



INSTITUT FÜR ENERGIE-
UND UMWELTFORSCHUNG
HEIDELBERG

Szenario Energiewende Berlin

Im Rahmen der Stoffstrom-, Klimagas- und Umweltbilanz für das Jahr 2016
für das Land Berlin

für die Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz (SenUVK),
Referat Kreislaufwirtschaft, 10179 Berlin

Regine Vogt

Heidelberg, Juni 2017



Inhalt

1	Veranlassung	1
2	Szenario Energiewende Berlin	2
2.1	Hintergrund und Vorgehen	2
2.2	Studien zu Szenarien für die Energiewende	4
2.2.1	Neue Energien für Berlin	4
2.2.1.1	Stromerzeugung	5
2.2.1.2	Wärmeerzeugung	6
2.2.1.3	Energieerzeugung aus (Abfall)Biomasse und Siedlungsabfällen	6
2.2.2	Studien zur Energiewende und Klimaschutzszenarien auf Bundesebene	7
2.3	Annahmen für die vergleichende Bilanzierung	10
2.3.1	Emissionsfaktoren für Strom und Wärme	11
2.3.2	Mitverbrennung von Abfällen in Kraftwerken	12
2.3.3	Mitverbrennung von Abfällen in Zementwerken	14
2.4	Vergleichende Klimagasbilanz	16
2.5	Schlussfolgerungen	21
	Literaturverzeichnis	23
	Abbildungsverzeichnis	25
	Tabellenverzeichnis	25
	Abkürzungsverzeichnis	26

1 Veranlassung

Gemäß dem vom Berliner Abgeordnetenhaus beschlossenen Abfallwirtschaftskonzept ist eine regelmäßige Stoffstrom-, Klimagas- und Umweltbilanz für die relevantesten, nicht gefährlichen Abfallarten durchzuführen. In einem ersten Schritt wurde zu diesem Zweck im Rahmen eines vom Bundesumweltministerium aufgelegten Förderprogramms im Auftrag der Senatsumweltverwaltung eine Untersuchung durchgeführt, in der zunächst eine vollständige Stoffstrombilanz sowie eine stoffstrombezogene Übersicht der Auswirkungen auf den Treibhauseffekt für das Bezugsjahr 2010 erstellt wurde. Ebenfalls umfasste die Studie eine Potenzialanalyse und einen Maßnahmenplan zur Erreichung weiterer Treibhausgasentlastungen. Aufbauend auf diese Studie wurde im Weiteren das für das Jahr 2010 erstellte Rechentool zur Bilanzierung und Fortschreibung auf wesentliche Umweltparameter ausgeweitet und eine umfassende Stoffstrom-, Klimagas- und Umweltbilanz für das Jahr 2012 durchgeführt. Basierend auf der entwickelten Systematik erfolgte schließlich die Erstellung der Stoffstrom-, Klimagas- und Umweltbilanz (SKU-Bilanz) für das Jahr 2014. Im gegebenen Vorhaben wird die SKU-Bilanz für das Jahr 2016 erstellt.

Über die Bilanzierung für das Jahr 2016 hinaus ist ein Szenario darzustellen, in dem die konkreten Auswirkungen der geplanten Energiewende im Land Berlin auf die im Jahr 2014 ermittelte Klimawirksamkeit der Entsorgung der untersuchten 37 Berliner Abfälle untersucht und bewertet wird. Dieses „Szenario Energiewende Berlin“ ist nachfolgend beschrieben.

2 Szenario Energiewende Berlin

Im „Szenario Energiewende Berlin“ werden die konkreten Auswirkungen der geplanten Energiewende im Land Berlin auf die im Jahr 2014 ermittelte Klimawirksamkeit der Entsorgung der untersuchten 37 Berliner Abfälle dargestellt und bewertet.

2.1 Hintergrund und Vorgehen

Die Stoffstrom-, Klimagas- und Umweltbilanz wird in einem zweijährigen Rhythmus erstellt. Ihre Erstellung folgt der Systematik von Ökobilanzen der Abfallwirtschaft und ist damit eine sektorale Betrachtung. Das bedeutet, dass nicht nur direkte Emissionen und Auswirkungen durch die Berliner Abfälle ermittelt werden, sondern auch die durch die Abfallentsorgung erbrachten Leistungen in Form von Entlastungspotenzialen einbezogen sind. Dies umfasst potenzielle Entlastungen durch die energetische Nutzung von Abfällen sowie durch die stoffliche Verwertung. Die Anrechnung dieser potenziellen Entlastungen erfolgt in der Bilanz durch Gutschriften. Für die energetische Nutzung unterscheiden sich die Gutschriften nach der Art der Nutzung. Beim Einsatz im MHKW Ruhleben oder in EBS-Kraftwerken mit dem Hauptzweck der schadlosen Entsorgung von Abfällen wird die dabei erzeugte Endenergie (Strom, Wärme) angerechnet. Bei der Mitverbrennung von Abfällen in Kraft- oder Zementwerken ersetzen die Abfälle dagegen Primärbrennstoffe, die für den Hauptzweck der Anlagen – die Erzeugung von Endenergie bzw. von Zementklinker – ansonsten benötigt werden. Hier wird heizwertäquivalent der vermiedene Einsatz fossiler Brennstoffe angerechnet.

Die Hintergründe für das methodische Vorgehen und die getroffenen Festlegungen für die SKU-Bilanz sind ausführlich im Methodenkapitel in (ifeu/ICU 2012) beschrieben. Darin auch diskutiert wurde die Problematik der verschiedenen Betrachtungsebenen – Durchschnittsbetrachtung und Marginalansatz – für die Anrechnung von „zusätzlich“ erzeugter Energie durch die thermische Behandlung von Abfällen. Abschließend wurde festgelegt, die Durchschnittsbetrachtung für die Bilanzierung anzuwenden. Bei der Durchschnittsbetrachtung wird die jeweilige durchschnittliche Erzeugung von Endenergie als Gutschrift angerechnet. Für die SKU-Bilanz sind dies innerhalb Berlins die Emissionsfaktoren für Vattenfallstrom und für Heizwärme in Berliner Haushalten und außerhalb Berlins die Emissionsfaktoren für den Strommix Deutschland und für Heizwärme in bundesdeutschen Haushalten.

Ein wichtiges Argument für die Durchschnittsbetrachtung liegt darin, sicherzustellen, dass bei der Beurteilung abfallwirtschaftlicher Aktivitäten für alle betrachteten Systeme – gegenwärtige wie zukünftige – die gleiche Systematik verwendet wird. Insbesondere vor dem Hintergrund der sich verändernden Energiewirtschaft wäre beim Marginalansatz fraglich, ab wann es nicht mehr gerechtfertigt ist, ausschließlich aus fossilen Energieträgern erzeugten Strom als Gutschrift anzurechnen, dessen Anteil gemäß politischer Zielsetzung stetig reduziert wird (wann endet die Wahrscheinlichkeit, dass marginal durch „zusätzlich“ erzeugten Strom ausschließlich fossil erzeugter Strom ersetzt wird?). Als Konsequenz der Festlegung die Durchschnittsbetrachtung zu verwenden

den sinkt bei Anpassung der Emissionsfaktoren die Gutschrift für zusätzlich erzeugte Energie über die Zeit durch die politisch gesetzten Vorgaben für die Energiewende.

Im Rahmen der SKU-Bilanzierung ist es von Bedeutung, diese absehbare Veränderung vorausschauend zu betrachten und zu kommunizieren. Entscheidend und die Schwierigkeit dabei ist, zu vermitteln, dass sich nicht die Leistungen der Abfallwirtschaft ändern bzw. verschlechtern, sondern die Rahmenbedingungen, die die Energiewirtschaft betreffen. Die geringer werdenden Gutschriften für zusätzlich erzeugte Endenergie werden sich durch die Aktualisierung der Emissionsfaktoren in der SKU-Bilanz mittelfristig zeigen.

Darüber hinaus haben die politischen Zielsetzungen im Rahmen des Klimaschutzes auch für weitere Bereiche signifikante Folgen. So zunächst für die Mitverbrennung von Abfällen in Kraft- und Zementwerken für die heizwertäquivalent die Substitution fossiler Brennstoffe angerechnet wird. Für Kohlekraftwerke ist dies mit der Energiewende insofern eindeutig, als dass diese bedingt durch die Energiewende langfristig stillgelegt werden und damit keine Abfälle mehr mitverbrannt werden können. Anders ist dies bei Zementwerken, deren Hauptzweck – die Erzeugung von Zementklinker – zunächst nicht durch die Energiewende beeinträchtigt wird. Allerdings ist absehbar, dass mit den deutschen Klimaschutzziele¹ auch Produktionsanlagen technische Lösungen finden müssen, bei denen auf den Einsatz von fossilen Brennstoffen verzichtet werden kann. In der UBA Studie „Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050“ (UBA 2015) wird für die Zementindustrie als Szenario für 2050 angesetzt, dass Zement zu 50% über neue Produktionsverfahren und neuartige Bindemittel erzeugt wird, deren Energiebedarf ausschließlich durch regenerativ erzeugten Strom gedeckt wird und zu 50% nach herkömmlichen Verfahren, die als Brennstoff aus atmosphärischem CO₂ erzeugtes Methan (Power-to-Gas, PtG) verwenden. Als Übergangslösung bzw. als erster Ansatz zur Umstellung für die herkömmlichen Produktionsverfahren kommt die Umstellung von Kohle auf Erdgas als Brennstoff in Frage, das energiespezifisch geringere Treibhausgasemissionen verursacht. Entsprechend einer solchen Entwicklung sind auch hier die Gutschriften bzw. das Referenzsystem für die Mitverbrennung von Abfällen mittel- bis langfristig anzupassen.

Langfristig betrachtet werden die durch die Klimaschutzziele bedingten Veränderungen auch bei der stofflichen Verwertung zu Veränderungen in den Referenzsystemen führen. Angerechnet werden hier die potenziellen Entlastungen der stofflichen Verwertung durch Gutschriften für die vermiedene Herstellung von Primärprodukten. Hier besteht beispielsweise langfristig eine absehbare Veränderung beim Recycling von Kunststoffen, wenn diese nicht mehr aus Rohöl, sondern ebenfalls synthetisch über Power-to-X Technologien² erzeugt werden. Eine entsprechend veränderte Herstellung von Kunststoffen hätte umgekehrt wiederum Auswirkungen auf die Klimagasbelastung durch die energetische Nutzung dieser. Die resultierenden THG-Emissionen wären klimaneutral. Diese Aspekte sind für die gegebene Fragestellung der konkreten Aus-

¹ 95% Minderung der Klimagasemissionen bis 2050 gegenüber 1990 als Beitrag Deutschlands zur Begrenzung der Erderwärmung auf 2°C bzw. weitergehende Begrenzung der globalen Erwärmung auf deutlich unter 2°C, möglichst 1,5°C, gemäß Pariser Abkommen (COP21, United Nations Framework Convention on Climate Change, 21st Conference of the Parties, 30.11.-12.12.15).

² Bei PtX-Verfahren wird CO₂ aus dem Abgas oder aus der Atmosphäre gewonnen und mit Wasserstoff zu Methan umgewandelt. Für die Erzeugung von Kunststoff folgen weitere Umwandlungsschritte zu Methanol und zu länger-kettigen Kohlenstoffmolekülen.

wirkungen durch die geplante Energiewende im Land Berlin allerdings nicht unmittelbar adressiert.

Zur Beantwortung der Fragestellung wird in einem ersten Schritt ermittelt, ob und wenn ja, wie sich die geplante Energiewende im Land Berlin auf die Klimawirksamkeit der Entsorgung der untersuchten 37 Abfallarten auswirkt. Hierfür werden die Vorgaben aus dem Bericht der Enquete-Kommission „Neue Energie für Berlin“ (Abgeordnetenhaus Berlin 2016) ausgewertet (Kapitel 2.2.1). Darüber hinaus werden analoge Zielsetzungen auf Bundesebene herangezogen, um auch die außerhalb des Landes Berlin erfolgende Entsorgung von Berliner Abfällen in die Betrachtung im Zukunftsszenario einbeziehen zu können. Entsprechende Studien werden im Überblick dargestellt und eine Auswahl für das Szenario Energiewende Berlin vorgenommen (Kap. 2.2.2).

Die Ableitung und Darstellung der Daten und Randbedingungen für das zu berechnende Zukunftsszenario erfolgt in Kapitel 2.3. Die Ergebnisse des Vergleichs der Ist-Situation (Bilanz für das Jahr 2014) und des Zukunftsszenarios werden in Kapitel 2.4 gezeigt.

2.2 Studien zu Szenarien für die Energiewende

In den nachfolgenden Unterkapiteln werden für das „Szenario Energiewende Berlin“ die wesentlichen Aspekte aus den Studien für Berlin und für die Bundesebene beschrieben.

2.2.1 Neue Energien für Berlin

Der Bericht der Enquete-Kommission „Neue Energien für Berlin“ (Abgeordnetenhaus Berlin 2016) betrachtet ausgehend von der Ist-Situation im Jahr 2010 die möglichen bzw. angestrebten Treibhausgas(THG)Minderungseffekte durch neue Energien in Berlin für das Zieljahr 2050. Ausgangspunkt für den Bericht bildet das vom Deutschen Bundestag am 28. Oktober 2010 beschlossene Energiekonzept³ in dem eine Reduktion der THG-Emissionen bis 2050 auf 85% gegenüber 1990 beschrieben wird.

Für Berlin wird die Zielsetzung formuliert spätestens bis zum Jahr 2050 zu einer klimaneutralen Stadt zu werden, die von allen Fraktionen des Berliner Abgeordnetenhauses unterstützt wird. Hierfür muss sichergestellt werden, dass Berlin bis zum Jahr 2050 seine THG-Emissionen um mindestens 85% gegenüber dem Jahr 1990 reduziert, was einer Verringerung von ca. 25 Millionen Tonnen pro Jahr auf ca. 4 Millionen Tonnen jährlich entspricht (bei gleichbleibender Einwohnerzahl). Für den Bereich der Energieerzeugung bedeutet die Zielsetzung, dass die Verwendung fossiler Brennstoffe in allen Verbrauchsbereichen gegen null reduziert werden muss.

Gemäß Klimaschutzvereinbarung mit Vattenfall wird die bestehende Braun- und Steinkohleverstromung in Berlin an den Standorten Reuter C und Klingenberg spätestens 2020 beendet. Für die Standorte Moabit und Reuter West fehlt noch eine Ausstiegsperspektive. Für die alternative Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energien werden intelligente Steuerungssysteme und Speichertechnologien benötigt, um den Be-

³ Bundestag Drucksache 17/3049 sowie 17/3050

darf mit hoher Versorgungssicherheit zu decken. In Berlin selbst können nennenswerte Mengen an erneuerbaren Energien nur durch Photovoltaik erzeugt werden. Entsprechend muss das städtische Elektroverteilungssystem ertüchtigt werden für den Import erneuerbarer Energien sowie die Einbindung dezentraler Einspeiser (BHKW, Solar-, Wind-, Geothermieanlagen, Wärmepumpen). Gleichzeitig muss der Energieverbrauch durch Effizienz- und Einsparmaßnahmen fortlaufend verringert werden. Im Verkehrssektor geht es um die Beendigung der Nutzung von Benzin und Diesel.

Die Schlussfolgerungen und Empfehlungen der Enquete-Kommission sind nachfolgend genauer beschrieben. Darin nicht umfasst ist der Bereich Verkehr, der nicht in den Untersuchungsauftrag der Enquete-Kommission fiel.

2.2.1.1 Stromerzeugung

Für die Stromerzeugung besteht der größte Handlungsbedarf beim braunkohlebefeuerten HKW Klingenberg und den steinkohlebefeuerten HKWs Moabit, Reuter und Reuter West. Für die Standorte Reuter C und Klingenberg, deren Betrieb nach Klimaschutzvereinbarung bis 2020 beendet werden soll, plant die Firma Vattenfall mittlerweile alternativ bis zum Jahr 2020 GuD-Anlagen zum Ersatz für das Braunkohlekraftwerk Klingenberg fertigzustellen. Die Enquete-Kommission empfiehlt darüber hinaus den kompletten Ausstieg aus der Kohleverstromung und -wärmegewinnung bis spätestens zum Jahr 2030. Ziel der neuen Landesregierung ist es, spätestens 2030 aus der Kohleverstromung auszusteigen. Vor diesem Hintergrund ist es vor allem erforderlich, dass die beiden bestehenden Steinkohlekraftwerke Reuter West und Moabit stillgelegt werden.

Um eine flexible Stromerzeugung zu ermöglichen empfiehlt die Enquete-Kommission den schnellstmöglichen Umstieg auf Gas als Brennstoff. Langfristig wird Power-to-Gas (PtG) als Möglichkeit gesehen klimaneutrales Gas einzusetzen, auch Biomethan verbessert die Emissionsbilanz. Des Weiteren sind Wärmespeicher und smarte Netze auszubauen, um KWK-Anlagen stromgeführt fahren zu können sowie virtuelle Kraftwerke zu fördern zur Steuerung eingespeister erneuerbarer Energien (Windkraft aus Brandenburg) und dezentraler BHKWs.

Schätzungen zufolge sind in Berlin 25% Stromerzeugung aus PV-Anlagen erreichbar (bei Nutzung von 21% der Dachflächen in Berlin und 4% der Fassaden). Der bisherige Solarstromanteil in Berlin beträgt etwa 0,6%. Nach Empfehlung der Enquete-Kommission sollten bis zum Jahr 2020 80% und bis zum Jahr 2025 alle dafür geeigneten Dachflächen des Landes Berlin genutzt werden. Das Windpotenzial für Berlin wurde zu 312,5 TWh ermittelt. Mit Brandenburg wird ein Stromerzeugungspotenzial aus erneuerbaren Energien gesehen, das bis zum Jahr 2030 bilanziell zu einer 100%igen Versorgung führen könnte. Zur Versorgungssicherheit werden schnell regelbare Kraftwerke benötigt. Zur Erreichung einer 100%igen Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen ist ein Ausbau von Stromspeichern erforderlich. Bei einer (gemessen am Verbrauch) bundesweit einheitlichen Speicherung würden auf Berlin grob Speicher von bis zu 3 GW Entladeleistung entfallen, je zur Hälfte als Kurz- und Langzeitspeicher.

→ bereits 2030 sollte damit ein Stand erreicht sein, bei dem die Stromerzeugung für Berlin ausschließlich durch erneuerbare Energien und Erdgas erfolgt.

→ für das Jahr 2050 sollte eine 100%ige Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien für Berlin gegeben sein.

2.2.1.2 Wärmeerzeugung

Für die Wärme- und Kälteversorgung der Berliner Gebäude wird im Bericht der Enquete-Kommission die „Machbarkeitsstudie Klimaneutrales Berlin 2050⁴“ herangezogen. Das darin beschriebene Referenzszenario für die Umstrukturierung der Wärmeversorgung bis 2050 reicht nicht zur Erreichung der Zielsetzung für Berlin aus. Erst die Zielszenarien ermöglichen den notwendigen Beitrag. Dies erfordert den Rückgang des Endenergieverbrauchs um knapp 50% (Zielszenario 1) bzw. nahezu 60% (Zielszenario 2). Zudem müssen erneuerbare Energieträger eingesetzt werden in Höhe von 52% (Zielszenario 1) bis 57% (Zielszenario 2) (aktueller Anteil knapp 2%). Hierzu ist überschüssiger EE-Strom direkt zur Wärmeerzeugung zu nutzen (Power-to-Heat, PtH) oder zur Gaserzeugung für den Wärmebedarf (Power-to-Gas, PtG). Solarthermie und Biomasse können nur einen geringen Beitrag leisten. Die nicht-erneuerbaren Anteile werden über Gas und KWK-Fernwärme gedeckt.

Von allen Handlungsfeldern wird der Gebäudebereich auch künftig mit einem Anteil am gesamten Endenergieverbrauch (einschließlich Verkehr) von ca. 50% der mit weitem Abstand bedeutsamste Verbrauchssektor sein.

→ Im Jahr 2050 muss der Endenergieverbrauch mindestens halbiert werden. Der Anteil erneuerbarer Energien muss auf mindestens 52% erhöht werden (Rest Gas bzw. KWK-Fernwärme).

2.2.1.3 Energieerzeugung aus (Abfall)Biomasse und Siedlungsabfällen

Die energetische Nutzung von Biomasse bietet als Übergangslösung die Chance schneller von Kohle und Öl unabhängig zu werden. Allerdings muss die Nutzung von Anbaubiomasse unter Einhaltung strenger Nachhaltigkeits- und Sozialstandards erfolgen. Langfristig wird Anbaubiomasse für hochwertigere Nutzungen wie stoffliche Verwertung oder Treibstoffe gebraucht. Biogene Abfälle können dagegen auch langfristig zur Energiegewinnung in Berlin beitragen.

Für die Energieerzeugung aus (Abfall)Biomasse spricht die Enquete-Kommission verschiedene Empfehlungen aus:

1. Ausweitung der Bioabfallsammlung auf das gesamte Stadtgebiet wodurch weitere 100.000 Tonnen Bioabfall eingesammelt werden können; klimafreundliche Nutzung durch eine hocheffiziente energetische Verwertung analog der Verwertung in der bestehenden Biogasanlage der BSR (= Aufbereitung zu Biomethan als Kraftstoff)
2. Nutzung von v.a. Althölzern (ca. 140.000 t/a), Grasschnitt und Laub (ca. 110.000 t/a) sowie Klärschlämme (ca. 90.000 t/a) als Energieträger für das Land Berlin sowie Optimierung der Verwertung von EBS aus Siedlungsabfällen.

⁴

3. Energetische Verwertung der Klärschlämme in Berlin in einer neu zu bauenden hocheffizienten Verbrennungsanlage.
4. Monitoring und Steuerung eines nachhaltigen Biomasseimports.
5. Unterstützung von Kurzumtriebsplantagen (KUP) an ökologisch vorteilhaften Standorten (vorrangig degradierte oder vorbelastete Flächen, die nicht für den Ackerbau zur Verfügung stehen, z.B. Berliner Rieselfelder).

→ im Jahr 2050 sollten die die Abfallwirtschaft betreffenden Maßnahmen 1-3 umgesetzt sein.

2.2.2 Studien zur Energiewende und Klimaschutzszenarien auf Bundesebene

Im Verlaufe der letzten Jahre wurden verschiedene Untersuchungen zur Energiewende sowie Klimaschutzszenarien durchgeführt. Einen Überblick relevanter Studien zeigt Tabelle 2.1.

Tabelle 2.1: Studien zur Energiewende und Klimaschutzszenarien

Studie	Auftraggeber	Untersuchungsgegenstand	Zieljahr(e)
(ewi/gws/Prognos 2010, 2011)	BMWi	KKW Ausstiegsszenarien	2020-2025
(ewi/gws/Prognos 2014)	BMWi	Prognose energiewirtschaftliche Entwicklung	2030 und Trend 2050
(consentec/ISI/ifeu, lfd. Vorhaben)	BMWi	Leitstudie: Auswirkungen Klimaschutzziele auf den Energiesektor	Langfristszenarien 2050 und mittelfristige Perspektive 2030 mit Stützjahren 2020, 2025
(Ecofys 2012)	Greenpeace	Kohleausstiegsgesetz	2012-2040
Projektionsbericht 2015 gemäß VO 525/2013/EU (Berechnungen Fraunhofer ISI und Öko-Institut)	BMUB	Projektionen THG-Emissionen ohne Maßnahmen und mit eingeführten klima- und energiepolitischen Maßnahmen bis 31.08.2014	Zeitraum 2005-2035 (5-Jahresschritte)
(Öko-Institut/ISI 2015)	BMUB	Klimaschutzszenario 2050; 3 Szenarien: - Aktuelle Maßnahmen (AMS 2012) - 80% Minderung (KS80) - 90% Minderung (KS90)	2020, 2030, 2040, 2050 (Basisjahr 2010)

Im Kontext des durchzuführenden Szenarios Energiewende Berlin ist nicht nur die Entwicklung in Berlin, sondern auch die bundesweite Entwicklung von Relevanz, da Abfälle aus Berlin auch außerhalb Berlins entsorgt werden. In Anlehnung an den Bericht der Enquete-Kommission für das Land Berlin wird eine Studie benötigt, die als Zieljahr das Jahr 2050 betrachtet. Von den in Tabelle 2.1 aufgeführten Studien kommt hierfür insbesondere das Klimaschutzszenario 2050 in Betracht. Die anderen gelisteten Studien haben entweder einen kürzeren Zeithorizont oder betrachten sehr spezifische Szenarien für die Entwicklung der Stromerzeugung in Deutschland (KKW Ausstiegssze-

nario, Kohleausstiegsgesetz, energiewirtschaftliche Entwicklung). Die Leitstudie (consentec/ISI/ifeu) befindet sich noch in Bearbeitung und ist hier nur der Vollständigkeit halber aufgeführt.

Die Studie „Klimaschutzszenario 2050“ (Öko-Institut/ISI 2015) wurde auch in „Beitrag der Kreislaufwirtschaft zur Energiewende“ (Öko-Institut 2014) zugrunde gelegt, eine Studie, die im gegebenen Kontext ebenfalls eine wichtige Literaturquelle darstellt.

Die 3 Szenarien in „Klimaschutzpotenziale 2050“ sind wie folgt charakterisiert:

- 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 (THG-Minderung um 80% gegenüber 1990, Erneuerbare Energien, Energieeffizienz)
- Klimaschutzszenario 90 (KS 90): Erreichung einer THG-Minderung von 90% gegenüber 1990 und damit eine weitgehend CO₂-freie Stromerzeugung

Für den Szenarienvergleich in dieser Studie erfolgt eine enge Anlehnung an die Vorgehensweise der Studie des Öko-Instituts (2014), die sich ebenfalls mit der Thematik des Einflusses der Energiewende auf die Kreislaufwirtschaft befasst. Die darin verwendeten Emissionsfaktoren für Strom und Wärme für die Jahre 2030 und 2050 werden hier übernommen, wodurch auch eine gewisse Vergleichbarkeit ermöglicht wird.

Für die vergleichende Klimagasbilanz wurde in Öko-Institut (2014) das Klimaschutzszenario 80 (KS 80) zugrunde gelegt, in dem die Ziele des deutschen Energiekonzepts erreicht werden (Tabelle 2.2).

Tabelle 2.2: Ziele des Energiekonzepts der Bundesregierung und THG-Minderung

	Anteil EE an der Stromerzeugung	Anteil EE Bruttoendenergieverbrauch	THG-Minderung ggü. 1990
2020	35%	18%	40%
2030	50%	30%	55%
2040	65%	45%	70%
2050	80%	60%	80-95%

Quelle: Bundesregierung (2011), Öko-Institut (2014)

Im Szenario KS 80 wird für die Zieljahre 2030 und 2050 davon ausgegangen, dass der fossile Anteil (Kohle und Erdgas) an der Stromerzeugung auf rd. 29% respektive 7,4% sinkt⁵. Entsprechend der Abnahme der fossilen Stromerzeugung im Zeitverlauf sinken auch die durchschnittlichen CO₂-Emissionen der inländischen Stromerzeugung. Tabelle 2.3 zeigt die im Klimaschutzszenario 2050 (Öko-Institut/ISI 2015) abgeleiteten Emissionsfaktoren für die durchschnittliche Stromerzeugung für die Jahre 2030 und 2050. Unterschieden sind in der Tabelle dabei die direkten CO₂-Emissionen sowie die THG-

⁵ Rest v.a. Erneuerbare Energien (60% bzw. rd. 75%) sowie Sonstige, Pumpspeicher, Backup-Kraftwerke und Importe.

Emissionen inklusive Vorkette, d.h. inkl. der Klimagasemissionen, die aus der Bereitstellung v.a. der fossilen Brennstoffe anfallen. Zum Vergleich zeigt Tabelle 2.3 auch die Emissionsfaktoren, die in der SKU-Bilanz 2014 (ifeu 2015a) verwendet wurden, die für die vorliegende vergleichende Untersuchung als Referenz dient. Des Weiteren sind in der Tabelle analoge Emissionsfaktoren für die Wärmeerzeugung dargestellt. Für die Klimagasbilanz sind die Emissionsfaktoren inklusive der Vorkette maßgeblich.

Tabelle 2.3: Emissionsfaktoren Strom und Wärme 2030 und 2050 im Vergleich zu SKU-Bilanz 2014

Jahr	Bezugsraum	Einheit	Strom	Gutschrift flexibler Strom	Wärme
2014	Berlin (mit Vorkette)	g CO ₂ -Äq/kWh	743		249
	Deutschland (mit Vorkette)	g CO ₂ -Äq/kWh	633		280
2030	Deutschland direkte CO ₂ -Emissionen	g CO ₂ /kWh	288	832	141
	Deutschland (mit Vorkette)	g CO ₂ -Äq/kWh	346		152
2050	Deutschland direkte CO ₂ -Emissionen	g CO ₂ /kWh	91	823	ca. 81
	Deutschland (mit Vorkette)	g CO ₂ -Äq/kWh	124		94

Quelle: (Öko-Institut 2014), (ifeu 2015a)

In Öko-Institut (2014) wird darauf hingewiesen, dass mit der stark sinkenden Erzeugung von Strom in konventionellen Kraftwerken (Kohle, Erdgas) auch die Stromerzeugung abnimmt, die flexibel hoch- oder runtergefahren werden kann (einlastbare Stromerzeugung). Nur ein Teil dieser Funktion kann durch Strom aus Biogas und Biomasse übernommen werden oder durch (teils neu zu errichtende) Backup-Kraftwerke wie z.B. Gasturbinen und Gasmotoren, die statt mit Erdgas auch mit synthetisiertem Methan (PtG) betrieben werden können. Der Rest muss weiterhin über die konventionelle Stromerzeugung abgedeckt werden. Damit nimmt die flexible Stromerzeugung im künftigen Energiesystem einen besonderen Stellenwert ein. In Öko-Institut (2014) wird aufgrund dessen für die Gutschrift für Strom aus Abfall folgende Unterscheidung vorgenommen:

Gutschriften für Stromerzeugung

- Anlagen, die Strom im Grundlastbetrieb erzeugen, ersetzen die durchschnittliche Stromerzeugung („Strom“ in Tabelle 2.3)
- Anlagen, die flexiblen Strom erzeugen, ersetzen die anteilige konventionelle Stromerzeugung („Gutschrift flexibler Strom“ in Tabelle 2.3)

Damit erhält die flexible Stromerzeugung mit der Energiewende eine deutlich höhere Gutschrift als die Stromerzeugung im Grundlastbetrieb. Diese Unterscheidung ist gerechtfertigt, da durch flexible Stromerzeugung der Betrieb fossiler Reservekraftwerke vermieden wird. In der vorliegenden Untersuchung wird diese Unterscheidung ebenfalls angewendet.

Grundsätzlich möglich ist eine flexible Stromerzeugung im Abfallsektor durch Speichersysteme wie beispielsweise die Lagerung von Abfallbrennstoffen oder die Speicherung von aus Abfall erzeugtem Biogas. Die Lagerungsmöglichkeit von Abfällen ist allgemein gegeben. Nach Öko-Institut (2014) dürfen Ersatzbrennstoffe (EBS) bis zu einem Jahr gelagert werden. Dies gilt nach Angaben der BSR (2017) gleichermaßen für Restmüll. Eine Genehmigung zur Lagerung für ein Jahr ist problemlos möglich, die Abfälle müssen lediglich balliert werden. Eine Verbrennung ist dann theoretisch flexibel in Müllverbrennungsanlagen bzw. für EBS in EBS-Kraftwerken möglich. In der Praxis stellt sich allerdings die Problematik, dass diese Verbrennungsanlagen (überwiegend Rostfeuerungen) nicht ohne Weiteres beliebig hoch- und runtergefahren werden können. Auch gilt zu bedenken, dass Reservekraftwerke nur eine begrenzte Betriebsstundenzahl pro Jahr im Einsatz sind, so dass einerseits selbst ein Jahr Lagerfähigkeit ggf. für eine ordnungsgemäße Entsorgung nicht ausreicht und andererseits die Wirtschaftlichkeit eines solchen Betriebs thermischer Abfallbehandlungsanlagen in Frage steht. Insofern wird für die hier durchgeführte Untersuchung die flexible Stromerzeugung aus Abfall in Form von Szenarien betrachtet.

Flexible Stromerzeugung aus Abfall

2.3 Annahmen für die vergleichende Bilanzierung

Grundsätzlich gilt für die vergleichende Bilanzierung in Anlehnung an die Ökobilanzmethode, dass die gesamte Abfallmenge konstant sein muss (vgl. ifeu/ICU 2012). Entsprechend wird auch für die hier durchzuführende Untersuchung keine Veränderung des gesamten Abfallaufkommens angenommen.

Konstantes Gesamtabfallaufkommen

Als Zeithorizont für das Zielszenario für die vergleichende Bilanzierung wird zunächst das Jahr 2050 gewählt, da 2050 auch das Zieljahr ist, das im Bericht der Enquete-Kommission (Abgeordnetenhaus Berlin 2016) betrachtet wurde. Darüber hinaus wird zur Darstellung der Veränderungen in der Übergangszeit auch das Jahr 2030 untersucht und hierfür soweit möglich bzw. soweit Informationen verfügbar sind ebenfalls Daten und Randbedingungen für die Bilanzierung abgeleitet.

Zieljahre 2050 und 2030

Grundsätzlich sind für Szenarien, die durch die Energiewende bestimmt werden, folgende Daten bzw. Randbedingungen für die THG-Bilanzierung abzuleiten bzw. festzulegen:

Randbedingungen für Szenarien Energiewende

1. Emissionsfaktoren für Strom und Wärme (Energiebedarf und Gutschrift)
 - a) für Berlin (Vattenfallstrom bzw. Strommix Berlin und Heizwärme Berliner Haushalte)
 - b) für Deutschland (Strommix Deutschland und Heizwärme bundesdeutsche Haushalte)
2. Umgang mit der Mitverbrennung von Abfällen in Kohlekraftwerken
3. Gutschriften bzw. zukünftiges Substitutionspotenzial für die Mitverbrennung von Abfällen in Zementwerken (z.B. Erdgas statt Kohle)

In den in Kapitel 2.2 beschriebenen Szenarien zur Energiewende sind i.d.R. auch abfallwirtschaftliche Maßnahmen berücksichtigt. Insbesondere für Berlin spricht die Enquete-Kommission in „Neue Energien für Berlin“ Empfehlungen für die Energieerzeugung

gung aus Abfall aus. Die in Kap. 2.2.1.3 aufgelisteten Punkte 1-3 entsprechen Maßnahmen, die im Rahmen der SKU-Bilanzen bereits untersucht wurden (ifeu/ICU 2012, ifeu/ICU 2013, ifeu 2015a).

Mit dem Ziel der hier durchzuführenden Untersuchung, den Einfluss der Energiewende auf die Kreislaufwirtschaft darzustellen, werden zunächst die Randbedingungen in den Vordergrund gestellt, die sich aus dem Wandel des Energiesystems ergeben. Der Beitrag abfallwirtschaftlicher Maßnahmen bzw. die Veränderung des abfallwirtschaftlichen Systems wird nur insoweit berücksichtigt, als dass die Randbedingungen des sich verändernden Energiesystems dies erforderlich machen wie beispielsweise für die Mitverbrennung von Abfällen in Kraftwerken (vgl. Kap. 2.3.2). Nachfolgend sind die für die Szenarien Energiewende getroffenen Annahmen beschrieben.

2.3.1 Emissionsfaktoren für Strom und Wärme

Emissionsfaktoren für Strom und Wärme für den Energiebedarf bzw. für Gutschriften werden aus den in Kapitel 2.2 vorgestellten Studien für Berlin („Neue Energien für Berlin“) und für die Bundesebene („Klimaschutzszenario 2050“) abgeleitet bzw. übernommen. Für die Bundesebene werden die in Tabelle 2.3 aufgeführten Emissionsfaktoren inkl. Vorkette verwendet. Dies erfolgt grundsätzlich gleichermaßen für den Energiebedarf und für Gutschriften. Eine Ausnahme bildet der Fall, wenn Strom aus Abfall flexibel erzeugt werden kann, dann wird die „Gutschrift flexibler Strom“ aus Tabelle 2.3 angerechnet. Auch wenn die entsprechenden Werte nur die direkten CO₂-Emissionen darstellen und die Klimagasemissionen aus der Bereitstellung von Brennstoffen (Vorkette) nicht enthalten sind, werden diese Werte hier vereinfacht übernommen.

Für das Land Berlin ergeben sich gegenüber der Bundesebene abweichende Emissionsfaktoren für die Strom- und Wärmeerzeugung. Vor allem für die Stromerzeugung ist nach dem Bericht der Enquete-Kommission (Abgeordnetenhaus Berlin 2016) davon auszugehen, dass bereits im Jahr 2030 die Stromerzeugung ausschließlich durch erneuerbare Energien und Erdgas erfolgt, während im Klimaschutzszenario 80 noch von einem relevanten Anteil an Kohlestrom ausgegangen wird (rd. 2/3 der noch erfolgenden fossilen Stromerzeugung). Im Jahr 2050 liegt der prozentuale Anteil von Kohlestrom an der dann noch erfolgenden fossilen Stromerzeugung sogar noch höher, während für Berlin nach dem Bericht der Enquete-Kommission eine 100%ige Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien gegeben sein sollte (vgl. Kap. 2.2.1.1).

Eine genauere Aufschlüsselung über die Anteile von Strom aus erneuerbaren Energien und Erdgas für das Jahr 2030 lässt sich nicht aus dem Bericht der Enquete-Kommission ableiten. Hier wird in Anlehnung an das Klimaschutzszenario 80 für die Bundesebene vereinfacht angesetzt, dass 60% des Stroms aus erneuerbaren Energien erzeugt wird (vgl. Fußnote 5) und der Rest durch Erdgas. Des Weiteren wird vereinfachend angenommen, dass aus erneuerbaren Energien erzeugter Strom klimaneutral erzeugt wird. Für Strom aus Erdgas wird ein Emissionsfaktor (inkl. Vorkette) von 572 g CO₂-Äq/kWh angesetzt. Dieser Wert entstammt einer aktuellen Studie des ifeu (2015b) und gilt für das Jahr 2012. Damit werden künftige Emissionen etwas überschätzt, da Minderungseffekte durch Effizienzsteigerungen nicht berücksichtigt sind. In Tabelle 2.4 sind die Emissionsfaktoren für Strom für Berlin aufgeführt, die sich aus den beschriebenen Annahmen ergeben. Ebenfalls nochmals mit aufgeführt ist der bisher in den SKU-Bilanzen verwendete Emissionsfaktor.

Tabelle 2.4: Emissionsfaktoren Strom für Berlin 2030 und 2050 im Vergleich zu SKU-Bilanz 2014

Jahr	Einheit	Strom
2014	g CO ₂ -Äq/kWh	743
2030	g CO ₂ -Äq/kWh	228,8
2050	g CO ₂ -Äq/kWh	0

Quelle: (ifeu 2015a), (ifeu 2015b), eigene Berechnungen/Annahmen

Die Emissionsfaktoren gelten gleichermaßen für Strombedarf wie für Gutschriften für in Grundlast erzeugten Strom. Eine Ausnahme bildet auch hier der Fall, dass Strom aus Abfall flexibel erzeugt werden kann, dann wird auch für Berlin die „Gutschrift flexibler Strom“ aus Tabelle 2.3 angerechnet.

Für die Wärmeerzeugung in Berlin lässt sich aus dem Bericht der Enquete-Kommission lediglich ableiten, dass bis 2050 der Verbrauch mindestens halbiert werden muss und der Anteil erneuerbarer Energien mindestens auf 52% erhöht werden muss (Rest Gas bzw. KWK-Fernwärme). Für das Jahr 2030 lassen sich keine Annahmen ableiten.

→ für die Wärmeerzeugung in Berlin in den Jahren 2030 und 2050 werden vereinfacht die Emissionsfaktoren für die Bundesebene übernommen (vgl. Tabelle 2.3).

Die abgeleiteten Emissionsfaktoren für den Energiebedarf bzw. für Gutschriften werden in den Vergleichsszenarien 2050 und 2030 so weit wie möglich angewendet. Bei den Abfallarten, bei denen aggregierte Emissionsfaktoren im Rechentool hinterlegt sind, ist dies nicht möglich. Dies betrifft Altpapier, Altglas, Fraktionen der Leichtverpackungsabfälle sowie Gutschriften für Komposte und Gärreste. Für die gegebene Fragestellung ist dies allerdings von nachgelagerter Bedeutung.

Aufgrund der eingeschränkten Möglichkeit der flexiblen Stromerzeugung aus Abfall (vgl. Kap. 2.2.2) wird dieser Fall ausschließlich für das Jahr 2050 betrachtet: In einem „Maximalszenario“ wird davon ausgegangen, dass eine flexible Stromerzeugung aus Abfall generell möglich ist, während in einem „Minimalszenario“ angenommen wird, dass dies generell nicht realisiert werden kann. Für ersteres wird die Gutschrift „flexibler Strom“ angerechnet, für den zweiten Fall, in dem Strom weiterhin im Grundlastbetrieb erzeugt wird, die durchschnittliche Stromerzeugung.

Stromgutschrift 2050
Minimal- und
Maximalszenario

Von den 37 im Land Berlin untersuchten Abfallarten betrifft dies die energetisch genutzten Abfälle, die in Müllverbrennungsanlagen, EBS-Kraftwerken oder Biomasse-Kraftwerken eingesetzt werden sowie organische Abfälle aus denen Biogas erzeugt wird, das in BHKWs verstromt wird. Nicht betroffen davon ist die Behandlung von Biogut in der Biogasanlage BSR Biogas West, da das dort erzeugte Biogas nicht verstromt, sondern weiter zu Biomethan aufbereitet wird. Das Biomethan wird für die Müllfahrzeugflotte als Kraftstoff eingesetzt, wodurch Dieselkraftstoff substituiert wird.

2.3.2 Mitverbrennung von Abfällen in Kraftwerken

Die Mitverbrennung von Abfällen in Kraftwerken ist bedingt durch die Energiewende und die damit einhergehende Stilllegung von Kohlekraftwerken langfristig nicht mehr

möglich. Für Berlin betrifft dies Ersatzbrennstoffe, holzige Abfälle sowie gefaulten bzw. gefault, getrockneten Klärschlamm, die bislang anteilig in Kohlekraftwerken mitverbrannt werden. Für Ersatzbrennstoffe besteht alternativ die Möglichkeit diese in EBS-Kraftwerken einzusetzen, holzige Abfälle können theoretisch in bestehenden Biomasse-Heizkraftwerken (HKW) mitbehandelt werden oder – insofern technisch machbar – beispielsweise im ansonsten stillzulegenden HKW Moabit. Für die bisher in Kraftwerken mitverbrannte Klärschlammmenge wird vor dem Hintergrund des oben formulierten Ziels im Szenario Energiewende zunächst möglichst keine Veränderungen des abfallwirtschaftlichen Systems einzubeziehen vereinfacht angesetzt, dass die entsprechenden Mengen alternativ in Zementwerken mitverbrannt werden können, wohlwissend, dass die hierfür verfügbaren Kapazitäten begrenzt sind.

Die Stilllegung von Kraftwerken ist innerhalb Berlins mittelfristig zu erwarten (Kap. 2.2.1). Auf Bundesebene werden in Brandenburg bzw. bundesweit nach Vereinbarungen im Zuge der Energiewende Braunkohlekraftwerke vorrangig stillgelegt⁶. Allerdings sind von dieser Vereinbarung bislang nur etwa 13% der Braunkohlekraftwerkskapazitäten betroffen⁷. Zudem ist nach dem Klimaschutzenszenario 80 im Jahr 2030 noch mit einem relevanten Anteil der Stromerzeugung durch Kohlekraftwerke zu rechnen (fossiler Anteil gesamt rd. 29%, davon 2/3 Kohlestrom).

Vor diesem Hintergrund werden für die Mitverbrennung von Abfällen in Kohlekraftwerken für die vergleichende THG-Bilanzierung folgende Annahmen getroffen:

→ Im Jahr 2030 wird davon ausgegangen, dass die Kraftwerke in Berlin stillgelegt wurden. Hiervon betroffen ist ausschließlich Baum- und Strauchschnitt für den alternativ der Einsatz in Biomasse-HKW angenommen wird mit Stromerzeugung in Grundlast. Für alle weiteren bislang mitverbrannten Abfälle wird unterstellt, dass sie weiterhin in Kohlekraftwerken mitverbrannt werden können, wofür wie bisher die Substitution von Kohle angerechnet wird.

→ Im Zieljahr 2050 wird dagegen angenommen, dass keine Abfälle mehr in Kohlekraftwerken mitverbrannt werden können. Ersatzbrennstoffe und die verbleibenden holzigen Abfälle werden alternativ in EBS-Kraftwerken bzw. Biomasse-HKW eingesetzt. Dabei wird im Maximalszenario von einer flexiblen Stromerzeugung ausgegangen, im Minimalszenario von einer Stromerzeugung in Grundlast. Für gefaulten und gefault, getrockneten Klärschlamm wird angenommen, dass dieser in Zementwerken mitverbrannt werden kann.

Allgemein wird für den alternativen Einsatz von EBS in EBS-Kraftwerken ein durchschnittliches EBS-Kraftwerk in Deutschland angenommen mit einer mittleren Entfernung von 100 km. Die Netto-Wirkungsgrade werden nicht an eine zukünftige Entwicklung angepasst, sondern es werden gegenwärtige Durchschnittswerte angesetzt von 18,8% elektrisch und 16% thermisch (Öko-Institut/ifeu 2010). Effizienzsteigerungen können in einem abfallwirtschaftlichen Szenario betrachtet werden in dem dann auch allgemein Effizienzsteigerungen für thermische Abfallbehandlungsanlagen berücksichtigt werden können. Für holzige Abfälle wird analog angenommen, dass sie alternativ

⁶ Nach Vereinbarung zwischen der Bundesregierung und Kraftwerksbetreibern werden bis 2022 acht Kraftwerksblöcke mit einer gesamten Kapazität von 2,7 GW zunächst für vier Jahre in die „Sicherheitsbereitschaft“ genommen und dann stillgelegt.

⁷ Gemäß Kraftwerkliste der Bundesnetzagentur waren zum Stand 31.03.2017 rd. 20 GW Braunkohlekraftwerksleistung in Betrieb (BNetzA 2017).

zur Mitverbrennung in durchschnittlichen Biomasse-HKW eingesetzt werden. Die durchschnittliche Entfernung wird wie gehabt mit 50 km angesetzt, die Nettowirkungsgrade mit 20% elektrisch und 20% thermisch.

2.3.3 Mitverbrennung von Abfällen in Zementwerken

Für die Mitverbrennung von Abfällen in Zementwerken sind ebenfalls Überlegungen bzw. Festlegungen der Randbedingungen für die Szenarien 2050 und 2030 erforderlich. In den Klimaschutzszenarien sind Veränderungen für den Energiebedarf für Zementwerke zwar nicht explizit enthalten, allerdings ist absehbar, dass auch Produktionsanlagen technische Lösungen finden müssen, bei denen auf den Einsatz von fossilen Brennstoffen verzichtet werden kann. Für Zementwerke besteht die Möglichkeit dies über neuartige Produktionsverfahren zu erreichen bei denen der Energiebedarf über regenerativ erzeugten Strom gedeckt werden kann. Eine demgegenüber leichter umsetzbare Lösung besteht darin bei den konventionellen Verfahren Erdgas statt Kohle zur Erzeugung der erforderlichen Prozesswärme einzusetzen. Langfristig kann alternativ zu Erdgas aus atmosphärischem CO₂ erzeugtes Methan (PtG) als Brennstoff verwendet werden. Für die Mitverbrennung von Abfällen bedeutet dies, dass sich das Referenzsystem ändert. Für die hier durchzuführende Untersuchung wird vereinfachend angenommen, dass die konventionellen Verfahren zur Herstellung von Zementklinker beibehalten werden, aber bis zum Jahr 2030 auf Erdgas umgestellt werden. Diese Annahme wird auch für das Jahr 2050 übernommen. Hier wird jedoch zusätzlich in einer Sensitivätsbetrachtung eine mögliche Umstellung auf Methan aus PtG untersucht.

Für die Gutschriften für die Mitverbrennung von Abfällen in Zementwerken bedeutet das, dass für 2030 und 2050 statt der Substitution von Kohle die Substitution von Erdgas angerechnet wird. Im Falle der Sensitivätsbetrachtung mit Umstellung auf Methan aus PtG hat die Mitverbrennung von Abfällen in Zementwerken keine Substitutionswirkung für den Klimawandel, da die Verbrennung des aus atmosphärischem CO₂ erzeugten Methans klimaneutral ist.

Die beschriebenen Annahmen und Randbedingungen für das Szenario Energiewende sind zusammenfassend in Tabelle 2.5 aufgeführt.

Tabelle 2.5: Wesentliche Annahmen im Szenario Energiewende im Überblick

	2030	2050
Strombedarf		
- Berlin	228,8 g CO ₂ -Äq/kWh	0 g CO ₂ -Äq/kWh
- Deutschland	346 g CO ₂ -Äq/kWh	124 g CO ₂ -Äq/kWh
Gutschrift Strom	durchschnittliche Stromerzeugung (s. Strombedarf)	Minimalszenario: durchschnittliche Stromerzeugung für in Grundlast erzeugten Strom aus Abfall (s. Strombedarf) Maximalszenario: Gutschrift flexibler Strom für Strom aus Abfall (823 g CO ₂ /kWh, s. Tabelle 2.3)
Wärmebedarf (Berlin wie Deutschland)	152 g CO ₂ -Äq/kWh	94 g CO ₂ -Äq/kWh
bisher in Kohlekraftwerken mitverbrannte EBS (erfolgt nur außerhalb Berlins)	wie 2014	Einsatz in EBS-KW
bisher in Berliner Kohlekraftwerken mitverbrannte holzige Abfälle	Einsatz in Biomasse-HKW, betrifft Baum- und Strauchschnitt	wie 2030
bisher außerhalb Berlins in Kohlekraftwerken mitverbrannte holzige Abfälle	wie 2014	Einsatz in Biomasse-HKW
bisher in Kohlekraftwerken mitverbrannter Klärschlamm	wie 2014	Mitverbrennung in Zementwerken
Referenzsystem Mitverbrennung Zementwerk	Substitution Erdgas	Substitution Erdgas Sensitivität Methan aus PtG (=klimaneutral)

2.4 Vergleichende Klimagasbilanz

Für die vergleichende Klimagasbilanz muss von einem konstanten Gesamtabfallaufkommen ausgegangen werden. Für das Szenario „Energiewende“ stehen die Randbedingungen im Vordergrund, die sich aus dem Wandel des Energiesystems ergeben. Einzig für bislang in Kohlekraftwerken mitverbrannte Ersatzbrennstoffe, holzige Abfälle und Klärschlamm werden Stoffstromumlenkungen einbezogen, da künftig mittel- und langfristig Kohlekraftwerke aufgrund der Energiewende stillgelegt werden. Weitere abfallwirtschaftliche Maßnahmen werden im Szenario „Energiewende“ nicht betrachtet. In Tabelle 2.6 sind die Ergebnisse der Stoffstrombilanz 2014 dargestellt sowie die Veränderungen im Szenario „Energiewende“ soweit Ersatzbrennstoffe, holzige Abfälle bzw. Klärschlämme anfallen, die bisher in Kohlekraftwerken mitverbrannt wurden.

Tabelle 2.6: Stoffstrombilanz 2014 und Veränderungen im Szenario „Energiewende“

Abfallart	entsorgte Menge [Mg]	Behandlung/Verbleib	Veränderung im Szenario „Energiewende“ für die Jahre 2030 und 2050
Hausmüll und Geschäftsmüll	818.499	62% MHKW Ruhleben, 36% MPS, 2% MA	2050: bisher mitverbrannte EBS aus MPS (130.816 Mg) in EBS-Kraftwerke Durchschnitt D
Sperrmüll	51.959	99% AAS, 1% Umschlag	-
Bioabfall (BIOGUT)	66.901	87% BSR Biogas West, 10% offene Kompostierung, 3% Vergärung Hennickend. Kompost	-
Eigenkompostierung	100.939	Eigenkompostierung	-
Weihnachtsbäume	1.816	4 Biomasse-HKWs	-
Organikabfälle in Laubsäcken	9.164	98% offene Kompostierung, 2% IKW Rüdersdorf	-
Altpapier	174.368	Verwertung Papierfabrik	-
LVP und StNVP	85.398	Verwertung Fraktionen	-
Altglas	63.634	Verwertung Glashütte	-
Alttextilien	32.949	Textil-Recycling, Himmelpforten	2050: bisher mitverbrannte EBS 13.180 Mg in EBS-Kraftwerke Durchschnitt D
Altreifen	14.482	50% Granulierung, 50% Mitverbrennung Zementwerk	-
E-Schrott	12.798	83% EAR/BRAL, 16% TSR Recycling	-
Altmetalle	8.614	Verwertung Metallhütten	-
Boden und Steine	1.794.575	25% Baumaßnahmen, 33% Deponie/Altablagerung, 42% Tagebau	-
Bauschutt	866.268	14% Straßenbau, 69% Deponie/Altablagerung, 17% Tagebau	-
Beton	1.256.360	98,5% Straßenbau, 1,15% Deponie/Altablagerung, 0,4% Tagebau	-
Gipsabfälle	36.061	Deponie	-

Abfallart	entsorgte Menge [Mg]	Behandlung/Verbleib	Veränderung im Szenario „Energiewende“ für die Jahre 2030 und 2050
Ziegel	15.911	Wegebau	-
Asphalt	96.812	90,4% Straßenbau, 9,5% Deponie/Altablagerung, 0,1% Tagebau	-
Baggergut	9.107	Deponie/Altablagerung	-
Hausmüllähnliche Gewerbeabfälle (HMG)	12.984	77% MHKW Ruhleben, 23% MPS Reinickendorf	2050: bisher mitverbrannte EBS 1.177 Mg in EBS-Kraftwerke Durchschnitt D
Gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle und Bau- und Abbruchabfälle	456.931	Berliner und Brandenburger Vorbehandlungsanlagen	2050: bisher mitverbrannte EBS 23.612 Mg in EBS-Kraftwerke Durchschnitt D
Sonstige Abfallarten aus Gewerbe und Industrie	10.920	MHKW Ruhleben	-
Laub, Straßenlaub	71.615	99,8% offene Kompostierung, 0,2% IKW Rüdersdorf	-
Ungefauter Klärschlamm (Rohschlamm)	161.072 (45.986 Mg TS)	KSVA Ruhleben	-
Gefauter und anteilig getrockneter Klärschlamm	164.878 (47.199 Mg TS)	Bezug TS: 13% KSVA Ruhleben, 54% gefault zu Kraftwerken, 17% getrocknet zu Zement- und Kraftwerken	2050: bisher in Kohlekraftwerken mitverbrannter gefauter und gefault, getrockneter Klärschlamm 33.266 Mg TS zur Mitverbrennung in Zementwerke
Straßenkehricht	57.715	gbav	2050: bisher mitverbrannte EBS aus MBS 1.753 Mg in EBS-Kraftwerke Durchschnitt D
Getr. gesammeltes Altholz	127.462	Biomasse-HKWs	-
Baum- und Strauchschnitt	44.656	22% Mulchung, 10% Kraftwerke, 68% Biomasse-HKWs	2030 und 2050: bisher im KW Reuter und KW Klingenberg mitverbrannte Mengen 4.473 Mg in durchschnittliches Biomasse-HKW
Straßenbegleitgrün	5.870	offene Kompostierung	-
Mähgut	43.600	offene Kompostierung	-
Speisereste	46.718	Vergärung	-
Überlagerte Lebensmittel	5.958	Vergärung	-
Fettabscheiderinhalte	14.951	Vergärung	-
Altfette	5.500	Altfettmethylester-Biodiesel	-
Pferdemist	9.282	offene Kompostierung	-
Rechengut	7.159	MBS ZAB Niederlehme	2050: bisher mitverbrannte EBS aus MBS 2.017 Mg in EBS-Kraftwerke Durchschnitt D
Summe	6.763.884		

Zur besseren Darstellung für die vergleichende Klimagasbilanz werden die 37 Abfallarten so zusammengefasst, dass Ursachen für Veränderungen (Emissionsfaktoren, Stoffstromumlenkung) möglichst gut erkennbar werden:

- 4.075.094 Mg **Mineralische Abfälle** (Boden und Steine, Bauschutt, Beton, Gipsabfälle, Ziegel, Baggergut)
- 818.499 Mg **Haus- und Geschäftsmüll**
- 480.835 Mg **gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle** (hausmüllähnliche Gewerbeabfälle (HMG), gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle und Bau- und Abbruchabfälle, sonstige Abfallarten aus Gewerbe und Industrie)
- 325.949 Mg **Klärschlamm** (29% TS)
- 64.874 Mg **Kehricht, Rechengut**
- 392.243 Mg **Trockene Wertstoffe** (Altpapier, LVP und StNVP, Altglas, Alttextilien, Altreifen, E-Schrott, Altmetalle)
- 312.871 Mg **Org. Abfälle Kompostierung** (Eigenkompostierung, Organikabfälle in Laubsäcken, Laub/Straßenlaub, Straßenbegleitgrün, Mähgut), **Biogut, Altfett**
- 67.627 Mg **Gew. org. Abfälle Vergärung** (Speisereste, überlagerte Lebensmittelabfälle, Fettabscheiderinhalte)
- 225.893 Mg **Holzige Abfälle, Sperrmüll**

Die Ergebnisse aus dem Vergleich der Ist-Situation (2014) mit den Szenarien Energiewende für die Jahre 2030 und 2050 (Minimal- und Maximalszenario) zeigt Abbildung 2.1. Es wird deutlich, dass unter den in Kapitel 2.3 beschriebenen Randbedingungen die Energiewende einen großen Einfluss auf die Klimagasbilanz hat. In beiden Vergleichsjahren gehen die möglichen Entlastungseffekte bei der energetischen Nutzung der Abfälle deutlich zurück, beim Minimalszenario 2050 nochmals deutlich stärker als im Maximalszenario.

Sichtbare, relevante Veränderungen durch die veränderten Randbedingungen zeigen vor allem die Ergebnisse für die Abfallarten „Haus- und Geschäftsmüll“, „gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle“ sowie „Holzige Abfälle, Sperrmüll“. Andere Abfallarten wie „gew. org. Abfälle Vergärung“, „Klärschlamm“ und „Kehricht, Rechengut“ sind zwar ebenfalls von den Veränderungen betroffen, haben aber nur einen geringen Einfluss auf das Gesamtergebnis. Die Abfallarten „org. Abfälle Kompostierung, Biogut, Altfett“, „trockene Wertstoffe“ und „mineralische Abfälle“ sind dagegen nur wenig durch die veränderten Randbedingungen betroffen. Die Entsorgung mineralischer Abfälle hat trotz Massenrelevanz generell nur einen sehr geringen Einfluss auf die Klimagasbilanz. Bei den „org. Abfällen Kompostierung, Biogut, Altfett“ sind nur kleine Teilmengen von der Energiewende betroffen, da die Mengen überwiegend kompostiert werden bzw. Biogut zu Biomethan als Kraftstoff umgesetzt wird.

Die Veränderungen in der Klimagasbilanz im Jahr 2030 gegenüber dem Referenzjahr 2014 werden vor allem durch die veränderten Emissionsfaktoren für Strom und Wärme geprägt. Die Umlenkung von Baum- und Strauchschnitt zu Biomasse-HKWs aufgrund der unterstellten Stilllegung der Berliner Kohlekraftwerke hat demgegenüber einen geringen Einfluss. Dagegen wiederum relevanter ist die Annahme, dass 2030 Zementwerke nicht mehr kohle- sondern gasbefeuert betrieben werden, wodurch sich entsprechend die Gutschrift für die Mitverbrennung von Abfällen verringert. Im Über-

Ergebnisse 2030

blick zeigen sich die schrittweisen Nettoentlastungsergebnisse für das Jahr 2030 wie folgt:

Emissionsfaktoren Strom, Wärme: -664.827 Mg CO₂-Äq
 + Umlenkung Baum- und Strauchschnitt: -661.363 Mg CO₂-Äq
 + Gutschrift Mitverbrennung Zementwerk Erdgas: -538.187 Mg CO₂-Äq

Die Ergebnisse der Klimagasbilanz für das Jahr 2050 unterscheiden sich zwischen Minimal- und Maximalszenario einzig durch die Annahme, dass im Minimalszenario Strom aus Abfall ausschließlich in Grundlast erzeugt werden kann (Gutschrift durchschnittliche Stromerzeugung), während im Maximalszenario angenommen ist, dass jegliche Stromerzeugung aus Abfall flexibel erfolgen kann, wodurch konventionelle Reservekraftwerke entlastet werden.

Ergebnisse 2050

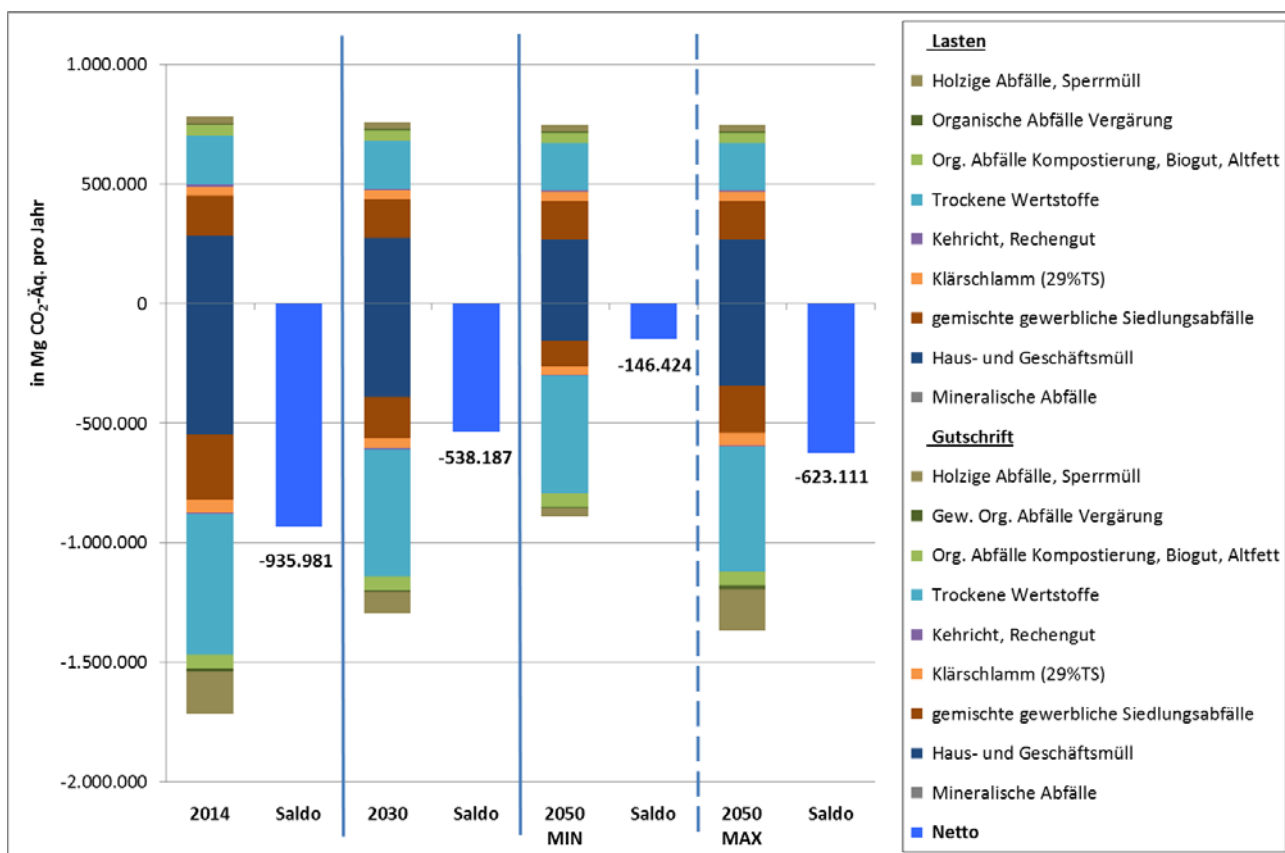


Abbildung 2.1: Ergebnis vergleichende Klimagasbilanz

Gegenüber dem Jahr 2030 ergibt sich die weitere Veränderung im Ergebnis der Klimagasbilanz durch die weiter gesunkenen Emissionsfaktoren für Strom und Wärme sowie durch die Stoffstromumlenkung von Abfällen, die nicht mehr in Kohlekraftwerken mitverbrannt werden können. Beide Schritte haben einen ähnlich relevanten Einfluss auf die zurückgehende Nettoentlastung in der Klimagasbilanz:

Emissionsfaktoren Strom, Wärme: -380.025 Mg CO₂-Äq
 + Umlenkung Mitverbrennung Kohlekraftwerke: -146.424 Mg CO₂-Äq

Erst die Annahme, dass Strom aus Abfall flexibel erzeugt werden kann bewirkt demgegenüber wieder eine deutlich höhere Nettoentlastung von -623.111 Mg CO₂-Äq.

Für das Jahr 2050 besteht die Möglichkeit, dass im Zuge der Klimaschutzstrategie nicht nur im Energiesektor (Strom, Wärmeerzeugung), sondern auch in der Industrie relevante Veränderungen realisiert werden. Beispielsweise kann Wärme statt aus fossilen Brennstoffen künftig entweder über Erneuerbaren Strom oder durch klimaneutrales Methan erzeugt werden, das aus atmosphärischem CO₂ gewonnen wird (PtG). Abbildung 2.2 zeigt das Ergebnis für die Sensitivitätsbetrachtung, dass im Jahr 2050 bei der Mitverbrennung in Zementwerken statt Erdgas Methan aus PtG substituiert wird. Durch diese Annahme verändert sich die Klimagasbilanz nochmals sehr deutlich. Im Minimalszenario würde sich dann eine Nettobelastung ergeben. Das bedeutet, dass Klimaschutzstrategien in der Energie- und in der Industriewirtschaft so weit, so erfolgreich umgesetzt werden konnten, dass andere Sektoren wie die Abfallwirtschaft keine bzw. nur noch geringe Nettoentlastungseffekte dort auslösen. Die wesentlichen weiteren Entlastungsbeiträge können dann noch im Recycling liegen, wobei auch dort langfristig mit der Dekarbonisierung von Produkten zu rechnen ist, insofern Klimaschutzziele ernst genommen und umgesetzt werden.

Sensitivität Zementwerk Methan aus PtG

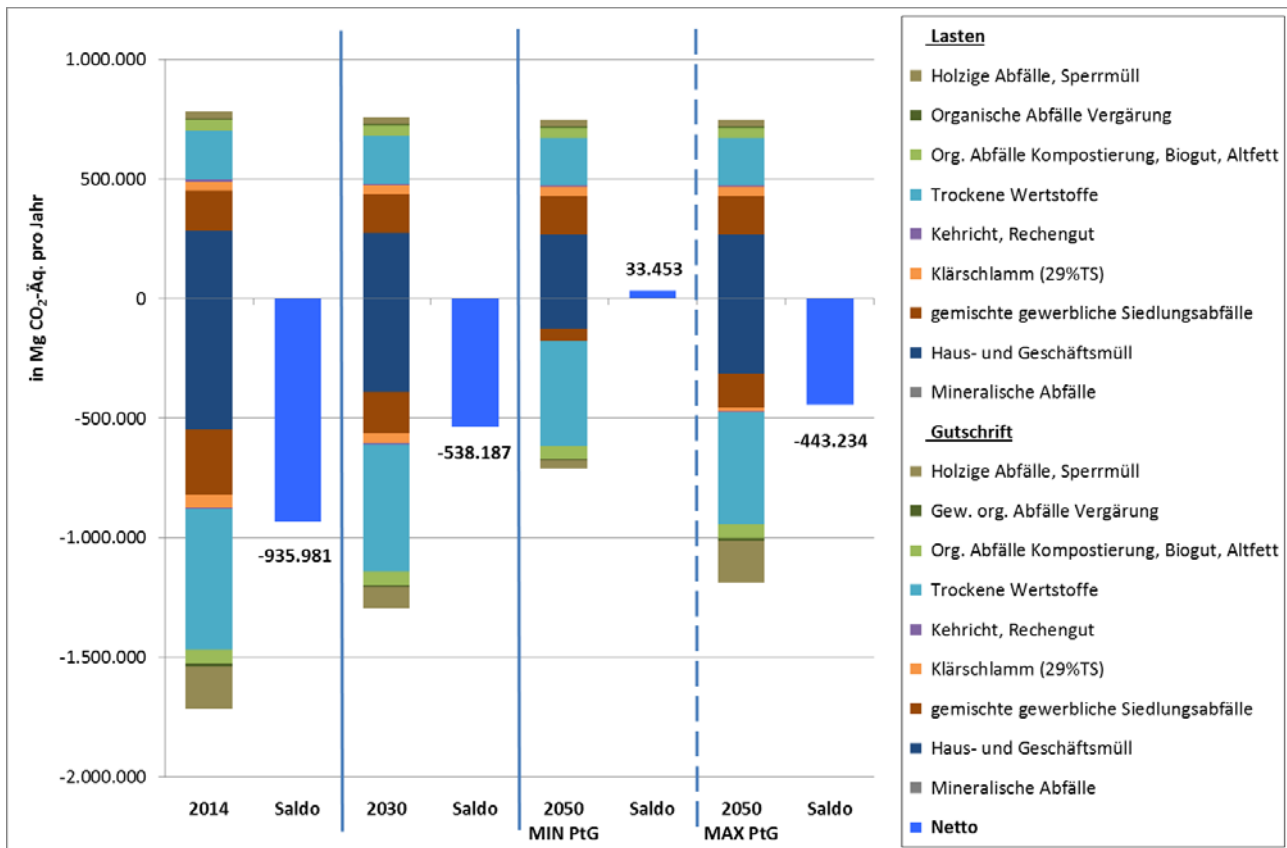


Abbildung 2.2: Sensitivität 2050 Mitverbrennung im Zementwerk Substitution klimaneutrales Methan aus PtG statt Erdgas

2.5 Schlussfolgerungen

Mit dem Ziel, den Einfluss der Energiewende auf die Kreislaufwirtschaft darzustellen, stehen im untersuchten „Szenario Energiewende“ die Randbedingungen im Vordergrund, die sich aus dem Wandel des Energiesystems ergeben. Der Beitrag abfallwirtschaftlicher Maßnahmen bzw. die Veränderung des abfallwirtschaftlichen Systems ist nur in Bezug auf die energetische Entsorgung von Abfällen berücksichtigt für die die Randbedingungen des sich verändernden Energiesystems eine Anpassung erfordern. Darüber hinaus gehende Aspekte wie der Einfluss bzw. der künftige Beitrag der stofflichen Verwertung liegen nicht im Betrachtungsrahmen.

Für die energetische Entsorgung wird deutlich, dass eine künftige Abfallwirtschaft nur dann weiterhin wesentliche Beiträge zum Klimaschutz leisten kann, wenn diese möglichst der flexiblen Stromerzeugung dient. Können Abfälle künftig nicht mehr in Kohlekraftwerken mitverbrannt werden und ändert sich die Zementherstellung wie angenommen (v.a. Sensitivität), sollte bei einer Stoffstromumlenkung auf die Möglichkeit der flexiblen Stromerzeugung geachtet werden. Technisch machbar und bereits teilweise in der Praxis umgesetzt ist die flexible Stromerzeugung aus Biogas. Bei der thermischen Behandlung von Abfällen wäre eine flexible Stromerzeugung grundsätzlich durch Lagerung der Abfälle – als ballierter Restmüll oder als EBS – möglich. Allerdings sind derzeitige Rostfeuerungsanlagen nicht geeignet nach Bedarf hoch- und runtergefahren zu werden. Des Weiteren muss die Entsorgungssicherheit beachtet werden und ist der Betrieb einer thermischen Behandlungsanlage als Reservekraftwerke ggf. nicht wirtschaftlich. Eine alternative Möglichkeit bestünde durch Stromspeichersysteme insofern diese mittel- bis langfristig ohne höhere Verlustgrade als Langzeitspeicher bereitgestellt werden können.

Eine weitere Alternative, weiterhin einen möglichst hohen Klimaschutzbeitrag zu leisten, besteht ggf. in einer verstärkten Erzeugung von Prozesswärme statt einer Verstromung. Grundsätzlich ist dies bei gegebener installierter Technik möglich (veränderte Fahrweise oder Umgehung der Kondensationsturbinen). Hier wäre allerdings sicherzustellen, dass die entsprechende Wärme durch Einspeisung in kommunale Wärmenetze oder Direktlieferungen an Industriestandorte fossile Brennstoffe ersetzt. Nicht als Maßnahme des Beitrags zum Klimaschutz geeignet ist das alleinige Abkoppeln von thermischen Abfallbehandlungsanlagen vom Stromnetz, da hierdurch der Energiegehalt des Abfalls ungenutzt bleibt und entsprechend kein Nutzen angerechnet werden kann.

Werden weitere abfallwirtschaftliche Maßnahmen in die Überlegungen einbezogen, so ist die Optimierung des Umgangs mit Abfallbiomasse zu nennen wie sie auch in den SKU-Bilanzen untersucht wurde (ifeu/ICU 2012, ifeu/ICU 2013, ifeu 2015a). Einen weiteren wichtigen Aspekt stellt die weitere Steigerung des Recyclings von Abfällen dar. Zwar konnten in der vorliegenden Untersuchung die energetischen Recycling- und Herstellungsaufwendungen aufgrund aggregierter Werte nur eingeschränkt angepasst werden, allerdings ist auch mit der Energiewende davon auszugehen, dass mehrheitlich die Aufwendungen für Recycling niedriger liegen als die für eine Primärherstellung.

Ungeachtet dessen ist für die Energiewende bzw. eine klimaneutrale Energieerzeugung künftig von einem erheblich höheren Energiebedarf auszugehen, um die benötigten Mengen an fluktuierendem Strom über Methan aus PtG oder andere klimaneutral erzeugte Brennstoffe auszugleichen. Hinzu kommen die Mengen, die für die Produkti-

on benötigt werden wie beispielsweise zur Erzeugung thermischer Energie für Zementwerke. Dies bedeutet, dass künftig wesentlich mehr Rohstoffe zum Bau von EE- und weiteren Anlagen in Anspruch genommen werden müssen. Recyclingmaßnahmen bzw. eine gut funktionierende Kreislaufwirtschaft werden dann einen maßgeblichen Beitrag unter dem Blickwinkel der Rohstoffschonung leisten. Zudem ist absehbar, dass der künftige gesamte Bedarf an Erneuerbarem Strom für PtX nicht ohne weiteres national gedeckt werden kann und insofern auch hier dem Beitrag einer hochwertigen, flexiblen energetischen Abfallnutzung ggf. eine besondere Rolle zur Klima- und Ressourcenschonung zukommen kann.

Literaturverzeichnis

Abgeordnetenhaus Berlin (2016): Enquete-Kommission „Neue Energien für Berlin – Zukunft der energiewirtschaftlichen Strukturen“. Die Verwaltung des Abgeordnetenhaus von Berlin (Hrsg.). <http://www.parlament-berlin.de/de/Das-Parlament/-Ausschuesse/Enquete-Kommission-Neue-Energie-fuer-Berlin>; Abruf am 24.06.16: Drucksache 17/2500 vom 4.11.15 und Abschlussbericht des Abgeordnetenhaus, 1. Auflage 2016

BNetzA (2017): Kraftwerkliste der Bundesnetzagentur (Stand 31.03.2017) https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/Erzeugungskapazitaeten/Kraftwerkliste/kraftwerkliste-node.html; Zugriff Mai 2017

BSR (2017): persönliche Mitteilung Dr.-Ing. Alexander Gosten, Jochen Hensel (BSR) zum Fachaustausch „Bilanzierung der Abfallwirtschaft unter Berücksichtigung der Berliner Energiewende“, am 25.4.2017, SenUVK Berlin

Bundesregierung (2011): Eckpunktepapier: Der Weg zur Energie der Zukunft – sicher, bezahlbar und umweltfreundlich. <https://www.bundesregierung.de/ContentArchiv/DE/Archiv17/Anlagen/2011/06/2011-06-06-energiekonzept-eckpunkte.pdf?blob=publicationFile&v=3>

consentec/ISI/ifeu: Auswirkungen der Klimaschutzziele und diesbezüglicher Maßnahmen auf den Energiesektor und den Ausbau der erneuerbaren Energien. Im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi). Durchgeführt von Consentec GmbH, Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), ifeu Heidelberg, in Bearbeitung

ewi/gws/prognos (2014): Entwicklung der Energiemärkte - Energiereferenzprognose. Projekt Nr. 57/12. Im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. Durchgeführt durch Prognos AG, Energiewirtschaftliches Institut Universität Köln (ewi) und Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforchung (GWS), Juni 2014

ewi/gws/prognos (2010 und 2011): Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung und Aktualisierung mit KKW-Ausstiegsszenario. Projekt Nr. 12/10. Für das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. Durchgeführt durch Prognos AG, Energiewirtschaftliches Institut Universität Köln (ewi) und Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforchung (GWS), August 2010 und Juli 2011

ifeu (2015a): Stoffstrom-, Klimagas- und Umweltbilanz für das Jahr 2014 für das Land Berlin. Im Auftrag der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt (SenStadtUm), Oktober 2015. http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/abfall/-entsorgung/download/studie_langfassung_2014.pdf

ifeu (2015b): Treibhausgas-Emissionswerte für unterschiedliche fossile Energieträger und Kraftwerksszenarios in Deutschland. Im Auftrag der Wingas GmbH Kassel, Januar

2015. https://www.ifeu.de/industriemissionen/pdf/THG-Faktoren%20fossiler%20Brennstoffvorketten%20und%20der%20Strombereitstellung%20in%20Deutschland_ifeu.pdf

ifeu/ICU (2013): Stoffstrom-, Klimagas- und Umweltbilanz Berlin 2012 für die Nutzung von Berliner Abfällen als Ressource. Regine Vogt und Joachim Reinhardt (ifeu Heidelberg) mit Beteiligung von ICU Berlin. Im Auftrag der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt (SenStadtUm), Oktober 2013

ifeu/ICU (2012): Maßnahmenplan zur Umsetzung einer vorbildhaften klimafreundlichen Abfallentsorgung im Land Berlin. Regine Vogt und Horst Fehrenbach (ifeu Heidelberg) unter Mitwirkung von Ulrich Wiegel, Knud Ebert (ICU Berlin). Im Auftrag der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz. Gefördert durch das Bundesumweltministerium. Heidelberg/Berlin, September 2012. <http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/abfall/entsorgung/de/klimakonzeption.shtml>

Öko-Institut/Fraunhofer ISI (2015): Klimaschutzszenario 2050. 2. Endbericht. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Berlin, 18. Dezember 2015

Öko-Institut (2014): Beitrag der Kreislaufwirtschaft zur Energiewende. Klimaschutzpotenziale auch unter geänderten Randbedingungen nutzen. Im Auftrag des BDE Bundesverband der deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Rohstoffwirtschaft. Durchgeführt durch das Öko-Institut, Januar 2014

Öko-Institut/ifeu (2010): Klimaschutzpotenziale der Abfallwirtschaft. Am Beispiel von Siedlungsabfällen und Altholz. Öko-Institut e.V. und ifeu Heidelberg. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. UFO-Plan-Vorhaben FZK 3708 31 302. Darmstadt, Heidelberg 2010

UBA (2014): Climate Change 07/2014: „Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050“. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau April 2014 <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/treibhausgasneutrales-deutschland-im-jahr-2050-0>

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Ergebnis vergleichende Klimagasbilanz	19
Abbildung 2.2: Sensitivität 2050 Mitverbrennung im Zementwerk Substitution klimaneutrales Methan aus PtG statt Erdgas	20

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Studien zur Energiewende und Klimaschutzszenarien	7
Tabelle 2.2: Ziele des Energiekonzepts der Bundesregierung und THG-Minderung	8
Tabelle 2.3: Emissionsfaktoren Strom und Wärme 2030 und 2050 im Vergleich zu SKU-Bilanz 2014	9
Tabelle 2.4: Emissionsfaktoren Strom für Berlin 2030 und 2050 im Vergleich zu SKU-Bilanz 2014	12
Tabelle 2.5: Wesentliche Annahmen im Szenario Energiewende im Überblick	15
Tabelle 2.6: Stoffstrombilanz 2014 und Veränderungen im Szenario „Energiewende“	16

Abkürzungsverzeichnis

BHKW	Blockheizkraftwerk
BSR	Berliner Stadtreinigungsbetriebe
C fossil	fossiler Kohlenstoff
CO ₂ -Äq	Kohlendioxid-Äquivalente (Umrechnungseinheit für klimawirksame Gase)
EBS	Ersatzbrennstoff
EE	Erneuerbare Energien
HKW	Heizkraftwerk
HMG	Hausmüllähnlicher Gewerbeabfall
LVP	Leichtverpackungen
MBA	Mechanisch-biologische Behandlungsanlage
MBS	Mechanisch-biologische Stabilisierungsanlage
Mg	Megagramm (1 Mg = 1 t = 1000 kg)
MHKW	Müllheizkraftwerk
MPS	Mechanisch-physikalische Stabilisierungsanlage
MVA	Müllverbrennungsanlage
PPK	Papier, Pappe, Kartonagen
PtG	Power-to-Gas
PtX	Power-to-X, weitere Umwandlungsschritte nach PtG
SenUVK	Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz
SKU-Bilanz	Stoffstrom-, Klimagas- und Umweltbilanz
StNVP	Stoffgleiche Nichtverpackungen
THG	Treibhausgas