötigten Stromerzeugung⁵ im Zeitverlauf deutlich.

⁴ Diese müssen jedoch überwiegend noch für die Umsetzung der Energiewende gebaut werden. Es handelt sich hierbei z. B. um Gasturbinen oder Gasmotoren.

⁵ Einschließlich Import.

Entsprechend der Abnahme der fossilen Stromerzeugung im Zeitverlauf sinken auch die durchschnittlichen CO₂-Emissionen des Stromsektors (Abbildung 2.3). Die Abbildung macht deutlich, dass die durchschnittlichen CO₂-Gutschriften der inländischen Stromerzeugung von rund 600 g CO₂/kWh im Jahr 2010 deutlich sinken werden. So sinken bei einer Fortschreibung aktueller Politik (AMS (2012)) die durchschnittlichen CO₂-Emissionen der Stromerzeugung bis zum Jahr 2050 auf rund 200 g CO₂/kWh. Sofern die Ziele des Energiekonzepts (KS 80) erreicht werden, sinken die durchschnittlichen CO₂-Emissionen auf rund 100 g CO₂/kWh. Eine weitgehende Dekarbonisierung der Wirtschaft führt auch im Stromsektor zu einer weitgehend CO₂-freien Stromerzeugung (KS 90) und damit zu Stromgutschriften weit unter 100 g CO₂/kWh.

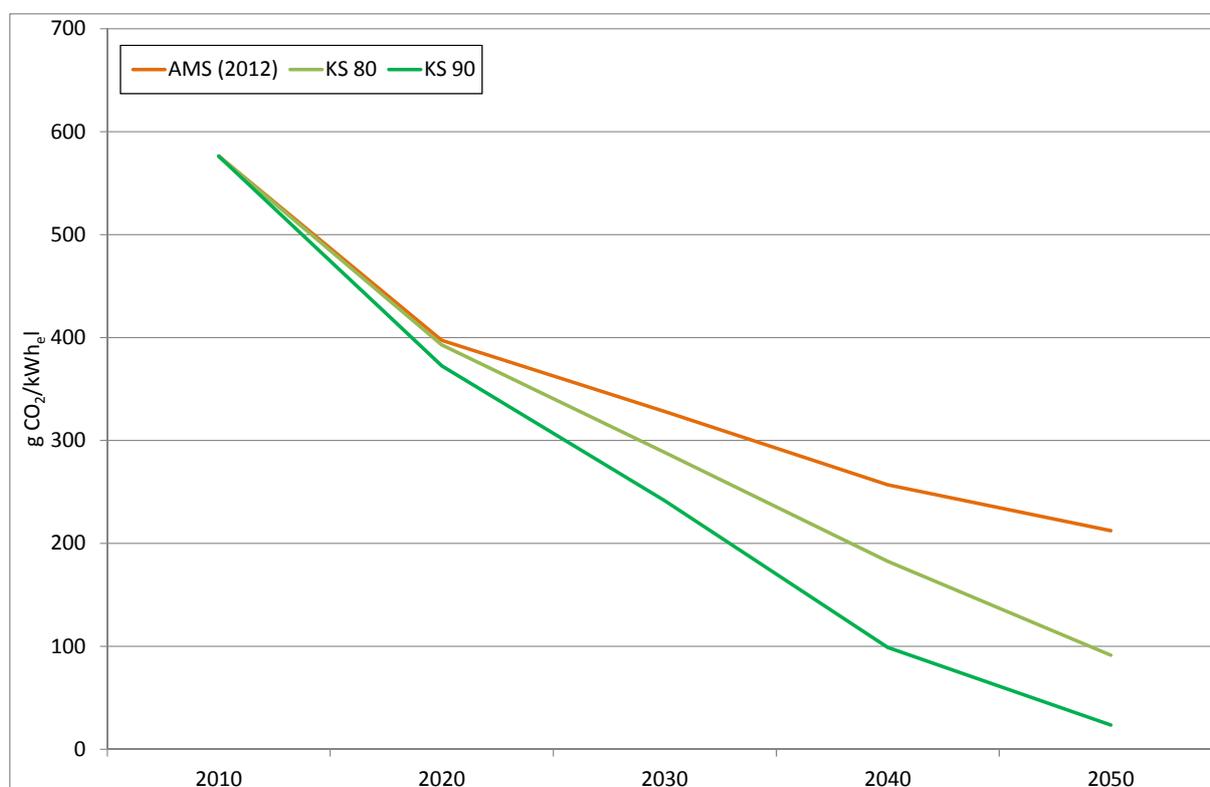


Abbildung 2.3 Durchschnittliche CO₂-Emissionen der inländischen Stromerzeugung [Quelle: Aktuelle Modellierungsarbeiten des Öko-Instituts 2013]

Wie einleitend dargestellt (Abschnitt 2.1), kann die Entwicklung der erneuerbaren Stromerzeugung wie im Energiekonzept vorgesehen als offizielle Regierungspolitik bezeichnet werden und befindet sich im Rahmen der Bandbreiten der hier vorgestellten Szenarienergebnisse bzw. kann als konservativ in Bezug auf die Ergebnisse anderer Studien angesehen werden.

Demnach sind für den Beitrag der Kreislaufwirtschaft zur Energiewende für Anlagen, die im Grundlastbetrieb Strom produzieren, die durchschnittlichen CO₂-Gutschriften (direkte Emis-

sionen) des mittleren Szenarios (KS 80) anzusetzen: 576 g CO₂/kWh (2010/2011), 288 g CO₂/kWh (2030) und 91 g CO₂/kWh (2050).

Wenn Strom flexibel bereitgestellt wird, sind die CO₂-Gutschriften (direkte Emissionen) des konventionellen Erzeugungsmixes (ohne erneuerbare Energien, jedoch einschließlich Kernenergie) anrechenbar. Diese belaufen sich im genannten Szenario (KS 80) auf 707 g CO₂/kWh (2010/2011), 832 g CO₂/kWh (2030) und 823 g CO₂/kWh (2050)⁶.

2.3.2 Wärmeezeugung

Neben der Stromerzeugung sollen erneuerbare Energien auch im Bereich der Wärmeezeugung eine zunehmend wichtige Rolle spielen, was sich in den Zielen des Erneuerbare-Energien-Wärmegesetzes und des Energiekonzepts (in letzterem Bezug auf den Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttoendenergieverbrauch) widerspiegelt (Abschnitt 2.1). Bereits heute kann durch die Nutzung von Solarkollektoren, Erdwärme (Wärmepumpen) oder die Nutzung von Biomasse-Kesseln Wärme auf erneuerbarer Basis bereitgestellt werden.

Als Referenzwert für das Jahr 2010 werden spezifische CO₂-Emissionen von knapp 250 g CO₂/kWh_{th} angesetzt, die sich aus einem Erzeugungsmix von Erdgas, Heizöl und Fernwärme ergeben. Ab 2020 wird zum einen angenommen, dass die fossile Wärme im Wesentlichen durch Erdgas-Brennwertkessel erzeugt wird (spezifische CO₂-Emissionen (direkt) von 202 g CO₂/kWh_{th}). Darüber hinaus wird für das Jahr 2020 angenommen, dass 14 % der Wärme regenerativ erzeugt werden [EEWärmeG 2011], so dass sich ein Wärmeezeugungsmix von 173 g CO₂/kWh_{th} ergibt. Ab 2030 wird der Ausbaupfad des Energiekonzepts in Bezug auf die Endenergie (30 % Anteil erneuerbarer Energien an der Brutto-Endenergie im Jahr 2030, 45 % im Jahr 2040 und 60 % im Jahr 2050) [BMWi & BMU 2010] zugrunde gelegt. Daraus ergeben sich direkte spezifische CO₂-Emissionen der Wärmeezeugung im Jahr 2030 von 141 g CO₂/kWh_{th} bzw. im Jahr 2050 von ca. 81 g CO₂/kWh_{th} (Abbildung 2.4).

⁶ Die genannten Emissionsfaktoren für die durchschnittlichen und fossilen Strommixe sowie die Wärmemixe werden für die Bilanz jeweils um die indirekten Emissionen aus den Vorketten ergänzt (vgl. Anhang Kapitel A 3.2).

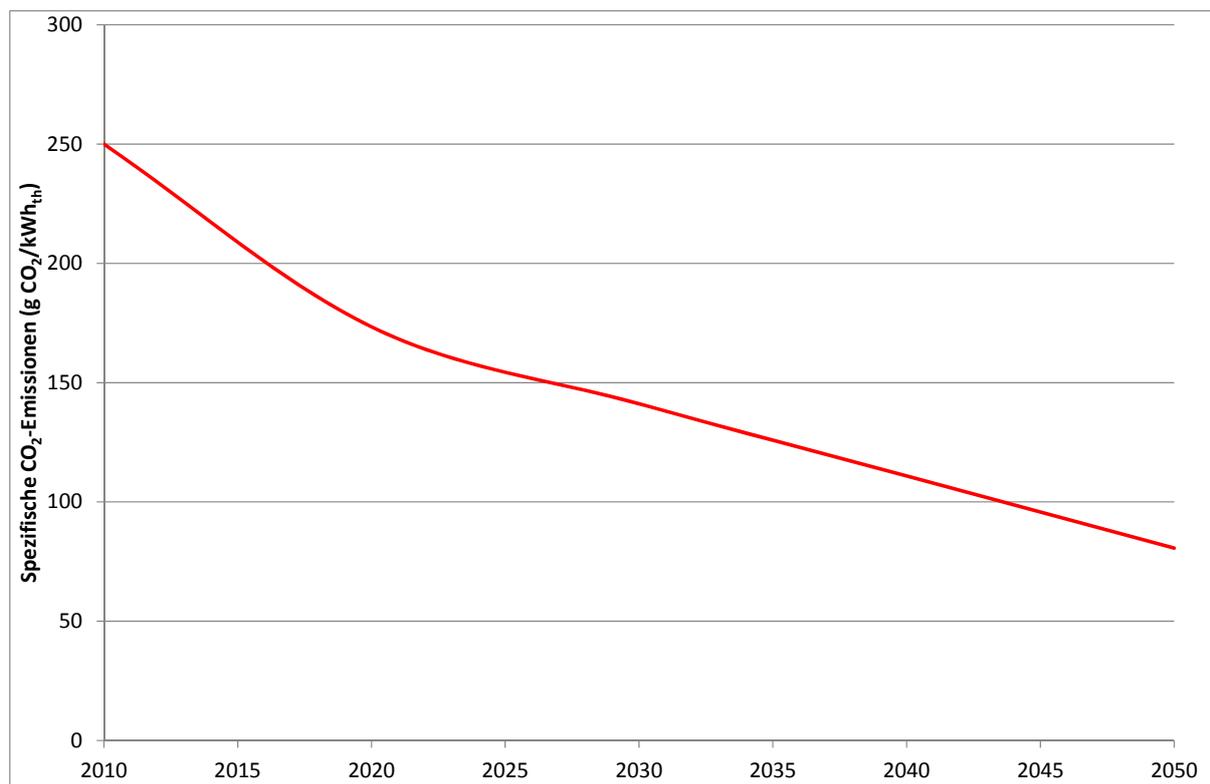


Abbildung 2.4 Spezifische CO₂-Emissionen der Wärmeerzeugung [Quelle: Annahmen und Berechnungen Öko-Institut]

2.4 Bereitstellung von Reservekapazitäten

Die in den Abschnitten 2.1 und 2.3 dargestellte perspektivisch weitgehend auf erneuerbaren Energien basierende Stromerzeugung führt dazu, dass erneuerbare Energien in vielen Stunden des Jahres die Stromerzeugung abdecken, die bislang überwiegend von konventionellen Kraftwerken (Kernkraftwerke, fossile Kraftwerke) erzeugt wurde. Damit sinkt zum einen die Anzahl der Stunden, in denen konventionelle Kraftwerke produzieren. Dies ist in Abbildung 2.5 dargestellt. Die nach Abzug der Einspeisung erneuerbarer Energien von konventionellen Kraftwerken zu deckende Last (Residuallast) nimmt im Zeitverlauf immer weiter ab (Kurven verschieben sich nach unten). Sofern die Residuallast negativ ist, bedeutet dies, dass die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in der jeweiligen Stunde größer ist als die Nachfrage nach Strom. Sofern die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien nicht flexibel ist (d. h. in diesem Fall reduziert werden kann) bzw. die Nachfrage nicht erhöht werden kann (keine nachfrageseitige Flexibilität), muss die überschüssige Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien exportiert oder abgeregelt werden. Dieses Prinzip der durch erneuerbare Energien sinkenden Residuallast führt dazu, dass weniger konventionelle Kraftwerke in weniger Stunden des Jahres zum Einsatz kommen.

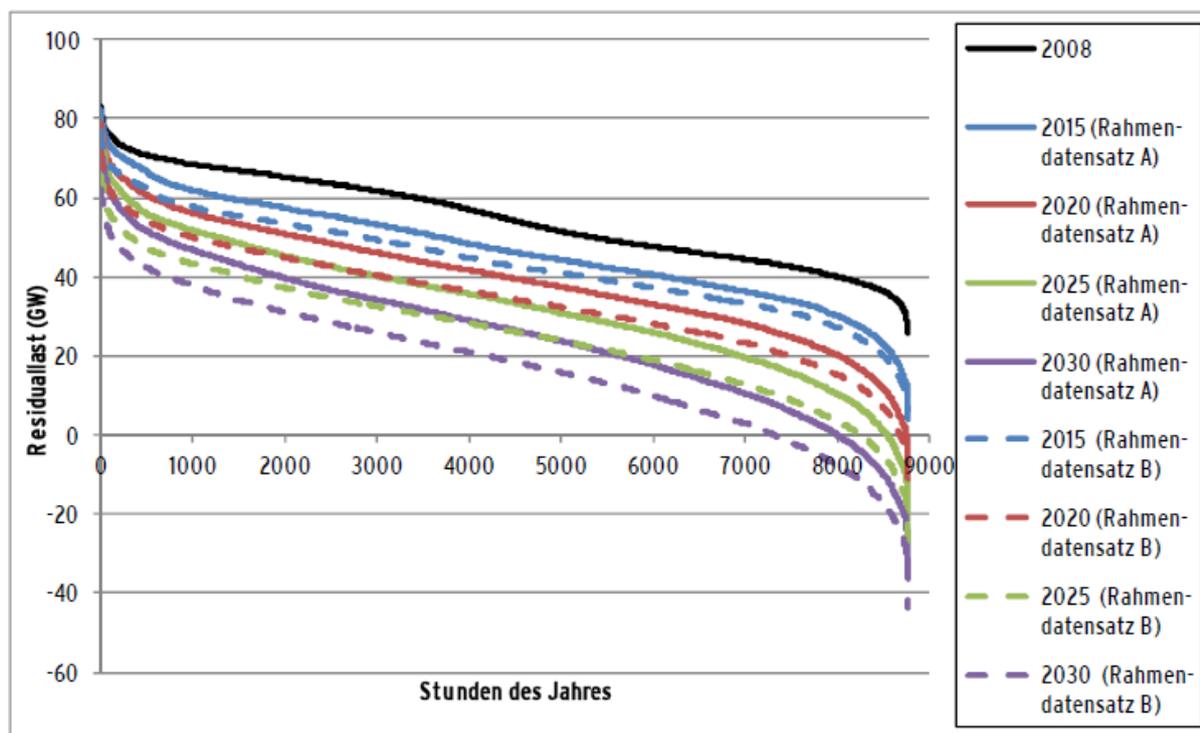


Abbildung 2.5 Residuallast bei einem verstärkten Ausbau erneuerbarer Energien [Quelle: Harthan, Seebach, Böttger, Bruckner 2012]

Auf der anderen Seite wird es künftig zahlreiche Stunden des Jahres geben, in denen die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien (vor allem Wind und Photovoltaik) nicht ausreichen wird, um den Leistungsbedarf des Systems bereitzustellen. Damit sind im Rahmen der Energiewende künftig weitere Reservekapazitäten notwendig, die die Stromerzeugung bzw. die Stromnachfrage variieren können, so dass stets Stromangebot und -nachfrage in Deckung gebracht werden können. Die Stromerzeugung in solchen flexiblen (einlastbaren) Kraftwerken nimmt jedoch vor allem durch den Rückgang der konventionellen Stromerzeugung deutlich ab (Tabelle 2.1).

Darüber hinaus führt ein verstärktes Angebot der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien dazu, dass nur noch wenige konventionelle Kraftwerke für die Stromerzeugung benötigt werden. Da an der Strombörse stets die günstigsten Kraftwerke zum Zuge kommen, werden bei einer verstärkten Einspeisung der erneuerbaren Energien immer weniger teure Kraftwerke eingesetzt, sodass insgesamt der Börsen-Strompreis sinkt⁷.

Damit tragen die Veränderungen im Strommarkt zu einer Veränderung der Erlössituation der Kraftwerke bei. Grundsätzlich können Erlöse künftig nur noch in deutlich weniger Stunden des Jahres erwirtschaftet werden. Auf der anderen Seite können Erlöse in ausreichender

⁷ Dies wird als Merit-Order-Effekt bezeichnet.

Höhe nur dann erzielt werden, wenn die verbleibende Residuallast hoch ist. Daraus kann geschlossen werden, dass eine Grundlasterzeugung von Strom künftig nicht mehr wirtschaftlich sinnvoll sein wird, da in vielen Stunden keine Erlöse erzielt werden können, zugleich aber Kosten für den Kraftwerksbetrieb entstehen. Erlöse können vor allem erzielt werden, sofern die Stromerzeugung flexibel nur noch in den Stunden erfolgt, in denen die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien nicht ausreicht.

In Bezug auf die Biomasse-Kraftwerke ist ein solcher flexibler Anlagenbetrieb jedoch heute bislang nicht Realität wie in Abbildung 2.6 dargestellt. Aus der Abbildung wird deutlich, dass die Stromerzeugung in Biomasse im Jahr 2010 im Grundlastbetrieb erfolgte (grüne Kurve) und noch unflexibler als Braunkohlekraftwerke betrieben wurde (braune Kurve).

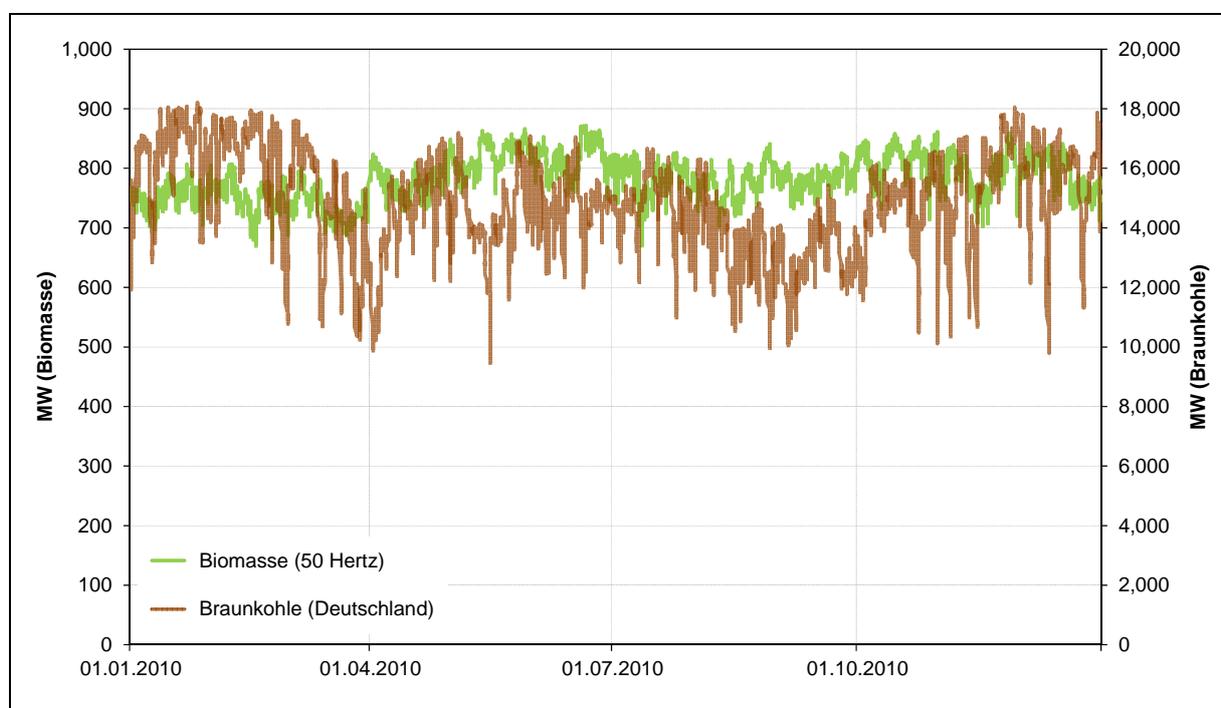


Abbildung 2.6 Stromerzeugung in Biomasse- und Braunkohlekraftwerken im Jahr 2010 (Quelle: 50 Hertz Transmission, EEX, Annahmen und Berechnungen Öko-Institut; Die Kommata entsprechen der englischen Schreibweise für tausender Trennzeichen)

Flexibilität kann zum einen angebotsseitig bereitgestellt werden. Hierfür kommen flexible fossile Kraftwerke, Gasturbinen oder Pumpspeicherkraftwerke (oder andere Speicher, z. B. Batteriespeicher) in Betracht. Perspektivisch sollen jedoch auch erneuerbare Kraftwerke (z. B. Biomassekraftwerke) oder heute noch unflexible Stromerzeuger vermehrt dafür genutzt werden. Zum anderen können auch nachfrageseitig Flexibilitäten z. B. durch Lastverschiebung (Demand-Side Management), Elektrofahrzeuge oder Lastabwurf (z. B. in der Industrie) erschlossen werden. Schließlich können erneuerbare Energien abgeregelt werden, sofern

ein Überangebot herrscht. Weitere Flexibilitätsmöglichkeiten sind der Stromaustausch mit dem Ausland (Import/Export) sowie der Netzausbau.

In den in Abschnitt 2.3.1 erwähnten aktuellen Modellierungsarbeiten wurde ebenfalls der zusätzliche Bedarf an Reservekapazität bzw. anderen Flexibilitäten (Backup-Bedarf) ermittelt⁸. Kurzfristig (2020) tritt dieser Bedarf im Klimaschutzszenario KS 80 in nur wenigen Stunden des Jahres auf und mit einer vergleichsweise geringen Leistung. Im Jahr 2050 jedoch tritt er schon in rund 5 % der Stunden des Jahres auf und die benötigte Reservekapazität beträgt in der Spitze 60 GW⁹. Dabei handelt es sich um Reservekapazitäten, die grundsätzlich über das ganze Jahr verteilt benötigt werden können, immer dann, wenn das Angebot der erneuerbaren Energien nicht ausreichend ist, um den Bedarf zu decken. Dies kann beispielsweise an dunklen, sonnenarmen Wintertagen relevant sein, jedoch auch in anderen Jahreszeiten, sofern das Dargebot an erneuerbaren Energien (vor allem Sonne und Wind, aber auch Wasserkraft) beispielsweise witterungsbedingt nicht ausreicht. Insgesamt geht die Stromerzeugung aus Kraftwerken, deren Einsatz flexibel steuerbar ist¹⁰, sehr stark zurück und beträgt im Szenario KS 80, das eine Reduktion der Treibhausgase um 80 % beschreibt, 2030 noch 189 TWh und 2050 nur noch 89 TWh (Tabelle 2.1).

Neben den hier genannten Reservekapazitäten bei einem stark steigenden Zubau erneuerbarer Energien sind weitere (bereits heute benötigte) flexible Kraftwerke erforderlich, beispielsweise um mögliche Nachfrageschwankungen oder ungeplante Kraftwerksausfälle abzufangen. Daraus wird deutlich, dass für ein Gelingen der Energiewende die Bereitstellung von zusätzlicher flexibler Kapazität zentral ist.

2.5 Emissionen der Stromerzeugung und langfristige Ziele

Die Ziele des Energiekonzepts sehen eine Minderung der Treibhausgas-Emissionen um 80 % bis 95 % bis 2050 in Bezug auf 1990 vor [BMWi, BMU 2010]. Um das Reduktionsziel von 80 % im Jahr 2050 zu erreichen, müssen die gesamten THG-Emissionen auf nur noch 250 Mio. t CO₂eq im Jahr 2050 sinken.

Im Jahr 2010 betragen die Emissionen aus der öffentlichen und der industriellen Stromerzeugung 379 Mio. t CO₂eq [UBA 2013]. Der Anteil der Emissionen aus der Verbrennung von fossilen Abfällen¹¹ betrug hierbei rund 3 % (ca. 13 Mio. t CO₂eq, [Quelle: UBA 2013]).

⁸ Hierbei handelt es sich um diejenigen Flexibilitäten, die sehr kurzfristig und in wenigen Spitzenstunden des Jahres eingesetzt werden können (wie z. B. Gasturbinen), d. h. in Fällen, in denen die installierte Kraftwerkskapazität nicht zur Deckung der Nachfrage ausreicht.

⁹ Damit wird deutlich, dass die benötigte Leistung zur Deckung der Stromerzeugung in Spitzenstunden sehr signifikant sein kann. Da die Backup-Kraftwerke jedoch nur wenige Stunden im Jahr betrieben werden, ist die insgesamt erzeugte Strommenge in diesen Kraftwerken vergleichsweise gering (z. B. im Klimaschutzszenario 80 lediglich 5 TWh für Backup-Kraftwerke im Jahr 2050, siehe Tabelle 2.1).

¹⁰ Also sowohl grundsätzlich flexibel steuerbare Kraftwerke wie fossile oder Biomasse-Kraftwerke als auch Backup-Kraftwerke für einzelne Spitzenstunden wie z. B. Gasturbinen.

¹¹ Die Emissionen aus der energetischen Nutzung des regenerativen Anteils des Abfalls werden mit einem Emissionsfaktor von null bewertet und gehen deshalb nicht in die Berechnung ein.

Der Anteil des Stromsektors (öffentliche und industrielle Stromerzeugung) an den gesamten THG-Emissionen betrug im Jahr 2010 etwa 40 % (379 Mio. t. CO₂eq von 944 Mio. t CO₂eq). Sofern davon ausgegangen wird, dass der Stromsektor einen seinem Anteil entsprechenden Minderungsbeitrag zum 80 %-Ziel leisten muss, so müssen die THG-Emissionen im Stromsektor (40 % von 250 Mio. t CO₂eq) auf unter 100 Mio. t CO₂eq sinken. Bleiben die Emissionen der Abfallverbrennung zur Stromerzeugung unverändert, so würden diese bereits rund 13 % der verfügbaren THG-Emissionen im Stromsektor ausmachen.

Daraus kann geschlossen werden, dass die absoluten Emissionen aus der Abfallverbrennung sinken müssen (beispielsweise durch die Reduktion der fossilen Anteile im Abfall). Auf der anderen Seite sollten die verbleibenden THG-Emissionen aus der energetischen Verwertung von Abfall so effizient und flexibel wie möglich eingesetzt werden, um verbleibende fossile Emissionen (Kohle und Gas) in Reservekraftwerken, die für die Energiewende benötigt werden, so weit wie möglich zu ersetzen.

3 Anforderungen an die Kreislaufwirtschaft und ihre Potenziale

Die Anforderungen, die aus den Entwicklungen der Energiewende auf die Kreislaufwirtschaft mittel- und langfristig zukommen und die Möglichkeiten, selbst einen Beitrag zum Gelingen der Energiewende zu leisten, werden anhand der wesentlichsten Bereiche

- Steigerung der Recyclinganteile als Beitrag zum Klima- und Ressourcenschutz,
- Optimierung des Umgangs mit Abfallbiomasse,
- Flexibilisierung der Energiebeiträge aus der Kreislaufwirtschaft.

kurz aufgezeigt, bevor in Kapitel 4 die zukünftigen Potenziale einer, den Rahmenbedingungen der Energiewende angepassten, Kreislaufwirtschaft aufgezeigt werden.

3.1 Steigerung der Recyclinganteile

Durch das Recycling von Wertstoffen aus Abfall werden von der Kreislaufwirtschaft schon heute erhebliche Beiträge zum Klimaschutz (vgl. Kapitel 4) und zur Ressourcenschonung geleistet.

Demzufolge ist der im Kreislaufwirtschaftsgesetz geregelte prinzipielle Vorrang¹² des Recyclings (stoffliche Verwertung) vor sonstigen Verwertungsarten folgerichtig und berechtigt.

Für die trockenen Wertstoffe Glas, Papier und Metalle ist dies technisch weniger aufwendig und ökonomisch rentabel. Diskutiert werden diese Verhältnisse bei Kunststoffen, gemischten Gewerbeabfällen, Elektrokleingeräten sowie Bio- und Grünabfällen. Hierzu folgen Aussagen in den Abschnitten 3.1.1 bis 3.1.3 bzw. 3.2. Die Potenziale für Papier, Glas und Metalle gehen aus der Bilanz in Kapitel 4 hervor, eine nähere Betrachtung ist hier deshalb entbehrlich.

3.1.1 Situation des Recyclings bei Kunststoffen

Wegen des hohen Aufwandes zur Getrennthaltung oder Sortierung sowie der Aufbereitung von Kunststoffen und der gleichzeitig günstigen Verbrennungsbedingungen von Kunststoffen, bei existierenden Überkapazitäten in Abfallverbrennungsanlagen, ist der Wert des Kunststoffrecyclings umstritten. Dass dies unberechtigt ist, soll im Folgenden kurz ausgeführt werden.

Nach Daten des statistischen Bundesamtes wurden in [INTECUS 2012] die Stoffflüsse der Kunststoffabfälle in Deutschland für 2007 bilanziert.

Die Daten aus Abbildung 3.1 sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst.

¹² Das Kreislaufwirtschaftsgesetz regelt hierzu auch Ausnahmen. Davon abgesehen ist der prinzipielle Vorrang aus Sicht des Öko-Instituts richtig, solange im konkreten Einzelfall nicht ökobilanziell eindeutig bewiesen wird, dass eine Ausnahme, z. B. die energetischen Verwertung bestimmter Fraktionen, die gleichen Umweltvorteile bringt.

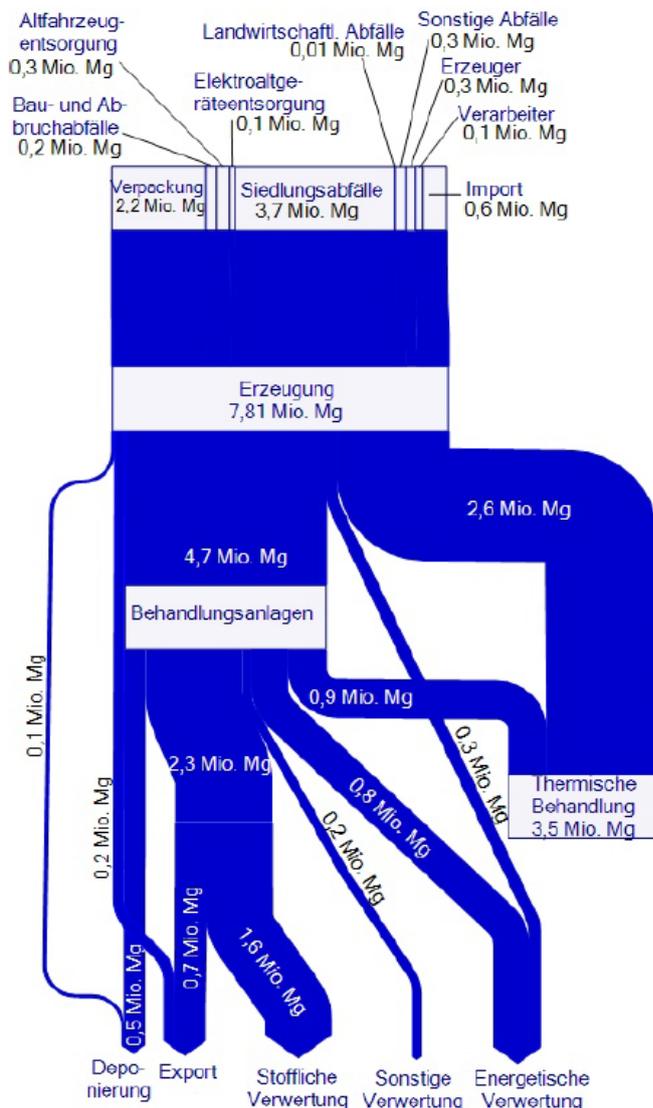


Abbildung 3.1 Materialstrom für Kunststoffabfälle in Deutschland im Jahr 2007 [INTECUS 2012]

In der gleichen Studie wurden ebenfalls für das Jahr 2007 auch Daten von CONSULTIC ausgewertet, die in der Summe eine geringere Menge an Kunststoffabfällen von nur 4,9 Mio. Mg/a und einen höheren Anteil des Kunststoffrecyclings (43 %), aber ebenso wie die Daten nach DeStatis einen hohen Anteil von 43 % der Kunststoffabfälle in der MVA ausweisen (2,1 Mio. Mg/a). Die Unterschiede liegen insbesondere an unterschiedlichen Annahmen zu Kunststoffgehalten in Abfallströmen der Siedlungs- und gemischten Gewerbeabfälle und betreffen insbesondere den Strom in die MVAn. Da seit Anfang der 1980er Jahre keine flächendeckenden Analysen der Abfallzusammensetzungen für Deutschland mehr erhoben wurden, lassen sich diese Unterschiede nicht aufklären. Der höhere Anteil des Kunststoffrecyclings in den Studien von CONSULTIC rührt insbesondere daher, dass CONSULTIC das anlageninterne Recycling von Produktionsabfällen der Kunststoffverarbeitenden Industrie stark berücksichtigt, dass aber definitionsgemäß in Abfallstatistiken kaum eingeht [INTECUS

2012]. In einer aktuelleren Veröffentlichung weist CONSULTIC für 2011 insgesamt 5,5 Mio. Mg/a aus, die zu 42 % (2,3 Mio. Mg/a) recycelt und zu 34 % (1,9 Mio. Mg/a) in der MVA entsorgt werden. Insgesamt wurden in MVA, als EBS und ähnliches 53 % (3 Mio. Mg) energetisch genutzt [CONSULTIC 2012]. Aus den CONSULTIC Daten geht demzufolge zwischen 2006 und 2011 ein Rückgang der in MVAn verbrannten Abfälle um knapp 10 % hervor. Da es bei den Betrachtungen und Bilanzen dieser Studie um Siedlungsabfälle und gemischte Gewerbeabfälle geht, ist das anlageninterne Recycling von Produktionsabfällen, das in diesen Aufstellungen mit einbezogen wurde, hier nicht von Bedeutung.

Tabelle 3.1 Übersicht der wichtigsten Verwertungswege für Kunststoffabfälle im Jahr 2007 nach [INTECUS, 2012]

	Destatis 2007	
	Mio. Mg	%
Gesamt	7,8	100
MVA	3,5	45
Recycling	1,6	21
energ.+sonst. Verw.	1,3	17
Export	0,9	12
Beseitigung	0,6	8

Tabelle 3.1 zeigt, dass nach DeStatis 2007 aus den Post Consumer-Abfällen etwa 3,5 Mio. Mg Kunststoffe in der MVA verbrannt wurden und nur 1,6 Mio. Mg recycelt wurden. Dies ist schon unter den heutigen Rahmenbedingungen aus Sicht des Klimaschutzes kontraproduktiv. Wenn man die Daten von CONSULTIC unterstellt, oder bei der Auswertung aktueller DeStatis Statistiken in Zusammenhang mit Ergebnissen aus zukünftigen Untersuchungen¹³ zu den Kunststoffgehalten im Restmüll und gemischten Gewerbeabfällen ebenfalls etwas rückläufige Werte für den Anteil in der MVA zu erkennen sein, ist die Situation etwas weniger kritisch, die Grundaussage bleibt aber die Selbe¹⁴.

Trotz oder gerade wegen des hohen Heizwertes und den vergleichsweise niedrigen Wirkungsgraden in Müllverbrennungsanlagen wird die Verbrennung von Kunststoffen in Müllverbrennungsanlagen nicht zum Klimaschutz beitragen. Im Vergleich zu den vermiedenen Emissionen aus eingespartem Strom und eingesparter Wärme verursacht diese Form der energetischen Verwertung zusätzliche Emissionen, da bei Kunststoffen als fossilem „Brenn-

¹³ Um die Konzeption von optimalen Abfallwirtschaftskonzepten auf eine belastbarere Datenbasis zu stellen, ist es dringend erforderlich, die Zusammensetzung der wichtigsten Abfallströme deutschlandweit zu erheben!

¹⁴ Den Bilanzen dieser Studie, die allerdings die betroffenen Abfallströme nur z. T. betrachtet und sich ebenfalls nur auf die begrenzt aussagefähige Datenlage zur Zusammensetzung von Abfallströmen beziehen kann, liegt eine Fracht von etwa 2,4 Mio. Mg Kunststoffe je Jahr zugrunde (vergleiche Daten zu Abfallströmen (Kapitel 4.2) und zur Abfallzusammensetzung (Anhang A3).

stoff“ der gesamte Anteil der CO₂-Emissionen klimawirksam ist (Abbildung 3.2). Hausmüll dagegen ist zu einem Anteil von etwa 60 % regenerativer Herkunft und kann deshalb trotz des schlechten Wirkungsgrades von Müllverbrennungsanlagen die eigenen Treibhausgasemissionen durch die Substitution von Strom und Wärme nach heutigen Bereitstellungs-mixen ausgleichen (vgl. auch Kapitel 4). In Abbildung 3.2 wird zur Verdeutlichung dieser Zusammenhänge, die Verbrennung von Kunststoffen in einer durchschnittlichen MVA in Deutschland für die Jahre 2010/2011, 2030 und 2050 bilanziert. Wie in Ökobilanzen üblich werden in dieser Abbildung, wie in allen anderen dieser Studie auch, Belastungen, z.B. die direkten Emissionen und aus den Aufwendungen für Betriebsmittel, insbesondere für die Rauchgasreinigung, mit positiven und Entlastungen (Gutschriften) mit negativem Vorzeichen angegeben. Als Zusammenfassung dieser Aufrechnung von Be- und Entlastungen wird rechts daneben ein Ergebnisbalken gezeigt (hier lila). Ist das Endergebnis positiv, bedeutet dies, dass die Belastungen aus dem Betrieb höher sind als die Entlastungen durch die zur Verfügung gestellte Energie (Strom und Wärme). Die direkten Emissionen hängen dabei von dem Kohlenstoffgehalt ab. Zu welchem Anteil diese wiederum klimawirksam sind, hängt von dem Verhältnis zwischen fossilem und regenerativem Kohlenstoff im Brennstoff ab. Die Höhe der Gutschriften ergibt sich im Wesentlichen aus dem Energiegehalt - Heizwert H_u - der Abfälle und dem Nettowirkungsgrad – η - (z.B. produzierte Menge Strom abzüglich des Eigenbedarfs für den Stromwirkungsgrad).

Die Ergebnisse zeigen, dass die Verbrennung von Kunststoffen in einer durchschnittlichen MVA schon unter heutigen Randbedingungen der Energiebereitstellung, bei ansonsten günstigen Annahmen für die MVA¹⁵, zu erheblichen Klimalasten führt. Werden die Ziele der Energiewende wie in Kapitel 2 beschrieben erreicht und in Kapitel 4 bilanziert, nimmt die Klimabelastung durch die energetische Nutzung der Kunststoffe in der Grundlast wegen der sinkenden Gutschriften des Strommixes und schlechten mittleren Wirkungsgrade der MVAn noch deutlich zu.

¹⁵ Da die Müllverbrennung in der Grundlast also nicht flexiblen Strom bereitstellt, ist die hier gewählte Stromgutschrift für 2010/2011 von 0,7 kg/kWh gegenüber dem durchschnittlichen Mix von 0,6 kg/kWh „großzügig“ gewählt. Zudem wurde ein (zu) hoher regenerativer Anteil durch organische Verschmutzungen angesetzt und der Wassergehalt in der Folienfraktion vernachlässigt. Die Annahmen zu den beispielhaften Berechnungen in diesem Kapitel entsprechen nicht exakt den Bilanzvorgaben in Kapitel 4, sondern wurden für die prinzipielle Darstellung vereinfacht und bewusst in Bezug auf Recycling sehr konservativ und in Bezug auf die Verbrennung optimistisch gewählt. Die Entwicklung der Strommixe entspricht den Angaben in Kapitel 2.

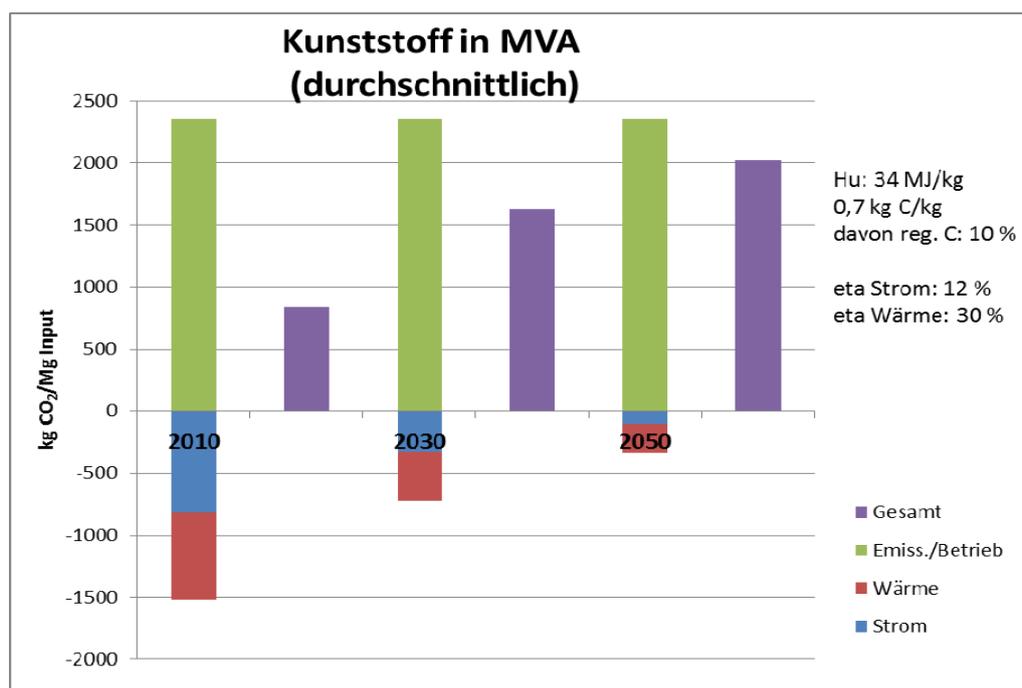


Abbildung 3.2 Vergleich der Klimaauswirkungen der energetischen Verwertung von Kunststoff in einer durchschnittlichen MVA heute (2010/2011), 2030 und 2050 bei sinkenden Stromgutschriften aufgrund der beschriebenen Veränderung der Strommixe

Aber auch Anlagen mit deutlich höherem - in der Praxis in Deutschland nur vereinzelt realisiertem - Wirkungsgrad (besonders effektive MVAn und EBS-HKW), würden die Emissionen der Kunststoffverbrennung durch die Bereitstellung von Strom und Wärme heute allenfalls ausgeglichen und werden unter den Bedingungen einer zunehmend auf regenerativer Energie basierenden Strom- und Wärmewirtschaft erheblich zu den Emissionen an Treibhausgasen beitragen (Abbildung 3.3).

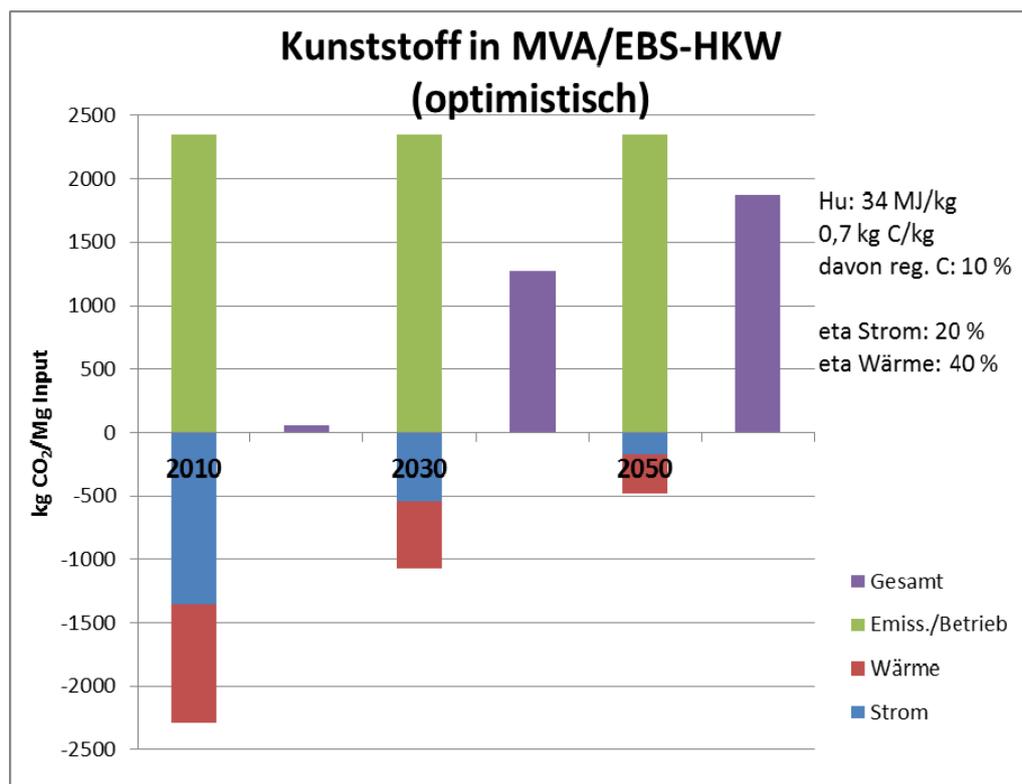


Abbildung 3.3 Vergleich der Klimaauswirkungen der energetischen Verwertung von Kunststoff in sehr effizienten MVAn und EBS-HKW heute (2010/2011), 2030 und 2050

Dagegen wird das Recycling von Kunststoffen, das heute schon - zusätzlich zu den wichtigen Beiträgen zur Ressourcenschonung – durch die Bereitstellung von Sekundärkunststoffen erhebliche Beiträge zum Klimaschutz leistet, unter den zukünftigen Rahmenbedingungen seinen Beitrag noch erheblich steigern (Abbildung 3.4).

Selbst unter sehr konservativen Annahmen (sehr hoher Aufbereitungsaufwand durch die beispielhafte Wahl von Folien und Vernachlässigung der energetischen Nutzung der Aufbereitungsverluste) zeigt das Recycling von Kunststoffen relevante, wegen der zukünftig ökologisch günstigeren Bereitstellung des Stroms für die Aufbereitung zunehmende Beiträge zur Klimaschutz. Als Zusatznutzen trägt das Recycling noch zur Vermeidung der Emissionen aus der Verbrennung von Kunststoffen bei.

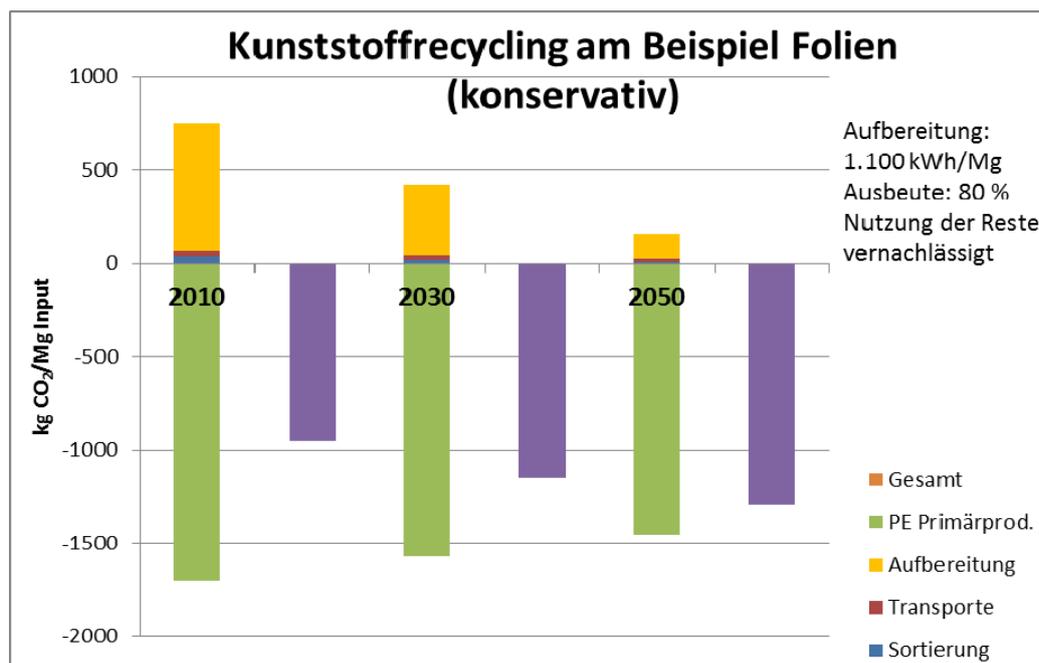


Abbildung 3.4 Vergleich der Klimabilanz des Recycling von Kunststofffolien unter den Rahmenbedingungen eines sich wandelnden Energiemarktes

Deshalb ist eine konsequente Umsetzung der Abfallhierarchie nach dem Kreislaufwirtschaftsgesetz und der europäischen Rahmenrichtlinie sowie die Förderung von hochwertigem (Kunststoff)Recycling ein sinnvoller und wichtiger Beitrag zum Klimaschutz, besonders unter den sich ändernden Rahmenbedingungen der Energiewende.

3.1.2 Verwertung gemischter Gewerbeabfälle

Die Datenlage bezüglich des Umgangs mit gemischten Gewerbeabfällen ist deutlich schlechter als bei Haushaltsabfällen. Die Erkenntnisse einer Studie von u.e.c. Berlin für das Umweltbundesamt aus dem Jahr 2011 [Dehne et al. 2011] beziehen sich auf die Situation im Jahre 2007. In diesem Jahr wurden in Deutschland etwa 6,4 Mio. Mg/a getrennt vom Hausmüll erfasste, gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle an etwa 500 Entsorgungsanlagen angeliefert. Davon waren

- ca. 4,3 Mio. Mg/a „Hausmüllähnliche Gewerbeabfälle, getrennt vom Hausmüll angeliefert oder eingesammelt“ (Abfallschlüssel (AS) 20030102) und
- ca. 2,1 Mio. Mg/a „gemischte Verpackungen, nicht differenzierbar“ (AS 15010600).

Die Gewerbeabfälle verteilten sich 2007 demnach wie folgt auf die Entsorgungsanlagen:

Deponien	0,2 %
Energetische Abfallbehandlungsanlagen	46,8 %
(Mechanisch) biologische Behandlungsanlagen	5,9 %

Schredderanlagen	0,7 %
Sortieranlagen	43,2 %.

Sortieranlagen, die im Vergleich zu LVP- Sortieranlagen deutlich niedrigere technische Standards aufweisen, nehmen neben Gewerbeabfällen auch Sperrmüll, Bau- und Abbruchabfälle und Wertstofffraktionen wie PPK an. Die Produktpalette ist nicht einheitlich. Soweit nicht metallische Fraktionen aussortiert werden, erfolgt dies nach rein betriebswirtschaftlichen Aspekten (häufig: Kunststoff-Großemballagen, Großfolien, Pappen). Beim Output kann nicht zwischen Abfällen verschiedener Herkunft unterschieden werden. Daher ist eine exakte Auskunft über den Anteil an Gewerbeabfällen, die einer stofflichen Verwertung zugeführt werden, nicht möglich. Aus verschiedenen Erhebungen und Befragungen bei Sortieranlagenbetreibern schließen die Gutachter, dass etwa 17 % des Inputs in die stoffliche Verwertung gehen [Dehne et al. 2011]. Dies sind überwiegend Holz, Metalle, PPK und Kunststoffe. Bezogen auf die etwa 2,77 Mio. Mg gemischte Gewerbeabfälle, die jährlich in Sortieranlagen landen, ergibt dies eine Menge von 0,47 Mio. Mg/a.

Die Wertstoffpotenziale aus gemischten Gewerbeabfällen sind nicht bekannt. Eine grobe Abschätzung von [Dehne et al. 2011], die auf alte Erhebungen aus den 1990er Jahren und auf vereinzelt aktuellen Analysen basiert, kommt in der Summe für PPK, Kunststoffe, Holz und Metalle auf etwa 50 %. Daraus leitet sich ein theoretisches Gesamtpotenzial an Sekundärrohstoffen von etwa 3,2 Mio. t/a ab, das derzeit nur zu rund 15 % ausgeschöpft wird. Das bisher ungenutzte Potenzial von etwa 2,7 Mio. Mg/a übersteigt damit die Menge, die durch die Erfassung der Wertstoffe aus Abfällen aus privaten Haushaltungen und „vergleichbaren Anfallstellen“ nach aktuellen Prognosen erfasst werden kann.

Gemischte Gewerbeabfälle sollten nicht in eine gemeinsame haushaltsnahe Wertstoffeffassung von Verpackungen und StNVP einbezogen werden. Dies wurde von Teilnehmern des Planspiels zur Wertstofftonne als Erfahrungen aus der Praxis eingebracht. Die Teilnehmer sprachen sich einvernehmlich für eine Beibehaltung des derzeitigen Anwendungsbereichs „Abfälle aus privaten Haushaltungen und vergleichbaren Anfallstellen“ aus [Öko-Institut/Team Ewen 2011].

Die Wertstoffeffassung aus Gewerbeabfällen sollte deutlich gesteigert werden. Soweit sinnvoll, sollten Gewerbeabfälle getrennt gesammelt bzw. vorbehandelt werden. Hierauf sollte nur bei Vorliegen besonderer Umstände verzichtet werden. In der anstehenden Neuregelung der Gewerbeabfallverordnung (GewAbfV) sollten entsprechende Vorgaben berücksichtigt werden.

Darüber hinaus sollten Verpackungen aus dem Gewerbe (derzeit nach [Dehne et al. 2011 2,1 Mio. t/a) in den Geltungsbereich der neuen Wertstoffverordnung - wie schon derzeit in der VerpackV - aufgenommen werden. Die Wertstoffquoten sowie die Kontrollen, die für Verpackungen und StNVP aus haushaltsnahen und vergleichbaren Anfallstellen vorgegeben werden, sollten auch für die Verpackungen aus dem Gewerbe gelten.

In der Klimabilanz in Kapitel 4 werden die gemischten Gewerbeabfälle der Abfallschlüssel AS 20030102 und AS 15010600 berücksichtigt. Die Berücksichtigung weiterer Gewerbeabfälle lässt die derzeitige Datenlage nicht zu und ist nicht Betrachtungsgegenstand dieser Studie.

3.1.3 Getrennte Erfassung von Elektrokleingeräten

Elektrokleingeräte werden heute noch in großem Umfang in der Restmülltonne entsorgt. Der Gehalt im Restmüll liegt nach verschiedenen Literaturangaben zwischen ein und zwei kg je Einwohner und Jahr. Aus Sicht des Ressourcen- und Klimaschutzes ist deren getrennte Erfassung und hochwertige stoffliche Verwertung dringend geboten. Eine generelle Miterfassung in der Wertstofftonne ist nicht empfehlenswert [vgl. z.B. Öko-Institut/Team Ewen 2011, HTP/Cyclos 2011], da dies zu unerwünschten Schadstoffströmen in die Wertstofffraktionen aus den Leichtverpackungen führen würde. Derzeit werden verschiedene Erfassungskonzepte als spezielle Bring- oder Holsysteme hierfür getestet und Pfand und Leasingansätze diskutiert [Hagelüken 2014; Dornbusch 2013; ATUS/INFA 2007].

Für Elektrokleingeräte ergeben sich nach [Öko-Institut 2008 und IFEU 2005] durch die eingesparte Primärherstellung der recycelten Grundmetalle eine Nettogutschrift von etwa 2.600 kg CO₂eq/Mg Elektrokleingeräte.

Der positive Effekt durch die verringerte Schadstoffzufuhr, insbesondere an Schwermetallen, in die Müllverbrennungsanlage [vgl. z.B. ATUS/INFA 2007] kann in einer reinen Klimabilanz nicht erfasst werden. Für die über die Grundmetalle (Eisen, Aluminium und Kupfer) hinausgehende Nutzung von Edelmetallen und seltenen Erden [Hagelüken 2013; Hagelüken 2014; Hagelüken/Buchert 2008] lässt die Datenlage derzeit eine Bilanz in der hier erforderlichen Detailschärfe nicht zu. Deshalb wird mit dem angesetzten Emissionsfaktor der untere Bereich der tatsächlichen Effekte einer getrennten Erfassung und hochwertigen Verwertung von Elektrokleingeräten dargestellt.

In den optimierten Szenarien für 2030 und 2050 wird von einer getrennten Erfassung und Verwertung von 120.000 Mg/a Elektrokleingeräten (knapp 1,5 kg/Einwohner bei ca. 81 Mio. Einwohner) ausgegangen.

3.2 Optimierung des Umgangs mit Abfallbiomasse

Wie in Kapitel 2 ausgeführt, wird eine optimale Nutzung der Biomasse aus Abfällen und Rückständen einen wesentlichen Beitrag zur Energiewende leisten müssen, da die Nachteile der energetischen Nutzung von Anbaubiomasse damit umgangen werden können.

Da auch die stoffliche Nutzung großer Teile der Abfallbiomassen einen wesentlichen Beitrag zum Umweltschutz leisten, wird die Kaskadennutzung von Abfallbiomassen aus Klima- und Ressourcenschutz am besten bewertet [Öko-Institut/IFEU 2010, Witzenhausen Institut 2010, Öko-Institut/IFEU 2005b; Öko-Institut et al. 2004; IFEU/AHU 2012; IFEU et al. 2011; bifa 2013]. Dabei wird zunächst Biogas in einer Vergärungsanlage produziert, danach der Gärrest kompostiert und als Ersatz von mineralischem Dünger und Torf genutzt. Die stoffliche

Nutzung von Bio- und Grünabfall - ohne vorherige Nutzung des Energieinhalts - weist eine etwa ausgeglichene Klimabilanz auf. Durch die Kaskadennutzung von Bioabfällen und eine stoffstrombezogenen Nutzung von Grünabfällen (Verbrennung des holzigen Anteils, Vergärung der Mittelfraktion und Kompostierung des Rests) können flexible Brennstoffe in Form von Biogas und festen Biomassebrennstoffen bereitgestellt werden (vgl. Kapitel 4). Die genauen Trennschnitte und Verteilungszahlen hängen von den verfolgten Konzepten ab und können zusätzlich im Jahresverlauf unterschiedlich konzipiert werden. Je nach Zusammensetzung der Grünabfälle und Schwerpunktsetzung beim Konzept sind Verteilungen zwischen Grob-, Mittel- und Feinfraktion von etwa 25/25/50 zu erwarten. Es gibt auch Konzepte, die nur auf die brennbare Fraktion abzielen und den Rest in eine Kompostierung geben. Dann liegt die Verteilung etwa bei 30/70 zwischen Grob- und Feinfraktion [vgl. auch IFEU et al. 2011].

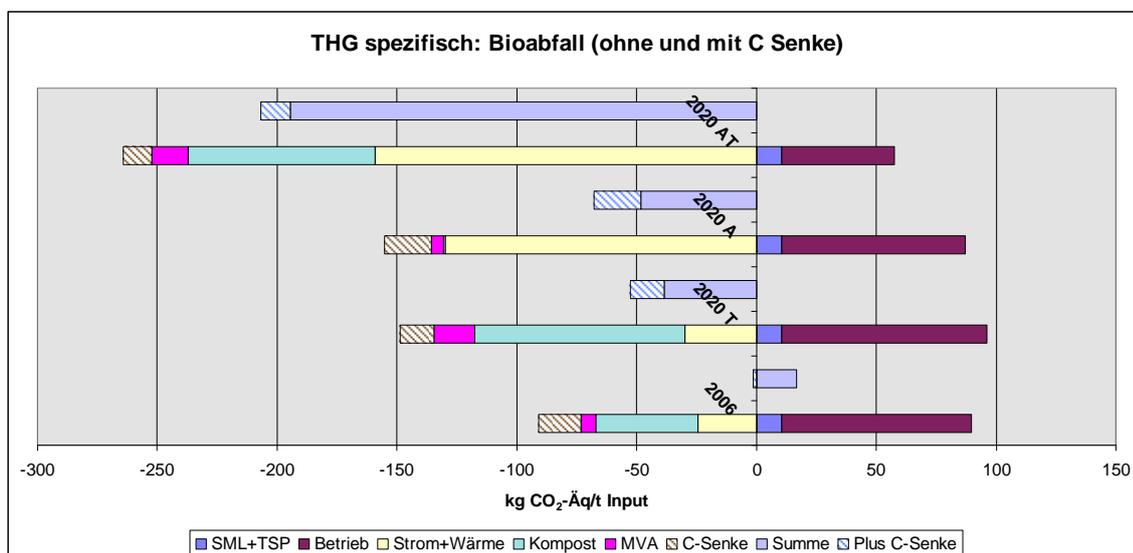


Abbildung 3.5 Spezifische THG-EF für die Bioabfallverwertung (Biotonneninhalte) mit und ohne Berücksichtigung der C-Senke¹⁶, aufgeschlüsselt nach wichtigen Beiträgen. [Öko-Institut/IFEU 2010]

Bei der Kaskadennutzung bzw. dem Betrieb der dazu gehörigen Vergärungsanlagen bestehen noch erhebliche Optimierungspotenziale. Dies betrifft insbesondere die Vermeidung von Treibhausgasemissionen (insbesondere Methan), aber auch die Betriebsführung in Hinsicht auf die Gasausbeuten. Abbildung 3.5 zeigt die Auswirkungen einer Ausweitung der Vergä-

¹⁶ Mit C-Senke wird der Kohlenstoffteil beschrieben, der beim Wachstum der Pflanzen aus dem CO₂ der Luft gebunden wurde und innerhalb des Betrachtungszeitraums (hier 100 Jahre) nicht abgebaut wird. Dieser stellt insofern eine Senke für CO₂ dar. Die Frage, ob diese Senke bei Klimabilanzen berücksichtigt werden soll oder nicht, wird unterschiedlich bewertet. Deshalb sind die Ergebnisse hier mit und ohne C-Senke dargestellt.

rungskapazitäten von 15 % (in 2006) auf 80 % (Szenario 2020 A) und eine Optimierung der technischen Rahmenbedingungen (Szenario 2020 T) sowie der Kombination aus beidem (Szenario 2020 AT) bei der Bioabfallverwertung. Die Rahmenbedingungen außerhalb der Kreislaufwirtschaft, insbesondere die Veränderung des Strommixes, wurden bei dieser Studie im Zeitverlauf nicht verändert [Öko-Institut/IFEU 2010].

Insbesondere die Aufbereitung von Biogas zu Erdgasqualität bietet eine gute Möglichkeit, einen hochwertigen Brennstoff für eine dringend benötigte räumlich (bessere Wärmenutzung) und zeitlich flexible Nutzung für kurzzeitige Kapazitätsengpässe bereitzustellen [IFEU et al. 2011].

3.3 Flexibilisierung der Energiebeiträge aus der Kreislaufwirtschaft

Auch bei noch so guter und intensiver Umsetzung von Bemühungen zur Förderung des Recyclings, bleiben Restgehalte an fossilen Abfällen, die auf eine andere Art genutzt werden müssen. Besonders geeignet ist hierfür die Mitverbrennung in Industrieprozessfeuerungen, da dort mit hohem Wirkungsgrad fossile Brennstoffe ersetzt werden. Daneben sollten diese Abfallfraktionen, wie in Kapitel 2 ausgeführt, insbesondere zur Bereitstellung von flexiblem Strom eingesetzt werden, weil hierdurch zusammen mit regenerativen Brennstoffen der notwendige Ersatz von fossilen Brennstoffen möglich ist.

Unter den Rahmenbedingungen der Energiewende wird auch bei der Verbrennung von gemischtem Restmüll in einer - in der Grundlast betriebenen - MVA nur noch mittelfristig ein Ausgleich der Betriebsemissionen durch die Gutschriften der Energiebereitstellung möglich sein (Abbildung 3.6)¹⁷.

¹⁷ Die Grundlagen dieser Berechnungen sind am Beispiel von Abbildung 3.2 ausführlich beschrieben. Der einzige Unterschied ist, dass jetzt das Verbrennen von gemischtem Restmüll bilanziert wurde und in Abbildung 3.2 lediglich die Fraktion Kunststoffabfälle betrachtet wurde.

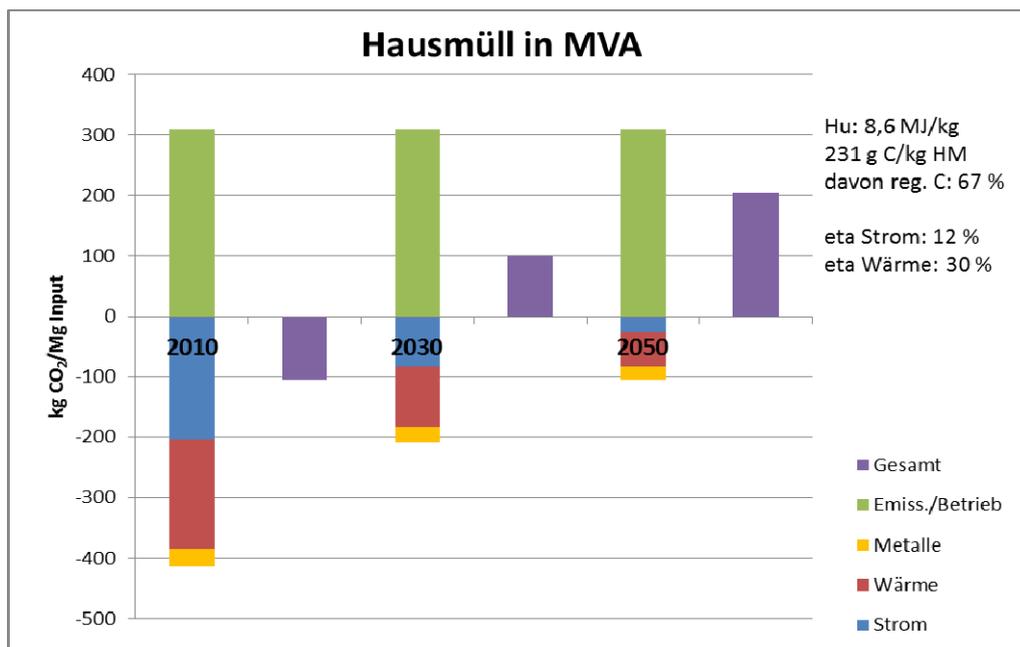


Abbildung 3.6 Vergleich der Klimaauswirkungen der energetischen Verwertung von Restmüll in einer durchschnittlichen MVA heute (2010/2011), 2030 und 2050

Durch die Herstellung von flexiblen und qualitativ hochwertigen Ersatzbrennstoffen könnte eine bessere Ausnutzung der heizwertreichen Fraktion der Abfälle erreicht werden.

Abbildung 3.7 zeigt jedoch, dass auch dieser Weg - beim Betrieb der EBS-HKW in der Grundlast - zukünftig keinen Beitrag zum Klimaschutz oder zur Energiewende verspricht.

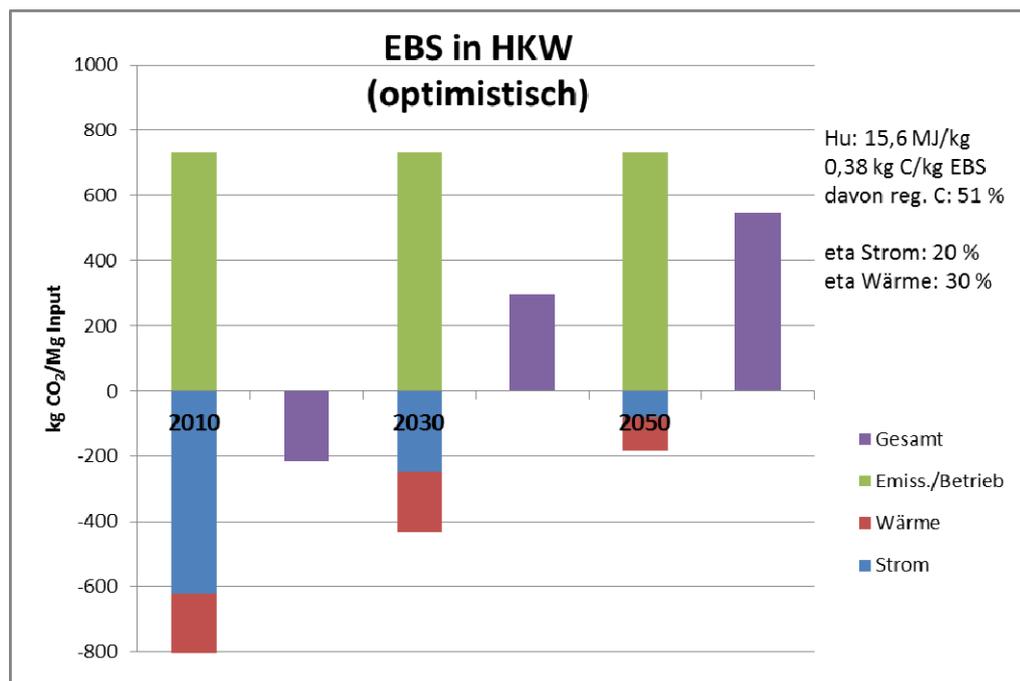


Abbildung 3.7 Vergleich der Klimaauswirkungen der energetischen Verwertung von Kunststoff in EBS-HKW heute (2010/2011), 2030 und 2050

Deshalb ist nur die konsequente Entnahme der fossilen Wertstoffe für das Recycling in Verbindung mit einer gezielten Aufarbeitung der nicht verwertbaren Reste zu hochwertigen, lager- und transportfähigen (also flexiblen) sowie schadstoffarmen Ersatzbrennstoffen zukunftsfähig. Diese Ersatzbrennstoffe sollten fossile Energieträger mit hohem Wirkungsgrad ersetzen. Dies ist durch die Mitverbrennung in industriellen Produktionsprozessen, die Bereitstellung von Prozessdampf in EBS-Heizwerken¹⁸ oder in flexiblen Kapazitätskraftwerken möglich.

Hierzu ist eine technisch hochwertige Aufbereitung (ggf. Positiv-Sortierung bzw. Abtrennung schadstoffhaltiger Bestandteile) und Weiterverarbeitung (z. B. Pelletierung) erforderlich. Der damit verbundene Aufwand rechnet sich ökologisch und muss zur Unterstützung der Energiewende auch wirtschaftlich rentabel gestaltet werden. Durch die im Rahmen des Recyclings ohnehin erforderlichen Sortier- und Aufbereitungsschritte ist die Kombination aus hochwertigem Recycling und der Bereitstellung flexibler, ebenfalls qualitativ hochwertiger Brennstoffe am ehesten erfolversprechend.

¹⁸ Die Prozessdampfbereitstellung muss im Normalfall nicht flexibel gestaltet werden, da der Bedarf unabhängig von der Stromproduktion kontinuierlich anfällt.

4 Klimabilanz der zukünftigen Potenziale im Vergleich zu 2011

In der folgenden Bilanz wird in fünf Szenarien die Klimawirksamkeit der Kreislaufwirtschaft in den Jahren 2011, 2030 und 2050 bilanziert. Für alle Szenarien in 2030 wird die Erreichung der in der Energiewende festgeschriebenen Klimaschutzziele unterstellt. Die Bilanz basiert dabei auf dem Szenario MS, wonach das Mindestziel, eine Reduktion der Klimagasemissionen bis 2050 um 80 %, angesetzt wird:

- „Status Quo“ Szenario 2011,
- „Status Quo“ Szenarien 2030 und 2050, in denen bezüglich dem Umgang mit Abfällen das „Weiter so“ unter heutigen Rahmenbedingungen der Abfallpolitik und -wirtschaft beschrieben wird, aber die zukünftigen Randbedingungen der Energiewirtschaft, die sich insbesondere bezüglich der Emissionsfaktoren für die durchschnittliche Bereitstellung von Strom und Wärme auswirken (vgl. Kapitel 2.3 und Anhang Kapitel A 3.2), berücksichtigt werden.
- Optimierte Szenarien 2030 und 2050, in denen die beschriebenen Optimierungen bezüglich Recycling, Flexibilisierung und Nutzung von Abfallbiomasse umgesetzt werden. Dazu gehört vor allem die Steigerung bzw. Ausgestaltung der getrennten Erfassung von Wertstoffen (LVP, StNVP, PPK, Bio- und Grünabfälle sowie Elektrokleingeräte). Außerdem wird die Umstellung auf eine stoffstromorientierte Restmüllbehandlung mit einem Schwerpunkt auf die Gewinnung von flexiblen Ersatzbrennstoffen bilanziert.

Verbesserung der Wirkungsgrade der Verbrennungstechnologien (MVA, EBS-HKW und Holz-HKW) werden in allen zukünftigen Szenarien gleich angesetzt (vgl. Anhang Kapitel A 3.3.3).

4.1 Methodik

Die Ermittlung und Bewertung der Klimaschutzpotenziale folgt der Methode der Ökobilanz in der Kreislaufwirtschaft. Die Ökobilanz ist das einzige Umweltbewertungsinstrument, das in der Lage ist, komplexe Systeme bezüglich ihrer ökologischen Auswirkungen zu bewerten. Die grundsätzliche Eignung des Ökobilanzansatzes zur Bewertung von Fragestellungen der Kreislaufwirtschaft wurde schon 1998 durch ein UBA Forschungsvorhaben methodisch untermauert [IFEU 1998] und durch eine Reihe von Arbeiten bestätigt. Die Ökobilanz ist zudem das erste entsprechende Handwerkszeug, das im internationalen Rahmen wissenschaftlich entwickelt und in seinen Grundsätzen seit 1993 national und international genormt und weiterentwickelt wurde (DIN ISO 14040 und 14044). Um wie in der Kreislaufwirtschaft mehrere Produkte oder Dienstleistungen gleichzeitig betrachten zu können, kann die Ökobilanz zur sogenannten Stoffstromanalyse erweitert werden. Sie löst sich damit von der detailgetreuen Abbildung einzelner Produkte zugunsten einer übergreifenden Betrachtung ganzer Sektoren oder Handlungsfelder.

Die Stoffstromanalysen in [Öko-Institut/IFEU 2010 und Öko-Institut/HTP 2012], die dieser Arbeit zugrunde liegen, wurden mit Hilfe von Excel-Modellen und den Software-Tools Umberto® (www.umberto.de) und GEMIS (www.gemis.de) durchgeführt. Umberto® und GEMIS erlauben die Modellierung der Stoff- und Energieumwandlungen aller in der Kreislaufwirtschaft und der Stoffstromwirtschaft vorkommenden Prozesse in der jeweils notwendigen Detaillierungstiefe. Die Stoffstromdaten basieren dabei auf Ökobilanzdaten, die teilweise in den genannten Rechentools hinterlegt sind, überwiegend aber aus Datenbanken wie ecoinvent und Informationen von Industrieverbänden (wie z. B. APME, FEFCO, GDA) stammen.

Die Bilanzmethode ist im Anhang in Kapitel A 1 ausführlicher beschrieben.

4.2 Abfallströme

Die der Bilanz zugrunde gelegten Abfallströme für die Status Quo Szenarien 2011, 2030 und 2050, sowie die zugrunde gelegten Veränderungen für die optimierten Szenarien sind in Tabelle 4.1 dargestellt. Eine ausführlichere Beschreibung der Herleitung der verschiedenen Abfallströme ist im Anhang in Kapitel A 2 zu finden.

Als wesentlich ist der Rückgang der direkten Mengen in die MVA im Grundlastbetrieb von über 12,5 Mio. Mg/a. Die verbleibenden Grundlastbetriebe sollen „nur noch“ schadstoffbelastete Abfälle beseitigen. Zunahmen verzeichnen M(B)An, die eine Aussortierung von Wertstoffen mit einer Herstellung von hochwertigem, flexibel nutzbarem Brennstoff verbinden, sowie die getrennte Erfassung von LVP, PPK, Altholz und Bio- und Grünabfällen.

Bei den dargestellten Mengen in Tabelle 4.1 handelt es sich um die Verteilung auf die Erstbehandlung. BA Kompostierung beschreibt beispielsweise den Input in reine Kompostierungsanlagen, BA Vergärung den Input in Vergärungsanlagen mit anschließender Kompostierung des Gärrestes. Die Abfallströme, die als Sortierreste aus der MBA oder der LVP-Sortierung oder aus der Aufbereitung von Wertstoffen in EBS-HKWn, MVAn oder Zementwerke gelangen, sind ebenfalls nicht aufgeführt. Diese weiteren Flüsse gehen aus Abbildung 4.1 hervor.

Die Siedlungsabfälle und Teile des Gewerbeabfalls (vgl. Abschnitt 3.1.2) sind auf die in Tabelle 4.1 beschriebenen Erstbehandlungstechniken aufgeteilt. Die gemischten Gewerbeabfälle beispielsweise gehen ganz überwiegend in die MVA und M(B)a. Das extra aufgeführte Altholz ist der getrennt erfasste Anteil aus dem Siedlungs- und den Gewerbeabfall.

Bei den der Bilanz zugrunde gelegten Veränderungen der Stoffflüsse wurde ausdrücklich nicht die maximalen Potenziale ausgeschöpft sondern angesichts der Zeiträume realistische Annahmen getroffen, die teilweise noch gesteigert werden können.

Tabelle 4.1 Abfallströme für 2011/2030/2050 (Status Quo) und dem optimierten Szenario für 2030 und 2050

Abfallströme	2011/2030/2050 Status Quo		2030/2050 optimiert		Reduktion Steigerung	
	1.000 Mg/a	%*	1.000 Mg/a	%*	1.000 Mg/a	%**
Deponie	247	0,5%	0	0,0%	-247	-100%
MVA	14.570	26,9%	2.024	3,7%	-12.546	-86%
M(B)An***	6.440	11,9%	12.783	23,6%	6.343	98%
MBA	2.838	5,2%		0,0%	-2.838	-100%
MBS/MPS	1.592	2,9%	12.783	23,6%	11.191	703%
MA	2.010	3,7%		0,0%	-2.010	-100%
Bioabfall****	4.697	8,7%	6.997	12,9%	2.300	49%
BA Kompostierung	3.739	6,9%	1.399	2,6%	-2.340	-63%
BA Vergärung	958	1,8%	5.598	10,3%	4.640	484%
Grünabfall*****	5.015	9,3%	6.015	11,1%	1.000	20%
GA Kompostierung	4.782	8,8%	3.634	6,7%	-1.148	-24%
GA Vergärung	0	0,0%	1.090	2,0%	1.090	-
GA Verbrennung	233	0,4%	1.090	2,0%	857	368%
PPK	8.074	14,9%	9.454	17,4%	1.380	17%
Glas	2.594	4,8%	2.594	4,8%	0	0%
LVP	4.330	8,0%	5.630	10,4%	1.300	30%
LVP	3.440	6,3%	4.140	7,6%	700	20%
Kunststoffe	890	1,6%	1.490	2,7%	600	67%
Metalle	731	1,3%	731	1,3%	0	0%
E-Geräte	590	1,1%	590	1,1%	0	0%
Elektrokleingeräte	0	0,0%	120	0,2%	120	-
Altholz	6.900	12,7%	7.250	13,4%	350	5%
stoffliche Verwertung	1.200	2,2%	1.261	2,3%	61	5%
energetische Verwertung	5.700	10,5%	5.989	11,1%	289	5%
Summe ohne Altholz	47.288	87,3%	46.938	86,6%	-350	-1%
Summe mit Altholz	54.188	100,0%	54.188	100,0%	0	0%

* Bezogen auf Summe mit Altholz

** Prozent Steigerung oder Reduktion. Nicht Änderung der Prozentpunkte! Steigerungen die sich auf einen Ausgangswert von 0 beziehen (Grünabfallvergärung und Elektrokleingeräte) können prozentual nicht angegeben werden.

*** M(B)An für mechanisch (biologische) Anlagen wird wie in [Öko-Institut/IFEU 2010] als Summe aus MBA, MBS, MPS und MA verstanden

**** Dabei handelt es sich um das Biogut aus der Biotonne und Biomassefraktionen, die zusammen mit diesem verwertet werden.

***** Dabei handelt es sich um Garten-, Parkabfälle u. ä. Biomassefraktionen, die getrennt von der Biotonne erfasst und verwertet werden.

Abweichungen in den Summen ergeben sich durch Rundungsungenauigkeiten.

4.3 Sachbilanzdaten

Die Bilanz zielt im Wesentlichen auf die Auswirkungen der Energiewende auf die Abfallwirtschaft ab. Wie beschrieben, betrifft dies insbesondere die Veränderungen der Gutschriften für bereitgestellte(n) sowie die Lastschriften für verbrauchte(n) Strom und Wärme infolge der Veränderungen der durchschnittlichen Strom- und Wärmemixe sowie der damit verbundenen Emissionsfaktoren. Ebenso wird berücksichtigt, dass bei der Anrechnung von Stromgutschriften zwischen Grundlast- und flexiblem Strom zu unterscheiden sind (vgl. Kapitel 2.3 und Anhang Kapitel A 3.2).

Der Einfluss dieser Veränderungen wird auch bei den sonstigen Gutschriften soweit möglich berücksichtigt. Die Gutschriften für das Bereitstellen von Sekundärrohstoffen ist in dem Maße von der Veränderung der Emissionsfaktoren für Strom und Wärme abhängig, wie die Primärproduktion durch die Energiebereitstellung beeinflusst wird. Es zeigt sich jedoch, dass bei den Emissionsfaktoren für die Primärherstellung energieaufwändiger Materialien heute schon meist besonders günstige Energiemixe berücksichtigt werden, so dass der Einfluss auf die Gutschriften für Sekundärrohstoffe begrenzt bleibt (vgl. Anhang Kapitel A3.7).

Nähere Angaben zur Sachbilanz siehe Anhang in Kapitel A 3.

4.4 Gegenüberstellung der Ergebnisse

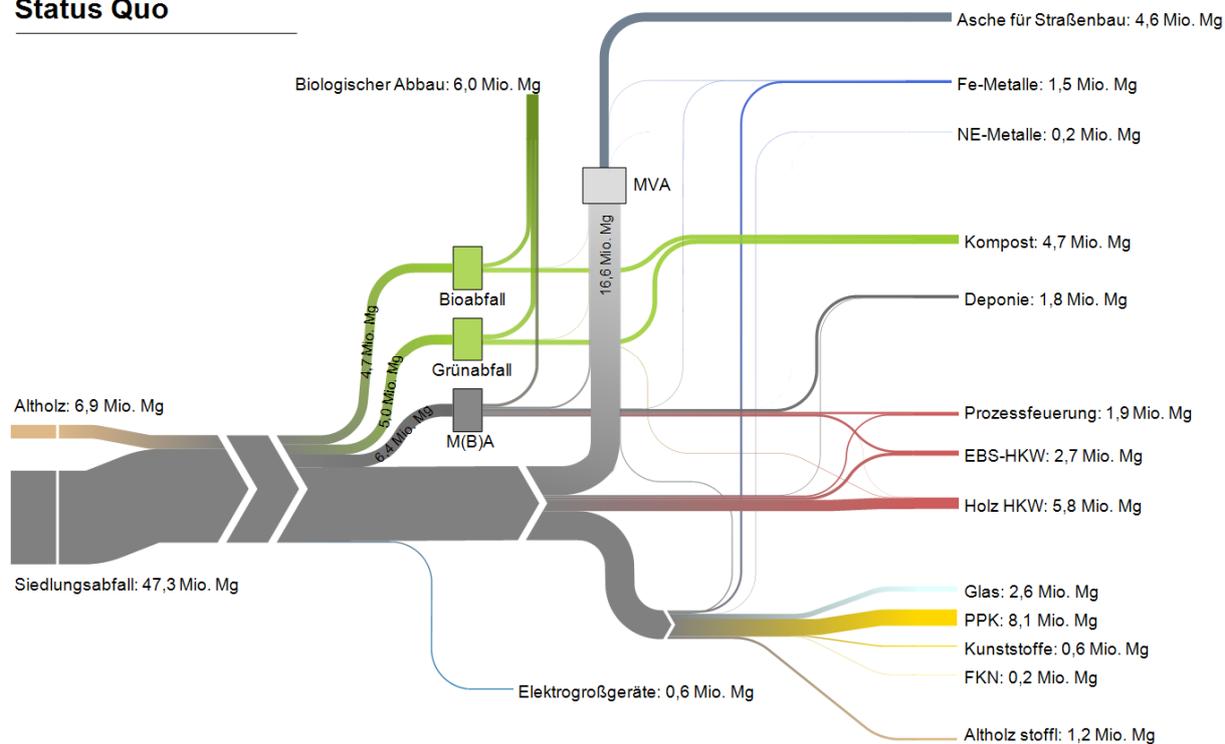
In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse in Bezug auf die Lenkung der Stoffflüsse, der spezifischen Emissionsfaktoren sowie der Gesamtergebnisse als Beitrag zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen dargestellt.

4.4.1 Lenkung der Stoffflüsse

Durch die zusätzliche getrennte Erfassung von Wertstoffen und die Schwerpunktsetzung auf eine stoffstromorientierte Restmüllbehandlung wird die Lenkung der Stoffflüsse vorgegeben.

Abbildung 4.1 zeigt die aktuellen Stoffflüsse im Jahr 2011, die in den Status Quo Szenarien für 2030 und 2050 nicht verändert wurden sowie die Stoffflüsse für die optimierten Szenarien. In den optimierten Szenarien wurde das Recycling gesteigert, und damit die Bereitstellung von Sekundärrohstoffen. Im Gegenzug wurde der direkte Input in die MVA deutlich reduziert. Obwohl der Anteil der stoffstromspezifischen Behandlung von Restabfall in M(B)An deutlich zugenommen hat, geht die Deponierung der biologisch vorbehandelten Abfälle noch zurück, da eine Umstellung auf MBS/MPS, mit überwiegender energetischer Behandlung der Reststoffe aus der biologischen oder physikalischen Behandlung unterstellt wird. Als Ergebnis dieser Umlenkung der Restabfälle wird in höherem Umfang qualitativ hochwertiges EBS bereitgestellt, der zusätzlich so aufbereitet wird, dass er flexibel einsetzbar ist.

Abfallstoffströme Status Quo



Abfallstoffströme optimiert

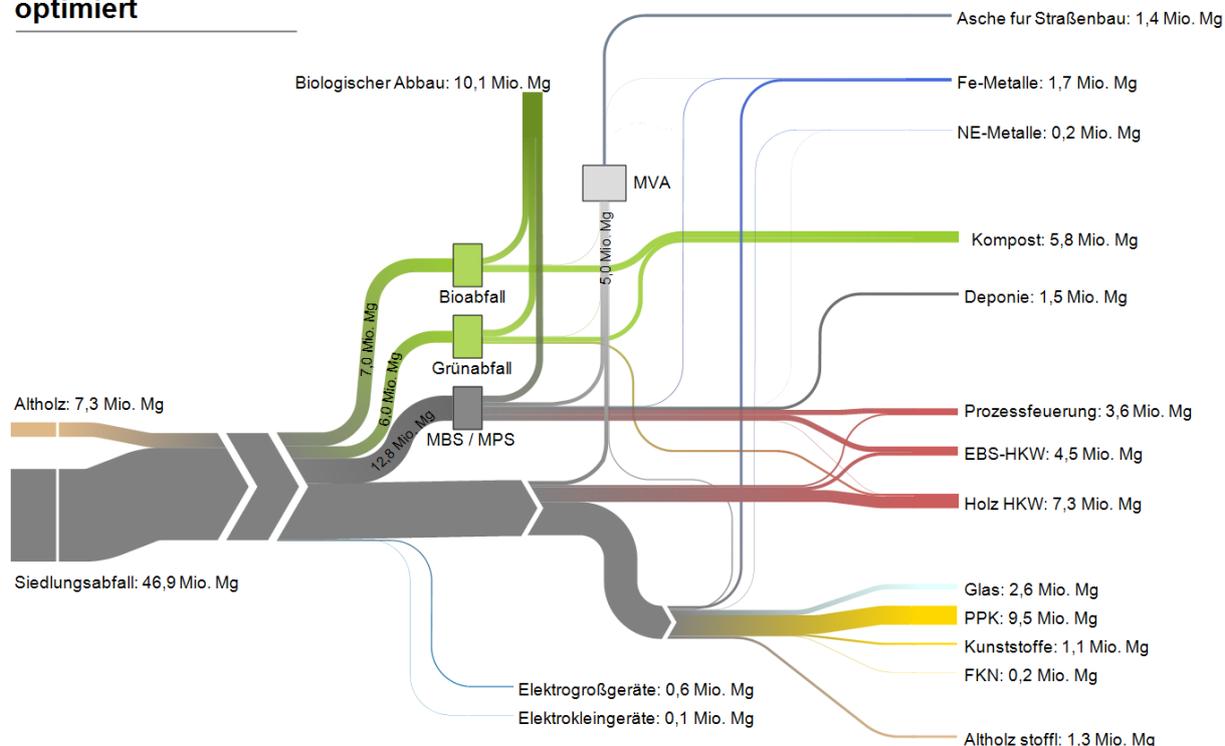


Abbildung 4.1 Stoffflüsse in den Status Quo Szenarien 2011, 2030 und 2050 (oben) sowie in den optimierten Szenarien 2030 und 2050 (unten)

Den Sankey-Diagrammen in Abbildung 4.1 (gerundete Mengen) und in Tabelle 4.2 sind die Wertstofffraktionen zu entnehmen, die den Recyclinganlagen direkt oder nach Aufbereitung zugeführt werden. Diese entsprechen den Nettomengen an Sekundärrohstoffen, die Primärrohstoffe ersetzen und damit auch die ökologischen und sozialen Belastungen, die mit deren Gewinnung und Aufbereitung verbunden sind.

Die Störstoffe aus der Aufbereitung der Wertstoffe sind in den Mengen zur energetischen Verwertung enthalten.

Tabelle 4.2 Bereitgestellte Sekundärrohstoffmengen

	Status Quo 2010/2030/2050	Optimiert 2030/2050
	1.000 Mg	1.000 Mg
PPK	8.142	9.523
FKN*	164	189
Glas	2.590	2.590
NE-Metalle	182	219
Fe-Metalle	1.545	1.709
Kunststoffe	639	1.098
Holz	1.200	1.260
Elektrokleingeräte**	0	120
Elektrogroßgeräte**	590	590
Kompost	4.680	5.840
SUMME	19.812	23.345

* FKN ist im Wesentlichen der PPK-Fraktion zuzuordnen

** eine exakte Aufschlüsselung in Fe-, NE-Metalle und Kunststoffe ist bei diesen Fraktionen nicht möglich

4.4.2 Strombereitstellung

Im Jahr 2050 kann die Kreislaufwirtschaft einen relevanten Beitrag für die Bereitstellung von flexibler Reservekapazität leisten. Die Berechnungen in dieser Studie zeigen, dass die Kreislaufwirtschaft im Jahr 2050 8,7 TWh flexiblen - also einlastbaren Strom – aus der Verwertung von etwa 4,5 Mio. Mg qualitativ hochwertigem EBS, 7,3 Mio. Mg Altholz und etwa 650 Mio. m³ Biogas bereitstellen kann (vgl. Anhang in Kapitel A 3). Um die Ziele des Energiekonzepts zu erreichen (im hier verwendeten Szenario einer Reduktion der Treibhausgase um 80 %), muss die Stromerzeugung zu einem überwiegenden Anteil auf fluktuierende Erneuerbare Energien wie Solar und Wind umgestellt werden. Die Stromerzeugung aus Kraftwerken, deren Einsatz flexibel steuerbar (oder einlastbar) ist, geht aufgrund des verbesserten Netzausbaus, dem vermehrten Einsatz von Speichern und der Anpassung der Nachfrage an die Zeiten mit hohem Stromangebot sehr stark zurück und beträgt im betrachteten Szenario nur noch 89 TWh. Dieser einlastbare Anteil der Stromproduktion wird nur soweit erforderlich aus fossilen Brennstoffen abgedeckt. Zunehmend werden diese durch Biogas, Biomasse (beide vorzugsweise aus Abfällen) und qualitativ hochwertigem EBS (vgl. hierzu auch Kapitel 2.4 und Tabelle 2.1) verdrängt. Übersteigt das Angebot regenerativer Brennstoffe den Bedarf an einlastbarer Stromgewinnung, können zum einen diese vermehrt für andere Anwen-

dungszwecke, wie Herstellung von Treibstoffen, Prozessfeuerungen und Wärmebereitstellung genutzt werden. Insgesamt kann durch die hier dargestellten Maßnahmen der Beitrag der Kreislaufwirtschaft an der flexibel steuerbaren Stromerzeugung auf rund 10 % steigen.

Zusätzlich können nach der Bilanz für das Szenario „2050 optimiert“ durch Ersatzbrennstoffe in Prozessfeuerungen etwa 2 Mio. Mg Steinkohle (oder vergleichbare fossile Brennstoffe) eingespart werden. Da in den meisten Prozessfeuerungen Steinkohle durch gute Sekundärbrennstoffe 1:1 in Bezug auf die Heizwerte ersetzt werden kann, ersetzen z.B. 1.000 kg qualitativ hochwertiges EBS mit einem unteren Heizwert von 16 MJ/kg etwa 550 kg Kohle mit einem unteren Heizwert von 29 MJ/kg (vgl. auch Anhang Kapitel A3).

4.4.3 Spezifische Emissionsfaktoren

Die Gegenüberstellung der spezifischen Emissionsfaktoren in Tabelle 4.3 zeigt, dass die Gesamtlastschrift bzw. –gutschrift der MVA zwischen 2030 Status Quo und 2030 optimiert nicht variiert. Das gleiche gilt für das Jahr 2050. Allerdings führt der Rückgang der Stromgutschriften von einer Nettogutschrift in 2011 über ein ausgeglichenes Ergebnis in 2030 zu einer Nettolastschrift in 2050. Das liegt insbesondere daran, dass die MVA für den bereitgestellten Strom im Grundlastbetrieb sowohl im Status Quo als auch in den optimierten Szenarien die gleichen Gutschriften für Strom und Wärme erhält und auch die Wirkungsgrade gleich hoch angesetzt wurden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass in diesen Ergebnissen auch die Gutschriften für das Metallrecycling aus den MVA-Aschen berücksichtigt sind.

Die M(B)A kann dagegen die spezifischen EF insbesondere durch die Produktion von hochwertigem, flexibel einsetzbarem EBS und dessen effektive Nutzung zum Ersatz von fossilen Brennstoffen noch verbessern. Der damit verbundene Mehraufwand, der mit einer Absenkung der der Stromgutschrift um 10 % abgeschätzt wurde, kann überkompensiert werden.

Tabelle 4.3 Spezifische Emissionsfaktoren für GWP für 2011, 2030, 2050

	2011	2030 Status Quo	2050 Status Quo	2030 optimiert	2050 optimiert
	[kg CO₂eq/Mg]				
Deponie	664	-	-	-	-
MVA	-116	-1	146	-1	146
M(B)An	-207	-194	-135	-428	-393
Bioabfall	20	38	53	-113	-103
Grünabfall	-3	12	27	-30	6
PPK	-758	-924	-926	-983	-1.174
Glas	-475	-445	-420	-445	-420
LVP	-568	-656	-635	-941	-967
Metalle*	-3.047	-3.151	-3.076	-3.151	-3.076
E-Großgeräte	-1.295	-1.295	-1.295	-1.295	-1.295
E-Kleingeräte	-	-	-	-2.603	-2.603
Durchschnitt ohne Altholz	-321	-320	-259	-531	-549
Altholz	-733	-451	-187	-776	-678
Durchschnitt mit Altholz	-374	-337	-250	-569	-571

* Bilanzansatz: Gemisch aus 84 % Fe- und 16 % NE-Metalle

Bei Elektrogroßgeräten wurden keine Änderungen bilanziert. Elektrokleingeräte wurden nur in den optimierten Szenarien getrennt erfasst.

Die Gutschrift für PPK verbessert sich infolge der technischen Verbesserungen im Holzheizkraftwerk, in dem das geschonte Holz genutzt wird¹⁹.

Die Hauptvorteile der Bio- und Grünabfallbehandlung liegen in der Verbesserung der Bodenqualität und Biodiversität und lassen sich bekanntermaßen in reinen Klimabilanzen nur bedingt bewerten [vgl. z. B. IFEU/AHU 2013]. Die getrennte Erfassung ist trotzdem sinnvoll und ökologisch vorteilhaft, da die gewonnenen Wertstoffe Kompost und Biogas wertvolle Beiträge zum Boden-, Klima- und Ressourcenschutz leisten, auch und gerade unter den zukünftigen Rahmenbedingungen der Energiewende.

Die spezifischen durchschnittlichen Emissionsfaktoren je Mg Abfall reduzieren sich für „Status Quo“ in 2030 und 2050 zum Teil erheblich und werden in den optimierten Szenarien gegenüber 2011 deutlich gesteigert.

¹⁹ Da der Strom- und Wärmemix in Schweden infolge des hohen Anteils an Wasserkraft heute schon geringer ist als die für Deutschland bilanzierten Werte in 2030 und 2050, zeigen sich hier keine Unterschiede zwischen „Status Quo“ und optimiert im selben Jahr.

4.4.4 Beitrag zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen

Tabelle 4.4 und Abbildung 4.2 zeigen die Gegenüberstellung der Gesamtergebnisse für 2030. Dabei ist zu erkennen, dass die Endergebnisse, also der Gesamtbeitrag der Kreislaufwirtschaft zur Emissionsvermeidung durch die Behandlung und Verwertung von Siedlungsabfällen und Altholz im Szenario „Status Quo“ 2030 gegenüber 2011 um mehr als 1 Mio. Mg CO₂eq/a auf ca. 18 Mio. Mg CO₂eq/a zurückgeht. Durch die bilanzierten Optimierungsmaßnahmen könnte der Beitrag dagegen um 11 Mio. Mg CO₂eq/a auf 30,7 Mio. Mg CO₂eq/a gesteigert werden. Daraus errechnet sich für das Jahr 2030 ein beachtlicher Unterschied von über 11 Mio. Mg CO₂eq/a zwischen „Status Quo“ und „optimiert“, trotz der auch für den Status Quo schon angesetzten wesentlichen Steigerungen der Wirkungsgrade der verschiedenen Anlagen zur energetischen Verwertung.

Die zusätzliche Emissionsminderung des „Optimierungsszenarios“ gegenüber dem „Status-Quo-Szenario“ von 12,5 Mio. Mg CO₂eq/a in 2030 entspricht etwa 8 % der Emissionen des Verkehrssektors im Jahr 2011 bzw. den durchschnittlichen Emissionen von mehr als einer Million Bürger in Deutschland²⁰.

Tabelle 4.4 Gesamtergebnis GWP 2011 und 2030 und Differenzen zu 2011, mit Angabe der wichtigsten Einzelbeiträge

	2011	2030 Status Quo	Diff zu 2011	2030 optimiert	Diff zu 2011
[1.000 Mg CO₂eq/a]					
Deponie	162	0	-162	0	-162
MVA	-1.691	-14	1.677	-2	1.689
M(B)An	-951	-1.246	-295	-5.473	-4.522
Bioabfall	93	179	85	-788	-882
Grünabfall	-14	61	76	-183	-169
PPK	-6.120	-7.457	-1.337	-9.290	-3.170
Glas	-1.232	-1.155	77	-1.155	77
LVP	-2.100	-2.840	-740	-5.301	-3.201
Metalle	-1.781	-1.842	-61	-1.842	-61
E-Großgeräte	-764	-764	0	-764	0
E-Kleingeräte	-	-	-	-312	-312
Summe	-14.398	-15.078	-680	-25.110	-10.711
Altholz	-5.060	-3.108	1.951	-5.624	-565
Gesamt	-19.458	-18.187	1.271	-30.734	-11.276

²⁰ Im Jahr 2011 betragen in Deutschland die spezifischen Emissionen, ermittelt aus den Gesamtemissionen aller Branchen und der Endverbraucher selbst, geteilt durch die Einwohnerzahl 11 t CO₂eq pro Kopf.

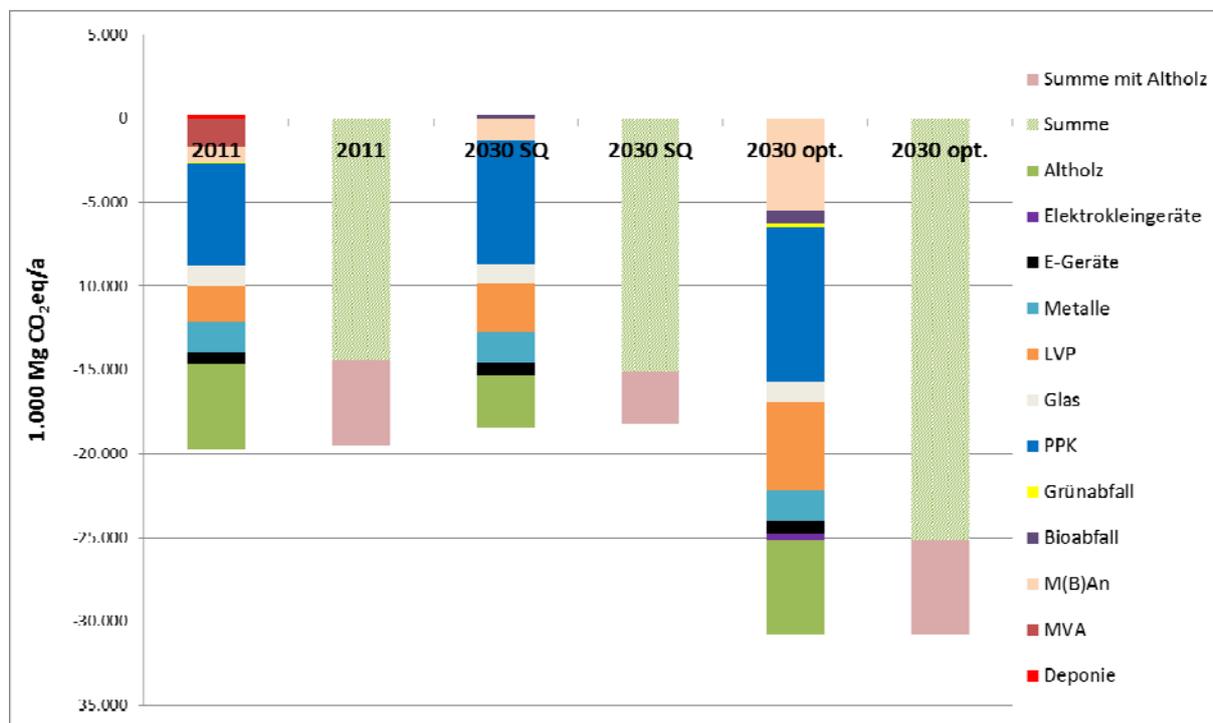


Abbildung 4.2 Gegenüberstellung der Gesamtergebnisse für GWP 2011 (links), 2030 Status Quo (SQ - Mitte) und 2030 optimiert (opt. - rechts), mit Angabe der wichtigsten Einzelbeiträge

Zur Vermeidung von Treibhausgasen tragen insbesondere PPK, M(B)A mit der Verwertung der flexiblen Brennstoffe, LVP und Altholz bei.

Tendenziell ergibt sich für 2050 ein ähnliches Bild, aber erwartungsgemäß mit einem deutlich stärkeren Rückgang des Beitrags zum Klimaschutz in dem Szenario „Status Quo“ von knapp 5 Mio. Mg CO₂eq/a. Das optimierte Szenario erreicht mit 30 Mio. Mg/a etwa den gleichen Wert wie 2030. Dies liegt daran, dass durch die gesunkenen Aufwendungen für die Strombereitstellung im durchschnittlichen Strommix in Deutschland, sowohl die Lastschriften für verbrauchten Strom (z.B. der Stromverbrauch der Sortierung und Aufbereitung) als auch die Gutschriften für bereitgestellten Strom (besonders in der Grundlast) und bereitgestellte Wärme zurückgehen. Diese beiden gegenläufigen Effekte gleichen sich unter den für die Bilanz angesetzten Rahmenbedingungen aus (vgl. hierzu Anhang Kapitel A 2 und A3).

Die Differenz zwischen optimiert und „Status Quo“ beträgt jetzt über 17 Mio. Mg/a.

Die zusätzliche Emissionsminderung des „Optimierungsszenarios“ gegenüber dem „Status-Quo-Szenario“ von 17 Mio. Mg CO₂eq/a in 2050 entspricht etwa 11 % der Emissionen des Verkehrssektors im Jahr 2011, bzw. den durchschnittlichen Emissionen von 1,6 Millionen Bürger in Deutschland.

Der Gesamtentlastungsbeitrag der Kreislaufwirtschaft in den „optimierten“ Szenarien für 2030 und 2050 von knapp 31 Mio. Mg CO₂eq/a entspricht ca. 20 % der Emissionen des Ver-

kehrssektors im Jahr 2011, bzw. den durchschnittlichen Emissionen von 2,8 Million Bürger in Deutschland.

Tabelle 4.5 Gesamtergebnis GWP 2011 und 2050 und Differenzen zu 2011, mit Angabe der wichtigsten Einzelbeiträge

	2011	2050 Status Quo	Diff. zu 2011	2050 optimiert	Diff. zu 2011
[1.000 Mg CO₂eq/a]					
Deponie	162	0	-162	0	-162
MVA	-1.691	2.158	3.849	295	1.986
M(B)An	-951	-866	85	-5.026	-4.074
Bioabfall	93	251	158	-724	-817
Grünabfall	-14	134	149	38	52
PPK	-6.120	-7.474	-1.354	-11.096	-4.976
Glas	-1.232	-1.088	143	-1.088	143
LVP	-2.100	-2.750	-650	-5.447	-3.347
Metalle	-1.781	-1.798	-16	-1.798	-16
E-Großgeräte	-764	-764	0	-764	0
E-Kleingeräte	-	-	-	-312	-312
Summe	-14.398	-12.197	2.201	-25.922	-11.524
Altholz	-5.060	-1.292	3.768	-4.914	146
Gesamt	-19.458	-13.489	5.969	-30.836	-11.378

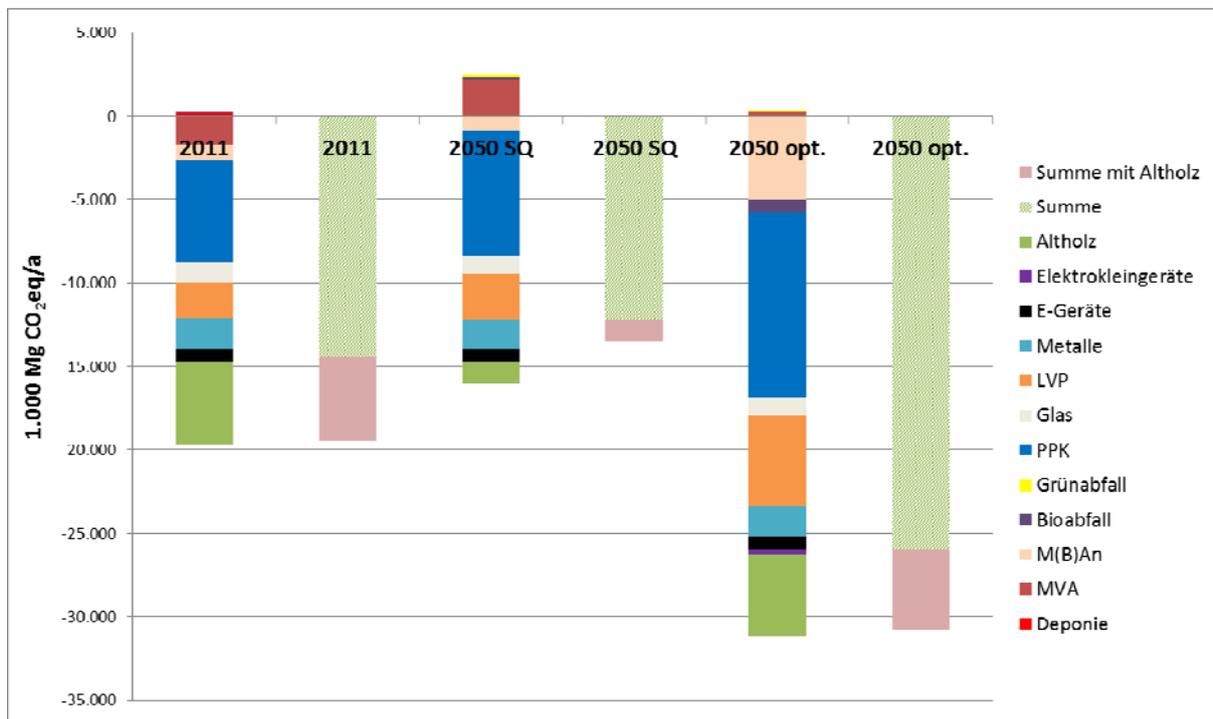


Abbildung 4.3 Gegenüberstellung der Gesamtergebnisse für GWP 2011 (links), 2050 Status Quo (SQ - Mitte) und 2050 optimiert (opt. - rechts), mit Angabe der wichtigsten Einzelbeiträge

Die Ergebnisse zeigen, dass die Kreislaufwirtschaft erhebliche Potenziale zur Erreichung der Klimaschutzziele hat, die aber nur genutzt werden können, wenn die Weichen dafür rechtzeitig gestellt werden.

5 Anreize und Maßnahmen

Um die aufgezeigten erheblichen Potenziale der Kreislaufwirtschaft zur Unterstützung der Energiewende auszuschöpfen, müssen geeignete Anreize gesetzt und Maßnahmen ergriffen werden. Aufgrund der Aufgabenstellung in der Studie werden insbesondere die folgenden drei Bereiche betrachtet:

- Steigerung der Recyclinganteile,
- Optimierung des Umgangs mit Abfallbiomasse und
- Flexibilisierung der Energiebeiträge aus der Kreislaufwirtschaft.

5.1 Steigerung der Recyclinganteile

Um die Recyclinganteile zu steigern und das damit verbundene erhebliche Klima- und Ressourcenschutzpotenzial auszuschöpfen, muss die Bereitschaft zur Getrennthaltung der Wertstoffe aus den Abfällen sowohl in den Haushalten als auch in Industrie und Gewerbe gesteigert werden. Zudem bedarf es ambitionierter gesetzlicher Vorgaben in Form von Recyclingquoten.

Bezüglich der Haushaltsabfälle sollten hierzu folgende Maßnahmen umgesetzt werden:

- Verbindliche Einführung verursachergerechter Abfallgebühren, auch in verdichteten Wohnstrukturen, wie sie u. a. im nationalen Abfallvermeidungsprogramm empfohlen werden. Hierdurch können die Anreize zum Getrennsammeln effektiv gesteigert werden. In der Praxis hat sich gezeigt, dass insbesondere verursachergerechte Abfallgebühren einer intensiven begleitenden Beratung und Betreuung bedürfen, um eine Zunahme von Fehlwürfen und Littering zu vermeiden.
- Verbesserung der Rahmenbedingungen zur Getrennthaltung für die Haushalte durch die Bereitstellung geeigneter, einfach zu bedienender Sammelsysteme. Versuche haben gezeigt, dass hierzu z. B. Sacksysteme nach Farben unterteilt, die das bequeme Getrennsammeln bereits innerhalb der Küche ermöglichen, nützlich sein können.
- Flächendeckende Einführung einer Wertstofftonne nach bundesweit einheitlichen Rahmenbedingungen²¹.
- Implementierung der verpflichtenden Getrennsammlung von Bioabfällen in den Abfallwirtschaftsplänen der Länder und in den Abfallsatzungen; Anschluss- und Benutzerszwang.

²¹ Was nicht heißt, dass dies in jedem Sammelgebiet exakt gleich ist, sondern dass basierend auf bundesweit einheitlichen Regelungen für jedes Gebiet das optimale System eingesetzt wird, aber nach den gleichen Vorgaben bezüglich der groben Ausgestaltung (z. B. Inhalte) und der zu erreichenden Quoten.

- Neuregelung der Quoten der Verpackungsverordnung bzw. zukünftig des Wertstoffgesetzes. Hierzu sollten die Quoten auf Sammlung bzw. Sortierung und Verwertung getrennt werden. Die Sammelquoten beispielsweise sollten aufgrund heutiger Erfahrungen einwohnerspezifisch festgelegt werden. Die Verwertungsquoten sind dann auf die tatsächlich gesammelte Menge zu beziehen. Beide Quoten sollten dynamisch und lernfähig ausgelegt werden, sich also dem Stand der Entwicklung anpassen. Nicht zuletzt sollte ein effektives Kontrollsystem durch Geldstrafen bei Nichterfüllung der Quoten ergänzt werden [vgl. Öko-Institut/HTP 2012].
- Reduktion des Trittbrettfahrerproblems und Beschränkung der Zulässigkeit von Branchenlösungen. Im Planspiel und bei den Diskussionen um die Wertstofftonne [vgl. z. B. Öko-Institut/Team Ewen 2012] wurden hierzu insbesondere eine scharfe Begrenzung von Ausnahmen zur Lizenzierung von Verpackungen und im Falle der Erweiterung zum Wertstoffgesetz ggf. auch der StNVP sowie die Einrichtung einer zentralen Stelle zur Erarbeitung entsprechender Rahmenbedingungen und deren Kontrolle gefordert.
- Es sollte geprüft werden, ob durch eine intensivere Nutzung des im Kreislaufwirtschaftsgesetz vorgesehen Instruments der Produktverantwortung noch weitere Recyclingpotenziale erschlossen werden können. In diesem Zusammenhang (oder auch davon unabhängig) sollten Anreize bzw. Gebote zum Einsatz von Sekundärrohstoffen erwogen werden, um die Absatzmärkte für Recyclingprodukte zu stärken.
- Durchführung von intensiven Informations- und Sensibilisierungskampagnen, zur Steigerung der Bereitschaft zur Getrennthaltung von trockenen Wertstoffen und Bioabfällen in den Haushalten, verbunden mit allgemeinen Informationen zum Nutzen des Recyclings und des Einsatzes von Sekundärrohstoffen für den Klima- und Ressourcenschutz. Dadurch soll auch die Akzeptanz für Produkte aus Sekundärrohstoffen gesteigert werden.

Zur Steigerung der Recyclinganteile im Bereich von Industrie und Gewerbe sollte die anstehende Novellierung der Gewerbeabfallverordnung genutzt werden und Vorgaben zu Recyclingquoten - ähnlich wie in dem Vorschlag zur Verpackungsverordnung beschrieben - sollten auch für gemischte Gewerbeabfälle eingeführt werden. Diese Quotenvorgaben sollten durch eine Ausweitung der Getrennthaltungspflicht und eine Sortierpflicht für Abfallgemische ergänzt werden.

Nur durch ein optimales Zusammenspiel der verschiedenen Maßnahmen lässt sich die Quantität der getrennt gesammelten Wertstoffe bei gleichzeitig guter Qualität der Sammelfraktionen steigern.

Ein „Gleichrang der energetischen Verwertung ab 11.000 kJ/kg“ ist nicht zielführend. Das zeigen nicht zuletzt die Bilanzen der vorliegenden Studie. Deshalb sollte § 8 Abs. 3 des KrWG gestrichen werden und der Vorrang von hochwertigem Recycling konsequent umgesetzt werden.

Das Preisdumping, das durch die bestehenden Überkapazitäten zur Abfallverbrennung ein hochwertiges Recycling behindert, muss unterbunden werden. Hierzu sollte der gezielte Abbau dieser Überkapazitäten eingeleitet werden.

5.2 Optimierung des Umgangs mit Abfallbiomasse

Im Koalitionsvertrag haben CDU/CSU/SPD festgelegt, dass die Stromerzeugung aus Biomasse überwiegend auf Abfall- und Reststoffe beschränkt werden soll [CDU/CSU/SPD 2013]. Die Vorgabe des KrWG zur Getrennsammelpflicht von Bioabfällen ab dem 01.01.2015 sollte deshalb konsequent umgesetzt werden. Hierzu sind ggf. flankierende Maßnahmen und konkretisierende Vorgaben zu den bestehenden Vorschriften im KrWG notwendig, die beispielsweise in der zu novellierenden BioAbfV, den Landesabfallgesetzen und Abfallwirtschaftsplänen der Länder verankert werden könnten.

Anfang 2014 wird das EEG überarbeitet. In diesem Zusammenhang schlägt das Öko-Institut eine werthaltige EEG-Reform [Öko-Institut 2014] vor. Zentraler Gegenstand dieses Vorschlages ist es, dass auch Anlagen zur Erzeugung erneuerbarer Energien systemdienlicher ausgelegt und betrieben werden sollen. Für die Stromerzeugung aus Biomasse bedeutet dies, dass es in Zukunft nicht sinnvoll ist, Biomassekraftwerke in der Grundlast zu betreiben. Hierfür müssen die richtigen regulatorischen Anreize (z.B. im EEG) gesetzt werden. Dabei müssen technische und immissionsschutzseitige Anforderungen berücksichtigt werden. Denn die Stromnachfrage kann zukünftig in den meisten Stunden - dann wenn genug Wind weht und die Sonne scheint – vollständig aus Wind-, Wasser- und Sonnenenergie bereitgestellt werden.

Grundsätzlich ist es sinnvoll, dass Biomasse aus Abfall- und Reststoffen vorrangig in kombinierten Anlagen zuerst vergoren und dann kompostiert wird. Diese Kaskadennutzung sollte weiterhin unterstützt werden. In entsprechenden Regelungen muss auch der Stand der Technik der Emissionsminderung (insbesondere bezüglich Methan und Lachgas) vorgegeben werden. Das so erzeugte Biogas sollte möglichst für einen flexiblen Einsatz aufbereitet und ins Erdgasnetz eingespeist werden. Anreize sollten auch für die Produktion von Biogas in Erdgasqualität geschaffen werden, um das besonders flexibel einsetzbare fossile Erdgas durch regeneratives Biogas aus Abfallbiomasse zu ersetzen und dabei das flächendeckend vorhandene Gasnetz nutzen zu können.

5.3 Flexibilisierung der Energiebeiträge aus der Kreislaufwirtschaft

Für das konventionelle Kraftwerkssegment schlägt das Öko-Institut die Einführung eines fokussierten Kapazitätsmarktes [Öko-Institut et al. 2012] vor (vgl. auch Kapitel 2.1). Ziel ist es, einen Markt für gesicherte Kapazität zu schaffen, um ausreichend Reservekapazität vorzuhalten, wenn Wind und Photovoltaik nicht verfügbar sind. Neuanlagen aus dem Segment der Kreislaufwirtschaft können nur gefördert werden, wenn sie flexibel einsetzbar sind und niedrige spezifische Emissionen aufweisen. Bestandsanlagen, die in der Grundlast betrieben werden, können keine Kapazitätszahlung erhalten.

Die zur Unterstützung des Recyclings vorgeschlagenen Maßnahmen werden auch die Voraussetzungen zur Herstellung von hochwertigem und flexiblem EBS unterstützen, da die Abfallfraktionen für das Recycling ohnehin aufbereitet werden müssen und die „billige“ Konkurrenz von am Markt angebotenen Verbrennungsüberkapazitäten für nicht vorbehandelte Abfälle zurückgefahren wird.

Ersatzbrennstoffe dürfen derzeit max. 1 Jahr gelagert werden. Um eine größere Flexibilisierung beim Einsatz dieser Brennstoffe ermöglichen zu können, sollten die genehmigungsrechtlichen Vorgaben der Lagerdauer für lagerfähig aufbereitete Ersatzbrennstoffe (z. B. pelletierter oder zu Ballen gepresster EBS) angepasst werden.

6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

In dieser Studie werden die Rahmenbedingungen, die eine konsequente Umsetzung der Energiewende für die Kreislaufwirtschaft vorgeben wird, beschrieben und die Konsequenzen, die sich daraus für die Kreislaufwirtschaft in Zukunft ergeben werden, aufgezeigt. In einer Bilanz werden dann der Situation in 2011 jeweils zwei Szenarien für 2030 und 2050 gegenübergestellt, die zum einen den Status Quo fortschreiben, zum anderen gegenüber den Bedingungen der Energiewende optimiert wurden. Dabei wurde zugrunde gelegt, dass das Mindestziel der Bundesregierung: die Reduktion der Treibhausgasemissionen um 80 %, erreicht wird. Außerdem wurde u.a. auch unterstellt, dass das Ziel, den Anteil erneuerbarer Energie an der Stromerzeugung auf 80 % zu steigern, erreicht wird. Die Rahmenbedingungen des geänderten Energiemarktes wurden bei den vier Zukunftsszenarien gleich berücksichtigt.

Im Rahmen der Energiewende wird der Stromsektor auf ein im Wesentlichen auf erneuerbaren Energien basierendes System umgestellt. Dies führt dazu, dass die CO₂-Gutschriften des durchschnittlichen Strommixes deutlich abnehmen. Damit sind auch für im Grundlastbetrieb betriebene Kraftwerke im Abfallbereich (insbesondere MVA und EBS-HKW) nur noch sehr geringe CO₂-Gutschriften (Ansatz durchschnittlicher Strommix) zu erzielen.

Im Jahr 2010 betragen die Emissionen aus der öffentlichen und der industriellen Stromerzeugung 379 Mio. t CO₂eq. Der Anteil der Emissionen aus der Verbrennung von fossilen Abfällen aus Siedlungs-, Gewerbe- und Industrieabfällen²² betrug hierbei rund 3 % (vgl. auch Kapitel 2.5). Bleiben die Emissionen der Abfallverbrennung zur Stromerzeugung unverändert, so würden diese bei Erreichung des 80 %-Reduktionsziel bereits rund 13 % der verfügbaren THG-Emissionen im Stromsektor ausmachen.

Des Weiteren ist die Bereitstellung ausreichender Stromerzeugungskapazität sowie von Systemflexibilität zentral für das Gelingen der Energiewende. Der Bedarf an Grundlasterzeugern wird dabei generell abnehmen, der Bedarf an Reservekapazität jedoch zunehmen.

Stromerzeugung aus Abfall ist bislang jedoch nicht ausreichend flexibel, um einen solchen Beitrag zu leisten. Eine Flexibilisierung kann und muss einen deutlichen und wichtigen Beitrag zur Umsetzung der Energiewende leisten, weil ökologisch vertretbar produzierte Biomasse allein dafür nicht reicht und außerdem für andere Bereiche (Ernährung, Mobilität, Produktionsrohstoff etc.) gebraucht wird. Andere (fossile) Flexibilitätsoptionen (Gas, Kohle) führen wiederum zu Treibhausgas-Emissionen.

Damit kann geschlossen werden, dass der Beitrag der Kreislaufwirtschaft für das Gelingen der Energiewende künftig nicht mehr darin bestehen wird, grundlastfähigen Strom zu erset-

²² Die Emissionen aus der energetischen Nutzung des regenerativen Anteils des Abfalls werden mit einem Emissionsfaktor von null bewertet und gehen deshalb nicht in die Berechnung ein. Die Bilanzen dieser Studie beziehen sich nur auf Siedlungsabfälle und Teile der Gewerbeabfälle.

zen (aufgrund des nicht vorhandenen Bedarfs und der deshalb geringen CO₂-Gutschriften), sondern vor allem Flexibilität bereit zu stellen, soweit das möglich ist.

Im Jahr 2050 kann die Kreislaufwirtschaft einen relevanten Beitrag für die Bereitstellung von flexibler Reservekapazität leisten. Um die Ziele des Energiekonzepts zu erreichen, muss die Stromerzeugung zu einem überwiegenden Anteil auf fluktuierende Erneuerbare Energien wie Photovoltaik und Windkraft umgestellt werden. Die Stromerzeugung aus Kraftwerken, deren Einsatz flexibel steuerbar ist, geht bis 2050 sehr stark zurück. Der Beitrag der Kreislaufwirtschaft an der flexibel steuerbaren Stromerzeugung steigt auf 10 % an.

Zusätzlich können nach der Bilanz für das Szenario „2050 optimiert“ durch Ersatzbrennstoffe in Prozessfeuerungen etwa 2 Mio. Mg Steinkohle (oder vergleichbare fossile Brennstoffe) eingespart werden.

Wenn Abfallverbrennungsanlagen weiterhin in Grundlast betrieben werden, steigen die Anteile an den Gesamtemissionen aus der Stromerzeugung bis 2050 sehr stark an, ohne dass ein adäquater Nutzen erbracht wird. Sollen die Treibhausgas-Emissionen insgesamt weiter sinken (z. B. bis 2050 um 80 bis 95 % in Bezug auf 1990), müssen auch die THG-Emissionen im Stromsektor deutlich reduziert werden. Dies kann nur gelingen, sofern zum einen die THG-Emissionen der Abfallverbrennung reduziert werden (geringere fossile Anteile) und zum anderen möglichst viele fossile Reservekraftwerke (Kohle, Gas) ersetzt werden. Für den Ersatz von fossilen Reservekraftwerken durch flexible Kraftwerke unter effizienter Nutzung von Abfall können für die Brennstoffe aus Abfall als CO₂-Gutschriften die fossilen Mixe in Ansatz gebracht werden.

Aus diesem Grund sollte der Fokus auf einer Reduzierung des fossilen Anteils des energetisch genutzten Abfalls liegen. Dies kann durch die konsequente Durchsetzung der getrennten Abfallerfassung, unterstützt durch eine hochwertige Sortierung und Aufbereitung der verschiedenen Abfallfraktionen sowie des Restabfalls gelingen. Die Steigerung der Recyclingquote und des Recyclings an sich ist in dem Zusammenhang zwingend. Darüber hinaus wird schadstoffarmes und lagerfähiges EBS produziert, das flexibel und effizient zur Stromerzeugung (insbesondere in KWK-Anlagen²³) genutzt wird (Ersatz von fossilen Reservekraftwerken). Gleichzeitig stellt die Steigerung von Recyclingpotentialen neben den deutlichen Vorteilen zum Klimaschutz auch einen wesentlichen Beitrag zur Ressourcenschonung dar.

Durch das Recycling werden heute schon erhebliche Beiträge zum Klima- und Ressourcenschutz geleistet, die durch die angesetzten Optimierungen noch gesteigert werden können. So werden in der Summe bereits 2011 knapp 20 Mio. Mg Sekundärrohstoffe inklusive Kompost bereitgestellt. Durch die angesetzten Optimierungen bei der Getrenntsammlung, Sortierung und Aufbereitung konnte dieser Beitrag auf über 23 Mio. Mg gesteigert werden²⁴. Damit

²³ Kraft-Wärme-Kopplung

²⁴ Die theoretischen Potenziale der Kreislaufwirtschaft wurden bei den Bilanzen bewusst nicht ausgeschöpft, um eine konservative Bewertung der Möglichkeiten zu erhalten! In vielen Bereichen der Abfallwirtschaft lie-

sind erhebliche Einsparungen bei der Gewinnung und Aufbereitung von Primärressourcen sowie der damit einhergehenden erheblichen ökologischen und sozialen Belastungen verbunden. Auch der Beitrag zur Energiewende - durch den eingesparten Energieverbrauch gegenüber der Primärrohstoffgewinnung - ist erheblich. Damit wird ein wesentliches Ziel der Energiewende, nämlich die Reduzierung des Energieverbrauchs unterstützt.

Des Weiteren kann die Kreislaufwirtschaft aus den getrennt erfassten organischen Abfallbestandteilen neben der stofflichen Nutzung als wertvollen Kompost, der zur Verbesserung der Bodenqualität und Biodiversität beiträgt, auch hochwertig aufbereitetes Gas in Erdgasqualität zur Verfügung stellen (Kaskadennutzung). Dieses kann für sehr kurzfristig benötigte Gasturbinen und Gasmotoren für die Bereitstellung von Reservekapazität genutzt werden. Dazu muss aber die politisch vorgegebene Getrennsammelpflicht für Bioabfälle konsequent umgesetzt werden. Weitere verfügbare Gase sowie Festbrennstoffe aus Abfall können dafür genutzt werden, die verbleibende fossile Stromerzeugung weiter zu reduzieren. Dabei ist auf möglichst hohe Wirkungsgrade (Kraft-Wärme-Kopplung, Mitverbrennung) zu achten. Perspektivisch ist es auch sinnvoll, durch Ersatzbrennstoffe aus Abfall den Einsatz von Anbau-Biomasse (z. B. Verbrennung von Kurzumtriebshölzern oder Biogas aus Mais) in Kraftwerken zu reduzieren, sofern die fossilen Brennstoffe ganz oder weitestgehend eingespart wurden, da es sich bei Biomasse ebenfalls um eine knappe Ressource handelt und der Anbau mit ökologischen Belastungen verbunden ist.

Der Müllverbrennung im herkömmlichen Sinne kommt in einem an der Energiewende orientierten Szenario nur noch die Bedeutung zu, schadstoffhaltige Abfälle, die aufgrund ihrer Schadstoffbelastungen nicht ökologisch vertretbar verwertet werden können, zu beseitigen. Ein Verwertungsstatus, den die meisten MVAs heute besitzen, ist dann nicht mehr gerechtfertigt.

Ohne dass die notwendigen Maßnahmen zur Optimierung der Kreislaufwirtschaft angegangen werden und dass die dafür notwendigen Rahmenbedingungen geschaffen werden, ist zu befürchten, dass der heute erreichte Beitrag der Kreislaufwirtschaft zum Klimaschutz nicht – wie erforderlich – verbessert werden kann, vermutlich könnten wir ihn nicht einmal halten.

Die Bilanzen der vorliegenden Studie zeigen, dass das Potenzial der Kreislaufwirtschaft, zur Energiewende beizutragen, erheblich ist.

Der Gesamtentlastungsbeitrag der Kreislaufwirtschaft in den „optimierten“ Szenarien für 2030 und 2050 von knapp 31 Mio. Mg CO₂eq/a entspricht ca. 20 % der Emissionen des Verkehrssektors im Jahr 2011, bzw. den durchschnittlichen Emissionen von 2,8 Millionen Bürgern in Deutschland.

gen für eine exakte Abschätzung der Potenziale allerdings keine ausreichenden Zahlen vor. Vergleiche hierzu auch Tabelle 4.2.

7 Literaturverzeichnis

- Alexandratos/Bruinsma 2012 Alexandratos, N., Bruinsma, J.: World agriculture towards 2030 / 2050. The 2012 Revision.
- ATUS/INFA 2007 ATUS GmbH, INFA GmbH: „Wissenschaftliche Begleitung des Versuches ‚Hamburger Wertstofftonne‘ – Zwischenbericht“. Bericht und Anhang, Hamburg/Ahlen, September 2007
- BAV 2009 Stellungnahme des Bundesverband der Altholzaufbereiter und -verwerter e.V. zur Studie vom 10.7.2009
- BAV 2010 Bundesverband der Altholzaufbereiter und –verwerter e.V.: Position des BAV zur Novellierung des EEG. Berlin, den 13. August 2010.
- bifa 2013 „Ökoeffizienzpotenziale bei der Behandlung von Bioabfällen in Bayern“, bifa-Text Nr. 61, Augsburg 2013
- BMU 2012: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Erneuerbare Energien in Zahlen, Berlin, Juli 2012 Bundesregierung (2011): Das Energiekonzept der Bundesregierung 2010 und die Energiewende 2011; Stand: Oktober 2011; http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/energiekonzept_bundesregierung.pdf
- BMWi, BMU 2010 Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung.
- Bundesregierung 2011 Eckpunktepapier: Der Weg zur Energie der Zukunft - sicher , bezahlbar und umweltfreundlich -.
- Bundesregierung 2013 Projektionsbericht 2013 gemäß Entscheidung 280/2004/EG. http://cdr.eionet.europa.eu/de/eu/ghgpro/envuucoda/130313_Projektionsbericht_DE_final.doc/manage_document
- CDU/CSU/SPD 2013 Deutschlands Zukunft gestalten. Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD. 18. Legislaturperiode.
- CONSULTIC 2012 Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2011 – Kurzfassung; Alzenau 2012
- Dehne et al. 2011 Dehne, I. Kanthak, M. Oetjen-Dehne, R.: Aufkommen, Verbleib und Ressourcenrelevanz von Gewerbeabfällen; UBA-Texte 19/2011; Dessau 2011
- DeStatis 2009 DeStatis: Umwelt – Abfallbilanz 2006, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden März 2009

DeStatis 2013a	DeStatis: Umwelt – Abfallbilanz 2011, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden Juli 2013
DeStatis 2013b	DeStatis: Umwelt – Abfallentsorgung 2011, Fachserie 19, Reihe 1 Statistisches Bundesamt, Wiesbaden Juli 2013
DLR, IWES, IFNE 2012a	Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global, BMU – FKZ 03MAP146, 2012
Dornbusch 2013	Dr. Dornbusch, Heinz-Josef (INFA): „Nicht im Trüben fischen!“ Varianten und Erfahrungen der Elektrokleingeräteerfassung, Vortrag: VKS Landesgruppe Küstenländer „AUF ZU NEUEN UFERN“, Kommunale Kreislaufwirtschaft 2020, Boltenhagen, 5. September 2013
ecoinvent V3 2013	http://www.ecoinvent.org/home/
EEA 2013	European Aluminium Association: Environmental Profile Report for the European Aluminium Industry. Life Cycle Inventory data for aluminium production and transformation processes in Europe. Data for the year 2010. April 2013
EEG Monitoring 2008	Anschlussvorhaben zum Monitoring zur Wirkung des novellierten Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) auf die Entwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse. IE Leipzig, Fichtner Stuttgart, TLL Jena, Prof. Dr. jur. Stefan Klinski Berlin. Im Auftrag des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), März 2008
EEWärmeG. 2011	Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich (Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz- EEWärmeG).
GDA 2013	Gesamtverband der Aluminiumindustrie http://www.aluinfo.de/index.php/klimavorsorge-und-aluminium.html [09.12.2013]
gewitra 2009	Cuhls, C. et al.: „Ermittlung der Emissionssituation bei der Verwertung von Bioabfällen“, UFO-Plan FKZ 206 33 326, Februar 2009 (unveröffentlichter Entwurf)
Hagelüken 2013	Hagelüken, Christian: „Optimierung der Recyclingkreisläufe für Edel- und Sondermetalle“; Vortrag auf dem Workshop Recycling von Technologiemetallen Potenziale, Herausforderungen & neue Perspektiven der Automation, Frankfurt, 13.11.2013
Hagelüken 2014	Hagelüken, Christian: „Technologiemetalle – Systemische Voraussetzungen entlang der Recyclingkette“, in: Strategische Rohstoffe

- Risikovorsorge, Kausch, Bertau, Gutzmer, Matschullat (Hrsg), Springer Spektrum, Berlin Heidelberg 2014
- Hagelüken/Buchert 2008 Hagelüken, C.; Buchert, M.: „The mine above ground – opportunities & challenges to recover scarce and valuable metals from EOL electronic devices“, Öko-Institut e. V.; umicore, IERC Salzburg, Januar 2008
- Harthan, R., Seebach, D., Böttger, D., Bruckner, T. 2012 Auswirkung einer verstärkten Förderung erneuerbarer Energien auf die Investitionsdynamik im konventionellen Kraftwerkspark; Öko-Institut e.V., Berlin 2012.
- HTP/Cyclos 2011 Bünemann, A.; Christiani, J; Rachut, G. u.a.: Planspiel zur Fortentwicklung der Verpackungsverordnung, Teilvorhaben 1: Bestimmung der Idealzusammensetzung der Wertstofftonne: UBA-Texte 8/2011, Dessau-Roßlau 2011
- IAI 2007 International Aluminium Institute: Life Cycle Assessment of Aluminium: Inventory Data for the Primary Aluminium Industry- Year 2005 Update September 2007
- IFEU 1998 Ökologische Bilanzen in der Abfallwirtschaft; Fallbeispiele: Verwertung von Altreifen und Haushaltskühlgeräten. Heidelberg 1998 (UBA-Texte 10/99)
- IFEU 2005 Institut für Energie- und Umweltforschung GmbH: „Beitrag der Abfallwirtschaft zur nachhaltigen Entwicklung in Deutschland – Fallbeispiel Elektro- und Elektronikaltgeräte“; Endbericht, UFO-Plan-Vorhaben des Umweltbundesamtes, Heidelberg, Juni 2005
- IFEU et al. 2011 „Optimierung des Systems der Bio- und Grünabfallverwertung“ ein Leitfaden; IFEU, Öko-Institut, IG-Lux, Ressource Abfall für das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft des Landes Baden-Württemberg; Stuttgart 2011
- IFEU/AHU 2012 „Optimierung der Verwertung organischer Abfälle“, UFOPLAN-Vorhaben des Umweltbundesamts FKZ 3709 33 340; Heidelberg 2012
- INTECUS 2012 Ermittlung des Beitrages der Abfallwirtschaft zur Steigerung der Ressourcenproduktivität sowie des Anteils des Recyclings an der Wertschöpfung unter Darstellung der Verwertungs- und Beseitigungspfade des ressourcenrelevanten Abfallaufkommens, UBA Forschungsvorhaben, UBA-Texte 14/2012; Dessau-Roßlau, Mai 2012

- IPCC 2007 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): Contribution of Working Group I to the 4th Assessment Report: Climate Change 2007, www.ipcc.ch
- Jering et al. 2012 Jering, A., Klatt, A., Seven, J., Ehlers, K., Günther, J., Ostermeier, A., Mönch, L. 2012 Globale Landflächen und Biomasse nachhaltig und ressourcenschonend nutzen.
- Jung, A. F. 2013 Entwicklung eines einfachen Modells zur Quantifizierung der CO₂-Emissionsreduktionen durch den Einsatz regenerativer Energiequellen in der Stromerzeugung. Bachelor-Thesis. Fachhochschule Flensburg. 08.03.2013
- Laborde 2011 Laborde, D.: Assessing the Land Use Change Consequences of European Biofuel Policies (pp. 1–111). 2011
- Mantau et al. 2012 Mantau, U.; Weimar, H.; Kloock, T.: Standorte der Holzwirtschaft - Holzrohstoffmonitoring. Altholz im Entsorgungsmarkt – Aufkommens- und Vertriebsstruktur 2010. Abschlussbericht. Universität Hamburg, Zentrum Holzwirtschaft, Arbeitsbereich Ökonomie der Holz- und Forstwirtschaft. Hamburg, 2012.
- Öko-Institut 2007 Schüler, D., Dehoust, G. et al: „Ökobilanzielle Untersuchung zur Verwertung von FCKW- und KW-haltigen Kühlgeräten“, Darmstadt 2007
- Öko-Institut 2008 Optimierung der Abfallwirtschaft in Hamburg unter dem besonderen Aspekt des Klimaschutzes- in Kooperation mit igw-Witzenhausen und FH Mainz, für die Freie und Hansestadt Hamburg; Darmstadt, 2008
- Öko-Institut 2014 Spezifikation einer Reform des Erneuerbaren-Energien-Gesetzes auf Basis eines Prämienmodells. Kurzstudie für Agora-Energiewende. In Veröffentlichung. Berlin 2014.
- Öko-Institut et al. 2004 Öko-Institut e. V., Umsicht, IE, IFEU, IZES, TU München: „Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse“; Endbericht und Anlagenband, Verbundprojekt des BMU im Rahmen des ZIP, Darmstadt 2004
- Öko-Institut/HTP 2012 Dehoust, G., Christiani, J.: Analyse und Fortentwicklung der Verwertungsquoten für Wertstoffe Sammel- und Verwertungsquoten für Verpackungen und stoffgleiche Nicht-verpackungen als Lenkungsinstrument zur Ressourcenschonung; UBA-Texte 40/2012, Dessau 2012
- Öko-Institut/IFEU 2005a Dehoust, G. et al.: „Beitrag der Abfallwirtschaft zum Klimaschutz – Statusbericht zum Beitrag der Abfallwirtschaft zum Klimaschutz

- und mögliche Potenziale“, Öko-Institut e.V. und IFEU Heidelberg, Ufoplan-Vorhaben 205 33 314. Darmstadt, Heidelberg 2005
- Öko-Institut/IFEU 2005b Öko-Institut e. V./IFEU GmbH: „Statusbericht zum Beitrag der Abfallwirtschaft zum Klimaschutz und mögliche Potenziale“; Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Darmstadt, Heidelberg 2005
- Öko-Institut/IFEU 2010 Dehoust, G., Dr. Schüler, D., Vogt, R., Giegrich, J.: Klimaschutzpotenziale der Kreislaufwirtschaft – Am Beispiel von Siedlungsabfällen und Altholz; UBA-Texte 06/2010; Dessau 2010
- Öko-Institut et al.2012 Öko-Institut/LBD 2012 Fokussierte Kapazitätsmärkte. Ein neues Marktdesign für den Übergang zu einem neuen Energiesystem. Kurzstudie für die Umweltstiftung WWF Deutschland. Berlin 2012
- Öko-Institut/Team Ewen 2011 Planspiel zur Fortentwicklung der Verpackungsverordnung. Teilvorhaben 3: Planspiel; UBA FKZ 3710 93 313 3; Berlin, Darmstadt 2011
- Prognos 2011 Bedeutung der Braunkohle in Ostdeutschland. Berlin September 2011.
- Prognos/EWI/GWS 2010 Prognos, Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln (EWI), Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforchung (GWS) 2010 Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung. Projekt Nr. 12/10 des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologien. Basel, Köln, Osnabrück, 27. August 2010.
- Prognos/EWI/GWS 2011 Prognos, Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln (EWI), Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforchung (GWS) 2011 Energieszenarien 2011. Projekt Nr. 12/10 des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologien. Basel, Köln, Osnabrück, Juli 2011.
- Rausch/Fritsche 2012 Rausch, L., Fritsche, U. R. 2012 Aktualisierung von Ökobilanzdaten für Erneuerbare Energien im Bereich Treibhausgase und Luftschadstoffe, Darmstadt 2012
- Searchinger 2013 Searchinger, T. 2013 Understanding the Biofuel Trade-offs between Indirect land use change (ILUC), Hunger and Poverty.
- UBA 2010 Energieziel 2050: 100% Strom aus erneuerbaren Quellen (p. 196). Dessau-Roßlau. Retrieved from <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3997.pdf>
- UBA 2013 National Inventory Report for the German Greenhouse Gas Inventory 1990 - 2011. Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol.

- UNCTAD 2013 Trade and Environment Review 2013: Wake up before it is too late
- Make Agriculture truly sustainable now for food security in a
changing climate.
- WBGU 2009 Welt im Wandel – Zukunftsfähige Bioenergie und nachhaltige
Landnutzung. Sondergutachten (p. 250). Mercedes. Retrieved
from http://www.wbgu.de/wbgu_jg200

ANHANG

Beitrag der Kreislaufwirtschaft zur Energiewende

Klimaschutzpotenziale auch unter geänderten Rahmenbedingungen optimal nutzen

Inhaltsverzeichnis

ANHANG	61
A 1 METHODE DER KLIMABILANZIERUNG	65
A 1.1 SYSTEMGRENZEN UND FUNKTIONELLE EINHEIT	65
A 1.2 VORGEHEN BEI DER BILANZIERUNG	65
A 1.3 WIRKUNGSABSCHÄTZUNG	65
A 2 ABFALLSTRÖME	67
A 2.1 MÜLLVERBRENNUNG	68
A 2.2 MECHANISCH (BIOLOGISCHE) ABFALLBEHANDLUNG	69
A 2.3 ENERGETISCHE VERWERTUNG	69
A 2.4 BIOLOGISCHE BEHANDLUNG	70
A 2.5 SORTIERANLAGEN	70
A 2.6 GEMISCHTE GEWERBEABFÄLLE	72
A 3 SACHBILANZ	73
A 3.1 ABFALLZUSAMMENSETZUNG	73
A 3.2 EMISSIONSFAKTOREN FÜR STROM UND WÄRME	73
A 3.3 RESTABFALL	74
A 3.3.1 RESTMÜLL ZUR MVA.....	74
A 3.3.2 RESTMÜLL ZU M(B)AN	74
A 3.3.3 VERTEILUNG UND WIRKUNGSGRADE ENERGETISCHE VERWERTUNG UND MVA.....	76
A 3.4 BIO- UND GRÜNABFÄLLE	77
A 3.4.1 BIOGUT.....	77
A 3.4.2 GRÜNABFALL	78
A 3.4.3 KOMPOSTIERUNG	78
A 3.4.4 VERGÄRUNG	79

A 3.4.5	KOMPOSTPRODUKTE UND –ANWENDUNG	79
A 3.5	PAPIER, PAPPE, KARTONAGE (PPK)	80
A 3.6	GLAS.....	81
A 3.7	LEICHTVERPACKUNG.....	81
A 3.8	ELEKTROGERÄTE.....	83
A 3.9	ALTHOLZ	83

Tabellenverzeichnis

Tabelle A 1.1:	Äquivalenzfaktoren für Treibhausgase	66
Tabelle A 2.1:	Bilanzdaten nach [DeStatis 2013a]	67
Tabelle A 3.1:	Mittlere Zusammensetzung für den, der Bilanz zugrunde gelegten, Mix aus Hausmüll und hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen für 2011 [nach Kern 2001, zitiert in Öko- Institut/IFEU 2010].....	73
Tabelle A 3.2:	Emissionsfaktoren Strom und Wärme	74
Tabelle A 3.3:	Verbrennungseigenschaften des Restmülls in der MVA	74
Tabelle A 3.4:	Verteilung der Outputströme für M(B)An als Mittel aus MBA, MBS/MPS und MA [Öko-Institut/IFEU 2010].....	75
Tabelle A 3.5:	Energie- und Gasverbräuche sowie Energieerträge der M(B)An [Öko-Institut/IFEU 2010 und eigene Berechnungen].....	76
Tabelle A 3.6:	Netto-Wirkungsgrade EBS-HKW, MVA, Holz-HKW	76
Tabelle A 3.7:	Optimierte Netto-Wirkungsgrade MVA, EBS- und Holz-HKW	77
Tabelle A 3.8:	Emissionsfaktoren Kompostierung [gewitra 2009]	78
Tabelle A 3.9:	Emissionsfaktoren Vergärung [Öko-Institut/IFEU 2010 nach gewitra 2009].....	79
Tabelle A 3.10:	Bio- und Grünabfallverwertung als Dünger nach [Öko- Institut/IFEU 2010].....	79
Tabelle A 3.11:	Gutschriften für die Substitution von Mineraldünger.....	80
Tabelle A 3.12:	Aufteilung der LVP-Fraktion [nach Öko-Institut/HTP 2012].....	81
Tabelle A 3.13:	Aufteilung der Recyclingfraktionen [nach Öko-Institut/HTP 2012].....	82
Tabelle A 3.14:	Netto-Gutschriften für die LVP-Fraktionen [ecoinvent V3 2013, Gemis, eigene Berechnungen].....	82

A 1 Methode der Klimabilanzierung

A 1.1 Systemgrenzen und funktionelle Einheit

Im Rahmen von Ökobilanzen für die Abfall- und Kreislaufwirtschaft müssen einige Abweichungen von der üblichen Lebenswegbetrachtung („von der Wiege bis zur Bahre“) beachtet werden:

- Die Bilanzierung erfolgt erst ab der Bereitstellung des Abfalls und schließt somit das Vorleben des Abfalls, wie beispielsweise die Herstellung oder Verwendung des zu Abfall gewordenen Gutes aus. Für die bei der Aufbereitung und Verwertung des Abfalls eingesetzten Betriebsmittel und Energieverbräuche muss allerdings der gesamte Lebensweg berücksichtigt werden.
- Auch am Ende der Systemgrenze ergibt sich u. U. eine Abweichung vom klassischen Lebenszyklus. Führt das zu bilanzierende Entsorgungssystem zur Erzeugung eines quantifizierbaren Nutzens (Bereitstellung von Energie, Sekundärrohstoffen bzw. -produkten), so wird dem System eine Gutschrift zugeschrieben. Diese Gutschrift wird zu 100 % dem Kreislaufwirtschaftssystem gutgeschrieben und nicht teilweise auf die aufnehmenden Produktionssysteme allokiert, wie dies bei Produktökobilanzen üblich ist.

Als funktionelle Einheit wird auf die Gesamtmenge zu entsorgender Abfälle abgestellt. Die Ergebnisse spiegeln so die Leistungsfähigkeit des gesamten Systems aus Erfassung, Sortierung und Verwertung wider.

A 1.2 Vorgehen bei der Bilanzierung

Bei der Erstellung des gesamten Stoffstrommodells, das der vorliegenden Bilanz zugrunde liegt, wurden für die zu untersuchenden Abfallfraktionen deren Entsorgungswege abgebildet. Dabei wurde die Kreislaufwirtschaft nicht bezogen auf die Materialströme am Ende der Behandlungswege bilanziert, sondern es erfolgen für jede betrachtete Abfallfraktion gesonderte Berechnungen, die alle nachfolgenden Schritte mit erfassen. Das Gesamtergebnis wird aus der Zusammenfassung der Einzelbilanzen für die Abfallfraktionen gebildet. Dieser Bilanzierungsansatz erlaubt die Zuordnung der Ergebnisse auf die einzelnen Abfallfraktionen (z. B. Restmüllentsorgung, Bioabfallverwertung etc.) und entspricht im Grundsatz methodisch einer separaten Bilanzierung jedes Entsorgungswegs.

A 1.3 Wirkungsabschätzung

In der Sachbilanz nach Ökobilanzmethode werden zunächst sämtliche aus der abgebildeten Abfallverwertung resultierende Aufwendungen und Emissionen aufgelistet. Sie bildet die Grundlage für die Wirkungsabschätzung. Im Rahmen dieser Studie wird einzig die Umwelt-

**Beitrag der Kreislaufwirtschaft
zur Energiewende**

wirkungen Treibhauseffekt ausgewertet. Damit liegt das Hauptaugenmerk auf den möglichen Beiträgen und Potenzialen der Kreislaufwirtschaft zum Klimaschutz.

Zur Auswertung des Treibhauseffektes werden die einzelnen Treibhausgase, die laut den Ergebnissen der Sachbilanz in einem Szenario emittiert wurden, entsprechend Klimawirksamkeit zusammengefasst. Diese wird für alle Parameter normiert als CO₂ Äquivalente.

Die wichtigsten Treibhausgase und ihre aktuellen CO₂-Äquivalenzwerte nach [gewitra 2009] sind in Tabelle A 1.1 für den Betrachtungszeitraum von 100 Jahren aufgeführt. Darin unterschieden sind Methanemissionen nach ihrer Entstehung. Regeneratives Methan (aus der Umwandlung organischer Substanz) weist gegenüber fossilem Methan (aus der Umwandlung fossiler Energieträger) einen etwas geringeren Äquivalenzfaktor auf, da das im Laufe der Zeit aus dem Methan durch luftchemische Umsetzung (Oxidation) entstehende regenerative Kohlendioxid als klimaneutral bewertet wird.

Tabelle A 1.1: Äquivalenzfaktoren für Treibhausgase

Treibhausgas	CO ₂ -Äquivalente (GWP) in kg CO ₂ eq/kg	
	Kohlendioxid (CO ₂), fossil	1
Methan (CH ₄), fossil	27,75	21
Methan (CH ₄), regenerative	25	18,25
Distickstoffmonoxid (N ₂ O)	298	310

A 2 Abfallströme

Die der Bilanz zugrunde gelegten Stoffströme beruhen auf den amtlichen statistischen Daten für 2011 [DeStatis 2013a].

Tabelle A 2.1: Bilanzdaten nach [DeStatis 2013a]

Abfälle	2011
	1.000 Mg
Hausmüll, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle gemeinsam über die öffentliche Müllabfuhr eingesammelt	14.027
Sperrmüll	2.428
Abfälle aus der Biotonne	4.016
Garten- und Parkabfälle biologisch abbaubar	5.045
Glas	2.595
Papier, Pappe, Kartonagen	8.131
Leichtverpackungen / Kunststoffe	5.367
Hausmüllähnliche Gewerbeabfälle getrennt vom Hausmüll angeliefert oder eingesammelt	4.244
Elektrogeräte	591
Metalle*	730
Biologisch abbaubare Küchen- und Kantinenabfälle	728
Marktabfälle	53
Siedlungsabfälle (ohne Reste in die Beseitigung)	47.955
Altholz aus Siedlungsabfällen (in der Aufstellung oben schon erfasst)	2.930
aus Sperrmüll	1.310
aus Transport und Umverpackungen	1.500
sonstiges Altholz aus Siedlungsabfällen	120
Altholz aus Gewerbe und Infrastruktur (nicht bei Siedlungsabfällen erfasst)	3.970
Abfälle aus der Holzbearbeitung	880
Abfälle aus der Forstwirtschaft	590
sonstiges Altholz aus Gewerbe	2.500
Altholz gesamt	6.900
Gesamtsumme	51.925

* Als Teil von 1.843 Mg direkt stofflich verwertetes Sonstiges (Verbunde, Metalle, Textilien etc.). Der Rest der Fraktion Sonstiges, die nicht direkt einer stofflichen Verwertung zugeführt werden.

Die Summe der direkt verwerteten Kunststoffe wird nach [DeStatis 2013b] aus Verpackungs- und Haushaltsabfällen bestimmt (0,89 Mio. Mg). Der Rest der nach [DeStatis 2013b] verwerteten Leichtverpackungen (LVP) und Kunststoffe (4,3 Mio. Mg) wird als LVP (3,44 Mio. Mg) bilanziert. Die zusätzlich aufgeführte Fraktion Sonstiges ist teilweise bei den deponierten

oder in MVA und M(B)A behandelten Mengen berücksichtigt. Der Rest der sonstigen Mengen, die direkt einer stofflichen Verwertung zugeführt werden (1,26 Mio. Mg) wird in der Bilanz nicht berücksichtigt.

Stofflich verwertete biologisch abbaubare Küchen- und Kantinenabfälle und Marktabfälle werden den Bioabfällen zugeordnet.

Als Input in die Müllverbrennung kann demnach die Summe der nicht gefährlichen Siedlungsabfälle eingestuft werden, die der thermischen Beseitigung (8,4 Mio. Mg) und mit Ausnahme des Sperrmülls der energetischen Verwertung (7,5 Mio. Mg) zugeführt wird.

Als Input in M(B)An kann die Summe der Siedlungsabfälle zugeordnet werden, die einer Behandlung zur Beseitigung (1,86 Mio. Mg) zugeführt werden und zusätzlich der jeweilige Anteil der Fraktionen

- Hausmüll, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle gemeinsam über die öffentliche Müllabfuhr eingesammelt (1,28 Mio. Mg),
- Hausmüllähnliche Gewerbeabfälle getrennt vom Hausmüll angeliefert oder eingesammelt (1,96 Mio. Mg),

die der stofflichen Verwertung zugeordnet sind. Dadurch werden die Anteile der getrennt erfassten Wertstofffraktionen, die nicht als stofflich verwertet angegeben werden, in der Bilanz direkt der MVA oder M(B)A zugeführt.

Der deponierte Anteil ergibt sich aus der Gesamtmenge der Siedlungsabfälle, die einer Ablagerung zugeführt werden (0,25 Mio. Mg).

Der Sperrmüll, der einer stofflichen und energetischen Verwertung (1,85 Mio. Mg) zugeführt wird, wird als Altholz eingestuft. Außerdem wird hier das Holz aus Transport- und Umverpackungen und der Sammlung von Verkaufsverpackungen bei gewerblichen und industriellen Endverbrauchern berücksichtigt.

A 2.1 Müllverbrennung

Nach [DeStatis 2013b] wurden 2011 in Müllverbrennungsanlagen insgesamt 19,34 Mio. Mg Abfälle aus dem Inland entsorgt. 13,18 Mio. Mg davon waren Siedlungsabfälle. Der Hauptteil dieser Menge setzt sich aus den Abfällen

- EAV 20030100: gemischte Siedlungsabfälle, nicht differenzierbar (2,96 Mio. Mg)
- EAV 20030101: Hausmüll, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle gemeinsam über die öffentliche Müllabfuhr eingesammelt (7,85 Mio. Mg)
- EAV 20030102: Hausmüllähnliche Gewerbeabfälle, getrennt vom Hausmüll angeliefert oder eingesammelt (1,34 Mio. Mg)

zusammen.

Außerdem wurden 0,81 Mio. Mg Verpackungsabfälle, davon 0,66 Mio. Mg gemischte Verpackungen nicht differenzierbar und 6,28 Mio. Mg Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen, öffentlichen Abwasserbehandlungsanlagen sowie der Aufbereitung von Wasser für den menschlichen Gebrauch und Wasser für industrielle Zwecke direkt in Abfallverbrennungsanlagen entsorgt. Letztere werden auch in der hier vorliegenden Klimabilanz indirekt der MVA zugeordnet.

A 2.2 Mechanisch (biologische) Abfallbehandlung

In mechanisch (biologischen) Abfallbehandlungsanlagen wurden in 2011 3,14 Mio. Mg Siedlungsabfälle und 0,95 Mio. Mg Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen, öffentlichen Abwasserbehandlungsanlagen sowie der Aufbereitung von Wasser für den menschlichen Gebrauch und Wasser für industrielle Zwecke aus Deutschland entsorgt. Insgesamt waren es 4,32 Mio. Mg, die ersteren können direkt als Input der Klimabilanz herangezogen werden, die letzteren ergeben sich aus der Bilanz.

A 2.3 Energetische Verwertung

Insgesamt wurden gemäß [DeStatis 2013b] 15,45 Mio. Mg aus Deutschland angelieferte Abfälle energetisch verwertet. Davon in

- Ersatzbrennstoffkraftwerken 4,54 Mio. Mg
- Biomassekraftwerken 5,46 Mio. Mg,
- anderen Kraftwerken (z. B. Kohlekraftwerken) 1,58 Mio. Mg
- Heizwerken 0,63 Mio. Mg
- Mitverbrennungsanlagen für andere Produktionszwecke (Zement-, Kalk-, Ziegel- oder Stahlwerken) 3,24 Mio. Mg.

Davon waren 0,39 Mio. Mg Siedlungsabfälle und davon wiederum 0,17 Mio. Mg biologisch abbaubare Abfälle.

10,22 Mio. Mg waren Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen, öffentlichen Abwasserbehandlungsanlagen sowie der Aufbereitung von Wasser für den menschlichen Gebrauch und Wasser für industrielle Zwecke. Die wichtigsten Abfälle dieser Gruppe sind:

- EAV 190805: Schlämme aus der Behandlung von kommunalem Abwasser 1,38 Mio. Mg
- EAV 191206*: Holz, das gefährliche Stoffe enthält 0,98 Mio. Mg
- EAV 191207: Holz mit Ausnahme desjenigen, das unter 191206 fällt 2,44 Mio. Mg
- EAV 191210: brennbare Abfälle (Brennstoffe aus Abfällen) 3,98 Mio. Mg

- EAV 191212: sonstige Abfälle (einschließlich Materialmischungen) aus der mechanischen Behandlung von Abfällen mit Ausnahme derjenigen, die unter 191211 fallen, 0,98 Mio. Mg.

A 2.4 Biologische Behandlung

In biologischen Behandlungsanlagen wurden laut Statistik [DeStatis 2013b] insgesamt 12,74 Mio. Mg aus Deutschland angelieferte Abfälle verwertet, davon in

- Bioabfallkompostierungsanlagen 4,19 Mio. Mg,
- Grünabfallkompostierungsanlagen 3,13 Mio. Mg,
- Biogas- und Vergärungsanlagen 4,06 Mio. Mg,
- Klärschlammkompostierungsanlagen 1,02 Mio. Mg und
- Sonstigen biologische Behandlungsanlagen 0,33 Mio. Mg.

Von der Summe entfielen 8,66 Mio. Mg auf Siedlungsabfälle, davon 4,03 Mio. Mg biologisch abbaubare Abfälle (EAV 200201), 3,94 Mio. Mg Abfälle aus der Biotonne (EAV 20030104) und 0,46 Mio. Mg biologisch abbaubare Küchen- und Kantinenabfälle (EAV 200108).

Außerdem waren 1,09 Mio. Mg Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen, öffentlichen Abwasserbehandlungsanlagen sowie der Aufbereitung von Wasser für den menschlichen Gebrauch und Wasser für industrielle Zwecke, davon 0,74 Mio. Mg Schlämme aus der Behandlung von kommunalem Abwasser (EAV 190805) biologisch behandelt worden.

2,61 Mio. Mg waren Abfälle aus Landwirtschaft, Gartenbau, Teichwirtschaft, Forstwirtschaft, Jagd und Fischerei sowie der Herstellung und Verarbeitung von Nahrungsmitteln die im Wesentlichen nicht im Fokus dieser Bilanz stehen.

A 2.5 Sortieranlagen

In Sortieranlagen wurden 23,77 Mio. Mg Abfälle aus Deutschland angeliefert.

Davon waren 8,27 Mio. Mg Verpackungsabfall, Aufsaugmassen, Wischtücher, Filtermaterialien und Schutzkleidung (a.n.g.). Davon wiederum Verpackungen aus

- Papier und Pappe 3,15 Mio. Mg,
- Kunststoff 0,37 Mio. Mg,
- Holz 0,12 Mio. Mg,
- EAV 15010600: gemischte Verpackungen nicht differenzierbar 1,19 Mio. Mg,
- LVP 1,86 Mio. Mg,
- gemischte Wertstoffe zusammen mit LVP 0,26 Mio. Mg und

Beitrag der Kreislaufwirtschaft zur Energiewende

- Glas 1,27 Mio. Mg.

1,63 Mio. Mg sind Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen, öffentlichen Abwasserbehandlungsanlagen sowie der Aufbereitung von Wasser für den menschlichen Gebrauch und Wasser für industrielle Zwecke.

8,24 Mio. Mg sind Siedlungsabfälle, davon

- Papier und Pappe 4,08 Mio. Mg,
- Glas 0,55 Mio. Mg,
- Bekleidung und Textilien 0,72 Mio. Mg,
- biologisch abbaubare Abfälle 0,28 Mio. Mg,
- gemischte Siedlungsabfälle nicht differenzierbar 0,63 Mio. Mg,
- Hausmüll, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle gemeinsam über die öffentliche Müllabfuhr eingesammelt 0,08 Mio. Mg,
- Hausmüllähnliche Gewerbeabfälle, getrennt vom Hausmüll angeliefert oder eingesammelt 1,14 Mio. Mg,
- Sperrmüll 1,05 Mio. Mg.

4,78 Mio. Mg waren Bau- und Abbruchabfälle, die mit Ausnahme des Altholzes von 0,51 Mio. Mg nicht im Fokus dieser Bilanz stehen.

Für die Klimabilanz können somit folgende Fraktionen den mechanischen Sortier- und Aufbereitungsanlagen unter M(B)A zugewiesen werden:

- gemischte Siedlungsabfälle nicht differenzierbar 0,63 Mio. Mg
- Hausmüll, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle gemeinsam über die oder getrennt von der öffentliche Müllabfuhr eingesammelt 1,22 Mio. Mg,
- gemischte Verpackungen nicht differenzierbar 1,19 Mio. Mg

Das ergibt zusammen 3,04 Mio. Mg.

Für die optimierten Szenarien der Jahre 2030 und 2050 wird eine zusätzlichen Menge von 1,38 Mio. Mg PPK angenommen. Dies entspricht 50 % der heute noch im Restabfall enthaltenen Menge. Außerdem wird nach [Öko-Institut IFEU 2010] mit einer zusätzlich aussortierten Menge LVP von 1,3 Mio. Mg gerechnet.

A 2.6 Gemischte Gewerbeabfälle

Nach [Dehne et al. 2011] wurden 2007 unter den Abfallschlüsseln

- EAV 15010600: gemischte Verpackungen nicht differenzierbar 2,1 Mio. Mg und
- EAV 20030102 sowie 20030100 und 200399 anteilig: gemischte Gewerbeabfälle 4,3 Mio. Mg

entsorgt.

Die Statistik in 2011 weist hierfür auf

- EAV 15010600: gemischte Verpackungen nicht differenzierbar 2,3 Mio. Mg und
- EAV 20030102 sowie 20030100 und 200399 anteilig: gemischte Gewerbeabfälle 3,86 Mio. Mg.

Die Mengen zu Metallen, Kunststoffen und Elektrogeräten sind aus der Statistik nach [DeStatis 2013b] direkt übernommen. LVP wird (ebenfalls gemäß [DeStatis 2013b]) in LVP und Kunststoffe unterteilt.

Die daraus abgeleiteten, der Bilanz zugrunde gelegten Daten zu den Abfallströmen sind dem Hauptbericht zu entnehmen (Hauptstudie, Kapitel 4.2 und 4.4; Tabelle 4.1 und Abbildung 4.1).

A 3 Sachbilanz

A 3.1 Abfallzusammensetzung

Die Restabfallzusammensetzung aus Hausmüll und hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen, als direkter Input in die Deponie, die M(B)A¹ und die MVA wird nach [Öko-Institut/IFEU 2010] wie in Tabelle A 3.1 dargestellt festgesetzt.

Tabelle A 3.1: Mittlere Zusammensetzung für den, der Bilanz zugrunde gelegten, Mix aus Hausmüll und hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen für 2011 [nach Kern 2001, zitiert in Öko-Institut/IFEU 2010]

Abfallfraktionen	Bilanzdaten 2011
Organik	25,1 %
Holz	3,8 %
Textilien	2,4 %
Verbunde	8,1 %
Sonstige Abfälle (inkl. mineralischer Abfälle)	12,4 %
Feinfraktion < 8 mm	14,1 %
Fe/NE-Metalle	3,5 %
PPK	12,8 %
Glas	6,2 %
Kunststoffe	7,0 %
Windeln	4,3 %
Summe	100,0 %

Abweichungen in den Summen ergeben sich durch Rundungsungenauigkeiten.

A 3.2 Emissionsfaktoren für Strom und Wärme

Zur Bilanzierung der Strom- und Wärmeaufwendungen, sowie zur Berechnung der Gutschriften für die Strom- und Wärmeerzeugung bei der Abfallverwertung (Verbrennung und Vergärung) wurden die in Tabelle A 3.2 dargestellten Emissionsfaktoren herangezogen.

¹ M(B)A wird wie in [Öko-Institut/IFEU 2010] als Summe aus MBA, MBS, MPS und MA verstanden.

Tabelle A 3.2: Emissionsfaktoren Strom und Wärme

	2011	2030	2050
	kg CO ₂ eq/kWh	kg CO ₂ eq/kWh	kg CO ₂ eq/kWh
Strom	0,622	0,346	0,124
Wärme	0,294	0,152	0,094

A 3.3 Restabfall

Die Verteilung zwischen den unterschiedlichen M(B)A-Typen erfolgt nach den prozentualen Anteilen gemäß [Öko-Institut/IFEU 2010]: 44,1 Gew.-% für MBA, 24,7 Gew.-% für MBS/MPS, 31,2 Gew.-% für MA.

Der Input in die MVA ergibt sich als Differenz der Gesamtmenge und der getrennt erfassten Fraktionen.

A 3.3.1 Restmüll zur MVA

Zur Bilanzierung der MVA wurde ein elektrischer Netto-Wirkungsgrad von 10 % sowie ein thermischer Nettowirkungsgrad von 30 % angesetzt. Der in den Anlagen nicht zur Deckung des Eigenbedarfs benötigte Strom wird zu 100 % in das Netz eingespeist. Der eingespeiste Strom und die bereitgestellte Wärme wird der MVA gutgeschrieben.

Die erzeugte Wärme wird als Ersatz von Öl- und Gasheizungen (im Verhältnis 1:1) bilanziert.

Für die Berechnung der Belastung durch die Abfallverbrennung, sowie die Berechnung der Gutschrift für gewonnenen Strom und Wärme werden folgende Abfalleigenschaften zu Grunde gelegt (vgl. Tabelle A 3.3).

Tabelle A 3.3: Verbrennungseigenschaften des Restmülls in der MVA

Abfall	C gesamt g/kg FS	C fossil %	Heizwert kJ/kg FS
Restmüll	245	37	9.195

A 3.3.2 Restmüll zu M(B)An

Es werden 69 % des Abfalls in einer MBA mit aerober und 31 % in einer MBA mit anaerober biologischer Behandlung behandelt. Aus den M(B)An werden Eisen- und NE-Metalle sowie eine heizwertreiche Fraktion ausgeschleust. Die Reststoffe werden entweder thermisch verwertet oder deponiert. Die Aufteilung der Ströme für den Status Quo der Jahre 2011/2030/2050 erfolgte prozentual nach [Öko-Institut/IFEU 2010]. Es sind gemittelte Werte aus MBA, MBS/MPS und MA. Für das optimierte Szenario der Jahre 2030/2050 wurde von

**Beitrag der Kreislaufwirtschaft
zur Energiewende**

einer Verbesserung der MBA und MA hin zu einer MBS/MPS angenommen. Aus diesem Grund wurde hierfür die Stoffstromverteilung der reinen MBS/MPS herangezogen. Tabelle A 3.4 zeigt die der Bilanz zugrunde gelegten Stoffstromdaten.

Tabelle A 3.4: Verteilung der Outputströme für M(B)An als Mittel aus MBA, MBS/MPS und MA [Öko-Institut/IFEU 2010]

	M(B)A Status Quo 2011/2030/2050		M(B)A optimiert (≅MBS/MPS opt.) 2030/2050	
	Mio. Mg			
M(B)A gesamt	6,440	100 %	12,880	100 %
Verluste*	1,496	23 %	3,475	27 %
Deponie	1,499	23 %	1,490	12 %
NE-Metalle	0,012	0 %	0,023	0 %
Fe-Metalle	0,170	3 %	0,340	3 %
MVA	0,446	7 %	0,883	7 %
Zementwerk und Kohle KW	1,138	18 %	2,694	21 %
EBS-HKW	1,175	18 %	2,781	22 %
MVA (hwr)	0,431	7 %	1,020	8 %
Holz HKW	0,073	1 %	0,173	1 %

*Durch Trocknung und biologischen Abbau

Den Strom-, Wärme- und Erdgasbedarf sowie die jeweiligen Erträge der verschiedenen Anlagen zeigt Tabelle A 3.5. Wie oben beschrieben, wurde für das optimierte Szenario von einer technischen Verbesserung der MBA ausgegangen. Aus diesem Grund wurde mit den Verbrauchswerten der MBS/MPS-Anlagen bilanziert. Eine Strom- und Wärmeproduktion durch die Nutzung von Biogas wird auch im optimierten Szenario bilanziert. Die zu Grunde liegenden Annahmen (Methanausbeute, Wirkungsgrade BHKW) sind entsprechend die der MBA im Status Quo.

Tabelle A 3.5: Energie- und Gasverbräuche sowie Energieerträge der M(B)An [Öko-Institut/IFEU 2010 und eigene Berechnungen]

		MBA	MBS/MPS	MA	gew. Mittel
Energiebedarf					
Strom	kWh/Mg	41,6	38,9	18,3	33,7
Wärme	kWh/Mg	11,2	6	10	9,5
Erdgas	m ³ /Mg	4,7	41,6		12,3
Erträge (Nettoerzeugung)					
Strom	kWh/Mg	19,8			8,7
Wärme	kWh/Mg	28,2			12,4

Von der verbleibenden Überschussenergie wird der Strom vollständig und überschüssige Wärme zu 20 % mit einer Gutschrift angerechnet. Für das optimierte Szenario 2030/2050 wird die überschüssige Wärme zu 80 % genutzt.

A 3.3.3 Verteilung und Wirkungsgrade energetische Verwertung und MVA

Die ausgeschleuste heizwertreiche Fraktion wird energetisch weiterverwertet. Die Aufteilung auf die verschiedenen Verwertungswege erfolgte wie folgt:

- Mitverbrennung im Zementwerk: 23,1 %
- Mitverbrennung in Kohlekraftwerken: 17,3 %
- EBS Kraftwerke und Heizkraftwerke: 41,7 %
- MVA: 15,3 %
- Holzverbrennung: 2,6 %.

Tabelle A 3.6 zeigt die Wirkungsgrade der verschiedenen energetischen Verwertungsanlagen.

Tabelle A 3.6: Netto-Wirkungsgrade EBS-HKW, MVA, Holz-HKW

Anlage	el. Netto-Wirkungsgrad	therm. Netto-Wirkungsgrad	Quelle
EBS-HKW	18,8 %	16 %	Öko-Institut/IFEU 2010
MVA	12 %	30 %	Öko-Institut/IFEU 2010
Holz-HKW	20 %	20 %	Öko-Institut/IFEU 2010

Für die Mitverbrennung im Zementwerk und Kohlekraftwerk wurde der Ersatz von Steinkohle mit einem heizwertäquivalenten Substitutionsfaktor von 1 bilanziert.

Zur Bilanzierung der Jahre 2030 und 2050 wurden technische Verbesserungen bei der thermischen und energetischen Verwertung angesetzt. Diese führen zu höheren Netto-Wirkungsgraden (vgl. Tabelle A 3.7).

Tabelle A 3.7: Optimierte Netto-Wirkungsgrade MVA, EBS- und Holz-HKW

Anlage	el. Netto-Wirkungsgrad	therm. Netto-Wirkungsgrad
MVA in Grundlast	14 %	45 %
flexibles EBS-HKW	20 %	40 %
Holz-HKW	18 %	40 %

A 3.4 Bio- und Grünabfälle

A 3.4.1 Biogut

Das Verhältnis zwischen Bioabfallvergärung mit anschließender Kompostierung und reiner Bioabfallkompostierung wurde für das Biogut aus der Biotonne in [Öko-Institut/IFEU 2010] für 2006 mit 15 % zu 85 % bilanziert. Aus den aktuellen statistischen Daten lassen sich hierzu keine konkreten Angaben entnehmen. Deshalb wird angenommen, dass das Biogut in diesem Verhältnis aufzuteilen ist, die zusätzlich berücksichtigten Mengen an biologisch abbaubaren Küchen- und Kantinenabfällen sowie Marktabfällen aber zu 50 % vergärt und zu 50 % kompostiert werden. Daraus ergibt sich ein Verhältnis von insgesamt 20 % Vergärung mit anschließender Kompostierung und 80 % direkter Kompostierung.

Für die optimierten Szenarien der Jahre 2030 und 2050 wird mit einer zusätzlichen Menge Bioabfall (Biogut aus der Biotonne und Biomassen die mit diesem zusammen behandelt werden, wie biologisch abbaubare Küchen- und Kantinenabfälle sowie Marktabfälle) von 2,3 Mio. Mg gerechnet. Zudem wird der Bioabfall zu 80 % als Kaskadennutzung vergärt und anschließend zu hochwertigem Kompost verarbeitet und die restlichen 20 % werden direkt einer Kompostierung zugeführt.

Bei der Vergärung werden Maßnahmen zur Emissionsminderung von Treibhausgasen unterstellt, die zu einem Emissionsniveau von 10 % des Ausgangswertes führen. Bei der Kompostierung werden keine weiteren Reduktionsmöglichkeiten bezüglich der Treibhausgasemissionen gesehen, da der Anlagenbetrieb heute bereits weitestgehend optimiert ist (vgl. z. B. [Öko-Institut/IFEU 2010]; [IFEU et al. 2011]).

Beim Biogas wird unterstellt, dass eine flexible Nutzung möglich wird, indem das Gas aufbereitet und in das Erdgasnetz eingespeist wird. Dadurch kann der fossile Strommix gutge-

schrieben werden. Für den erhöhten Aufbereitungsaufwand wird die Energiegutschrift um 10 % gekürzt.

A 3.4.2 Grünabfall

Nach [DeStatis 2013b] ist der Input in Grünabfallkompostierungsanlagen 3,13 Mio. Mg. Zusätzlich werden 0,17 Mio. Mg biologisch abbaubare Abfälle in Biomassekraftwerken entsorgt. Das entspricht einem Anteil von 5,2 % energetischer Nutzung der Grünabfälle.

Nach [DeStatis 2013a] werden 4,78 Mio. Mg Grünabfälle stofflich und 0,23 Mio. Mg energetisch genutzt. Das entspricht ebenfalls einem Anteil energetischer Nutzung von etwa 5 %. Diese Daten werden der Bilanz zugrunde gelegt. Die heute bereits vereinzelt existierenden Vergärungsanlagen für Teile des Grünabfalls werden in den Status Quo Varianten vernachlässigt.

Für die optimierten Szenarien der Jahre 2030 und 2050 wird mit einer Steigerung der Grünabfallmenge von 1 Mio. Mg gerechnet. Der Grünabfall verteilt sich dann zu 62,5 % auf die Kompostierung, zu 18,75 % auf die Vergärung und zu 18,75 % auf die Verbrennung (vgl. [Öko-Institut/IFEU 2010]; [Öko-Institut 2008]; [IFEU et al. 2011]). Technische Verbesserungen werden wie beim Bioabfall angesetzt.

A 3.4.3 Kompostierung

Die angenommenen Anteile an offenen und geschlossenen Kompostierungsanlagen unterscheiden sich jeweils für die Kompostierung des Bio- und Grünabfalls. Es werden folgende Verteilungen angenommen:

- Bioabfall: 10 % offene Kompostierung und 90 % geschlossene.
- Grünabfall: 90 % offene Kompostierung und 10 % geschlossene.

Die Emissionen für offene und geschlossene Kompostierungsanlagen wurden nach [gewitra 2009] bilanziert. Die entsprechenden Methan- und Lachgas-Emissionen sind in Tabelle A 3.8 dargestellt.

Tabelle A 3.8: Emissionsfaktoren Kompostierung [gewitra 2009]

	Methan	Lachgas
	g/Mg Abfallinput	
Bio-und Grünabfall, geschlossen	710	68
Bio-und Grünabfall, offen	1.000	110
Grünabfall, offen	850	72

A 3.4.4 Vergärung

Die Bilanzdaten für eine durchschnittliche Bioabfallvergärung sind wie folgt angesetzt:

- mittlere Gasertrag 100 m³/t Bioabfall
- bei einem mittleren Methangehalt von 60 Vol %.

Das entspricht 60 m³ Methan je Mg Bioabfall. Für die Nutzung des erzeugten Biogases im BHKW wird von einem elektrischen Netto-Wirkungsgrad von 37,5 % und einem thermischen Netto-Wirkungsgrad von 43 % ausgegangen. Der Energieeigenbedarf wird mit 20 % bezogen auf den produzierten Strom und 25 % bezogen auf die produzierte Wärme berechnet. Die im Überschuss produzierte Energie wird für Strom vollständig mit einer Gutschrift angerechnet, bei Wärme wird davon ausgegangen, dass nur 20 % der Überschusswärme tatsächlich genutzt werden kann.

Die Emissionen bei der Vergärung zeigt Tabelle A 3.9.

Tabelle A 3.9: Emissionsfaktoren Vergärung [Öko-Institut/IFEU 2010 nach gewitra 2009]

	Methan	Lachgas
	g/Mg Abfallinput	
Vergärung mit geschlossener Nachrotte	3.700	120

A 3.4.5 Kompostprodukte und –anwendung

Der Kompost nach der Kompostierung sowie der Gärrest der Vergärung werden zum Teil als Dünger weitervermarktet. Die Emissionen nach der Aufbringung werden als Aufwendungen angerechnet. Der Kompost bzw. Gärrest substituieren damit allerdings Mineraldünger. Dafür werden den jeweiligen Verwertungswegen Gutschriften in Höhe des Herstellungsaufwandes von Mineraldünger, sowie der Emissionen des Mineraldüngers nach Aufbringung vergeben.

Je nach Anwendung erhalten die Komposte unterschiedliche Gutschriften. Die Verteilung der Aufwendungen zeigt Tabelle A 3.10.

Tabelle A 3.10: Bio- und Grünabfallverwertung als Dünger nach [Öko-Institut/IFEU 2010]

Anwendung	Kompost	Gärrest
Landwirtschaft	58 %	74 %
Hobbygarten, Garten- und Landschaftsbau	29 %	15 %
Erdenwerk	11 %	4 %
Rekultivierung	2 %	6 %

Beitrag der Kreislaufwirtschaft zur Energiewende

- Anwendung in der Landwirtschaft: Ersatz von Mineraldünger. Gutschriften entsprechend den mittleren Gehalten an Phosphor, Kalium, Magnesium, Calcium und anteilig Stickstoff im Kompost.
- Anwendung im Hobbygarten oder Garten- und Landschaftsbau: Ersatz von Mineraldünger und zusätzliche Anrechnung der organischen Düngewirkung. In diesen Anwendungsbereichen würde ohne Kompost Rindenhumus oder (früher) auch Torf eingesetzt. Deren Einsparung ist in der Verteilung 50 % Rindenhumus und 50 % Torf massenäquivalent zum Organikgehalt der Komposte gutgeschrieben.
- Anwendung im Erwerbsgartenbau bzw. in Erdenwerken zur Substraterzeugung: Ersatz von Torf massenäquivalent zum Organikgehalt.

Tabelle A 3.11 zeigt die Gutschriften für die Substitution von Mineraldünger.

Tabelle A 3.11: Gutschriften für die Substitution von Mineraldünger

		N-Dünger	P₂O₅-Dünger	K₂O-Dünger	CaO-Dünger
CO₂ fossil	g/kg	2.686	1.114	616,5	284,3
CH₄	g/kg	7,45	2,42	1,38	0,29
CH₄ reg	g/kg				
N₂O	g/kg	12	0,032	0,049	0,019
CO₂ fossil	g CO ₂ eq/kg	2.686	1.114	616,5	284,3
CH₄	g CO ₂ eq/kg	207	67,1	38,2	7,9
CH₄ reg	g CO ₂ eq/kg	0	0	0	0
N₂O	g CO ₂ eq/kg	3.576	9,6	14,6	5,78
Summe IPCC 2007		6.469	1.191	669	298

A 3.5 Papier, Pappe, Kartonage (PPK)

Altpapier wird nach einer Sortierung in Papierfabriken aufbereitet und verwertet. Die dabei anfallenden Reststoffe werden thermisch (Spuckstoffe rd. 0,6 % des Input) und energetisch in Kohlekraftwerken (Papierschlämme rd. 5,3 % des Input) verwertet [Öko-Institut/IFEU 2010]. Als Gutschrift für die erzeugten Altpapierfasern wird die vermiedene Herstellung von Primärfasern aus Industrieholz verrechnet. Die geringere Qualität der Sekundärfasern wird durch einen Substitutionsfaktor in Höhe von 0,95 berücksichtigt. Die substituierte Neufaser ergibt sich als ein Mix aus 57 % Zellstoff und 43 % Holzstoff. Durch das PPK-Recycling wird Holz eingespart, welches energetisch im Holz-HKW genutzt werden kann. In der vorliegenden Studie wird von einer Nutzung in Schweden als einem der wichtigsten Herkunftsländer

für Neufasern zur Papierherstellung ausgegangen. Einer energetischen Nutzung in Schweden wird die dortige durchschnittliche Strom- und Wärmeerzeugung gegenübergestellt.

A 3.6 Glas

Altglas wird aufbereitet und Glashütten zur Verwertung zugeführt. Der Scherbenanteil ersetzt Primärrohstoffe für die Glasherstellung. Zudem wird anteilig Energie eingespart, da die Altglasscherben gegenüber Rohmaterial einen geringeren Schmelzaufwand zur Glasherstellung bedingen.

A 3.7 Leichtverpackung

Die Zusammensetzung der LVP-Fraktion wurde nach [Öko-Institut/HTP 2012] wie folgt angenommen:

Tabelle A 3.12: Aufteilung der LVP-Fraktion [nach Öko-Institut/HTP 2012]

Fraktion	Anteil
Fe-Metalle (Weißblech)	11 %
NE-Metalle (Aluminium)	3 %
Flüssigkeitskarton (FKN)	6 %
PPK aus LVP	3 %
Folien	5 %
Andere Kunststoffarten (PE, PP, PET)	6 %
Mischkunststoffe	33 %
Sonstiges (Sortierrest)	32 %

Die Anteile der Fraktionen, die ins Recycling bzw. in die Verbrennung gehen, unterscheiden sich zwischen den Szenarien „Status Quo“ und „optimiert“ (vgl. Tabelle A 3.13).

**Beitrag der Kreislaufwirtschaft
zur Energiewende**

Tabelle A 3.13: Aufteilung der Recyclingfraktionen [nach Öko-Institut/HTP 2012]

Fraktion	2011/2030/2050 Status	2030/2050 Optimiert
Fe-Metalle (Weißblech)	9,7 %	12,3 %
NE-Metalle (Aluminium)	1,0 %	1,7 %
Flüssigkeitskarton (FKN)	3,8 %	3,4 %
PPK aus LVP	1,7 %	1,3 %
Folien	4,0 %	4,2 %
Andere Kunststoffarten (PE, PP, PET)	4,2 %	8,8 %
Mischkunststoffe (Regranulat)	2,1 %	2,9 %
Mischkunststoffe (Holz-/Beton-Ersatz)	4,5 %	3,6 %
MVA	10,1 %	8,4 %
Zementwerk	17 %	16 %
EBS-HKW	35 %	31 %

Die Bilanzlücke zu 100 % entspricht dem Feuchteverlust.

Die verschiedenen Mengen wurden mit den entsprechenden Netto-Gutschriften verrechnet. Dabei ist zu beachten, dass sich diese entsprechend den veränderten Strom- und Wärmemengen mit den Jahren verändern.

Tabelle A 3.14: Netto-Gutschriften für die LVP-Fraktionen [ecoinvent V3 2013, Gemis, eigene Berechnungen]

Fraktion	2011	2030	2050
	kg CO₂eq/Mg		
Fe-Metalle (Weißblech)	-2.286	-2.396	-2.556
NE-Metalle (Aluminium)	-8.344	-8.344	-6.649
Flüssigkeitskarton (FKN)	-743	-743	-743
PPK aus LVP	-719	-719	-719
Folien	-1.445	-1.585	-1.685
Andere Kunststoffarten (PE, PP, PET)	-1.756	-1.707	-1.653
Mischkunststoffe (Regranulat)	-1.720	-1.596	-1.478
Mischkunststoffe (Holz-/Beton-Ersatz)	-279,4	-403,6	-503,5
MVA	-86	61	207
Zementwerk	-1.219	-1.219	-1.219
EBS-HKW	7	-46	118
EBS-HKW „optimiert“	-	-366	-365

A 3.8 Elektrogeräte

Für die Entsorgung der Elektrogroßgeräte wird angenommen, dass beim Elektrogroßgeräte-recycling die gleichen Nettogutschriften erzielt werden wie beim Recycling der Bestandteile von Kühlgeräten, abzüglich der Belastungen und Gutschriften, die durch die Entsorgung der Kältemittel entstehen. Die Datengrundlage ist die Ökobilanz zur Entsorgung von Kühlgeräten [Öko-Institut 2007], in der die Entsorgung von Kühlgeräten mit einem nachfolgenden Metallrecycling und einer energetischen Verwertung der Shredderleichtfraktion bilanziert wurde. Der so ermittelte Emissionsfaktor für das Treibhauspotenzial ergibt nach [Öko-Institut 2008] eine Nettogutschrift von 1.295 kg CO₂eq/Mg Elektrogroßgeräte. Eine spezielle Ökobilanzstudie zu Elektrorecycling [IFEU 2005] kommt zu vergleichbaren Ergebnissen.

Die Bilanzdaten zu Elektrokleingeräten sind im Haupttext in Kapitel 3.1.4 beschrieben.

A 3.9 Altholz

Für Altholz wurden die Ansätze aus [Öko-Institut/IFEU 2010] für 2006 übernommen, nachdem eine Prüfung ergab, dass sie auch aktuell noch gelten. Insgesamt fallen in Deutschland nach verschiedenen Quellen ([EEG Monitoring 2008], [Mantau 2012], [BAV 2010]) deutlich höhere Mengen Altholz an, als in der Statistik unter Siedlungsabfälle aufgeführt. In [Öko-Institut/IFEU 2010] wurde zur Bilanzierung von einer Gesamt-Altholzmenge (Mittelwert des EEG-Monitoring 2008) von 6,9 Mio. Mg ausgegangen. Dieser Wert wird durch [BAV 2010] noch einmal bestätigt. Untersuchungen zur Holzbilanz für Deutschland für das Jahr 2010 ergaben nach [Mantau et al. 2012] ein Marktvolumen von rund 6,3 Mio. Mg Altholz. In dieser Studie wurde weiterhin mit einem Altholzaufkommen von 6,9 Mio. Mg bilanziert. Dabei setzt sich diese Menge nach [[BAV 2009] zitiert in [Öko-Institut/IFEU 2010]] aus Altholz aus Haushalten (Sperrholz), Verpackungsholz, Bau- und Abbruchholz sowie Holz aus Außenanwendungen zusammen. Die Verwertungswege des Altholzes wurden in [Öko-Institut/IFEU 2010] wie folgt angenommen: Die Mengen zur stofflichen Verwertung von Haus-, Sperrmüll und hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen werden in der Holzwerkstoffindustrie eingesetzt. Die restliche Menge wird energetisch verwertet. In [Öko-Institut/IFEU 2010] wurde eine Menge von 2,2 Mio. Mg stofflich verwertet. Nach [BAV 2010] benötigt die Holzwerkstoffindustrie, welche der mengenmäßig größte stoffliche Verwerter von Altholz ist, nur etwa 1,2 Mio. Mg pro Jahr. Auch [Mantau et al. 2012] gibt eine Menge von ca. 1 Mio. Mg an, die in der Spanplattenindustrie eingesetzt werden. Der Rest geht fast ausschließlich in die energetische Verwertung. Da sich der Split zwischen stofflicher und energetischer Verwertung auf das Bilanzergebnis nicht relevant auswirkt, weil die spezifischen Emissionsfaktoren etwa gleich sind, wurde der Bilanzansatz von 2010 beibehalten.

Bei Altholz werden demnach nach der aktuellen Statistik kombiniert mit [Öko-Institut/IFEU 2010] folgende Fraktionen in der Bilanz berücksichtigt:

- aus Sperrmüll 1,31 Mio. Mg [nach DeStatis 2013a],

**Beitrag der Kreislaufwirtschaft
zur Energiewende**

- aus Transport- und Umverpackungen 1,50 Mio. Mg [nach DeStatis 2013a],
- sonstiges Holz aus Siedlungsabfällen 0,12 Mio. Mg [nach DeStatis 2013b],
- Abfälle aus Holzbearbeitung 0,88 Mio. Mg [nach DeStatis 2013b],
- Abfälle aus der Forstwirtschaft 0,59 Mio. Mg [nach DeStatis 2013b],
- sonstiges Altholz 2,50 Mio. Mg als Differenz zu der Summe von 6,90 Mio. Mg [nach Öko-Institut/IFEU 2010].

Für die optimierten Szenarien der Jahre 2030 und 2050 wird mit einer zusätzlichen Menge von 0,35 Mio. Mg Altholz gerechnet. Diese Gesamtmenge wird zu gleichen Anteilen stofflich und energetisch verwertet.

Aufgrund des aktuell hohen Nutzungsdrucks von Holz wird, wie auch bei PPK, für die geschonte Holzmenge von einer energetischen Verwertung ausgegangen. Allerdings wird das geschonte Holz in Deutschland eingespart, womit der fossile deutsche Strommix gutgeschrieben wird. Es handelt sich dabei um vollständig regeneratives Material. Dadurch ist der Unterschied zwischen der stofflichen und energetischen Verwertung von Altholz gering.