

TEXTE

51/2018

Energieerzeugung aus Abfällen

Stand und Potenziale in Deutschland bis 2030

TEXTE 51/2018

Projektnummer 75778

UBA-FB EF001021

Energieerzeugung aus Abfällen

Stand und Potenziale in Deutschland bis 2030

von

Prof. Dr.-Ing. Sabine Flamme, Dipl.-Betriebswirt Jörg Hanewinkel
neovis GmbH + Co. KG

Prof. Dr.-Ing. Peter Quicker, Dr. Kathrin Weber
Ingenieurbüro Qonversion

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber:

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
info@umweltbundesamt.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt

Durchführung der Studie:

neovis GmbH + Co. KG
Lippstädter Straße 42
48155 Münster

Ingenieurbüro Qonversion
Bamberger Straße 23 b
96173 Oberhaid

Abschlussdatum:

April 2018

Redaktion:

Fachgebiet III 2.4 Abfalltechnik, Abfalltechniktransfer
Markus Gleis

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, Juni 2018

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abkürzungsverzeichnis..... | 7 |
| Danksagung..... | 9 |
| Kurzfassung..... | 10 |
| Abstract..... | 11 |
| 1 Einleitung und Aufgabenstellung..... | 12 |
| 2 Vorgehen..... | 13 |
| 2.1 Untersuchungsrahmen..... | 13 |
| 2.2 Datenermittlung | 14 |
| 2.3 Methodik bei der Auswertung..... | 15 |
| 2.4 Vorgehen bei der Prognose | 17 |
| 3 Status Quo | 18 |
| 3.1 Anlagen | 18 |
| 3.1.1 Müllverbrennungsanlagen [MVA] | 18 |
| 3.1.2 Ersatzbrennstoffkraftwerke [EBS-KW]..... | 24 |
| 3.1.3 Sondermüllverbrennungsanlagen [SMVA]..... | 28 |
| 3.1.4 Altholzverbrennungsanlagen Biomassekraftwerke [BMKW]..... | 32 |
| 3.1.5 Klärschlammverbrennungsanlagen [KVA] | 37 |
| 3.1.6 Zementwerke [ZW – Abfallmitverbrennung] | 40 |
| 3.1.7 Kohlekraftwerke [KKW – Abfallmitverbrennung] | 43 |
| 3.1.8 Industriekraftwerke [IKW]..... | 47 |
| 3.1.9 Bioabfallvergärungsanlagen [BVGA]..... | 49 |
| 3.1.10 MBA-Anlagen mit Vergärungs-Stufe [MBA]..... | 54 |
| 3.1.11 Alternative Abfallbehandlungsverfahren | 56 |
| 3.2 Abfallmengen..... | 58 |
| 3.2.1 Siedlungsabfälle | 59 |
| 3.2.1.1 Hausmüll Sperrmüll Abfälle aus der Biotonne | 59 |
| 3.2.1.2 Verpackungsabfälle aus privaten Haushalten | 61 |
| 3.2.1.3 Marktabfälle Straßenkehricht Park- und Gartenabfälle | 61 |
| 3.2.1.4 Hausmüllähnliche Gewerbeabfälle | 62 |
| 3.2.1.5 Sonstige Siedlungsabfälle | 62 |
| 3.2.2 Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen | 62 |
| 3.2.2.1 EBS SekBS | 63 |
| 3.2.2.2 Klärschlamm | 63 |
| 3.2.2.3 Schredderleichtfraktion | 65 |

| | | |
|---------|---|----|
| 3.2.2.4 | Tierische Nebenprodukte | 65 |
| 3.2.2.5 | Sonstige Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen | 66 |
| 3.2.3 | Gewerbe- und Produktionsabfälle | 66 |
| 3.2.3.1 | Holzabfälle | 66 |
| 3.2.3.2 | Faserabfälle | 67 |
| 3.2.3.3 | Verpackungsabfälle gewerblich | 68 |
| 3.2.3.4 | Sonstige Produktions- und Gewerbeabfälle zur energetischen Verwertung | 68 |
| 3.2.3.5 | Sonstige Kunststoffabfälle | 69 |
| 3.2.3.6 | Küchen- und Kantinenabfälle | 70 |
| 3.2.3.7 | Ölabfälle [Altöl] | 71 |
| 3.2.4 | Bau- und Abbruchabfälle..... | 71 |
| 3.2.5 | Gefährliche Abfälle | 72 |
| 3.2.6 | Altreifen..... | 73 |
| 3.2.7 | Sonstige | 74 |
| 3.2.8 | Deponiegas..... | 74 |
| 3.2.9 | Gülle und Festmist..... | 75 |
| 3.3 | Energie aus Abfall..... | 76 |
| 3.3.1 | Übersicht Abfallströme | 76 |
| 3.3.2 | Energiebereitstellung | 78 |
| 3.3.3 | CO ₂ -Reduktion..... | 81 |
| 4 | Prognose bis 2030 | 90 |
| 4.1 | Rahmenbedingungen..... | 90 |
| 4.1.1 | Bevölkerungsentwicklung | 90 |
| 4.1.2 | Wirtschaftliche Entwicklung und politische Ziele..... | 93 |
| 4.1.3 | Technische Entwicklungen | 95 |
| 4.1.4 | Strom und Wärme..... | 95 |
| 4.2 | Entwicklung der Abfallmengen | 95 |
| 4.2.1 | Siedlungsabfälle | 96 |
| 4.2.1.1 | Hausmüll | 96 |
| 4.2.1.2 | Hausmüllähnliche Gewerbeabfälle | 96 |
| 4.2.1.3 | Sperrmüll | 96 |
| 4.2.1.4 | Abfälle aus der Biotonne | 96 |
| 4.2.1.5 | Verpackungsabfälle aus privaten Haushalten | 96 |
| 4.2.1.6 | Marktabfälle Straßenkehrschutt Park- und Gartenabfälle Sonstige | 96 |
| 4.2.2 | Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen | 97 |

| | | |
|-----------------------------|---|-----|
| 4.2.2.1 | Abfälle aus MBA-Anlagen | 97 |
| 4.2.2.2 | EBS SekBS | 97 |
| 4.2.2.3 | Klärschlamm | 97 |
| 4.2.2.4 | Schredderleichtfraktion | 98 |
| 4.2.2.5 | Tierische Nebenprodukte | 98 |
| 4.2.2.6 | Sonstige Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen | 98 |
| 4.2.3 | Gewerbe- und Produktionsabfälle | 98 |
| 4.2.3.1 | Holzabfälle | 98 |
| 4.2.3.2 | Faserabfälle | 99 |
| 4.2.3.3 | Verpackungsabfälle gewerblich | 99 |
| 4.2.3.4 | Sonstige Produktions- und Gewerbeabfälle zur energetischen Verwertung | 99 |
| 4.2.3.5 | Sonstige Kunststoffabfälle | 100 |
| 4.2.3.6 | Küchen- und Kantinenabfälle | 100 |
| 4.2.3.7 | Ölabfälle [Altöl] | 100 |
| 4.2.4 | Bau- und Abbruchabfälle..... | 100 |
| 4.2.5 | Gefährliche Abfälle | 100 |
| 4.2.6 | Altreifen..... | 100 |
| 4.2.7 | Sonstige | 101 |
| 4.2.8 | Deponiegas..... | 101 |
| 4.2.9 | Gülle und Festmist..... | 101 |
| 4.2.10 | Weitere Entwicklung bei den Entsorgungswegen..... | 101 |
| 4.3 | Entwicklung der Energie aus Abfall | 102 |
| 4.3.1 | Übersicht Abfallströme | 102 |
| 4.3.2 | Energiebereitstellung | 104 |
| 4.3.3 | CO ₂ -Reduktion..... | 107 |
| 4.4 | Hemmnisse und Fördermöglichkeiten | 107 |
| 5 | Zusammenfassung und Fazit..... | 110 |
| Anhang | | 113 |
| A 2.2 | Datenermittlung | 113 |
| A 2.3 | Methodik bei der Auswertung..... | 114 |
| A 3.2.7 | Gülle und Festmist..... | 116 |
| A 3.3.3 | CO ₂ Reduktion | 131 |
| Quellenverzeichnis..... | | 135 |
| Abbildungsverzeichnis | | 153 |
| Tabellenverzeichnis..... | | 157 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|--------|---|
| AAA | Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen |
| ASN | Abfallschlüsselnummer |
| BAV | Bundesverband der Altholzaufbereiter und -verwerter e.V. |
| BDSAV | Bundesverband deutscher Sonderabfallverbrennungsanlagen e.V. |
| BG | Biogut |
| BGS | Bundesgütegemeinschaft Sekundärbrennstoffe, heute Gemeinschaft Sekundärbrennstoffe und Recyclingholz e. V. |
| BGL | British Gas/Lurgi (Schlackebadvergaser) |
| BK | Brennkammer |
| BMK | Biomassekraftwerk [hier: Altholzkraftwerk] |
| BVGA | Bioabfallvergärungsanlagen |
| CR | Containerrotte |
| D | nur Dampfabgabe |
| DR | Drehrohr |
| EBS | Ersatzbrennstoff [aus der Aufbereitung von Haus- und Gewerbeabfall] |
| EBS-KW | Ersatzbrennstoffkraftwerk |
| el | Elektrisch |
| EO | Etagenofen |
| EW | Einwohner |
| EtW | Etagenwirbler |
| EWG | Einwohnergleichwerte |
| exp | Exportiert |
| fe | feste Abfälle |
| fl | flüssige Abfälle |
| FM | Frischmasse |
| Fol | Folien (Kunststoff) |
| FS | Faserschlamm |
| FWL | Feuerungswärmeleistung |
| g | gasförmige Abfälle |
| GWA | Gewerbeabfall |
| Ges | Gesamt |
| GG | Grüngut |
| GGÜ | Gegenlaufüberschubrost |
| HHS | Holzhackschnitzel |
| HPR | Holzproduktionsreste |

| | |
|---------|---|
| IBS | Inbetriebsetzung |
| ITAD | Interessengemeinschaft der Thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland e.V. |
| KKW | Kohlekraftwerk |
| KS | Klärschlamm |
| KuSt | Kunststoffe |
| KVA | Klärschlammverbrennungsanlage |
| KWK | Kraft-Wärme-Kopplung |
| LVP | Leichtverpackungen |
| MA | Mechanische Abfallbehandlung |
| MAb | Mineralische Abfälle |
| MBA | Mechanisch-Biologische Abfallbehandlung |
| MBS | Mechanisch-Biologische Stabilisierung |
| MPS | Mechanisch-Physikalische Stabilisierung |
| MR | Mietenrotte |
| MVA | Müllverbrennungsanlage |
| NVG | Nassvergärung |
| NR | Nachrotte |
| orgFlsg | organische Flüssigkeiten |
| PEE | Primärenergieeinsparung |
| PPR | Papierproduktionsreste |
| PR | Produktionsreste |
| prod | Produziert |
| PS | Papierschlamm |
| PY | Pyrolyse |
| RF | Rostfeuerung |
| R | Rotte |
| RB | Rotteboxen |
| Rnd | Rinde |
| RR | Rückschubrost |
| RWS | Rotierende Wirbelschicht [Feuerung] |
| S | nur Stromabgabe |
| SA | Speiseabfälle |
| SBS® | Sekundärbrennstoffe mit Gütesicherung nach RAL-GZ 724 |
| SekBS | Sekundärbrennstoffe |
| SL | Schwarzlauge |

| | |
|------|--|
| SLM | Schlämme allgemein |
| SMVA | Sondermüllverbrennungsanlage [Verbrennungsanlagen für gefährliche Abfälle] |
| SO | Schachtofen |
| SpS | Spuckstoffe |
| Ssp | Sägespäne |
| SVZ | Sekundärrohstoff-Verwertungszentrum [Schwarze Pumpe GmbH] |
| SWS | Stationäre Wirbelschicht [Feuerung] |
| Tex | Textilreste [Teppich] |
| th | Thermisch |
| TM | Trockenmasse |
| TML | Tiermehl |
| TR | Tunnelrotte |
| TS | Teilstrom |
| TVG | Trockenvergärung |
| VCI | Verband der chemischen Industrie e.V. |
| VDZ | Verein Deutscher Zementwerke e.V. |
| VG | Vergärung |
| VR | Vorschubrost |
| VS | Vollstrom |
| ZW | Zementwerke |
| ZWS | Zirkulierende Wirbelschicht [Feuerung] |
| W | nur Wärmeabgabe |
| WR | Walzenrost |
| WtE | Waste-to-Energy [Energetische Abfallverwertung] |
| WV | Wirbelschichtvergasung |

Danksagung

Wir bedanken uns bei allen Betreibern, Institutionen und vielen freundlichen Menschen, die zum Gelingen dieser Studie ihren Beitrag geleistet haben.

Unser Dank gilt insbesondere den Verbänden

ASA e.V. | BDSAV e.V. | BGS e.V. | ITAD e.V. | VCI e.V. | VDZ e.V.

und den folgenden Fachexperten

Michael Bock | Wolfgang Butz | Jörn Franck | Sigrid Hams | Andreas Neuss | Martin Oerter
Christian Pacher | Carsten Spohn | Jürgen Tecker | Martin Treder | Benjamin Wiechmann

Kurzfassung

Die europäische Abfallrahmenrichtlinie ordnet die energetische Verwertung von Abfällen in die vierte Stufe der Hierarchie, unterhalb der stofflichen Verwertung ein. Dennoch wird eine große Menge an Abfällen der energetischen Verwertung zugeführt und diese Abfälle leisten inzwischen einen relevanten Beitrag zur Strom-, Wärme- und Prozessenergieversorgung der Bundesrepublik Deutschland. Im Fokus dieser Studie stand daher die Ermittlung der energetischen Abfallpotenziale in Deutschland und die Quantifizierung der verfügbaren Anlagenkapazitäten zu deren Behandlung. Auf dieser Basis wurde eine Prognose zur Situation im Jahr 2030 abgeleitet. Für beide Szenarien (Ist-Zustand und Prognose) wurden die CO₂-Reduktionspotenziale durch die energetische Nutzung der Abfälle bestimmt.

Es muss zunächst festgehalten werden, dass die Datenlage für eine geschlossene Bilanzierung der Abfallströme in Deutschland zur energetischen Verwertung und thermischen Behandlung als ungenügend einzustufen ist. Vor diesem Hintergrund ist es wichtig zu betonen, dass die präsentierten Zahlen als fundierte Schätzung zu verstehen sind.

Nach den Ergebnissen dieser Studie werden in Deutschland jährlich 48 Mio. Mg Abfälle vorwiegend in thermischen aber auch durch biologische Verfahren energetisch verwertet. Wesentliche Stoffströme dabei sind Siedlungsabfälle, hauptsächlich der klassische Hausmüll. Weitere relevante Fraktionen sind Ersatzbrennstoffe, Altholz, Bioabfälle, Klärschlamm und gefährliche Abfälle. Der Heizwert, der mit dem Abfall allein den thermischen Anlagen zugeführt wird, entspricht 4,3 % des deutschen Primärenergieverbrauchs. Nach Berücksichtigung des Eigenverbrauchs tragen Abfälle damit einen Anteil von rund 3,7 % zum Endenergieverbrauchs der Bundesrepublik bei. Die Müllverbrennungsanlagen besitzen die größte Behandlungskapazität und erzeugen mehr als ein Drittel der insgesamt aus Abfall erzeugten Nutzenergie. Gemeinsam mit den Ersatzbrennstoffkraftwerken erhöht sich der Anteil auf etwa 50 %. Auch die Zementwerke tragen einen erheblichen Anteil bei. Ein bedeutendes zusätzliches Energiepotenzial, das nur am Rande zum Abfallbereich gerechnet wird, beinhalten Wirtschaftsdünger.

Die Prognose für 2030 sagt aus, dass das Abfallaufkommen für die energetische Verwertung in 2030 mit 2015 vergleichbar sein wird – allerdings bei steigendem Gesamtabfallaufkommen. Dieses impliziert einen Rückgang des energetisch verwerteten Anteils durch weitergehende Getrennthaltung von Abfällen, induziert durch höhere Recyclingquoten. Zudem wird es im Bereich der Entsorgungsanlagen zu Verschiebungen kommen. Aufgrund der leicht rückläufigen Abfallmengen zur energetischen Verwertung wird für das Jahr 2030 auch eine geringfügig abnehmende Energiebereitstellung aus Abfällen erwartet.

Die Rolle des Abfalls im Bereich der Energieerzeugung wird sich auf lange Sicht verändern, da in den nächsten Jahren viele thermische Kraftwerke vom Netz gehen, die auch in die Kraft-Wärme-Kopplung eingebunden waren. Diese Lücke in der Wärmeversorgung könnten energetische Abfallverwertungsanlagen schließen.

Der Einsatz von Abfällen zur Bereitstellung von Nutzenergie führt sowohl im Betrachtungszeitraum 2015 als auch für die Prognose 2030 zu einer Treibhausgaseinsparung von etwa 15 Mio. Mg CO₂.

Es ist unstrittig, dass die thermische Abfallbehandlung aus Gründen des Umwelt- und Gesundheitsschutzes auch in Zukunft ein wichtiger Pfeiler der Abfallwirtschaft sein wird. Mit zunehmendem Anteil erneuerbarer Energien an der deutschen Energieversorgung ist auf lange Sicht aber auch ein negativer Beitrag der energetischen Abfallverwertung zur CO₂-Bilanz absehbar. Es ist daher zu diskutieren, wie mit diesem Dilemma umzugehen ist. Wie bei anderen Fällen von unvermeidbarer Abwärme auch, sollte daher die Abwärme aus der thermischen Behandlung von stofflich nicht mehr nutzbaren Restabfällen als grundsätzlich klimaneutral betrachtet werden.

Abstract

The European Waste Framework Directive classifies the energetic utilization of waste materials as the fourth step in the waste management hierarchy, after material recycling. Nevertheless, a large amount of waste is used energetically, contributing significantly to the supply of electricity, heat and process steam in Germany. Within this study, the energetic potential of waste in Germany and the capacities of existing treatment facilities have been determined. Based on this, the situation in the year 2030 has been estimated. For both scenarios, the CO₂-reduction potential for the energetic utilization of waste has been calculated.

The current data basis has to be considered insufficient in order to derive a complete balance of thermally treated and energetically utilized waste in Germany. Therefore, it is important to note that the presented numbers and values are the result of substantiated estimations.

The results of this study show that in Germany, an annual amount of 48 million Mg of waste is used for energy production, predominantly through thermal, but also through biological processes. Major material flows are municipal solid wastes, mostly household waste. Other relevant fractions are refuse derived fuels, waste wood, bio-waste, sewage sludge and hazardous wastes. The heating value of waste entering thermal treatment facilities, corresponds to about 4 % of the German primary energy consumption. Considering also internal consumption of the plants, waste contributes to about 3.7 % of Germany's final energy demand. Municipal solid waste incineration plants make up most of the capacity and produce more than one third of the total effective energy from waste. Together with refuse derived fuels, this share is more than 50 %. Cement plants also add a noteworthy amount. The use of animal manure offers a significant additional potential.

The prognosis for 2030 shows that the amount of waste for energetic utilization will be roughly the same, whereas the total amount of waste will increase. This implicates a reduction of the combusted waste fraction through increased recycling rates. Changes in the treatment facilities are also estimated. Due to the decreasing amount of waste for energetic utilization in 2030, the total amount of energy from waste will slightly decrease.

The role of waste in energy production will change in the long run. There will be an increased demand for heat, as a number of power plants currently contributing to combined heat and power generation, will be taken from the grid. This gap could be closed by thermal waste treatment plants.

The utilization of waste for the supply of useful energy leads to saving in CO₂-emissions of about 15 Mio. Mg, both in 2015 and in 2030.

The importance of thermal waste treatment for the protection of environment and human health now and in the future is indisputable. With an increasing share of renewable energies in the future, a negative contribution of thermal waste treatment to the overall CO₂ mitigation is also possible and may be expected on the long run – an issue that needs to be addressed. As in other cases of unavoidable waste heat, the energy resulting from the thermal treatment of waste fractions, for which a material recovery is not possible, should generally be considered carbon dioxide-neutral.

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Nach der europäischen Abfallrahmenrichtlinie wird die energetische Verwertung von Abfällen als vierte Stufe der Hierarchie, nach der Vermeidung, der Vorbereitung zur Wiederverwendung und dem Recycling, eingeordnet. Dennoch wird eine große Menge an Abfällen, die für eine stoffliche Nutzung nicht mehr geeignet sind, der energetischen Verwertung zugeführt. Dadurch haben Abfälle inzwischen einen nicht zu vernachlässigbaren Anteil an der Strom-, Wärme- und Prozessenergieversorgung in Deutschland und anderen Ländern mit entwickelter Abfallwirtschaft.

Die Bedeutung von Abfällen für die Energieversorgung wird inzwischen auch auf EU-Ebene erkannt. Auf Basis des Aktionsplans der europäischen Union für die Kreislaufwirtschaft („Den Kreislauf schließen – Ein Aktionsplan der EU für die Kreislaufwirtschaft“, 2015), der explizit auf die Bedeutung von Abfällen zur Energieversorgung als Ergänzung zur stofflichen Abfallverwertung hinweist, soll eine Initiative zur „Energieerzeugung aus Abfällen“ angestoßen werden.

Vor diesem Hintergrund wurde in dem vorliegenden, vom Umweltbundesamt initiierten Sachverständigenvorhaben „Energieerzeugung aus Abfällen – Stand und Potenziale in Deutschland bis 2030“, eine belastbare Zahlenbasis für den Beitrag von Abfällen zur deutschen Energieversorgung erarbeitet – soweit dies auf Basis der heterogenen und zum Teil stark widersprüchlichen Datengrundlage möglich ist.

Für überlassungspflichtige Siedlungsabfälle existiert eine relativ umfangreiche Datenbasis, da diese Abfälle regelmäßig statistisch erfasst werden. Allerdings ist anzumerken, dass die Hintergrundangaben zu den Daten mitunter unzureichend sind und die Daten zum Teil auch falsch zugeordnet oder aggregiert wurden. Gewerbeabfälle werden dagegen überhaupt nicht statistisch erfasst und sind daher nur indirekt zu bestimmen oder abzuschätzen.

Im Fokus der Studie stand daher die Ermittlung der bereits genutzten und noch verfügbaren Potenziale an Abfällen zur energetischen Verwertung und der daraus bereitstellbaren Energiemengen sowie die Quantifizierung der verfügbaren Anlagenkapazitäten zu deren Behandlung. Auf dieser Basis wurde eine Prognose für die Situation im Jahr 2030 entwickelt.

Im Wesentlichen wurden im Rahmen der Studie folgende Inhalte bearbeitet:

- ▶ Ermittlung der in Deutschland 2015 verfügbaren Abfallmengen und Anlagenkapazitäten zur Energiebereitstellung aus Abfällen (inklusive alternative Verfahren und Deponiegas)
- ▶ Abschätzung der Energiemengen, die insgesamt und durch die einzelnen Verfahren zur Verfügung gestellt werden können
- ▶ Prognose der künftigen Entwicklung bis zum Jahr 2030
- ▶ Abschätzung der CO₂ Reduktionspotenziale durch die energetische Nutzung von Abfällen

Es zeigte sich, dass auch bei intensiver Datenrecherche, inklusive der Befragung vieler Betreiber, eine geschlossene Bilanzierung der Abfälle zur energetischen Verwertung nicht möglich ist. In vielen Fällen widersprachen sich die unterschiedlichen Quellen, auch Angaben des statistischen Bundesamtes zeigten sich häufig fehlerbehaftet.

Durch den Vergleich vieler Informationen, Plausibilitätsbetrachtungen und durch intensive Diskussionen mit Fachleuten aus der Branche ist es dennoch gelungen, ein Datengerüst zu entwickeln, das die wesentlichen Stoffströme von Abfällen zur energetischen Verwertung in Deutschland mit guter Genauigkeit darstellt.

2 Vorgehen

2.1 Untersuchungsrahmen

Geographischer Rahmen der Untersuchung sind die Grenzen der Bundesrepublik Deutschland. Als Bezugsjahr wurde das Jahr 2015 herangezogen. In einigen Fällen musste aufgrund der begrenzten Datenlage auch auf Zahlenreihen anderer Jahrgänge zurückgegriffen werden (soweit vorhanden 2016, ansonsten 2014). Dies ist im Einzelfall angemerkt.

Im Folgenden sind die im Rahmen der Datenerfassung berücksichtigten Abfallarten aufgeführt. Dabei wurden alle für eine – thermische oder biologische – energetische Verwertung relevanten Einsatzstoffe berücksichtigt:

- ▶ Siedlungsabfälle
 - Gemischte Siedlungsabfälle (Hausmüll)
 - Sperrmüll
 - Abfälle aus der Biotonne
 - Verpackungsabfälle aus privaten Haushalten
 - Marktabfälle
 - Straßenkehricht | Park- und Gartenabfälle
 - Hausmüllähnliche Gewerbeabfälle
- ▶ Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen
 - EBS- | SekBS-Herstellung
 - Abwasseraufbereitung
 - Schredderleichtfraktion
 - Tierische Nebenprodukte
- ▶ Gewerbe- und Produktionsabfälle
 - Holzabfälle
 - Faserabfälle
 - Verpackungsabfälle gewerblich
 - Sonstige Produktions- und Gewerbeabfälle zur energetischen Verwertung
 - Sonstige Kunststoffabfälle
 - Küchen- und Kantinenabfälle
 - Altfette und -öle
 - Mineralische Ölabfälle (Altöl)
- ▶ Bau- und Abbruchabfälle
- ▶ Gefährliche Abfälle
- ▶ Altreifen
- ▶ Deponiegas
- ▶ Gülle und Festmist (Potenzialbetrachtung)

Die Begriffe EBS und SekBS sind nicht klar definiert. Ersatzbrennstoff ist der Oberbegriff. Nach RAL-Gütezeichen „Sekundärbrennstoffe“ (RAL-GZ 724 [1]) wird dieser unterteilt in heizwertreiche Fraktionen für die Monoverbrennung (in Ersatzbrennstoffkraftwerken) und Sekundärbrennstoffe für die Mitverbrennung in Zement- oder Kohlekraftwerken. Im Folgenden wird vereinfacht der Begriff SekBS für die Mitverbrennung und EBS für die Monoverbrennung in Ersatzbrennstoffkraftwerken verwandt. Se-

kundärbrennstoffe, die nach dem RAL-GZ 724 gütegesichert sind, werden mit der Marke SBS® bezeichnet. Hinsichtlich des Anlagenparks, wurden neben klassischen Monoverbrennungsanlagen auch Anlagen zur Mitverbrennung von Abfällen sowie biologische Abfallbehandlungsanlagen betrachtet:

- ▶ Müllverbrennungsanlagen (MVA)
- ▶ Ersatzbrennstoffkraftwerke (EBS-KW)
- ▶ Sondermüllverbrennungsanlagen (SMVA)
- ▶ Altholzverbrennungsanlagen | Biomassekraftwerke (BMKW)
- ▶ Klärschlammverbrennungsanlagen (KVA)
- ▶ Zementwerke (ZW – Abfallmitverbrennung)
- ▶ Kohlekraftwerke (KKW – Abfallmitverbrennung)
- ▶ Industriekraftwerke (IKW)
- ▶ Bioabfallvergärungsanlagen (BVGA)
- ▶ MBA-Anlagen mit Vergärungs-Stufe (MBA)

Bei der Datenrecherche und insbesondere bei den Betreiberbefragungen wurden die von den einzelnen Anlagen exportierten Mengen an Strom, Wärme und Dampf erfasst und im Falle der Mitverbrennung die substituierten Mengen an Primärbrennstoffen abgefragt.

Neben der quantitativen Ermittlung der genannten Abfallströme und Kapazitäten, erfolgte im Rahmen der Studie auch eine qualitative Bewertung von alternativen Verfahrensansätzen zur energetischen Nutzung von Abfällen. Derartige Verfahren spielen in Deutschland zurzeit technisch so gut wie keine Rolle. Daher konnte nur diskutiert werden, ob bzw. welche Verfahren künftig grundsätzlich für einen industriellen Einsatz im Bereich der energetischen Abfallverwertung infrage kommen könnten.

Auch der Beitrag von Deponiegas und Alt- sowie Tierfetten zur Biodieselerzeugung zur Energiebereitstellung wurde berücksichtigt. Zudem wurden die Mengen an tierischen Exkrementen aus der Landwirtschaft recherchiert und im Rahmen der Aufstellung als Energiepotenzial (durch Biogaserzeugung) dargestellt.

2.2 Datenermittlung

Ausgangspunkt der Datenermittlung war die Quantifizierung der Anlagenkapazitäten zur energetischen Abfallverwertung und der tatsächlich in den Anlagen behandelten Abfallmengen. Insbesondere auf Basis der durchgeführten Betreiberbefragungen konnten diese Zahlen mit hoher Genauigkeit bestimmt werden. Darüber hinaus bot die Kraftwerksliste der Bundesnetzagentur [2] einen umfangreichen Informationspool zum deutschen Kraftwerkspark, aus dem viele der benötigten Basisinformation extrahiert werden konnten. Plausibilitätskontrollen und die Recherche fehlender Informationen erfolgte unter anderem durch den Abgleich mit den Abfallbilanzen der Länder, Angaben des Statistischen Bundesamtes sowie Verbands- und Literaturangaben.

Neben den Kapazitäten und Massenströmen [Mg/a] wurden die von den Anlagen exportierten Energiemengen in Form von Strom, Wärme und Dampf, die Energiebereitstellung aus Abfall im Industrieprozess sowie der Energiegehalt der behandelten Abfallströme, in Form der Heiz- oder Brennwerte [MJ/Mg], abgefragt bzw. anderweitig ermittelt. Dies ermöglichte eine heizwertbezogene Kapazitätsbetrachtung für die jeweils eingesetzten Abfallmengen.

Ausgehend von den kommunalen Abfallmengen ließen sich unter Berücksichtigung der Importmengen sowie anderer bekannter Mengen (z.B. gefährliche Abfälle, mitverbrannter Klärschlamm etc.) die ansonsten kaum dokumentierten gewerblichen Abfallmengen quantifizieren, die in den Anlagen einer energetischen Verwertung zugeführt wurden.

Durch eine einwohnerbezogene, rückwärtige Betrachtung über mehrere Jahre (soweit Daten verfügbar), wurden die Auswirkungen möglicher Einflussfaktoren (Bevölkerungsentwicklung, abfallrechtliche Änderungen, wirtschaftliche Entwicklungen etc.) identifiziert, quantitativ abgeschätzt und für die Prognose der weiteren Entwicklung bis zum Jahr 2030 genutzt.

Die Bewertung der sogenannten alternativen Abfallbehandlungsverfahren (Pyrolyse, Vergasung, Verölung, Plasmaverfahren etc.) hinsichtlich ihrer Relevanz für die Energieversorgung im Jahr 2030, erfolgte auf Basis der langjährigen Erfahrungen der Autoren, die durch aktuelle öffentliche und industriefinanzierte Studien auf diesem Gebiet einen umfassenden und aktuellen Überblick über die Thematik besitzen.

Die Daten zum Deponiegaspotenzial wurden aus der vorhandenen Literatur extrahiert. Da in Deutschland kein unvorbehandelter Abfall mehr abgelagert werden darf, werden keine neuen Deponiebereiche mit nennenswerter Gasbildung errichtet. Die vorhandenen Potenziale sind bekannt und die Abnahme der Gasbildungsrate mit der Zeit auf Basis vorhandener Erfahrungen gut abschätzbar.¹

Ergänzend wurde auch das Biogaspotenzial aus Gülle und anderen tierischen Exkrementen berücksichtigt. Auch wenn es sich hierbei nicht um klassische Abfälle handelt, besitzen diese landwirtschaftlichen Reststoffe ein relevantes Umwelt- und Energiepotenzial. Aufgrund der Vielzahl der Anfallstellen erfolgte für diese Reststoffe keine anlagenspezifische Recherche, sondern eine Abschätzung auf Basis der Anzahl der Tiere.

2.3 Methodik bei der Auswertung

Ein einheitliches Vorgehen zur Auswertung der abgefragten und recherchierten Daten war nicht möglich, da für jeden Anlagentyp unterschiedliche Voraussetzungen und Datenqualitäten vorlagen.

Grundsätzlich wurde versucht, für jeden Anlagentyp die Menge der eingesetzten Abfallstoffe und deren Energiegehalt zu quantifizieren. Anhand von Strom-, Wärme-, und Dampflieferungen und unter Berücksichtigung der eingesetzten Zusatzenergieträger (z.B. Heizöl als Zünder, Erdgas zur Temperierung der Abgase) wurden dann elektrische und Gesamtnutzungsgrade (soweit möglich brutto und netto) berechnet.

Im Folgenden wird das prinzipielle Vorgehen zur Bestimmung der energetischen Kennzahlen auf Basis der Fragebogenauswertung kurz skizziert.

Aus den Rückläufern der Fragebögen (vgl. Abbildung A 2.2-1) wurden zunächst Gesamtsummen (über alle Rückläufer) für alle relevanten Datenreihen, also zum Beispiel für die Abfallmenge, den Stromexport, den Gasverbrauch etc., aggregiert. Da nicht 100 % der Anlagendaten bekannt waren (im Fall der MVA 92,1 %), wurden die ermittelten Werte im nächsten Schritt anhand der Kapazität auf den gesamten deutschen Anlagenpark hochgerechnet (einfacher Dreisatz).

Die jährlichen Gesamtmasseudurchsätze für den Anlagentyp standen somit direkt zur Verfügung. Durch Multiplikation des Durchsatzes mit dem (ebenfalls abgefragten) Heizwert wurde die Energiemenge bestimmt, die mit dem Abfall in die Anlagen eingebracht wird:

$$E_{\text{Abf, input}} = M_{\text{Abfall}} \cdot H_{\text{u, Abfall}}$$

¹ In einem parallel laufenden noch nicht abgeschlossenen Projekt des Umweltbundesamtes werden aktuell die zu erwartenden Deponiegasmengen abgeschätzt.

Um die aus den Abfällen erzeugte Energie zu ermitteln, wurden die eingesetzten Hilfsenergiemengen (Strom, Heizöl, Erdgas) berücksichtigt. Die ohne Berücksichtigung des Eigenbedarfs aus dem Abfall erzeugte Bruttoenergie wurde nach folgender Formel berechnet:

$$\begin{aligned} E_{\text{Abf, prod, brutto}} &= (E_{\text{el, prod}} + E_{\text{th, prod}}) - E_{\text{Hilf}} \cdot \eta_{\text{Ges, brutto}} \\ &= (E_{\text{el, prod}} + E_{\text{th, Wärme, prod}} + E_{\text{th, Dampf, prod}}) - E_{\text{Hilf}} \cdot \eta_{\text{Ges}} \end{aligned}$$

Von der erzeugten Energie (Summe aus Strom, Wärme und Dampf) wurde die Hilfsenergie (E_{Hilf}) also anteilig (gewichtet mit dem Gesamtnutzungsgrad) abgezogen, um lediglich die im Abfall gespeicherte Brennstoffenergie zu berücksichtigen. Zur Ermittlung der netto bereitgestellten Energie wurde analog verfahren, wobei hier nur die exportierte Energiemenge berücksichtigt ist:

$$\begin{aligned} E_{\text{Abf, prod, netto}} &= (E_{\text{el, exp}} + E_{\text{th, exp}}) - E_{\text{Hilf}} \cdot \eta_{\text{Ges, netto}} \\ &= (E_{\text{el, exp}} + E_{\text{th, Wärme, exp}} + E_{\text{th, Dampf, exp}}) - E_{\text{Hilf}} \cdot \eta_{\text{Ges}} \end{aligned}$$

Auch bei der Berechnung der Nutzungsgrade wurden die eingesetzten Hilfsenergien berücksichtigt:

$$\eta_{\text{ges, brutto}} = \frac{E_{\text{el, prod}} + E_{\text{th, Wärme, prod}} + E_{\text{th, Dampf, prod}}}{E_{\text{Abf, input}} + E_{\text{Hilf}}}$$

$$\eta_{\text{ges, netto}} = \frac{E_{\text{el, exp}} + E_{\text{th, Wärme, exp}} + E_{\text{th, Dampf, exp}}}{E_{\text{Abf, input}} + E_{\text{Hilf}}}$$

bzw. für die Elektrizität:

$$\eta_{\text{el, brutto}} = \frac{E_{\text{el, prod}}}{E_{\text{Abf, input}} + E_{\text{Hilf}}}$$

$$\eta_{\text{el, netto}} = \frac{E_{\text{el, exp}}}{E_{\text{Abf, input}} + E_{\text{Hilf}}}$$

Die geschilderte Auswertemethodik wurde auf die Daten der Müllverbrennungsanlagen, EBS-Kraftwerke und Verbrennungsanlagen für gefährliche Abfälle angewendet. Die bei den MVA erreichte Quote an Rückläufern lag mit 92,1 % so hoch, dass die Hochrechnung auf die Gesamtzahl der Anlagen sehr gut erfolgen konnte. Aufgrund der deutlich geringeren Anzahl an Rückläufern der Fragebogenaktion bei EBS-Kraftwerken und SMVA (39,4 % bzw. 56,1 %), ergaben sich durch die Hochrechnungen zum Teil Unstimmigkeiten, insbesondere bei den Nutzungsgradberechnungen. Für diese Anlagentypen wurden daher zum Teil zunächst Nutzungsgrade für die Einzelanlagen (nach obigen Formeln) berechnet und hieraus dann ein Mittelwert gebildet. In den jeweiligen Unterkapiteln von Abschnitt 3.1 ist dies in den betreffenden Fällen angemerkt.

Für die anderen Anlagentypen war die Datenlage zum Teil deutlich ungünstiger. Insbesondere für die Mitverbrennung in Kohlekraftwerken sowie über den Betrieb der Industriekraftwerke sind wenig Informationen verfügbar. Hier musste, auf Basis der verfügbaren Daten, jeweils ein individueller Ansatz entwickelt werden. Dies ist in den entsprechenden Unterkapiteln von Abschnitt 3.1 für den Einzelfall beschrieben. Für diese Anlagen war auch eine Unterscheidung zwischen Brutto- und Nettowerten für die Energiebereitstellung nicht möglich.

Die abgeschätzten Werte sind daher grundsätzlich als Bruttowerte zu interpretieren. Waren aus den recherchierten Daten keine Heizwerte zu entnehmen bzw. rückzurechnen, wurden die in Tabelle A 2.3-1 im Anhang aufgeführten Werte verwendet.

2.4 Vorgehen bei der Prognose

Aus dem für das Jahr 2015 erstellten Szenario der Abfallmengen wurde eine Abschätzung der entsprechenden Mengen für das Jahr 2030 aufgebaut. Die einzelnen dazu getroffenen Annahmen sind den Unterabschnitten in Kapitel 4.2 zu entnehmen.

Von diesem Mengengerüst ausgehend wurde, unter Berücksichtigung der Veränderungen in der Entsorgungsanlagenstruktur, das zu erwartende Potenzial der Energieerzeugung aus Abfällen im Jahr 2030 abgeleitet.

3 Status Quo

3.1 Anlagen

In diesem Kapitel werden die bundesdeutschen Anlagen zur thermischen und biologischen Abfallbehandlung hinsichtlich der vorhandenen Kapazitäten und der durchgesetzten Abfallmengen dargestellt. Das Kapitel bildet die Basis für die integrale Ableitung der insgesamt in der Bundesrepublik anlagenspezifisch behandelten Abfälle und deren Mengen.

In jedem Unterkapitel werden zunächst alle bekannten Anlagen des jeweiligen Typs mit verschiedenen Merkmalen, insbesondere der Kapazität (soweit verfügbar), tabellarisch gelistet. Die weiteren Betrachtungen zur Energiebereitstellung erfolgen dann nicht anlagenspezifisch, sondern aggregiert für ganz Deutschland, um die Anonymisierung der Anlagendaten sicherzustellen. Dies war Voraussetzung für die Bereitschaft der Anlagenbetreiber, ihre Daten im Rahmen der durchgeführten Befragungen zur Verfügung zu stellen. Die Betreiberbefragungen wurden über die Verbände der Müllverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoffkraftwerke sowie der Sondermüllverbrennungsanlagen durchgeführt. Weitere Daten und Informationen wurden über das Statistische Bundesamt (insbesondere Fachserie 19 [3–17]), die Landesabfallbehörden, Internet- und Literaturrecherche sowie durch persönliche Nachfragen bei Fachleuten der entsprechenden Branchen beschafft.

3.1.1 Müllverbrennungsanlagen [MVA]

Die Abgrenzung zwischen Müllverbrennungsanlage (MVA) und Ersatzbrennstoff-Kraftwerk (EBS-KW) ist nicht immer eindeutig. Ursprünglich wurden die MVA in erster Linie zur Vernichtung des Schadstoffpotenzials erbaut, haben mittlerweile aber auch die Funktion als Energieversorger übernommen. Die EBS-KW hingegen sind in erster Linie zum Zwecke der Energieerzeugung in der unmittelbaren Nähe zu den Energieabnehmern errichtet worden. Die eingesetzte Verbrennungstechnik ist häufig identisch. Heute werden auch in Ersatzbrennstoff-Kraftwerken in der Regel Rostsysteme verwendet, weniger als ein Drittel der Anlagen verfügt über eine Wirbelschichtfeuerung (vergleiche Tabelle 3-2). In beiden Anlagentypen werden unaufbereitete und aufbereitete Siedlungsabfälle verbrannt. Wobei in den MVA schwerpunktmäßig unaufbereiteter Siedlungsabfall eingesetzt wird. Die EBS-Kraftwerke haben zudem einen meist deutlich eingeschränkteren Katalog für die einzusetzenden Abfallarten.

Im Rahmen dieser Studie wurden daher Anlagen eher jüngeren Baujahrs, die überwiegend zur Energieversorgung unter der Verwendung von Ersatzbrennstoffen konzipiert wurden, als Ersatzbrennstoff-Kraftwerke geführt. Dieses Vorgehen gewährleistet auch die Vergleichbarkeit mit der vorliegenden Fachliteratur und der bisherigen Zählweise des Umweltbundesamtes².

Tabelle 3-1 enthält eine Aufstellung der 66 aktuell in Deutschland betriebenen Müllverbrennungsanlagen, die alle mit einer Rostfeuerung ausgerüstet sind. Abbildung 3-1 zeigt die geographische Lage der Anlagen in der Bundesrepublik.

In Summe steht eine MVA Verbrennungskapazität von 20.634.782 Mg/a zur Verfügung. Konkrete Neubaupläne sind derzeit nicht bekannt. Lediglich der Ausbau der MVA Göppingen um rund 20.000 Mg/a ist geplant und befindet sich derzeit in der Genehmigungsphase.

² Es wird empfohlen, künftig eine klare Einteilung, beispielsweise anhand der verwendeten Technologie (Rostfeuerung versus Wirbelschichtfeuerung) vorzunehmen, falls eine Unterscheidung überhaupt erforderlich ist.

Tabelle 3-1 Müllverbrennungsanlagen in Deutschland (fehlende Werte wurden vom Betreiber nicht angegeben und/oder konnten nicht recherchiert werden) [18–32]

| Nr | Anlage | Rost | Linien | IBS | Energie- abgabe | FWL [MW] | Kapazität [Mg/a] |
|----|--------------------------|----------|--------|------|--------------------|-------------|---------------------|
| 1 | Augsburg | VR | 3 | 1994 | KWK | 75 | 255.000 |
| 2 | Bamberg | GGÜ | 3 | 1978 | KWK | 53 | 145.000 |
| 3 | Berlin ¹⁾ | WR | 5 | 1967 | KWK | | 550.000 |
| 4 | Bielefeld | GGÜ | 3 | 1981 | KWK | 180 | 400.000 |
| 5 | Böblingen | VR | 2 | 1999 | KWK | 58 | 157.000 |
| 6 | Bonn ¹⁾ | VR | 3 | 1992 | KWK | 86 | 315.000 |
| 7 | Bremen | VR | 4 | 1969 | KWK | 221 | 550.000 |
| 8 | Bremerhaven | VR | 4 | 1977 | KWK | | 401.500 |
| 9 | Burgkirchen | VR | 2 | 1994 | KWK | | 230.000 |
| 10 | Coburg | RR | 2 | 1988 | KWK | 53,4 | 142.000 |
| 11 | Darmstadt | VR | 3 | 1967 | KWK | 77 | 212.000 |
| 12 | Düsseldorf ¹⁾ | WR | 6 | 1965 | KWK | 137 | 450.000 |
| 13 | Emlichheim (Laar) | VR | 2 | 2008 | S | | 454.176 |
| 14 | Essen | WR | 4 | 1987 | KWK | | 745.000 |
| 15 | Frankfurt | VR | 4 | 1965 | KWK | | 525.300 |
| 16 | Freiburg Eschbach | VR | 1 | 2005 | KWK | 61,1 | 185.000 |
| 17 | Göppingen | WR | 1 | 1975 | KWK | 57,75 | 157.680 |
| 18 | Hagen | WR | 3 | 1966 | KWK | | 144.000 |
| 19 | Hamburg MVB | VR | 2 | 1994 | KWK | 116 | 320.000 |
| 20 | Hamburg MVR | VR | 2 | 1999 | KWK | 120 | 320.000 |
| 21 | Hameln | VR WR | 3 | 1977 | KWK | 141 | 300.000 |
| 22 | Hamm | VR | 4 | 1985 | KWK | | 295.000 |
| 23 | Hannover | VR | 2 | 2005 | S | 105 | 280.000 |
| 24 | Helmstedt Buschhaus | VR | 3 | 1998 | S | 172,5 | 525.000 |
| 25 | Herten | VR GGÜ | 4 | 1982 | KWK | 208,4 | 600.000 |
| 26 | Ingolstadt | RR GGÜ | 3 | 1977 | KWK | 99 | 255.000 |
| 27 | Iserlohn | VR | 3 | 1970 | KWK | 102 | 295.000 |
| 28 | Kamp-Lintfort | WR | 2 | 1997 | KWK | 99 | 270.000 |
| 29 | Kassel | VR | 2 | 1968 | KWK | 30,8 | 200.000 |
| 30 | Kempten | RR | 2 | 1996 | KWK | 52 | 160.000 |
| 31 | Kiel | WR | 2 | 1996 | KWK | 43,75 | 140.000 |
| 32 | Köln | WR | 4 | 1998 | KWK | 241 | 780.000 |
| 33 | Krefeld | WR | 3 | 1975 | KWK | 162 | 375.000 |
| 34 | Lauta | VR | 2 | 2004 | KWK | 87 | 225.000 |
| 35 | Leuna | VR | 2 | 2005 | KWK | 152,78 | 420.000 |
| 36 | Leverkusen | VR | 3 | 1970 | KWK | 83,69 | 280.320 |

| Nr | Anlage | Rost | Linien | IBS | Energie- abgabe | FWL [MW] | Kapazität [Mg/a] |
|----|---------------------------------------|------------|--------|------|--------------------|-------------|---------------------|
| 37 | Ludwigshafen ¹⁾ | WR | 3 | 1967 | KWK | 86,7 | 210.000 |
| 38 | Ludwigslust | VR | 1 | 2005 | S | 16 | 50.000 |
| 39 | Magdeburg Rothensee | VR | 4 | 2006 | KWK | 267 | 650.000 |
| 40 | Mainz ¹⁾ | RR | 3 | 2004 | KWK | | 350.000 |
| 41 | Mannheim | VR | 3 | 1965 | KWK | 263 | 650.000 |
| 42 | München | RR | 4 | 1983 | KWK | 172 | 685.000 |
| 43 | Neunkirchen | RR | 2 | 1969 | KWK | 55,6 | 150.000 |
| 44 | Neustadt | VR | 1 | 1984 | KWK | | 56.000 |
| 45 | Nürnberg ¹⁾ | VR | 3 | 2001 | KWK | 105 | 230.000 |
| 46 | Oberhausen Niederhein | WR | 4 | 1972 | KWK | 267 | 700.000 |
| 47 | Offenbach | WR | 3 | 1970 | KWK | 84,3 | 250.000 |
| 48 | Olching Geiselbullach | VR | 3 | 1975 | KWK | | 120.000 |
| 49 | Pirmasens | VR | 2 | 1998 | KWK | | 180.000 |
| 50 | Rosenheim | GGÜ | 1 | 1964 | KWK | 27,7 | 100.000 |
| 51 | Salzbergen ¹⁾ | VR | 1 | 2004 | KWK | 47 | 130.000 |
| 52 | Schwandorf | GGÜ | 4 | 1982 | KWK | 205 | 450.000 |
| 53 | Schweinfurt | VR | 3 | 1994 | KWK | 62,4 | 196.806 |
| 54 | Solingen | VR | 2 | 1969 | KWK | 63 | 175.000 |
| 55 | Stapelfeld | VR | 2 | 1979 | KWK | 58,2 | 350.000 |
| 56 | Staßfurt | VR | 2 | 2007 | KWK | 111 | 380.000 |
| 57 | Stuttgart ¹⁾ | VR WR | 3 | 1965 | KWK | 192,6 | 420.000 |
| 58 | Tornesch-Ahrenlohe | VR | 2 | 1974 | KWK | 29 | 80.000 |
| 59 | Ulm | VR | 2 | 1997 | KWK | | 165.000 |
| 60 | Velsen Saarbrücken | VR | 2 | 1997 | S | 83,3 | 255.000 |
| 61 | Weißenhorn | VR | 2 | 1991 | S | 48 | 116.000 |
| 62 | Weisweiler Eschweiler ¹⁾ | WR | 3 | 1996 | KWK | | 360.000 |
| 63 | Wuppertal | WR | 5 | 1976 | KWK | 186 | 400.000 |
| 64 | Würzburg | VR VR-RR | 3 | 1984 | KWK | | 219.000 |
| 65 | Zella-Mehlis | RR | 1 | 2008 | KWK | 60 | 160.000 |
| 66 | Zorbau | VR | 2 | 2005 | KWK | 75 | 338.000 |
| | | | | | | Σ | 20.634.782 |

Anlagen in Bau | Planung

| | |
|--|--------|
| Erweiterung MVA Göppingen auf 180.000 Mg/a | 22.000 |
|--|--------|

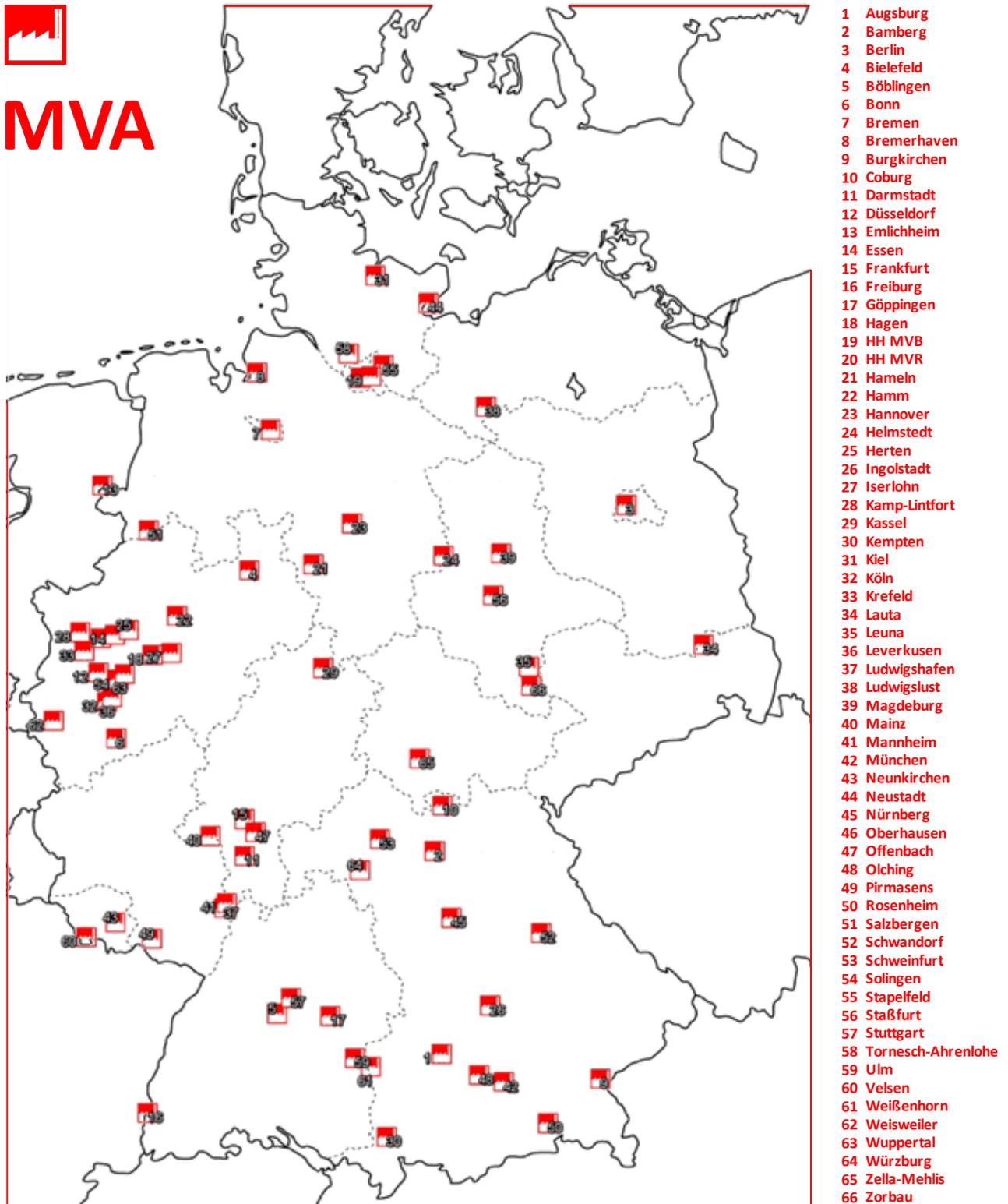
Anmerkungen

1) Dampfverstromung in externer Anlage

VR = Vorschubrost | RR = Rückschubrost | GGÜ = Gegenlaufüberschubrost | WR = Walzenrost
 KWK = Kraft-Wärme-Kopplung | S = nur Stromabgabe

Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [18-32]

Abbildung 3-1 Müllverbrennungsanlagen in Deutschland



Quelle: Eigene Darstellung

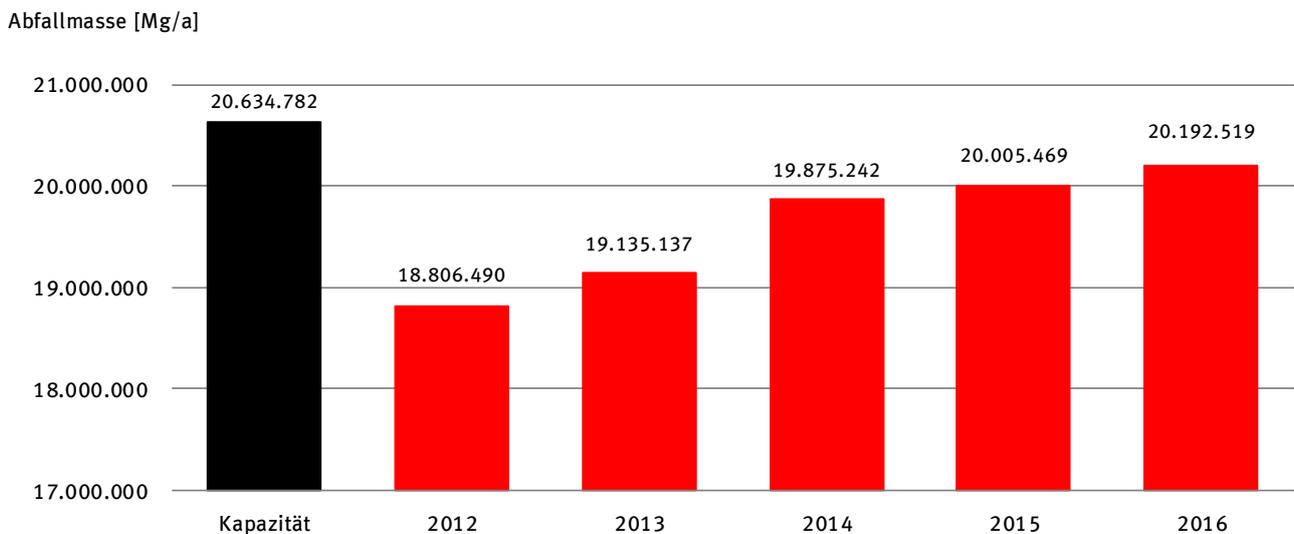
Die Anlagengrößen der deutschen MVA variieren zwischen 50.000 Mg/a und 780.000 Mg/a. Die meisten Anlagen werden in Kraft-Wärme-Kopplung betrieben, wobei einige den erzeugten Prozessdampf

in externe Anlagen zur Verstromung und Wärmenutzung weitergeben (jeweils als Fußnote in der Tabelle vermerkt, wobei KWK-Betrieb ausgewiesen ist). Nur sechs Anlagen erzeugen ausschließlich Strom.

Im Rahmen der durchgeführten Betreiberumfrage konnten detaillierte Daten über Betriebsparameter, Abfalleinsatz und Energievermarktung erhoben werden. Die Rücklaufquote der Fragebogen betrug 89,4 %, damit konnten 92,1 % der deutschen MVA Kapazität abgedeckt werden. Von diesem sehr hohen Anteil ausgehend, konnte mit geringem Fehler auf den kompletten Anlagenpark hochgerechnet werden, um die erforderlichen Kenngrößen zu berechnen.

Abbildung 3-2 zeigt zunächst den jährlichen Gesamtdurchsatz aller deutschen MVA, für die Jahre 2012 bis 2016, im Vergleich zur verfügbaren Kapazität (in den Durchsatzzahlen enthalten sind auch Abfallmengen aus dem Ausland, die in den letzten beiden Jahren etwa 700.000 Mg/a betragen). Die Daten spiegeln die bekannte Zunahme der Auslastung in den letzten Jahren deutlich wieder. Obwohl eine ganze Reihe an Anlagen ihre ursprüngliche Kapazitätsgrenze bereits seit einigen Jahren kontinuierlich überschreitet (vgl. z.B. [33]) war im Jahr 2016, dem Jahr der bisher höchsten Auslastung, noch eine Gesamtkapazität von einer knappen halben Mio. Mg „verfügbar“. Nach Ansicht vieler Experten ist dies aber bereits zu wenig, um einen sicheren Langzeitbetrieb zu gewährleisten. Bereits der Ausfall einer größeren Anlage, würde diese Kapazitätsreserve aufzehren.

Abbildung 3-2 In deutschen MVA zwischen 2012 und 2016 jährlich verbrannte Abfallmenge und die insgesamt verfügbare Verbrennungskapazität (Hochrechnung auf Basis Betreiberbefragung. Rücklaufquote: 92 % der Kapazität)



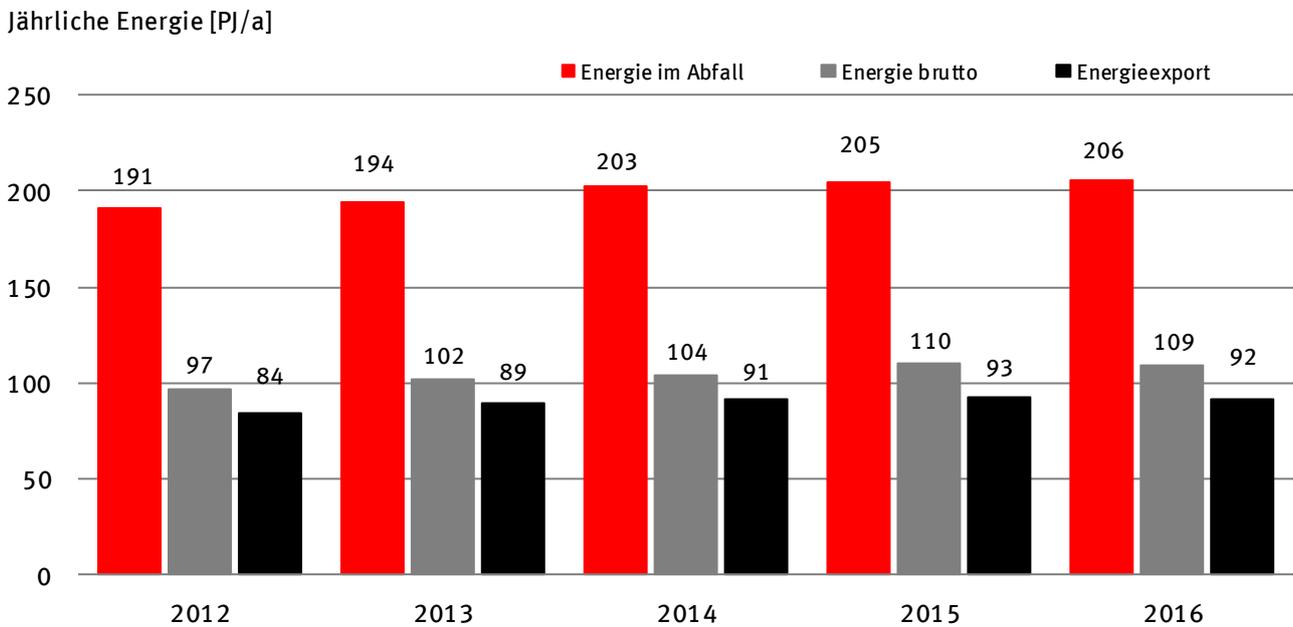
Quelle: Eigene Darstellung

Die den Müllverbrennungsanlagen mit dem Abfall insgesamt zugeführte Energie ist Abbildung 3-3 zu entnehmen. Ebenfalls dargestellt sind die erzeugte und exportierte Energie aus diesen Anlagen.

Die mit dem Abfall den Müllverbrennungsanlagen zugeführte Energie entspricht mit gut 205 PJ/a etwa 1,5 % des jährlichen deutschen Primärenergieverbrauchs [34]. In Strom, Wärme und Dampf überführt werden davon ca. 100 PJ/a, entsprechend einem Bruttonutzungsgrad von über 50 %. Nach Abzug des Eigenverbrauchs, dessen Höhe auch auf die umfangreichen Vorkehrungen zum Umweltschutz, insbesondere zur Emissionsminderung, zurückzuführen ist, verbleiben rund 90 PJ/a, die als Endenergie an die Verbraucher geliefert werden und dabei etwa 1 % zum Endenergieverbrauch in Deutschland beitragen.

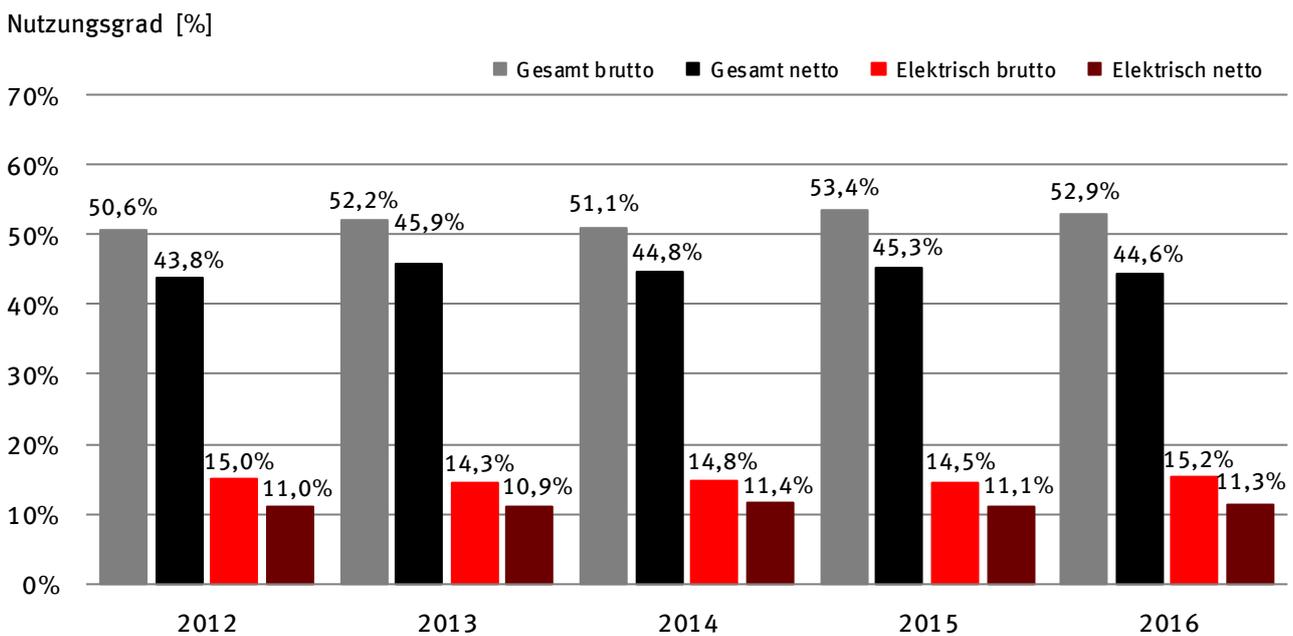
In Abbildung 3-4 sind die elektrischen und die Gesamtnutzungsgrade (brutto und netto) dargestellt. Die Berechnung erfolgte mit den aus allen Anlagen aggregierten Gesamtzahlen, jeweils unter Berücksichtigung der verwendeten Hilfsenergien.

Abbildung 3-3 Energieeinsatz und -erzeugung (Summe aus Strom, Wärme und Dampf) in deutschen MVA zwischen 2012 und 2016 (Hochrechnung auf Basis Betreiberbefragung. Rücklaufquote: 92 % der Kapazität)



Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 3-4 Elektrische und Gesamtnutzungsgrade deutscher MVA zwischen 2012 und 2016 (Hochrechnung auf Basis Betreiberbefragung; Rücklaufquote: 92 % der Kapazität)



Quelle: Eigene Darstellung

3.1.2 Ersatzbrennstoffkraftwerke [EBS-KW]

Die Datenerhebung bei den Betreibern der Ersatzbrennstoffkraftwerke erfolgte analog zu den Müllverbrennungsanlagen. Da die Anzahl der im Verband organisierten Anlagen geringer als bei den Müllverbrennungsanlagen ist, konnten hier nur deutlich weniger Betreiber über die Umfrage erreicht werden. Dennoch konnte ein Kapazitätsanteil von 39,4 % der in Tabelle 3-2 als EBS-Kraftwerke geführten Anlagen abgedeckt werden.

Tabelle 3-2 Ersatzbrennstoffkraftwerke in Deutschland ([18,32,35–59]; es sind die Gesamtkapazitäten angegeben. Einige Anlagen verwerten neben EBS auch weitere Brennstoffe, wie z.B. Papierschlämme

| Nr | Anlage | Typ | Linien | IBS | Energieabgabe | FWL [MW] | Kapazität [Mg/a] |
|----|---------------------------------------|-------|--------|-------------|---------------|----------|------------------|
| 1 | Amsdorf | RF | 2 | 2004 | KWK | | 120.000 |
| 2 | Andernach | RF | 1 | 2008 | KWK | | 114.000 |
| 3 | Bernburg ¹⁾ | RF | 3 | 2009 | KWK | 214 | 552.000 |
| 4 | Bitterfeld-Wolfen | RF | 1 | 2010 | KWK | 56 | 130.000 |
| 5 | Bremen Blumenthal | RF | 1 | 2005 | KWK | 31 | 60.000 |
| 6 | Bremen MKK | RF | 1 | 2009 | KWK | 110 | 330.000 |
| 7 | Eisenhüttenstadt ²⁾ | ZWS | 1 | 2011 | KWK | 150 | 340.000 |
| 8 | Erfurt Ost | RF | 1 | 2006 | KWK | 26 | 63.900 |
| 9 | Essen ⁴⁾ | SWS | 1 | 2010 | KWK | 12 | 26.500 |
| 10 | Frankfurt (T2C) | RWS | 3 | 2012 | KWK | | 700.000 |
| 11 | Gersthofen Augsburg | RF | | 2009 | KWK | 35 | 90.000 |
| 12 | Gießen | RF | 1 | 2009 | KWK | 10 | 25.000 |
| 13 | Glückstadt ²⁾ | ZWS | 1 | 2009 | KWK | | 250.000 |
| 14 | Großbräschen | RF | 1 | 2008 | KWK | 102 | 258.750 |
| 15 | Hagenow | RF | | 2009 | KWK | 35 | 80.000 |
| 16 | Heringen ¹⁾ | RF | 2 | 2010 | KWK | 117 | 297.600 |
| 17 | Hürth Knapsack | RF | 2 | 2008 | KWK | 130 | 320.000 |
| 18 | Korbach | RF | 1 | 2008 | KWK | 36 | 75.000 |
| 19 | Lünen ³⁾ | ZWS | 1 | 1982 2005 | KWK | | 165.000 |
| 20 | Meuselwitz-Lucka ⁴⁾ | RF | | 2005 | | | 50.000 |
| 21 | Minden | RF | 1 | 2002 | KWK | 15 | 35.000 |
| 22 | Neumünster | ZWS | 1 | 2005 | KWK | 83 | 150.000 |
| 23 | Pforzheim | ZWS | 1 | 1990 | KWK | | 50.000 |
| 24 | Premnitz | ZWS/R | 2 | 2001 | KWK | 106 | 270.000 |
| 25 | Rostock | RF | 1 | 2010 | KWK | 87 | 230.000 |
| 26 | Rudolstadt Schwarza | RF | 1 | 2007 | D | 29 | 80.000 |
| 27 | Rüdersdorf | RF | 1 | 2008 | S | 110 | 226.000 |
| 28 | Schwedt ²⁾ | ZWS | 1 | 2011 | KWK | | 442.000 |
| 29 | Spremberg Schw. Pumpe ²⁾ | RF | 1 | 2012 | KWK | 110 | 240.000 |

| Nr | Anlage | Typ | Linien | IBS | Energie- abgabe | FWL [MW] | Kapazität [Mg/a] |
|---------------------------------|--|-----|--------|------|--------------------|-------------|---------------------|
| 30 | Stavenhagen | RF | 1 | 2007 | KWK | 49 | 90.000 |
| 31 | Weener Leer | RF | 1 | 2008 | KWK | | 120.000 |
| 32 | Witzenhausen ²⁾ | RF | 1 | 2009 | KWK | 124 | 330.000 |
| | | | | | | Σ | 6.310.750 |
| Anlagen in Bau Planung | | | | | | | |
| | Gießen, 2. Anlage | RF | 1 | 2017 | KWK | 10 | 28.670 |
| | Stade | RF | 1 | | | | 175.000 |
| | Stellinger Moor | RF | 1 | | KWK | 48 | 100.000 |
| Anmerkungen | | | | | | | |
| 1) | Dampfverstromung in externer Anlage | | | | | | |
| 2) | Verbrennt auch Rejekte und Schlamm aus dem Papierrecycling | | | | | | |
| 3) | Mitverbrennung mit anderen Brennstoffen (z.B. Biomasse, Tiermehl, Kohle) | | | | | | |
| 4) | Anlage (derzeit) außer Betrieb | | | | | | |
| | RF = Rostfeuerung SWS = Stationäre Wirbelschicht ZWS = Zirkulierende Wirbelschicht RWS = Rotierende Wirbelschicht KWK = Kraft-Wärme-Kopplung D = nur Dampfabgabe S = nur Stromabgabe | | | | | | |

Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [18,32,35-59]

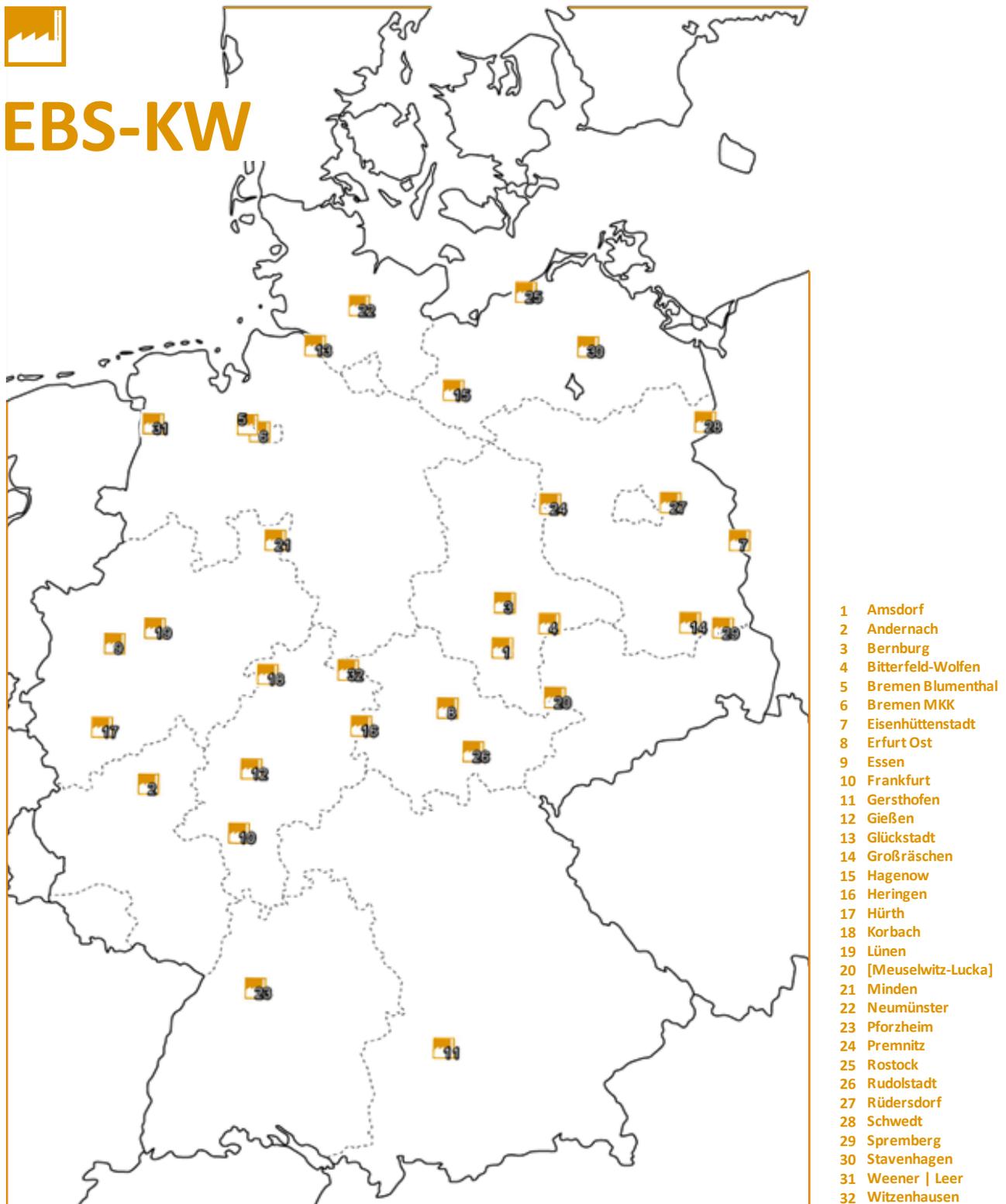
Die Kapazität deutscher Ersatzbrennstoffkraftwerke beträgt aktuell 6.310.750 Mg/a. Da in dieser Summe auch Anlagenkapazitäten an Standorten von Papierfabriken, mit einem Entsorgungsauftrag für die Reststoffe aus der Papierherstellung, enthalten sind, steht nicht das komplette Volumen für Ersatzbrennstoffe zur Verfügung.

Die aktuell günstige Marktsituation hat offensichtlich dazu geführt, dass im moderaten Umfang Pläne zum Ausbau des EBS-Kraftwerkparcs entstehen. So gibt es Bestrebungen, eine bereits seit Jahren als Rohbau („Bauruine“) existierende Anlage in Stade fertigzustellen und konkrete Pläne, am Standort der ehemaligen Hamburger Müllverbrennungsanlage Stellinger Moor, ein Abfallverwertungszentrum mit Ersatzbrennstoffkraftwerk zu errichten. Zudem befindet sich in Gießen eine zweite Anlage in Bau (TREA II), die Ende 2017 in Betrieb gehen soll.

Wie Abbildung 3-6 zeigt, werden auch die Kapazitäten der Ersatzbrennstoffkraftwerke sehr gut genutzt (die angegebenen Zahlen beinhalten auch Abfälle aus dem Ausland, von zuletzt etwa 200.000 Mg/a). Die letzten Jahre waren von einem moderaten Durchsatzanstieg gekennzeichnet. Auch unter diesen Anlagen gibt es einige, die inzwischen durchgehend oberhalb der ursprünglichen Auslegungskapazität operieren. In Summe besteht dennoch eine geringe Kapazitätsreserve von etwa einer halben Million Mg/a, die – wie bereits bei den Müllverbrennungsanlagen angemerkt – für ein funktionierendes System zwingend erforderlich ist.

Die aus den Umfragedaten gewonnenen (aggregierten) Zahlen zur eingesetzten und genutzten Energie (Summe aus Strom, Wärme und Dampf) aus dem verwerteten Abfall zeigt Abbildung 3-7. Mit rund 70 % Gesamtnutzungsgrad ergibt sich ein signifikant höherer Wert als bei den Müllverbrennungsanlagen. Dies ist sicherlich den gezielt für eine optimierte Energieversorgung ausgesuchten Anlagenstandorten geschuldet, die häufig eine kontinuierliche (ganzjährige) Dampflieferung an Industriebetriebe erlauben. Die exportierte Energiemenge liegt mit rund 45 PJ/a etwa halb so hoch wie der entsprechende Wert bei den Müllverbrennungsanlagen.

Abbildung 3-5 Ersatzbrennstoffkraftwerke in Deutschland

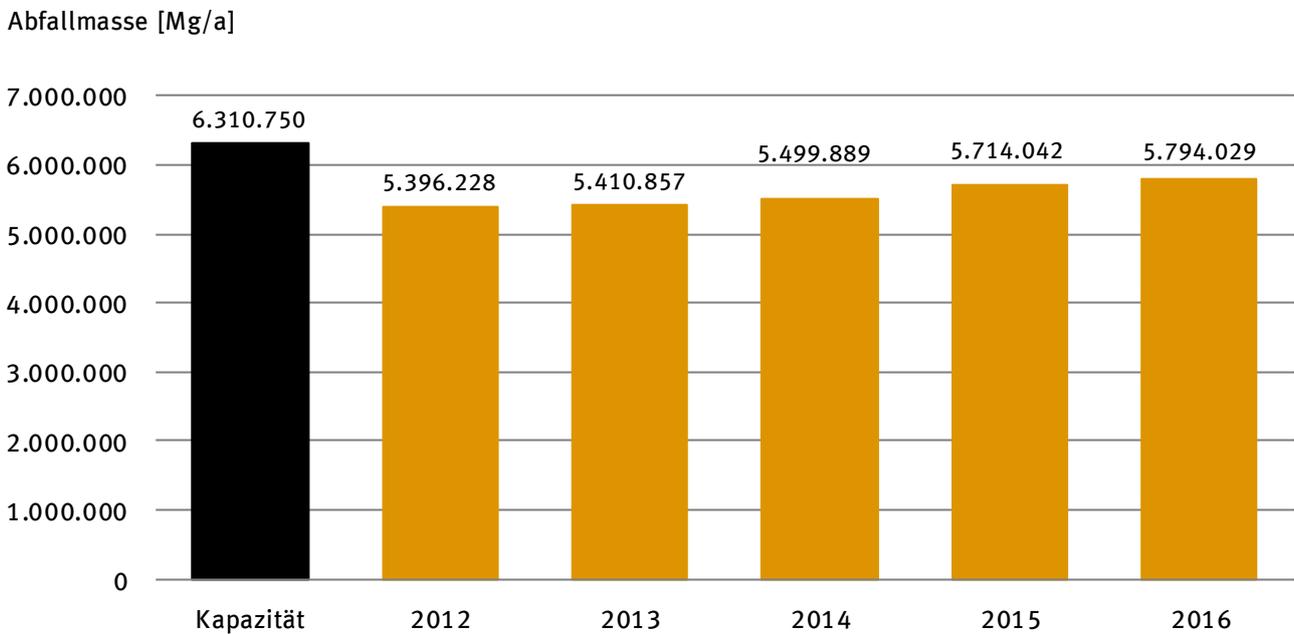


Quelle: Eigene Darstellung

Auf eine tiefere Analyse (z.B. Berechnung der netto/brutto Werte oder Stromnutzungsgrade) der aggregierten Gesamtzahlen wurde aufgrund der unsicheren Datenlage (nur 39,4 % Rückläufer) verzichtet. Abbildung 3-8 zeigt stattdessen die mittleren und maximalen elektrischen und Gesamtnutzungsgrade

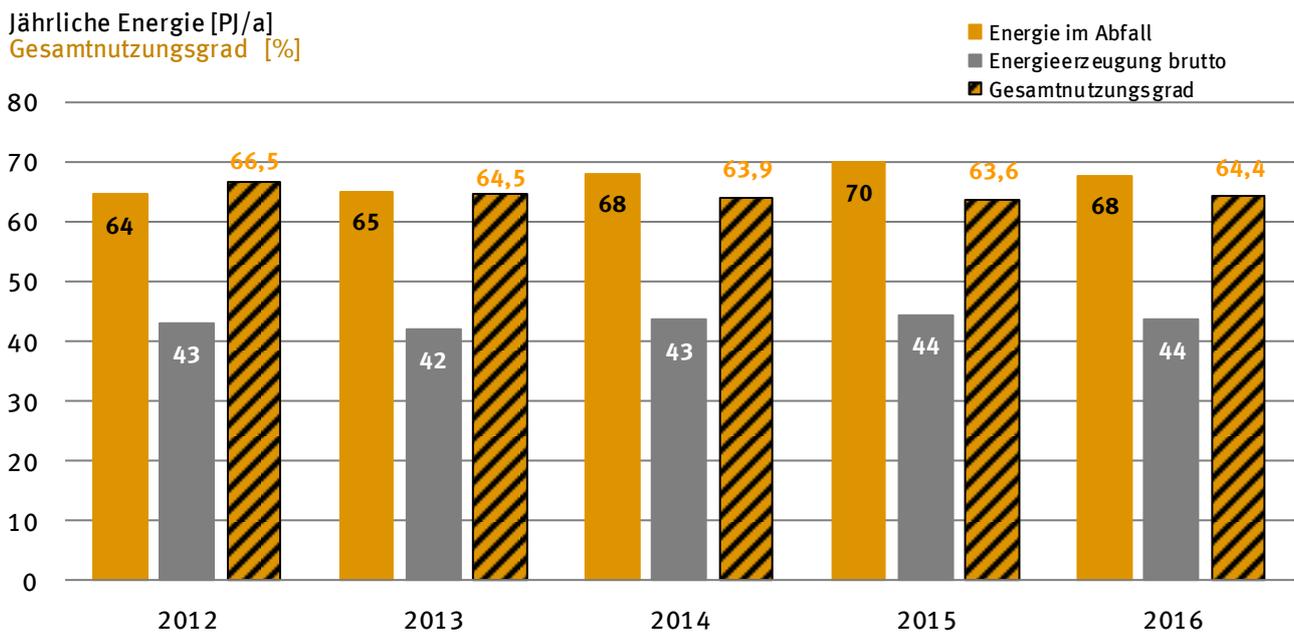
der Einzelanlagen. Auch hier zeigen sich im Vergleich zu den MVA höhere Werte, die neben optimierten Standortbedingungen auch auf die gewählten Dampfparameter (Druck und Temperatur) zur Stromerzeugung zurückgeführt werden können.

Abbildung 3-6 In deutschen EBS-Kraftwerken zwischen 2012 und 2016 jährlich verbrannte Abfallmengen und die insgesamt verfügbare Verbrennungskapazität (Hochrechnung auf Basis einer Betreiberbefragung. Rücklaufquote: 39 % der Kapazität)



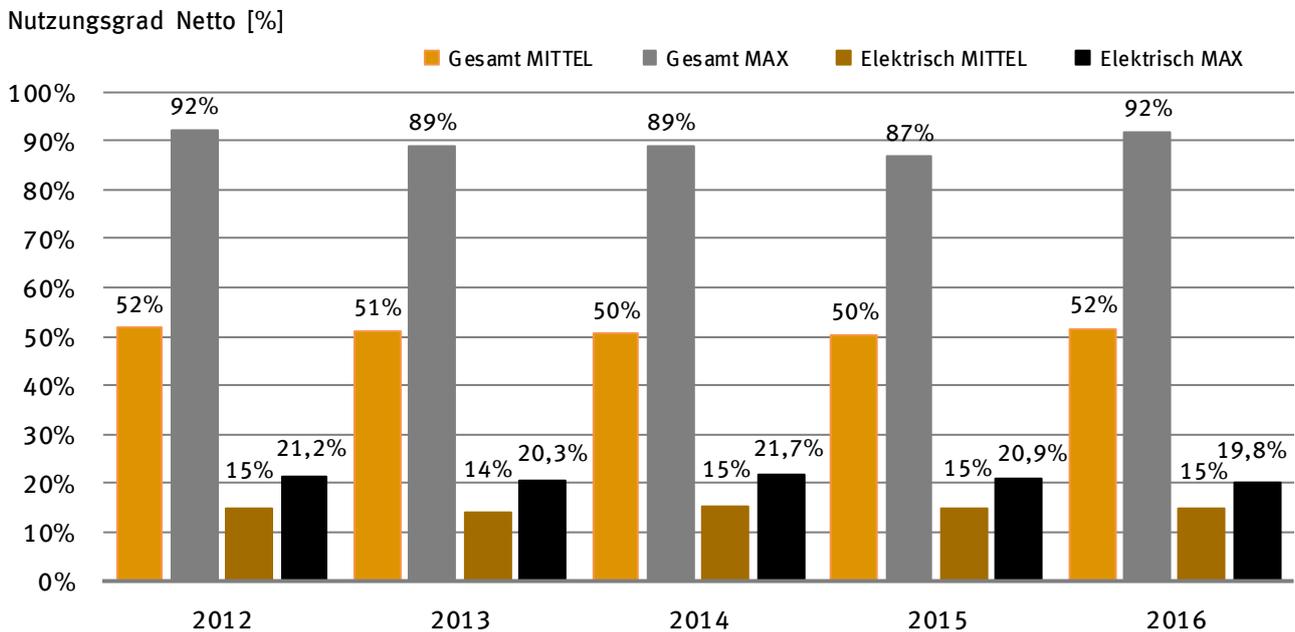
Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 3-7 Energieeinsatz, -bruttoerzeugung und Gesamtnutzungsgrad (Summe aus Strom, Wärme und Dampf) in deutschen EBS-Kraftwerken zwischen 2012 und 2016 (Hochrechnung auf Basis Betreiberbefragung. Rücklaufquote: 39 % der Kapazität)



Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 3-8 Überblick der Netto-Nutzungsgrade von EBS-Kraftwerken in Deutschland zwischen 2012 und 2016. Angegeben sind jeweils der Mittelwert sowie der Maximalwert des elektrischen und des Gesamtnutzungsgrades (Werte aus Betreiberbefragung)



Quelle: Eigene Darstellung

3.1.3 Sondermüllverbrennungsanlagen [SMVA]

In Deutschland gibt es 31 Verbrennungsanlagen für gefährliche Abfälle (vgl. Tabelle 3-3). Die überwiegende Mehrzahl dieser Anlagen verfügt über Drehrohröfen, in denen flüssige, feste und zum Teil auch gasförmige Abfälle inertisiert werden. Außerdem werden einige Brennkammern für flüssige und gasförmige Abfälle betrieben.

In Tabelle 3-3 sind alle Anlagen und ihre Kapazitäten aufgeführt. Die Ermittlung der relevanten Daten für eine Einschätzung der Energiebereitstellung erfolgte auch in diesem Fall über eine Betreiberumfrage, die durch den BDSAV e.V. und den VCI e.V. unterstützt wurde. Die Rücklaufquote der Umfrage lag bei 56,1 % (der Kapazität). Auf dieser Basis erfolgte eine Hochrechnung der relevanten Daten auf die verfügbare Gesamtkapazität.

Tabelle 3-3 Anlagen zur Verbrennung gefährlicher Abfälle (Sonderabfälle) in Deutschland [32,60–78]

| Nr | Anlage | Betreiber | Linien | Feuerung | Brennstoffe | Energieabgabe | Kapazität [Mg/a] |
|----|-----------------|-----------------------|--------|-----------|-------------|---------------|------------------|
| 1 | Baar-Ebenhausen | GSB | 2 | DR | fe fl | KWK | 180.000 |
| 2 | Bergkamen | Bayer Schering Pharma | | | | | 12.000 |
| 3 | Biebesheim | Indaver HIM | 2 | DR | fe fl | KWK | 120.000 |
| 4 | Bramsche | Remondis | | BK | fl g | | 2.000 |
| 5 | Brunsbüttel | Remondis | 1 | DR | fe fl | KWK | 55.000 |
| 6 | Brunsbüttel | Currenta | | BK | fl | | 27.000 |
| 7 | Burghausen | Wacker | 2 | DR 2xBK | fe fl g | D | 32.000 |
| 8 | Dormagen | Currenta | 1 | DR | fe fl g | D | 75.000 |

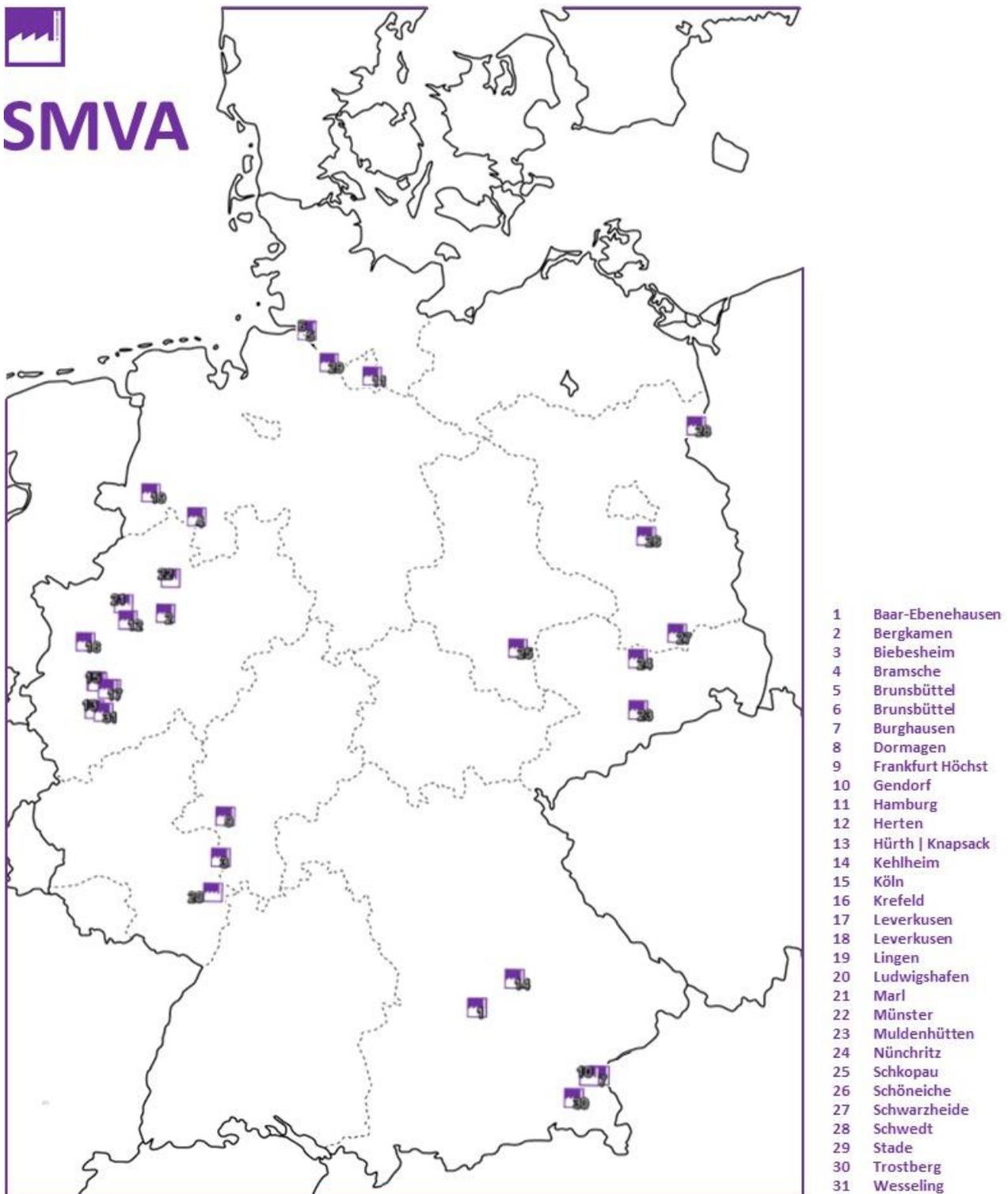
| Nr | Anlage | Betreiber | Linien | Feuerung | Brennstoffe | Energieabgabe | Kapazität [Mg/a] |
|--------------------|--|-------------------------------|--------|----------|-------------|---------------|---------------------|
| 9 | Frankfurt Höchst | Infraserv | 2 | DR | fe, fl, g | D | 60.000 |
| 10 | Gendorf | Infraserv¹⁾ | | BK | Fl | D | 4.000 |
| 11 | Hamburg | Indaver AVG | 2 | DR | fe fl | D | 130.000 |
| 12 | Herten | AGR Gruppe | 2 | DR | fe fl | KWK | 112.000 |
| 13 | Hürth Knapsack | Vinnolit | 2 | | | | 11.360 |
| 14 | Kehlheim | Kehlheim Fibres | 1 | DR | | D | 5.000 |
| 15 | Köln | INEOS | | | | | 70.000 |
| 16 | Krefeld | Currenta | 1 | DR | fe fl g | D | 25.000 |
| 17 | Leverkusen | Currenta | 2 | DR | fe fl | D | 140.000 |
| 18 | Leverkusen | DNES Dynamit Nobel | | BK | | D | 26.280 |
| 19 | Lingen | BP | 1 | DR | fl | D | ²⁾ 9.440 |
| 20 | Ludwigshafen | BASF | 6 | DR | | D | 165.000 |
| 21 | Marl | Evonik | 1 | DR | | D | 20.000 |
| 22 | Münster | BASF Coatings | 1 | DR | fe/fl | D | 13.000 |
| 23 | Muldenhütten | MRU | 1 | DR | fe/fl | KWK | 33.000 |
| 24 | Nünchritz | Wacker | 2 | | | D | 37.000 |
| 25 | Schkopau | Dow | 1 | DR | fe fl | D | 45.000 |
| 26 | Schöneiche | MEAB | 1 | DR | fe fl g | KWK | 25.000 |
| 27 | Schwarzheide | BASF | 1 | DR | fe fl | D | 40.000 |
| 28 | Schwedt | PCK Raffinerie | 1 | DR | fe fl | | 30.000 |
| 29 | Stade | Dow | 1 | DR | fe fl | D | 40.000 |
| 30 | Trostberg | AlzChem | 1 | 2 BK | fl g | D | 30.000 |
| 31 | Wesseling | Basell | 2 | DR | fe fl | KWK | 60.000 |
| | | | | | | Σ | 1.634.080 |
| Anmerkungen | | | | | | | |
| ¹⁾ | Anlage (derzeit) außer Betrieb | | | | | | |
| ²⁾ | berechnet aus 1,18 Mg/h Durchsatz und (angenommenen) 8.000 h/a Betriebszeit | | | | | | |
| | fe = feste Abfälle fl = flüssige Abfälle g = gasförmige Abfälle DR = Drehrohr BK = Brennkammer KWK = Kraft-Wärme-Kopplung D = nur Dampfabgabe | | | | | | |

Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [32, 60-78]

Die in Deutschland insgesamt verfügbare Verbrennungskapazität für gefährliche Abfälle liegt bei 1.634.080 Mg/a und wird, wie Abbildung 3-10 zeigt, zu rund 80 % ausgenutzt. Die in den letzten Jahren verbrannte Menge lag relativ konstant bei gut 1,3 Mio. Mg/a.

Da sich die Anlagen zur thermischen Behandlung gefährlicher Abfälle zumeist an integrierten Standorten (Abfallentsorgungszentren oder Chemparks) befinden, ist es bei diesen Anlagen üblich, die zurückgewonnene Energie in Form von Dampf, innerbetrieblich oder im Betriebsverbund, zu nutzen (vgl. Spalte „Energieabgabe“ in Tabelle 3-3). Dementsprechend werden recht hohe Gesamtnutzungsgrade von etwa 60 % erreicht (vgl. Abbildung 3-11). Auf die Angabe von Werten zur Stromerzeugung wird hier verzichtet, da nur sehr wenige Anlagen Elektrizität erzeugen.

Abbildung 3-9 Verbrennungsanlagen für gefährliche Abfälle in Deutschland

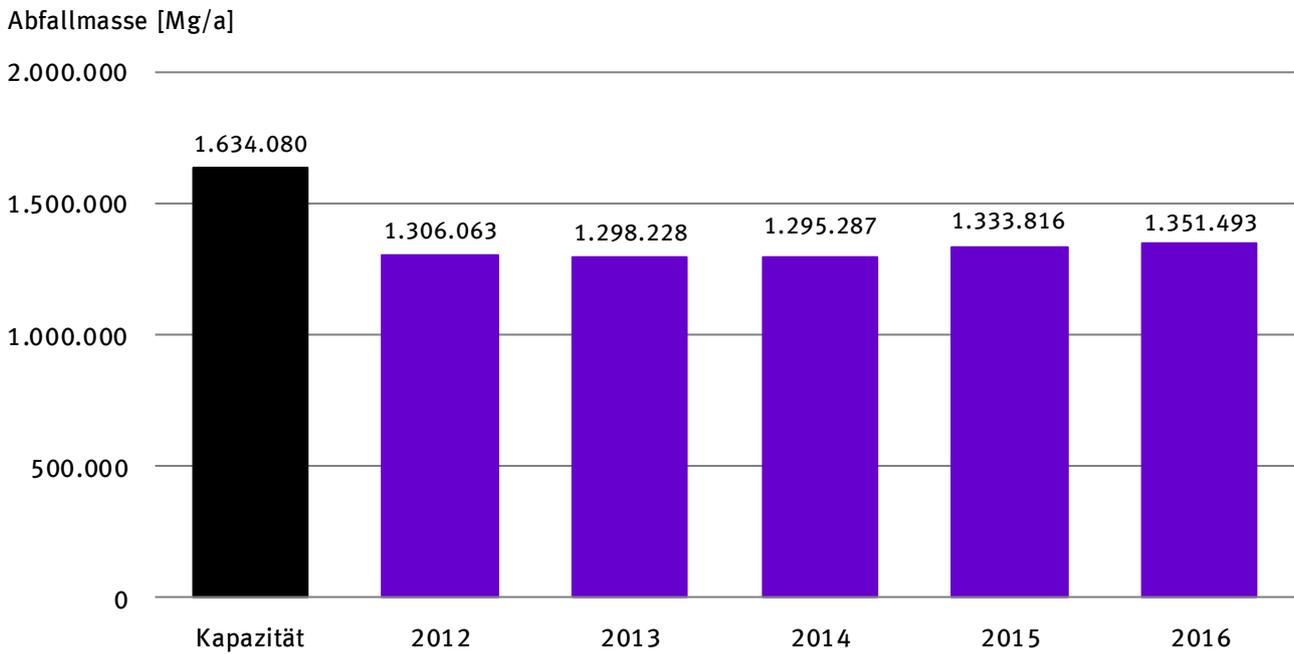


Quelle: Eigene Darstellung

Die in den 1,3 Mio. Mg gefährlichen Abfällen enthaltenen 22 PJ an Brennstoffenergie, wurden somit im Jahr 2016 in 15 PJ Endenergie, vorwiegend Dampf und etwas Strom, überführt.

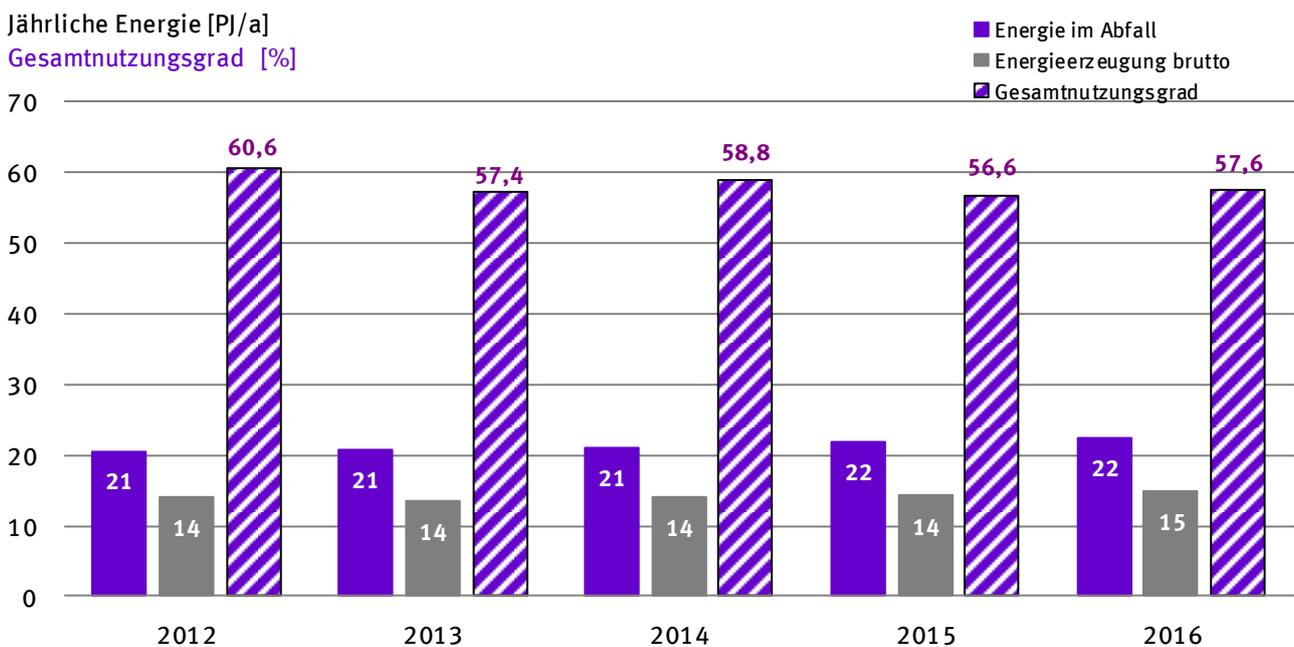
Werden wiederum die Einzelanlagen betrachtet, so lagen die ermittelten Gesamtnutzungsgrade im Bereich zwischen knapp 40 und deutlich über 90 % (vgl. Abbildung 3-12).

Abbildung 3-10 In Verbrennungsanlagen für gefährliche Abfälle In D zwischen 2012 und 2016 jährlich verbrannte Abfallmengen und insgesamt verfügbare Verbrennungskapazität (Hochrechnung auf Basis Betreiberbefragung. Rücklaufquote: 57 % der Kapazität)



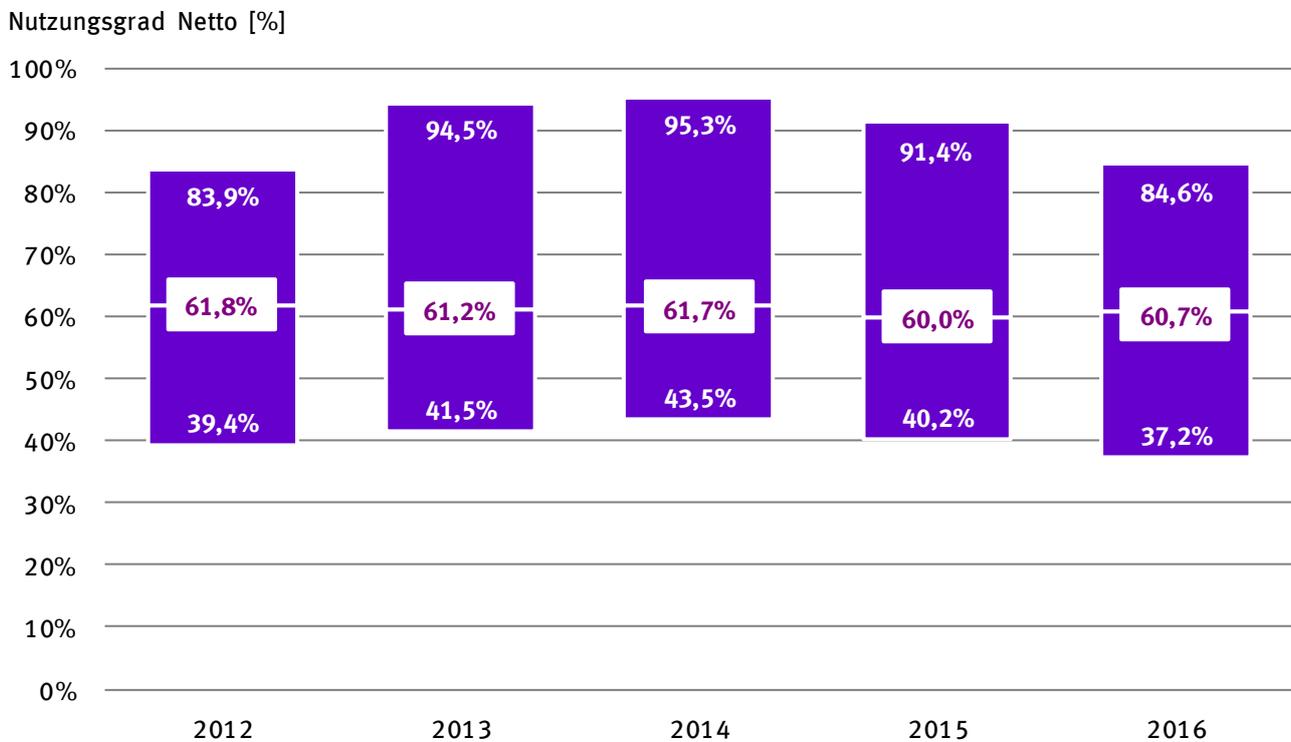
Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 3-11 Energieeinsatz, -bruttoerzeugung und Gesamtnutzungsgrad (Summe Strom, Wärme, Dampf) in deutschen Verbrennungsanlagen für gefährliche Abfälle zwischen 2012 und 2016 (Hochrechnung auf Basis Betreiberbefragung. Rücklaufquote: 57 % der Kapazität)



Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 3-12 Überblick der Netto-Nutzungsgrade von Verbrennungsanlagen für gefährliche Abfälle in Deutschland zwischen 2012 und 2016. Angegeben ist jeweils der Bereich zwischen Minimal- und Maximalwert, sowie das arithmetische Mittel des Gesamtnutzungsgrades (Werte aus Betreiberbefragung)



Quelle: Eigene Darstellung

3.1.4 Altholzverbrennungsanlagen | Biomassekraftwerke [BMKW]

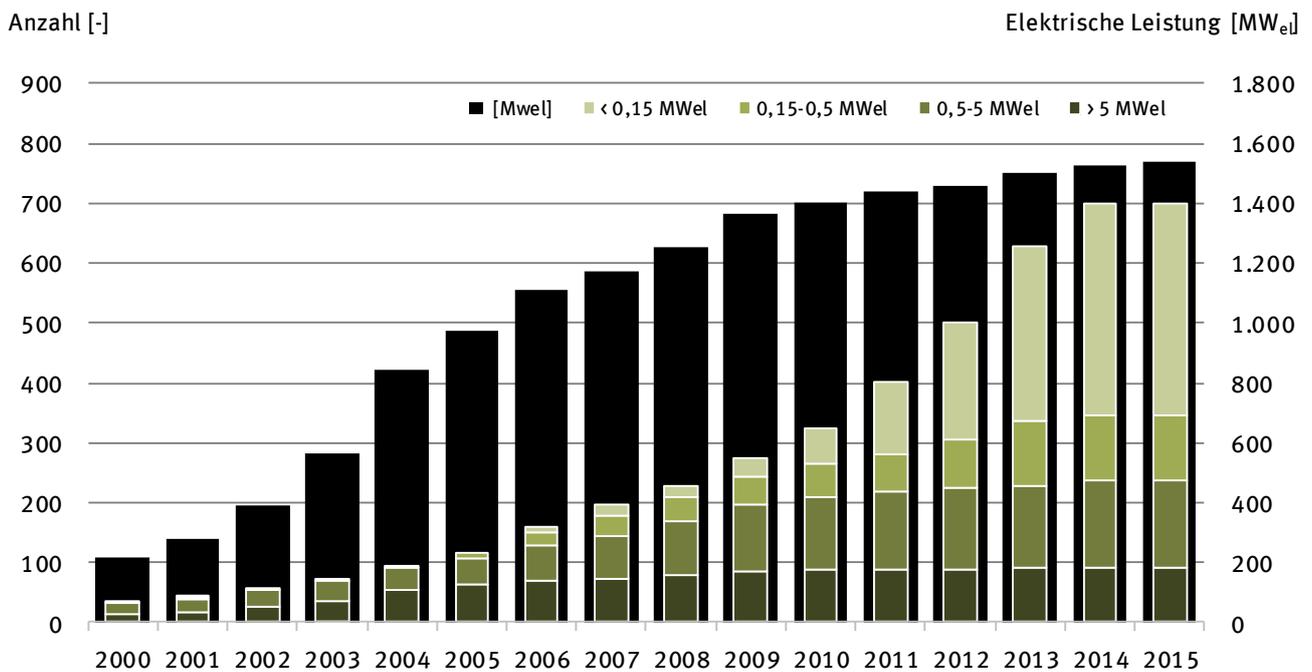
Biomasse-(Heiz-)Kraftwerke umfassen sowohl Anlagen die Altholz einsetzen, als auch solche, in denen naturbelassenes Holz genutzt wird. In statistischen Auswertungen wird dies, auch weil der Übergang durchaus fließend ist, oft nicht klar abgegrenzt. Es war also zunächst die Aufgabe, aus dem Gesamtbestand der Biomasse-(Heiz-)Kraftwerke die Altholzverbrennungsanlagen zu extrahieren.

Abbildung 3-13 gibt die Ergebnisse einer Studie des DBFZ zum Bestand der Biomasse-(Heiz-)Kraftwerke in Deutschland wieder [79]. Die Zusammenstellung zeigt, dass die Anzahl größerer Anlagen mit einer elektrischen Leistung über 5 MW_{el} recht überschaubar ist. Es ist davon auszugehen, dass Altholz vorwiegend in diesen größeren Anlagen zum Einsatz kommt. Hintergrund sind die Anforderungen der 17. BImSchV zur Emissionsminderung, die erst ab einer gewissen Mindestgröße wirtschaftlich umgesetzt werden können („Economy of Scale“). Für die Auswertungen im Rahmen dieser Studie wurden daher nur solche Anlagen berücksichtigt, die eine elektrische Leistung über 5 MW_{el} oder eine FWL über 20 MW aufweisen. Aus den entsprechenden Listen wurde anschließend die Anlagen eliminiert, die ausschließlich naturbelassenes Holz verbrennen. Als Ergebnis sind die in Tabelle 3-4 aufgeführten Anlagen zur Verbrennung von Altholz verblieben. Nicht EEG-fähige Anlagen der Holzwerkstoff- und Papierindustrie sind dabei ebenso wenig berücksichtigt wie Industrieanlagen, die betriebsinterne Produktionsreste verwerten (vgl. Kap. 3.1.8).

Es ergeben sich somit 56 Altholzverbrennungsanlagen mit einer Jahresgesamtkapazität von 6.579.671 Mg und einer Feuerungswärmeleistung von 2.997 MW. Eine Umrechnung dieser Feuerungswärmeleistung, mit einem üblichen elektrischen Wirkungsgrad von 26,3 %, ergibt eine elektrische Leistung von

knapp 800 MW_{el}, die mit jener gut übereinstimmt, die der BAV als Gesamtleistung der Altholzkraftwerke in Deutschland mit 783 MW_{el} angibt. Diese Plausibilitätsprüfung bestätigt folglich die Auswahl der in Tabelle 3-4 aufgelisteten Anlagen [80,81].

Abbildung 3-13 Anlagenanzahl und installierte elektrische Bruttoleistung EEG-fähige Biomasse-(H)KW (nach [79] – ohne Biomasse-Mitverbrennung und den nicht nach EEG vergüteten Anteil der Papier- und Zellstoffindustrie; Angaben basierend auf der Biomasse-(H)KW-Datenbank des DBFZ sowie Annahmen bzgl. des Zubaus an Holzvergaseranlagen [82])



Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [79, 82]

Dies entspricht rund der Hälfte der in Abbildung 3-13 für alle Holz(heiz)kraftwerke spezifizierten elektrischen Leistung. Dieser Anteil erscheint plausibel, da Altholz, wie erläutert, vorwiegend in der Leistungsklasse über 5 MW_{el} eingesetzt wird.

Tabelle 3-4 Anlagen zur Altholzverbrennung mit einer Feuerungswärmeleistung > 20 MW in Deutschland (fehlende Werte konnten nicht recherchiert werden) [83–135]

| Nr | Anlage | IBS | Brennstoffe | FWL [MW] | Kapazität [Mg/a] | |
|----|-------------|--------------------------------|-------------|---------------|------------------|---------|
| 1 | Altenstadt | Heizkraftwerk Altenstadt | 1999 | AI-AIII LPM | 40 | 100.000 |
| 2 | Baruth/Mark | Pfleiderer Baruth | 2002 | AI-AIV HST | 110 | 245.000 |
| 3 | Beeskow | BHW Beeskow Holzwerkstoffe | 2001 | AI-AIV | 130 | 235.000 |
| 4 | Bergkamen | RWE Energiedienstleistungen | 2005 | AI-AIII SPM | 23 | 160.000 |
| 5 | Berlin | RWE Innogy Cogen | 2005 | AI-AIV | 66 | 200.000 |
| 6 | Borken | Borchers Biomassekraftwerk | 2006 | AI-AIV | 36 | 74.000 |
| 7 | Brilon | Egger Kraftwerk Brilon | 1990 | Holz SPM | 150 | 340.000 |
| 8 | Buchen | Biomasseheizkraftwerk Odenwald | 2003 | AI-AIV | 30 | 60.000 |
| 9 | Delitzsch | Danpower Energie Service GmbH | 2004 | AI-AIV | 69 | 147.000 |

| Nr | Anlage | IBS | Brennstoffe | FWL [MW] | Kapazität [Mg/a] | |
|----|------------------------|-----------------------------------|-------------|----------------------|------------------|---------|
| 10 | Dresden | STEAG Energy Contracting | 2004 | AI-AIV | 27 | 56.000 |
| 11 | Elsterwerda | Danpower GmbH | 2004 | AI-AIV SPM | 44 | 90.000 |
| 12 | Emden | Statkraft Markets GmbH | 2005 | Altholz | 67 | 150.000 |
| 13 | Emlichheim | PN Biomasse HKW Emlichheim | 2006 | AI-AIV | 67 | 170.000 |
| 14 | Flörsheim Wicker | Biomasse Rhein-Main GmbH | 2003 | AI-AIII | 50 | 90.000 |
| 15 | Frankfurt am Main | Mainova AG | 2004 | AI - AIV | 44 | 120.000 |
| 16 | Großaitingen | STEAG New Energies GmbH | 2002 | AI-AIII | 21 | 40.000 |
| 17 | Gütersloh | Pfleiderer Gütersloh GmbH | 2001 | AI-AIV | 58 | 110.000 |
| 18 | Hagen | BVA Hagen-Kabel GmbH | 2004 | AI-AIV | 86 | 219.000 |
| 19 | Hagenow | Biotherm Hagenow GmbH | | AI AII | 36 | 97.671 |
| 20 | Hamburg | MVB Müllverwertung Borsigstraße | 2005 | AI-AIV | 90 | 160.000 |
| 21 | Hameln | Enertec Hameln GmbH | 2002 | AI - AIV | | 100.000 |
| 22 | Heiligengrabe | Kronoply GmbH | 2002 | AI-AIV PR WHG | 65 | 130.000 |
| 23 | Helbra | Heizkraftwerk Mansfelder Land | 2001 | AII-AIV | 28 | 45.000 |
| 24 | Herbrechtingen | Biomasse-HKW-Herbrechtingen | 2004 | AI-AII PR WHG | 49 | 128.000 |
| 25 | Hoppstädten-Weiersbach | HKW Neubrücke | | AI-AIV | 29 | 60.000 |
| 26 | Horn-Bad Meinberg | Glunz Holzwerkstoffproduktion | 2000 | AI-AIV PR WHG | 102 | 190.000 |
| 27 | Hückelhoven | Wärme-, Energie- & Prozesstechnik | | AI AII | 39 | 60.000 |
| 28 | Ilmenau | Biomasse-HKW Ilmenau GmbH | 2005 | AI-AIII | 20 | 50.000 |
| 29 | Ingelheim | Boehringer Ingelheim Pharma | 2004 | AI-AIV | 70 | 90.000 |
| 30 | Karlsruhe | Stora Enso Maxau | 2010 | AI-AIII EBS FS | 170 | 230.000 |
| 31 | Kassel | Städtische Werke Energie + Wärme | 1988 | AI AII KS | 42 | 80.000 |
| 32 | Kehl | BEB - Bio Energie Baden GmbH | 2002 | AI-AIV | 47 | 110.000 |
| 33 | Kehl | BEB - Bio Energie Baden GmbH | 2011 | AI AII | 21 | 40.000 |
| 34 | Königs Wusterhausen | MVV Energie AG | 2003 | AI-AIV SPM | 20 | 120.000 |
| 35 | Landesbergen | Statkraft Markets GmbH | 2005 | AI-AIV | 22 | 140.000 |
| 36 | Liebenscheid | Biomasse HKW Siegerland | 2006 | AI-AIV | 50 | 100.000 |
| 37 | Lünen | STEAG New Energies | 2006 | AI-AIV SR | 65 | 135.000 |
| 38 | Malchin | envia THERM | 2003 | AI-AIII Stroh ZS | 44 | 130.000 |
| 39 | Mannheim | MVV Energie | 2003 | AI-AIV | 66 | 135.000 |
| 40 | Neufahrn | STEAG New Energies | 2004 | AI-AIII | 21 | 40.000 |
| 41 | Neumarkt i.d. Opf. | Pfleiderer Neumarkt | 1997 | AI-AIV | 100 | 200.000 |
| 42 | Neuwied | BHKW Flohr | 2004 | AI-AIV | 30 | 60.000 |
| 43 | Obrigheim | BKWO Biomasse-HKW Obrigheim | 2008 | AI-AIII | 22 | 67.000 |
| 44 | Papenburg | B+S Papenburg Energie | 2003 | AI-AIV | 20 | 155.000 |
| 45 | Pforzheim | Heizkraftwerk Pforzheim | 2004 | AI-AIII | 45 | 105.000 |
| 46 | Recklinghausen | Ökotech Ingenieurgesellschaft | 2004 | AI-AIV | 50 | 120.000 |
| 47 | Rietz-Neuendorf | Otto-Rüdiger Schulze Recycling | | AI-AIV SPM | 25 | 55.000 |

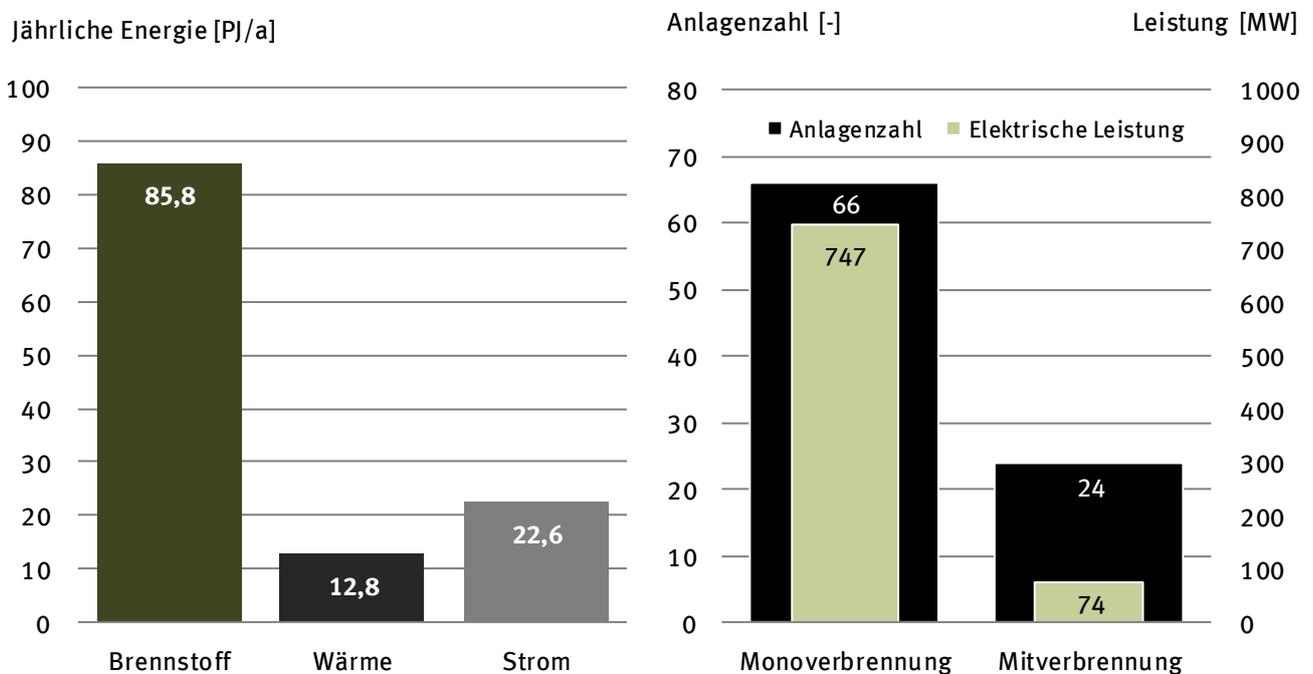
| Nr | Anlage | IBS | Brennstoffe | FWL [MW] | Kapazität [Mg/a] | | |
|----|------------|-----|------------------------------|----------|------------------|----------|------------------|
| 48 | Silbitz | | Holzheizkraftwerk Silbitz | 2003 | AI-AIV | 27 | 55.000 |
| 49 | Ulm | | Fernwärme Ulm | 2003 | AI-AIV | 58 | 140.000 |
| 50 | Ulm | | Fernwärme Ulm | 2012 | AI-AII | 25 | 90.000 |
| 51 | Wiesbaden | | ESWE BioEnergie | 2014 | AI-AIV | 46 | 90.000 |
| 52 | Wiesbaden | | InfraServ | 2003 | AI-AIV | 50 | 96.000 |
| 53 | Wismar | | Egger Holzwerkstoffe | | AI-AIV PR | 80 | 96.000 |
| 54 | Wismar | | Wismar Pellets | | AI AII | 39 | 80.000 |
| 55 | Zapfendorf | | Veolia Umweltservice Süd | 2009 | AI-AIV | 27 | 64.000 |
| 56 | Zolling | | GDF SUEZ Energie Deutschland | 2003 | AI-AIV | 66 | 130.000 |
| | | | | | | Σ | 6.579.671 |

Anmerkungen

AI, AII, AIII, AIV = Altholzklasse | LPM = Landschaftspflegematerial | HST = Holzstaub | SPM = Sperrmüll | PR = Produktionsreste | WHG = Waldhackgut | EBS = Ersatzbrennstoffe | FS = Faserschlamm | SR = Siebreste | ZitriS = Zitronenschalen | KS = Klärschlamm

Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [83-135]

Abbildung 3-14 Linkes Bild: Jährlich in deutschen Altholzkraftwerken umgesetzte Brennstoffenergie und daraus pro Jahr erzeugte Menge an Strom und Wärme. Rechtes Bild: Altholzkraftwerke und ihre elektrische Leistung nach BAV [80,81]

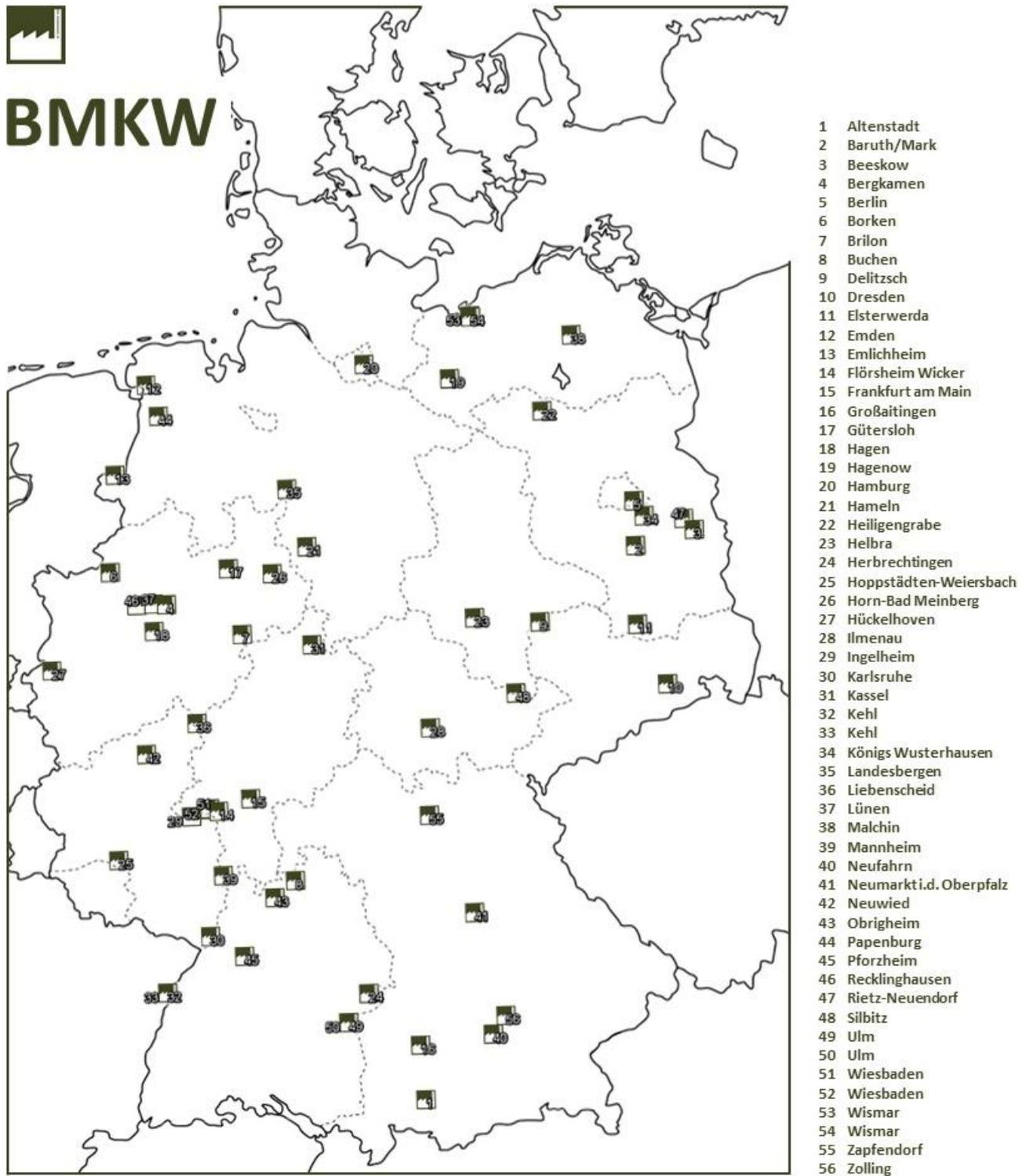


Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [80, 81]

Zur Berechnung der jährlich umgesetzten Brennstoffenergie wurde diese einerseits über die Summe der für die einzelnen Kraftwerke bekannten Brennstoffkapazitäten (Annahme Heizwert 15.000 MJ/Mg)

und andererseits über die Feuerungswärmeleistung, mit der Annahme einer jährlichen Betriebsstundenzahl von 8.000 h, berechnet. Der über die FWL berechnete geringere Wert von 85,8 PJ pro Jahr wurde im Weiteren verwendet.

Abbildung 3-15 Altholzverbrennungsanlagen in Deutschland



Quelle: Eigene Darstellung

Die Strombereitstellung wurde über die installierte elektrische Leistung (783 MW_{el}) und eine angenommene Betriebsstundenzahl von 8000 h/a abgeschätzt und mit anderen Quellen (siehe BAV) auf Plausibilität geprüft. Die geringfügigen Abweichungen zu den BAV-Daten basieren vermutlich auf einem unterschiedlichen Erfassungsrahmen. Der Umfang der Wärmebereitstellung aus größeren Biomasseheizkraftwerken ist ebenfalls bekannt. Das daraus ermittelbare Verhältnis von Strom zu Wärme wurde auf den hier betrachteten Anlagenpark übertragen und somit die entsprechende Wärmebereitstellung abgeschätzt [136]. Die ermittelten Werte sind in Abbildung 3-14 dargestellt. Auffallend ist, dass mehr Strom als Wärme produziert wird. Dies ist eine Folge älterer EEG-Regelungen, die Anfang der 2000er Jahre zum Bau einer Vielzahl von stromgeführten Biomassekraftwerken führten.

3.1.5 Klärschlammverbrennungsanlagen [KVA]

Klärschlamm wird in Deutschland – neben der Mitverbrennung in Zement- und Kohlekraftwerken – in 20 Monobehandlungsanlagen thermisch behandelt, die vorwiegend kommunalen Schlamm einsetzen. Hinzu kommen 7 Verbrennungsanlagen für industrielle Schlämme an Standorten großer Chemieunternehmen bzw. Chemieparks.

In Tabelle 3-5 sind die Anlagen und einige wichtige Charakteristika zusammengestellt. Neben den aktuellen sind mehrere Standorte aufgeführt, für die konkrete Planungen bestehen oder bereits Anlagen im Bau sind.

Tabelle 3-5 Anlagen zur Monoklärschlammverbrennung in Deutschland [137]

| Nr | Anlage | Typ | Linien | IBS | TM-Gehalt | Kapazität [Mg/a] | |
|----|---------------------------------------|-----|--------|------|-----------|------------------|---------|
| | | | | | | FM | TM |
| 1 | Altenstadt ¹⁾ | RF | 2 | 2008 | 34 % | 160.000 | 55.000 |
| 2 | Balingen | WV | 1 | 2002 | 80 % | 3.000 | 2.400 |
| 3 | Berlin-Ruhleben | SWS | 3 | 1985 | 26 % | 325.000 | 84.100 |
| 4 | Bitterfeld-Wolfen | SWS | 1 | 1997 | 30 % | 50.700 | 15.200 |
| 5 | Bonn ²⁾ | SWS | 2 | 1981 | 27 % | 29.100 | 8.000 |
| 6 | Bottrop | SWS | 2 | 1991 | 40 % | 110.000 | 44.000 |
| 7 | Burghausen (Wacker) | SWS | 1 | 1976 | 21 % | 20.000 | 4.125 |
| 8 | Düren | SWS | 1 | 1975 | 40 % | 35.000 | 14.000 |
| 9 | Frankfurt (Hoechst) | SWS | 2 | 1994 | 39 % | 205.000 | 80.000 |
| 10 | Frankfurt (Kommunal) ²⁾ | EtW | 4 | 1981 | 28 % | 188.000 | 52.560 |
| 11 | Gendorf (Infraserv) | SWS | 1 | 2006 | 25 % | 40.000 | 10.000 |
| 12 | Hamburg ²⁾ | SWS | 3 | 1997 | 40 % | 197.100 | 78.840 |
| 13 | Herne | SWS | 1 | 1990 | 44 % | 50.000 | 22.200 |
| 14 | Homburg | PY | | 1916 | 28 % | 5.000 | 1.400 |
| 15 | Karlsruhe ²⁾ | SWS | 2 | 1982 | 25 % | 80.000 | 20.000 |
| 16 | Leverkusen (Currenta) | EO | 1 | 1988 | 30 % | 120.000 | 36.000 |
| 17 | Linz-Unkel | PY | 1 | 2015 | 30 % | 2.300 | 700 |
| 18 | Ludwigshafen (BASF) | SWS | 2 | 1992 | 26 % | 420.000 | 110.000 |
| 19 | Lünen | SWS | 1 | 1997 | 40 % | 235.000 | 95.000 |
| 20 | Mannheim | WV | 2 | 2010 | 46 % | 10.800 | 5.000 |

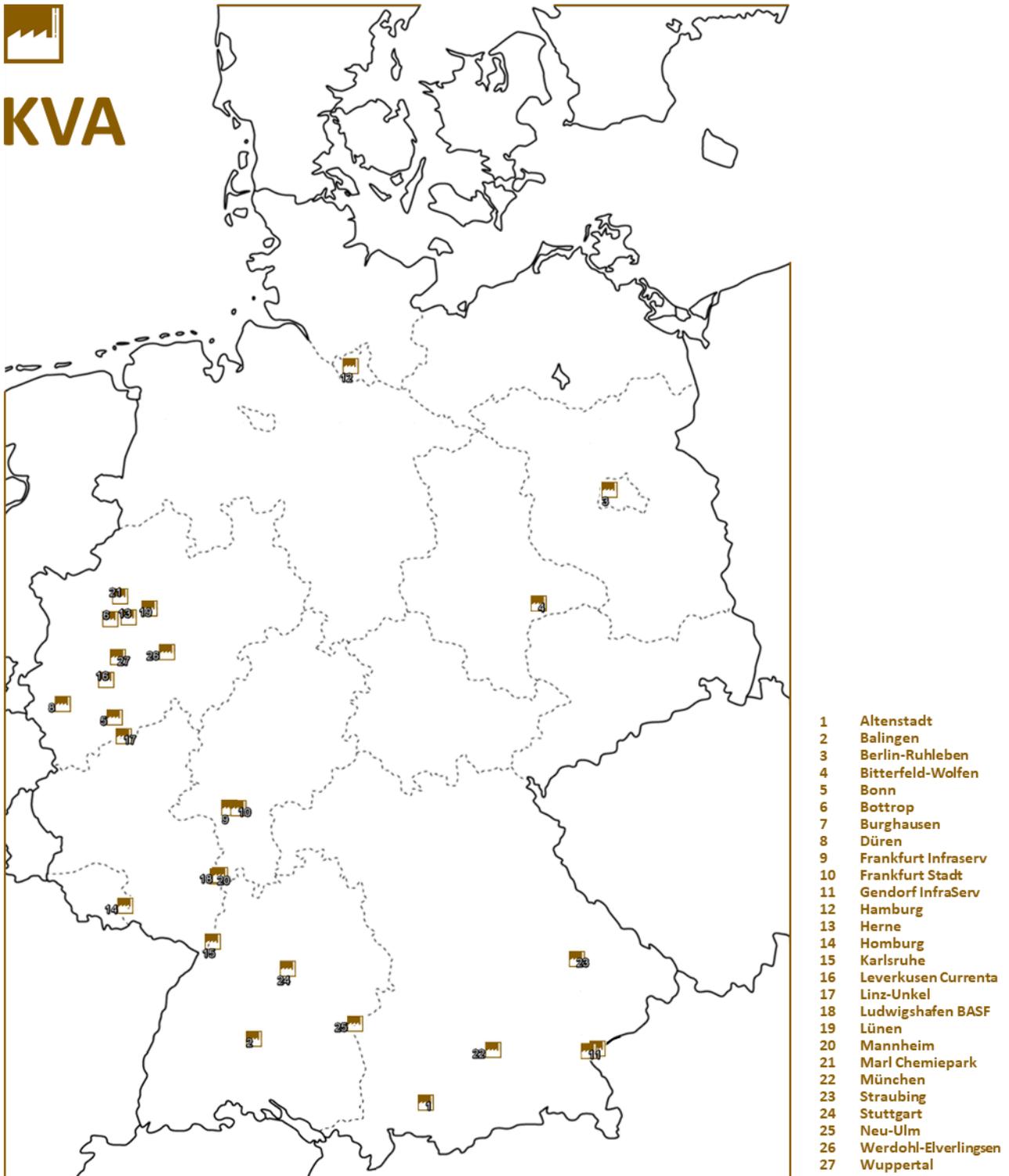
| Nr | Anlage | Typ | Linien | IBS | TM-Gehalt | Kapazität [Mg/a] | |
|---|--|-----|--------|------|-----------|------------------|---------|
| | | | | | | FM | TM |
| 21 | Marl (Chemiepark) | SWS | 1 | 1980 | 25 % | 40.000 | 10.000 |
| 22 | München ²⁾ | SWS | 2 | 1997 | 25 % | 88.000 | 22.000 |
| 23 | Straubing ^{2), 4)} | R | 1 | 2012 | 28 % | 9.000 | 2.500 |
| 24 | Stuttgart ²⁾ | SWS | 2 | 2007 | 25 % | 130.000 | 32.000 |
| 25 | Neu-Ulm ²⁾ | SWS | 2 | 1979 | 25 % | 64.000 | 16.000 |
| 26 | Werdohl-Elverlingsen ³⁾ | SWS | 1 | 2002 | 28 % | 200.000 | 61.320 |
| 27 | Wuppertal ²⁾ | SWS | 2 | 1977 | 25 % | 128.000 | 32.000 |
| | | | | | Σ | 2.943.500 | 913.145 |
| Anlagen in Bau Planung | | | | | | | |
| | Rügen | SWS | 1 | 2017 | | | 2.500 |
| | Mainz | SWS | 1 | 2019 | | | 30.000 |
| | Koblenz | WV | 1 | 2017 | 90 % | 14.000 | 3.000 |
| | Rostock | SWS | 1 | | | 90.000 | |
| | Saerbeck | SWS | 1 | | 30-40 % | 60.000 | |
| | Schwandorf | PY | 1 | | | | |
| | Nürnberg | SO | 1 | | | | |
| | Emmerich | PY | | | | | |
| | Böblingen | | | | | | |
| | Offenbach | | | | | | |
| | Wassmannsdorf | | | | | | |
| Anmerkungen | | | | | | | |
| 1) | Anlage verbrennt auch Gärreste | | | | | | |
| 2) | Neubau, Ertüchtigung oder Erweiterung vorgesehen oder bereits in Umsetzung | | | | | | |
| 3) | Anlage verbrennt zusätzlich 4.000-6.000 Mg EBS jährlich | | | | | | |
| 4) | Anlage außer Betrieb | | | | | | |
| Industrielle Schlammverbrennungsanlage | | | | | | | |
| RF = Rostfeuerung SWS = Stationäre Wirbelschicht EO = Etagenofen EtW = Etagenwirbler WV = Wirbelschichtvergasung PY = Pyrolyse SO = Schachtofen | | | | | | | |

Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [137]

Ein Vergleich der verfügbaren Verbrennungskapazität von 913.145 Mg/a mit den Angaben des Statistischen Bundesamtes zur Klärschlammmonoverbrennung in Deutschland, von 432.500 Mg/a (2015), würde entsprechend große Kapazitätsreserven nahelegen. Allerdings gibt das Amt (neben Angaben zur Mitverbrennung von ebenfalls ungefähr 446.900 Mg/a) eine Menge von über 269.300 Mg/a an, die nicht zugeordnet werden konnte [138,139]. Es ist zu vermuten, dass es sich bei diesen Mengen zumindest zum Teil um Fraktionen handelt, die der Monoverbrennung zugeführt wurden. Insgesamt ist von einer deutlich höheren Monoverbrennungsmenge als 450.000 Mg/a auszugehen. Genauere Angaben sind aufgrund der Datenlage jedoch nicht möglich.

Der mittlere Trockenmassegehalt der Schlämme, die in den in Tabelle 3-5 aufgeführten Anlagen behandelt wurden, liegt bei 33 %. Ein solcher Schlamm wäre nur bei einer Vortrocknung oder bei Verwendung von hoch vorgewärmter Verbrennungsluft zu verbrennen. Für beides ist so viel Energie erforderlich, dass, rein bilanziell, ein Export von thermischer oder elektrischer Energie in nennenswertem Umfang gar nicht erfolgen kann.

Abbildung 3-16 Klärschlammverbrennungsanlagen in Deutschland



Quelle: Eigene Darstellung

In der Praxis wird von den Betreibern in der Regel ein möglichst energieautarker Betrieb angestrebt. Hierzu wird neben der Trocknung mitunter auch eine (kleine) Turbine betrieben. Einige Anlagen sind in betriebliche Versorgungsnetze eingebunden, wobei sich aber auch in diesen Fällen kein nennenswerter Nettoexport realisieren lässt. Dies wäre zu beeinflussen, wenn der Schlamm möglichst weitgehend mit sonst ungenutzter Niedertemperaturwärme oder über Solarwärme vorgetrocknet würde. Die Möglichkeiten hierzu sind jedoch stark standortabhängig, eine pauschale Bewertung ist an dieser Stelle nicht sinnvoll.

Zusammenfassend wird festgehalten, dass ein nennenswerter Energieexport aus Klärschlammverbrennungsanlagen nicht stattfindet. Entsprechend wird in dieser Studie kein Beitrag der Klärschlammverbrennung zur Energieversorgung berücksichtigt.

3.1.6 Zementwerke [ZW – Abfallmitverbrennung]

Alle 34 Zementwerke mit Klinkerproduktion in Deutschland und zwei Kalkwerke besitzen die Genehmigung, abfallstämmige Fraktionen als Brennstoffe einzusetzen. Tabelle 3-6 enthält eine Liste dieser Anlagen. Eine Kapazität für die Mitverbrennung von Abfällen in den Zementwerken ist nicht angegeben, da der Einsatz von der Klinkerproduktion von der Beschaffenheit (z. B. Wassergehalt) der Rohstoffe abhängt. Im Prinzip ist 100 % Abfalleinsatz möglich, wenn die Zusammensetzung der mineralischen Anteile im Brennstoff mit dem Rezept für den Zementklinker kompatibel ist. Zudem sind Daten zu den einzelnen Anlagen nur schwer verfügbar. Zur Berechnung der für die vorliegende Studie relevanten Energiekennzahlen wurde daher auf aggregierte Zahlen des VDZ e.V. (Abfallarten, Abfallmengen, Heizwerte) zurückgegriffen, der regelmäßig den Sekundärbrennstoffeinsatz in den deutschen Zementwerken dokumentiert und diese Werte auch publiziert [140–144].

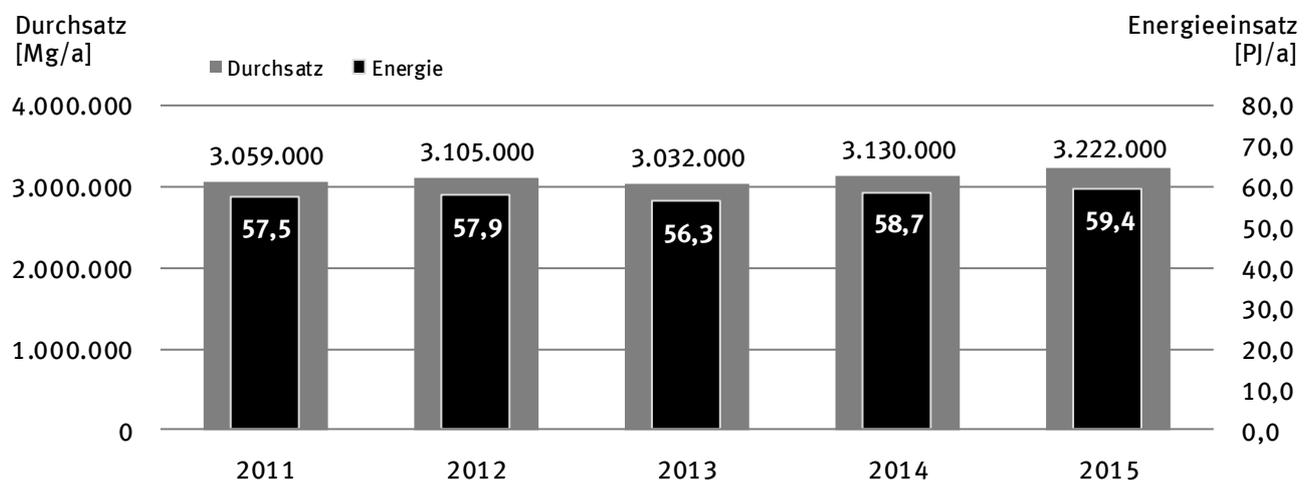
Tabelle 3-6 Deutsche Zement- und Kalkwerke mit der Genehmigung zur energetischen Verwertung von Abfallfraktionen [145]

| Nr | Zementwerke | | Ofenanzahl | Ofentyp |
|----|-----------------|--|------------|------------|
| 1 | Allmendingen | Schwenk Zement | 1 | Zyklonofen |
| 2 | Amöneburg | Dyckerhoff | 1 | Zyklonofen |
| 3 | Beckum | Phoenix Zementwerke | 1 | Zyklonofen |
| 4 | Beckum | Holcim WestZement | 1 | Zyklonofen |
| 5 | Bernburg | Schwenk Zement | 1 | Zyklonofen |
| 6 | Burglengenfeld | HeidelbergCement | 2 | Zyklonofen |
| 7 | Deuna | Deuna Zement | 2 | Zyklonofen |
| 8 | Dotternhausen | Holcim | 1 | Zyklonofen |
| 9 | Ennigerloh | HeidelbergCement | 1 | Zyklonofen |
| 10 | Erwitte | Portlandzementwerke Wittekind Hugo Miebach | 1 | Zyklonofen |
| 11 | Erwitte | Portland-Zementwerke Gebr. Seibel | 1 | Zyklonofen |
| 12 | Erwitte | Spenner Zement | 1 | Zyklonofen |
| 13 | Erwitte | Portland Zementwerke Seibel & Söhne | 3 | Lepolofen |
| 14 | Geseke | HeidelbergCement | 1 | Zyklonofen |
| 15 | Geseke | Dyckerhoff | 1 | Zyklonofen |
| 16 | Göllheim | Dyckerhoff | 2 | Zyklonofen |
| 17 | Großenlüder Müs | Zement- und Kalkwerke Otterbein | 1 | Zyklonofen |

| Nr | Zementwerke | | Ofenanzahl | Ofentyp |
|---|---------------------------------------|---------------------------------------|-----------------|------------|
| 18 | Hannover | HeidelbergCement | 1 | Zyklonofen |
| 19 | Harburg | Märker Zement | 1 | Zyklonofen |
| 20 | Höver | Holcim | 1 | Zyklonofen |
| 21 | Karlstadt | Schwenk Zement | 1 | Zyklonofen |
| 22 | Karsdorf | Opterra Zement | 3 ¹⁾ | Zyklonofen |
| 23 | Lägerdorf | Holcim | 1 | Zyklonofen |
| 24 | Leimen | HeidelbergCement | 2 | Lepolofen |
| 25 | Lengerich | Dyckerhoff | 2 | Zyklonofen |
| 26 | Lengfurt | HeidelbergCement | 1 | Zyklonofen |
| 27 | Mergelstetten | Schwenk Zement | 1 | Zyklonofen |
| 28 | Paderborn | HeidelbergCement | 1 | Zyklonofen |
| 29 | Rohrdorf | Portland-Zementwerk Gebr. Wiesböck | 1 | Zyklonofen |
| 30 | Rüdersdorf | Cemex Zement | 1 | Zyklonofen |
| 31 | Schelklingen | HeidelbergCement | 1 | Zyklonofen |
| 32 | Solnhofen | Solnhofener Portlandzementwerke | 1 | Zyklonofen |
| 33 | Üxheim | Portlandzementwerk Wotan H. Schneider | 1 | Zyklonofen |
| 34 | Wössingen | Opterra Zement | 1 | Zyklonofen |
| Kalkwerke mit Genehmigung zur SekBS-Verwertung | | | | |
| 1 | Wülfrath | Rheinkalk Werk Flandersbach | 6 4 | SO DR |
| 2 | Menden | Rheinkalk Werk Hönnetal | 4 1 | SO DR |
| Anmerkungen | | | | |
| 1) | Nur 2 der 3 Öfen in Betrieb | | | |
| | SO = Schachtofen DR = Drehrohrföfen | | | |

Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [145]

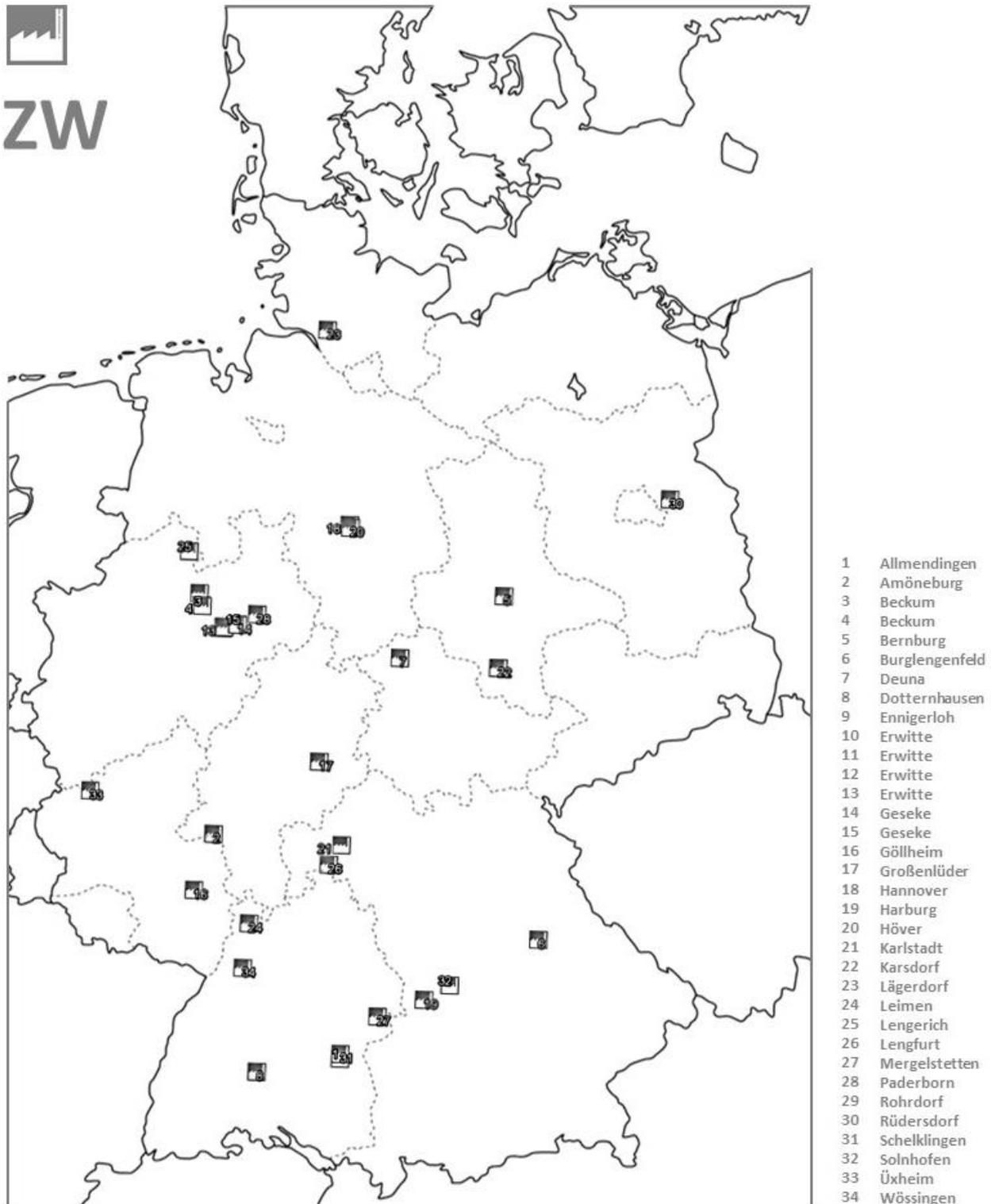
Abbildung 3-17 Abfalleinsatz in deutschen Zementwerken zwischen 2011 und 2015: Masse und Energie [140–144]



Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [140-144]

Abbildung 3-17 zeigt den Abfalleinsatz in deutschen Zementwerken zwischen 2011 und 2015. Angegeben ist die eingesetzte Gesamtmasse von zuletzt etwa 3,2 Mio. Mg/a, sowie die eingetragene Energiemenge, die sich knapp unterhalb von 60 PJ/a bewegt.

Abbildung 3-18 Zementwerke in Deutschland



Quelle: Eigene Darstellung

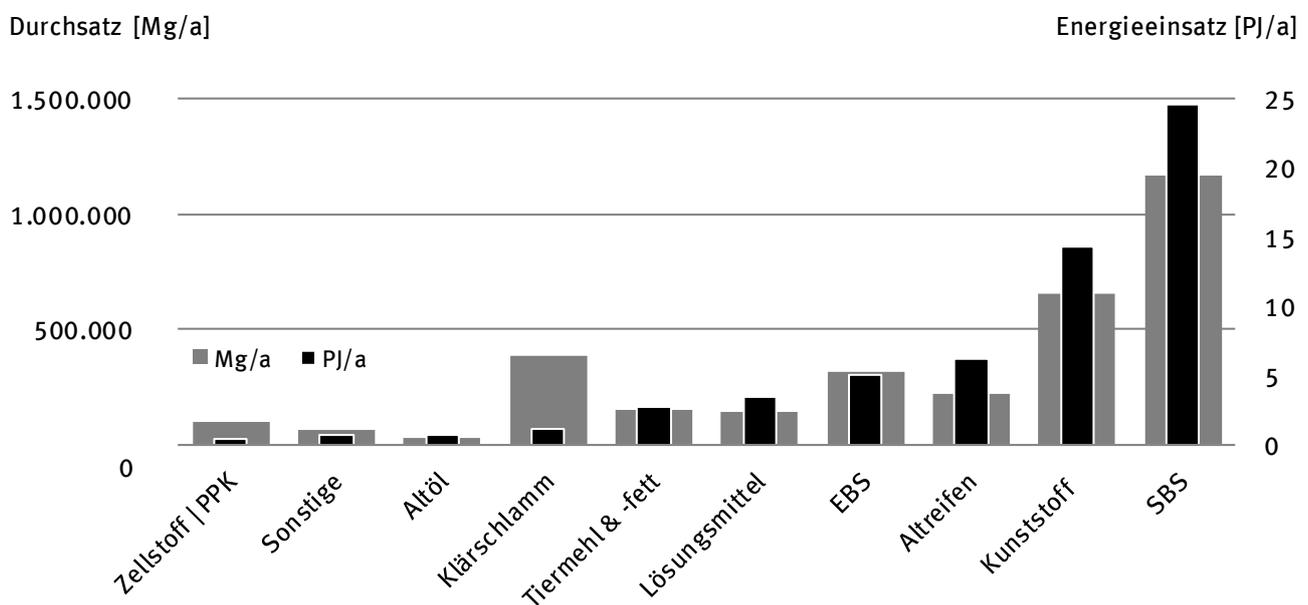
Die beiden Kalkwerke verfügen in Summe über eine genehmigte Kapazität für den Einsatz von SekBS in Höhe von 391. 676 Mg/a, setzen aber derzeit nur einige hundert Mg SekBS pro Jahr ein. Zu weiteren

möglichen Einsatzmengen (z. B. Flüssigbrennstoffe) konnten keine Daten ermittelt werden. Für die Abfallmengen- und Energiebetrachtung wurden sie daher nicht weiter berücksichtigt.

Die in den deutschen Zementwerken eingesetzte Brennstoffpalette ist vielfältig. Neben Tiermehl, Klärschlamm oder Altreifen werden überwiegend aufbereitete Fraktionen aus Industrie-, Gewerbe- und Siedlungsabfällen (SekBS), zu denen auch die in Abbildung 3-19 als Kunststoff bezeichneten Fraktionen zu zählen sind, eingesetzt [146]. Eine Spezifizierung der im einzelnen eingesetzten Abfälle sowie deren Mengen und der damit realisierte Energieeintrag kann Abbildung 3-19 entnommen werden.

Die eingesetzten Brennstoffe setzen ihre Energie direkt, unmittelbar und vollständig im Klinker-Brennprozess frei. Dies führt zu einem hohen energetischen Wirkungsgrad, der hier mit 70 % angesetzt wurde [147]. Zudem werden die Verbrennungsrückstände vollständig ins Produkt eingebunden.

Abbildung 3-19 Einsatz abfallstämmiger Brennstoffe in deutschen Zementwerken: Masse und Energie [140–144]



Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [140-144]

3.1.7 Kohlekraftwerke [KKW – Abfallmitverbrennung]

Derzeit besitzen 22 Kraftwerke in Deutschland die Genehmigung zur Mitverbrennung von Abfällen, wobei jeweils 11 mit Braun- bzw. Steinkohle als Grundbrennstoff befeuert werden. In Tabelle 3-7 sind die Anlagen aufgelistet. Angegeben sind neben der Art der mitverbrannten Abfälle, die genehmigten und die tatsächlich mitverbrannten Abfallmengen.

Tabelle 3-7 Kohlekraftwerke mit Genehmigung zur Abfallmitverbrennung [89,148–155]

| Nr | Anlage | | Typ | IBS | Abfallarten | KWK j/n | Mitverbrennung [Mg/a] | |
|----|------------|---------------|-----|--------------|-------------|------------|-----------------------|-----------|
| | | | | | | | genehmigt | verbrannt |
| 1 | Boxberg | KW Boxberg | BK | | KS TML | | 190.000 | - |
| 2 | Duisburg | HKW Huntsmann | BK | 1962 | KuSt, Fol | j | 35.000 | - |
| 3 | Eschweiler | Weisweiler | BK | 1965 1974 | KS PS | n j | 540.000 | 73.000 |

| Nr | Anlage | | Typ | IBS | Abfallarten | KWK j/n | Mitverbrennung [Mg/a] | |
|----|--------------|---------------------------------|-----|--------------|----------------------|------------|-----------------------|-----------|
| | | | | | | | genehmigt | verbrannt |
| 4 | Frechen | Frechen/Wachtberg | BK | 1959 | KS | j | 260.000 | 50.000 |
| 5 | Grevenbroich | Frimmersdorf ¹⁾ | BK | 1966 | PS | j | 262.800 | 150.000 |
| 6 | Hürth | Ville/Berrenrath | BK | 1991 | SekBS KS | j | 337.300 | - |
| 7 | Hürth | Goldenberg ²⁾ | BK | 1993 | PS KS | j | 600.000 | 286.000 |
| 8 | Neukiritsch | Kraftwerk Lippendorf | BK | 2000 | KS TML | | 192.500 | - |
| 9 | Peitz | KW Jänschwalde | BK | 1981 1989 | SekBS | j | 560.000 | 500.000 |
| 10 | Spremberg | KW Schwarze Pumpe | BK | | FS SekBS | | 345.000 | 235.000 |
| 11 | Zülpich | Kohlekraftwerk | BK | 2010 | SpS | j | 20.148 | - |
| 12 | Duisburg | HKW I ³⁾ | SK | 1985 | KS TML Tex HHS | j | 90.000 | 9.000 |
| 13 | Ensdorf | Kraftwerk Ensdorf ⁴⁾ | SK | 1971 | TML KS | n | 18.933 | 18.933 |
| 14 | Flensburg | Heizkraftwerk FL | SK | 1992 | EBS HHS | j | 80.000 | - |
| 15 | Ibbenbüren | Ibbenbüren | SK | 1985 | KS | j | 30.000 | - |
| 16 | Kassel | Fernwärmekraftwerk | SK | 1987 | KS | | 216.000 | - |
| 17 | Lünen | KW Lünen | SK | 1962 1969 | KS TML | n | 81.118 | - |
| 18 | Marl | Kraftwerk I | SK | 1971 | orgFlsg | j | 542.400 | - |
| 19 | Oberkirch | Kraftwerk | SK | 1986 | SekBS KS FS PS | j | 128.016 | 35.874 |
| 20 | Pforzheim | Heizkraftwerk Pforzheim | SK | 1990 | EBS | j | 42.000 | 9.600 |
| 21 | Werne | Gersteinwerk ⁵⁾ | SK | 1984 | SekBS | n | 240.000 | 120.000 |
| 22 | Wuppertal | HKW Elberfeld ⁶⁾ | SK | 1989 | SekBS | j | 40.000 | 22.000 |
| | | | | | | Σ | 3.342.748 | 1.509.407 |

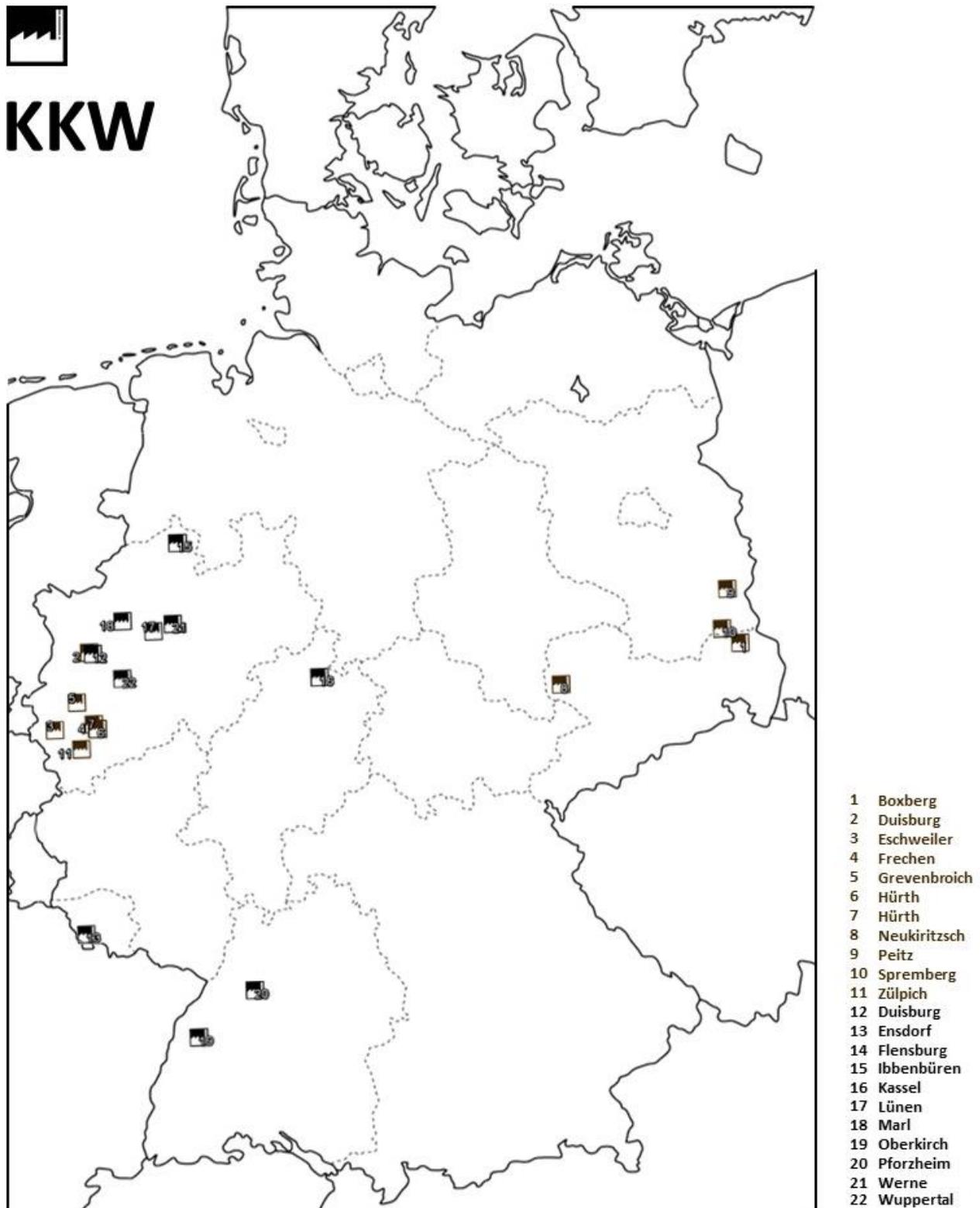
| Geplante Stilllegungen | |
|--|-------------------------------------|
| ¹⁾ | Stilllegung Ende 2017 [Kaltreserve] |
| ²⁾ | bereits stillgelegt |
| ³⁾ | Stilllegung im März 2018 |
| ⁴⁾ | Stilllegung Ende 2017 |
| ⁵⁾ | Stilllegung Anfang 2019 |
| ⁶⁾ | Stilllegung bis 2019 |
| Anmerkungen | |
| BK = Braunkohle SK = Steinkohle | |
| KS = Klärschlamm TML = Tiermehl KuSt = Kunststoffe Fol = Folien (Kunststoff) PS = Papierschlamm SekBS = Sekundärbrennstoffe FS = Faserschlamm SpS = Spuckstoffe Tex = Textilreste (Teppich) HHS = Holzhackschnitzel EBS = Ersatzbrennstoffe orgFlsg = organische Flüssigkeiten | |

Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [89,148-155]

Es fällt auf, dass die genehmigte Jahreskapazität von über 4,8 Mio. Mg/a bei weitem nicht ausgenutzt wird, sondern mit 1,5 Mio. Mg/a lediglich etwa ein Drittel der zugelassenen Menge eingesetzt wird.

Dabei entfallen etwa 1,3 Mio. Mg/a auf Braunkohlekraftwerke und nur 200.000 Mg/a auf die Steinkohlekraftwerke. Insgesamt verzichtet fast die Hälfte der Anlagen mit einer Mitverbrennungsgenehmigung vollständig auf einen Einsatz von Abfällen.

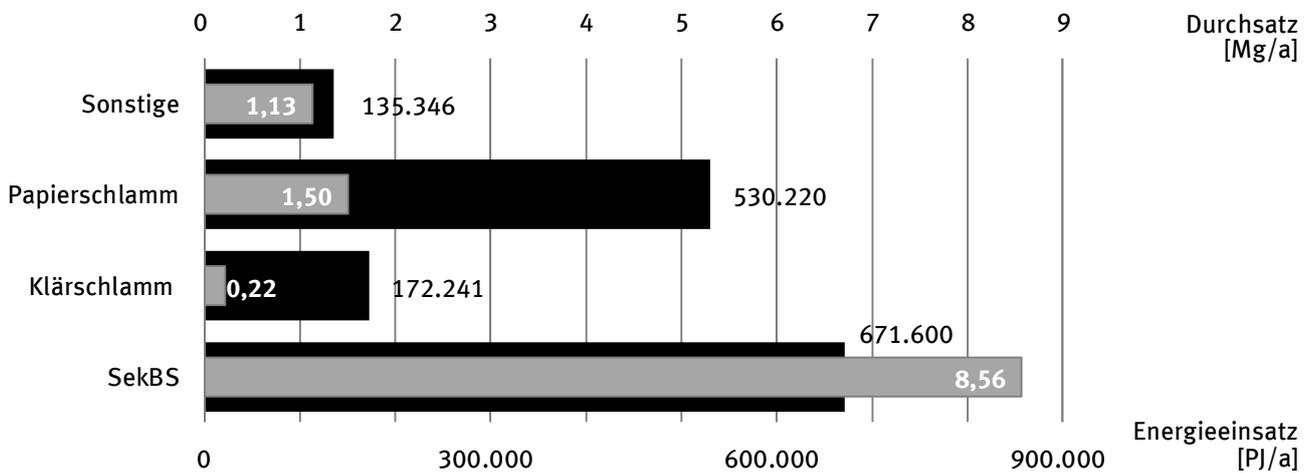
Abbildung 3-20 Deutsche Kohlekraftwerke mit Genehmigung zur Abfallmitverbrennung



Quelle: Eigene Darstellung

Trotz der relativ umfangreichen Auswahl an genehmigten Brennstoffen (Tabelle 3-7) wird aktuell nur eine überschaubare Anzahl dieser Stoffe auch wirklich eingesetzt. SekBS Fraktionen dominieren auch hier die Brennstoffpalette. Außerdem in nennenswertem Umfang eingesetzt werden Papierschlämme und Klärschlämme (vgl. Abbildung 3-21).

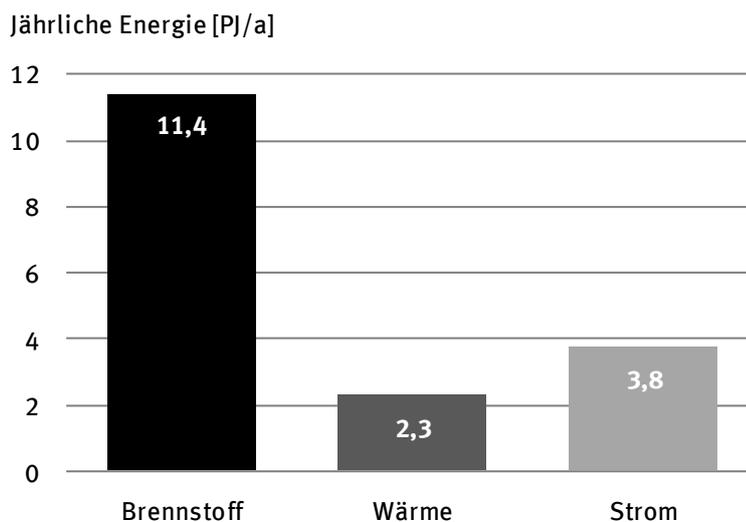
Abbildung 3-21 Abfalleinsatz (Masse und Energie) in deutschen Kohlekraftwerken



Quelle: Eigene Darstellung

Unter Verwendung dieser Werte lässt sich die jährlich in deutsche Kohlekraftwerke über Abfälle eingebrachte Energiemenge auf 11,4 PJ berechnen (Abbildung 3-22). Je nach Kraftwerkstyp (Stein-/Braunkohle) werden den Primärenergieträgern entsprechende Sekundärbrennstoffe eingesetzt. Aufgrund der gemeinsamen Umsetzung mit der Kohle im gleichen Kessel, können damit auch die typischen Wirkungsgrade von Kohlekraftwerken für die energetische Bewertung herangezogen werden.

Abbildung 3-22 Jährlich in deutschen Kohlekraftwerken umgesetzte Brennstoffenergie aus Abfall und daraus pro Jahr erzeugte Menge an Strom und Wärme



Quelle: Eigene Darstellung

Da Ersatzbrennstoffe bevorzugt in älteren Kraftwerken eingesetzt werden, wurde für die Abschätzung der Stromerzeugung ein elektrischer Wirkungsgrad von 36 % angesetzt, mit einer resultierenden Elektrizitätsmenge von 3,8 PJ pro Jahr. Im Vergleich zum Strom ist die Wärmenutzung bei Kohlekraftwerken

eher gering ausgeprägt. Gründe sind die Lage, die Größe und die auf Stromversorgung optimierte Betriebsweise dieser Anlagen. Daher wurde für den Wärmenutzungsgrad lediglich ein Wert von 20 % angesetzt. Die Ergebnisse zeigt Abbildung 3-22.

3.1.8 Industriekraftwerke [IKW]

Als Industriekraftwerke im Sinne dieser Studie werden solche Anlagen bezeichnet, die in erster Linie Reststoffe und Abfälle aus der Produktion verfeuern und dadurch gleichzeitig eine Versorgungsfunktion für das Unternehmen erfüllen.

Grundsätzlich ist die Datenverfügbarkeit zu diesen Anlagen schlecht. Da der Anlagenbetrieb nicht das Hauptgeschäft der Unternehmen darstellt, ist das Interesse an Verbandsarbeit oder Publikationen in der Regel eher gering. Anlagen, die ihre Energie z. B. über EBS-Kraftwerke beziehen und ihre Reststoffe auch dorthin abgeben, sind in den Kapiteln aufgeführt, die dem Hauptbrennstoffeinsatz entsprechen (z.B. EBS-KW oder Klärschlammverbrennung).

Als eine der wenigen Informationen konnte für 80,6 % der Anlagen die Feuerungswärmeleistung recherchiert werden, die zunächst auf die Gesamtzahl der Anlagen hochgerechnet wurde.

Als elektrischer Wirkungsgrad der Kraftwerke wurde 25 % angenommen, als Wärmenutzungsgrad 50 %. Dieser relativ hohe Wert scheint gerechtfertigt, da die Anlagen für die industrielle Versorgung konzipiert sind, die eine konstante ganzjährige Wärmeabnahme ermöglicht.

Tabelle 3-8 Industriekraftwerke mit der Genehmigung zur Verbrennung von Abfällen [83,89,90,94,156–169]

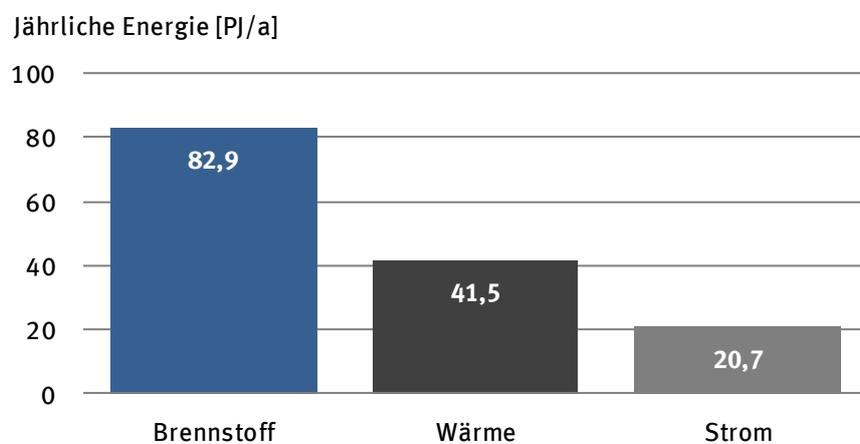
| Nr | Anlage | | IBS | Brennstoffe | FWL [MW] |
|----|-------------------|--|-------------|----------------|----------|
| 1 | Alfeld | Sappi Alfeld | 1998 | SLM PPR | 79 |
| 2 | Arneburg | Zellstoff Stendal | 2004 2013 | SL Rnd | 662 |
| 3 | Aschaffenburg | Pollmeier | 2007 | HPR | 10 |
| 4 | Blankenstein | Zellstoff- und Papierfabrik Rosenthal | 1999 | SL Rnd PR | 412 |
| 5 | Burgbernheim | Rettenmaier Holzindustrie Wilburgstetten | 2001 | HPR | 23 |
| 6 | Düsseldorf | Henkel | 1948 | orgFlsg | 104 |
| 7 | Eberhardzell | biopower SKW (Schneider-Holz) | 2004 | HPR | 28 |
| 8 | Ehingen | Sappi Ehingen | 1990 | SL Rnd HPR | 120 |
| 9 | Eilenburg | Kombikraftwerk Eilenburg | 1991 | PR | |
| 10 | Ettenheim | J. Rettenmaier & Söhne | | HPR | 20 |
| 11 | Hohenstein | SchwörerHaus | | HPR | 25 |
| 12 | Kalletal | Ziegelwerk Otto Bergmann | 1992 | FS | |
| 13 | Kösching | BinderHolz Deutschland | 2007 | HPR | 50 |
| 14 | Kühbach | Pfeifer Holz | 2007 | HPR | 42 |
| 15 | Lampertswalde | Kronospan | 2002 | HPR | 48 |
| 16 | Landsberg am Lech | Ilim Timber Bavaria | | HPR | 23 |
| 17 | Lauterbach | Pfeifer Holz Lauterbach | | HPR | 60 |
| 18 | Mannheim | SCA Hygiene Products | 1966 2000 | SL Rnd PR | 160 |
| 19 | Markt Bibart | Rauch Spanplattenwerk | | HPR | 57 |
| 20 | Marsberg | WEPA Kraftwerk | 1997 | SLM KS EBS | 22 |

| Nr | Anlage | | IBS | Brennstoffe | FWL [MW] |
|---|--------------------|------------------------------------|------|-----------------|----------|
| 21 | Oberrot | EnBW Klenk Holzenergie | 2000 | HPR Rnd | 40 |
| 22 | Rietberg | Wienerberger Ziegelindustrie | 2012 | PPR MAb Ssp | |
| 23 | Saalburg-Ebersdorf | Mercer Holz | 2008 | HPR | 49 |
| 24 | Schongau | UPM | 1989 | PPR | |
| 25 | Stefanskirchen | Hamberger Flooring | 2004 | PR | 50 |
| 26 | Steinheim | Otto Bergmann Ziegelwerk | 2007 | EBS SLM FS | |
| 27 | Stockstadt | Sappi Stockstadt | 2003 | SL PR | 105 |
| 28 | Torgau | Hit Holzindustrie Torgau | 2014 | HPR | 40 |
| 29 | Uelzen | Pfeifer Holz | | HPR | 42 |
| 30 | Warburg | August Lücking Ziegelei Betonwerke | 2013 | EBS PPR MAb | |
| 31 | Wörth | Palm Power | 2008 | PPR | 52 |
| | | | | Σ | 2.323 |
| Anmerkungen | | | | | |
| SL = Schwarzlauge Rnd = Rinde HPR = Holzproduktionsreste orgFlsg = organische Flüssigkeiten FS = Faserschlämme SLM = Schlämme allgemein EBS = Ersatzbrennstoffe Ssp = Sägespäne PPR = Papierproduktionsreste PR = Produktionsreste MAb = Mineralische Abfälle | | | | | |

Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [83,89,90,94,156-169]

Anhand dieser einfachen und sicher fehlerbehafteten Ableitungen wurde eine jährlich in Industriekraftwerken eingesetzte Brennstoffenergie von 82,9 PJ/a abgeschätzt. Unter Anwendung der angegebenen Wirkungsgrade können hieraus 41,5 PJ/a Wärme und 20,7 PJ/a Elektrizität erzeugt werden.

Abbildung 3-23 Jährlich in deutschen Industriekraftwerken aus Abfällen freigesetzte Brennstoffenergie und die daraus potenziell erzeugbare Menge an Strom und Wärme, bei angenommenen Nutzungsgraden von 25 % für Strom und 50 % für Wärme

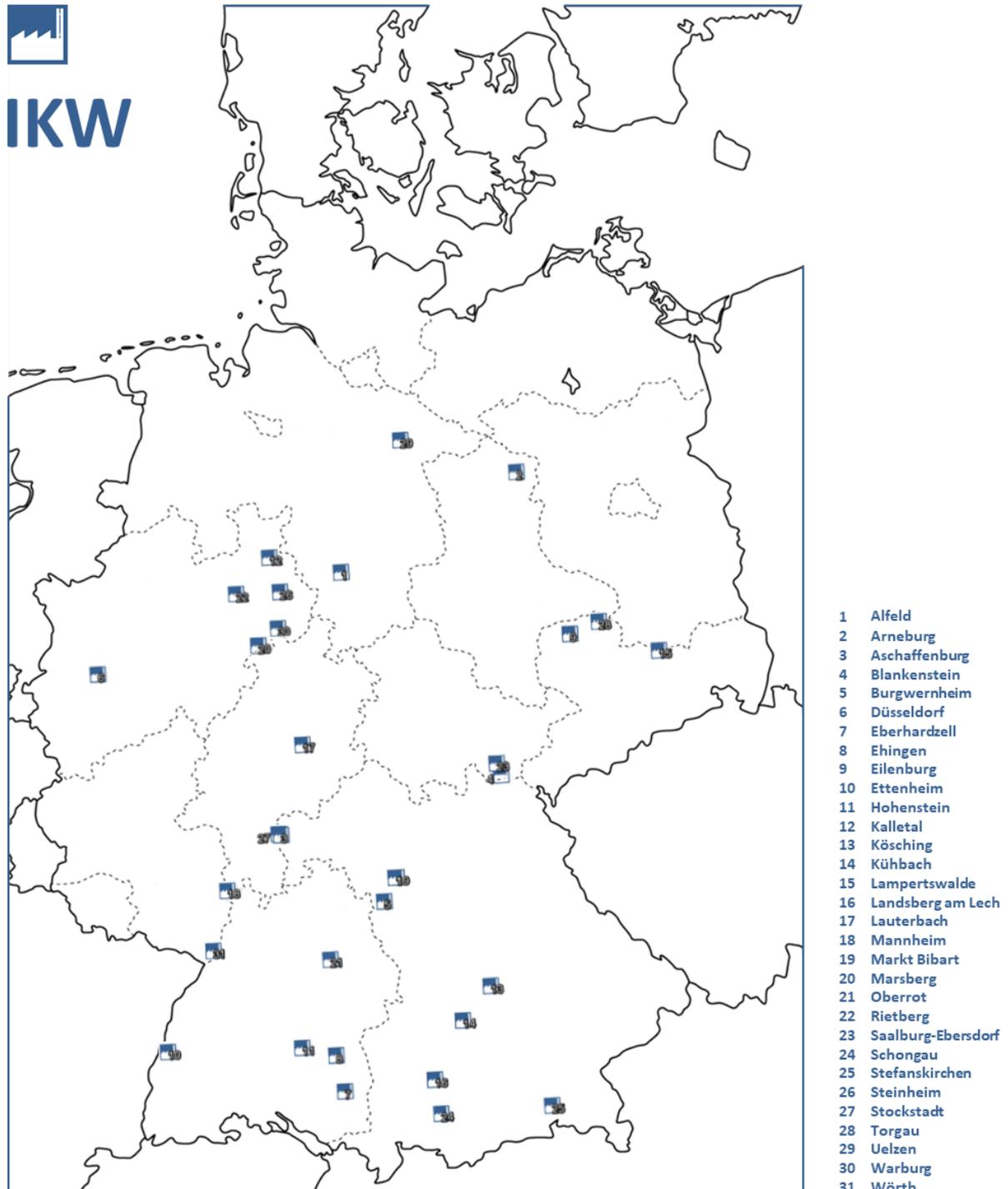


Quelle: Eigene Darstellung

Aus der ermittelten Brennstoffenergie, die den Industriekraftwerken zugeführt wird, könnte unter Kenntnis eines mittleren Heizwertes auch der zugehörige Brennstoffmassenstrom abgeschätzt werden.

Da in vielen Anlagen Produktionsreste aus der Holzverarbeitung (Rinden, Holzreste, Schwarzlauge etc.) eingesetzt werden, erscheint ein mittlerer Heizwert zwischen 12 und 15 MJ/kg realistisch. Dies würde einer Brennstoffmenge zwischen 6,9 Mio. Mg/a und 5,5 Mio. Mg/a entsprechen.

Abbildung 3-24 Industriekraftwerke



Quelle: Eigene Darstellung

3.1.9 Bioabfallvergärungsanlagen [BVGA]

die Identifikation und Quantifizierung von Bioabfallvergärungsanlagen gestaltete sich, ebenso wie im Fall der Altholzverbrennungsanlagen, schwierig, da auch hier eine Vermengung von Informationen

und statistischen Daten mit Anlagen zur Verwertung von nachwachsenden Rohstoffen stattfindet. In der Literatur finden sich allerdings verschiedene Publikationen, die speziell auf den Bestand an Bioabfallvergärungsanlagen fokussieren [170].

Abbildung 3-25 Anlagen zur Biogasenerzeugung aus biologischen Abfälle in Deutschland [170]



Quelle: Eigene Darstellung

Laut Kern et al. [170] werden in Deutschland derzeit 112 Biogasanlagen zur Vergärung von Bioabfällen mit einer Gesamtkapazität von 4,25 Mio. Mg/a betrieben, die im Bezugsjahr allerdings nur 3,15 Mio. Mg durchgesetzt haben (Tabelle 3-9). Die installierte elektrische Leistung der Anlagen beläuft sich in Summe auf 100 MW_{el}.

Tabelle 3-9 Anlagen zur Vergärung von abfallstämmigen Biomassen in Deutschland [170]

| Nr | Anlage | Kapazität [Mg/a] | Durchsatz [Mg/a] | Einsatzstoffe | Elektr. Leistung P _{el} [kW] |
|----|-------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|--|
| 1 | Alterhofen | 40.000 | 35.307 | BG GG | 364 |
| 2 | Altenholz | 21.000 | 21.000 | BG SA GG GWA | 536 |
| 3 | Alteno | 85.000 | 30.000 | SA | 1.323 |
| 4 | Altenstadt | 50.000 | 35.000 | SA GWA | 0 |
| 5 | Amtzell | 20.000 | 14.500 | BG GG GWA | 875 |
| 6 | Aschaffenburg | 15.000 | 13.200 | BG | 500 |
| 7 | Augsburg | 70.000 | 60.182 | BG GG | 0 |
| 8 | Backnang | 41.000 | 39.574 | BG GG | 1.600 |
| 9 | Baden-Baden | | 176.500 | BG SA GG Sonst | |
| 10 | Bad Köstritz | 51.944 | 33.202 | SA GWA Sonst | 4.172 |
| 11 | Bad Rappenau | 7.500 | 5.000 | SA GWA | 400 |
| 12 | Bardowick | 36.300 | 33.000 | SA GWA | 2.128 |
| 13 | Bassum | 55.000 | 55.427 | BG GG Sonst | 625 |
| 14 | Begrheinfeld | 32.000 | 18.000 | BG GG | 1.600 |
| 15 | Berlin | 60.000 | 60.000 | BG | |
| 16 | Bernau | 6.000 | 4.800 | SA GWA Sonst | 330 |
| 17 | Boden | 51.000 | 32.509 | BG SA GWA | 986 |
| 18 | Borgstedt | 50.000 | 42.000 | BG GG | 1.150 |
| 19 | Brake | 15.000 | 10.800 | BG GG | 440 |
| 20 | Braunschweig | 20.000 | 16.450 | BG GWA | |
| 21 | Brensbach | 70.055 | 17.500 | SA GWA Sonst | 1.480 |
| 22 | Burgberg | 13.000 | 11.000 | GG | 300 |
| 23 | Coesfeld | 68.640 | | | |
| 24 | Deißlingen | 25.000 | 25.000 | BG Sonst | 1.030 |
| 25 | Demen | | | | |
| 26 | Diespeck | 10.000 | 7.265 | BG | 191 |
| 27 | Dörpen | 19.600 | | BG GG | 260 |
| 28 | Eiselfing-Aham | 31.000 | 10.000 | GG Sonst | 265 |
| 29 | Eitting | 40.000 | 29.431 | BG | 921 |
| 30 | Engstingen | 18.000 | 18.000 | SA GWA | 890 |
| 31 | Ennigerloh | 52.000 | 49.000 | BG GG | 680 |
| 32 | Erfurt-Schwerborn | 23.500 | 20.759 | BG GG GWA Sonst | 660 |
| 33 | Erkheim | 18.000 | 17.160 | BG SA GWA | 1.065 |
| 34 | Essenheim | 48.000 | | | 1.200 |
| 35 | Eurasburg | 35.000 | 34.500 | BG GG | 800 |
| 36 | Flörsheim-Wicker | 55.000 | 38.700 | BG | 5.300 |
| 37 | Framersheim | 28.750 | 22.943 | BG GG | 738 |

| Nr | Anlage | Kapazität [Mg/a] | Durchsatz [Mg/a] | Einsatzstoffe | Elektr. Leistung P _{el} [kW] |
|----|------------------------|---------------------|---------------------|-------------------------------|--|
| 38 | Frankfurt | 43.000 | 32.957 | BG GG GWA | 680 |
| 39 | Frankfurt-Höchst | 205.000 | 170.000 | Sonst | 5.100 |
| 40 | Freiburg | 45.000 | 36.000 | BG GWA Sonst | 1.800 |
| 41 | Freising | 18.000 | 18.000 | SA GG GWA Gülle Sonst | 690 |
| 42 | Freudenstadt-Sulzhau | 18.000 | | | 550 |
| 43 | Friedberg | 18.000 | 18.000 | SA GWA Gülle | 734 |
| 44 | Garmisch-Partenkirchen | 10.500 | | | |
| 45 | Geislingen | 40.000 | 15.000 | SA GWA | 1.400 |
| 46 | Genthin | 73.000 | 49.676 | SA GWA Sonst | 1.886 |
| 47 | Gescher | 17.500 | 17.500 | BG SA GWA Sonst | 500 |
| 48 | Göttingen | 22.500 | 19.199 | BG GG | 252 |
| 49 | Gröden | 110.000 | 110.000 | SA GWA Gülle Sonst | 1.600 |
| 50 | Großefehn | 60.000 | 56.115 | BG GG | 590 |
| 51 | Großenlüder | 65.000 | | BG GG Gülle | |
| 52 | Gütersloh | 65.000 | | BG GG | 800 |
| 53 | Halle-Lochau | 110.000 | 85.000 | BG SA GG GWA Sonst | 1.896 |
| 54 | Hamburg | 20.000 | 18.929 | SA | 1.000 |
| 55 | Heidelberg | | | | |
| 56 | Heidensee | 32.000 | 27.523 | SA | 1.400 |
| 57 | Hennickendorf | 18.000 | 15.500 | BG SA GG GWA Sonst | 610 |
| 58 | Heppenheim | 32.000 | | | 750 |
| 59 | Hille | 50.000 | 50.000 | BG GG | |
| 60 | Hoppstädten-Weiersbach | 24.500 | 16.907 | BG | 800 |
| 61 | Iffezheim | 18.000 | 17.000 | BG | 527 |
| 62 | Ilbenstadt | 35.000 | 30.000 | BG GG | 625 |
| 63 | Karbow-Vietlütbe | 18.250 | 16.000 | SA GWA Gülle Sonst | 230 |
| 64 | Karlsruhe | 16.000 | 7.856 | BG | 380 |
| 65 | Kempton | 18.000 | 18.000 | BG GG | 930 |
| 66 | Kirchheim-Stausebach | 30.000 | | | |
| 67 | Kirchstockach | 35.000 | 30.407 | BG | 630 |
| 68 | Kißlegg-Rahmhaus | 17.500 | 17.500 | SA GWA | 960 |
| 69 | Kogel | 57.000 | 36.000 | SA | 2.400 |
| 70 | Langenau | 17.100 | 16.452 | GG Sonst | 540 |
| 71 | Lemgo | 60.000 | 44.875 | BG GG | 938 |
| 72 | Leonberg | 36.500 | 33.485 | BG GG | 2.213 |
| 73 | Lindlar | 55.000 | 34.051 | BG | 1.829 |
| 74 | Lingen | 19.600 | | GG | 365 |
| 75 | Lohfelden | 26.000 | 26.150 | BG GG | 450 |
| 76 | Malching | 76.500 | 58.000 | SA GWA Sonst | 2.042 |

| Nr | Anlage | Kapazität [Mg/a] | Durchsatz [Mg/a] | Einsatzstoffe | Elektr. Leistung P_{el} [kW] |
|-----|---------------------|------------------|------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 77 | Marburg | 12.000 | 12.000 | BG GG GWA | 370 |
| 78 | Marl | 120.000 | 27.719 | SA | 3.120 |
| 79 | Mertingen | 37.166 | 14.000 | BG GG GWA | 760 |
| 80 | München | 22.500 | 19.748 | BG | 570 |
| 81 | Münster | 22.000 | 16.114 | BG | 650 |
| 82 | Nentzelrode | 12.000 | | | 250 |
| 83 | Nieheim | 85.000 | 80.000 | BG GG | 680 |
| 84 | Parum | 50.000 | 50.000 | SA GWA Sonst | 2.100 |
| 85 | Passau | 40.000 | 40.000 | BG | 1.487 |
| 86 | Peine | 10.000 | 10.000 | BG | 384 |
| 87 | Putbus | 100.000 | 76.759 | SA GWA Gülle Sonst | 1.250 |
| 88 | Radeberg | 61.000 | 61.000 | SA Gülle Sonst | 830 |
| 89 | Regen | 18.000 | 18.000 | GG Sonst | 625 |
| 90 | Rhadereistedt | 40.000 | 28.600 | SA GWA Sonst | 1.020 |
| 91 | Roding | 12.000 | 11.800 | SA GWA | 700 |
| 92 | Saalfeld | 80.000 | 80.000 | BG GG Sonst | 1.050 |
| 93 | Saerbeck | 50.000 | | | 1.056 |
| 94 | Schwabach | 16.000 | 12.000 | SA GWA | 861 |
| 95 | Schwallungen | 115.000 | 79.432 | SA Gülle | 1.886 |
| 96 | Senftenberg | 12.000 | | | 569 |
| 97 | Stammham | 23.000 | 21.750 | BG GG | 630 |
| 98 | Strullendorf | 18.000 | 17.545 | BG GWA Sonst | 1.140 |
| 99 | Tangstedt-Bützeburg | 70.000 | 52.775 | BG GG | |
| 100 | Taufkirchen | | 9.000 | BG Gülle | 450 |
| 101 | Teugn | 22.000 | 11.000 | BG SA Sonst | 360 |
| 102 | Trittau | 30.000 | 25.000 | BG | 800 |
| 103 | Uelzen | 18.000 | 12.000 | BG GG | 500 |
| 104 | Vechta | 10.000 | 10.000 | BG | 330 |
| 105 | Volkenschwand | 35.000 | 35.000 | BG SA | |
| 106 | Waldmünchen | 13.000 | 13.000 | BG GG Sonst | 840 |
| 107 | Warngau | 18.250 | 15.374 | BG GG GWA | 365 |
| 108 | Weißenfels | 30.000 | 25.023 | BG GG Sonst | 856 |
| 109 | Witten-Stockum | 29.990 | 29.500 | BG GG Sonst | 700 |
| 110 | Würselen | 29.999 | 29.999 | BG | 537 |
| 111 | Wüschheim | 13.000 | 9.450 | BG GG | 830 |
| 112 | Zobes | 62.000 | 21.800 | BG SA GG GWA Gülle | 744 |
| | Σ Mio.Mg/a | 4,25 | 3,15 | | 100,2 MW |

BG =Biogut | SA = Speiseabfälle | GG = Grüngut | GWA = Gewerbeabfall | Sonst = Sonstiges

Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [170]

Die Abschätzung der Energiebereitstellung aus den Biogasanlagen erfolgte über die insgesamt installierte elektrische Leistung, die auf den tatsächlichen Massendurchsatz normiert wurde. Damit wurden auch die Anlagen berücksichtigt, die mit einer Netzeinspeisung des Biomethans arbeiten. Es ergab sich somit ein Wert für sämtliche Anlagen in Höhe von 2,92 PJ/a. Bei Verwendung typischer Biogas-BHKW ist eine Wärmenutzung mindestens im gleichen Umfang wie die Strombereitstellung möglich. Das Problem bei diesen Anlagen ist allerdings oft, dass keine entsprechenden Abnehmer zur Verfügung stehen, da die Betriebe oft außerhalb der Ortschaften angesiedelt sind, um Belästigungen durch Geruch und Verkehr zu vermeiden.

3.1.10 MBA-Anlagen mit Vergärungs-Stufe [MBA]

In Deutschland werden 44 Anlagen zur mechanisch-biologischen Abfallbehandlung betrieben, von denen 12 über eine Vergärungsstufe verfügen und 4 nur mechanische Verfahrensschritte anwenden (vgl. Tabelle 3-10).

Tabelle 3-10 MBA-Anlagen zur mechanisch-biologischen Abfallbehandlung [171–196].

| Nr | Anlage | Typ | Biologische Stufe | Kapazität [Mg/a] | |
|----|---------------------|-------------------------------|-------------------|------------------|---------|
| 1 | Bardowick | MBV Bardowick | MBA | CR NR | 120.000 |
| 2 | Bassum | RABA Bassum | MBA | TM TVG MR | 115.000 |
| 3 | Berlin | MPS Berlin-Pankow | MPS | keine | 160.000 |
| 4 | Berlin | MPS Berlin-Reinickendorf | MPS | keine | 160.000 |
| 5 | Chemnitz | RABA Chemnitz | MPS | keine | 150.000 |
| 6 | Dresden | BMA Dresden | MBS | RB | 105.000 |
| 7 | Ennigerloh | EBS-Aufbereitungsanlageanlage | MBA | R | 160.000 |
| 8 | Echzell | MBA Wetterau | MA | keine | 49.500 |
| 9 | Erfstadt | VZEK Rhein-Erft-Kreis | MBS | TR | 170.000 |
| 10 | Erfurt | RABA Erfurt-Ost | MBA | TR | 90.000 |
| 11 | Friedland | MBA Südniedersachsen | MBA | VS NVG | 130.000 |
| 12 | Gardelegen | MBA Deponie Lindenberg | MBA | R | 50.000 |
| 13 | Gescher | MBA Gescher | MBA | R | 115.000 |
| 14 | Großefehn | MBA Großefehn | MBA | TR | 47.600 |
| 15 | Großpösna | MBA Cröbern | MBA | TR | 300.000 |
| 16 | Großräschen | MBA Freienhufen | MBA | NVG | 37.000 |
| 17 | Hannover | MBA aha Hannover | MBA | VS TVG | 200.000 |
| 18 | Hille | MBA Pohlsche Heide | MBA | TM TVG MR | 100.000 |
| 19 | Ihlenberg | MA Ihlenberg | MA | keine | 120.000 |
| 20 | Ingenried | MBA Erbenschwang | MBA | TR | 40.000 |
| 21 | Kleinfurra, OT Hain | MA Nentzelrode | MBA | TVG | 140.000 |
| 22 | Königs Wusterhausen | MBS ZAB Nuthe-Spree | MBS | RB | 150.000 |
| 23 | Linkenbach | MBA Linkenbach | MBA | TR | 90.000 |
| 24 | Lübben (Spreewald) | MBV Lübben-Ratsvorwerk | MBS | RB | 28.000 |
| 25 | Lübeck | MBA Lübeck | MBA | TM NVG | 146.000 |

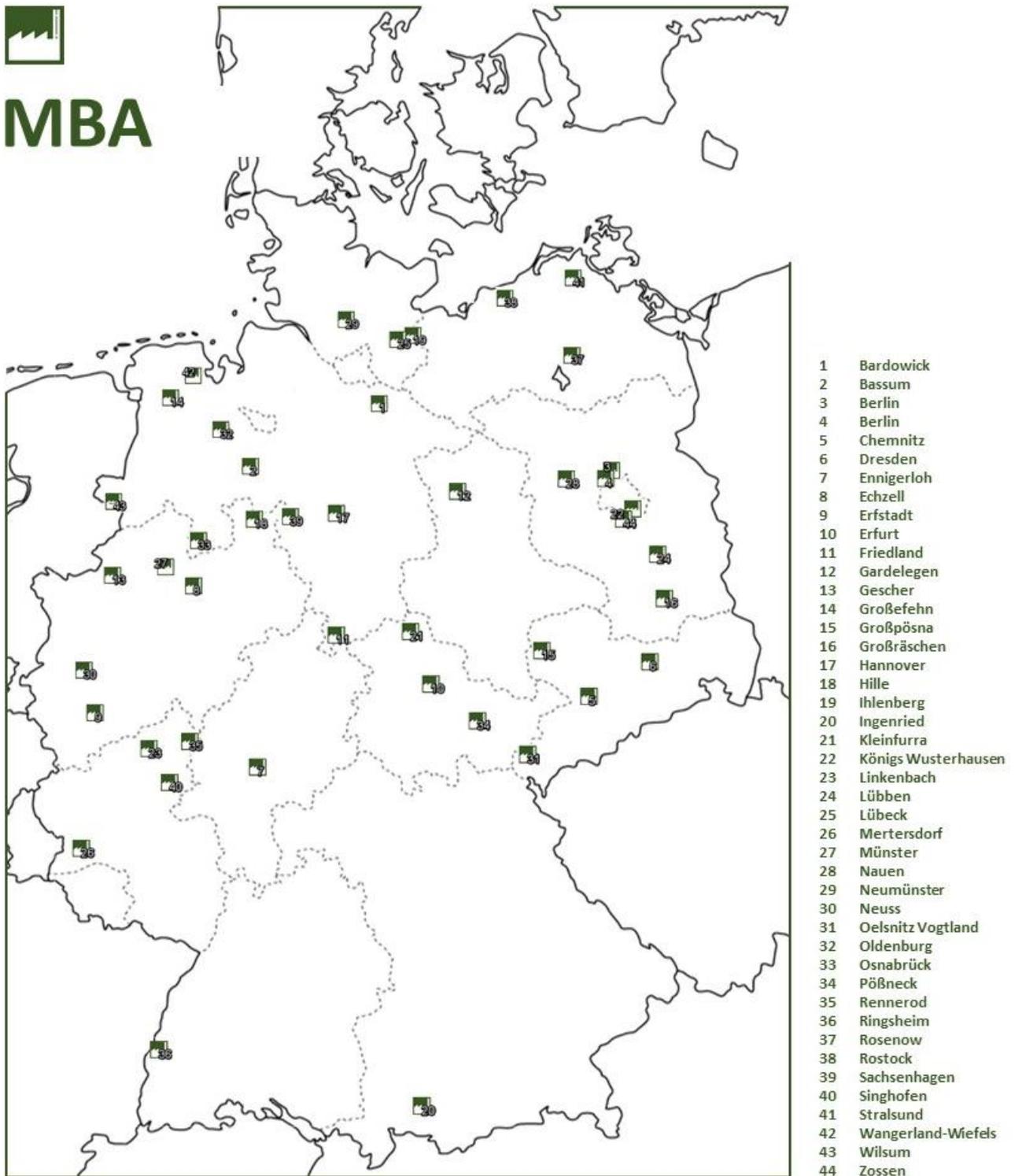
| Nr | Anlage | Typ | Biologische Stufe | Kapazität [Mg/a] | |
|----|--------------------|-----------------------|-------------------|------------------|-----------|
| 26 | Mertersdorf | MBT Mertersdorf | MBS | TR | 220.000 |
| 27 | Münster | MBRA Münster | MBA | TM TVG MR | 70.000 |
| 28 | Nauen | MBA Schwanebeck | MBA | R | 72.500 |
| 29 | Neumünster | MBA Neumünster | MBS | RB | 260.000 |
| 30 | Neuss | WSAA Neuss | MBS | TR | 300.000 |
| 31 | Oelsnitz Vogtland | MBS Vogtland | MBS | RB | 100.000 |
| 32 | Oldenburg | MA Oldenburg | MA | keine | 34.000 |
| 33 | Osnabrück | MBS Osnabrück | MBS | RB | 105.000 |
| 34 | Pößneck | MBRA Wiewärthe | MBA | R | 85.000 |
| 35 | Rennerod | MBS-Anlage Westerwald | MBS | RB | 120.000 |
| 36 | Ringsheim | MBA Kahlenberg | MBA | NVG R | 110.000 |
| 37 | Rosenow | ABA Rosenow | MBA | TR | 190.000 |
| 38 | Rostock | RABA Rostock | MBA | VG | 135.000 |
| 39 | Sachsenhagen | MBA Schaumburg | MBA | VS NVG | 70.000 |
| 40 | Singhofen | MBA Singhofen | MBA | TR | 90.000 |
| 41 | Stralsund | MBS Stralsund | MA | keine | 130.000 |
| 42 | Wangerland-Wiefels | MBA Wiefels | MBA | VS NVG | 113.500 |
| 43 | Wilsum | MBA Wilsum | MBA | TR | 63.000 |
| 44 | Zossen | MBA Schöneiche | MBA | R | 180.000 |
| | | | | Σ | 5.421.100 |

| Anmerkungen | |
|-------------|---|
| | Anlage mit Vergärungsstufe |
| | rein mechanische Anlagen |
| | MA = Mechanische Behandlung MBA = Mechanisch-Biologische Behandlung MBS = Mechanisch-Biologische Stabilisierung MPS = Mechanisch-Physikalische Stabilisierung |
| | CR = Containerrotte MR = Mietenrotte NR = Nachrotte R = Rotte RB = Rotteboxen TR = Tunnelrotte |
| | NVG = Nassvergärung TVG = Trockenvergärung VG = Vergärung |
| | VS = Vollstrom TS = Teilstrom |

Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [171-196]

Bezogen auf den gesamten Input in deutsche MBA-Anlagen wird ca. ein Prozent der Gesamtmasse in Biogas umgewandelt. Dies entspricht 36,5 Mio. m³ Biogas mit einem Volumenanteil von 61 % Methan oder einer Brennstoffenergie von 0,08 PJ/a [196]. Nach Verstromung in einem typischen BHKW mit etwa 40 % elektrischen Wirkungsgrad könnten hierdurch 0,03 PJ/a an Elektrizität und etwa im gleichen Umfang Wärme bereitgestellt werden.

Abbildung 3-26 Mechanisch-Biologische Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland



Quelle: Eigene Darstellung

3.1.11 Alternative Abfallbehandlungsverfahren

Der potenzielle Beitrag alternativer thermischer Abfallbehandlungsverfahren (Vergasungs-, Pyrolyse-, Verölungs- und Plasmaverfahren) zur Energieversorgung in der Bundesrepublik kann im Rahmen die-

ser Studie nur qualitativ diskutiert werden, da aktuell kaum Anlagen dieser Art in Deutschland betrieben werden. Seit der Schließung der Hausmüllpyrolyseanlage im bayerischen Burgau und der Stilllegung der Contherm-Anlage im westfälischen Hamm, in der Ersatzbrennstoffe über einen Pyrolyseschritt energetisch im Kohlekraftwerk verwertet wurden, wird als verbliebenes alternatives thermisches Verfahren im industriellen Maßstab nur noch die Wirbelschichtvergasungsanlage im Zementwerk Rüdersdorf betrieben. Hinzu kommen einige kleinere Klärschlammbehandlungsanlagen.

Dennoch soll im Rahmen der Studie eine Aussage zur Anwendbarkeit alternativer Ansätze zur thermischen Abfallbehandlung getroffen werden. Dies erfolgt im Wesentlichen auf Basis und analog der Schlussfolgerungen des Gutachtens "Sachstand zu den alternativen Verfahren für die thermische Entsorgung von Abfällen" [197].

Abbildung 3-27 gibt einen groben Überblick über den Nutzen thermischer Abfallbehandlungsverfahren in Relation zum erforderlichen Aufwand und stellt damit eine Zusammenfassung der Ergebnisse der angesprochenen Studie dar.

Alleinstehende Prozesse zur Pyrolyse und Vergasung deren Konzept lediglich eine Gasnutzung vorsieht, jedoch keine weitere Verwertung des festen kohlenstoffhaltigen Produktes, sind laut BREF Abfallverbrennung (Kap. 5, Nr. 24) nicht als Stand der Technik anzusehen. Wenn dieses Problem, beispielsweise durch eine Koks-Nachverbrennung, gelöst werden kann, stellt das Ziel einer möglichst hochwertigen Gasnutzung eine weitere große Herausforderung dar. Nach den Erfahrungen der Autoren ist es mit vertretbarem Aufwand nicht möglich, aus gemischten Abfällen mittels thermohemischer Verfahren ein qualitativ hochwertiges Gas zu erzeugen. Hohe Aufbereitungstiefe der Einsatzstoffe, Zugabe fossiler Hilfsenergieträger und vielstufige, aufwändige Gasaufbereitungsverfahren sind typische Charakteristika der Prozesse, die zufriedenstellende großtechnische Betriebserfahrung nachweisen konnten oder können.

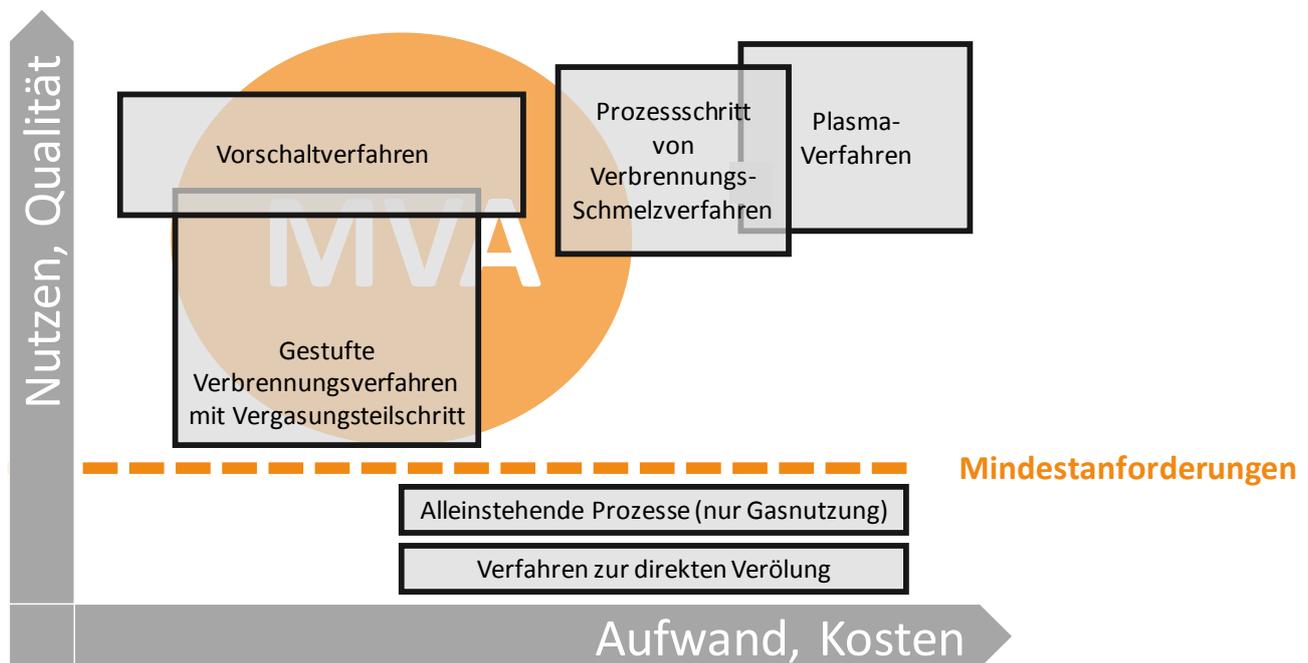
Direktverölungsverfahren stellen eine Umkehr der Polymerisation dar. Diese Beschreibung impliziert bereits die einzig sinnvollen Einsatzstoffe für solche Verfahren: Kunststoffe, die durch Polymerisation erzeugt wurden. Andere Einsatzstoffe wie Biomassen, Papier, Textilien oder gar gemischte Abfälle sind nicht dazu geeignet, qualitativ hochwertige flüssige Produkte zu erzeugen. Nach bisherigen Erfahrungen können durch die Direktverölungsverfahren selbst beim Einsatz von kunststoffreichen Fraktionen die Normen für hochwertige Treibstoffe in der Regel nicht erfüllt werden. Trotz mehrjährigem Betrieb von Technikums- und Pilotanlagen konnte bis heute noch kein Prozess den Nachweis der technischen Reife im industriellen Dauerbetrieb erbringen.

Die Anwendung von Hochtemperaturschmelzverfahren und Plasmaprozessen wird sich in der Regel nur für Spezialfraktionen lohnen, die z.B. aus ökologischen Gründen eine Verglasung benötigen. Eine Anwendung in größerem Umfang wird sich aufgrund des erforderlichen (energetischen) Aufwandes nicht durchsetzen.

Die in der Abbildung aufgeführten gestuften Verbrennungsverfahren sind Prozesse, die in der primären Umsetzungsstufe unterstöchiometrisch betrieben werden. Das erzeugte Gas wird in der Nachbrennkammer aber direkt überstöchiometrisch verbrannt. Diese Betriebsweise kann verschiedene Vorteile, wie zum Beispiel geringere Energieverluste durch geringeren Abgasstrom und niedrigere NO_x -Werte, haben. Grundsätzlich sind diese Ansätze als Verbrennungsverfahren zu bewerten.

Interessant, insbesondere für eine optimierte energetische Nutzung von Abfällen, erscheint der Einsatz von Vorschaltanlagen. In direkter Kombination mit thermischen Hauptprozessen, wie Zement oder Kohlekraftwerken, können diese Verfahren besondere Vorteile bieten – wie zum Beispiel höhere Wirkungsgrade oder die vollständige Verwertung der entstehenden Aschen (vgl. z.B. Zementwerk Rüdersdorf, Contherm-Anlage Hamm).

Abbildung 3-27 Bewertung alternativer Verfahren für gemischte Siedlungsabfälle nach Aufwand und Nutzen [197]



Quelle: [197]

Aufgrund des erforderlichen investiven und operativen Aufwandes aber auch wegen der negativen Erfahrungen in der Vergangenheit, ist nicht damit zu rechnen, dass alternative thermische Prozesse in absehbarer Zeit auf dem deutschen Markt Fuß fassen können. Grundsätzlich hängt dies natürlich auch von den politischen Rahmenbedingungen, wie zum Beispiel der Höhe von stofflichen Rückgewinnungs- und Recyclingquoten ab. Da der Trend zur Erhöhung dieser Quoten auf politischer Ebene anhält, könnte dies auf lange Frist auch die Anwendung neuer Technologien, wie zum Beispiel der alternativen thermischen Prozesse, erforderlich machen, allerdings dann zur stofflichen Verwertung und nicht – wie es Thema dieser Studie ist – zur energetischen Nutzung.

Bei der energetischen Verwertung von Abfällen werden die alternativen thermischen Verfahren in Deutschland in den nächsten Jahren nicht an Bedeutung gewinnen. Auch im Jahr 2030 wird kein relevanter Beitrag dieser Verfahren zur Energieversorgung aus Abfällen erwartet.

3.2 Abfallmengen

Die Mengenermittlung der anfallenden Abfallgruppen basiert auf der Auswertung unterschiedlicher Literaturquellen mit dem Basisjahr 2015. In Einzelfällen musste jedoch auf Daten aus dem Jahr 2014 zurückgegriffen werden.

Die Auswertung wurde mit dem Ziel durchgeführt, die 2015 in Deutschland thermisch behandelten oder energetisch verwerteten Abfallmengen zu ermitteln. Im Input wurden deshalb nur solche Abfallmengen berücksichtigt, die vollständig oder teilweise (z. B. nach einer Behandlung) entsprechenden Entsorgungswegen zugeführt worden sind.

Als Hauptquellen der Auswertung wurden die Abfallbilanz 2015 [198] sowie die Fachserie 19 Reihe 1, Abfallentsorgung [3] von Destatis (Statistisches Bundesamt) zu Grunde gelegt. Für Untersuchung der Siedlungsabfallmengen wurden ergänzend auch die Abfallbilanzen aller Bundesländer für das Jahr 2015 ausgewertet.

Dort wo andere Datenquellen zur Abfallmengenbestimmung verwendet worden sind, wurden diese Angaben stets mit den Destatis – Mengenangaben abgeglichen, um die grundsätzliche Plausibilität zu gewährleisten.

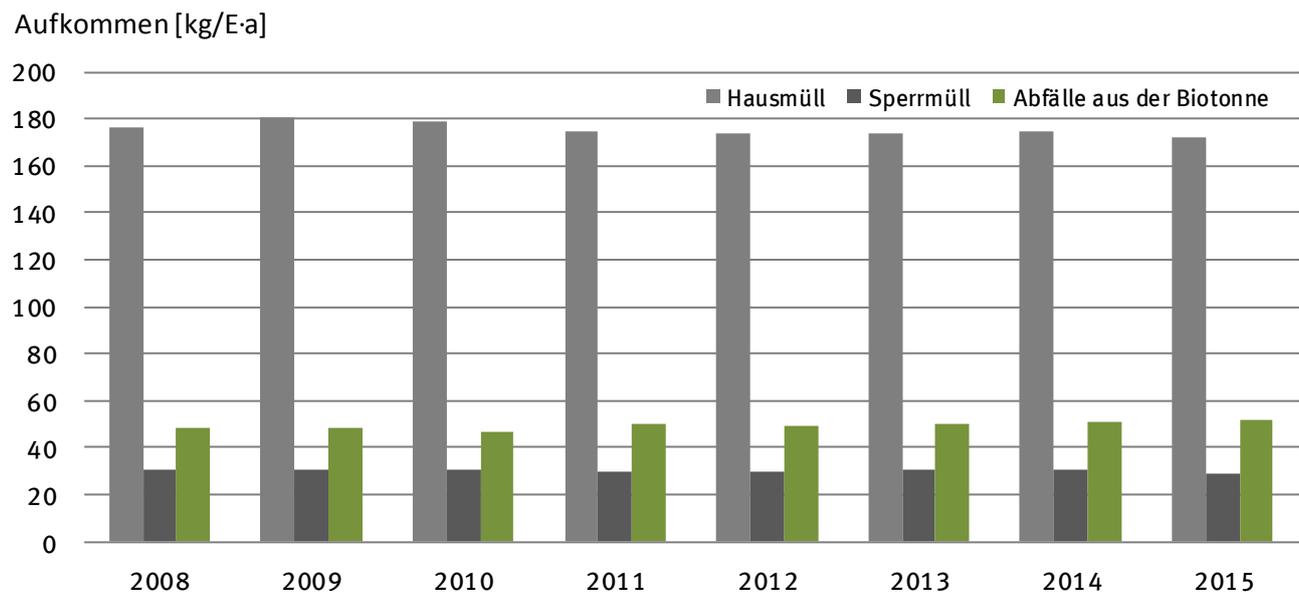
3.2.1 Siedlungsabfälle

Da Siedlungsabfälle zurzeit nicht eindeutig definiert sind, wurden unter der Rubrik „Siedlungsabfall“ diejenigen Abfallfraktionen berücksichtigt, die auch bei Destatis in diese Kategorie eingeordnet werden. Dazu gehören neben dem klassischen Hausmüll, Sperrmüll, Abfälle aus der Biotonne (Bioabfall), Verpackungsabfälle aus privaten Haushalten, Marktabfälle, Straßenkehricht, Park- und Gartenabfälle, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle sowie sonstige Siedlungsabfälle. Im Folgenden werden die einzelnen angesetzten Abfallmengen erläutert.

3.2.1.1 Hausmüll | Sperrmüll | Abfälle aus der Biotonne

Für Hauptmengströme des Siedlungsabfalls, Hausmüll, Sperrmüll sowie Abfälle aus der Biotonne, wurden die Daten der Abfallbilanz 2015 von Destatis verwendet. Wie die folgende Abbildung zeigt, haben sich die anfallenden Abfallmengen dieser Abfallarten über die letzten Jahre nur wenig verändert.

Abbildung 3-28 Einwohnerbezogene Mengenentwicklung für Hausmüll, Sperrmüll, Abfälle aus der Biotonne [198]



Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [198]

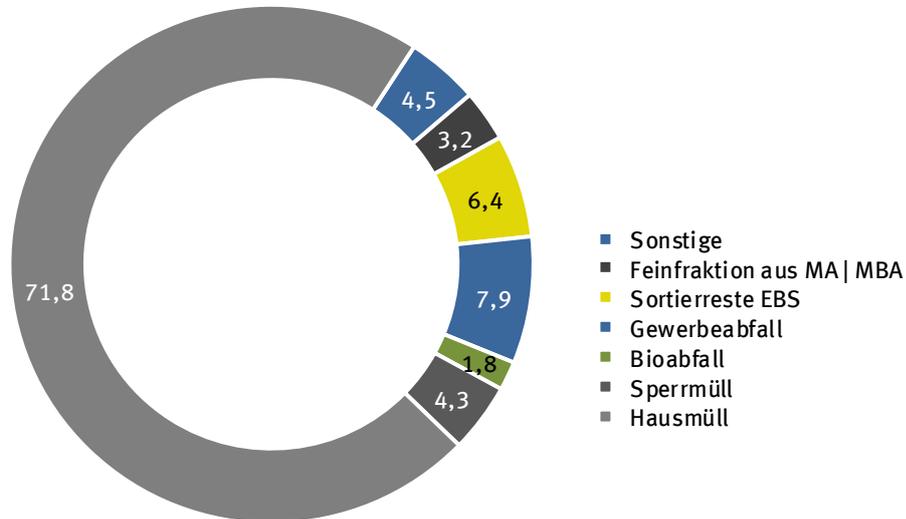
Hausmüll wird in den deutschen Müllverbrennungsanlagen, in Anlagen zur stoffstromspezifischen Abfallbehandlung (MBA-Anlagen) und im geringen Maß (ca. 5%) in EBS-Kraftwerken eingesetzt.

Der Sperrmüll wird gemäß Destatis FS19 zu einem Drittel direkt energetisch verwertet. Er wird oft auch in Sortieranlagen weiterbehandelt oder auch nach Fraktionen getrennt eingesammelt. Teilströme werden dem Recycling zugeführt (z. B. Holz, Metalle, PPK, hochwertige Kunststoffe, etc.) oder zu einem Brennstoff (Holz, EBS und SekBS) weiterverarbeitet und anschließend energetisch verwertet. Dieser Behandlungsanteil an der anfallenden Sperrmüllmenge wurde mit 66% angesetzt.

Teilströme von Haus- und Sperrmüll sowie geringfügige Mengen an Bioabfällen werden auch in MBA-Anlagen behandelt. Zur Zuordnung und Verteilung der Input- und Outputströme in diesen Anlagen wurden die von Ketelsen für die ASA ermittelten Daten [196] verwendet. Sie ermöglichen eine relativ

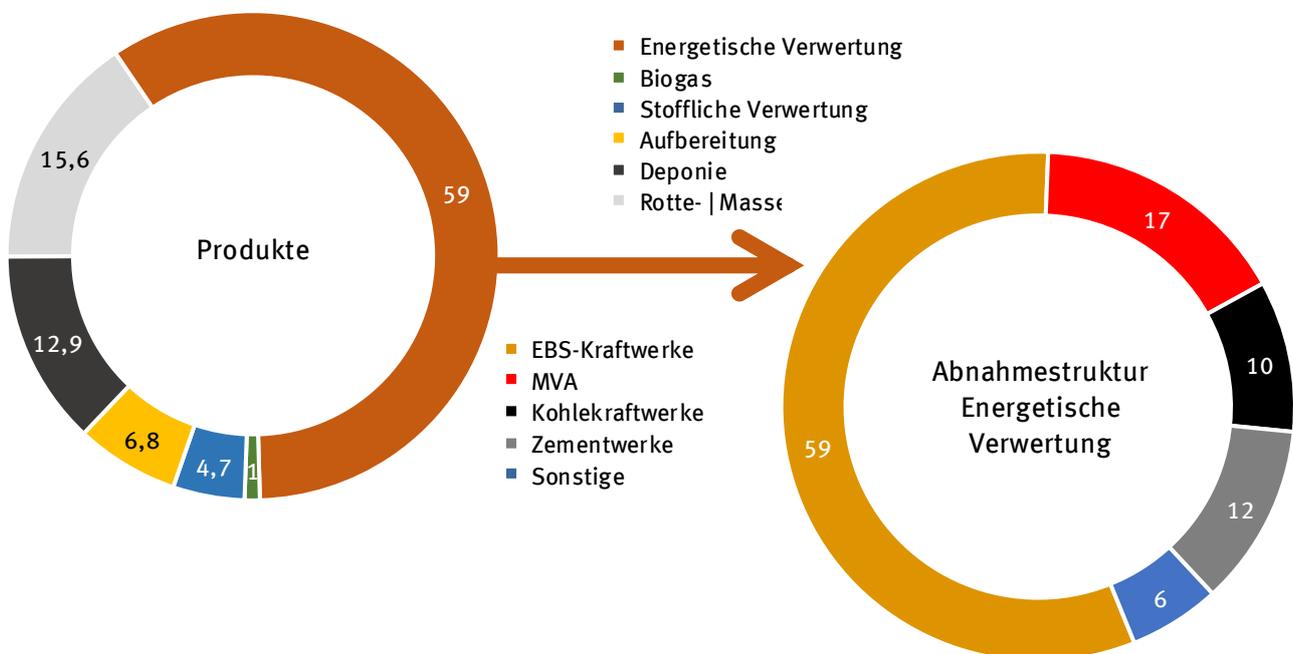
genaue Zuordnung zu den jeweiligen Entsorgungswegen (Recycling, biologische Behandlung, Mitverbrennung als SekBS, energetische Verwertung in EBS-Kraftwerken und MVA, Ablagerung).

Abbildung 3-29 Durchschnittliche Aufteilung der Inputmengen deutscher MBA-Anlagen [%] [196]



Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [196]

Abbildung 3-30 Durchschnittliche Verteilung der Outputmengen deutscher MBA (links) und Abnehmer des Outputstroms „Energetische Verwertung“ (rechts; Angaben jeweils in %) [196]



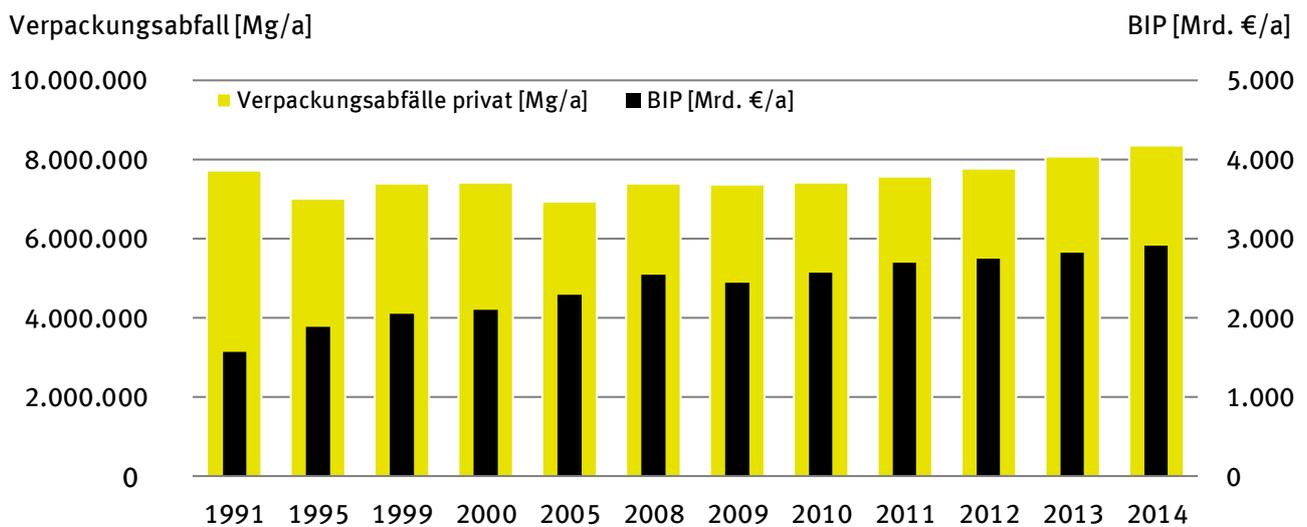
Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [196]

Die Abfälle aus der Biotonne wurden nach Abzug der an die MBA gelieferten Mengen anteilmäßig den aus dem Biogas-Atlas 2014/15 von Kern und Raussen entnommenen Biogasanlagenkapazitäten [170] für kommunale Bioabfälle zugerechnet. Die dann noch verbleibende Bioabfallmenge wurde der Kompostierung zugeschlagen.

3.2.1.2 Verpackungsabfälle aus privaten Haushalten

Die Mengenangaben zu den Verkaufsverpackungen für den privaten Endverbrauch wurden der GVM – Studie für das Jahr 2014 [199] entnommen. Sie beziehen sich auf sämtliche Verpackungsmaterialien (LVP, PPK, Holz, Glas, sonstige Verbunde, etc.). Diese Daten wurden herangezogen, da sie eine gute Differenzierung nach Art und Herkunft sowie zu den Entsorgungswegen der gesammelten Stoffgruppen bieten. Da Verpackungsabfälle i. d. R. zunächst Sortier- und Behandlungsprozesse durchlaufen, wurden sie zu 100% der Vorbehandlung zugeschlagen und der thermisch/ energetisch genutzte Anteil nach GVM [199] wurde entsprechend berücksichtigt.

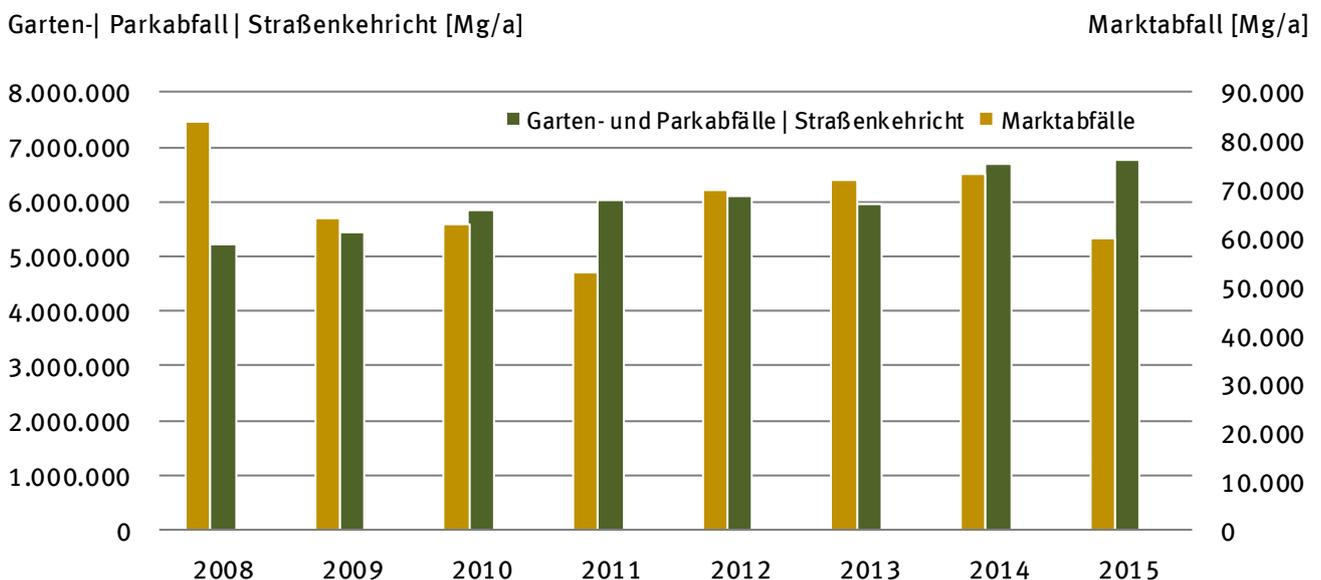
Abbildung 3-31 Entwicklung des Verpackungsverbrauchs privater Endverbraucher (alle Materialien) und BIP (verändert, nach [199])



Quelle: veränderte Darstellung nach [199]

3.2.1.3 Marktabfälle | Straßenkehrriecht | Park- und Gartenabfälle

Abbildung 3-32 Entwicklung der anfallenden Mengen an Marktabfällen, Park- und Gartenabfällen und Straßenkehrriecht 2008-2015 [199]



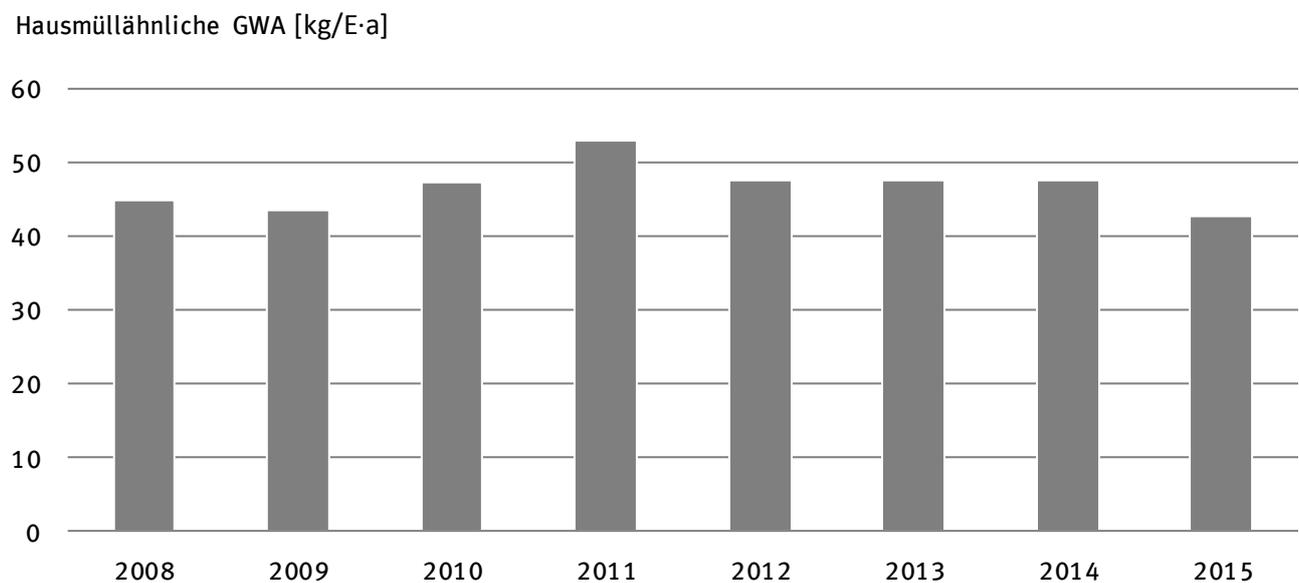
Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [199]

Bei Marktabfällen, Park- und Gartenabfällen sowie Straßenkehrriecht wurden die Daten der Destatis - Abfallbilanz 2015 [198] zu Grunde gelegt. Die in der Destatis FS 19 aufgeführten Mengen an Straßenkehrriecht und Marktabfällen für die Thermische Verwertung wurden übernommen. Für die restlichen Mengen sowie die Park- und Gartenabfälle wurde eine Behandlung angesetzt.

3.2.1.4 Hausmüllähnliche Gewerbeabfälle

Die Hausmüllähnlichen Gewerbeabfälle wurden entsprechend der Angaben in der Destatis-Abfallbilanz 2015 angesetzt. Anders als bei den anderen Siedlungsabfallarten zeigte dieser Mengenstrom in der Vergangenheit recht deutliche Schwankungen. Zur besseren Veranschaulichung der Entwicklung zeigt das nächste Schaubild die Mengenentwicklung in kg pro Einwohner und Jahr.

Abbildung 3-33 Entwicklung der einwohnerbezogenen Menge an Hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen in Deutschland von 2008-2015 [198,200]



Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [198,200]

Teilmengen dieses Abfallstroms wurden bisher bereits direkt energetisch/thermisch genutzt. Ein Großteil wurde einer Vorbehandlung bzw. Sortierung unterzogen. Aufgrund von Erfahrungen aus Stoffflussbilanzierungen wird von einem Anteil von 85 % für die thermische Behandlung bzw. energetische Verwertung ausgegangen.

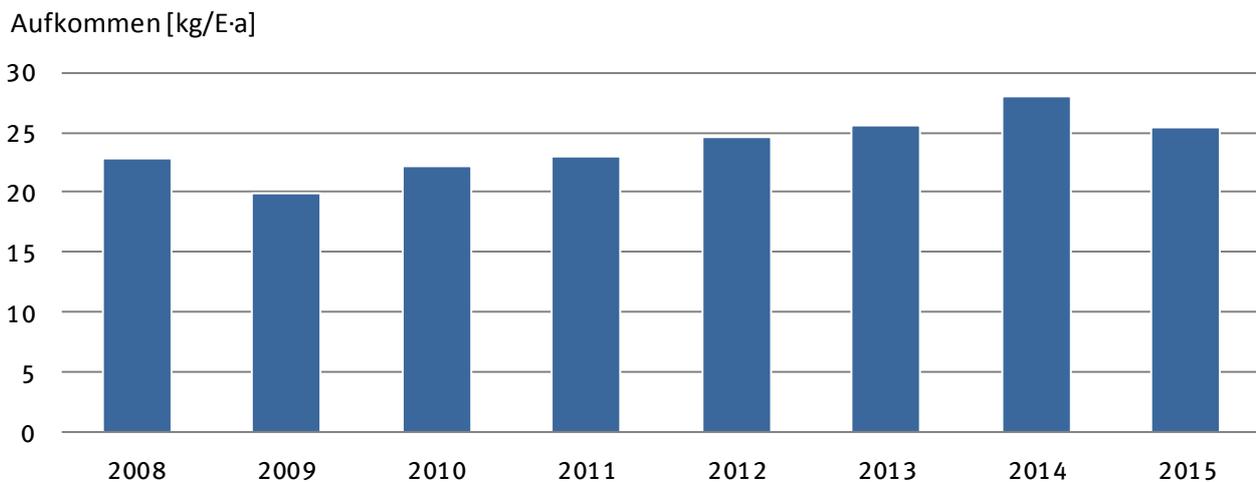
3.2.1.5 Sonstige Siedlungsabfälle

Der Mengenstrom „Sonstige Siedlungsabfälle“ wurde als Sammelposition von Verbunden, Metallen, Textilien usw. vollständig entsprechend der Angaben in der Destatis - Abfallbilanz 2015 berücksichtigt. Abbildung 3-34 gibt einen Überblick über die spezifische Mengenentwicklung dieses Abfallstroms seit 2008.

3.2.2 Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen

In den Abfällen aus Abfallbehandlungsanlagen sind die Teilströme zur thermischen Behandlung bzw. energetischen Verwertung zu finden, die sich nach der Vorbehandlung errechnen. Diese werden überwiegend unter den Abfallschlüsselnummern 191210 [brennbare Abfälle (Brennstoffe aus Abfällen)] und 191212 [sonstige Abfälle (einschließlich Materialmischungen) aus der mechanischen Behandlung von Abfällen mit Ausnahme derjenigen, die unter 191211 fallen] geführt.

Abbildung 3-34 Entwicklung der anfallenden Mengen an sonstigen Siedlungsabfällen 2008-2015 [198,200]



Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [198,200]

3.2.2.1 EBS | SekBS

Unter dem Begriff Ersatzbrennstoffe wird ein breites Spektrum verschiedener Brennstoffe, hergestellt aus nicht gefährlichen Siedlungs- und Produktionsabfällen, zusammengefasst. Nach dem RAL-Gütezeichen „Sekundärbrennstoffe“ [1] wird dieser Ersatzbrennstoff unterteilt in heizwertreiche Fraktionen (hier als Ersatzbrennstoff oder EBS bezeichnet) für die Monoverbrennung in Ersatzbrennstoffkraftwerken und Sekundärbrennstoffe (SekBS) für die Mitverbrennung in Zement- oder Kohlekraftwerken.

Ersatzbrennstoffe werden überwiegend aus Hausmüll- und/oder gewerbeabfallstämmigen Stoffströmen hergestellt und sind durch eine geringere Aufbereitungstiefe, größere Korngrößen und geringere Heizwerte im Vergleich zum SekBS charakterisiert.

Sekundärbrennstoffe sind endkonfektionierte Brennstoffe aus produktionsspezifischen Abfällen bzw. aus heizwertreichen Fraktionen von Siedlungsabfällen mit einer definierten Qualität. Sie werden durch umfassende Aufbereitungsprozesse hergestellt und sind gekennzeichnet durch geringere Korngrößen (max. 50 mm) sowie i. d. R. höhere Heizwerte [201].

Sekundärbrennstoffe können mit dem Gütezeichen RAL-GZ 724 geführt werden, wenn sie den Anforderungen der „Allgemeinen und besonderen Güte- und Prüfbestimmungen für Sekundärbrennstoffe“ [1] entsprechen und diese regelmäßig in den Produktionsanlagen nachgewiesen werden. Sie werden dann mit der Markenbezeichnung SBS® gekennzeichnet. Die wachsende Bedeutung der Gütesicherung spiegelt sich in den Mengen der gütegesicherten Sekundärbrennstoffe (SBS®) wieder, die sich im Zeitraum von 2014 bis Ende 2017 nahezu verdoppeln werden.

Die in der Mengendarstellung unter EBS / SekBS zusammengefassten Abfallmengen aus den Abfallbehandlungsanlagen enthalten alle Stoffströme aus der Vorbehandlung, die einer energetischen Verwertung oder thermischen Behandlung zugeführt werden und unter den Abfallschlüsselnummern 19 12 10 und 19 12 12 geschlüsselt sind.

3.2.2.2 Klärschlamm

Klärschlamm bildet den Hauptmassenstrom der in der Abwasserentsorgung anfallenden Abfälle. Die Mengen an Sieb-, Rechen- und Sandfanggut sind deutlich geringer und werden zudem in der Statistik über Abfallbehandlungsanlagen (Abfallschlüsselnummern 190801 und 190802) geführt [202]. Die Mengen belaufen sich auf 150.000-180.000 Mg Sieb- und Rechenrückstände sowie 120.000-140.000

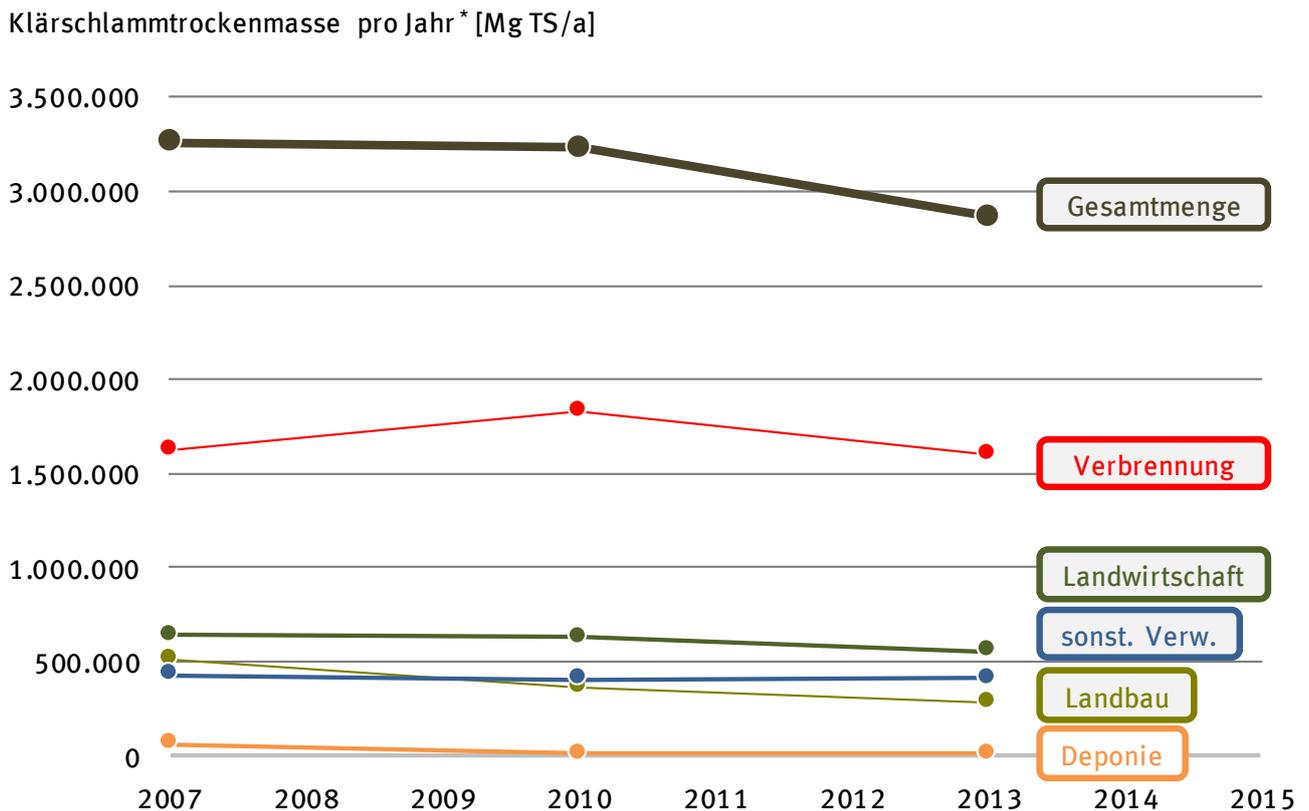
Mg Sandfangrückstände. Zum Teil werden diese Abfälle verbrannt, zum Teil aufgrund des geringen Heizwertes auch direkt deponiert, Teilmengen gelangen auch in die MBA [202].

Klärschlämme fallen in öffentlichen (kommunalen) und nichtöffentlichen (industriellen) Kläranlagen an und werden in der Statistik entsprechend kategorisiert.

Demnach fallen bei der öffentlichen Abwasserreinigung aktuell noch etwa 1,8 Mio. Mg TM an Klärschlamm an. Die entstehenden Mengen sind seit Jahren rückläufig.

Die kommunalen Schlämme werden zum größten Teil (64 %) in Verbrennungsanlagen thermisch behandelt. Da die Deponierung seit 2005 gesetzlich verboten ist, bleiben Landwirtschaft und Landbau als alternative Entsorgungspfade. Es ist jedoch bereits seit Jahren ein Rückgang der landwirtschaftlichen und landbaulichen Verwertung zu beobachten. Dieser Trend wird sich aufgrund der Novelle der Klärschlammverordnung [203] und der Verschärfung von Auflagen bei der landwirtschaftlichen Ausbringung von Klärschlamm laut Düngemittelverordnung [204] noch deutlich verstärken (vgl. Abschnitt 4.2.1).

Abbildung 3-35 Kommunale und industrielle Klärschlammengen, die für eine thermische Verwertung geeignet sind (* industrielle Schlämme, die deponiert werden, finden hier keine Berücksichtigung, da eine energetische Verwertung aufgrund zu geringer Heizwerte nicht infrage kommt) [138,139]



Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [138,139]

Neben den kommunalen Schlämmen entstehen auch große Mengen an industriellen Klärschlämmen. In Abbildung 3-35 sind die Gesamtmengen, also kommunale und industrielle Klärschlämme, dargestellt. Nicht betrachtet wurden bei dieser Darstellung solche industriellen Schlämme, die bereits heute deponiert werden und aufgrund von zu geringen Heizwerten oder besonderer Toxizität nicht für eine thermische Verwertung zur Verfügung stehen. Es ergibt sich ein Gesamtanfall von 2,7 Mio. Mg im Jahr

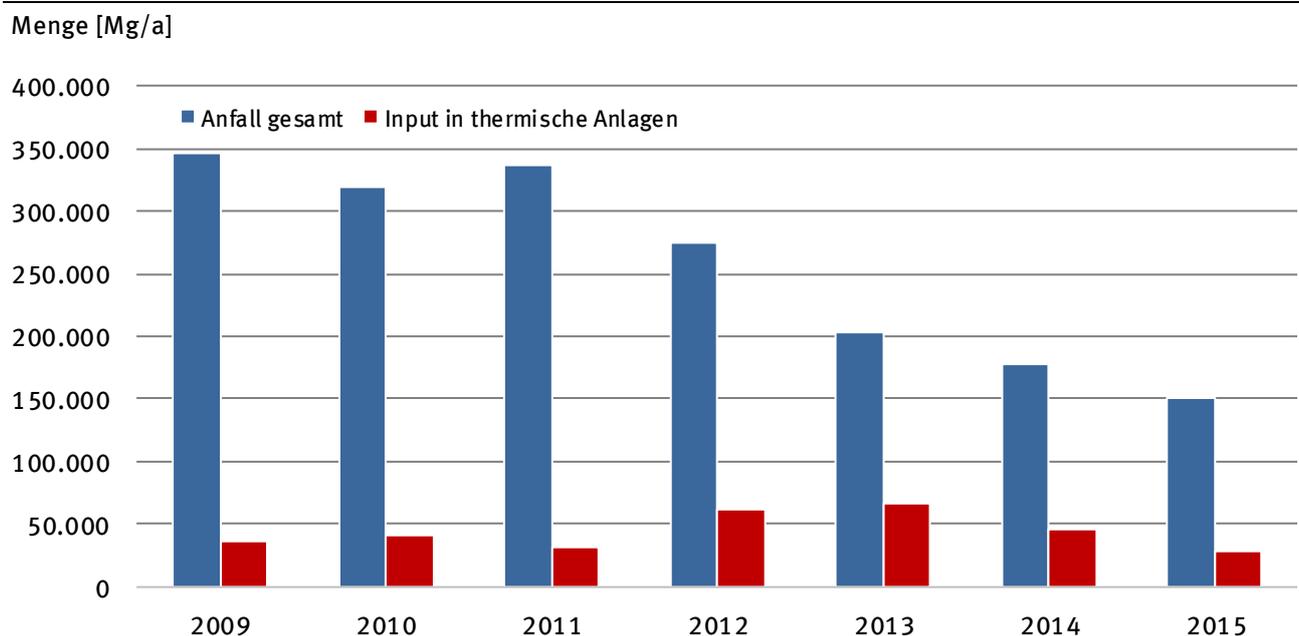
2013. Auch bei der Gesamtmenge ist ein Rückgang seit 2007 zu beobachten. Aktuell werden etwa 56 % der anfallenden Klärschlämme thermisch behandelt, also verbrannt.

3.2.2.3 Schredderleichtfraktion

Schredderleichtfraktion entsteht bei der Aufbereitung von Altfahrzeugen, Elektro- und Elektronikgeräten sowie Mischschrotten im Rahmen der Rückgewinnung der Metalle zur Verwertung.

Die angegebenen Inputmengen für die Schredderleichtfraktion mit den Abfallschlüsselnummern 191003* und 191004 in Abfallbehandlungsanlagen wurden der Destatis – Fachserie 19 [3–9] entnommen. In Abbildung 3-36 sind diese Mengen und zusätzlich die direkt thermisch behandelten Mengen für die Jahre 2009 - 2015 dargestellt.

Abbildung 3-36 Entwicklung Inputmengen Schredderleichtfraktion mit der Abfallschlüsselnummer 191203* und 191204 in Abfallbehandlungsanlagen gesamt und zur Thermischen Behandlung gemäß Destatis – Fachserie 19 [3–9] für die Jahre 2009 - 2015



Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [3-9]

Zusätzliche Angaben zu den Mengen an Schredderleichtfraktion, die in anderen Abfallschlüsselnummern enthalten, aber ihrer Menge nicht klar belegbar sind, wurden hier nicht gemacht. Diese Mengen sind jedoch vom Potenzial her in den Abfallschlüsselnummern 191210 und 191212 enthalten und werden damit bei der Berechnung in Kapitel 3.3.1 berücksichtigt.

3.2.2.4 Tierische Nebenprodukte

Tierische Reststoffe, die nicht zum menschlichen Verzehr geeignet sind, werden als tierische Nebenprodukte bezeichnet. Je nach Art des Tieres fällt eine unterschiedlich große Menge an, bei Schweinen etwa 34 % des Gewichts, bei Rindern 42 % und bei Geflügel etwa 25 % [205]. Je nach ihren Gefährdungspotenzial werden diese Nebenprodukte in drei Kategorien eingeteilt. Material mit einem hohen Risiko (Kategorie 1) wird energetisch genutzt (und damit gleichzeitig sicher beseitigt). Im Jahre 2016 wurden in Deutschland etwa 3 Millionen Mg tierische Nebenprodukte erzeugt, darunter etwa 200.000 Mg Tiermehl (Proteine) der Kategorie 1, welche thermisch verwertet wurden. Der nennenswerte Anteil wird in Zementwerken eingesetzt, im Jahr 2015 waren dies etwa 149.000 Mg [144]. Darüber hinaus wird fast die Hälfte der anfallenden tierischen Fette (250.000 Mg von 570.000 Mg insgesamt) zur Erzeugung von Biodiesel genutzt [206].

3.2.2.5 Sonstige Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen

In dieser Rubrik wurden die thermisch behandelten Anteile der Abfallmengen an Straßenkehrriecht, Park- und Gartenabfällen berücksichtigt.

3.2.3 Gewerbe- und Produktionsabfälle

Da die Gewerbe- und Produktionsabfälle in den Abfallbilanzen nicht detailliert beschrieben werden, mussten weitere Literaturquellen für die Quantifizierung der energetischen Verwertung dieser Stoffströme herangezogen werden. Darüber hinaus war es notwendig, die Mengen bestimmter Stoffgruppen so aufzuteilen, dass es nicht zu Doppelerfassungen kam. Dies wurde bei der Beschreibung der Stoffgruppen entsprechend vermerkt.

3.2.3.1 Holzabfälle

Holzabfälle entstehen in vielen unterschiedlichen Bereichen der Wirtschaft wie z. B. in der Forstwirtschaft, der Holzverarbeitenden Industrie oder dem Baugewerbe. Sie fallen als Produktionsreste, getrennt gesammelte Abfallfraktionen oder als Bestandteil anderer Abfallgemische an. Die Altholzverordnung gibt eine gute Übersicht über die einzelnen Holzfraktionen (Tabelle 3-11).

Tabelle 3-11 Verordnung über Anforderungen an die Verwertung und Beseitigung von Altholz (Altholzverordnung - AltholzV) - § 2 Begriffsbestimmungen

| | |
|--------------------------------|---|
| Altholz | Industrierestholz und Gebrauchtholz, soweit diese Abfall im Sinne des § 3 Absatz 1 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes sind |
| Industrierestholz | In Betrieben der Holzbe- oder -verarbeitung anfallenden Holzreste einschließlich der in Betrieben der Holzwerkstoffindustrie anfallenden Holzwerkstoffreste sowie anfallende Verbundstoffe mit überwiegendem Holzanteil (mehr als 50 Masseprozent) |
| Gebrauchtholz | Gebrauchte Erzeugnisse aus Massivholz, Holzwerkstoffen oder aus Verbundstoffen mit überwiegendem Holzanteil (mehr als 50 Masseprozent) |
| Altholzeinteilung in 4 Klassen | |
| Altholz AI | Naturbelassenes oder lediglich mechanisch bearbeitetes Altholz, das bei seiner Verwendung nicht mehr als unerheblich mit holzfremden Stoffen verunreinigt wurde |
| Altholz AII | verleimtes, gestrichenes, beschichtetes, lackiertes oder anderweitig behandeltes Altholz ohne halogenorganische Verbindungen in der Beschichtung und ohne Holzschutzmittel |
| Altholz AIII | Altholz mit halogenorganischen Verbindungen in der Beschichtung ohne Holzschutzmittel |
| Altholz AIV | Mit Holzschutzmitteln behandeltes Altholz, wie Bahnschwellen, Leitungsmasten, Hopfenstangen, Rebpfähle, sowie sonstiges Altholz, das aufgrund seiner Schadstoffbelastung nicht den Altholzkategorien A I, A II oder A III zugeordnet werden kann, ausgenommen PCB-Altholz |

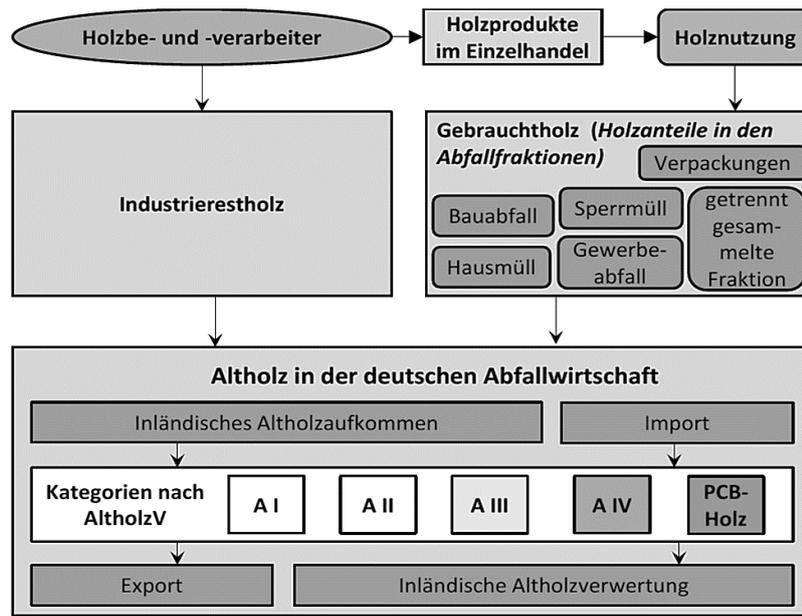
Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus der Altholzverordnung

Das folgende Schaubild (Abbildung 3-37) gibt einen Überblick über die Nutzungspfade von Altholz in Deutschland.

Da sich diese Ausarbeitung auf die energetischen Potenziale des Abfalls bezieht, wurden im weiteren Verlauf nur die energetisch genutzten Altholzmengen betrachtet.

Die Althölzer, die Bestandteil der separat betrachteten Abfallfraktionen Verpackungen, Sperrmüll, Hausmüll und Bauabfall sind, wurden zur Vermeidung von Doppelnennungen in diesem Kapitel nicht betrachtet und aus der anfallenden Gesamtmenge entsprechend herausgerechnet.

Abbildung 3-37 Nutzungspfade von Altholz in Deutschland [207]

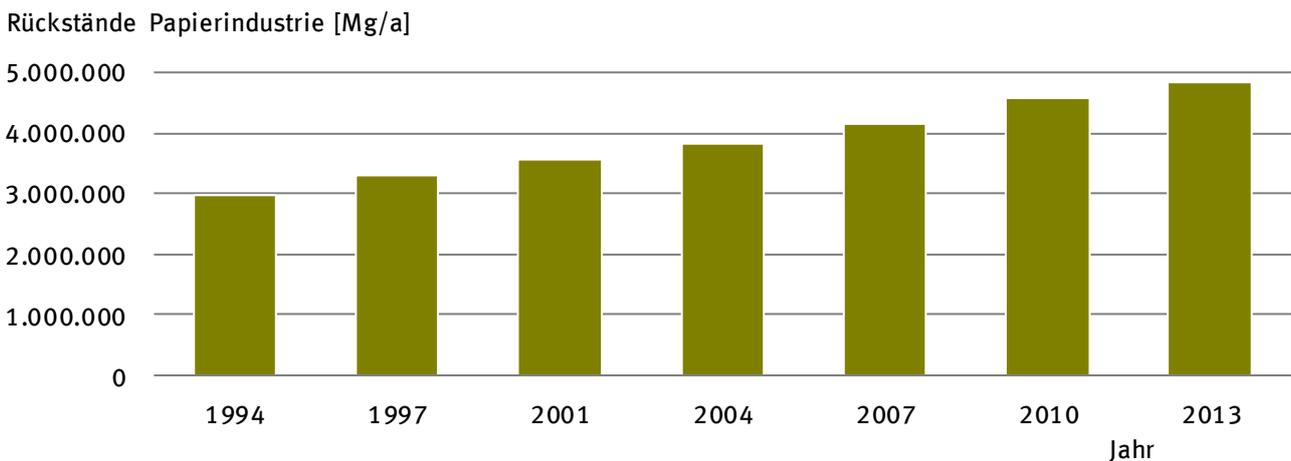


Ausgehend von einer Altholzgesamtmenge von rund 11 Mio. Mg/a verblieben dann noch 3,95 Mio. Mg, die hier entsprechend angesetzt wurden. Zur Bestimmung dieser Holzmenge wurden u. a. die Ausführungen von GVM [199], Mantau [208], [209] und Kreislaufwirtschaft Bau [210] berücksichtigt.

3.2.3.2 Faserabfälle

Da die Faserabfälle in der Destatis Abfallbilanz nicht gesondert aufgeführt werden, wurde die Menge an Rückständen aus den Papierfabriken zur energetischen Verwertung bzw. thermischen Behandlung einer Umfrage der Papier Technischen Stiftung (PTS) aus dem Jahr 2014 [211] entnommen.

Abbildung 3-38 Mengen an Rückständen (lutro) aus der deutschen Zellstoff- und Papierindustrie [211]



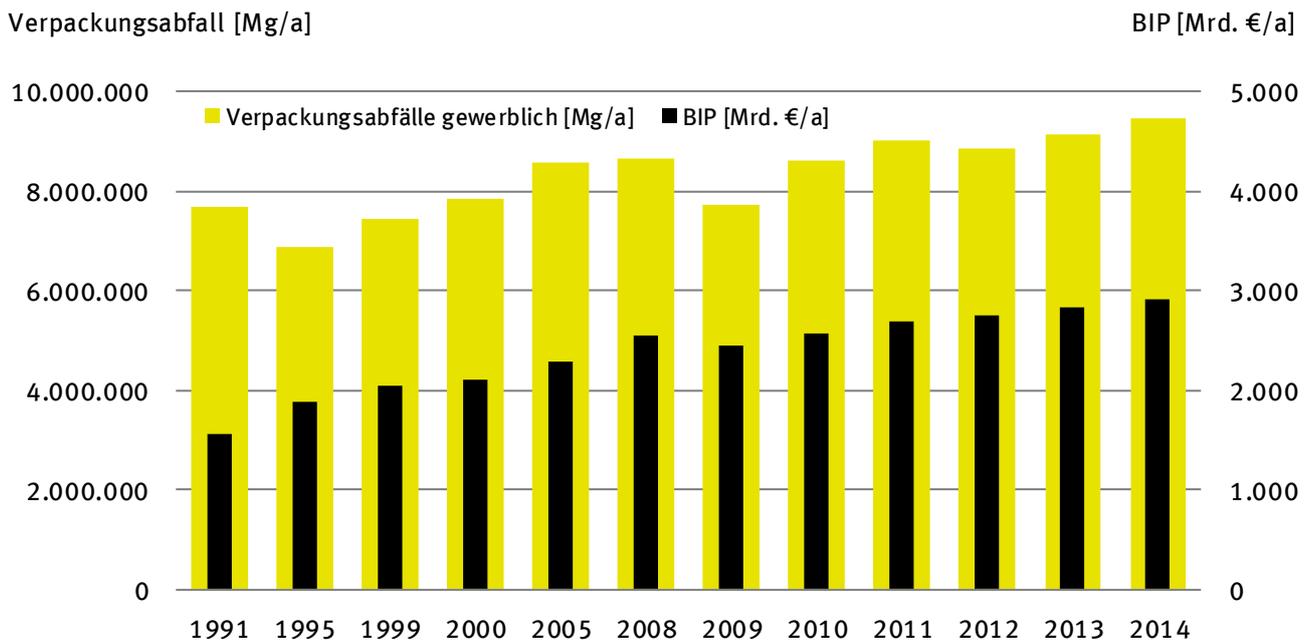
Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [211]

Die Gesamtmenge an Faserabfällen in der deutschen Zellstoff- und Papierindustrie belief sich 2013 auf rund 4,8 Mio. Mg. Davon wurden 50% bzw. 2,4 Mio. Mg in betriebsinternen oder externen Anlagen energetisch verwertet.

3.2.3.3 Verpackungsabfälle gewerblich

Die Angaben zu den gewerblichen Verpackungsabfällen wurden, wie auch die Mengenermittlung der Verpackungsabfälle für private Endverbraucher, der GVM – Studie 2014 [199] entnommen. Die rund 9,4 Mio. Mg an gewerblichen Verpackungsabfällen (Glas, Metalle, PPK, Kunststoffe, Verbunde, etc.) wurden zum Großteil sortiert und vorbehandelt und dann anteilig recycelt, energetisch verwertet oder thermisch behandelt.

Abbildung 3-39 Entwicklung des Verpackungsverbrauchs gewerblicher Endverbraucher (alle Materialien) und BIP [199]



Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [199]

3.2.3.4 Sonstige Produktions- und Gewerbeabfälle zur energetischen Verwertung

Die Ermittlung dieses Abfallstromes ist aufgrund der heterogenen Zusammensetzung aus einer Vielzahl von Einzelabfallströmen, die direkt oder nach einer Vorbehandlung anfallen können, im Regelfall nur durch eine Schätzung möglich. Der hier verfolgte Ansatz wird im Folgenden dargelegt. Diese Abfallmengenposition für die thermische Behandlung und energetische Verwertung ist die einzige entsprechende Abfallgruppe, die anhand von Literaturdaten nicht ausreichend genau bestimmt werden kann. Durch die Bestimmung der Summe aller anderen, besser zu ermittelnden, Abfallfraktionen und durch den Abgleich dieser Gesamtmengenpositionen mit den ermittelten thermisch-/ energetischen Gesamtkapazitäten lässt sich ein Saldo berechnen, der die gesuchte Abfallmenge näherungsweise wiedergibt. Auch der so hergeleitete Wert wird nicht genau die Realität widerspiegeln, aber er kann die gesuchten Mengen vergleichsweise gut abbilden.

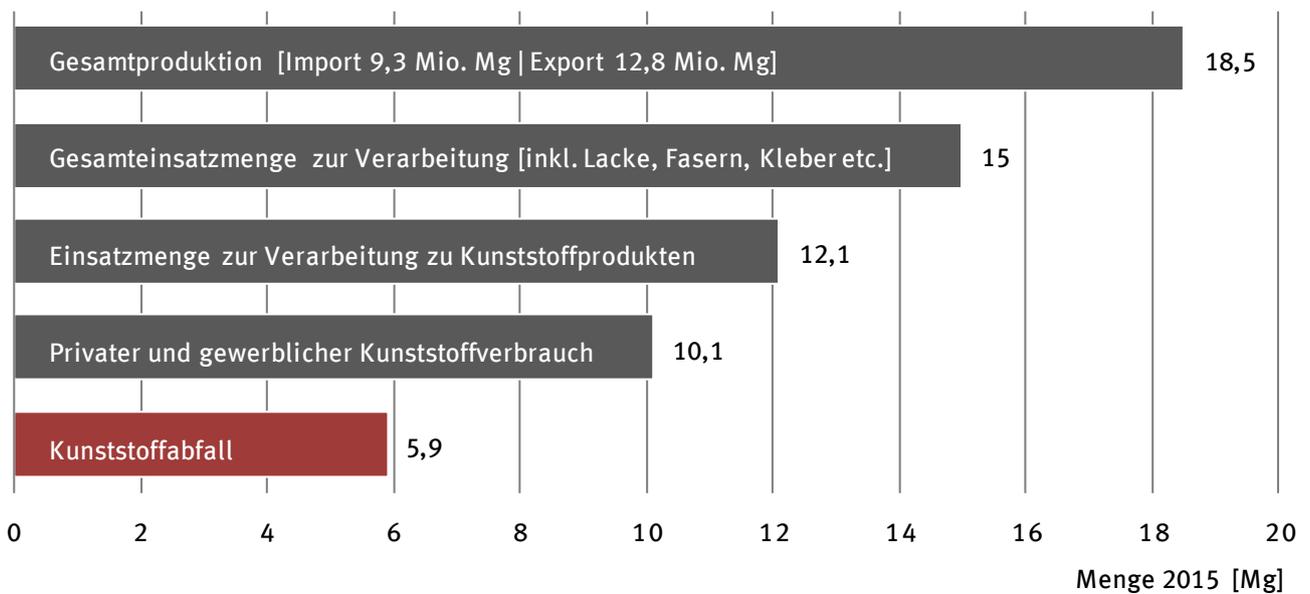
Es sei hier angemerkt, dass die unter dieser Position ausgewiesene Menge nicht der in Abfallwirtschaftskreisen oft diskutierten Gesamtmenge an gemischten Gewerbeabfällen entspricht. Große Mengenanteile dieser gemischten Gewerbeabfälle sind bereits in anderen hier aufgeführten Abfallfraktionen, wie z. B. Holz, Verpackungen oder Kunststoffe anteilig enthalten. Zudem sind unter diesem Punkt auch betriebsinterne Abfallströme zur Beschickung von Industriekraftwerken zusammengefasst.

Das hat den Vorteil, dass dadurch evtl. Unschärfen bei den z. T. notwendigen Mengenabschätzungen möglichst geringgehalten werden konnten. Aus diesem Grund wurde die Bezeichnung dieser Position auch bewusst mit dem Attribut „sonstige“ angepasst.

3.2.3.5 Sonstige Kunststoffabfälle

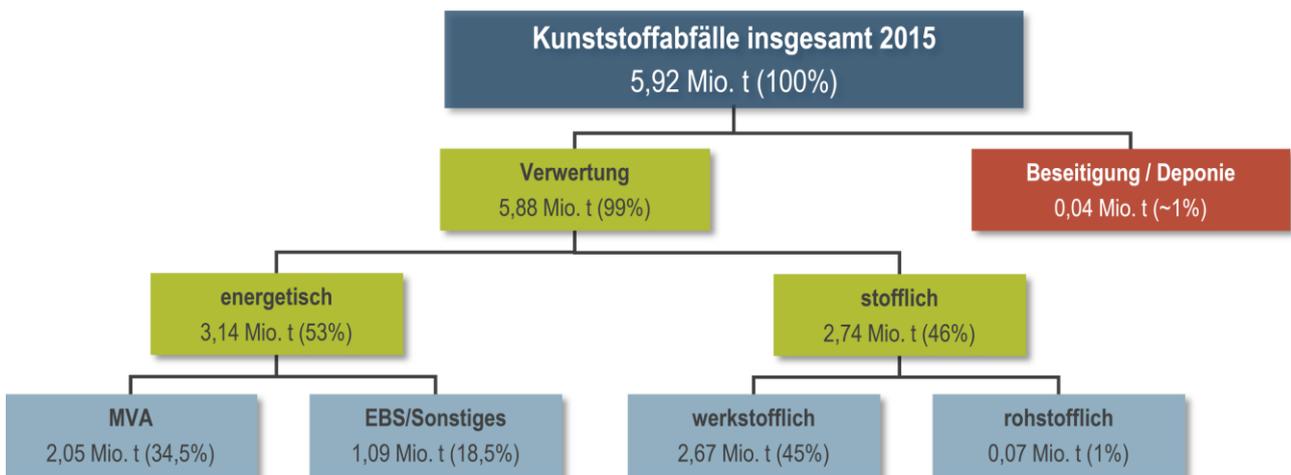
Die Mengenermittlung der anfallenden thermisch behandelten oder energetisch verwerteten sonstigen Kunststoffabfallmengen (ohne die Verpackungsmengen sowie Kunststoffe aus dem Bauabfall) erfolgt auf Basis der Angaben der Studie von Consultic [212] für das Jahr 2015.

Abbildung 3-40 Übersicht Produktion, Verarbeitung, Verbrauch und Verwertung von Kunststoffen 2015 [212]



Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [212]

Abbildung 3-41 Kunststoffabfallentsorgung in Deutschland 2015 im Überblick [212]



Quelle: [212]

Das Schaubild Abbildung 3-40 zeigt die Mengenverteilung der Kunststoffe von der Herstellung bis zum Kunststoffabfall. Kunststoffabfälle fallen als Produktionsrest, als getrennt erfasster Abfallstrom oder in Mischfraktionen an. Insgesamt handelt es sich nach den Angaben von Consultic um rund 5,9 Mio. Mg/a, die im Jahre 2015 entsprechend Abbildung 3-41 (Angaben von Consultic) entsorgt wurden.

Es ist festzustellen, dass in 2015 99 % der hier aufgeführten Kunststoffabfälle entweder recycelt oder energetisch verwertet wurden. Die in der Studie aufgeführten Kunststoffuntergruppen und ihre Mengenanteile zur energetischen Verwertung bzw. thermischen Behandlung wurden um die Mengenströme bereinigt die bereits an anderer Stelle berücksichtigt wurden.

Es wurden daher die sonstigen Kunststoffabfallmengen nach [Tabelle 3-12] in der weiteren Berechnung der Abfallmengen für die energetische Verwertung bzw. thermische Behandlung angesetzt.

Tabelle 3-12 „Sonstige Kunststoffabfälle“ (eigene Berechnung auf Basis der Zahlen von [212])

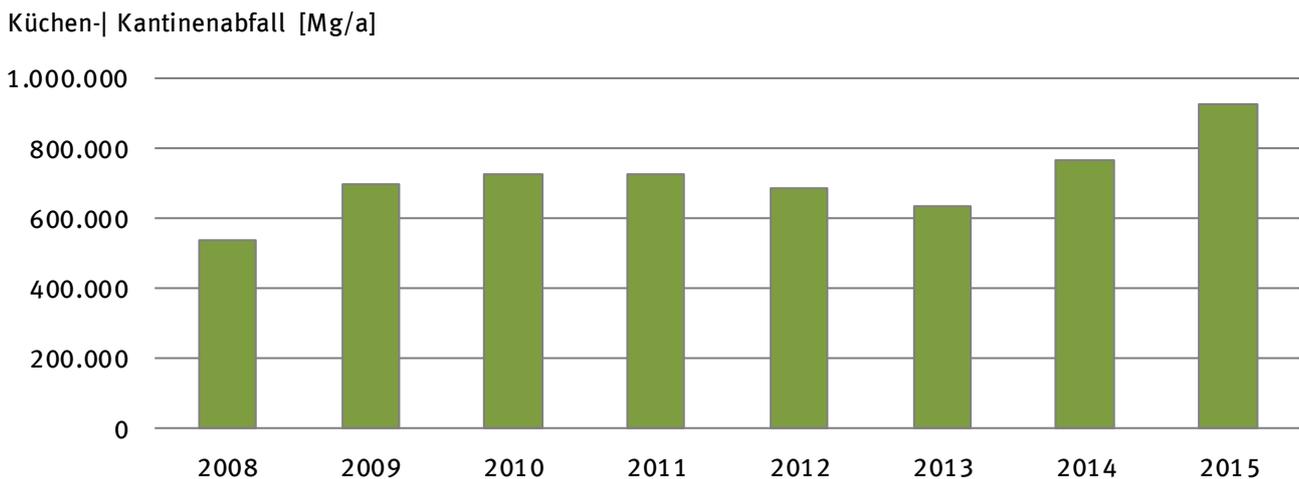
| Sonstige Kunststoffabfälle [Mg/a] | Menge | Recycling | Energie | Beseitigung |
|---|-----------|-----------|-----------|-------------|
| Gewerbeabfälle über private Entsorger | 1.162.000 | 311.000 | 838.000 | 13.000 |
| Schredderbetriebe incl. Autoverwerter & Werkstätten | 197.000 | 43.000 | 148.000 | 6.000 |
| Sonstige Sammlungs- und Verwertungssysteme | 109.000 | 92.000 | 17.000 | 0 |
| E-Schrott Privathaushalte & Gewerbe | 188.000 | 23.000 | 165.000 | 0 |
| Kunststoffproduzenten | 60.000 | 40.000 | 18.000 | 2.000 |
| Kunststoffverarbeiter | 856.000 | 777.000 | 77.000 | 2.000 |
| Summe | 2.572.000 | 1.286.000 | 1.263.000 | 23.000 |

Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [212]

3.2.3.6 Küchen- und Kantinenabfälle

Die Küchen- und Kantinenabfallmengen wurden an Hand der Destatis-Abfallbilanz 2015 [198] ermittelt und um Angaben im Biogas-Atlas 2014/15 von Kern und Raussen [4] ergänzt. Die Mengenentwicklung der letzten Jahre wird in Abbildung 3-42 dargestellt.

Abbildung 3-42 Mengenentwicklung der Küchen- und Kantinenabfälle 2008 – 2015 nach [198]



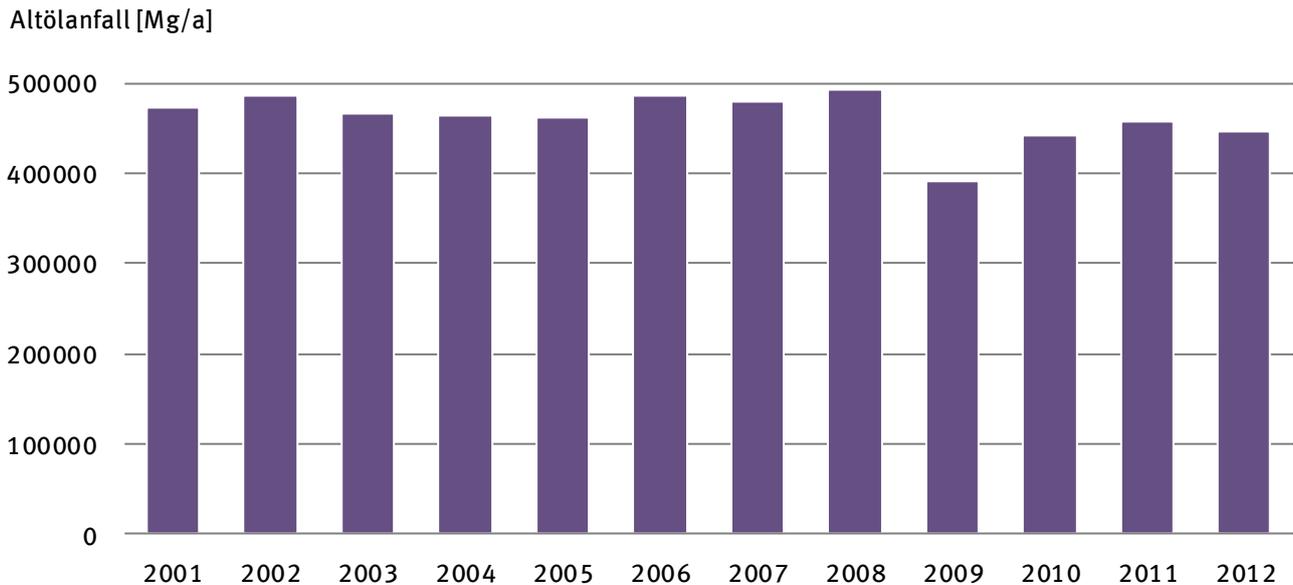
Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [198]

Küchen- und Kantinenabfälle wurden anteilmäßig den aus dem Biogas-Atlas 2014/15 von Kern und Raussen entnommenen Vergärungsanlagen- sowie Kompostierungsanlagenkapazitäten [4] für gewerbliche Bioabfälle zugerechnet. Geringere Mengen wurden auch direkt in Müllverbrennungsanlagen entsorgt.

3.2.3.7 Ölabfälle [Altöl]

Die Angaben zu den im Jahr 2014 angefallenen und energetisch verwerteten bzw. thermisch entsorgten Altölmengen wurden einer Information des bvse, Fachbereich Sonderabfallwirtschaft [213] entnommen. Das folgende Schaubild gibt einen Überblick zur historischen Entwicklung der angefallenen Altölmengen im Zeitraum 2001 – 2012. Die aktuellen Mengen aus 2014 (467.000 Mg) bewegen sich in einer ähnlichen Größenordnung wie in den Jahren zuvor.

Abbildung 3-43 Übersicht zur Mengenentwicklung der gesammelten Altölmengen in Deutschland im Zeitraum 2001 – 2011 [214]



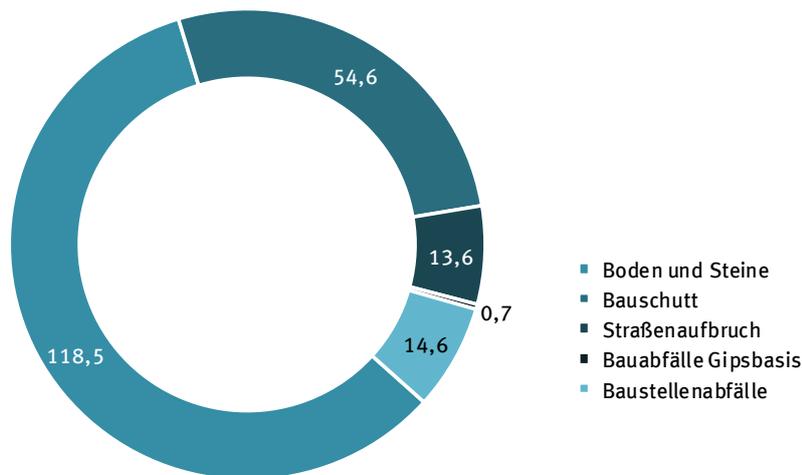
Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [214]

3.2.4 Bau- und Abbruchabfälle

Bei den Mengenangaben zu den Bau- und Abbruchabfällen wurden nicht der gesamte Abfallstrom, sondern nur die energetisch verwertbaren Anteile der Baustellenabfälle berücksichtigt. Hierbei handelt es sich überwiegend um Kunststoff- und Holzfraktionen. Die herangezogenen Abfallmengen basieren auf Daten von Kreislaufwirtschaft Bau [210] sowie den Mengenangaben aus der Destatis – Fachserie 19 für das Jahr 2015 [3]. Dieser wurden die getrennt gesammelten Mengen an Holz und Kunststoffen aus dem Baubereich (Abfallschlüsselnummern 170201 und 170202) entnommen. Zusätzlich wurde 25 % der dokumentierten Abfallmenge unter Abfallschlüsselnummer 170904 (gemischte Bau- und Abbruchabfälle) angerechnet, da im Monitoringbericht von Kreislaufwirtschaft Bau dieser Anteil als Holz und Kunststoff beschrieben wird [8].

Abbildung 3-44 und Abbildung 3-45 zeigen den Anteil (7,2%) der Baustellenabfälle am Gesamtaufkommen der Bau- und Abbruchabfälle sowie deren Entwicklung von 2008 bis 2014.

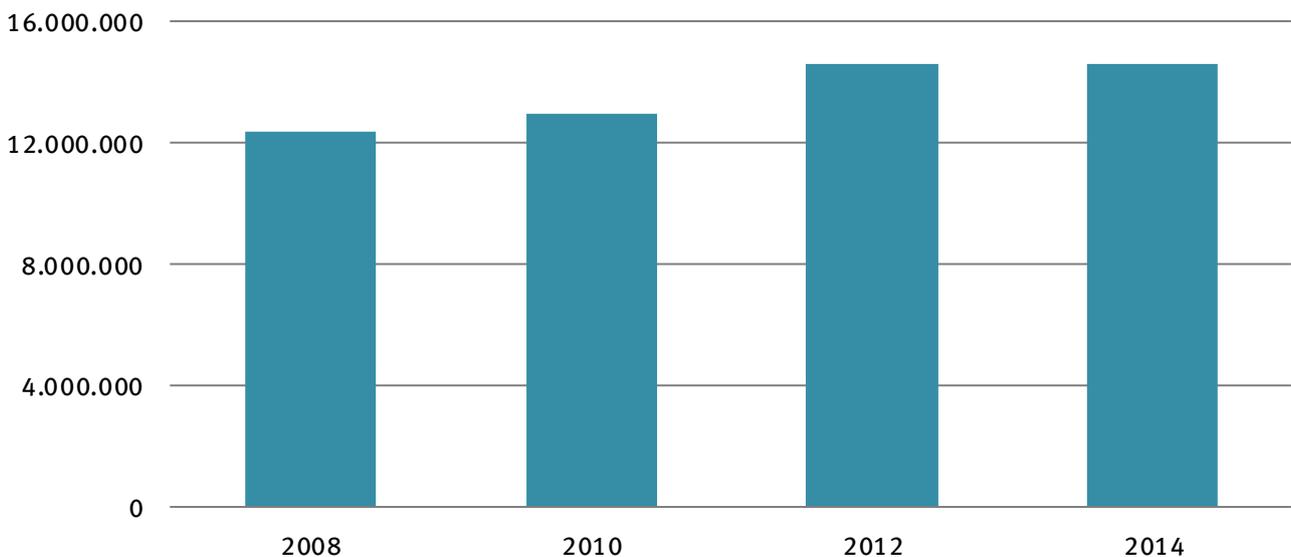
Abbildung 3-44 Bauabfälle 2014 [Mio. Mg]. Gesamtanfall 202 Mio. Mg [210]



Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [210]

Abbildung 3-45 Mengenentwicklung der Baustellenabfälle 2008 – 2014 [210]

Baustellenabfälle [Mg/a]



Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [210]

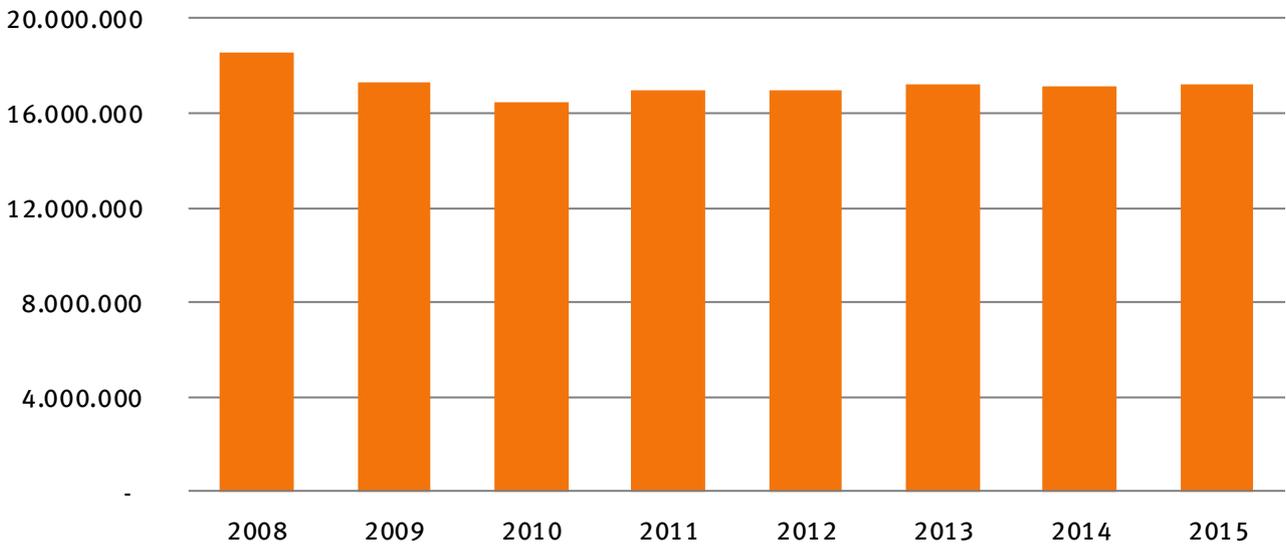
3.2.5 Gefährliche Abfälle

Die angefallenen und die thermisch-/energetisch entsorgten Mengen an gefährlichen Abfällen wurden der Destatis – Abfallbilanz 2015 entnommen. Dabei wurden nur die Primärabfälle, also die direkt an die thermisch-/energetischen Entsorgungsanlagen angelieferten Abfälle, betrachtet.

Die rund 1,7 Mio. Mg gefährliche Abfälle aus Behandlungsanlagen (Sekundärabfälle) wurden nicht berücksichtigt. Es wurde angenommen, dass diese Abfälle zum Großteil aus Produktionsbetrieben stammen. Eine Identifikation dieser Verwertungskapazitäten war im Rahmen dieser Studie nicht umsetzbar. Es wurde deshalb vereinfacht angenommen, dass sich die Mengen der nicht erfassten Kapazitäten zur Entsorgung gefährlicher Produktionsabfälle und der nicht berücksichtigten gefährlichen Sekundärabfälle aus der Destatis – Abfallbilanz ausgleichen.

Abbildung 3-46 Mengenentwicklung gefährlicher Abfälle (ohne Sekundärabfälle) in Deutschland 2008 – 2015 [198]

Gefährliche Abfälle ohne Sekundärabfälle [Mg/a]



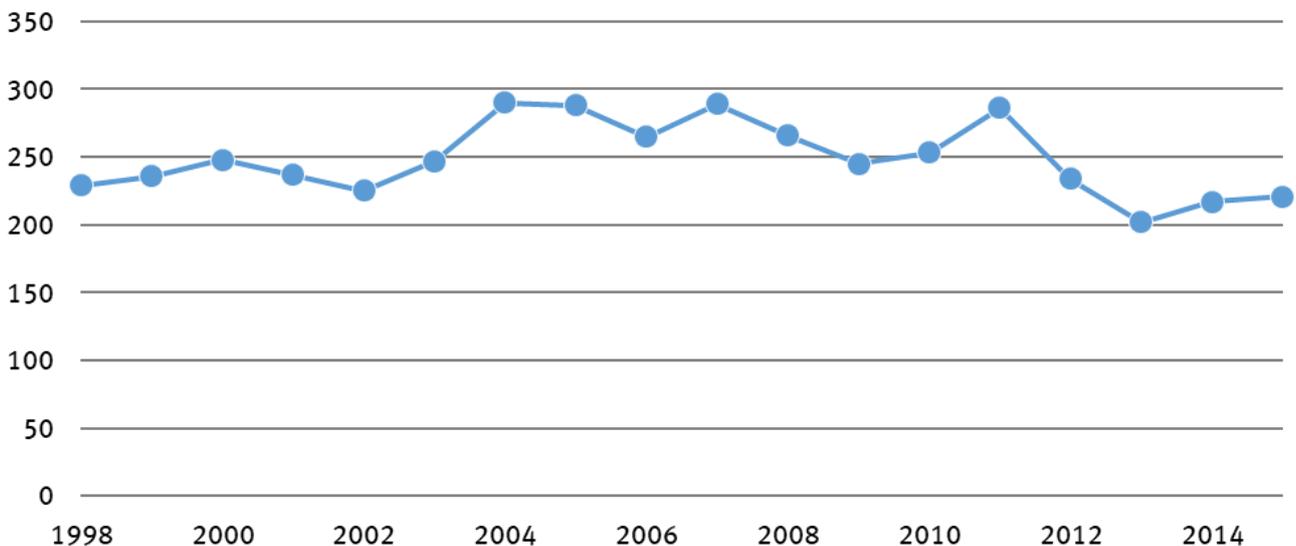
Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [198]

3.2.6 Altreifen

Jährlich fallen in Deutschland etwa 570.000 Mg Altreifen an, welche entweder stofflich oder energetisch verwertet werden. Die thermische Nutzung beschränkt sich fast ausschließlich auf die Verbrennung in Zementwerken, wo zwischen 35 und 40 % (2012 bis 2015), etwa 220.000 Mg, der anfallenden Reifenmenge verbrannt wurden [140–144,215–229]. Abbildung 3-47 zeigt die in Zementwerken eingesetzte Menge an Altreifen seit 1998.

Abbildung 3-47 In deutschen Zementwerken eingesetzte Altreifen [140–144,215–226]

Altreifen [1.000 Mg]



Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [140-144,215-226]

3.2.7 Sonstige

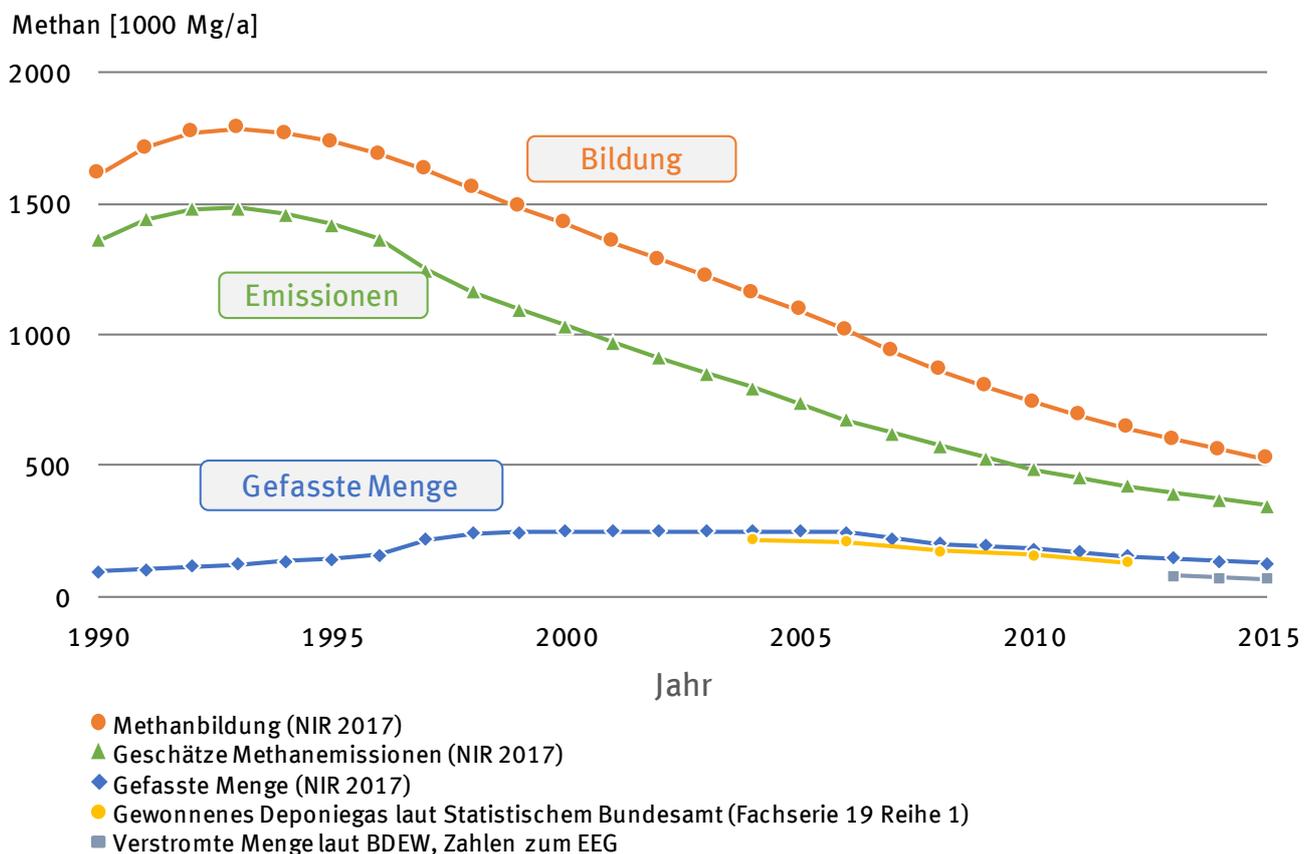
Unter dem Punkt „Sonstige“ wurden nicht näher definierte Inputfraktionen der MBA-Anlagen aufgenommen, um sie in der Bilanz berücksichtigen zu können.

3.2.8 Deponiegas

Deponiegas entsteht durch die anaerobe Vergärung biologischen Materials in deponiertem Abfall. Die Zusammensetzung ist abhängig vom Alter der Deponie, kann aber in der Regel auf die beiden Komponenten Methan (55-60 Vol.-%) und Kohlendioxid (40-45 Vol.-%) reduziert werden. Je nach Volumen der Deponie können Gasmengen von 100 bis mehreren tausend m³ pro Stunde anfallen [230,231].

Seit Juni 2005 dürfen in Deutschland keine unvorbehandelten Abfälle mehr deponiert werden, die einen nennenswerten Anteil organisch abbaubaren Materials enthalten, sodass die Methanemissionen aus Deponien nur auf die vor 2005 abgelagerten unbehandelten Abfälle zurückzuführen sind [232,233]. Entsprechend nimmt die Menge der Methanemissionen aus Deponien kontinuierlich ab.

Abbildung 3-48 Methanemissionen und gefasste Gasmengen aus Deponien [3,232,234–237]



Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [3,232,234-237]

Um das entstehende Gas nutzen zu können (und den ungehinderten Austritt in die Atmosphäre zu verhindern), wird es mit Hilfe von Entgasungseinrichtungen, die über den Deponiekörper verteilt sind, gefasst. Da in Deponienähe meist keine nennenswerte Wärmenachfrage herrscht, wird das Gas üblicherweise in einem BHKW verstromt. Sinken Menge und Qualität des Gases (auf z.B. weniger als 50 m³/h bei einem Methangehalt von 40 %), so ist der wirtschaftliche Betrieb vieler BHKWs nicht mehr möglich und das Deponiegas wird entsorgt, d.h. abgefackelt. Abbildung 3-48 zeigt den Verlauf der Methanemissionen sowie der gefassten Gasmenge seit 1990. Hierbei ist anzumerken, dass die Werte

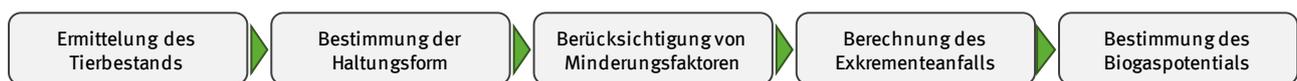
teilweise auf Schätzungen und interpolierten Daten beruhen und zur den gesamten Methanemissionen keine genauen Messwerte vorliegen.

Laut des Nationalen Inventarberichts 2017 [234] lag die Methanbildung aus Deponien im Jahre 2015 bei etwa 523 Tausend Tonnen. Etwa 24 % davon, 125 Tausend Tonnen Millionen m³, wurden gefasst und energetisch genutzt bzw. abgefackelt. Dies ist konsistent mit Angaben zur eingespeisten Strommenge aus Deponiegas-BHKWs, welche im Jahr 2015 bei 479 Millionen kWh lag [236]. Unter der Annahme eines elektrischen Wirkungsgrades von 40 % lässt sich damit auf eine verstromte Methanmenge von knapp hundert Millionen m³ schließen.

3.2.9 Gülle und Festmist

Die Betrachtung der Energieerzeugung aus tierischen Exkrementen beschränkt sich auf die Erzeugung (und Nutzung) von Biogas. Die direkte Verbrennung von Mist wird nicht berücksichtigt. Da Gülle und Festmist keine klassischen Abfälle, sondern landwirtschaftliche Nebenprodukte sind, werden die für die Quantifizierung des energetischen Potenzials nötigen Abschätzungen und Berechnungen nicht im Haupttext, sondern im Anhang A 3.2.7 erläutert. Eine allgemeine Übersicht des Vorgehens findet sich in Abbildung 3-49.

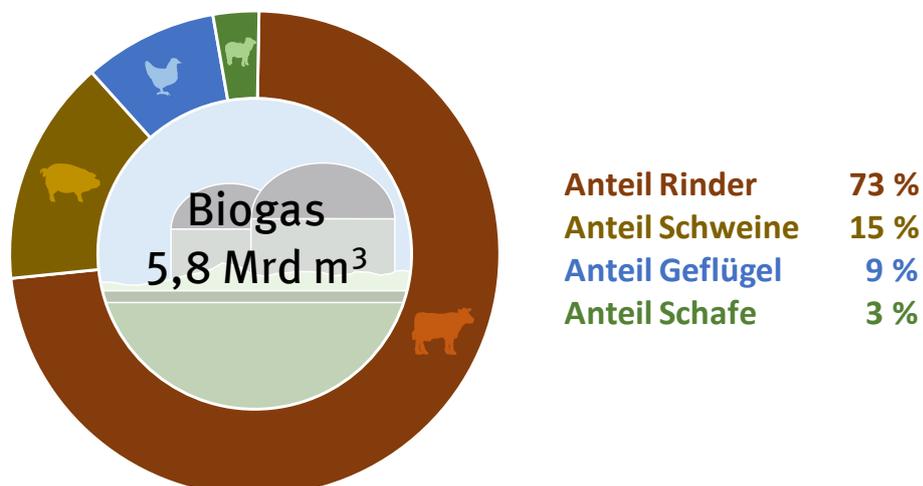
Abbildung 3-49 Allgemeine Vorgehensweise zur Bestimmung des Biogaspotentials



Quelle: Eigene Darstellung

Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Abbildung 3-51 als jährliches Biogaspotenzial zusammengefasst. Hierzu wurden die im Anhang A 3.2.7 erläuterten Annahmen und typischen Rahmendbedingungen zugrunde gelegt. Es ergibt sich ein Potenzial von 3,3 Milliarden m³ Methan (5,8 Mrd. m³ Biogas) bzw. 119 PJ (bei einem Energiegehalt von Methan von 36 MJ/m³) für Deutschland im Jahr 2014. Dieses Potenzial, bzw. die zu Grunde liegende Menge an Gülle und Mist (203.626.971 Mg) ist, verglichen mit den in [274] angegebenen 309.522.716 m³, deutlich geringer (für den Vergleich kann eine Dichte von 1.000 kg/m³ angenommen werden). Bei der Berechnung des letzteren wurden allerdings keine Einteilungen der Tiere in Altersgruppen oder verschiedene Haltungsformen vorgenommen und auch keine Minderungsfaktoren berücksichtigt.

Abbildung 3-50 Biogaspotenzial aus Tierexkrementen im Jahr 2014



Quelle: Eigene Darstellung

3.3 Energie aus Abfall

3.3.1 Übersicht Abfallströme

Tabelle 3-13 und Abbildung 3-51 zeigen den Versuch, die Massenströme der brennbaren Abfälle in Deutschland zumindest grob in einem Übersichtsschema darzustellen. Im Folgenden wird zunächst erläutert, welche Methodik dieser Darstellung zugrunde liegt und wie das Datengerüst entwickelt wurde.

In einem ersten Schritt wurden die verfügbaren Informationen zu den Anfallmengen der in Kapitel 3.2 im Einzelnen diskutierten Abfallströme zusammengetragen. Gleichzeitig wurden die Einsatzmengen in die Behandlungsanlagen für Abfälle (vgl. Kapitel 3.1) recherchiert bzw. über Betreiberbefragungen ermittelt. Bei der Gegenüberstellung dieser Informationen musste festgestellt werden, dass die statistischen Informationen in vielen Bereichen nicht konsistent sind, sodass eine klare Zuordnung zwischen den angefallenen Abfällen und den verschiedenen Anlagenarten nicht ohne weiteres möglich ist.

Tabelle 3-13 enthält das recherchierte Datenmaterial in Form eines Flussdiagramm zwischen Abfallanfall und energetischer Verwertung. In Spalte A ist das Abfallaufkommen, also der Input in das System, aufgeführt (entspricht der linken Säule in Abbildung 3-51). Viele der in Spalte A gelisteten Abfälle werden nicht direkt einer energetischen Nutzung zugeführt, sondern durchlaufen zum Teil mehrere Aufbereitungsschritte (z.B. MBA, LVP-Sortierung etc.), in denen die Abfallfraktionen durch vorwiegend mechanische Prozesse aufgetrennt und daraus neue Stoffströme erzeugt werden, die im Anschluss unterschiedliche Behandlungs- und Verwertungswege durchlaufen.

Diese Behandlungskaskaden sind ein wesentlicher Grund, warum eine statistische Transparenz für das Abfallwirtschaftssystem nur schwer herzustellen ist. Dementsprechend wird in Tabelle 3-13 auch nicht der Versuch unternommen, die anfallenden Abfallströme auf konkrete energetischen Verwertungspfade zu verteilen. Hierzu fehlen die notwendigen Informationen.

Es handelt sich hier vielmehr um ein bilanzielles System. Diese Bilanz ist so angelegt, dass die Gesamtmasse, die in die finale Behandlungsstufe eingebracht wird (Spalte C), mit jener übereinstimmt, die nach der letzten Aufbereitungsstufe der Abfälle vorliegt (Spalte B und rechte Säule in Abbildung 3-51). Dabei wurde die Einsatzmenge in die finale Behandlung von 48.097.423 Mg (Spalte C) als Leitgröße verwendet, da die anlagenspezifische Datenlage als relativ gut zu bewerten ist (Betreiberbefragungen, Dokumentationen der Anlagen im Zusammenhang mit Emissionsschutzrecht oder Netzverwaltung). Leitgröße bedeutet, dass das Bilanzdefizit zwischen Spalte B und C durch zusätzlich in das System eingebrachte Gewerbeabfallmengen (vgl. Zielfeld mit roter Ziffer „4.265.881“) ausgeglichen wurde. Dieses Vorgehen ist deshalb statthaft, weil die Gewerbeabfälle nicht statistisch erfasst werden und das festgestellte Defizit auf der Inputseite also im Bereich der Gewerbeabfälle liegen muss. Da im Rahmen der Studie sicherlich nicht alle energetischen Verwertungsanlagen ermittelt werden konnten, dürfte dieses Bilanzdefizit – und damit auch die Menge des angefallenen Gewerbeabfalls – in Wirklichkeit noch höher liegen.

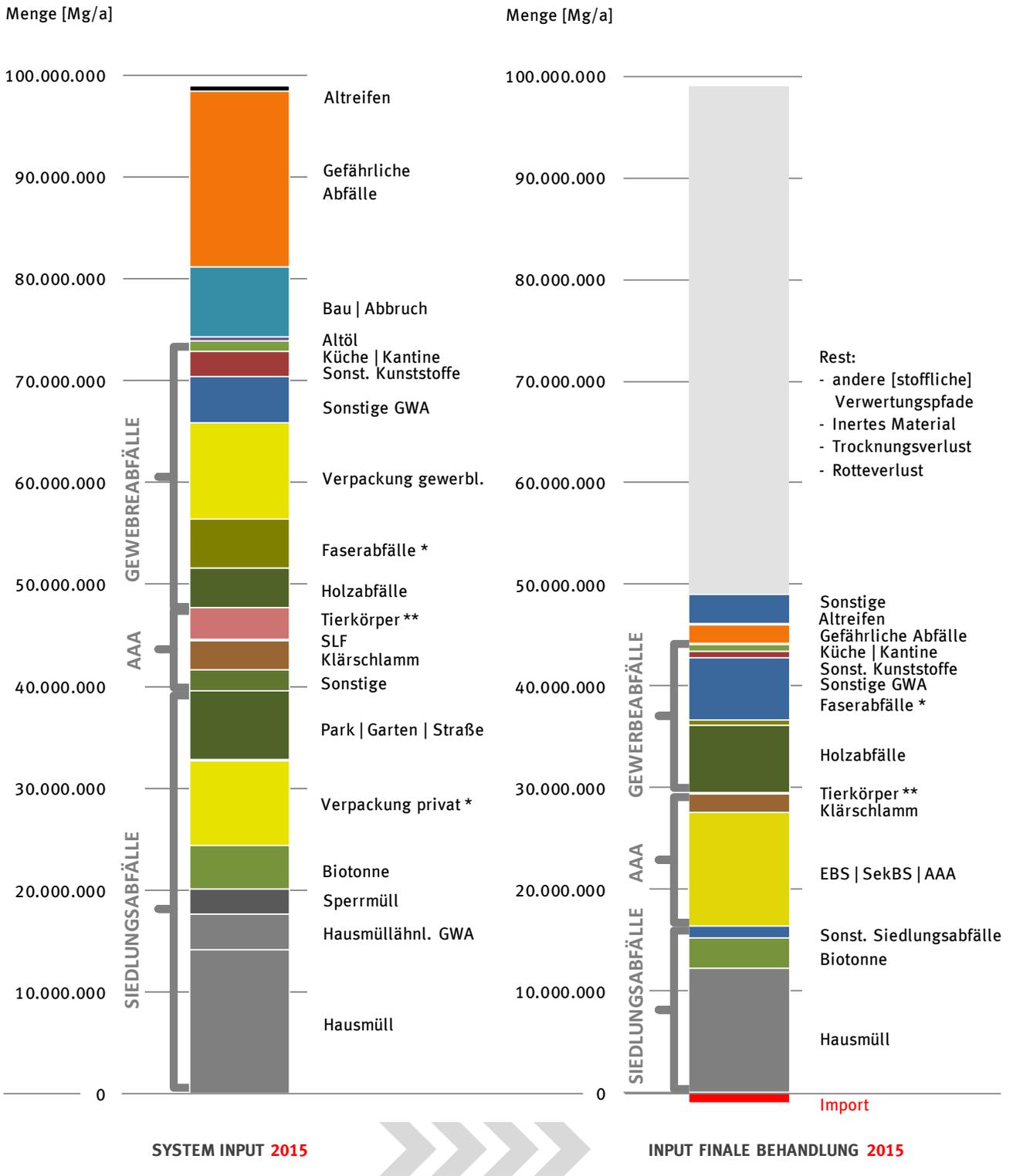
Ein Vergleich mit den Daten des statistischen Bundesamtes zeigt eine erhebliche Abweichung. Dort wurden (für das Jahr 2014) insgesamt 51.469.000 Mg an Abfällen ausgewiesen, die energetisch verwertet oder thermisch beseitigt wurden, davon 16.942.000 Mg Sekundärabfälle. Im Vergleich zu den in Tabelle 3-13 aufgeführten rund 48 Mio. Mg ergibt sich hier ein Unterschied von etwa 3,5 Mio. Mg. Werden davon rund 1,7 Mio. Mg gefährliche Sekundärabfälle abgezogen, die auch in dieser Ausarbeitung nicht berücksichtigt wurden (siehe Abschnitt 3.2.5), verbliebe noch ein Defizit von 1,8 Mio. Mg.

Tabelle 3-13 Darstellung der in Deutschland anfallenden und behandelten Abfallströme mit energetisch nutzbaren Anteilen [Mg] (Stoffströme mit vollständige inerten Materialien, wie Glas, Metall oder Mineralik, sind nicht berücksichtigt). Referenzjahr 2015 (*2014, **2016)

| 2015 | INPUT SYSTEM A | | | | | | | | | | VORBEHANDLUNG AUFBEREITUNGSSCHRITTE | | | | | | | | | | FINALE BEHANDLUNG THERMISCH | | | | | | | | | | BIOL. |
|--|----------------|-----------|-----------|------------|------------------|-------------------|----------------|-----------------|-------------------|-------------------------|-------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--|-----------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|-------|
| | Aufkommen | | MBA Input | MBA Output | Verpackung Input | Verpackung Output | Sonstige Input | Sonstige Output | nach Aufbereitung | Input finale Behandlung | MVA | EBS-KW | SMVA | BMKW | KVA | ZW | KKW | IKW | BGA | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Siedlungsabfälle | 41.629.000 | 3.412.020 | | | 8.345.000 | | 13.360.888 | | 16.511.092 | 16.442.998 | 12.708.671 | 710.559 | | | | | | | 3.023.767 | | | | | | | | | | | | |
| Gemischte Siedlungsabfälle (Hausmüll) | 14.147.000 | 3.144.840 | | | | | | | 11.002.160 | 12.224.778 | 11.696.563 | 528.215 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Spermill | 2.495.000 | 188.340 | | | | | 1.522.396 | | 784.264 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Abfälle aus der Biotonne | 4.232.000 | 78.840 | | | | | 1.129.393 | | 3.023.767 | | | | | | | | | | 3.023.767 | | | | | | | | | | | | |
| Verpackungsabfälle (Verkaufsverpackungen) * | 8.345.000 | | | | 8.345.000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Marktabfälle | 60.000 | | | | | | 52.800 | | 7.200 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Straßenkehricht, Park- und Gartenabfälle | 6.757.000 | | | | | | 6.685.600 | | 71.400 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Hausmüllähnliche Gewerbeabfälle | 3.506.000 | | | | | | 2.436.700 | | 1.069.300 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Sonstige ASN 20 | | | | | | | | | | 1.194.452 | 1.012.108 | 182.344 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Sonstige | 2.087.000 | | | | | | 1.534.000 | | 553.000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen | 6.085.470 | 420.480 | 2.584.200 | | 4.689.000 | | 3.229.863 | 3.555.876 | 13.264.204 | 13.081.114 | 4.947.980 | 4.311.362 | | 957.932 | 2.020.000 | 843.841 | | | | | | | | | | | | | | | |
| Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen | | 420.480 | 2.584.200 | | 4.689.000 | | | | 2.163.720 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| EBS/ SekBS | | | | | | | | | 7.825.872 | | | | | | | 1.489.000 | 671.600 | | | | | | | | | | | | | | |
| Klärschlamm [TM] | 2.855.607 | | | | | | | | 2.855.607 | 1.772.019 | 196.463 | 63.383 | | 957.932 | 382.000 | 172.241 | | | | | | | | | | | | | | | |
| Schneedeichtfraktion | 150.600 | | | | | | 150.600 | 49.698 | 49.698 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Tierische Nebenprodukte ** | 3.079.263 | | | | | | 3.079.263 | 200.707 | 200.707 | 149.000 | | | | | | 149.000 | | | | | | | | | | | | | | | |
| Sonstige | | | | | | | | 168.600 | 168.600 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Gewerbe- und Produktionsabfälle | 26.615.581 | 346.020 | | | 9.432.700 | | 5.965.960 | 779.326 | 11.690.227 | 14.649.217 | 49.000 | | | 6.579.671 | 771.000 | 530.220 | 6.100.000 | 619.326 | | | | | | | | | | | | | |
| Holzabfälle (o. Verpack. Sperm- Hausmüll) [Baubf.] | 3.950.000 | | | | | | 790.000 | | 3.160.000 | 6.579.671 | | | | 6.579.671 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Faserabfälle Papierschlamm* | 4.800.000 | | | | | | 2.400.000 | | 2.400.000 | 623.220 | | | | | 93.000 | 530.220 | | | | | | | | | | | | | | | |
| Verpackungsabfälle gewerblich | 9.432.700 | | | | 9.432.700 | | | | | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Sonstige Prod./Gewerbeabfälle zur energ. Verw. * | 4.265.881 | 346.020 | | | | | | | 3.959.861 | 6.100.000 | | | | | | | 6.100.000 | | | | | | | | | | | | | | |
| Sonstige Kunststoffabfälle | 2.572.000 | | | | | | 1.286.000 | | 1.286.000 | 654.000 | | | | | 654.000 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Küchen-/Kantinenabfälle | 928.000 | | | | | | 879.000 | 619.326 | 668.326 | 668.326 | 49.000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Altfett | 200.000 | | | | | | 200.000 | 160.000 | 160.000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ölabfälle (Altöl) | 467.000 | | | | | | 410.960 | | 56.040 | 24.000 | | | | | 24.000 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Bau- und Abbruchabfälle (Brennbar - Holz/Kunststoff) | 6.900.000 | | | | | | 2.725.000 | | 4.175.000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Gräßliche Abfälle | 17.202.000 | | | | | | 14.768.000 | | 2.434.000 | 1.823.090 | 344.274 | 1.333.816 | | | 145.000 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Altreifen | 570.000 | | | | | | 350.000 | | 220.000 | 221.000 | | | | | 221.000 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Sonstige | | 197.100 | | | | | | | 197.100 | 2.848.011 | 1.955.544 | 692.121 | | | 65.000 | 135.346 | | | | | | | | | | | | | | | |
| DAVON AUS DEM AUSLAND | | | | | | | | | | -968.008 | -706.652 | -261.356 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| GESAMT | 99.002.051 | 4.375.620 | 2.584.200 | | 17.777.700 | | 40.399.711 | 4.335.202 | 48.097.422 | 48.097.423 | 19.298.817 | 5.452.687 | 1.333.816 | 6.579.671 | 957.932 | 3.222.000 | 1.509.407 | 6.100.000 | 3.643.093 | | | | | | | | | | | | |

Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 3-51 Darstellung der in Deutschland anfallenden und behandelten Abfallströme mit energetisch nutzbaren Anteilen (Stoffströme mit vollständige inertem Materialen, wie Glas, Metall oder Mineralik, sind nicht berücksichtigt). Referenzjahr 2015 (*2014, **2016)



© Flamme | Hanewinkel | Quicker | Weber | 2017

Quelle: Eigene Darstellung

3.3.2 Energiebereitstellung

In diesem Abschnitt wird die zum Bezugsjahr 2015 aus Abfällen in Form von Strom, Wärme und Dampf bereitgestellte Energiemenge dargestellt. Der in der Studie angewandten Methodik folgend, werden diese Werte anlagenspezifisch betrachtet. Dies erlaubt eine wesentlich genauere Aussage, als eine pauschale Hochrechnung auf Basis der mit starken statistischen Fehlern behafteten Abfallmengen, ohne Kenntnis des konkreten Verwertungsweges und damit des erzielten Wirkungsgrades.

Tabelle 3-14 Energie aus Abfall in Deutschland: Überblick und Zusammenfassung (Bezug 2015, soweit Daten verfügbar, inklusive Importanteil)

| 2015 | INPUT | | OUTPUT | | | NUTZUNGSGRAD | | | |
|------------|--------------|----------------|-------------------------|--------------|--------------|------------------|--------|-----------------|--------|
| | Masse [Mg/a] | Energie [PJ/a] | E _{ges} [PJ/a] | Wärme [PJ/a] | Strom [PJ/a] | η _{ges} | | η _{el} | |
| | | | | | | brutto | netto | brutto | netto |
| MVA | 20.005.469 | 205,05 | 109,53 | 79,77 | 29,76 | 53,4 % | 44,6 % | 14,5 % | 11,1 % |
| EBS-KW | 5.714.042 | 69,79 | 44,37 | 31,96 | 12,42 | 63,6 % | 60,1 % | 17,8 % | 14,7 % |
| SMVA | 1.333.816 | 21,92 | 14,21 | 13,78 | 0,43 | 64,9 % | 56,6 % | 2) | 2) |
| BMKW | 6.579.671 | 85,78 | 35,39 | 12,84 | 22,55 | 41,3 % | | | |
| KVA | 957.932 | 1) 37,12 | 3) 0 | 0 | 0 | | | | |
| ZW | 3.222.000 | 59,40 | 41,58 | 41,58 | 0 | 70 % | | | |
| KKW | 1.509.407 | 11,41 | 6,05 | 2,28 | 3,76 | 53,0 % | | 33 % | |
| IKW | 6.100.000 | 82,95 | 62,21 | 41,47 | 20,74 | 75,0 % | | 25 % | |
| BVGA | 3.643.093 | | 5,85 | 2,92 | 2,92 | | | | |
| MBA | 4.375.620 | | 0,06 | 0,03 | 0,03 | | | | |
| Σ | 53.441.050 | 573,42 | 319,25 | 226,64 | 92,62 | | | | |
| Biodiesel | 320.000 | | 11,84 | | | | | | |
| Deponiegas | 125.000 | | 1,72 | | 1,72 | | | | |
| Exkremente | 203.626.971 | | 86,00 | 41,00 | 45,00 | | | | |
| Σ | 257.513.021 | | 418,81 | 267,64 | 139,34 | | | | |

Anmerkungen

1) in vollgetrocknetem Zustand

2) aufgrund der geringen erzeugten Strommengen wird hier auf die Angabe eines Nutzungsgrades verzichtet

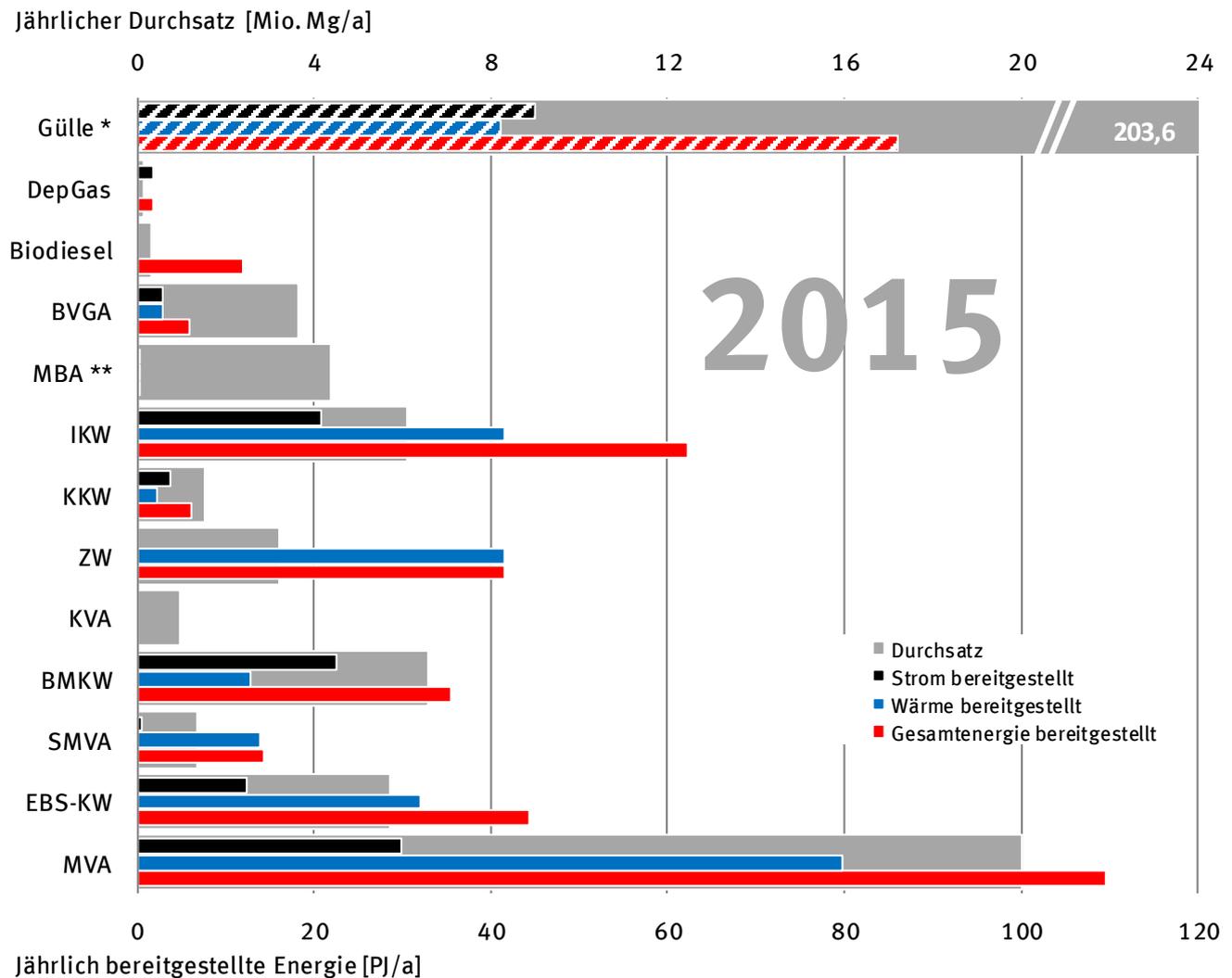
3) bei Einsatz von lediglich entwässertem Schlamm ist bilanziell kaum Energie rückgewinnbar

MVA = Müllverbrennungsanlage | EBS-KW = Ersatzbrennstoffkraftwerke | SMVA = Sondermüllverbrennungsanlagen
 BMKW = Biomassekraftwerke | KVA = Klärschlammverbrennungsanlagen | ZW = Zementwerke | KKW = Kohlekraftwerke | IKW = Industriekraftwerke | BVGA = Bioabfallvergärungsanlagen | MBA = Mechanisch-biologische Abfallbehandlung

Quelle: Eigene Darstellung

Die durch die Verwertungsanlagen bereitgestellten Energiemengen in Form von Wärme und Strom bzw. als Gesamtwert, wurden in Kapitel 3.1 hergeleitet und diskutiert.

Abbildung 3-52 Energie aus Abfall in Deutschland (Bezug 2015, soweit Daten verfügbar | * Die Werte für Gülle sind nicht umgesetzt sondern beschreiben das Potenzial |** für MBA ist nur die Energieerzeugung durch Vergärung berücksichtigt)



© Flamme | Hanewinkel | Quicker | Weber | 2017

Quelle: Eigene Darstellung

Die Betrachtung von Abbildung 3-52 zeigt deutlich, dass die höchste Versorgungsleistung von den Müllverbrennungsanlagen erbracht wird. Durch die MVA wird ca. ein Drittel der Gesamtenergie aus Abfällen bereitgestellt. Gemeinsam mit den EBS-Kraftwerken erhöht sich dieser Anteil auf fast 50 %. Ebenfalls einen hohen Beitrag zur Energieversorgung aus Abfällen leisten die Industriekraftwerke, wobei die unzureichende Datenlage hierbei zu beachten ist.

Interessant ist die Rolle der Zementwerke. Trotz der relativ geringen Einsatzmengen, von etwa 3,2 Mio. Mg/a an Abfällen, leisten die Anlagen einen bedeutenden Beitrag zur Substitution fossiler Brennstoffe. Dies ist dadurch begründet, dass der Energiegehalt der Brennstoffe durch den direkten Einsatz im Brennprozess von Zementwerken zu einem großen Anteil genutzt werden kann. Allerdings unterliegt der Abfalleinsatz in Zementwerken auch Limitierungen. Zunächst muss der mineralische Anteil der Brennstoffe mit der Klinkerzusammensetzung kompatibel sein. Außerdem sind die Einträge an Schwermetallen (vor allem Quecksilber) über die Brennstoffe ebenso zu minimieren wie die Konzentrationen an Chlor und Schwefel. Die Minderung der Quecksilbergehalte hat das Ziel, schädliche Emissionen zu vermeiden. Chlor und Schwefel wirken sich auf den Produktionsprozess und im Fall von Chlor auch auf das Produkt negativ aus. Für die Überwachung dieser und anderer relevanter Parameter

sind in den letzten Jahren geeignete Qualitätssicherungskonzepte in den Zementwerken eingeführt und umgesetzt worden.

Auffällig ist auch der für den Durchsatz von 1,3 Mio. Mg relativ hohe energetische Beitrag der Verbrennungsanlagen für gefährliche Abfälle. Dies liegt daran, dass die meisten Anlagen Dampf exportieren und somit kaum Wirkungsgradverluste im eigenen Bilanzkreis haben.

Der Beitrag der biologischen Verfahren, also MBA und Bioabfallvergärung, ist relativ gering (< 6 PJ/a). Dies gilt mit 0,06 PJ/a insbesondere für die MBA-Anlagen mit Vergärungsstufe. Klärschlamm wurde hier nicht weiter betrachtet, da der Energiegehalt von entwässertem Schlamm – und auf diesen Zustand ist die Bilanzierung zu beziehen – nicht ausreicht, um einen Energieexport (ohne den Einsatz von Zusatzwärme zur Trocknung) zu realisieren.

Tierische Exkremeente stellen dagegen ein großes und wenig genutztes Energiepotenzial dar. Dies wird bereits durch den immensen Massenstrom von über 200 Mio. Mg/a an Gülle und Festmist deutlich. Umgerechnet in Strom und Wärme, die über anaerobe Verfahren aus den Exkrementen gewonnen werden könnten, ergibt sich ein energetisches Gesamtpotenzial von 86 PJ/a.

Mit den rund 50 Mio. Mg/a an Abfällen (tierische Exkremeente hierbei nicht berücksichtigt), werden jährlich über 570 PJ an Brennstoffenergie in die deutschen Anlagen zur Abfallbehandlung eingebracht. Das entspricht etwa 4,3 % des deutschen Primärenergiebedarfs (13.306 PJ im Jahr 2015 [34]). In Summe werden hieraus über fast 320 PJ an Endenergie (brutto) erzeugt, rund 225 PJ/a Wärme und 90 PJ/a an Strom. Nach Berücksichtigung des Eigenbedarfs ergibt sich ein Beitrag abfallstämmiger Energie in Deutschland von gut 3,7 % des Endenergieverbrauchs.

3.3.3 CO₂-Reduktion

Die Gruppe der relevanten Treibhausgase umfasst laut Kyoto-Protokoll Kohlendioxid, Methan, Lachgas, wasserstoffhaltige Fluorkohlenwasserstoffe, perfluorierte Kohlenwasserstoffe, Schwefelhexafluorid und Stickstofftrifluorid. Fast 90 % der freigesetzten Treibhausgase entfallen auf Kohlendioxid (87,9 % im Jahr 2014 in Deutschland) [280].

Biomasse wird per Definition als CO₂-neutral betrachtet. Bei der thermischen Nutzung wird nur die Menge an Treibhausgasen frei, die die Biomasse während ihres Wachstums der Atmosphäre entzogen hat. Ausgehend von der Annahme, dass der Kreislauf aus Erzeugung und Nutzung der Biomasse geschlossen ist (d.h. dass in dem Zeitraum, in dem eine bestimmte Menge Biomasse thermisch genutzt wird, die gleiche Menge Biomasse angebaut wird) müssen die CO₂-Emissionen, welche bei der Erzeugung von Energie aus Biomasse freigesetzt werden, nicht betrachtet werden. (Berücksichtigt werden müssen allerdings jene fossilen Treibhausgasemissionen, welche z.B. bei der Anpflanzung, der Ernte oder dem Transport der Biomasse entstehen). Dementsprechend wird auch der Anteil im Abfall, welcher biogenen Ursprungs ist, als CO₂-neutral bewertet.

Der biogene Anteil im Abfall schwankt je nach Abfallart deutlich und kann bei speziellen Fraktionen nahezu 100 % betragen (z.B. Holz) [281]. Auch im Siedlungsabfall ist mehr als die Hälfte der enthaltenen Energie biogenen Ursprungs [282]. Daher kann die Erzeugung von Strom, Wärme und Prozessdampf aus Abfall zu einer Minderung fossiler CO₂-Emissionen beitragen. Durch die Bestimmung entsprechender Kenngrößen können sowohl CO₂-Einsparungsmöglichkeiten als auch Optimierungsbedarf aufgezeigt werden.

Einsparungspotenzial

Die Menge an Treibhausgasemissionen, welche durch den Einsatz eines bestimmten Verfahrens eingespart werden kann (bzw. zusätzlich verursacht wird), wird als Einsparungspotenzial bezeichnet. Hierbei erfolgt ein Vergleich mit den Emissionen einer Referenztechnologie:

$$EP_{CO_2} = EF_{ref} - EF_i \quad (Gl.3-1)$$

mit

EP_{CO_2} Einsparungspotenzial an fossilen CO₂-Emissionen [kgCO₂/kWh]

EF_{ref} Fossile Emissionen des Referenzverfahrens [kgCO₂/kWh]

EF_i Fossile Emissionen des betrachteten Verfahrens [kgCO₂/kWh]

Das Einsparungspotenzial kann sowohl für den deutschen Strom- als auch für den Wärmemix berechnet werden. Für das Referenzjahr 2015 wurden zunächst die fossilen Emissionen des Referenzverfahrens (EF_{ref} in Gleichung 3-1) ermittelt.

Die Emissionen der energetischen Abfallnutzung (EF_i in Gleichung 3-1) wurden nicht spezifisch für jede Abfallart, sondern für jede Anlagenart bestimmt, da für diese eine verlässliche Datenbasis zur Verfügung stand. Über die gesamten Massenströme (vgl. Tabelle 3-13) wurde ein anlagenspezifischer Brennstoffmix errechnet, welcher der Zusammensetzung entspricht, die tatsächlich in den entsprechenden Anlagen verwertet wurde. Mit Hilfe der spezifischen Emissionsfaktoren (Tabelle A 3.3.3-1 im Anhang) und der Heizwerte (Tabelle A 2.3-1 im Anhang) wurden die brennstoffbezogenen CO₂-Emissionen dieses Mixes bestimmt.

Für Energieerzeugungsanlagen, die nur ein Produkt – Strom oder Wärme – bereitstellen, lassen sich die Emissionen eindeutig diesem Produkt zuordnen. Eine Vielzahl von energetischen Verwertungsanlagen arbeitet allerdings in Kraft-Wärme-Kopplung. So produzieren beispielsweise mehr als 80 % der deutschen Müllverbrennungsanlagen sowohl Strom als auch Wärme. Um das Einsparungspotenzial strom- bzw. wärmespezifisch ermitteln zu können, muss für diese Anlagen eine Zuordnung der entstehenden Emissionen auf die beiden Produkte erfolgen. Hierzu stehen verschiedene Methodiken zur Auswahl, welche in Anhang A 3.3.3 erläutert sind. Mit diesen Methoden lassen sich Faktoren berechnen, mit denen die brennstoffspezifischen CO₂-Emissionen multipliziert werden. Somit ergibt sich die Zuordnung zu den erzeugten Produkten Strom und Wärme. Einige dieser Verfahren (finnische Methode, Storm- und Wärmegutschriftmethode) beinhalten einen Vergleich mit Referenzanlagen zur Strom- und Wärmeerzeugung. Deren einziges Ziel ist die effiziente Energiebereitstellung, mit entsprechend ausgerichteter Anlagentechnik. Das primäre Ziel der energetischen Abfallverwertung hingegen ist die Reduktion der Abfallmenge und die Verringerung des Schadstoffpotenzials. Die nutzbare Energie entsteht dabei lediglich als Nebenprodukt. Daher ist ein vergleichendes Verfahren zur CO₂-Allokation nicht sinnvoll. Aus diesem Grund wurden die Wirkungsgradmethode und die IEA-Methode zur Verteilung der CO₂-Emissionen gewählt. (Eine beispielhafte Berechnung und Vergleich verschiedener Methoden ist im Anhang 3.3.3 zu finden.)

Mit den so ermittelten produktspezifischen CO₂-Emissionen wurde entsprechend der Gleichung 3-1 das Einsparungspotenzial der Energieerzeugung aus Abfällen in den Anlagentypen bestimmt.

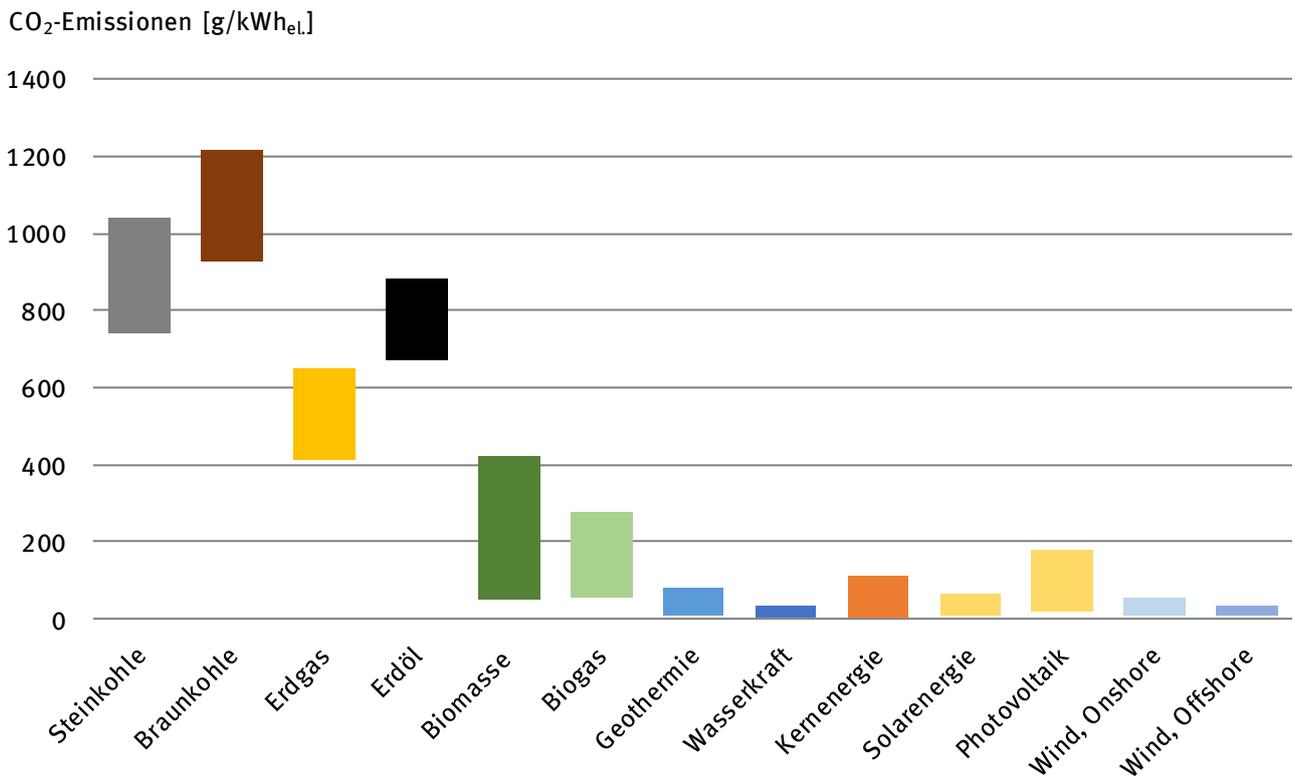
Emissionsfaktoren des deutschen Strom- und Wärmemixes

Für das Jahr 2015 wird die Gesamtstromerzeugung mit 647 Mrd. kWh angegeben [283]. Die zur Bereitstellung dieser Menge eingesetzten Energieträger, bzw. Bereitstellungsarten sind in Tabelle A 3.3.3-2 (Anhang A 3.3.3) zusammengefasst. Die CO₂-Emissionen für den deutschen Strommix 2015 werden

mit 534 g/kWh_{el} beziffert³ [284]. Dieser Wert berücksichtigt allerdings keine indirekten Emissionen, d.h. Vorketten wie Brennstoffgewinnung und Transport, welche zur Nutzung des Brennstoffs allerdings unumgänglich sind.

Berücksichtigt man die Vorkette, so verursachen auch jene Brennstoffe, welche als CO₂-neutral angesehen werden (z.B. Biomasse oder auch Kernenergie) entsprechende Emissionen. Die Emissionen der Vorkette sind nur schwer zu beziffern, da sie stark von lokalen Gegebenheiten abhängen. Die Spannbreiten der spezifischen CO₂-Emissionen einzelner Energieträger unter Berücksichtigung der Vorkette, wie sie in verschiedenen Studien ermittelt worden sind, sind in Abbildung 3-53 dargestellt.

Abbildung 3-53 Spezifische fossile CO₂-Emissionen der Stromerzeugung aus verschiedenen Energieträgern unter Berücksichtigung der Vorkette [285]



Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [285]

Für den deutschen Strommix 2014 (Tabelle A 3.3.3-2) ergeben sich unter Berücksichtigung der Maximalwerte aus Abbildung 3-53 spezifische CO₂-Emissionen (inklusive Vorkette) von 608 g/kWh_{el}. Wegen der Ungenauigkeit der notwendigen Annahmen, soll dieser Wert nur als Richtwert zur Einschätzung der Größenordnung dienen.

Die Festlegung der fossilen CO₂-Emissionen des Referenzverfahrens, E_{ref} in Gleichung 3-1, kann unter unterschiedlichen Annahmen erfolgen. Hierbei ist vor allem entscheidend, wie sich eine zusätzliche Erzeugung von Strom und Wärme aus Abfällen auf den Strom- und Wärmemarkt auswirkt. Verwendet

³ Die verbrauchsspezifischen CO₂-Emissionen (in g/kWh_{el}) ergeben sich als Quotient aus den direkten CO₂-Emissionen bei der gesamten Stromerzeugung, erfasst durch das zentrale System der Emissionen, und dem Stromverbrauch [290].

man die oben erläuterten Emissionsfaktoren des deutschen Strommixes (mit oder ohne Berücksichtigung der Vorkette), so liegt die Annahme zu Grunde, dass sich die zusätzlich bereitgestellte Energie aus Abfall gleichermaßen auf alle Energieträger des Strommixes auswirkt.

Der Residualmix berücksichtigt zweckgebundene Energiemengen, welche vom Energiemix abgezogen werden. So z.B. Ökostromtarife von Privatkunden oder die Strommengen der Deutschen Bahn, welche ihr Netz zu 42 % mit Ökostrom betreibt [286]. Wird der verbleibende Residualmix verwendet, so gilt wiederum die Annahme, dass die Energieerzeugung aus Abfällen alle Energieträger dieses Mixes gleichermaßen beeinflusst [287].

Der Marginalmix (oder Verdrängungsmix) bezeichnet den Energiemix, welcher durch Änderungen im System (z.B. variierende Produktions- oder Abnahmemengen) beeinflusst wird. Wie dieser Mix zusammengesetzt ist, hängt von verschiedenen Faktoren ab. Dazu zählen z.B. technische Gegebenheiten: Ein Braunkohlekraftwerk kann auf Grund der maximal zulässigen Lastgradienten weniger flexibel betrieben werden als beispielsweise ein Gaskraftwerk und wird daher vornehmlich zur Deckung der Grundlast eingesetzt⁴. Weiterhin sind politische Ziele wesentlich: Durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz hat die Einspeisung von Strom aus regenerativen Quellen Vorrang, weswegen diese ebenfalls nicht zum Marginalmix gezählt werden. In Deutschland lässt sich der Marginalmix auf Steinkohle und Gas reduzieren [288,289]. Nimmt man z.B. eine Zusammensetzung des Mixes aus 75 % Steinkohle und 25 % Erdgas an (wie in [289]) und berücksichtigt die spezifischen CO₂-Emissionen der einzelnen Brennstoffe aus dem Jahr 2015 (Erdgas 391 g/kWh_{el} und Steinkohle 863 g/kWh_{el} [290]), so ergeben sich spezifische CO₂-Emissionen des Marginalmixes von 745 g/kWh_{el}. Berücksichtigt man zusätzlich die Spannbreite indirekter Emissionen (Abbildung 3-53), liegen die Emissionen mit bis zu 942 g/kWh_{el} noch deutlich darüber. Wie bereits erwähnt, dient letzterer Wert zur Einschätzung der Größenordnung. (Für einen ähnlichen Verdrängungsmix aus 2 % Braunkohle, 73 % Steinkohle und 25 % Erdgas wurden in [291,292] direkte CO₂-Emissionen von 820 g/kWh_{el} und Gesamtemissionen von 855 g/kWh_{el} ermittelt, letztere mit GEMIS 4.6).

Die Annahme, dass sich eine Änderung der Stromerzeugungskapazität auf alle Energieträger gleichermaßen auswirkt, ist eine starke Vereinfachung und aus energiewirtschaftlicher Sicht nicht zulässig [287]. Zur Bestimmung der Emissionen des Referenzverfahrens E_{ref} empfiehlt sich daher der Verdrängungsmix. Zusätzlich wurden zum Vergleich in der vorliegenden Betrachtung dennoch auch die Emissionen des deutschen Strommixes herangezogen, Tabelle 3-15. Auf Grund der Unsicherheiten wird die Vorkette vernachlässigt.

Tabelle 3-15 Vergleichswerte für spezifische CO₂-Emissionen der Stromerzeugung des Jahres 2015

| Strommix | Anmerkung | CO ₂ -Emissionen [g/kWh _{el}] |
|--------------------|--|--|
| Deutscher Strommix | Ohne Vorkette | 534 |
| Marginalmix Strom | Ohne Vorkette, 75 % Steinkohle und 25 % Erdgas | 745 |

Quelle: Eigene Darstellung

⁴ Anmerkung: Braunkohlekraftwerke sollen durch verbesserte Anlagen- und Leittechnik zunehmend flexibler gestaltet werden, z.B. soll eine Senkung der Mindestlast ermöglicht werden oder kürzere An- und Abfahrzeiten realisiert werden. Damit sollen Braunkohlekraftwerke auch außerhalb des Grundlastbereichs eingesetzt werden können. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass der Betrieb solcher Anlagen außerhalb des Auslegungsbereichs immer mit einem verringerten Wirkungsgrad, vermehrter Materialbeanspruchung und damit letztendlich erhöhten spezifischen CO₂-Emissionen einhergeht.

Anders als bei der Stromerzeugung ist der Wärmemarkt von dezentraler Produktion dominiert. Dadurch lässt sich der Wärmemix und vor allem die Emissionen weniger genau bestimmen als bei der Stromerzeugung, für die diese Daten zentral erfasst werden.

Die Zusammensetzung des deutschen Wärmemixes für das Jahr 2015 kann aus Tabelle A 3.3.3-3 (Wärmeverbrauch nach Energieträgern, im Anhang) entnommen werden. Entsprechend der Unsicherheiten sollen die spezifischen CO₂-Emissionen des deutschen Wärmemixes (Tabelle 3-16) als Anhaltswert dienen. In der vorliegenden Studie wurden diese mit 304 g CO₂/kWh_{th} angenommen (basierend auf Einzelwerten aus [292–295]).

Wie auch beim deutschen Strommix lässt sich für den Wärmemarkt ein Marginalmix bestimmen, welcher z.B. hälftig aus Heizöl und Erdgas besteht [288]. Für die Substitution mit Wärme aus Abfall hat dieser allerdings nur geringe Bedeutung. Kurz- und mittelfristig kann eine entsprechende Wärmebereitstellung nur jene Abnehmer bedienen, welche an eine entsprechende Infrastruktur angeschlossen, d.h. in ein Fernwärmenetz eingebunden sind. Daher wurde neben dem allgemeinen Wärmemix auch der Fernwärmemix als Vergleichswert für die wärmebedingten CO₂-Emissionen verwendet (Tabelle 3-16), mit spezifischen Emissionen von 285 g CO₂/kWh_{th} [292].

Tabelle 3-16 Vergleichswerte für spezifische CO₂-Emissionen der Wärmeerzeugung des Jahres 2015

| Wärmemix | Anmerkung | CO ₂ -Emissionen [g/kWh _{th}] |
|--------------------|---------------|--|
| Deutscher Wärmemix | Ohne Vorkette | 304 |
| Fernwärmemix | Ohne Vorkette | 285 |

Quelle: Eigene Darstellung

Als Besonderheit wurden die Emissionen aus der Abfallverbrennung in Zementwerken nicht mit denen des deutschen Wärmemixes verglichen, da die im Prozess benötigte Energie nicht unmittelbar durch den entsprechenden Brennstoffmix substituiert werden kann. Stattdessen wurden die CO₂-Emissionen ermittelt, welche durch die Wärmebereitstellung für die Zementproduktion entstehen würden, wenn nur fossile Energieträger eingesetzt würden. Hierfür wurde der fossile Brennstoffmix der Zementwerke des Jahres 2015 verwendet: 25,6 % Braunkohle, 59,1 % Steinkohle, 10,5 % Petrolkoks, 3,4 % Heizöl und 1,4 % Erdgas [144]. Entsprechend der brennstoffspezifischen CO₂-Emissionen der fossilen Brennstoffe [296] und des Nutzungsgrades der Anlage (Tabelle 3-17) ergibt sich hierfür ein CO₂-Emissionsfaktor von 606 g/kWh_{th}.

Eine ähnliche Betrachtung muss für Kohlekraftwerke angesetzt werden. Die Substitution von Brennstoff ersetzt auch hier nicht den Strom- und Wärmemix, sondern die anlagenspezifischen Emissionen aus der reinen Kohleverbrennung. Laut [284] beträgt dieser für die Stromerzeugung aus Steinkohle 863 g/kWh_{el} und aus Braunkohle 1151 g/kWh_{el}. Um allerdings eine direkte Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurden die produktspezifischen Emissionen anhand des gleichen Vorgehens wie hier beschrieben bestimmt, unter Berücksichtigung der CO₂-Allokation auf die Koppelprodukte Strom und Wärme. Damit ergaben sich Vergleichswerte von 1085 gCO₂/kWh_{th} und 554 gCO₂/kWh_{el} für die Allokation nach der Wirkungsgradmethode und 775 g/kWh_{th,el} für die IEA-Methode. (Die brennstoffspezifischen CO₂-Emissionen für Steinkohle und Braunkohle aus [296] wurden gemittelt).

Einsparungspotenzial durch die Energieerzeugung aus Abfällen

Die anlagenspezifischen, energieeinsatzbasierten CO₂-Emissionen wurden als Quotient der Emissionen des Brennstoffmixes (spezifisch für jede Anlagenart) und dem entsprechenden Heizwert berechnet:

$$EF_{Energie,mix} = \frac{EF_{Masse,mix}}{H_{u,mix}} \quad (\text{Gl. 3-2})$$

mit

$EF_{Energie,mix}$ energieeinsatzbasierte Emissionen für den Brennstoffmix [kgCO₂/MJ_{mix}]

$EF_{Masse,mix}$ massebasierte Emissionen für den Brennstoffmix [kgCO₂/kg_{mix}]

$H_{u,mix}$ Heizwert des anlagenspezifischen Brennstoffmixes [MJ/kg_{Mix}]

Der Heizwert des anlagenspezifischen Brennstoffmixes $H_{u,mix}$ wurde über die Massenanteile der entsprechenden Abfallarten an der gesamten Einsatzmenge der jeweiligen Anlage, multipliziert mit dem Heizwert der Abfallart, summiert:

$$H_{u,mix} = \sum_{i=1}^n x_i \cdot H_{u,i} \quad (\text{Gl. 3-3})$$

mit

x_i Massenanteil der jeweiligen Abfallart an der gesamten Einsatzmenge [kg_{Abfall}/kg_{gesamt}]

$H_{u,i}$ Heizwert der jeweiligen Abfallart [MJ/kg_{Abfall}]

Die Massenanteile x_i ergeben sich aus der Betrachtung der gesamten Abfallmengen und deren Entsorgungspfade, (Tabelle 3-13). Die verwendeten Heizwerte für jede Abfallart $H_{u,i}$ können (Tabelle A 2.3-1) entnommen werden.

Die massenbasierten Emissionen des Brennstoffmixes $EF_{Masse,mix}$ wurden aus den abfallarttypischen fossilen CO₂-Emissionen und dem Anteil der entsprechenden Abfallart an der gesamten Einsatzmenge der jeweiligen Anlage berechnet:

$$EF_{Masse,mix} = \sum_{i=1}^n x_i \cdot H_{u,i} \cdot EF_{Energie,i} \quad (\text{Gl. 3-4})$$

mit

$EF_{Energie,i}$ energiebasierte Emissionen der jeweiligen Abfallart [kgCO₂/MJ_{Abfall}]

Die brennstoffspezifischen CO₂-Emissionen für jede Abfallart, welche für die Berechnungen verwendet wurden, sind in Tabelle 3-17 gelistet.

Die brennstoffmixspezifischen CO₂-Emissionen, die anhand dieses Vorgehens ermittelt wurden, sind in Tabelle 3-17 dargestellt. Darüber hinaus sind in der Tabelle die elektrischen und thermischen Nutzungsgrade (netto) der verschiedenen Anlagentypen im Bundesdurchschnitt dargestellt. Der thermische Nutzungsgrad wurde als Differenz zwischen dem Netto-Gesamtnutzungsgrad und dem elektrischen Netto-Nutzungsgrad berechnet. Für Anlagentypen, für die nur Brutto-Nutzungsgrade vorlagen, wurden pauschal 5 Prozentpunkte Eigenbedarf abgezogen (markiert mit * in der Tabelle).

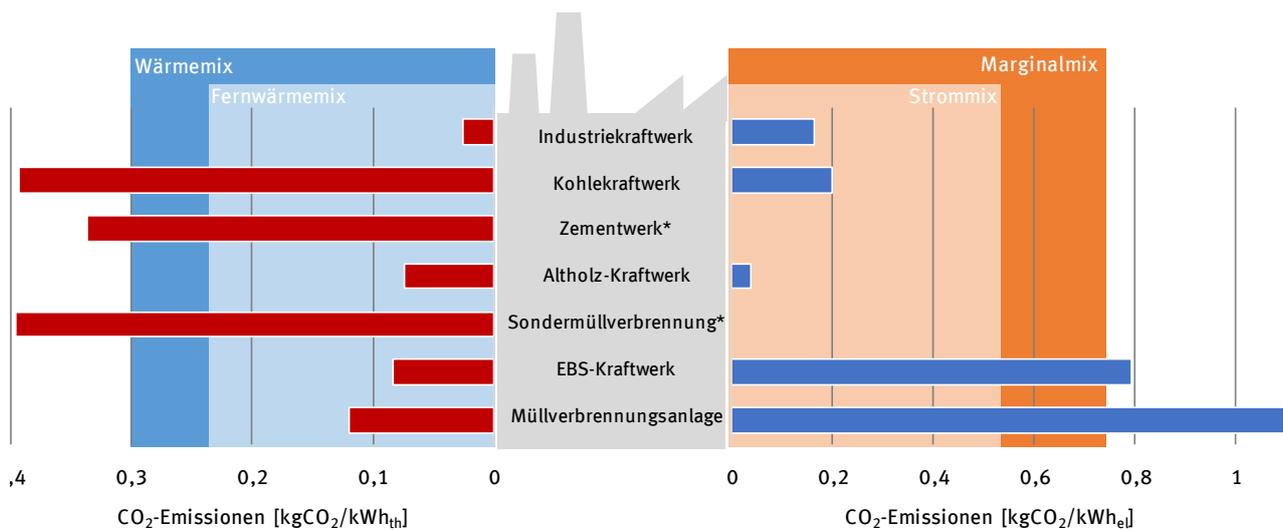
Tabelle 3-17 Brennstoffmixspezifische CO₂-Emissionen sowie durchschnittliche Wirkungsgrade der verschiedenen Anlagentypen

| Anlagentyp | Brennstoffmixspezifische CO ₂ -Emissionen [gCO ₂ /kWh] | Thermischer Nutzungsgrad [%] | Elektrischer Nutzungsgrad [%] |
|-------------------------------|--|------------------------------|-------------------------------|
| Müllverbrennungsanlage | 162 | 33,5 | 11,1 |
| Ersatzbrennstoffkraftwerk | 155 | 45,4 | 14,7 |
| Sondermüllverbrennungsanlage | 224 | 56,6 | - |
| Altholzkraftwerk* | 19 | 15 | 21,3 |
| Klärschlammverbrennungsanlage | 6,3 | - | - |
| Zementwerk* | 190 | 95 | - |
| Kohlekraftwerk* | 135 | 20 | 28 |
| Industriekraftwerk* | 165 | 50 | 25 |

Quelle: Eigene Darstellung

Die produktspezifischen CO₂-Emissionen der Energieerzeugung aus Abfällen sind in Abbildung 3-54 (mit Allokation der Emissionen für KWK-Anlagen nach der Wirkungsgradmethode) und in Abbildung 3-55 (Allokation nach der IEA-Methode) dargestellt. Ein Vergleich der beiden Abbildungen, deren Datenbasis identisch ist, zeigt die starke Abhängigkeit der Ergebnisse von der Allokationsmethode für KWK-Anlagen. Für die betrachteten Anlagen begünstigt die Wirkungsgradmethode emissionstechnisch die Wärmeerzeugung zu Lasten der Stromproduktion, umgekehrt für die IEA-Methode.

Abbildung 3-54 Anlagenspezifische CO₂-Emissionen der Energieerzeugung aus Abfällen, Allokation für KWK-Anlagen nach der Wirkungsgradmethode (Anlagen ohne KWK sind mit * gekennzeichnet)



Quelle: Eigene Darstellung. Nicht dargestellt: Vergleichswert für Zementwerke (0,606 kg/kWh_{th}) und für Kohlekraftwerke (1,085 kg/kWh_{th} und 0,554 kg/kWh_{el})

Die Wärmeerzeugung aus der Verbrennung gefährlicher Abfälle führt mit beiden Methoden zu CO₂-Emissionen, welche höher liegen als die Referenzwerte. Hierbei ist allerdings anzumerken, dass die thermische Beseitigung der entsprechenden Gefahrstoffe in der Regel alternativlos ist. In den Abbildungen nicht dargestellt sind die Referenzwerte für Zementwerke und Kohlekraftwerke. Die Substitution fossiler Energieträger in diesen Anlagen beinhaltet allerdings automatisch eine nennenswerte Reduktion der CO₂-Emissionen. Da die CO₂-Emissionen von Biomasse per Definition Null sind, führt die Erzeugung von Strom und Wärme in Bioabfallvergärungsanlagen zu einem Einsparungspotenzial, welches genau den Emissionen des Referenzverfahrens entspricht (ebenfalls nicht dargestellt).

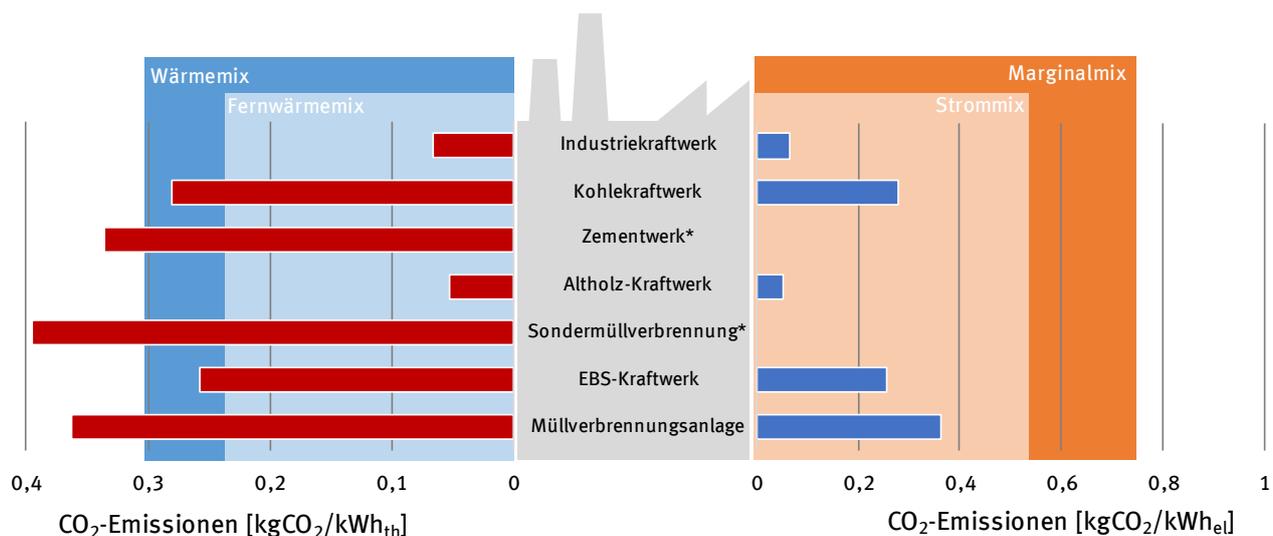
Basierend auf diesen Berechnungen kann die gesamte Menge CO₂, die durch die energetische Nutzung von Abfällen im Jahr 2015 eingespart wurde, quantifiziert werden:

$$CO2_{gesamt} = \sum_{i=1}^n E_{th/el,i} \cdot EP_{CO2,i} \tag{Gl. 3-5}$$

berechnet werden. Hierbei sind

- CO₂_{gesamt} Gesamtmenge an eingespartem CO₂ [kgCO₂]
- E_{th/el,i} Gesamte erzeugte Energie (thermisch oder elektrisch) pro Anlage und Jahr [kWh]
- EP_{CO₂,i} Eingespartes CO₂ pro Anlage (aus Gleichung 3-1) [kgCO₂/kWh]

Abbildung 3-55 Anlagenspezifische CO₂-Emissionen der Energieerzeugung aus Abfällen, Allokation für KWK-Anlagen nach der IEA-Methode (Anlagen ohne KWK mit * gekennzeichnet)



Quelle: Eigene Darstellung. Nicht dargestellt: Vergleichswert für Zementwerke (0,606 kg/kWh_{th}) und für Kohlekraftwerke (0,775 kg/kWh_{th,el})

Die gesamte Menge Energie, welche im Jahr 2015 in den betrachteten Anlagen erzeugt wurde (E_{th/el,i} in Gleichung 3-5), kann aus Tabelle 3-14 entnommen werden. Je nach Allokationsmethode und Referenzszenario schwanken diese zwischen 11 und 16 Millionen Tonnen. Die Gesamtemissionen an CO₂-Äquivalenten in Deutschland im Jahre 2015 lagen bei etwa 900 Millionen Tonnen [297], was bedeutet, dass durch die energetische Nutzung von Abfällen 1,2 bis 2,2 % eingespart worden sind. Die Ergebnisse der gesamten CO₂-Einsparungen für das Jahr 2015 sind in Tabelle 3-18 dargestellt. Die Energiemengen aus Deponiegas und MBA wurden auf Grund der sehr geringen Menge vernachlässigt. Ebenso wurde der Beitrag der Nutzung von Biogas aus tierischen Exkrementen nicht berücksichtigt, da die Co-Vergärung mit anderen Stoffen eine genaue Quantifizierung der entsprechenden Mengen schwierig

macht. Die Belastung durch die thermische Beseitigung gefährlicher Abfälle wurde hingegen berücksichtigt. Die angegebenen Werte können daher als konservativ angesehen werden.

Tabelle 3-18 CO₂-Einsparung durch Energieerzeugung aus Abfällen im Jahr 2015 [in 1000 Mg CO₂]

| Allokationsmethode | Referenzszenario | | | |
|--------------------|------------------|------------------|-------------------|----------------------|
| | Wärme Strom | Wärme Marginal | Fernwärme Strom | Fernwärme Marginal |
| Wirkungsgrad | 13 982 | 18 577 | 10 625 | 15 220 |
| IEA | 15 129 | 19 723 | 11 771 | 16 366 |

Quelle: Eigene Darstellung

Die obigen Berechnungen berücksichtigen keine Emissionen der Vorkette, also Gewinnung, Aufbereitung und Transport der Brennstoffe. Im Gegensatz zu fossilen Energieträgern, aber auch biogenen Materialien wie Energiegräsern, welche einzig zu dem Zweck der Energiebereitstellung an- und abgebaut werden, aufbereitet und transportiert werden müssen, fallen Abfälle in jedem Fall an und müssen entsorgt werden. D.h. die Emissionen, welche beispielsweise durch Sammlung und Transport der Abfälle entstehen, werden nicht als Vorkette der Energieerzeugung bewertet. Berücksichtigt man daher die gesamten Emissionen, inklusive der Vorkette, so verschiebt sich das oben beschriebene CO₂-Einsparungspotenzial weiter zu Gunsten des Abfalls.

Je weiter der Anteil erneuerbarer Energien an der deutschen Versorgung allerdings ansteigt, umso geringer wird aber auch der berechnete klimawirksame Nutzen der Energie aus Abfall ausfallen. Dies liegt u.a. darin begründet, dass gemischte Siedlungsabfälle im Restabfall nur zu ca. 50 % biogenen Ursprungs sind und der Rest aus fossilen Anteilen besteht. Entsprechend ist auf lange Sicht zu erwarten, dass die thermische Abfallbehandlung rechnerisch zu einer Klimabelastung führen wird und daher womöglich in die politische Diskussion gerät.

Die erste und wichtigste Aufgabe der Abfallwirtschaft ist und bleibt jedoch die optimale und schadlose Entsorgung der Abfälle durch Verwertung und Beseitigung. Stoffe, die trotz weiter forcierter Behandlungs- bzw. Recyclinganstrengungen auch in Zukunft nicht mehr stofflich nutzbar sind, und noch organischen Kohlenstoff und ein Schadpotenzial besitzen, müssen letztlich thermisch behandelt werden.

Es ist unstrittig, dass die thermische Abfallbehandlung auch in Zukunft ein wichtiger Pfeiler der Abfallwirtschaft bleiben wird. Gesetzt den Fall, dass die Energiewende (weitgehend) gelingt, ist aber auch ein zukünftig negativer Beitrag der Abfallverbrennung zur CO₂-Bilanz absehbar. Es ist daher zu diskutieren, wie mit diesem Dilemma umzugehen ist. Eine Nutzung der bei der unvermeidbaren Abfallverbrennung immer entstehenden Abwärme ist sicherlich auch klimapolitisch sinnvoll, da das mit der Erzeugung verbundene klimawirksame Kohlendioxid ganz unabhängig von der späteren Nutzung freigesetzt wird. Wie bei anderen Fällen von unvermeidbarer Abwärme auch, sollte daher die Abwärme aus der thermischen Behandlung von stofflich nicht mehr nutzbaren Restabfällen als grundsätzlich klimaneutral betrachtet werden.

In der Schweiz wurde dieser Gedanke bereits offiziell implementiert. Abwärme – und zwar auch solche aus „Kehricht“ – wird dort von Seiten des Eidgenössischen Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK sowie vom Bundesamt für Energie als klimaneutral deklariert [299].

4 Prognose bis 2030

Auf Basis der erarbeiteten Datengrundlage zu energetisch verwerteten Abfallmengen sowie Kapazitäten im Jahr 2015 wurde eine Prognose der Entwicklung der in Deutschland anfallenden Abfallmengen und der Energiebereitstellung aus Abfällen bis zum Jahr 2030 angestellt. Diese ist im vorliegenden Kapitel beschrieben. Zunächst werden die Rahmenbedingungen diskutiert. Neben der Entwicklung der Bevölkerungszahl sind in diesem Zusammenhang auch die wirtschaftlichen und politischen Rahmenbedingungen von Interesse. Auswirkungen auf die Abfallmengen zur energetischen Abfallverwertung werden dabei ermittelt und diskutiert.

Außerdem muss der im Jahr 2030 relevante Strom- und Wärme-Mix definiert werden, um insbesondere für die CO₂-Betrachtungen ein Referenzszenario zur Verfügung zu stellen.

4.1 Rahmenbedingungen

Die Abschätzung der in Deutschland anfallenden Abfallmengen im Jahr 2030 erfolgte ausgehend von den zuvor ermittelten Abfallmengen aus dem Jahr 2015. Zudem wurden wesentlichen Einflussfaktoren definiert und berücksichtigt. Im Folgenden wird auf die Faktoren: Bevölkerungsentwicklung, wirtschaftliche, gesetzliche und technische Entwicklung sowie Entwicklung bei der Strom- und Wärmebereitstellung eingegangen.

4.1.1 Bevölkerungsentwicklung

Ein wesentlicher Einflussfaktor der Abschätzungen der anfallenden Abfallmengen im Jahr 2030 war die zukünftige Bevölkerungsentwicklung in Deutschland. Hierzu gibt es offizielle Berechnungen des Statistischen Bundesamtes (Destatis), die aber aufgrund von aktuellen Entwicklungen angepasst werden mussten.

Zur Veranschaulichung der tatsächlichen Entwicklung der Bevölkerung der letzten Jahre wurden zunächst, ausgehend von den Zensusdaten 2011, die durch Destatis ermittelten Ist-Werte der Bevölkerung von 2011 bis 2015 zusammengestellt [300].

Zur weiteren Abschätzung der Bevölkerungsentwicklung kann im Normalfall die Bevölkerungsvorausberechnung von Destatis verwendet werden. Derzeit liegt die 13. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung des Basisjahres 2013 bis zum Jahr 2060 aus dem Jahre 2015 vor [301]. In dieser Berechnung gibt es insgesamt acht unterschiedliche Modellvarianten, die sich auf jeweils zwei unterschiedliche Szenarien der Attribute Geburtenrate (Kinder je Frau), Lebenserwartung und Wanderungssaldo (durchschnittliche Personen pro Jahr) beziehen.

Zur Veranschaulichung der Streubreite der von Destatis ermittelten Daten wurden von den in der 13. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung berechneten Varianten das minimale Entwicklungsszenario (Variante 1: G1-L1-W1), das maximale Entwicklungsszenario (Variante 8: G2-L2-W2) und eine mittlere Variante (Variante 2:G1-L1-W2) bis zum Jahre 2030 ausgewählt und visualisiert (siehe gestrichelte Linien in Abbildung 4-1). Sie basieren auf folgenden Entwicklungsvorgaben:

- ▶ Variante 1: G1-L1-W1
 - Geburtenrate 1,4 Kinder je Frau
 - Lebenserwartung bei Geburt 2060 für Jungen 84,8/Mädchen 88,8 Jahre
 - Wanderungssaldo sinkt von 500 000 im Jahr 2014 + 2015 auf 100 000 im Jahr 2021, danach konstant
- ▶ Variante 8: G2-L2-W2
 - Geburtenrate 1,6 Kinder je Frau
 - Lebenserwartung bei Geburt 2060 für Jungen 86,7/Mädchen 90,4 Jahre

- Wanderungssaldo sinkt von 500 000 im Jahr 2014 + 2015 auf 200 000 im Jahr 2021, danach konstant
- ▶ Variante 2: G1-L1-W2
 - Kontinuität bei stärkerer Zuwanderung Geburtenrate 1,4 Kinder je Frau
 - Lebenserwartung bei Geburt 2060 für Jungen 84,8/Mädchen 88,8 Jahre
 - Wanderungssaldo sinkt von 500 000 im Jahr 2014 + 2015 auf 200 000 im Jahr 2021, danach konstant

Betrachtet man die Entwicklung der Ist-Werte zur Bevölkerungsentwicklung bis 2015 und die Daten der 13. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung, so wird deutlich, dass die prognostizierte Entwicklung ab 2015 von den Ist-Werten abweicht. Dafür sind zwei Faktoren entscheidend. Der unerwartete Anstieg der durchschnittlichen Geburtenrate in Deutschland seit 2013 und insbesondere der starke Zuzug nach Deutschland im Rahmen der Flüchtlingskrise und der anhaltenden Wirtschaftskrise in den südeuropäischen Ländern.

Destatis arbeitet derzeit an einer aktualisierten koordinierten Bevölkerungsprognose, die aber erst ab 2018 vorliegen wird. Zur Verdeutlichung der Konsequenzen wurde aber bereits vorab eine erste Variante der Bevölkerungsvorausberechnung auf Basis der Erkenntnisse 2015 veröffentlicht [302]. Diese Variante lehnt sich an die zuvor bereits dargestellte Variante 2 (G1-L1-W1) mit dem Basisjahr 2013 an. Sie wurde von Destatis als Variante 2A (G1-L1-W2015) betitelt. Die geänderten Grundrahmenbedingungen für die Berechnung sind der folgenden Übersicht zu entnehmen.

Tabelle 4-1 Vergleich der Annahmen für die Variante 2-A im Vergleich zur Variante 2 der aktualisierten 13. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung mit dem Basisjahr 2015 nach Destatis [302]

| Demografische Komponente | Variante 2-A auf Basis 2015 | Variante 2 auf Basis 2013 |
|---|-----------------------------|---------------------------|
| Zusammengefasste Geburtenziffer 2060 | G1 „annähernde Konstanz“ | |
| Kinder je Frau | 1,5 | 1,4 |
| Lebenserwartung bei Geburt 2060 (Jahre) | L1 „moderater Anstieg“ | |
| Jungen | 84,7 | 84,8 |
| Mädchen | 88,6 | 88,8 |
| Saldo der Außenwanderung (Personen) | W2015 | W2 |
| 2016 | 750 000 | 450 000 |
| 2017 | 500 000 | 400 000 |
| 2018 | 400 000 | 350 000 |
| 2019 | 300 000 | 300 000 |
| 2020 | 250 000 | 250 000 |
| 2021-2060 | 200 000 | 200 000 |

Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [302]

In Tabelle 4-2 und Abbildung 4-1 wurden die Ist-Entwicklungen von 2011 – 2015 sowie die unterschiedlichen Vorausberechnungen von Destatis zur Bevölkerungsentwicklung bis 2030 zusammengefasst.

Tabelle 4-2 Überblick zur Ist-Entwicklung 2011-2015 und zu Prognosen der Bevölkerungsentwicklung nach Destatis bis 2013 - 2030 [300–302]

| Jahr | Ist-Entwicklung | Minimum | Variante 2 | Maximum | Variante 2A |
|---------------------------------------|------------------|------------|------------|------------|-------------|
| | nach Zensus 2011 | Basis 2013 | Basis 2013 | Basis 2013 | Basis 2015 |
| | | Variante | Variante | Variante | Variante |
| | | G1-L1-W1 | G1-L1-W2 | G2-L2-W2 | G1-L1-W2015 |
| | [1000 EW] | [1000 EW] | [1000 EW] | [1000 EW] | [1000 EW] |
| 2011 | 80.328 | | | | |
| 2012 | 80.524 | | | | |
| 2013 | 80.768 | | | | |
| 2014 | 81.198 | 81.058 | 81.058 | 81.069 | |
| 2015 | 82.176 | 81.345 | 81.345 | 81.378 | 82.176 |
| 2016 | | 81.478 | 81.579 | 81.642 | 82.753 |
| 2017 | | 81.554 | 81.757 | 81.863 | 83.073 |
| 2018 | | 81.573 | 81.879 | 82.039 | 83.289 |
| 2019 | | 81.533 | 81.945 | 82.169 | 83.399 |
| 2020 | | 81.434 | 81.953 | 82.251 | 83.450 |
| 2021 | | 81.274 | 81.902 | 82.283 | 83.442 |
| 2022 | | 81.102 | 81.841 | 82.314 | 83.423 |
| 2023 | | 80.917 | 81.769 | 82.341 | 83.393 |
| 2024 | | 80.719 | 81.685 | 82.362 | 83.352 |
| 2025 | | 80.506 | 81.589 | 82.375 | 83.298 |
| 2026 | | 80.278 | 81.479 | 82.378 | 83.233 |
| 2027 | | 80.036 | 81.357 | 82.370 | 83.156 |
| 2028 | | 79.779 | 81.222 | 82.351 | 83.068 |
| 2029 | | 79.510 | 81.076 | 82.321 | 82.968 |
| 2030 | | 79.230 | 80.919 | 82.280 | 82.857 |
| Anmerkung | | | | | |
| Bezug jeweils 31. Dezember des Jahres | | | | | |

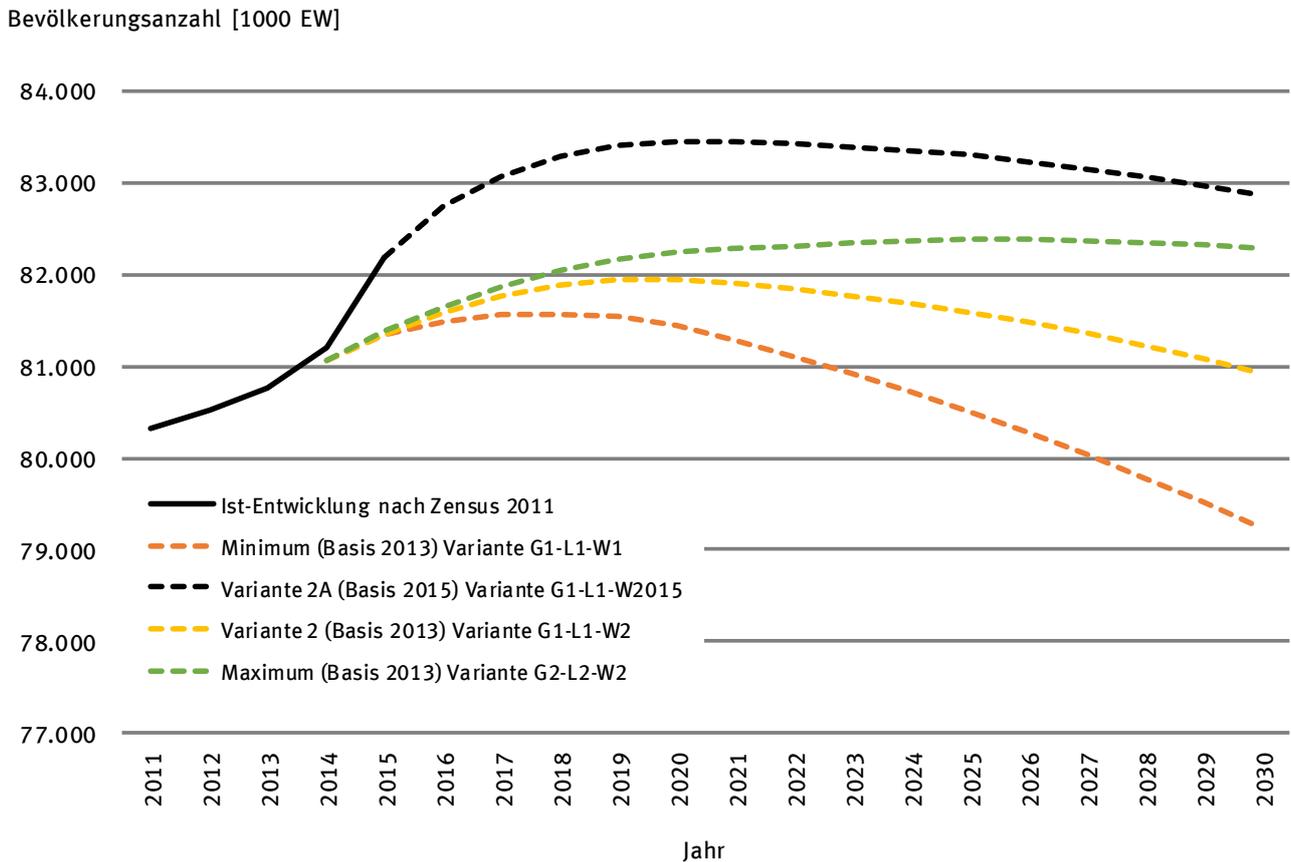
Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [300-302]

Die Tabelle und das Schaubild zeigen deutlich, dass es notwendig war, die aktuellen Entwicklungen für eine Bevölkerungsprognose im weiteren Verlauf dieser Ausarbeitung zu berücksichtigen. Beim Vergleich der Destatis - Bevölkerungsprognose für 2030 ergab sich zwischen der Variante 2 und der aktualisierten Variante 2A ein Unterschied von knapp 2 Mio. Einwohnern. In der aktualisierten, „mittleren“ Variante 2A ist im Jahre 2030 von rund 82,9 Mio. Einwohnern gegenüber einer ehemaligen Prognose von 80,9 Mio. Einwohnern auszugehen.

Darüber hinaus zeigen die Daten aus der Bevölkerungsvorausberechnung, dass es bei den Prognosen bis 2030 je nach berechneter Variante zu Schwankungsbreiten von bis zu 3 Mio. Einwohnern bis 2030

kommen kann. Ausgehend davon, dass die aktualisierte Variante 2A gleiche Schwankungsbreiten aufweist wie die Variante 2, ist für das Jahr 2030 mit einer Einwohnerzahl von 81,1 bis 84,2 Mio. und einem mittleren Wert (Variante 2A) von 82,9 Mio. in Deutschland zu rechnen.

Abbildung 4-1 Überblick zur Ist-Entwicklung 2011-2015 und zu Prognosen der Bevölkerungsentwicklung nach Destatis, 2013-2030 (Bezug jeweils 31. Dezember des Jahres) [300-302]



Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [300-302]

4.1.2 Wirtschaftliche Entwicklung und politische Ziele

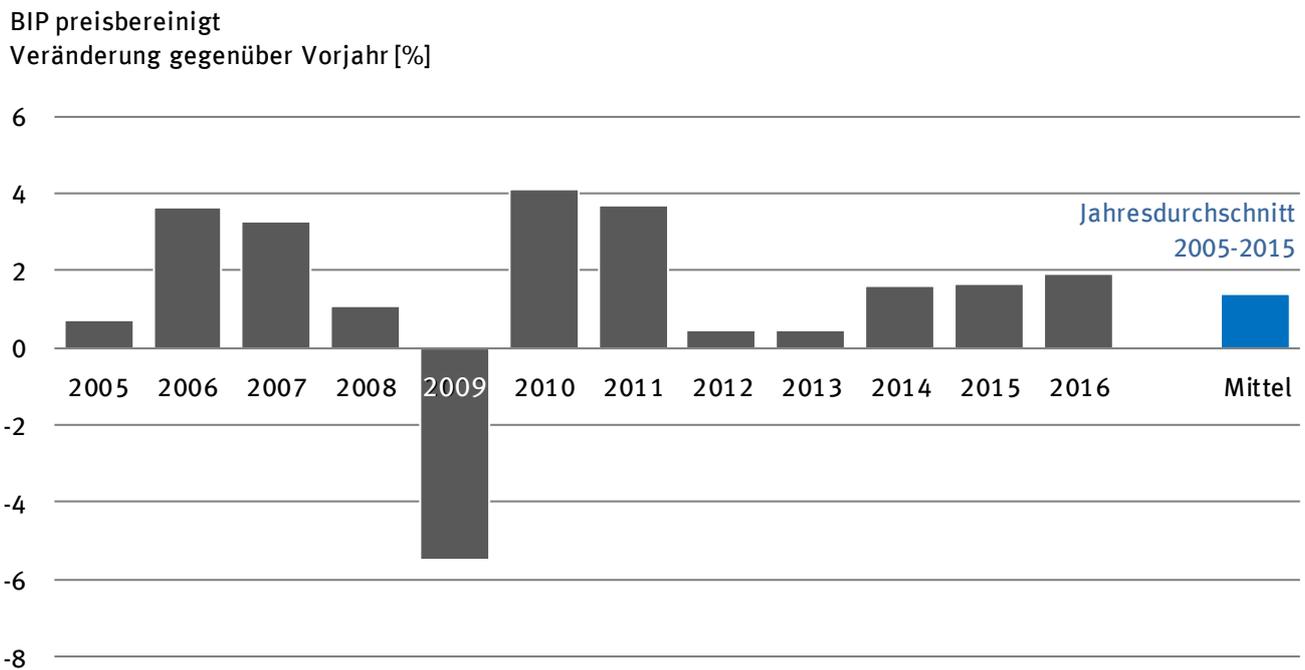
Die anfallenden Abfallmengen bzw. deren Verwertungswege 2030 hängen einerseits von den politischen Zielen ab, die sich in gesetzlichen Vorgaben wiederfinden. Andererseits werden vor allem gewerbliche Abfallmengen von der wirtschaftlichen Entwicklung beeinflusst. Im Folgenden wird kurz auf diese Einflussfaktoren eingegangen.

Wirtschaftliche Entwicklung

Ein wichtiger Indikator zur Bestimmung der wirtschaftlichen Entwicklung ist das nationale Bruttoinlandsprodukt (BIP). Das folgende Schaubild gibt einen Überblick über die historische Entwicklung des BIP der letzten 10 Jahre. Bei deutlichen Unterschieden von Jahr zu Jahr wurde eine durchschnittliche Steigerung von 1,4% über den Zeitraum 2005 – 2015 erreicht [270].

Zur Berücksichtigung der zukünftigen Entwicklung in der Prognose wurde vereinfachend angenommen, dass sich das BIP bis 2030 um 21% erhöhen wird. Je nach Abhängigkeit der betrachteten Abfallfraktion von der allgemeinen konjunkturellen Entwicklung wurde ausgehend von diesem Wert Mengenanpassungen vorgenommen.

Abbildung 4-2 Entwicklung des preisbereinigten Bruttoinlandproduktes in Deutschland im Zeitraum 2005-2016 [303]



Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [303]

Relevante Gesetze mit Auswirkungen auf Abfallmengen und deren -entsorgung in 2030 (Auswahl)

Im Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG [271]) sind die Grundsätze und Rahmenbedingungen für die Abfallbewirtschaftung festgelegt. Zweck des Gesetzes ist, die Kreislaufwirtschaft zur Schonung der natürlichen Ressourcen zu fördern und den Schutz von Mensch und Umwelt bei der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen sicherzustellen (§1 KrWG). In § 14 KrWG sind zur Schonung der natürlichen Ressourcen Kriterien zur Förderung des Recyclings und der sonstigen stofflichen Verwertung verankert, die u. a. besagen, dass

- ▶ zum Zweck des ordnungsgemäßen, schadlosen und hochwertigen Recyclings Papier-, Metall-, Kunststoff- und Glasabfälle getrennt zu sammeln sind.
- ▶ die Vorbereitung zur Wiederverwendung und das Recycling von Siedlungsabfällen sollen spätestens ab dem 1. Januar 2020 mindestens 65 % insgesamt betragen.
- ▶ die Vorbereitung zur Wiederverwendung, das Recycling und die sonstige stoffliche Verwertung von nicht gefährlichen Bau- und Abbruchabfällen (ohne Abfallschlüssel 17 05 04) sollen spätestens ab dem 1. Januar 2020 mindestens 70 % betragen.

In jüngster Zeit wurden zudem entsprechende Gesetze und Verordnungen mit konkreten Anforderungen an Recyclingquoten etc. für bestimmte Abfallgruppen verabschiedet, in denen die Prämissen des § 14 KrWG konkretisiert wurden. Hier sind u. a. die zum 01. August 2017 in Kraft getretene Gewerbeabfallverordnung [272] und das zum 01.01.2019 in Kraft tretende Verpackungsgesetz [273] zu nennen. Nach der neuen Gewerbeabfallverordnung wird die in der bisherigen Verordnung enthaltene Gleichheit von stofflicher und energetischer Verwertung abgelöst durch den Vorrang der stofflichen Verwertung und über Quotenvorgaben das Recycling von gewerblichen Siedlungsabfällen gestärkt [272]. Im Verpackungsgesetz wurden ebenfalls höhere Recyclingquoten festgelegt. So steigt diese zum Beispiel für Kunststoffverpackungen von bisher 36 Prozent bis zum Jahr 2022 auf 63 Prozent. Auch bei anderen Verpackungsmaterialien werden die Recycling-Quoten deutlich erhöht, bei Metallen, Glas

und Papier auf 90 Prozent [273]. Derartige Regelungen können sich auf die zukünftig energetisch zu verwertenden Abfallströme auswirken.

Andererseits wird die novellierte Abfallklärslammverordnung (AbfklärV) Auswirkungen auf die Anlagenkapazitäten für Klärschlamm haben, denn eine landwirtschaftliche Verwertung von Schlämmen aus Kläranlagen > 50.000 EWG wird nicht mehr zulässig sein. Zum anderen wird auch die Düngemittelverordnung [166] Einfluss auf die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung haben. Das Auslaufen der EEG Förderung für Biomassekraftwerke wird ebenfalls Veränderungen auf dem Abfallmarkt bewirken.

Auf die Auswirkungen bei der Prognose der Abfallmengen wird in den einzelnen Kapiteln kurz eingegangen.

4.1.3 Technische Entwicklungen

Ein Einfluss der technischen Entwicklung wurde hinsichtlich der Sortiertechnologie berücksichtigt und resultierte im Ansetzen höherer Recyclingquoten für das Jahr 2030 im Vergleich zum Jahr 2015. Diese Annahme erschien sinnvoll, da die Sortiertechnik aktuell eine enorme Lernkurve durchlebt und aufgrund der politischen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen und Ziele in diesem Bereich weitere Anstrengungen zu erwarten sind.

Bezüglich der energetischen Wirkungsgrade der Verwertungsanlagen wurden technische Entwicklungen nicht berücksichtigt. Dies hat mehrere Gründe. Zunächst ist der vorhandene Anlagenpark bereits weitestgehend optimiert. Limitierung im Wirkungsgrad sind jedoch häufig durch den Standort bedingt und wesentlich von der Anschlussmöglichkeit geeigneter Wärmekunden abhängig. Standortwechsel in relevantem Umfang erscheinen aber in den nächsten 10-15 Jahren unwahrscheinlich, da hierfür bei den meisten Anlagen aufgrund des guten technischen Zustandes kein Grund besteht und ohnehin Überkapazitäten für die Zukunft wahrscheinlich sind.

4.1.4 Strom und Wärme

Die Entwicklung des Strom- und Wärmemarktes ist ausschlaggebend für die Menge an Treibhausgasemissionen, die bei der Energieerzeugung aus Abfall eingespart werden kann. So schätzt das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, dass im Jahre 2030 etwa 50 % des Stroms durch erneuerbare Energien gedeckt werden können [304]. Der Rückbau von Atom- und Kohlekraftwerken [153] verschiebt die Verteilung konventioneller Energieträger an der Stromproduktion. Auf die Annahmen, die der Prognose des CO₂-Emissionen zu Grunde liegen, ist in Kapitel 4.3.3 verwiesen.

4.2 Entwicklung der Abfallmengen

Bei der Abschätzung der Abfallmengen 2030 sowie deren Anteil an energetischer Verwertung und thermischer Behandlung wurden folgende Einflussfaktoren herangezogen:

- ▶ Bisheriger Trend der spezifischen Abfallmengen von 2010-2015 oder länger (siehe auch Kap. 3.2) [176,275–279]
- ▶ Bevölkerungsentwicklung bis 2030 nach Variante 2A durchgängig für alle betrachteten Abfälle um 1 % (siehe Kap. 4.1.1)
- ▶ Berücksichtigung des Bruttoinlandsprodukts bei gewerblichen Abfällen (siehe Kap. 4.1.2)
- ▶ Verlagerung von Stoffströmen zum Recycling, Erhöhung der Recyclingquoten

Die individuellen Rahmenbedingungen für die einzelnen betrachteten Abfallarten sind in den folgenden Abschnitten erläutert. Bei Abfallarten für die dies relevant ist, wird auch auf Änderungen bei den Entsorgungswegen eingegangen.

4.2.1 Siedlungsabfälle

4.2.1.1 Hausmüll

Neben dem Bevölkerungswachstum haben sich die spezifischen Abfallmengen an Hausmüll in Deutschland im Zeitraum von 2010-2015 um 11 % (=1,83 % pro Jahr) verringert. Dies ist vermutlich auf die Erweiterung der Bioabfallsammlung zurückzuführen. Wie von Kern [170] abgeschätzt, wird von einem weiteren Rückgang der Hausmüllmenge bis 2030 von 1,7 Mio. Mg durch Erweiterung der Bioabfallsammlung (siehe auch 4.2.2.3) ausgegangen. Zudem wird weiterhin Hausmüll in der MBA, wie von Ketelsen [196] prognostiziert, vorbehandelt (siehe auch 4.2.2.1).

4.2.1.2 Hausmüllähnliche Gewerbeabfälle

Für die Abschätzung der hausmüllähnlichen Gewerbeabfälle im Jahr 2030 wurde zunächst die Entwicklung des BIP herangezogen (rund 23 % über die letzten 15 Jahre). Da davon ausgegangen wird, dass ggf. noch weitere hausmüllähnliche Gewerbeabfälle aufgrund der Gewerbeabfallverordnung getrennt gesammelt werden, wurde der Abschätzung nur eine Steigerung von 15 % zugrunde gelegt. Die angesetzte Quote zur stofflichen Verwertung wurde um 15 % auf 25 % erhöht. Es wurde angenommen, dass bei weiterer Vortrennung des hausmüllähnlichen Gewerbeabfalls die nach Gewerbeabfallverordnung vorgeschriebenen 30 % Verwertungsquote nur schwer zu erreichen sein werden. Die Beobachtung der Recyclingquoten in den kommenden Jahren wird hier gesichertere Informationen liefern.

4.2.1.3 Sperrmüll

Die Mengen an spezifischen Sperrmüll lagen über die letzten Jahre konstant bei ca. 29 kg/E*a. Es wird daher lediglich die Bevölkerungsentwicklung für die Abschätzung der Abfallmenge 2030 herangezogen. Bei der Verwertung wurde angesetzt, dass lediglich 20 % direkt einer energetischen Verwertung zugeführt werden, 80 % sortiert werden und hier eine stoffliche Verwertung von 50 % erreicht wird.

4.2.1.4 Abfälle aus der Biotonne

Durch die Erweiterung der getrennten Bioabfallsortierung wird die Menge der Bioabfälle weiter ansteigen. Wenn alle öffentlich rechtlichen Entsorgungsträger, die bisher keine Bioguterfassung anbieten, diese mit dem Ziel einführen, mindestens eine Durchschnittserfassungsleistung für ihre Gebietsstruktur zu erreichen, werden nach Kern [170] 700.000 Mg/a zusätzlich erfasst. Wenn diejenigen, die bisher nur unterdurchschnittliche Bioabfallmengen erfassen, ihr Angebot optimieren, könnte nach Kern eine weitere Million Mg an Bioabfall erfasst werden [170]. Für die Bioabfallmenge aus der Biotonne wurde daher bis 2030 ein zusätzliches Potenzial von 1,7 Mio. Mg/a angesetzt.

Zurzeit werden ca. ein Drittel des Biogutes vergoren. Kern prognostiziert für das Jahr 2025, dass 60 % des Biogutes in Vergärungsanlagen eingesetzt wird. Er geht von einer Kapazität von 5,5 Mio. Mg für einen Substratmix von 4,5 Mio. Mg Biogut aus [170]. In der Abschätzung des energetischen Potenzials aus Abfällen in 2030 wurde daher die größere Vergärungskapazität angesetzt.

4.2.1.5 Verpackungsabfälle aus privaten Haushalten

Bei den spezifischen Mengen an Verpackungsabfällen aus privaten Haushalten verweist Bothe [305] auf eine Steigerung dieser Mengen seit 2010 gleichlaufend zum Bruttoinlandsprodukt. Als Gründe für die Steigerung führt er u. a. an: vermehrte Einpersonenhaushalte, ein Trend zur „To-Go-Gesellschaft“ sowie vermehrter Internethandel. Bei der Prognose der Abfallmengen 2030 dieser Abfallart wird daher eine Steigerung gleichlaufend zum BIP mit 20 % angesetzt. Da GVM [199] bereits hohe Recyclingquoten angibt, wird in der Abschätzung von einer Steigerung von 5 % bis 2030 ausgegangen.

4.2.1.6 Marktabfälle | Straßenkehricht | Park- und Gartenabfälle | Sonstige

Die spezifischen Abfallmengen bei Marktabfällen, Straßenkehricht und Park- und Gartenabfällen zeigen einen weitgehend gleichbleibenden Trend über die letzten sechs Jahre [3–8]. Bei der Abschätzung

der entsprechenden Mengen im Jahr 2030 wurde daher lediglich die Bevölkerungsentwicklung angesetzt. Das wurde auch bei der Position „Sonstige“ umgesetzt.

4.2.2 Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen

Die Abfallmengen aus Abfallbehandlungsanlagen ergaben sich aus den Ansätzen zu den einzelnen Abfallarten sowie den zugrunde gelegten Entsorgungswegen in der Abschätzung 2030. Im Folgenden werden nur die Hinweise gegeben, wenn zusätzliche Veränderungen angenommen wurden.

4.2.2.1 Abfälle aus MBA-Anlagen

Bei den Abfällen aus der MBA für das Jahr 2030 wurden die Prognosen von Ketelsen [196] herangezogen. Er geht davon aus, dass bis 2030 ca. 10 % der MBA-Anlagenkapazität durch Anlagenschließungen verloren geht. Es wurden in der folgenden Berechnung angelehnt daran 10 % weniger an Abfällen in MBA-Anlagen angesetzt. Da davon auszugehen ist, dass die biologische Stufe der MBA in Zukunft z.B. für die biologische Trocknung vor der energetischen Verwertung genutzt wird, werden auch Veränderungen des Stoffstroms angenommen. Da die Ablagerung auf der Deponie entfällt, werden vereinfacht 70 % des Stoffstroms für die energetische Verwertung und bis zu 30 % stoffliche (hier bilanziell Trocknungsverluste enthalten) angenommen.

4.2.2.2 EBS | SekBS

Es werden auch 2030 Abfallmengen aus der Vorbehandlung bzw. Sortierung von Abfällen für den Einsatz in der energetischen Verwertung anfallen. Diese ergeben sich in der Abschätzung durch die Ansätze zur stofflichen bzw. energetischen Verwertung der einzelnen betrachteten Abfallarten im Stoffflussmodell.

4.2.2.3 Klärschlamm

Betrachtet wurde die Entwicklung der kommunalen Schlämme und jener industriellen Klärschlämme, die für eine energetische Verwertung grundsätzlich in Frage kommen. Industrielle Schlämme, die aktuell deponiert werden, finden keine Berücksichtigung, da diese für eine energetische Verwertung kaum geeignet sind.

Es wird erwartet, dass der Trend der letzten Jahre anhält und weiterhin ein Rückgang der erzeugten Klärschlamm-mengen zu beobachten ist. Für den betrachteten Prognosezeitraum von knapp 15 Jahren wurde eine Reduktion der kommunalen Schlämme von etwa 7 % angenommen, der Rückgang bei den industriellen Schlämmen wurde auf etwa 3,5 % beziffert.

Hinsichtlich der Verwertungswege wird die Verbrennung bis 2030 weiter an Bedeutung zunehmen. Dies liegt zum einen an der Novelle der Klärschlammverordnung [203], die eine landwirtschaftliche Verwertung von Schlämmen aus Kläranlagen > 50.000 EWG nicht mehr zulässt. Zum anderen wird die Düngemittelverordnung [204] Einfluss auf die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung haben. Bereits zum Januar 2017 sollte das Verbot der landwirtschaftlichen Ausbringung von Klärschlämmen greifen, die mit polymeren Flockungshilfsmitteln behandelt wurden. Allerdings wurde kürzlich ein zweijähriges Moratorium für diese Regelung in die Verordnung aufgenommen. Für die Beteiligten ist jedoch klargeworden, dass die landwirtschaftliche Verwertung künftig deutlich schwieriger werden wird. Deshalb besteht ein großes Interesse der Anlagenbetreiber, eine sichere, insbesondere thermische Verwertungslösung für die Zukunft aufzubauen.

Dementsprechend werden die Verwertung in der Landwirtschaft und die, laut Novelle der Klärschlammverordnung [203], rechtlich gleichzusetzende, landesbauliche Verwertung an Bedeutung verlieren. Für die künftige Mengenentwicklung wurde eine jährliche Abnahme von landbaulicher und landwirtschaftlicher Wertung um 0,5 % angenommen. Für die sonstige Verwertung wurde ein jährlicher Rückgang von 1 % zu Grunde gelegt. Damit ergibt sich bis zum Jahr 2030 ein Anteil der thermischen Verwertung von rund 85 % bei der Behandlung von Klärschlamm. Dominierendes Verfahren

wird dabei die Monoverbrennung sein, da die Pflicht zur Rückgewinnung von Phosphor [AbfKlärV] bei der Verbrennung mit anderen Brennstoffen, z.B. in Kohlekraftwerken oder Müllverbrennungsanlagen, erschwert oder sogar unmöglich gemacht wird.

4.2.2.4 Schredderleichtfraktion

Bei der Abschätzung der anfallenden Mengen an Schredderleichtfraktion wurde trotz möglicher konjunkturbedingter Mengensteigerungen bei den zu behandelnden Abfällen aufgrund der Optimierung der Sortiertechnik von einer Reduzierung von 15 % bis 2030 ausgegangen.

4.2.2.5 Tierische Nebenprodukte

Tierische Nebenprodukte fallen vornehmlich bei der Schlachtung von Nutztieren, insbesondere bei der Masttierhaltung an. Diese ist abhängig von der Bevölkerungszahl und deren Ernährungsgewohnheiten. Es wird geschätzt, dass der Konsum von Rind- und Schweinefleisch zu Gunsten von Geflügel zurückgeht.

In den Jahren 2010 bis 2012 wurde pro Person und Jahr im Schnitt 11,1 kg Rindfleisch, 32,3 kg Schweinefleisch und 20,8 kg Geflügelfleisch verzehrt. Für das Jahr 2022 werden diese Mengen auf 11 kg Rind, 31,7 kg Schwein und 21,2 kg Geflügel geschätzt [253]. Für die Prognose des Tierbestands wurde dieser Trend bis 2030 fortgeführt.

Ausgehend von der Annahme, dass der Tierbestand proportional zur Fleischmenge ist, die pro Person im Jahr verzehrt wird, lassen sich anhand der Bevölkerungszahl die zu erwartende Anzahl der verschiedenen Tierarten für 2030 abschätzen. Diese wurde entsprechend der Verteilung des Jahres 2016 auf die einzelnen Untergruppen (z.B. Masttiere, Milchtiere etc. verteilt). Anhand des Tierbestands und eines durchschnittlichen Gewichts pro Tier (800 kg/Rind, 300 kg/Schwein, 1,5 kg/Huhn) wurde die Gesamtmasse an Tieren für 2016 und 2030 bestimmt.

Aus der Menge tierischer Nebenprodukte des Jahres 2016 (etwa 3 Millionen Mg) lässt sich der prozentuale Anteil erzeugter Nebenprodukte an der Gesamtmasse Tiere abschätzen (dieser beträgt etwa 16 %). Wendet man diesen Anteil auf die Gesamtmasse der Tiere des Jahres 2030 an, so kann man auf einen Anfall tierischer Nebenprodukte von etwa 3,6 Millionen Mg schließen. Der Anteil thermisch verwerteter Nebenprodukte betrug im Jahr 2016 etwa 200 000 Mg, also 6,7 %. Entsprechend wurde abgeschätzt, dass im Jahr 2030 etwa 240 000 Mg tierische Nebenprodukte verbrannt werden.

4.2.2.6 Sonstige Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen

Unter diesem Punkt wurden in 2015 die thermisch behandelten Abfallmengen an Straßenkehricht, Park- und Gartenabfällen berücksichtigt. Wie auch bei der Abschätzung der Ausgangsmengen wurde für die Mengen im Jahr 2030 lediglich die Bevölkerungsentwicklung angesetzt.

4.2.3 Gewerbe- und Produktionsabfälle

4.2.3.1 Holzabfälle

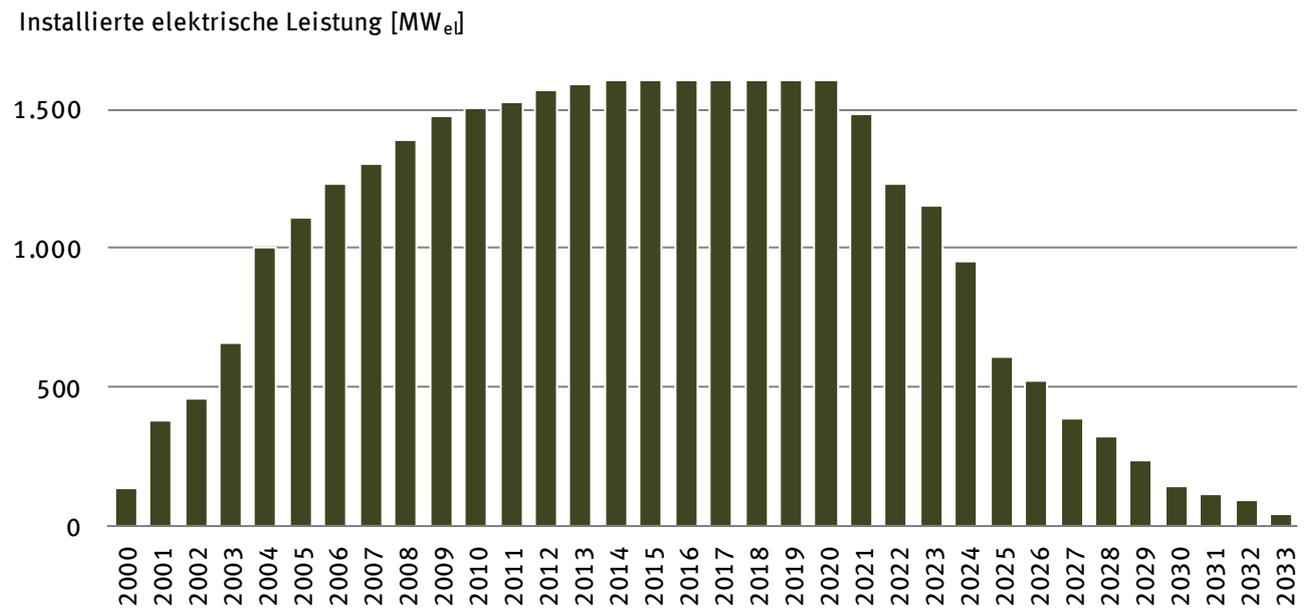
Bei den hier betrachteten Holzabfällen wurde zunächst die wirtschaftliche Entwicklung analog zum BIP zugrunde gelegt. Da davon auszugehen ist, dass effizienter produziert wird, wurde diese Steigerung moderat abgemildert und auf 15 % festgelegt. Die stoffliche Verwertungsquote von 20 % [208] wurde auf 35 % erhöht. Hier bleibt abzuwarten, ob diese umgesetzt werden kann, da die Anforderungen an die stoffliche Verwertung von Altholz in diesem Stoffstrom erfüllt sein müssen.

Die zukünftige Entwicklung des Anlagenbestandes und der durch Biomassen und insbesondere Altholz erzeugten Energie sind durch das Auslaufen der EEG-Förderung schwer zu prognostizieren. Es ist noch nicht abzusehen, wie viele der derzeitigen Anlagen nach dem Ende der EEG-Austrittsphase (2020-2026) noch am Markt aktiv sein werden [80]. Durch den Wegfall der Förderung ist davon auszugehen, dass die Altholzkraftwerke in Zukunft deutliche Zuzahlungen bei der Anlieferung von Altholz

verlangt werden. Inwieweit dieser Marktumschwung gelingen wird, ist derzeit noch nicht vorauszu- sehen. Für die Abschätzung der Kapazitäten von Biomassekraftwerken in 2030 wurde zunächst ein Rückgang von 10 % angenommen

Abbildung 4-3 zeigt die Kapazitätsentwicklung von Anlagen zur Verstromung fester Biomasse für den Fall, dass sie nach dem Auslaufen des Förderzeitraums vom Netz genommen werden.

Abbildung 4-3 Entwicklung und Prognose der installierten elektrischen Leistung von Anlagen zur Verstromung fester Biomasse bei Stilllegung der Anlagen nach Auslaufen des För- derzeitraumes [82]



Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [82]

4.2.3.2 Faserabfälle

Aufgrund des über die letzten Jahre steigenden Trends des Altpapierverbrauchs [306] wurde auch hier eine Abhängigkeit vom BIP veranschlagt. Wie bei den Holzabfällen wird für die Faserabfälle eine geringfügigere Steigerung von 15 % angenommen. Da im Jahr 2015 bereits 50 % der Abfälle stofflich verwertet wurden, ist davon auszugehen, dass die Verwertungswege mit ihren jeweiligen Anforderungen an die Faserabfälle etabliert sind. Die Quote bleibt daher in der Abschätzung 2030 unverändert.

4.2.3.3 Verpackungsabfälle gewerblich

Bei der Entwicklung der Verpackungsabfälle gewerblich wurde die gleiche Mengensteigerung wie bei den Verpackungsabfällen aus privaten Haushalten angenommen (siehe auch [305]). Bei der Recyclingquote über die gesamten Verpackungsarten wurde 80 % (Erhöhung um 5 %-Punkte) angesetzt.

4.2.3.4 Sonstige Produktions- und Gewerbeabfälle zur energetischen Verwertung

Bei der Ermittlung der Mengen 2015 wurde mit dieser Position (Abfallmenge an gemischten Gewerbeabfällen) die Bilanz mit den vorhandenen energetischen und thermischen Kapazitäten ausgeglichen (siehe Kap. 3.2.3.4). In der Betrachtung der Prognose 2030 wurde kein bilanzieller Ausgleich durchgeführt, da die Abfallmengenveränderungen ausschlaggebend waren. Das Bilanzdefizit aus 2015 (siehe Kap. 3.3) wurde daher unverändert in die Bilanz für 2030 übernommen, um die Ergebnisse direkt vergleichen zu können.

Es sei hier angemerkt, dass die unter dieser Position ausgewiesenen Menge nicht der in Abfallwirtschaftskreisen oft diskutierten Gesamtmenge an gemischten Gewerbeabfällen entspricht. Große Mengenanteile dieser gemischten Gewerbeabfälle sind bereits in anderen hier aufgeführten Abfallfraktionen, wie z. B. Holz, Verpackungen oder Kunststoffe anteilig enthalten.

4.2.3.5 Sonstige Kunststoffabfälle

In den letzten Jahren sind die Mengen an sonstigen Kunststoffabfällen lediglich geringfügig [212], die Produktionsmengen jedoch deutlicher angestiegen. Aufgrund der auch hier angenommenen Effizienzsteigerung in der Produktion wurden für 2030 nur 10 % Mengensteigerung angesetzt. Die Recyclingquote wurde zusätzlich von 50 % auf 60 % erhöht.

4.2.3.6 Küchen- und Kantinenabfälle

Bei den Küchen- und Kantinenabfällen wurde eine Mengensteigerung von 15 % angenommen. Es wurde eine Steigerung des Trends zum Essen außer Haus (Schulessen, Kantine, Restaurants) berücksichtigt. Die Verwertung wird, wie bei den anderen biologischen Abfällen, vermehrt in Vergärungsanlagen erfolgen [170].

4.2.3.7 Ölabbfälle [Altöl]

Die Statistik über die Entwicklung der eingesammelten Menge an Altöl in Deutschland in den Jahren 2001 bis 2012 zeigt einen fast gleichbleibenden Verlauf [214] bei steigendem BIP. Trotz der positiven wirtschaftlichen Entwicklung wurde eine Abnahme der Menge prognostiziert, da einerseits effizientere Produktionsverfahren zum Einsatz kommen. Andererseits wird bei dem Trend zu E-Mobilität weniger Öl aus dem KFZ-Bereich anfallen. Bei den Ölabbfällen wurde daher von einem Rückgang der Mengen um 10 % bis 2030 ausgegangen. Da bereits der größte Anteil stofflich verwertet wird, wurde diese Quote beibehalten.

4.2.4 Bau- und Abbruchabfälle

Bei Holz und Kunststoffen aus Bau- und Abbruchabfällen wurde aufgrund des weitergehenden Getrennthaltungsgebots der Gewerbeabfallverordnung und einem zukünftig vermehrten Rückbau (z. B. [307]) von einer Steigerung der Mengen um 25 % bis 2030 ausgegangen. Da auf der einen Seite z. B. bei den Kunststoffen vermehrt Verbundmaterialien anfallen werden, gleichzeitig aber auch an Recyclinglösungen gearbeitet wird, wird eine Steigerung der Recyclingquote um 10 %-Punkte auf 50 % angenommen.

4.2.5 Gefährliche Abfälle

Bei gefährlichen Abfällen ist ein fallender oder ggf. gleichbleibender Grundtrend zu erwarten, da auch hier Produktionsverfahren effektiver werden. Es ist jedoch noch nicht abschließend klar, ob oder welche weiteren Abfällen als gefährlich nach der Verordnung (EU) 2016/293 (über persistente organische Schadstoffe (POP-Verordnung) eingestuft werden könnten [308]. Sollte eine derartige Einstufung erfolgen, ist der entsprechende Abfall nicht mehr direkt recyclingfähig, da der POP-Stoff zunächst zerstört werden muss. Es wurde bei der Prognose bis zum Jahr 2030 deshalb zunächst an der bestehenden Aufteilung der Verwertungswege stofflich/energetisch festgehalten.

4.2.6 Altreifen

Die Menge an jährlich anfallenden Altreifen wird im Wesentlichen durch die Entwicklung der Automobilbranche bedingt. Es ist zu erwarten, dass der Motorisierungsgrad weiterhin zunimmt, insbesondere in Personengruppen, bei denen dieser bisher noch unterdurchschnittlich ausgeprägt ist (Frauen, ältere Personen und Zuwanderer). Dieser Trend besteht bereits seit einigen Jahren. So hat die Fahrzeugdichte in Deutschland zwischen 2010 und 2014 von 631 auf 684 Fahrzeuge pro 1000 Personen zugenom-

men. Es wurde eine jährliche Zunahme der Fahrzeuganzahl von 0,5 % prognostiziert (mit einer Fahrzeugdichte von 694 pro 1000 Personen im Jahr 2030; eine Wachstumsrate, welche durch den aktuellen Bestand bereits überholt ist) [309][310]. Entsprechend wird auch die jährlich anfallende Menge an Altreifen zunehmen. Ausgehend von einer ähnlichen Wachstumsrate wurde die Altreifenmenge für das Jahr 2030 mit 620.000 Mg abgeschätzt.

Altreifen werden vornehmlich stofflich verwertet, die energetische Nutzung beschränkt sich auf den Einsatz in der Zementindustrie. Trotz der stetig gestiegenen Gesamtmenge an Altreifen schwankt die energetisch genutzte Menge seit 1998 zwischen 200.000 und 300.000 Mg/a, ohne erkennbaren Trend [140–144,215–217,219–226,311,312]. Auch der Umsatz der deutschen Zementindustrie liegt seit 2009 zwischen 2,5 und 2,8 Milliarden Euro und wird auf 2,6 Milliarden Euro für das Jahr 2020 geschätzt [313]. Darüber hinaus beeinflusst der Brennstoff im Zementwerk direkt die Produktqualität. Daher ist nicht zu erwarten, dass sich die etablierten Mengenverhältnisse signifikant ändern werden. Für das Jahr 2030 wurde der Anteil energetisch verwerteter Altreifen auf 250.000 Mg geschätzt.

4.2.7 Sonstige

Hier sind lediglich nicht näher definierte Inputfraktionen in die MBA – Anlagen aufgeführt.

4.2.8 Deponiegas

Seit Juni 2005 werden keine Abfälle mehr deponiert, welche einen nennenswerten Anteil biologisch abbaubaren Materials enthalten. Die energetisch nutzbare Methanmenge entstammt daher ausschließlich aus den vor 2005 abgelagerten Abfällen. Schätzungen gehen davon aus, dass sich die gebildeten Methanmengen aus Deponien bis zum Jahre 2050 auf 56 000 t, bzw. 86 Millionen m³ reduzieren. Die Hälfte hiervon wird in die Atmosphäre emittiert, die andere Hälfte entweder durch biologische Prozesse oxidiert oder gefangen [232,233].

Die stabile Methanbildung aus deponierten Abfällen beginnt etwa zwei Jahre nach Ablagerungsbeginn und dauert, abhängig von der Abfallzusammensetzung, der Abfallmenge und dem Wasserhaushalt, etwa 15 bis 20 Jahre an. Die daran anschließende postmethanogene Phase ist von einem signifikanten Rückgang der produzierten Gasmenge und Qualität gekennzeichnet [231]. Es kann davon ausgegangen werden, dass die stabile Bildung von Deponiegas in nutzbarer Qualität innerhalb des Betrachtungszeitraums bis 2030 abgeschlossen ist.

4.2.9 Gülle und Festmist

Der Prognose zur erzeugten Menge Biogas aus tierischen Exkrementen liegt die gleiche Abschätzung des Tierbestands im Jahre 2030 zu Grunde, wie sie für die tierischen Nebenprodukte vorgenommen wurde. Das Vorgehen zur Bestimmung der erzeugten Menge Biogas ist in Anhang A 3.2.7 ausführlich beschrieben und wurde auch für diese Prognose angewendet.

Damit beträgt die für das Jahr 2030 produzierbare Menge tierischer Exkremente 209.739.642 Mg. Bei Einsatz der gesamten Menge zur Biogaserzeugung lässt sich eine Menge an von etwa 5,9 Milliarden m³, bzw. 3,4 Milliarden m³ Methan erzeugen, was einem Energieinhalt von 121 PJ entspricht. Die Nutzung in einem BHKW (Eigenschaften entsprechend den Annahmen in Abschnitt 3.2.9) würde eine Strommenge von 45,6 PJ oder 12.700 GWh und eine Wärmemenge von 41,4 PJ, bzw. 11.500 GWh liefern.

4.2.10 Weitere Entwicklung bei den Entsorgungswegen

In diesem Punkt werden weitere Annahmen zur Veränderung bei den Entsorgungsanlagen zur energetischen sowie thermischen Behandlung bis 2030 aufgeführt, soweit sie noch nicht in den o. g. Punkten dargelegt wurden.

Es wurde angenommen, dass bis 2030 die Kohlekraftwerke, die derzeit Ersatzbrennstoffe einsetzen, komplett vom Netz gegangen sind. Damit werden dort 1,5 Mio. Mg an Gesamt-Entsorgungskapazität für verschiedene Abfälle wegfallen.

Im Gegensatz dazu ist beim Einsatz von Sekundärbrennstoffen in Zementwerken eine Erhöhung zu erwarten. Oerter [314] prognostiziert bis 2030 eine Erhöhung der Substitutionsraten auf ca. 80 %. Das würde eine Steigerung des SekBS-Einsatzes in Zementwerken von ca. 1 Mio. Mg (Heizwert von ca. 20 MJ/kg) bedeuten. Er stellt aber gleichzeitig klar, dass eine solche Erhöhung mit einer entsprechend angepassten, hohen und gleichbleibenden Brennstoffqualität verbunden ist.

Diese Veränderungen wurden in der Abschätzung 2030 entsprechend übernommen. Bei den Industriekraftwerken, wurden die Kapazitäten aus 2015 weiterhin verwendet.

4.3 Entwicklung der Energie aus Abfall

4.3.1 Übersicht Abfallströme

Die Prognose der Abfallmengen und Behandlungskapazitäten für das Jahr 2030 ist in Tabelle 4-3 und Abbildung 4-4 wiedergegeben. Die Systematik der Darstellung folgt dabei im Wesentlichen dem in Kapitel 3.3.1 erläuterten Vorgehen. Tabelle 4-3 zeigt das Aufkommen der (teilweise) energetisch nutzbaren Fraktionen als Abfallinput ins System (Spalte A und Abbildung 4-4, linke Säule) und die Mengen, die nach der Aufbereitung als Einsatzstoffe für die thermischen und biologischen Verwertungsanlagen verbleiben (Spalte B und Abbildung 4-4, mittlere Säule).

Zur Abschätzung dieser Mengen wurden die für 2015 ermittelten Daten (siehe Kap. 3.2) herangezogen und mit den in Kap. 4.2 dokumentierten Veränderungen verknüpft. Aufgrund der Unsicherheiten der bereits für 2015 ermittelten Daten wurde auf eine Darstellung von Schwankungsbreiten verzichtet. Eine beispielhaft durchgeführte Abschätzung der Fehlerfortpflanzung für solche Schwankungsbreiten ergab unrealistische Werte ohne Aussagekraft. Das Bilanzdefizit aus 2015 (siehe Kap. 3.3) wurde mit dem gleichen Zahlenwert in die Bilanz 2030 übernommen, um eine Aussage hinsichtlich der Auslastung im Jahr 2030 zu ermöglichen.

Durch die prognostizierten Veränderungen ergab sich als Systeminput ein Mehraufkommen der betrachteten Abfälle (Spalte A in Tabelle 4-3) von 9,7 Mio. Mg, wobei die Menge der letztlich energetisch verwerteten Abfallmengen nahezu unverändert bleibt.

Der Anteil der energetischen Verwertung an der Abfallbehandlung wird also zurückgehen. Grund hierfür ist die Annahme, dass bis 2030 eine weitergehende Getrennthaltung von Abfällen erfolgt und durch technischen Fortschritt der Sortiertechnologie höhere Recyclingquoten erreicht werden.

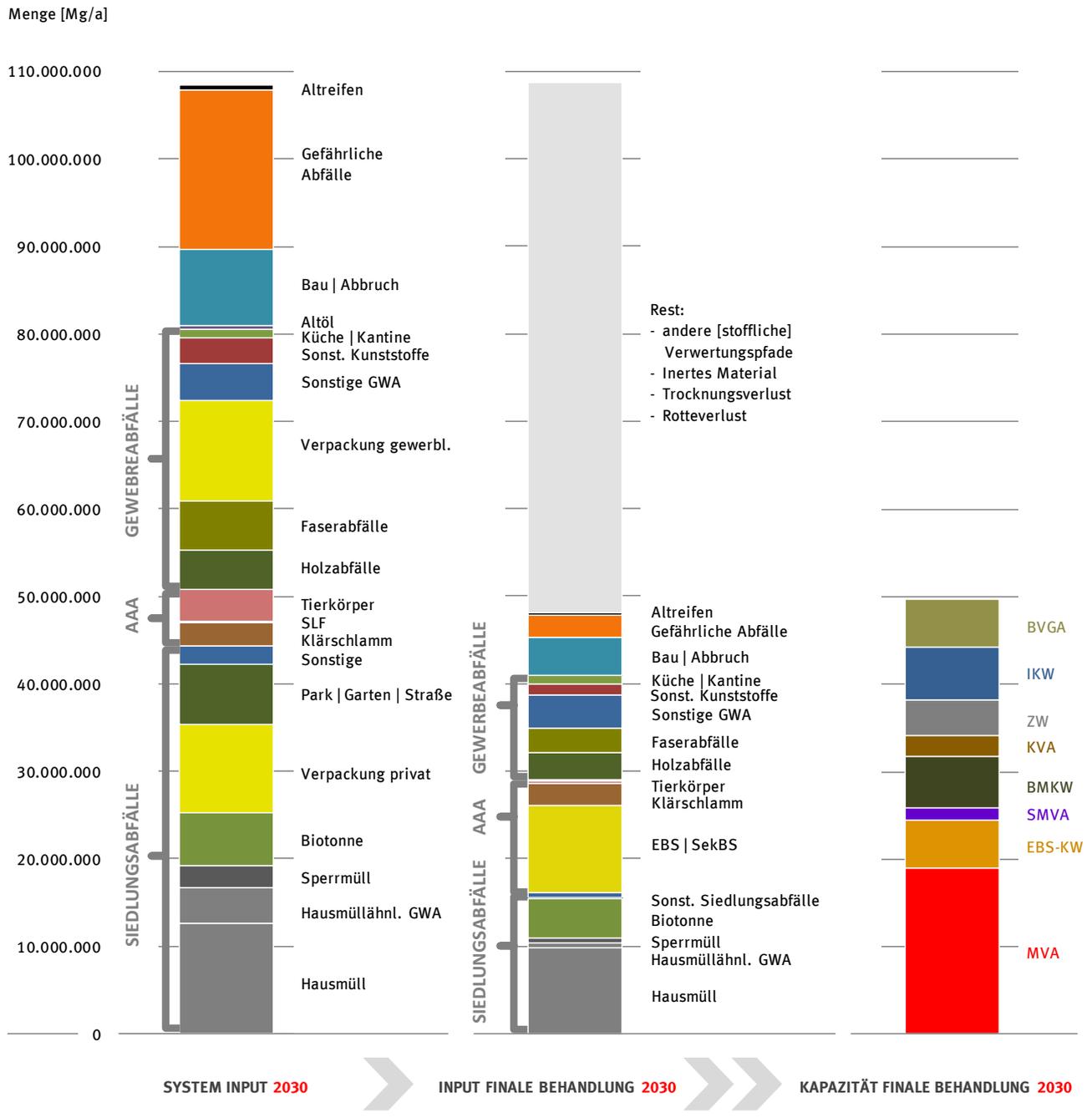
Ebenfalls in der Tabelle dargestellt sind die für 2030 erwarteten Behandlungskapazitäten (Spalte C und Abbildung 4-4, rechte Säule). Da, wie erläutert, für die Prognose kein Mengenausgleich (zwischen Spalte B und C) stattgefunden hat, ist durch Differenzbildung direkt die Auslastung der Anlagen im Jahr 2030 abzuschätzen. Der Abgleich ergibt ein Überangebot von Anlagenkapazitäten in der Größenordnung von 1,8 Mio. Mg/a. Ob die freien Behandlungskapazitäten durch Mengen aus dem Ausland aufgefüllt oder aber Anlagen außer Betrieb genommen werden, ist aus heutiger Perspektive nicht vorherzusagen.

Tabelle 4-3 Prognose der in Deutschland anfallenden und behandelten Abfallströme mit energetisch nutzbaren Anteilen im Jahr 2030 (vollständig inerte Stoffströme nicht berücksichtigt. Einheit: [Mg])

| 2030 | VORBEHANDLUNG EIN ODER MEHRERE AUFBEREITUNGSSCHRITTE | | | | | | | | | | FINALE BEHANDLUNG THERMISCH ODER BIOLOGISCH | |
|--|---|-----------|------------|------------------|-------------------|----------------|-----------------|-------------------|-----------|---------------------------------|--|--|
| | INPUT SYSTEM A | | B | | | | | | | | C | |
| | Aufkommen | MBA Input | MBA Output | Verpackung Input | Verpackung Output | Sonstige Input | Sonstige Output | nach Aufbereitung | Kapazität | Anlagentyp | | |
| Siedlungsabfälle | 44.260.000 | 3.097.536 | | 10.100.000 | | 15.014.989 | | 16.047.475 | | | | |
| Gemischte Siedlungsabfälle [Hausmüll] | 12.600.000 | 2.830.356 | | | | | | 9.769.644 | | | | |
| Sperrmüll | 2.500.000 | 188.340 | | | | 1.849.328 | | 462.332 | | | | |
| Abfälle aus der Biotonne | 6.000.000 | 78.840 | | | | 1.356.160 | | 4.565.000 | | BVGA Bioabfallvergärung | | |
| Verpackungsabfälle [Verkaufsverpackungen] | 10.100.000 | | | 10.100.000 | | | | | | | | |
| Marktabfälle | 60.000 | | | | | 52.800 | | 7.200 | | | | |
| Straßenkehrschutt, Park- und Gartenabfälle | 6.800.000 | | | | | 6.728.146 | | 71.854 | | | | |
| Hausmüllähnliche Gewerbeabfälle | 4.100.000 | | | | | 3.485.000 | | 615.000 | | IKW Industriekraftwerke | | |
| Sonstige ASN 20 | | | | | | | | | | | | |
| Sonstige | 2.100.000 | | | | | 1.543.555 | | 556.445 | | KKW Kohlekraftwerke | | |
| Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen | 6.470.000 | 420.480 | 2.842.795 | | 4.300.000 | 4.004.000 | 3.816.737 | 13.005.052 | 0 | | | |
| Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen | | 420.480 | 2.842.795 | | | | | 0 | | | | |
| EBS SekBS | | | | | 4.300.000 | | 3.364.164 | 10.086.479 | | ZW Zementwerke | | |
| Klärschlamm [TM] | 2.740.000 | | | | | 274.000 | | 2.466.000 | | | | |
| Schredderleichtfraktion | 130.000 | | | | | 130.000 | 42.900 | 42.900 | | | | |
| Tierische Nebenprodukte | 3.600.000 | | | | | 3.600.000 | 240.000 | 240.000 | | KVA Klärschlammverbrennung | | |
| Sonstige | | | | | | | 169.673 | 169.673 | | | | |
| Gewerbe- und Produktionsabfälle | 30.505.881 | 346.020 | | 11.400.000 | | 7.553.000 | 935.000 | 11.949.861 | | | | |
| Holzabfälle [o. Verpack. Sperr- Hausmüll Baubfall] | 4.600.000 | | | | | 1.610.000 | | 2.990.000 | | | | |
| Faserabfälle Papierschlamm* | 5.600.000 | | | | | 2.800.000 | | 2.800.000 | | BMKW Biomasskraftwerke | | |
| Verpackungsabfälle gewerblich | 11.400.000 | | | 11.400.000 | | | | | | | | |
| Sonstige Prod.-/Gewerbeabfälle zur energ. Verw. * | 4.265.881 | 346.020 | | | | | | 3.919.861 | | SMVA Sonderabfallverbrennung | | |
| Sonstige Kunststoffabfälle | 2.900.000 | | | | | 1.740.000 | 935.000 | 1.160.000 | | | | |
| Küchen-/Kantinenabfälle | 1.100.000 | | | | | 1.051.000 | 984.000 | 984.000 | | | | |
| Altfett | 240.000 | | | | | 240.000 | 48.000 | 48.000 | | EBS-KW EB S-Kraftwerke | | |
| Ölabfälle (Altöl) | 400.000 | | | | | 352.000 | | 48.000 | | | | |
| Bau- und Abbruchabfälle [brennbar - Holz/Kunststoff] | 8.700.000 | | | | | 4.350.000 | | 4.350.000 | | | | |
| Gefährliche Abfälle | 18.200.000 | | | | | 15.624.788 | | 2.575.212 | | | | |
| Altrefen | 620.000 | | | | | 370.000 | | 250.000 | | MVA Müllverbrennung | | |
| Sonstige | | | | | | | | -197.100 | | | | |
| | | | | | | | | | | ÜBERSCHUSS KAPAZITÄT | | |
| GESAMT | 108.755.881 | 4.061.136 | 2.842.795 | 21.500.000 | 4.300.000 | 46.916.777 | 4.751.737 | 47.980.500 | 1.777.189 | 49.757.689 | | |

Quelle: Eigene Darstellung (* Der Wert für „Sonstige Produktions- und Gewerbeabfälle zur energetischen Verwertung“ wurde unverändert aus der Abschätzung für 2015 übernommen)

Abbildung 4-4 Prognose der in Deutschland anfallenden und behandelten Abfallströme mit energetisch nutzbaren Anteilen im Jahr 2030 (Stoffströme mit vollständige inerten Materialien, wie Glas, Metall oder Mineralik, sind nicht berücksichtigt)



Quelle: Eigene Darstellung

4.3.2 Energiebereitstellung

Auch die Energiebereitstellung aus Abfall wurde für das Jahr 2030 prognostiziert. Tabelle 4-4 und Abbildung 4-5 g einen Überblick über die erwarteten Abfallmengen und die daraus in den verschiedenen Anlagentypen produzierte Endenergie. Die Einsatzmengen wurden anhand des in Tabelle 4-3 festgelegten Schlüssels auf die Anlagen verteilt, wobei lediglich die anfallende Menge von rund 48 Mio. Mg (nicht die verfügbare Kapazität von 49,7 Mio. Mg) berücksichtigt wurde. Die Minderauslastung von

etwa 1,8 Mio. Mg, im Vergleich zur prognostizierten Kapazität, wurde bei allen Anlagentypen mit gleichem Prozentsatz berücksichtigt (3,5 % geringerer Durchsatz).

Tabelle 4-4: Energie aus Abfall in Deutschland: Prognose für 2030

| 2030 | INPUT | | OUTPUT | | |
|---|---|---------------------|-------------------------|--------------|--------------|
| | Masse [Mg/a] | Energie [PJ/a] | E _{ges} [PJ/a] | Wärme [PJ/a] | Strom [PJ/a] |
| Müllverbrennung – MVA | 19.051.382 | 188,36 | 100,62 | 73,28 | 27,34 |
| Ersatzbrennstoffkraftwerke – EBS-KW | 5.413.788 | 63,78 | 40,55 | 29,21 | 11,35 |
| Sondermüllverbrennung – SMVA | 1.333.816 | 21,14 | 13,71 | 13,29 | 0,42 |
| Biomassekraftwerke – BMKW | 5.921.704 | 74,47 | 30,73 | 11,15 | 19,58 |
| Klärschlammverbrennung – KVA | 2.466.000 | ¹⁾ 92,16 | ³⁾ 0 | 0 | 0 |
| Zementwerke – ZW | 3.971.000 | 70,62 | 49,43 | 49,43 | 0 |
| Kohlekraftwerke – KKW | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Industriekraftwerke – IKW | 6.100.000 | 80,01 | 60,01 | 40,01 | 20,00 |
| Bioabfallvergärung – BVGA | 5.500.000 | | 8,52 | 4,26 | 4,26 |
| Mechanisch-biologische Abfallbehandlung – MBA | 4.061.136 | | 0,07 | 0,03 | 0,03 |
| Σ | 53.818.825 | 590,54 | 299,38 | 220,66 | 78,72 |
| Biodiesel | 392.000 | | 13,02 | | |
| Deponiegas | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Exkremente | 209.739.642 | | 88,58 | 42,23 | 46,35 |
| Σ | 263.950.467 | | 400,98 | 262,89 | 125,07 |
| Anmerkungen | | | | | |
| 1) | in vollgetrocknetem Zustand | | | | |
| 3) | bei Einsatz von lediglich entwässertem Schlamm ist bilanziell kaum Energie rückgewinnbar | | | | |
| | MVA = Müllverbrennungsanlage EBS-KW = Ersatzbrennstoffkraftwerke SMVA = Sondermüllverbrennungsanlagen BMKW = Biomassekraftwerke KVA = Klärschlammverbrennungsanlagen ZW = Zementwerke KKW = Kohlekraftwerke IKW = Industriekraftwerke BVGA = Bioabfallvergärungsanlagen MBA = Mechanisch-biologische Abfallbehandlung | | | | |

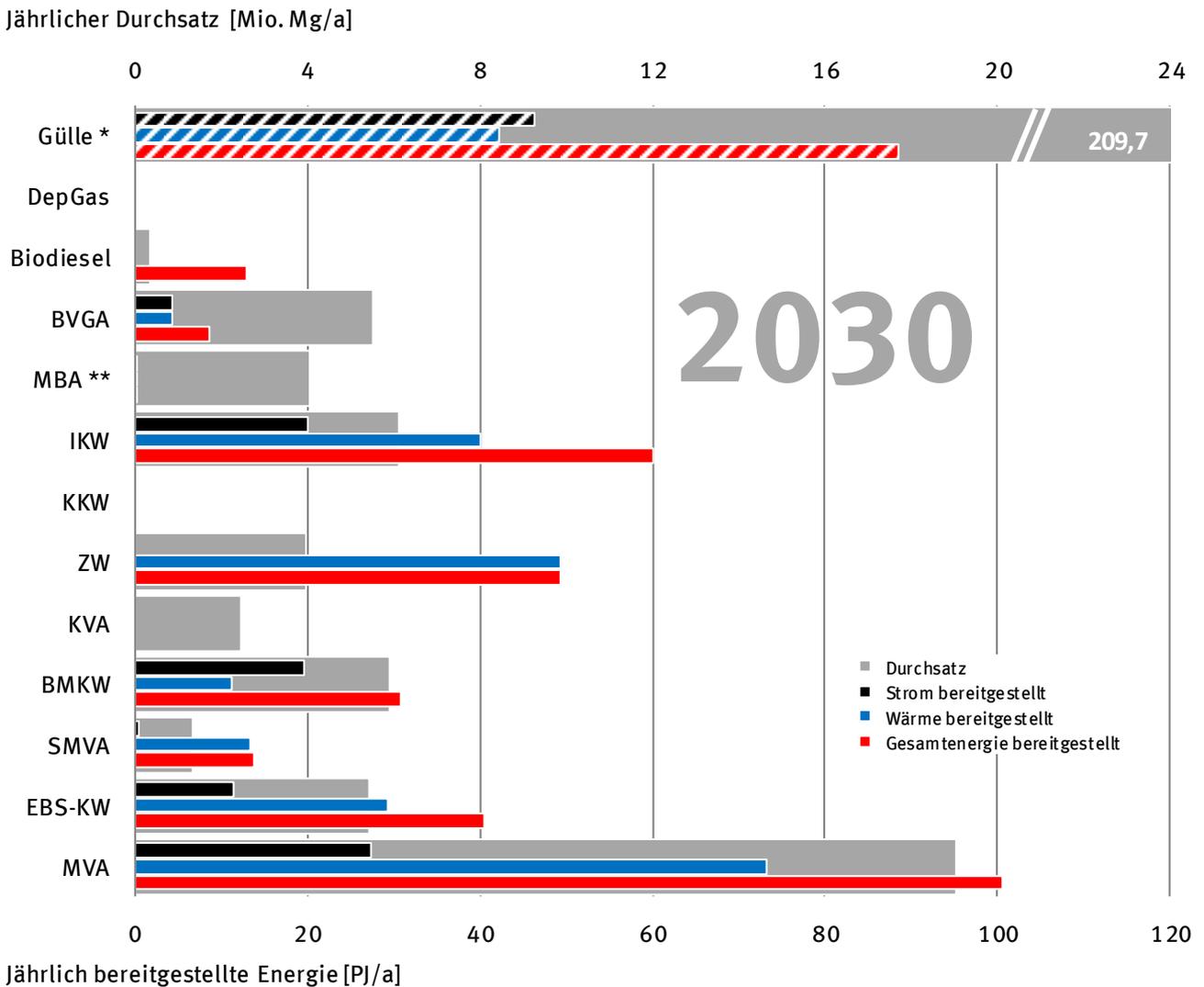
Quelle: Eigene Darstellung

Analog zum Rückgang der Abfallmenge nimmt auch die aus Abfall bereitgestellte Energie bis zum Jahr 2030 geringfügig ab. Deutlicher fallen die Verschiebungen zwischen den verschiedenen energetischen Verwertungspfaden aus.

Aufgrund der Energiewende werden sukzessive Kohlekraftwerke außer Betrieb gesetzt. Damit wird in absehbarer Zeit auch die Mitverbrennung von Abfällen in diesen Anlagen nicht mehr möglich sein. Da dieser Prozess bis zum Jahr 2030 weitestgehend abgeschlossen sein sollte, wurde bei der Prognose keine Behandlungskapazität für Abfälle in Kohlekraftwerken in 2030 mehr berücksichtigt.

Die freiwerdenden Mengen werden sich andere Verwertungswege suchen. Aufgrund der guten Qualitäten von Ersatzbrennstoffen für Kohlekraftwerke scheint der künftige Einsatz dieser Brennstoffe in Zementwerken eine denkbare Option. Diese Einschätzung steht auch im Einklang mit dem Wunsch der Zementindustrie in der Zukunft die Energiebereitstellung aus abfallstämmigen Fraktionen weiter zu erhöhen.

Abbildung 4-5 Energie aus Abfall in Deutschland: Prognose für 2030 verfügbar (* Die Werte für Gülle sind nicht umgesetzt sondern beschreiben das Potenzial | ** für MBA ist nur die Energieerzeugung durch Vergärung berücksichtigt)



Quelle: Eigene Darstellung

Durch die Getrennthaltungspflicht für Bioabfälle, wird sich dieser Stoffstrom und damit auch die Behandlungskapazität in den entsprechenden Vergärungsanlagen sukzessive erhöhen. Gleichzeitig wird von einem geringfügigen Rückgang der MBA Kapazitäten ausgegangen, die allerdings in der Zukunft vermehrt als biologische Trocknungsanlagen oder rein mechanische Vorbehandlungsanlagen, und weniger als Energieerzeugungsanlagen, betrieben werden.

Für das Deponiegas wird bis zum Jahr 2030 ein Ausklingen der energetischen Nutzungsphase erwartet. Zwar werden noch methanhaltige Restgase in den Deponien gebildet, die zu erwartenden Volumenströme und Methankonzentrationen aber keine sinnvolle energetische Nutzung mehr zulassen.

Für den Gülleanfall wird ein weiterer Anstieg um ca. 6 Mio. Mg, mit einer entsprechenden Zunahme des energetischen Potenzials, prognostiziert.

4.3.3 CO₂-Reduktion

Um die CO₂-Emissionen abzuschätzen, welche durch die energetische Nutzung von Abfall im Jahre 2030 erzeugt werden, musste neben den anfallenden Abfallmengen auch angenommen werden, wie sich diese Mengen auf die verschiedenen Anlagen verteilen. Für manche Abfallströme war diese Zuordnung eindeutig, so z.B. für Altreifen, welche bei der energetischen Nutzung komplett im Zementwerk eingesetzt werden. Auch zu einigen Anlagentypen lassen sich für das Jahr 2030 relativ sichere Aussagen treffen. So führt z.B. die Stilllegung von Kohlekraftwerken zum Wegfall von Verbrennungskapazitäten oder es kann davon ausgegangen werden, dass Sondermüllverbrennungsanlagen ausschließlich gefährliche Abfälle verbrennen. Wie sich die übrigen Abfallmengen verteilen, wird vor allem von der Marktsituation bestimmt und lässt sich daher kaum sinnvoll vorhersagen.

Um dennoch eine Einschätzung des Einsparungspotenzials der Energieerzeugung aus Abfällen zu geben, wurden die in Kapitel 4.3.2 ermittelten Mengen erzeugter Wärme und Stroms für das Jahr 2030 sowie die für das Jahr 2015 ermittelten brennstoffmixspezifischen CO₂-Menge für jede Anlage und deren Wirkungsgrade verwendet. Die Allokation auf die Koppelprodukte erfolgte wie auch für das Jahr 2015 sowohl mit der Wirkungsgradmethode als auch mit der IEA-Methode.

Da das Einsparungspotenzial einen Vergleich mit einer Referenz beinhaltet, musste für das Jahr 2030 eine Annahme zu den zu erwartenden produktspezifischen CO₂-Emissionen des Strom- und Wärmemarktes getroffen werden. Für die Stromerzeugung wird in [315] ein Emissionsfaktor von 386 g/kWh_{el} für das Jahr 2020 angenommen, was den beschriebenen Trend in [316] bestätigt, welcher eine Reduktion des CO₂-Ausstoßes um 55 % bis zum Jahr 2030 (verglichen mit 1990) schätzt. Die CO₂-Emissionen der Stromerzeugung aus Abfall wurden mit einem Referenzwert des Strommixes von 350 g/kWh_{el} verglichen. Darüber hinaus wurde auch hier der Marginalmix berücksichtigt, dessen Zusammensetzung identisch zu der des Jahres 2015 angenommen wurde (745 g/kWh_{el}). Für den Wärmemix wurde die prognostizierte Zusammensetzung aus [317] verwendet und ein entsprechender CO₂-Emissionsfaktor von 250 g/kWh_{th} errechnet. Die Emissionen des Fernwärmemixes wurden denen des Jahres 2015 gleichgesetzt (285 g/kWh_{th}).

Tabelle 4-5: CO₂-Einsparung durch Energieerzeugung aus Abfällen im Jahr 2030 [in 1000 Mg CO₂]

| Allokationsmethode | Referenzszenario | | | |
|--------------------|------------------|------------------|-------------------|----------------------|
| | Wärme Strom | Wärme Marginal | Fernwärme Strom | Fernwärme Marginal |
| Wirkungsgrad | 7 366 | 16 210 | 6 399 | 15 243 |
| IEA | 8 303 | 17 127 | 7 336 | 16 180 |

Quelle: Eigene Darstellung

Die Abschätzungen der Mengen an CO₂, die im Jahr 2030 durch die energetische Nutzung von Abfällen eingespart werden können, sind in Tabelle 4-5 dargestellt. Durch den deutlich niedrigeren Emissionsfaktor des Strommixes ist die Schwankungsbreite zwischen den verschiedenen Szenarien deutlich größer als für das Jahr 2015.

4.4 Hemmnisse und Fördermöglichkeiten

Entsprechend der europäischen Abfallhierarchie ist die stoffliche Verwertung einer energetischen Nutzung von Abfällen grundsätzlich vorzuziehen (Ausnahmen aufgrund ökologischer Vorteile oder wirtschaftlicher Angemessenheit sind möglich). Daher ist eine Förderung der energetischen Nutzung von

Abfällen immer auf solche Fraktionen zu beschränken, die für eine stoffliche Verwertung nicht mehr geeignet sind. Im hart umkämpften Abfallmarkt wird die Etablierung von Fördermaßnahmen oder der Abbau von Hemmnissen im Zusammenhang mit der energetischen Nutzung von Abfällen dennoch immer eine politische Gratwanderung zwischen den verschiedenen Interessengruppen darstellen.

Nach Einschätzung der Autoren sollte eine optimierte energetische Abfallnutzung der Zukunft mit folgenden Schlagworten charakterisiert werden:

- ▶ integriert
- ▶ dezentral
- ▶ wärmegeführt

Das bedeutet, die Abfälle werden dort verwertet wo sie anfallen. Am Anfallort ist in der Regel auch eine effektive Wärmeabnahme möglich. Verschiedene Anlagen zur Ver- und Entsorgung können dabei im integrierten Betrieb (z.B. System MVA – Kläranlage – Bioabfallbehandlung) Synergien heben, dadurch Kosten senken und den ökologischen Nutzen optimieren. Alle Maßnahmen, die die Erreichung dieses Ziels unterstützen, sind zu begrüßen. Wichtig ist es zunächst solche Konzepte den politischen Entscheidern als vorteilhaft und zukunftsweisend zu vermitteln. Anschließend gilt es Pilotprojekte mit Best-Practice Charakter umzusetzen, um die Vorteile in der Praxis nachzuweisen.

Aber auch auf politischer Ebene sind verschiedene Maßnahmen erforderlich oder zumindest hilfreich, um die energetische Abfallverwertung zu stützen und weiter auszubauen.

Ein gern und häufig gewähltes Instrument zur Steuerung der Abfallwirtschaft ist die Vorgabe von Rückgewinnungs- und Recyclingquoten. Ziel dabei ist es, immer mehr Wertstoffe im Kreislauf zu führen und dadurch den Nachhaltigkeitsgedanken zu stärken. Hier ist auch ein Augenmerk auf die Produkte, mit einem Trend zu immer mehr Verbunden, zu richten: Eine sortenreine Trennung und stoffliche Verwertung ist hier oft nicht möglich. Tatsächlich stellen solche Quoten allein, ohne Beurteilung der tatsächlichen Recyclingfähigkeit und flankierender Qualitätssicherung, aber ein Problem dar. Zum einen kann hierdurch die Qualität der Recyclate sinken, im schlechtesten Fall können sogar Schadstoffe im Kreislauf geführt werden. Sicher ist, dass der Markt kein Interesse an qualitativ minderwertigen Sekundärrohstoffen hat.

Um dieses Problem zu lösen, wären Anforderungen an Produktdesign und eine grundsätzliche Reorganisation des deutschen Abfallwirtschaftssystems notwendig. Die dualen Sammel- und Verwertungsstrukturen haben zu einem ständigen Wettbewerb um die anfallenden Abfallmengen geführt und verhindern in manchen Bereichen die Etablierung effizienter Sammel-, Trenn- und Verwertungskonzepte. So macht es beispielsweise wenig Sinn, dass ein Teil der Kunststoffverpackung zunächst separat gesammelt und durch Aufbereitungsanlagen geschleust wird, bevor er letztlich doch als Brennstoff eingesetzt wird. Es wird daher empfohlen, die Abfälle bereits am Anfallort (also beim Bürger oder im Gewerbe) möglichst verwertungsorientiert zu sammeln. Solche Kunststoffe bzw. -verbunde, die nicht stofflich verwertet werden können, könnten mit dem Restmüll der energetischen Verwertung zugeführt werden. So würden kostenintensive doppelte Behandlungsstrukturen vermieden und das Gesamtsystem effizienter und ökologischer gestaltet.

Wie schon in Kapitel 3.3.3 ausführlich erläutert, wird der berechnete klimawirksame Nutzen der Energie aus Abfall mit der Zunahme erneuerbarer Energien an der Energieversorgung zurückgehen. Auf lange Sicht ist sogar zu erwarten, dass die thermische Abfallbehandlung rechnerisch zu einer Klimabelastung führen wird und daher womöglich in die politische Diskussion gerät. Im Extremfall wäre es sogar denkbar, dass die Energie aus der Abfallbehandlung aufgrund der fossilen CO₂-Emissionen nicht mehr eingespeist werden dürfte. Eine solche Entwicklung wäre ökologisch jedoch unsinnig, da die thermische Abfallbehandlung auch in Zukunft ein wichtiger Pfeiler der Abfallwirtschaft bleiben wird, um eine schadlose Abfallbehandlung zu sichern und die Energie aus den behandelten Abfällen daher

ohnehin anfallen wird, ob sie nun genutzt wird oder nicht. Es ist daher zu diskutieren, wie mit diesem Dilemma umzugehen ist.

Eine mögliche Lösungsmöglichkeit wäre es, wie bei anderen Fällen von unvermeidbarer Abwärme auch, die Abwärme aus der thermischen Behandlung von stofflich nicht mehr nutzbaren Restabfällen als grundsätzlich klimaneutral zu betrachten. In der Schweiz wurde dieser Gedanke bereits offiziell umgesetzt. Abwärme – und zwar auch solche aus „Kehricht“ – wird dort von Seiten des Eidgenössischen Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK sowie vom Bundesamt für Energie als klimaneutral deklariert [299].

Eine Restriktion ganz anderer Art ist in den Standorten vieler Abfallbehandlungsanlagen zu sehen, die eine effiziente Wärmeabgabe aufgrund fehlender Abnehmer von vornherein unmöglich machen. Am Status quo ist hier zunächst nichts zu ändern. Allerdings könnten Maßnahmen ergriffen werden, um Neubauprojekte an optimalen Standorten – im Regelfall zur Versorgung von Industriebetrieben – zu realisieren. Auf Seiten des Bundes könnte dies beispielsweise durch Vorgabe entsprechender anlagen-spezifischer Energienutzungsgrade, beispielsweise in der 17. BImSchV, erfolgen, die nur bei entsprechend effizienter Wärmenutzung erreichbar wären. Kommunen könnten z. B. einen Anschlusszwang an lokale Lieferanten aussprechen, die abfallstämmig Brennstoffe einsetzen oder in den Leitplanungen gezielt solche Einrichtungen vorsehen.

5 Zusammenfassung und Fazit

Nach der europäischen Abfallrahmenrichtlinie wird die energetische Verwertung von Abfällen in die vierte Stufe der Hierarchie unterhalb der stofflichen Verwertung eingeordnet. Dennoch wird eine große Menge an Abfällen der energetischen Verwertung zugeführt. Dadurch tragen Abfälle inzwischen einen nicht zu vernachlässigbaren Anteil an der Strom-, Wärme- und Prozessenergieversorgung der Bundesrepublik Deutschland.

Im Fokus dieser Studie stand daher die Ermittlung der Potenziale aller in Deutschland zur energetischen Verwertung anfallenden Abfallströme und der daraus bereitstellbaren Energiemengen sowie die Quantifizierung der verfügbaren Anlagenkapazitäten zu deren Behandlung. Auf dieser Basis wurde eine Prognose zur Situation im Jahr 2030 abgeleitet.

Im Rahmen der Studie wurden im Wesentlichen folgende Inhalte bearbeitet:

- ▶ Ermittlung der aktuell in Deutschland verfügbaren Abfallmengen und Anlagenkapazitäten zur Energiebereitstellung aus Abfällen (inklusive alternative Verfahren und Deponiegas)
- ▶ Abschätzung der Energiemengen, die insgesamt und durch die einzelnen Verfahren zur Verfügung gestellt werden können
- ▶ Prognose der künftigen Entwicklung bis zum Jahr 2030
- ▶ Abschätzung der CO₂ Reduktionspotenziale durch die energetische Nutzung von Abfällen

Ausgangspunkt der Untersuchungen war die Quantifizierung der Einzelkapazitäten (anlagenscharf) der deutschen Abfallbehandlungsanlagen, der darin behandelten Abfallmengen und daraus produzierten bzw. exportierten Energiemengen. Hierzu wurden Betreiberbefragungen durchgeführt und in den Abfallbilanzen der Länder, den Medien des statistischen Bundesamtes, der Bundesnetzagentur sowie in Verbandsinformationen und der frei verfügbaren Literatur recherchiert. Aus diesen Daten wurden die in den verschiedenen Anlagentypen (MVA | EBS-KW | SMVA | BMKW | KVA | ZW | KKW | IKW | BVGA | MBA mit Vergärungsstufe) jährlich produzierten Energiemengen abgeleitet und auf die verfügbare landesweite Gesamtkapazität des jeweiligen Typs hochgerechnet. Auffälligkeiten und Inkonsistenzen wurden durch Rücksprache mit branchenkundigen Fachleuten und durch Rückfragen bei Betreibern so weit möglich aufgelöst.

Zunächst muss festgehalten werden, dass die Datenlage für eine geschlossene Bilanzierung der Abfallströme in Deutschland zur energetischen Verwertung und thermischen Behandlung als ungenügend einzustufen ist. Für gewerbliche Abfälle existieren nur Schätzungen, da diese nicht statistisch erfasst werden. Aber auch für die statistisch erfassten Siedlungsabfälle ist es schwierig, konsistentes Datenmaterial zu finden. Selbst die Publikationen der öffentlichen Informationsträger (Bund, Länder) sind häufig untereinander nicht kompatibel. Vor diesem Hintergrund ist es wichtig zu betonen, dass die Ergebnisse dieser Studie als fundierte Schätzung zu verstehen sind, die einzelnen Zahlen im Detail aber sicherlich Fehler aufweisen können.

Nach den Ergebnissen dieser Studie werden in Deutschland jährlich 48 Mio. Mg Abfälle vorwiegend in thermischen aber auch durch biologische Verfahren energetisch verwertet. Wesentliche Stoffströme dabei sind Siedlungsabfälle, hauptsächlich der klassische Hausmüll. Weitere relevante Fraktionen sind Ersatzbrennstoffe, Altholz, Bioabfälle, Klärschlamm und gefährliche Abfälle.

Der Heizwert von 537 PJ/a der mit dem Abfall allein den thermischen Anlagen zugeführt wird, entspricht 4,3 % des deutschen Primärenergieverbrauchs. In den Anlagen (biologisch und thermisch) wird daraus eine Endenergiemenge (brutto) von 331 PJ/a, in Form von Strom, Dampf und (Prozess-) Wärme bereitgestellt. Nach Berücksichtigung des Eigenverbrauchs tragen Abfälle damit einen Anteil

von rund 3,7 % des Endenergieverbrauchs der Bundesrepublik. Andererseits sind hier auch noch Potenziale zu heben, die allerdings vorwiegend mit Standort- und Abnahmefragen (Wärmelieferung, Lastgang) zu tun haben.

Mit rund 20 Mio. Mg/a besitzen die Müllverbrennungsanlagen die größte Behandlungskapazität und erzeugen mit 110 PJ/a (brutto) deutlich mehr als ein Drittel der insgesamt aus Abfall erzeugten Nutzenergie. Gemeinsam mit den Ersatzbrennstoffkraftwerken, die 44 PJ pro Jahr (brutto) bereitstellen, erhöht sich der Anteil auf fast 50 %. Ebenfalls über 40 PJ/a werden in den Zementwerken aus Abfällen freigesetzt. Auf 30 PJ/a lässt sich der Beitrag der Altholzwerkwerke auf über 60 PJ jener der Industriekraftwerke beziffern. Im Vergleich zu den anderen Anlagentypen ist der geringe Beitrag der MBA-Anlagen mit Anaerobstufe von 0,06 PJ/a vernachlässigbar.

Aus Deponiegas werden aktuell noch etwa 1,7 PJ/a Strom erzeugt. Die Gaserzeugung ist bereits jetzt rückläufig, da seit 2005 keine unbehandelten Abfälle und damit auch kaum noch organische Substanz auf den Deponien abgelagert wird.

Ein bedeutendes zusätzliches Energiepotenzial, das nur am Rande zum Abfallbereich gerechnet wird, beinhalten tierische Exkrememente, also Gülle und Festmist, von denen im Jahr über 200 Mio. m³ in Deutschland anfallen. Durch Vergärung könnten aus diesem Stoffstrom insgesamt etwa 5,8 Mrd. m³ Biogas, bzw. nach motorischer Nutzung etwa 40 PJ Strom und 45 PJ Wärme, erzeugt werden.

Die Abschätzung der in Deutschland anfallenden Abfallmengen im Jahr 2030 erfolgte ausgehend von den zuvor ermittelten Abfallmengen aus dem Jahr 2015. Zudem wurden wesentliche Einflussfaktoren und Trends berücksichtigt. Diese waren die Bevölkerungsentwicklung bis 2030, die wirtschaftliche Entwicklung bis 2030, gesetzliche Änderungen, die bis 2030 umgesetzt sein sollen, technische Entwicklung sowie Entwicklung bei der Strom- und Wärmebereitstellung.

Bezogen auf das Gesamtabfallaufkommen für die energetische Verwertung und thermische Behandlung in 2030 sind im Vergleich zu 2015 nur geringfügige Änderungen erwarten. Durch die prognostizierten Entwicklungen ergab sich zwar ein Mehraufkommen der betrachteten Gesamtmenge an Abfällen (also allen Stoffströmen die thermisch verwertbar sind oder verwertbare Anteile enthalten) von 9,7 Mio. Mg, die sich daraus bilanziell ergebende Abfallmenge der energetisch zu verwertenden oder thermisch zu behandelnden Abfallmengen blieb jedoch im Vergleich zu 2015 fast konstant (leichter Rückgang von 120.000 Mg/a.) Grund für die Verringerung des relativen Anteils der energetischen Verwertung an der betrachteten Gesamtabfallmenge von 48,5 auf 44 % ist letztlich die Annahme, dass bis 2030 eine weitergehende Getrennthaltung von Abfällen erfolgt und höhere Recyclingquoten erreicht werden.

Zudem wird es im Bereich der Entsorgungsanlagen zu Verschiebungen kommen. So werden viele Kohlekraftwerke aufgrund der Energiewende außer Betrieb gehen, die Zementwerke werden den Abfalleinsatz erhöhen und Klärschlämme werden aus der Mitverbrennung und landwirtschaftlichen Verwertung in die Monoverbrennung drängen. Zudem läuft die EEG Förderung für viele Altholzverbrennungsanlagen aus.

Aufgrund der geringfügig rückläufigen Abfallmengen wird für das Jahr 2030 auch eine geringfügig abnehmende Energiebereitstellung aus Abfällen erwartet. Signifikante Wirkungsgradsteigerungen wurden für den Zeitraum nicht zu Grunde gelegt, da die Zeit für eine relevante Erneuerung des Anlagenparks zu kurz erscheint und die für den deutschen Markt bis 2030 als ausreichend prognostizierten Kapazitäten (dies gilt selbst dann, wenn die Kohlekraftwerke sukzessive vom Netz gehen) Neuinvestitionen vermutlich begrenzen wird.

Es wird davon ausgegangen, dass die wegfallenden Kapazitäten in den Kohlekraftwerken zum größten Teil durch die Zementwerke aufgefangen werden, da dort die Absicht besteht, die Sekundärbrennstoffquoten weiter zu erhöhen. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass für den vermehrten Einsatz im Zementwerk entsprechende Qualitäten der Sekundärbrennstoffe erforderlich sind.

Die Rolle des Abfalls im Bereich der Energieerzeugung wird sich auf lange Sicht verändern. Die erzielbaren Stromerlöse sind nur noch gering, und die vom Markt geforderte Lieferflexibilität kann nur begrenzt geboten werden, da bei der Abfallbehandlung zunächst immer die schadlose Entsorgung im Vordergrund steht. Wärme aus Abfall wird dagegen in Zukunft mehr nachgefragt werden, da in den nächsten Jahren viele thermische Kraftwerke vom Netz gehen, die auch in die Kraft-Wärme-Kopplung eingebunden waren. Diese Lücke könnten energetische Abfallverwertungsanlagen anteilig schließen. Insbesondere interessant ist die Versorgung von Industriebetrieben, da hier eine ganzjährig gute Wärmeabnahme gesichert ist.

Sowohl im Betrachtungszeitraum 2015 als auch im Jahr 2030 trägt die energetische Nutzung von Abfällen zu einer Reduktion der Freisetzung von Treibhausgasen bei. Im Jahr 2015 wurden durch die Energieerzeugung aus Abfällen etwa 15 Millionen Mg Kohlenstoffdioxid eingespart. Das Einsparpotenzial im Jahre 2030 wird auf 12 Mio. Mg abgeschätzt.

Es ist unstrittig, dass die thermische Abfallbehandlung aus Gründen des Umwelt- und Gesundheitsschutzes auch in Zukunft ein wichtiger Pfeiler der Abfallwirtschaft sein wird. Mit zunehmendem Anteil erneuerbarer Energien an der deutschen Energieversorgung ist langfristig aber auch ein negativer Beitrag der energetischen Abfallverwertung zur CO₂-Bilanz absehbar. Eine Nutzung der bei der unvermeidbaren Abfallverbrennung immer entstehenden Abwärme ist aber klimapolitisch sicherlich sinnvoll, da das mit der Erzeugung verbundene klimawirksame Kohlendioxid ganz unabhängig von der späteren Nutzung ohnehin freigesetzt wird. Es ist daher zu diskutieren, wie mit diesem Dilemma umzugehen ist. Eine mögliche Lösungsmöglichkeit wäre es, wie bei anderen Fällen von unvermeidbarer Abwärme auch, die Abwärme aus der thermischen Behandlung von stofflich nicht mehr nutzbaren Restabfällen als grundsätzlich klimaneutral zu betrachten.

Anhang

A 2.2 Datenermittlung

Abbildung A 2.2-1 Fragebögen an die Betreiber thermischer Abfallbehandlungsanlagen

| Name Anlage: | | | | | | |
|---|------------------------------------|------|------|------|------|------|
| Ansprechpartner: | | | | | | |
| ANLAGE | | 2016 | 2015 | 2014 | 2013 | 2012 |
| Anzahl Linien | [-] | | | | | |
| Maximale Kapazität (technisch bzw. rechtlich möglich) | [Mg/a] | | | | | |
| Auslegungsheizwert | [kJ/kg] | | | | | |
| Feuerungswärmeleistung der Gesamtanlage (Abfallteil) | [MW] | | | | | |
| Installierte Gesamtgeneratorleistung | [MW] | | | | | |
| Abgasmenge | [m ³ _{i,N} /h] | | | | | |
| Abgastemperatur (im Mittel oder von - bis) | [°C] | | | | | |
| Frischdampfdruck | [bar] | | | | | |
| Frischdampftemperatur | [°C] | | | | | |
| ABFÄLLE | | | | | | |
| Gemischte Siedlungsabfälle (nur ASN 200301) | [Mg/a] | | | | | |
| Sonstige aus Kapitel 20 (außer gef. Abfälle und 200301) | [Mg/a] | | | | | |
| Alle gefährlichen Abfälle | [Mg/a] | | | | | |
| ASN 191210 und 191212 | [Mg/a] | | | | | |
| Klärschlamm | [Mg/a] | | | | | |
| sonstige ASN (bisher nicht aufgeführt) | [Mg/a] | | | | | |
| Davon: Abfälle aus dem Ausland | [Mg/a] | | | | | |
| Durchschnittlicher Heizwert | [kJ/kg] | | | | | |
| Durchschnittlicher biogener Anteil (z.B nach HkNR) | [%] | | | | | |
| FREMDENERGIEEINSATZ | | | | | | |
| Strom | [MWh/a] | | | | | |
| Gas | [MWh/a] | | | | | |
| Heizöl | [MWh/a] | | | | | |
| Sonstiges (Menge) | [MWh/a] | | | | | |
| ENERGIE | | | | | | |
| Eigengenutzte Wärme | [MWh/a] | | | | | |
| Exportierter Prozessdampf | [MWh/a] | | | | | |
| Exportierte Wärme | [MWh/a] | | | | | |
| Produzierte Strommenge | [MWh/a] | | | | | |
| Exportierte Strommenge | [MWh/a] | | | | | |

| | | | | | | |
|---|----------|------|------|------|------|------|
| Name der Anlage: | | | | | | |
| Ansprechpartner: | | | | | | |
| | | 2016 | 2015 | 2014 | 2013 | 2012 |
| Anlagendaten | | | | | | |
| Maximale Kapazität (technisch bzw. rechtlich möglich) | [Mg/a] | | | | | |
| Auslegungsheizwert | [kJ/kg] | | | | | |
| Anzahl Linien | [-] | | | | | |
| Verfügbarkeit | [h/Jahr] | | | | | |
| Abfälle | | | | | | |
| Gesamtmenge | [Mg/a] | | | | | |
| Durchschnittlicher Heizwert | [kJ/kg] | | | | | |
| FREMDENERGIEEINSATZ | | | | | | |
| Strom | [MWh/a] | | | | | |
| Erdgas | [MWh/a] | | | | | |
| Heizöl | [MWh/a] | | | | | |
| Sonstiges (Menge) | [MWh/a] | | | | | |
| Energie | | | | | | |
| Eigengenutzte Wärmemenge | [MWh/a] | | | | | |
| Exportierte Wärmemenge | [MWh/a] | | | | | |
| Eigengenutzte Strommenge | [MWh/a] | | | | | |
| Exportierte Strommenge | [MWh/a] | | | | | |
| Exportierter Prozessdampf | [MWh/a] | | | | | |
| oder | [Mg/a] | | | | | |
| Dampfdruck | [bar] | | | | | |
| Dampftemperatur | [°C] | | | | | |

Quelle: Eigene Darstellung

A 2.3 Methodik bei der Auswertung

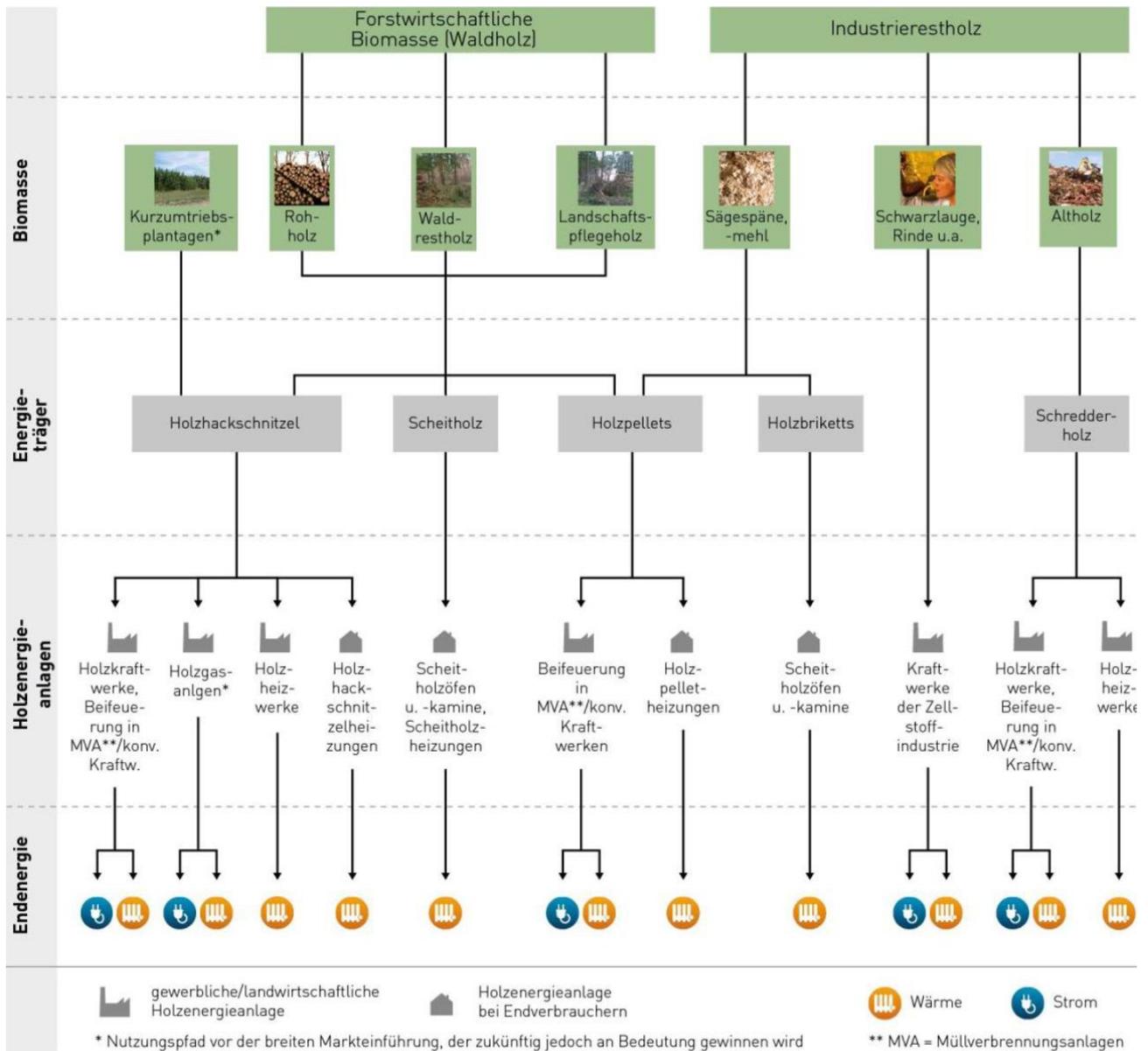
Tabelle A 2.3-1 Übersicht der bei den Berechnungen verwendeten Heizwerte [144,318] und eigene Analysen

| Abfallart | Heizwert (Rohzustand) |
|--|-----------------------|
| | [MJ/kg] |
| Siedlungsabfälle | |
| Gemischte Siedlungsabfälle | 10 |
| Sperrmüll | 16 |
| Abfälle aus der Biotonne | 5 |
| Verpackungsabfälle | 18 |
| Marktabfälle | 12 |
| Straßenkehricht, Park- und Gartenabfälle | 4 |
| Hausmüllähnliche Gewerbeabfälle | 10 |
| Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen | |
| Abfälle aus MBA-Anlagen | 10 |
| EBS SekBS | 13 22 |
| Klärschlamm | 1,5 |
| Schredderleichtfraktion | 14 |
| Tierische Nebenprodukte | 18 |
| Gewerbe- und Produktionsabfälle | |
| Holzabfälle | 16 |
| Faserabfälle Papierschlamm | 3,4 |
| Schwarzlauge | 12,3 |
| Verpackungsabfälle gewerblich | 18 |
| Produktions-/Gewerbeabfälle zur energ. Verw. | 13 |
| Sonstige Kunststoffabfälle | 18 |
| Küchen-/Kantinenabfälle | 5 |
| Ölabfälle | 40 |
| Sonstige | 10 |
| Bau- und Abbruchabfälle (brennbare Anteile) | 17 |
| Gefährliche Abfälle | 16 |
| Altreifen | 30 |

Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [144,318]

A 3.2.3.1 Holzabfälle

Abbildung A 3.2.3-1 Nutzungspfade von Energieholz [319]



Quelle: [319]

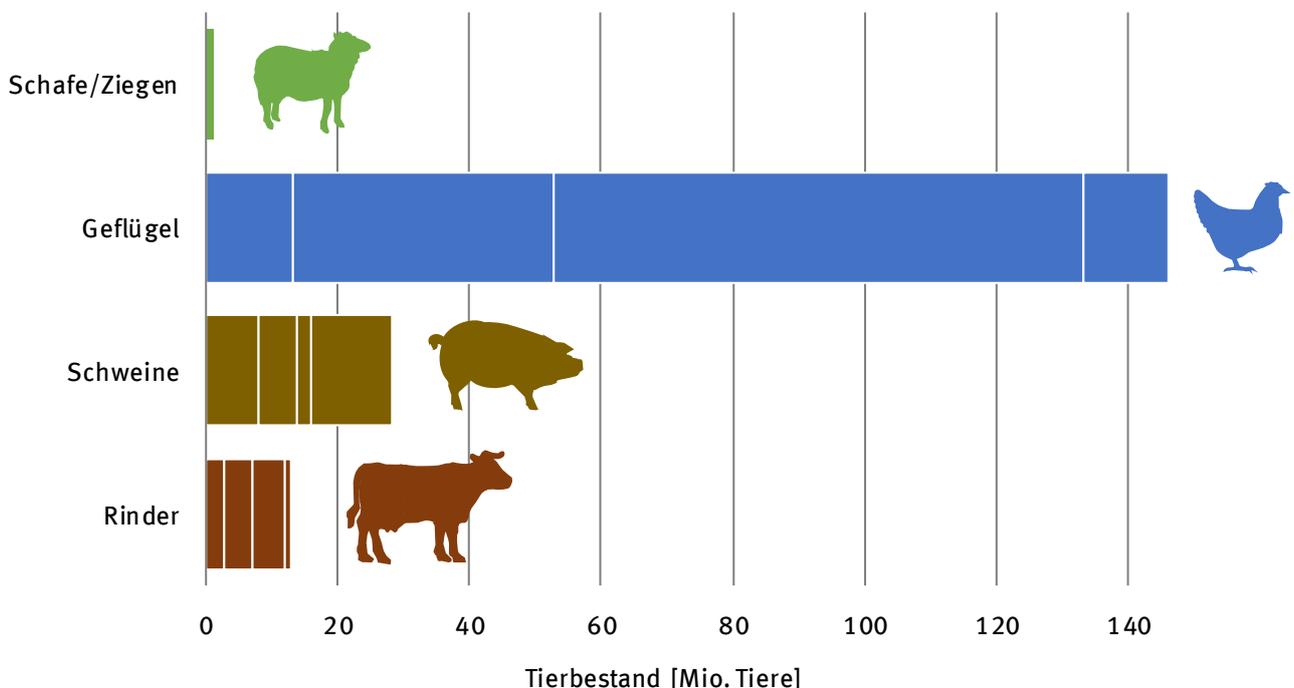
A 3.2.7 Gülle und Festmist

Da Gülle und Festmist keine klassischen Abfälle sondern landwirtschaftliche Nebenprodukte sind, werden die für die Quantifizierung des energetischen Potenzials nötigen Abschätzung und Berechnungen hier im Anhang erläutert. Es wird explizit darauf hingewiesen, dass die angewendete Methodik von anderen Untersuchungen zu dieser Thematik (z.B. von DBFZ, Thünen-Institut, KTBL) abweicht und sich die Ergebnisse daher unterscheiden. Die Autoren gehen davon aus, dass die hier verwendete Systematik zu belastbaren Ergebnissen führt.

Zunächst wurde der Tierbestand in Deutschland aufgenommen. Dieser ergibt sich aus Landwirtschaftszählungen (z.B. [238]) oder (halb-)jährlichen Bestandsaufnahmen (z.B. [239,240]). Abbildung A 3.2.7-1 zeigt die Anzahl der in Deutschland gehaltenen Nutztiere im Jahr 2014. Der Bestandsverlauf von 2000 bis 2016 ist in Abbildung A 3.2.7-4 dargestellt.

Für Schweine und Rinder liegen halbjährliche Bestandsdaten vor, welche direkt übernommen werden konnten. Im Jahr 2014 wurden in Deutschland etwa 12,7 Millionen Rinder und mehr als 28 Millionen Schweine gehalten. Schafe und Ziegen wurden in einer Gruppe zusammengefasst. Der Bestand der Schafe ist im betrachteten Zeitraum ebenfalls gut dokumentiert. Die Anzahl der Ziegen lag nur für die Jahre 2010 und 2013 vor, betrug etwa 10 % (2010) bzw. 7 % (2013) der Anzahl an Schafen [241]. Daher wurde für alle betrachteten Jahre (2000 bis 2016) ein mittlerer Anteil von 8,5 % zur Gesamtanzahl der Schafe hinzuaddiert, um den Ziegenbestand zu berücksichtigen. Der aus dieser Annahme resultierende Fehler am Gesamtergebnis, der produzierten Menge Dung, ist vernachlässigbar gering, da die Anzahl der Schafe verglichen mit Rindern und Schweinen kaum ins Gewicht fällt. Für das Jahr 2014 wird eine Anzahl von 1,7 Millionen Schafen und Ziegen angenommen.

Abbildung A 3.2.7-1 Tierbestand* in Deutschland im Jahr 2014 [241]



Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [241]

* Die einzelnen Tierarten (außer Schafe) sind in Untergruppen eingeteilt, markiert durch einen Strich im zugehörigen Balken. Die Untergruppen lauten (Darstellung von links nach rechts im Balken):
 Geflügel: Junghennen, Legehennen, Masttiere, Großgeflügel
 Schweine: Ferkel, Jungtiere, Zuchtschweine, Mastschweine
 Rinder: Kälber, Jungtiere, Milchkühe, Mastrinder

Mit fast 150 Millionen Tieren macht Geflügel die größte Gruppe an Nutztieren aus. Aufgrund der relativ kurzen Lebensdauer (vor Allem bei Masthühnern, von nur wenigen Wochen) und der großen Anzahl an Tieren pro Betrieb werden die Bestandsdaten üblicherweise als Durchschnittswerte angegeben und unterliegen erheblich größeren Schwankungen und Ungenauigkeiten als bei anderen Tieren. Für einige Jahre lagen Daten für verschiedene Geflügelgruppen (z.B. Junghennen, Legehennen, Masthühner, Puten) vor, für andere war nur der Legehennenbestand gegeben. Für Jahre mit vollständigen Datensätzen (n=6 Jahre) konnte die Verteilung des Bestands auf die Untergruppen ermittelt und verglichen werden (siehe hierzu auch Erläuterungen weiter unten, bei den Zusatzinformationen). Darauf aufbauend wurde für die übrigen Jahre der gesamte Geflügelbestand anhand der Anzahl von Legehennen hochgerechnet. Nicht dargestellt sind Pferde und andere Einhufer, für die keine Bestandsdaten für das betrachtete Jahr vorliegen. Allerdings zeigte sich bei einem Vergleich anderer Jahre (n=4 Jahre), dass die Anzahl mit etwa 500 000 [242,243] vergleichsweise gering ist.

Je nach Haltungsform fallen die Ausscheidungen der Tiere in unterschiedlicher Form an. Flüssige und feste Ausscheidungen können vermischt als Gülle vorliegen (z.B. bei Spaltenbodenhaltung) oder vermengt mit Einstreu als Mist anfallen (ggf. mit einem zusätzlichen Jaucheanfall). Um das Biogaspotenzial korrekt zu bestimmen, muss daher eine Unterscheidung der Haltungsform der einzelnen Tierarten vorgenommen werden. Aus der Landwirtschaftszählung 2010 [238] geht hervor, dass etwa 80 % der Haltungsplätze für Milchkühe und ca. 62 % der Plätze für Mastrinder als Gülleplätze ausgewiesen sind. In der Schweinemast sind etwa 6 % der Haltungsplätze als Festmistplätze ausgewiesen. Hier wurde angenommen, dass das Verhältnis der ausgewiesenen Plätze für Gülle- und Festmisthaltung dem Verhältnis der entsprechend gehaltenen Tiere entspricht, d.h. dass die Haltungsplätze gleichermaßen ausgelastet sind. Aufgrund der Haltungsform fallen die Ausscheidungen von Schafen (und Ziegen) und Geflügel in der Regel als Mist bzw. Trockenkot an.

Die Menge der Ausscheidungen hängt nicht nur von der Art der Tiere und der Haltung ab, sondern auch von Alter und Bewirtschaftungsform. So produzieren Milchkühe beispielsweise mehr als zweieinhalb Mal so viel Gülle wie Masttiere. Um die anfallende Menge an Dung mit möglichst geringem Fehler zu bestimmen, wurde daher der Bestand in entsprechend verfügbaren Unterkategorien aufgenommen (ebenfalls dargestellt in Abbildung A 3.2.7-1). So wurde der Rinderbestand in den Kategorien Kälber, Jungtiere, Milchkühe und Mastrinder erfasst. Für jedes der betrachteten Jahre konnte damit das Verhältnis ausgewachsener Milch- zu Masttiere gebildet werden. Ausgehend von der Annahme, dass sich Milch- und Masttierbestände gleichmäßig entwickeln, wurde das errechnete Verhältnis auch auf Jungtiere und Kälber übertragen. Somit wurden Kälber und Jungtiere, welche zu Milchkühen aufgezogen werden, von jenen unterschieden, welche für die Masttierhaltung bestimmt sind. Diese Herangehensweise ermöglichte es, die Verteilung von Gülle- zu Festmisthaltungsplätzen, welche nur für die Gruppen Milch- und Mastvieh vorlag und nicht für Kälber und Jungtiere, auch auf letztere anzuwenden. Die in Deutschland gehaltenen Schweine konnten in die Untergruppen Ferkel, Jungtiere, Zucht- und Mastschweine eingeteilt werden. Für Geflügel wurde eine Unterscheidung in Junghennen, Legehennen, Masttiere und Großgeflügel (Puten, Gänse, Enten) vorgenommen. Den Bestandsdaten entsprechend wurden Schafe (und Ziegen) in Jungtiere (< 1 Jahr) und Tiere älter als ein Jahr eingeteilt.

Nutztiere werden vorrangig in Ställen gehalten, wo ihre Exkremamente gesammelt und entsorgt werden können. Darüber hinaus verbringen viele Tiere eine mehr oder weniger große Zeit ihres Lebens im Freien, also in Weidehaltung. In dieser Zeit verbleiben auch die Exkremamente auf der Weide, stehen also nicht für die Erzeugung von Biogas zur Verfügung. Aus der Landwirtschaftszählung 2010 geht hervor, dass 42 % der Milchkühe und 35 % der Masttiere mit Weidezeit gehalten werden. Diese beträgt im Schnitt mindestens 2 Stunden täglich (also 8,3 % der Zeit). [238,244,245] Die genaue Weidezeit wird nicht näher spezifiziert. Es ist anzunehmen, dass sie für bestimmte Rindergruppen deutlich über der Mindestdauer liegt. So verspricht die Großmolkerei Arla beispielsweise, dass ihre Milchkühe, welche sogenannte Weidemilch produzieren, täglich mindestens sechs Stunden auf der Weide verbringen [246]. Da der Begriff Weidemilch in Deutschland allerdings nicht gesetzlich geregelt ist [247], der

Marktanteil an Weidemilch wohl nicht nennenswert ist [248] und keine weiteren brauchbaren Informationen zur genauen Weidezeit der Tiere vorliegen, war die tatsächlich durch Freilandhaltung von Rindern vermiedene Dungmenge zur Entsorgung nicht verlässlich zu bestimmen. Daher wurde die Mindestdauer geringfügig nach oben korrigiert und angenommen, dass für Rinder mit Weidegang 10 % der anfallenden Exkreme abgezogen werden müssen.

Tabelle A 3.2.7-1 Dunganfall verschiedener Tierarten und Haltungsformen [252, 259–265]

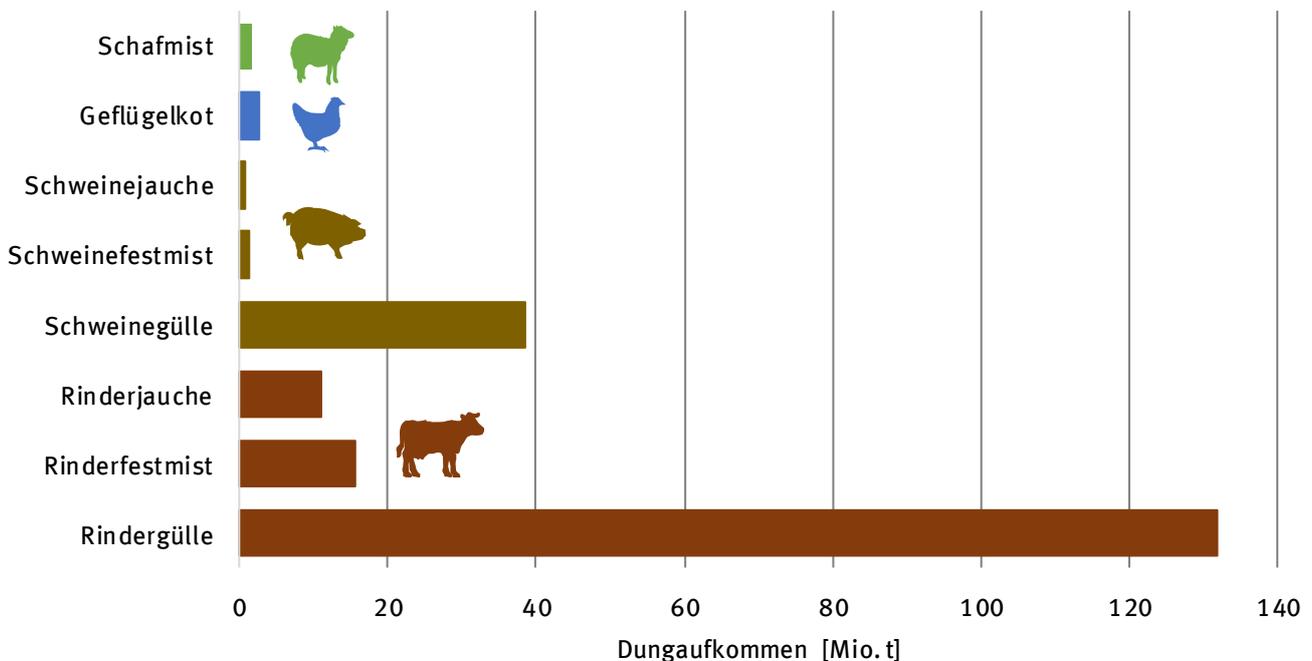
| Bez. | Tier | | Gülle | Festmist | Jauche | Trockenkot |
|-----------------------------------|---------------|----------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | | [m³/Tier/Jahr] | [kg/Tier/Jahr] | [m³/Tier/Jahr] | [kg/Tier/Jahr] |
| Rinder - Gülle | | | | | | |
| Rg1 | Kälber | bis 8 Monate | 3,4 | | | |
| Rg2 | Jungtiere | 8 Monate bis 2 Jahre | 8,17 | | | |
| Rg3 | Milchkühe | | 26,4 | | | |
| Rg4 | Masttiere | | 9,95 | | | |
| Rinder – Festmist/Jauche | | | | | | |
| Rf1 | Kälber | bis 8 Monate | | 1643 | 1,07 | |
| Rf2 | Jungtiere | 8 Monate bis 2 Jahre | | 4338 | 4,30 | |
| Rf3 | Milchkühe | | | 10715 | 6,18 | |
| Rf4 | Masttiere | | | 5037 | 4,77 | |
| Schweine - Gülle | | | | | | |
| Sg1 | Ferkel | bis 28 kg | 0,37 | | | |
| Sg2 | Jungschweine | bis 50 kg | 1,53 | | | |
| Sg3 | Zuchtschweine | | 4,70 | | | |
| Sg4 | Mastschweine | | 1,75 | | | |
| Schweine – Festmist/Jauche | | | | | | |
| Sf1 | Ferkel | bis 28 kg | | 268 | 0,20 | |
| Sf2 | Jungschweine | bis 50 kg | | 937 | 0,53 | |
| Sf3 | Zuchtschweine | | | 2750 | 1,46 | |
| Sf4 | Mastschweine | | | 937 | 0,53 | |
| Geflügel | | | | | | |
| G1 | Junghennen | | | | | 10 |
| G2 | Legehennen | | | | | 24 |
| G3 | Masthühner | | | | | 7 |
| G4 | Großgeflügel | | | | | 80 |
| Schafe und Ziegen | | | | | | |
| Sch1 | Jungschafe | unter 1 Jahr | | 1000 | | |
| Sch2 | Schafe | über 1 Jahr | | 2300 | | |
| Pferde | | | | | | |
| P1 | Pferde | 7 kg Einstreu/Tag | | 8800 | | |

Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [252,259-265]

Der Anteil an Tieren mit Weidegang aus 2010 wurde als repräsentativ angenommen und auf die anderen Jahre übertragen. Praktisch wurden daher 4,2 % der Milchkühe und 3,5 % der Mastrinder vom Bestand abgezogen.

Da in der Schweinemast nur die Stallhaltung nennenswert ist (die Freilandhaltung liegt bei unter einem Prozent [249]), wurde hier keine Weidezeit berücksichtigt. In der Schafhaltung haben etwa 84 % der Tiere Zugang zur Weide (im Jahre 2010, was ebenfalls auf die anderen Jahre übertragen wurde). [250] Hierbei ist eine reine Stallhaltung im Winter und eine reine Weidehaltung im Sommer üblich [251]. Daher war für den entsprechenden Anteil an Schafen (und Ziegen) die Hälfte der anfallenden Menge an Exkrementen abzuziehen. Praktisch wurde dies mit einer entsprechenden Reduzierung des Bestands berücksichtigt. Bei konventioneller Freilandhaltung von Geflügel fällt nicht unbedingt weniger Kot an als bei der Stallhaltung, da sich die Tiere im Bereich der Futterstelle aufhalten, wo oftmals kein Pflanzenbewuchs herrscht und der Kot der Tiere entsorgt werden muss [252]. Aus diesem Grund wurde bei der konventionellen Geflügelhaltung kein Minderungsfaktor für die Freilandhaltung angenommen.

Abbildung A 3.2.7-2 Aufkommen Exkremente aus der Nutztierhaltung im Jahr 2014



Quelle: Eigene Darstellung

Aufgrund von ökologischer Tierhaltung verbringen Nutztiere zusätzlich zur oben beschriebenen Weidezeit Zeit im Freien, welche die zu entsorgende Menge an tierischen Exkrementen zusätzlich verringert. Der Marktanteil an ökologisch erzeugtem Fleisch am gesamten Fleischkonsum liegt allerdings unter 2 % [253], weswegen eine entsprechende Minderung für alle Masttiere (Rinder, Schweine und Geflügel) vernachlässigt wurde. Der Anteil ökologisch erzeugter Milch ist ebenfalls gering (2,2 % im Jahr 2014 [254]), weswegen auch bei der Milchviehhaltung kein weiterer Minderungsfaktor berücksichtigt wurde. Der Marktanteil ökologisch erzeugter Eier hingegen, beträgt bis zu 9 % [255]. Daher wurde für den Legehennenbestand ein entsprechender Minderungsfaktor berücksichtigt. Ein Vergleich der Jahre 2012 bis 2015 [239,256,257] ergab, dass etwa 8,5 % der Legehennen in ökologischen Betrieben leben. Bei der Erzeugung von Bio-Eiern ist es üblich, dass die Hühner während mindestens einem Drittel ihrer Lebensdauer ständig Zugang zum Freien haben und dass sich auf der Auslauffläche

überwiegend Pflanzenbewuchs befindet [258]. Daher wurde für den entsprechenden Anteil an Legehennen ein Drittel der anfallenden Exkreme abgezogen, indem der zu berücksichtigende Bestand entsprechend verringert wurde.

Für jede Tierart und Untergruppe wurde der typische Anfall an Exkrementen ermittelt. Hierzu wurden die entsprechenden Werte der Düngeverordnung [259,260] unter anderem mit Richtwerten für die Auslegung von Mistlagerplätzen verglichen (z.B. [261,262]) und entsprechende Kategorien festgelegt. Diese können aus Tabelle 3.2.7-1 entnommen werden.

Die jährlich anfallende Menge an Exkrementen aus der Tierhaltung ergibt sich aus der Multiplikation des Bestands (verringert um die beschriebenen Minderungsfaktoren) mit dem entsprechenden Wert der zugehörigen Dungkategorie, dargestellt in Abbildung 3.2.7-2. Zur Umrechnung der volumetrisch berechneten Exkremente (Gülle und Jauche) in Masse, wurde aufgrund des hohen Wasseranteils eine Dichte von 1000 kg/m³ verwendet. Darüber hinaus wurde bei der Berechnung berücksichtigt, dass bei der Einsammlung von Tierdung nur etwa 90 bis 95 % geborgen werden können [266]. Daher wurde ein sogenannter Bergungsfaktor von 0,95 verwendet.

Tabelle A 3.2.7-2 Trockenmasse, organische Trockenmasse, Biogasertrag und Methangehalt für verschiedene Tierexkremente [261,264,267–273]

| | Trockenmasse (TM) | Organische Trockenmasse (oTM) | Biogasertrag | Methangehalt |
|--------------------|-------------------|-------------------------------|-------------------------|--------------|
| | [% Gesamtmasse] | [% TM] | [m ³ /t oTM] | [%] |
| Rindermist | 25 | 80 | 329 | 57,3 |
| Rinderjauche | 2,3 | 82,5 | 327 | 55,9 |
| Rindergülle | 8,6 | 82,5 | 327 | 55,9 |
| Schweinemist | 24,2 | 82,5 | 400 | 60 |
| Schweinejauche | 2,0 | 82,5 | 430 | 62,4 |
| Schweinegülle | 5,5 | 81,3 | 430 | 62,4 |
| Geflügeltrockenkot | 52 | 74,7 | 501 | 56,3 |
| Schafmist | 30,0 | 80 | 450 | 55 |
| Pferdemist | 28,7 | 80 | 275 | 55 |

Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [261,264,267-273]

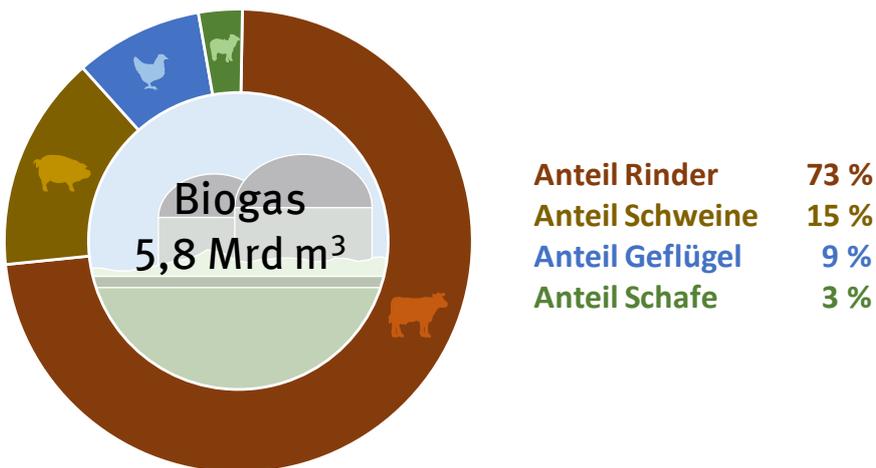
In Abbildung 3.2.7-2 ist zu erkennen, dass der wesentliche Anteil (ca. 78 % bzw. 159 Millionen Mg) der gesamten im Jahr 2014 in Deutschland angefallenen Menge an Dung auf die Rinderhaltung zurückzuführen sind. 20 % (41 Millionen Mg) sind Exkremente aus der Schweinehaltung. Trotz der großen Menge an Tieren ist die Menge an Ausscheidungen aus der Geflügelhaltung mit etwa 1,25 % der Gesamtmenge, bzw. 2,5 Millionen Mg, vernachlässigbar gering.

Um aus der Menge tierischer Exkremente den potenziellen Biogasertrag zu bestimmen, wurden die in Tabelle A 3.2.7-2 angegebenen Werte für Trockenmasse, organische Trockenmasse, Biogasertrag und Methangehalt verwendet. In der Tabelle wird jeweils der Durchschnitt der Werte aus den genannten Quellen angegeben. Die Abweichung der Einzelwerte vom Durchschnitt betrug weniger als 10 %, außer für Geflügeltrockenkot, wo die Schwankungsbreite mehr als ± 40 % (bei n=11 Einzelwerten) be-

trug. Die Trockenmasse liegt verglichen mit Exkrementen anderer Tierarten hoch, was auf die Haltungsform zurückzuführen ist. So wird z.B. in Scharrräumen ein sehr hoher Anteil an Einstreu verwendet [252].

Das errechnete Biogaspotenzial für das Jahr 2014 beträgt 5,8 Milliarden m³, wovon etwa 73 % auf die Rinderhaltung zurückzuführen sind, siehe Abbildung A 3.2.7-3. Die Haltung anderer Nutztiere trägt zu 15 % (Schweinehaltung), 9 % (Geflügel) bzw. 3 % (Schafe und Ziegen) zum Biogaspotenzial bei.

Abbildung A 3.2.7-3 Biogaspotenzial aus Tierexkrementen im Jahr 2014



Quelle: Eigene Darstellung

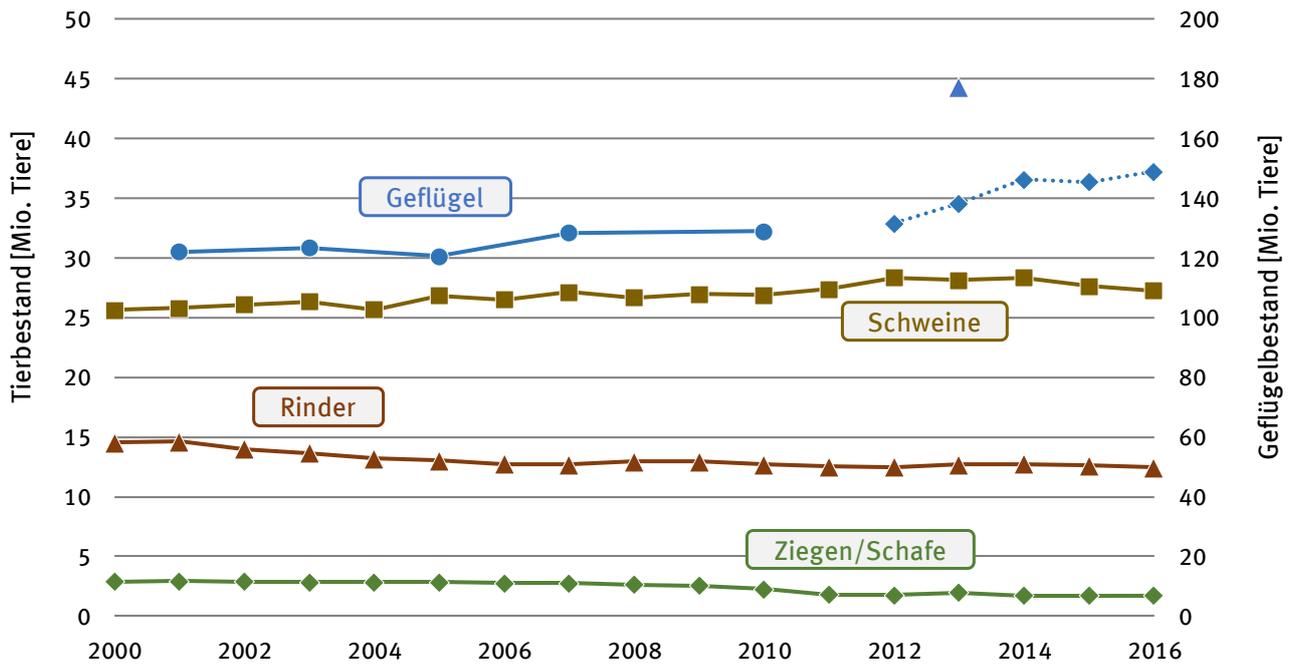
Entsprechend der in Tabelle A 3.2.7-2Tabelle angegebenen Methangehalte ergibt sich hieraus ein Potenzial von 3,3 Milliarden m³ Methan bzw. 119 PJ (bei einem Energiegehalt von Methan von 36 MJ/m³) für Deutschland im Jahr 2014. Dieses Potenzial, bzw. die zu Grunde liegende Menge an Gülle und Mist (203.626.971 Mg), ist verglichen mit den in [274] angegebenen 309.522.716 m³ deutlich geringer (für den Vergleich kann eine Dichte von 1.000 kg/m³ angenommen werden). Bei der Berechnung des letzteren wurden allerdings keine Einteilungen der Tiere in Altersgruppen oder verschiedene Haltungsformen vorgenommen und auch keine Minderungsfaktoren berücksichtigt.

Der überwiegende Anteil des erzeugten Biogases wird am Entstehungsort verstromt [275]. Hierzu kommen in der Regel Blockheizkraftwerke (BHKW) zum Einsatz, in denen die Koppelprodukte Strom und Wärme erzeugt werden. Der Nutzungsgrad eines BHKW liegt zwischen 85 und 90 % und teilt sich in einen elektrischen Wirkungsgrad zwischen 28 und 47 % und einen thermischen Wirkungsgrad zwischen 34 und 55 % auf [276]. Der elektrische Wirkungsgrad steigt mit der elektrischen Leistung der Anlage an (vgl. Abbildung A3.2.7-12). Die meisten marktverfügbaren BHKWs haben eine elektrische Leistung von weniger als 250 kW [277]. Dem gegenüber steht der Eigenbedarf der Biogasanlage an elektrischer Energie, z.B. für die Substratförderung, Rührwerke und die Peripherie des BHKW. Der elektrische Eigenbedarf einer Biogasanlage (inklusive des BHKW) liegt zwischen 2 und 10 %, im Durchschnitt bei 5,8 % [278]. Zusätzlich muss zur Beheizung des Fermenters eine wesentliche Menge an Wärme aufgebracht werden, ca. 20 bis 30 % der Gesamtwärmeleistung des BHKWs [279]. Unter der Verwendung einer Beispielanlage ($P_{el} = 250 \text{ kW}$, $\eta_{el}=40 \%$, $\eta_{th}=45 \%$, Eigenstromverbrauch 5,8 % des erzeugten Stromes, Eigenwärmeverbrauch 24 % der erzeugten Wärme) lässt sich das Methanpotenzial aus Biogas für das Jahr 2014 in ein Potenzial für Wärme und Strom umrechnen. Diese Abschätzung ergibt ein Wärmepotenzial aus Biogas von knapp 41 PJ oder 11.670 GWh und ein entsprechendes Strompotenzial von knapp 45 PJ oder 12.500 GWh.

Im Folgenden finden sich weitere Zusatzinformationen zu den Berechnungen des Energiepotenzials aus Gülle und Festmist

Entwicklung des Tierbestands

Abbildung A 3.2.7-4 Entwicklung des Tierbestands in Deutschland von 2000 bis 2016 [239,241,256,257,320]



Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [239,241,256,257,320]

Anmerkungen zu Abbildung A 3.2.7-4:

In der Abbildung nicht dargestellt sind Pferde und andere Einhufer. Deren Anzahl liegt unter 500 000 Stück [242,243].

Für den Geflügelbestand des Jahres 2013 lagen unterschiedliche Daten vor: Die Daten zum Geflügelbestand der Jahre 2001, 2003, 2005, 2007 und 2010 (durchgezogene Linie) stammen aus [241], die der Jahre 2012 bis 2016 (gepunktete Linie) wurden aus der jährlichen Legehennenstatistik hochgerechnet [239,256,257,321]. Für das Jahr 2013 war darüber hinaus ein Bestand in [322] gegeben.

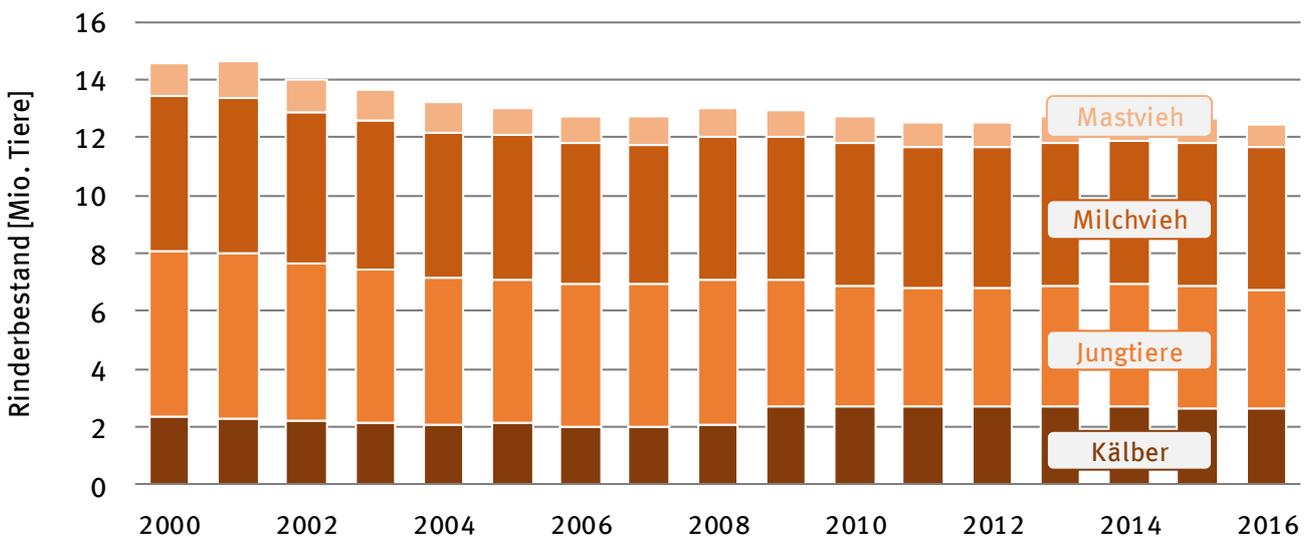
Entwicklung des Rinderbestands

Tabelle A 3.2.7-3 Entwicklung des Rinderbestands seit 2000, Aufteilung in Untergruppen [241]

| Jahr | Gesamt | Kälber | Jungtiere | Milch- und sonstige Kühe | Masttiere |
|------|------------|-----------|-----------|--------------------------|-----------|
| 2000 | 14 538 000 | 2 331 400 | 5 698 800 | 5 399 700 | 1 108 100 |
| 2001 | 14 603 087 | 2 302 373 | 5 657 124 | 5 407 598 | 1 235 992 |
| 2002 | 13 988 200 | 2 204 300 | 5 443 900 | 5 224 700 | 1 115 300 |
| 2003 | 13 643 703 | 2 135 107 | 5 266 220 | 5 146 077 | 1 096 299 |
| 2004 | 13 195 900 | 2 048 300 | 5 069 300 | 5 036 500 | 1 041 800 |
| 2005 | 13 034 500 | 2 102 300 | 4 973 200 | 4 982 800 | 976 200 |
| 2006 | 12 747 800 | 2 013 400 | 4 956 200 | 4 825 600 | 952 600 |
| 2007 | 12 686 644 | 2 005 145 | 4 920 111 | 4 811 766 | 949 622 |
| 2008 | 12 969 674 | 2 079 055 | 4 996 105 | 4 962 163 | 932 351 |
| 2009 | 12 944 903 | 2 718 233 | 4 360 150 | 4 941 018 | 925 502 |
| 2010 | 12 706 229 | 2 666 771 | 4 216 829 | 4 888 963 | 933 666 |
| 2011 | 12 527 840 | 2 666 176 | 4 115 632 | 4 873 852 | 872 180 |
| 2012 | 12 506 772 | 2 668 388 | 4 139 877 | 4 862 751 | 835 756 |
| 2013 | 12 685 993 | 2 670 965 | 4 222 017 | 4 940 719 | 852 292 |
| 2014 | 12 742 190 | 2 698 570 | 4 220 861 | 4 969 277 | 853 482 |
| 2015 | 12 635 456 | 2 633 209 | 4 196 276 | 4 965 979 | 839 992 |
| 2016 | 12 466 586 | 2 602 606 | 4 151 945 | 4 887 230 | 824 805 |

Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [241]

Abbildung A 3.2.7-5 Entwicklung des Rinderbestands seit 2000, Aufteilung in Untergruppen [241]



Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [241]

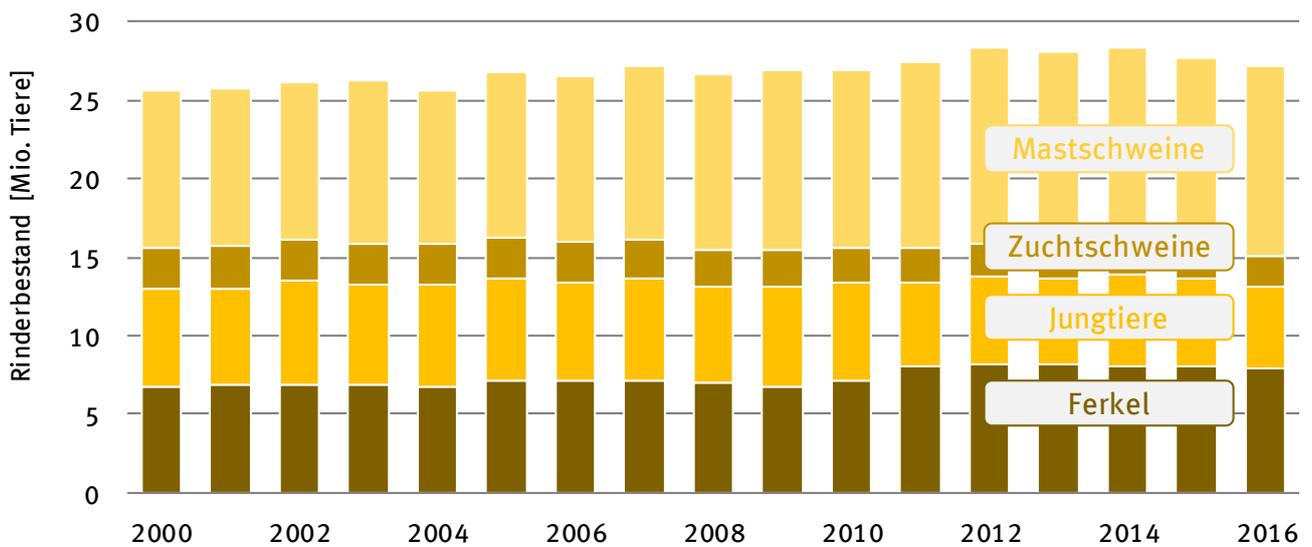
Entwicklung des Schweinebestands

Tabelle A 3.2.7-4 Entwicklung des Schweinebestands seit 2000, Aufteilung in Untergruppen [241]

| Jahr | Gesamt | Ferkel | Jungtiere | Zuchtschweine | Masttiere |
|------|------------|-----------|-----------|---------------|------------|
| 2000 | 25 633 300 | 6 697 400 | 6 303 500 | 2 616 500 | 10 015 900 |
| 2001 | 25 783 928 | 6 917 717 | 6 106 343 | 2 663 309 | 10 096 559 |
| 2002 | 26 103 000 | 6 918 700 | 6 573 800 | 2 642 100 | 9 968 400 |
| 2003 | 26 334 320 | 6 878 060 | 6 340 390 | 2 633 960 | 10 481 910 |
| 2004 | 25 659 500 | 6 760 500 | 6 493 800 | 2 565 400 | 9 839 800 |
| 2005 | 26 857 800 | 7 129 900 | 6 476 000 | 2 588 400 | 10 663 500 |
| 2006 | 26 521 300 | 7 109 300 | 6 324 100 | 2 527 800 | 10 560 100 |
| 2007 | 27 125 299 | 7 173 676 | 6 447 936 | 2 545 500 | 10 958 187 |
| 2008 | 26 686 800 | 6 947 300 | 6 170 400 | 2 403 200 | 11 165 900 |
| 2009 | 26 948 300 | 6 804 500 | 6 315 500 | 2 339 500 | 11 488 800 |
| 2010 | 26 900 800 | 7 148 700 | 6 186 000 | 2 265 000 | 11 301 100 |
| 2011 | 27 402 500 | 7 997 500 | 5 394 800 | 2 218 700 | 11 791 500 |
| 2012 | 28 331 500 | 8 116 600 | 5 611 800 | 2 144 400 | 12 458 700 |
| 2013 | 28 133 400 | 8 219 100 | 5 449 100 | 2 082 800 | 12 382 400 |
| 2014 | 28 339 000 | 8 097 800 | 5 759 200 | 2 074 400 | 12 407 600 |
| 2015 | 27 652 400 | 8 100 900 | 5 554 000 | 1 998 600 | 11 998 900 |
| 2016 | 27 246 400 | 7 945 400 | 5 192 000 | 1 905 400 | 12 203 600 |

Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [241]

Abbildung A 3.2.7-6 Entwicklung des Schweinebestands seit 2000, Aufteilung in Untergruppen [241]



Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [241]

Entwicklung des Geflügelbestands

Tabelle A 3.2.7-5 Entwicklung des Geflügelbestands seit 2000, Aufteilung in Untergruppen, Durchschnittswerte [239,241,256,257,320–322]

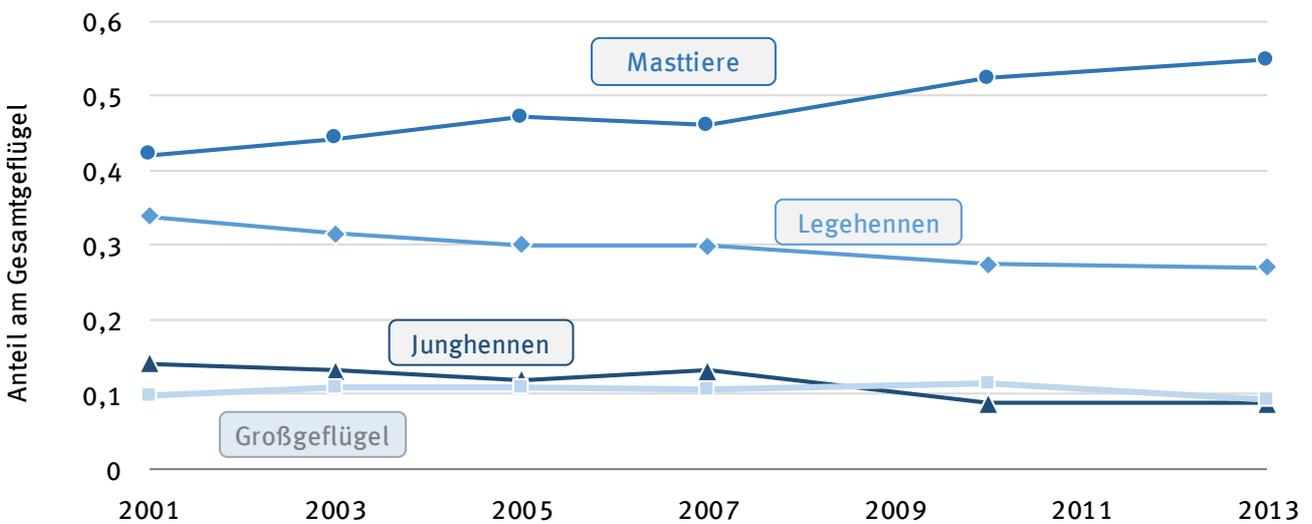
| Jahr | Gesamt | Junghennen | Legehennen | Masttiere | Großgeflügel |
|-------|-------------|------------|------------|------------|--------------|
| 2000 | | | | | |
| 2001 | 122 056 102 | 17 277 100 | 41 330 004 | 51 385 754 | 12 063 244 |
| 2002 | | | | | |
| 2003 | 123 407 731 | 16 217 329 | 38 964 768 | 54 611 374 | 136 142 60 |
| 2004 | | | | | |
| 2005 | 120 560 200 | 14 347 800 | 36 157 100 | 56 762 500 | 13 292 800 |
| 2006 | | | | | |
| 2007 | 128 462 716 | 16 940 069 | 38 463 704 | 59 221 711 | 13 837 232 |
| 2008 | | | | | |
| 2009 | | | | | |
| 2010 | 128 899 750 | 11 303 297 | 35 278 999 | 67 531 078 | 14 786 376 |
| 2011 | | | | | |
| 2012 | 131 532 141 | 11 837 893 | 35 513 678 | 72 342 677 | 11 837 893 |
| 2013 | 177 333 100 | 15 641 200 | 47 986 700 | 97 145 600 | 16 559 600 |
| 2013* | 138 302 826 | 12 447 254 | 37 341 763 | 76 066 554 | 12 447 254 |
| 2014 | 146 297 174 | 13 166 746 | 39 500 237 | 80 463 446 | 13 166 746 |
| 2015 | 145 451 267 | 13 090 614 | 39 271 842 | 79 998 197 | 13 090 614 |
| 2016 | 148 978 948 | 13 408 105 | 40 224 316 | 81 938 421 | 13 408 105 |

* für das Jahre 2013 liegen unterschiedliche Werte für den Legehennenbestand vor (s.u.)

Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [239,341,256,257,320-322]

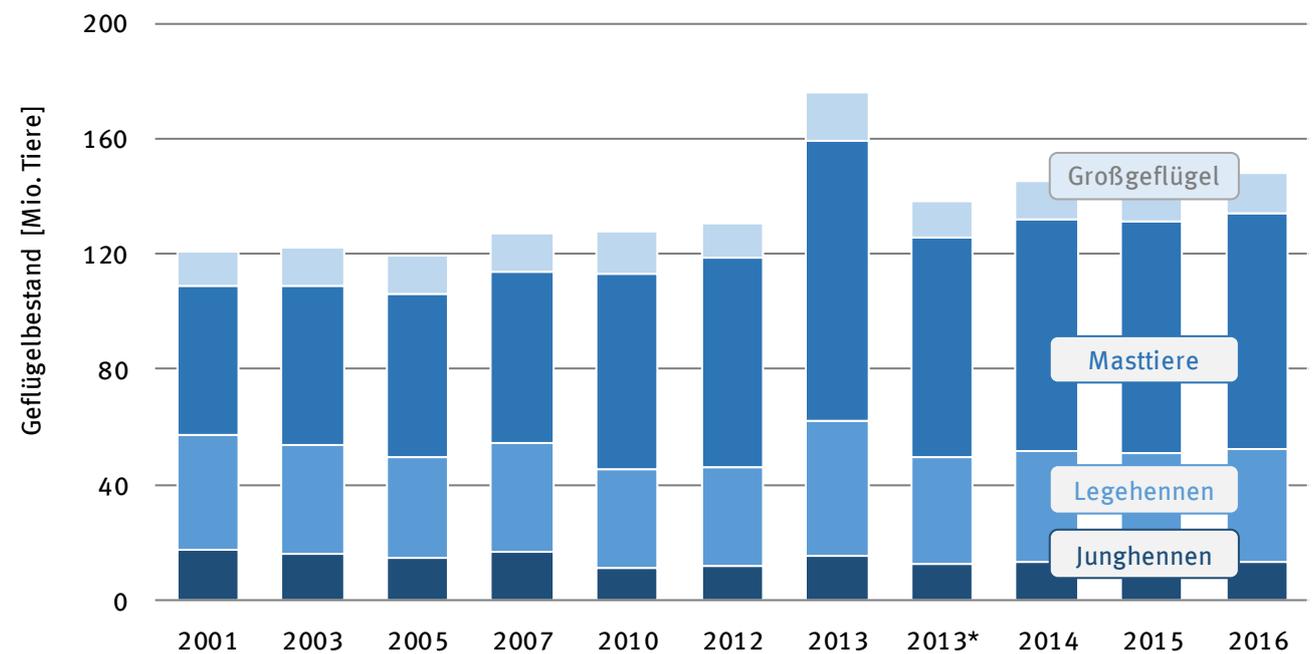
Die in der Tabelle schwarz dargestellten Werte wurden direkt aus der Literatur übernommen. Für die Jahre ab 2012 (mit Ausnahme der Daten aus der Landwirtschaftszählung 2013) lag keine genaue Aufschlüsselung nach Untergruppen vor, hier war lediglich der Legehennenbestand gegeben. Aus einem Vergleich der Vorjahre wurde der Anteil der einzelnen Gruppen an der gesamten Menge Geflügel ermittelt und verglichen (Abbildung A 3.2.7-4). Hieraus geht hervor, dass der Legehennenbestand von 2001 bis 2013 von 34 % auf 27 % gesunken ist. Entsprechend war auch der Anteil Junghennen rückläufig (14 % im Jahr 2001 und knapp 9 % im Jahr 2013). Der steigende Konsum von Hühnerfleisch in Deutschland [323,324] spiegelt sich auch im Masthühnerbestand wider, welcher im betrachteten Zeitraum (2001 bis 2013) von 42 auf fast 55 % gestiegen ist. Die Gruppe Großgeflügel besteht größtenteils aus Puten, umfasst aber auch Enten und Gänse. Ihr Anteil an der Gesamtzahl Geflügel schwankte im betrachteten Zeitraum zwischen etwa 9 und 11 %. Die letzte so ermittelte Verteilung (2013; Legehennen 27 %, Junghennen 9 %, Masthühner 55 %, Großgeflügel 9 %) wurde verwendet, um die Geflügel-mengen der Jahre 2012 bis 2016 anhand des Legehennenbestands hochzurechnen. Hier wurde bewusst darauf verzichtet, Durchschnittswerte der Verteilung zu benutzen, da die steigende Anzahl an Mastgeflügel hiermit unterschätzt würde. Die so berechneten Bestandswerte für die Jahre 2012 bis 2016 in Tabelle A 3.2.7-3 sind in blau dargestellt.

Abbildung A 3.2.7-7 Entwicklung der Anteile der Untergruppen am Geflügelbestand [241,322]



Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [241,322]

Abbildung A 3.2.7-8 Entwicklung des Geflügelbestands seit 2000, Aufteilung in Untergruppen [239,241,256,257,320-322]



Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [239,241,256,257,320-322]

* Für das Jahr 2013 lagen unterschiedliche Angaben zum Bestand vor (vgl. auch Tabelle A 3.2.7-3 und Abbildungen A 3.2.7-1 und A 3.2.7-5). Der Bestand (mit Untergruppen) wird seit der Landwirtschaftszählung 2010 im dreijährigen Rhythmus in Strukturerhebungen erfasst (z.B. [241]) und lag daher auch für 2013 vor. (Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Studie waren die vollständigen Daten der Agrarstrukturerhebung 2016 noch nicht veröffentlicht und konnten daher nicht berücksichtigt werden). Darüber hinaus wird der Legehennenbestand in Unternehmen mit mindestens 3000 Haltungsplätzen auch in einer Legehennenstatistik erfasst (z.B. [239,256,257,321]), so auch für das Jahr 2013. Der Bestand, welcher aus den Anzahl Legehennen hochgerechnet wurde, liegt daher unter dem tatsächlichen Bestand. Die Auswirkungen auf das Gesamtergebnis, das Biogaspotential, sind allerdings vernachlässigbar.

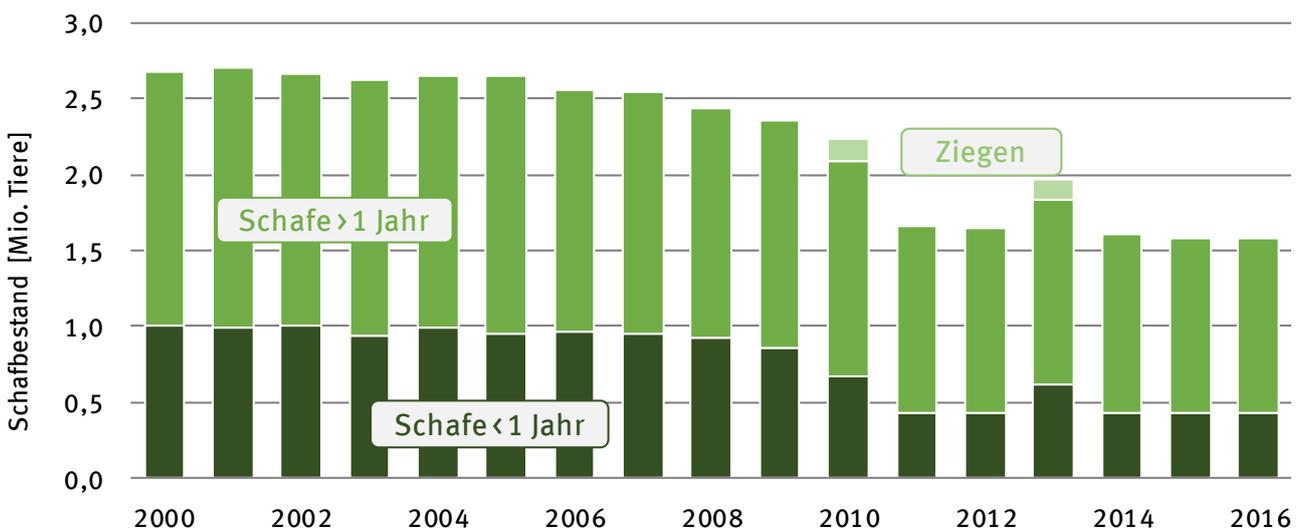
Entwicklung des Schafbestands

Tabelle A 3.2.7-6 Entwicklung des Schaf- und Ziegenbestands seit 2000 [241]

| Jahr | Schafe Gesamt | Schafe unter 1 Jahr | Schafe über 1 Jahr | Ziegen |
|------|---------------|---------------------|--------------------|---------|
| 2000 | 2 675 900 | 998 200 | 1 677 700 | |
| 2001 | 2 696 698 | 996 628 | 1 700 070 | |
| 2002 | 2 659 600 | 999 500 | 1 660 100 | |
| 2003 | 2 628 566 | 932 896 | 1 695 670 | |
| 2004 | 2 647 700 | 984 000 | 1 663 700 | |
| 2005 | 2 642 300 | 956 500 | 1 685 800 | |
| 2006 | 2 560 300 | 957 400 | 1 602 900 | |
| 2007 | 2 537 791 | 952 046 | 1 585 745 | |
| 2008 | 2 437 000 | 920 000 | 1 517 000 | |
| 2009 | 2 350 500 | 862 900 | 1 487 600 | |
| 2010 | 2 088 541 | 675 783 | 1 412 758 | 149 936 |
| 2011 | 1 657 800 | 434 400 | 1 223 400 | |
| 2012 | 1 641 000 | 426 400 | 1 214 600 | |
| 2013 | 1 834 700 | 614 600 | 1 220 100 | 130 200 |
| 2014 | 1 600 800 | 435 500 | 1 165 300 | |
| 2015 | 1 579 800 | 428 400 | 1 151 400 | |
| 2016 | 1 572 500 | 434 600 | 1 137 900 | |

Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [241]

Abbildung A 3.2.7-9 Entwicklung des Schafbestands seit 2000, Aufteilung in Untergruppen [241]



Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [241]

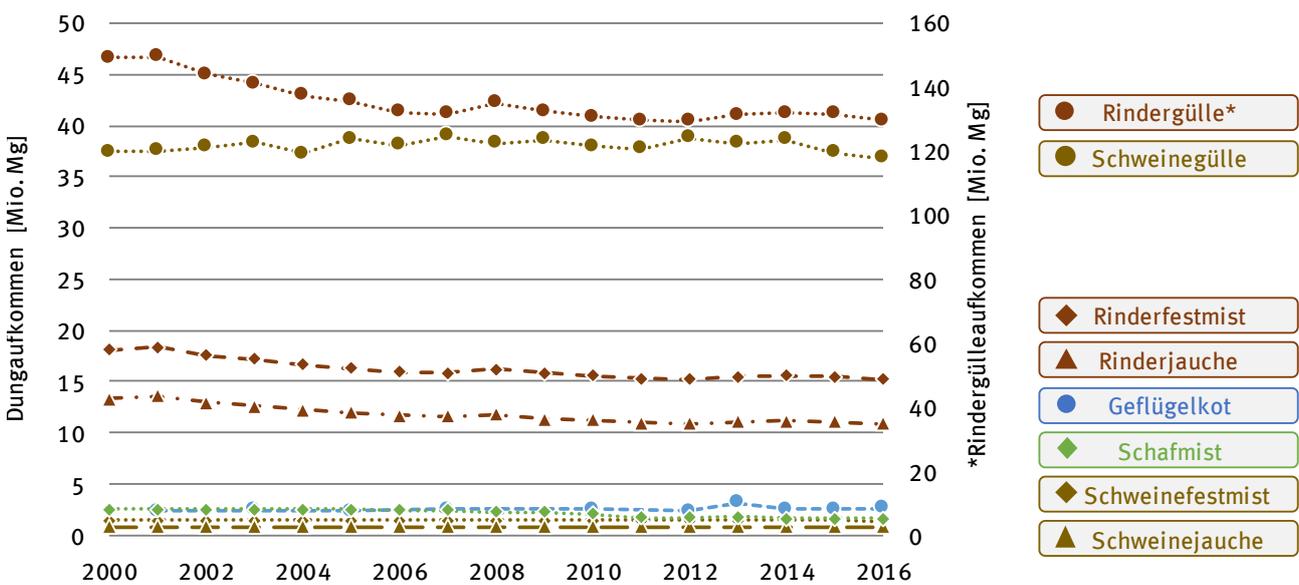
Entwicklung des Dungaufkommens

Tabelle A 3.2.7-7 Entwicklung des Dungaufkommens seit 2000, in Tonnen

| Jahr | Rinder- gülle | Rinder- festmist | Rinder- jauche | Schweine- gülle | Schweine- festmist | Schweine- jauche | Geflügel- kot | Schaf- mist | Einhufer- mist |
|------|------------------|---------------------|-------------------|--------------------|-----------------------|---------------------|------------------|----------------|-------------------|
| 2000 | 149 176 567 | 18 085 217 | 13 315 577 | 37 436 387 | 1 383 908 | 787 105 | | 2 503 130 | |
| 2001 | 149 602 636 | 18 349 871 | 13 561 909 | 37 563 371 | 1 388 392 | 789 992 | 2 338 279 | 2 528 836 | |
| 2002 | 143 998 852 | 17 518 167 | 12 904 886 | 37 910 994 | 1 403 201 | 798 489 | | 2 482 938 | |
| 2003 | 141 178 239 | 17 150 381 | 12 612 114 | 38 347 995 | 1 416 260 | 805 810 | 2 415 139 | 2 490 775 | 524 753 |
| 2004 | 137 433 951 | 16 621 950 | 12 190 097 | 37 226 768 | 1 377 622 | 784 000 | | 2 479 217 | |
| 2005 | 135 663 238 | 16 306 887 | 11 920 212 | 38 708 637 | 1 429 909 | 814 472 | 2 325 052 | 2 491 240 | |
| 2006 | 132 160 098 | 15 925 083 | 11 677 828 | 38 079 021 | 1 406 464 | 801 481 | | 2 393 438 | |
| 2007 | 131 647 121 | 15 858 439 | 11 623 889 | 38 965 383 | 1 438 092 | 819 455 | 2 458 510 | 2 370 343 | 541 890 |
| 2008 | 135 133 831 | 16 180 003 | 11 817 939 | 38 239 812 | 1 408 600 | 802 923 | | 2 272 340 | |
| 2009 | 132 611 141 | 15 784 307 | 11 367 442 | 38 627 376 | 1 421 423 | 810 132 | | 2 208 062 | |
| 2010 | 130 675 199 | 15 564 610 | 11 195 518 | 37 959 001 | 1 398 073 | 798 274 | 2 461 799 | 2 022 912 | 461 779 |
| 2011 | 129 509 101 | 15 307 252 | 10 959 250 | 37 734 680 | 1 387 736 | 795 010 | | 1 674 051 | |
| 2012 | 129 270 022 | 15 225 826 | 10 891 095 | 38 800 462 | 1 425 127 | 816 896 | 2 279 989 | 1 659 497 | |
| 2013 | 131 351 130 | 15 477 583 | 11 077 506 | 38 235 060 | 1 404 278 | 805 718 | 3 116 237 | 1 763 010 | 461 300 |
| 2014 | 131 976 799 | 15 540 365 | 11 114 039 | 38 621 315 | 1 419 011 | 813 766 | 2 535 927 | 1 605 749 | |
| 2015 | 131 544 085 | 15 459 528 | 11 045 676 | 37 386 059 | 1 374 398 | 788 947 | 2 521 264 | 1 585 613 | |
| 2016 | 129 602 796 | 15 232 969 | 10 887 985 | 36 770 305 | 1 349 014 | 774 666 | 2 582 413 | 1 572 806 | |

Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung A 3.2.7-10 Entwicklung des Dungaufkommens seit 2000



Quelle: Eigene Darstellung

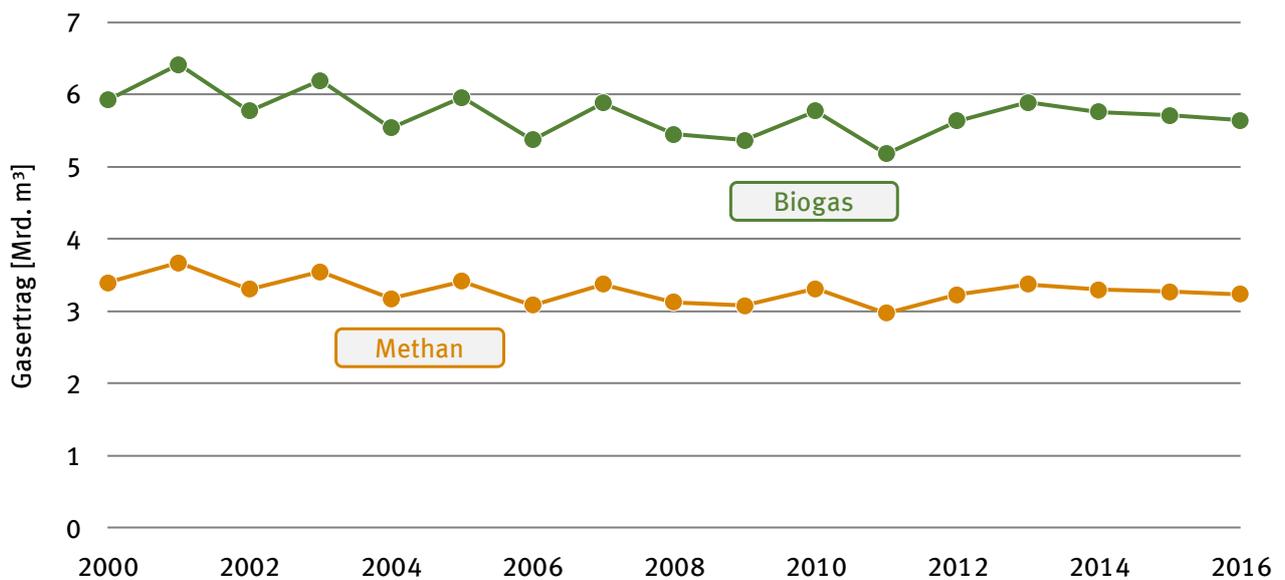
Entwicklung des Biogas- und Methanpotentials

Tabelle A 3.2.7-8 Entwicklung des Biogas- und Methanpotentials, in Milliarden m³

| Jahr | Biogas | Methan |
|------|--------|--------|
| 2000 | 5,93 | 3,39 |
| 2001 | 6,42 | 3,67 |
| 2002 | 5,77 | 3,31 |
| 2003 | 6,19 | 3,54 |
| 2004 | 5,54 | 3,17 |
| 2005 | 5,96 | 3,41 |
| 2006 | 5,37 | 3,08 |
| 2007 | 5,89 | 3,37 |
| 2008 | 5,45 | 3,13 |
| 2009 | 5,36 | 3,08 |
| 2010 | 5,77 | 3,31 |
| 2011 | 5,18 | 2,97 |
| 2012 | 5,63 | 3,23 |
| 2013 | 5,89 | 3,37 |
| 2014 | 5,76 | 3,30 |
| 2015 | 5,71 | 3,27 |
| 2016 | 5,64 | 3,23 |

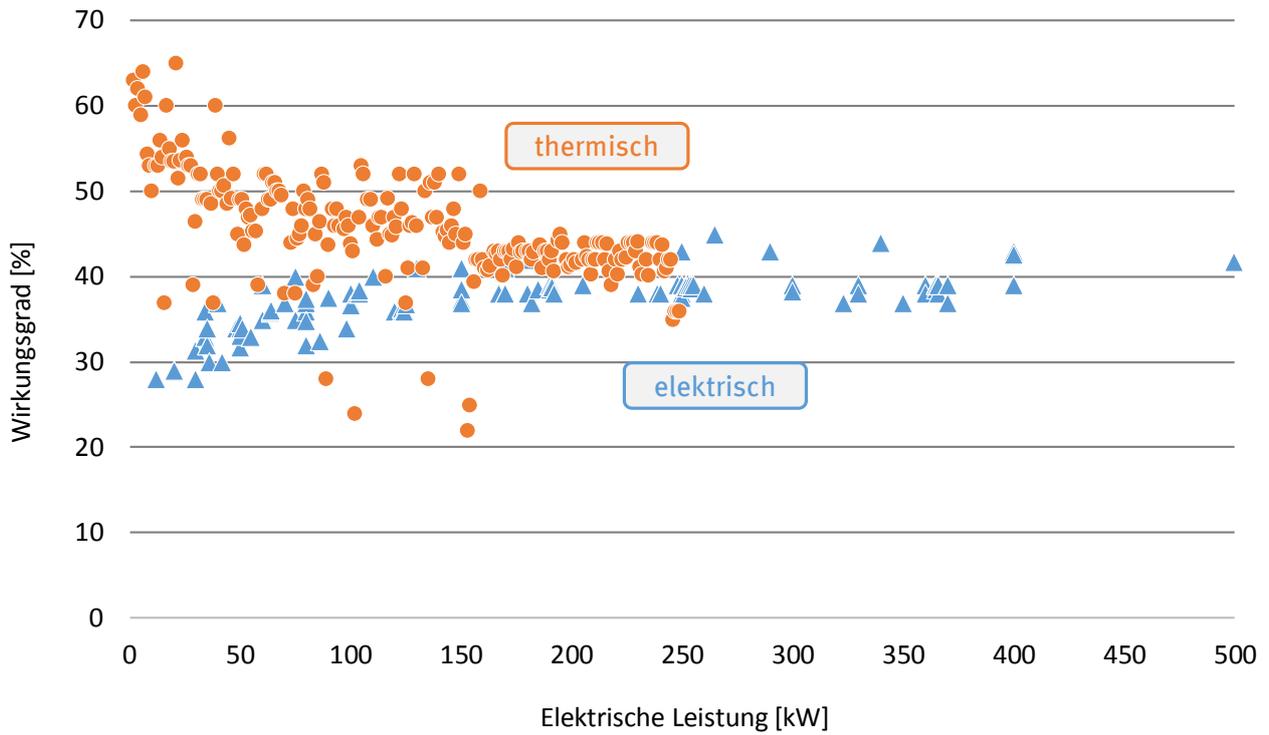
Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung A 3.2.7-11 Entwicklung des Biogas- und entsprechenden Methanpotentials seit 2000



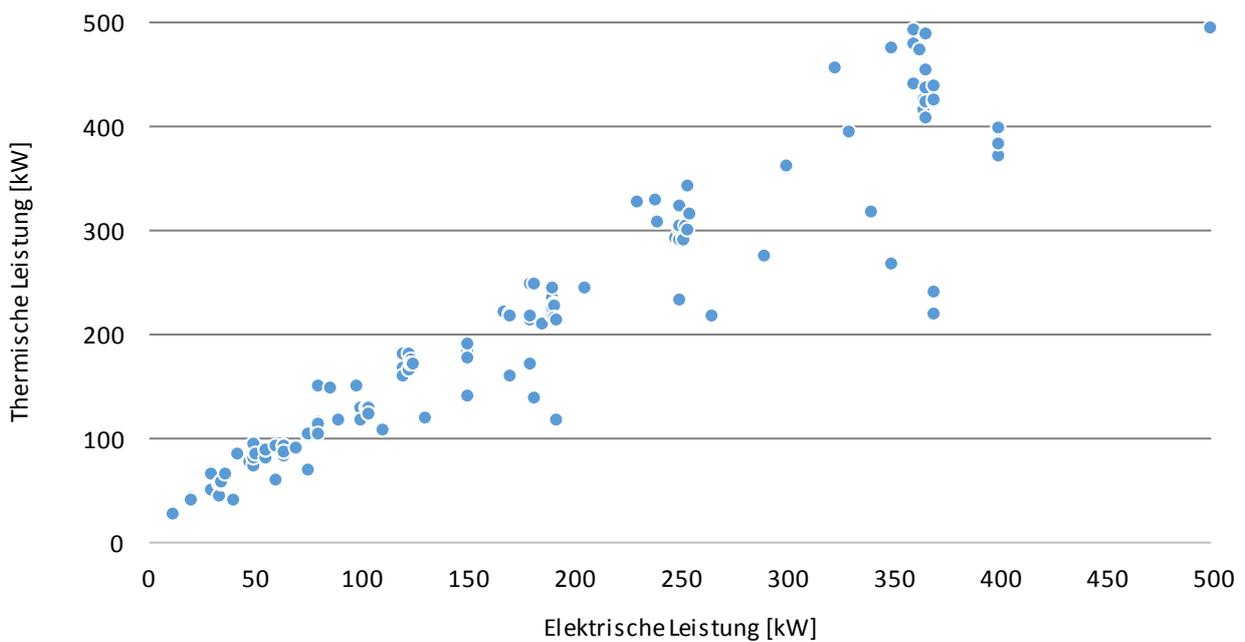
Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung A 3.2.7-12 Thermischer und elektrischer Wirkungsgrad von Blockheizkraftwerken unterschiedlicher Leistung [277]



Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [277]

Abbildung A 3.2.7-13 Thermische und elektrische Leistung von Blockheizkraftwerken [277]



Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [277]

A 3.3.3 CO₂ Reduktion

Tabelle A 3.3.3-1 zeigt eine Abschätzung brennstoffspezifischer CO₂-Emissionen der Abfallarten, in Mg CO₂/TJ. Über den biogenen Abfallanteil lassen sich die fossilen CO₂-Emissionen bestimmen. Auf Grund der Inhomogenität unterliegen diese Werte großen Schwankungen. Die in der Tabelle angegebenen Werte liegen der Berechnung der CO₂-Emissionen in der vorliegenden Studie zu Grunde.

Tabelle A 3.3.3-1 Gesamte und fossile brennstoffspezifische CO₂-Emissionen verschiedener Abfallarten [234,284,292,296,325–328]

| Abfallart | Gesamte CO ₂ -Emissionen [Mg CO ₂ /TJ] | Biogener Anteil | Fossile CO ₂ -Emissionen | |
|---|--|-----------------|-------------------------------------|--------------------------|
| | | | [Mg CO ₂ /TJ] | [g CO ₂ /kWh] |
| Siedlungsabfälle | | | | |
| Gemischte Siedlungsabfälle | 91,5 | 50 % | 45,8 | 165 |
| Sperrmüll | 103 | 60 % | 41,2 | 148 |
| Abfälle aus der Biotonne | 115 | 100 % | - | - |
| Verpackungsabfälle | 63 | 32 % | 42,8 | 154 |
| Marktabfälle | 76 | 60 % | 30,4 | 109 |
| Straßenkehrriecht, Park- und Gartenabfälle | 130 | 100 % | - | - |
| Hausmüllähnliche Gewerbeabfälle | 91,5 | 50 % | 45,8 | 165 |
| Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen | | | | |
| Abfälle aus MBA-Anlagen | 91,5 | 50 % | 45,8 | 165 |
| EBS SekBS | 94,0 | 55 % | 42,3 | 152 |
| Klärschlamm | 116,2 | 85 % | 17,4 | 6,3 |
| Schredderleichtfraktion | 99,6 | 10 % | 89,6 | 322 |
| Tierische Nebenprodukte | 85,8 | 100 % | - | - |
| Gewerbe- und Produktionsabfälle | | | | |
| Holzabfälle | 105 | 95 % | 5,25 | 18,9 |
| Faserabfälle Papierschlamm | 54,9 | 91 % | 4,9 | 17,8 |
| Verpackungsabfälle gewerblich | 56,9 | 40 % | 34,1 | 123 |
| Sonstige Kunststoffabfälle | 80,9 | - | 80,9 | 291 |
| Küchen-/Kantinenabfälle | 115 | 100 % | - | - |
| Ölabfälle | 75,3 | - | 75,3 | 271 |
| Sonstige | 68,1 | 52 % | 32,7 | 118 |
| Bau- und Abbruchabfälle (brennbare Anteile) | 103 | 50 % | 51,5 | 185 |
| Gefährliche Abfälle* | 83 | 15 % | 62,3 | 224 |
| Altreifen | 88,4 | 27 % | 64,5 | 232 |

Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [234,284,292,296,325-328]

*Auf Grund der großen Inhomogenität gefährlicher Abfälle war es nicht möglich, den biogenen Anteil genau zu bestimmen. Daher handelt es sich hier um eine Abschätzung, mit der z.B. Holz- und Textilmaterialien berücksichtigt werden, welche als Träger- und Aufnahmematerial mit Gefahrstoffen verunreinigt sind.

Tabelle A 3.3.3-2 Deutscher Strommix 2015 [283]

| Energieträger | Energiemenge [Mrd kWh] | Anteil am Strommix |
|----------------------|------------------------|--------------------|
| Braunkohle | 155 | 23,9 % |
| Steinkohle | 117,7 | 18,4 % |
| Kernenergie | 91,8 | 14,2 % |
| Erdgas | 62,0 | 9,6 % |
| Windkraft (onshore) | 70,9 | 11,0 % |
| Biomasse | 44,6 | 6,9 % |
| Photovoltaik | 38,7 | 6,0 % |
| Wasserkraft | 19,0 | 2,9 % |
| Windkraft (offshore) | 8,3 | 1,3 % |
| Sonstige | 37,5 | 5,8 % |

Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [283]

Tabelle A 3.3.3-3 Deutscher Wärmemix 2015 [329]

| Energieträger | Energiemenge [Mrd kWh] | Anteil am Wärmemix |
|-----------------------|------------------------|--------------------|
| Mineralöl | 204,8 | 15,6 % |
| Gase | 587,4 | 44,6 % |
| Strom | 232,9 | 9,3 % |
| Fernwärme | 114,6 | 8,7 % |
| Kohlen | 147,3 | 11,2 % |
| Regenerative Energien | 139,3 | 10,6 % |

Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus [329]

Allokationsmethoden zur Verteilung produktspezifischer CO₂-Emissionen in KWK-Anlagen

Für Anlagen, welche in Kraft-Wärme-Kopplung betrieben werden, müssen die Emissionen auf die beiden Koppelprodukte verteilt werden. Hierzu stehen verschiedene Ansätze zur Verfügung. Die Unterschiede sollen anhand einer Berechnung mit den in dieser Studie ermittelten Daten aus Müllverbrennungsanlagen aufgezeigt werden. Es wurden ein brennstoffspezifischer CO₂-Wert von 162 g/kWh (es werden nur die fossilen Anteile betrachtet), und Nutzungsgrade von 33,5 % (thermisch) und 11,1 % (elektrisch) verwendet. Die Bestimmung dieser Werte ist in Abschnitt 3.3.3 beschrieben. Die produktspezifischen CO₂-Emissionen, welche mit den verschiedenen Allokationsmethoden bestimmt wurden, sind in Abbildung A 3.3.3-1 dargestellt.

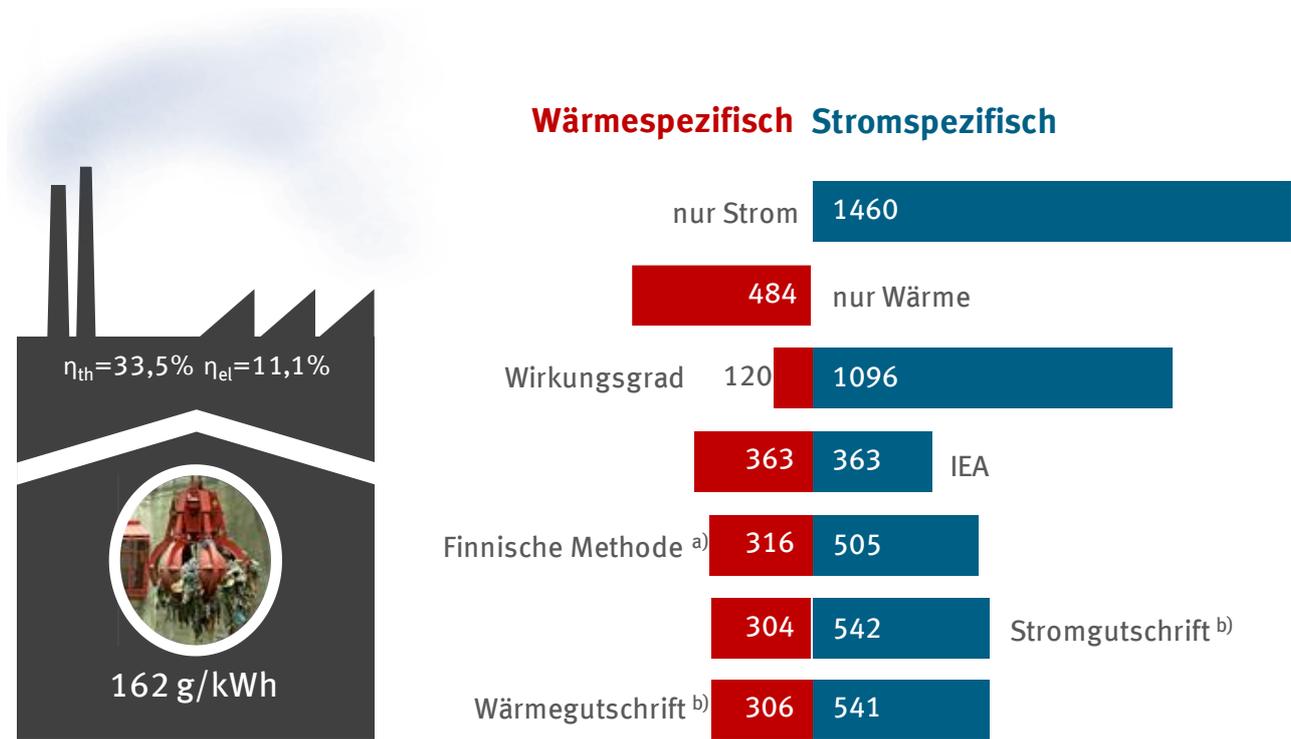
Die beiden gezeigten **Extremfälle (nur Strom, nur Wärme)**, die Zuordnung aller Emissionen entweder zum Strom (1460 gCO₂/kWh_{el}) oder zur Wärme (937 gCO₂/kWh_{th}) dient hier als Vergleich.

Die **Wirkungsgradmethode** beruht auf der Ermittlung eines Verteilfaktors, basierend auf dem thermischen und elektrischen Wirkungsgrad der Anlage [330]:

$$\text{Anteil}_{el} = \frac{\eta_{th}}{(\eta_{th} + \eta_{el})} \quad \text{bzw.} \quad \text{Anteil}_{th} = \frac{\eta_{el}}{(\eta_{th} + \eta_{el})} \quad (\text{Gl. 3-6}) \quad (\text{Gl. 3-7})$$

Entsprechend dieser Anteile werden die brennstoffspezifischen CO₂-Emissionen auf die Strom- und Wärmeproduktion verteilt. Unter Einbeziehung des thermischen bzw. elektrischen Wirkungsgrades der Anlage ergeben sich daraus die spezifischen CO₂-Emissionen. Im gezeigten Beispiel sind dies 1096 gCO₂/kWh_{el} bzw. 120 gCO₂/kWh_{th}. Die Wirkungsgradmethode basiert auf der Annahme, dass das Produkt, dessen Erzeugung den niedrigeren Wirkungsgrad aufweist, die meisten Emissionen verursacht [331].

Abbildung A 3.3.3-1 Vergleich verschiedener Methoden zur Bestimmung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen von Strom und Wärme in einer Siedlungsabfallverbrennungsanlage mit Kraft-Wärme-Kopplung (Beispielwerte, in g/kWh)



- a) als Referenz wurden Wirkungsgrade von 80 % (thermisch) und 50 % (elektrisch) angenommen
- b) als Referenz wurden spezifische CO₂-Emissionen von 304 g/kWh (thermisch) und 534 g/kWh (elektrisch) angenommen

Quelle: Eigene Darstellung

Der **IEA-Methode** (abgeleitet von der Internationalen Energieagentur, International Energy Agency) liegt die gegensätzliche Annahme als bei der Wirkungsgradmethode zu Grunde. Auch hier werden Faktoren zur Verteilung der Emissionen, basierend auf den Wirkungsgraden ermittelt, jedoch werden dem Produkt, dessen Erzeugung den höheren Wirkungsgrad aufweist, die meisten Emissionen zugeschrieben [331]:

$$Anteil_{el} = \frac{\eta_{el}}{(\eta_{th} + \eta_{el})} \text{ bzw. } Anteil_{th} = \frac{\eta_{th}}{(\eta_{th} + \eta_{el})} \quad \text{(Gl. 3-8) (Gl. 3-9)}$$

Der Unterschied zur Wirkungsgradmethode liegt im vertauschten Zähler.

Die spezifischen CO₂-Emissionen gemäß der IEA-Methode sind für beide Produkte immer gleich groß und liegen im betrachteten Beispiel bei 363 gCO₂/kWh.

Bei der **finnischen Methode** wird die Erzeugung von Strom und Wärme in KWK-Anlagen der ungekoppelten Erzeugung in entsprechenden Referenzanlagen gegenübergestellt [330,331]. Diese Me-

thode bestimmt zunächst die Primärenergieeinsparung (PEE) und darauf aufbauend wiederum Faktoren zur anteiligen Zuordnung der brennstoffspezifischen CO₂-Emissionen (die Formel zur Berechnung der Primärenergieeinsparung entspricht den Vorgaben der Energie-Effizienz-Direktive (EED) 2012/27/EU):

$$PEE = 1 - \frac{1}{\frac{\eta_{th}}{\eta_{th,ref}} + \frac{\eta_{el}}{\eta_{el,ref}}} \quad (\text{Gl. 3-10})$$

$$Anteil_{el} = (1 - PEE) \frac{\eta_{el}}{\eta_{el,ref}} \quad \text{bzw.} \quad Anteil_{th} = (1 - PEE) \frac{\eta_{th}}{\eta_{th,ref}} \quad (\text{Gl. 3-11}) \quad (\text{Gl. 3-12})$$

Im betrachteten Beispiel wurden ein thermischer Wirkungsgrad einer Referenzanlage von $\eta_{th,ref} = 0,8$ und ein elektrischer Referenzwirkungsgrad von $\eta_{el,ref} = 0,5$ angenommen. Die CO₂-Emissionen für das betrachtete Beispiel betragen damit 316 gCO₂/kWh_{th}, bzw. 505 gCO₂/kWh_{el}. Zur Bestimmung des Verteilungsschlüssels für die Emissionen der Abfallverwertung ist die finnische Methode nur bedingt geeignet, da als Referenzanlagen typischerweise hocheffiziente Anlagen herangezogen werden, deren einziges Ziel die effektive Bereitstellung von Strom bzw. Wärme ist. Da das primäre Ziel der thermischen Abfallbehandlung aber ein anderes ist, nämlich die Behandlung und damit Reduktion der Abfallmenge, ist die Anwendung dieser Methode in diesem Zusammenhang nicht sinnvoll. Darüber hinaus wird mit der Annahme von Referenzwirkungsgraden eine weitere beeinflussbare Größe in die Berechnung aufgenommen, welche die Transparenz des Ergebnisses nicht erhöht.

Die beiden Gutschriftenmethoden, **Wärmegutschriftmethode** und **Stromgutschriftmethode**, reduzieren die Anlage zunächst auf reine Wärme- bzw. Strombereitstellung. Dem so definierten Hauptprodukt werden die gesamten brennstoffspezifischen CO₂-Emissionen angerechnet. Für das gekoppelte Produkt werden die CO₂-Emissionen berechnet, die in einer Referenzanlage anfallen würden. Im betrachteten Fall werden entsprechend dem deutschen Strom- und Wärmemix 304 g/kWh_{th} sowie 534 g/kWh_{el} verwendet. Diese Emissionen (Koppelprodukt in der Referenzanlage) werden dann von denen des Hauptprodukts (gesamte brennstoffspezifische Emissionen) abgezogen. So ergibt sich der „Netto-Emissionsfaktor“ des Hauptproduktes. Die Differenz wird dem Koppelprodukt zugeordnet, wodurch sich eine systematische Begünstigung desselben ergibt [330,331]. Unter Anwendung der Wärmegutschriftmethode ergeben sich im betrachteten Fall spezifische CO₂-Emissionen von 307 gCO₂/kWh_{th} und 534 kgCO₂/kWh_{el}. Für die Stromgutschriftmethode sind dies 304 gCO₂/kWh_{th} und 541 gCO₂/kWh_{el}. Die Emissionswerte des Koppelprodukts entsprechen bei dieser Methode somit denen der Referenz, zu Lasten der Emissionswerte des Hauptprodukts.

Laut VDI 4661 [332] ist keine der beschriebenen Methoden einer anderen zwingend vorzuziehen.

Quellenverzeichnis

- [1] Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V. RAL Gütezeichen Sekundärbrennstoffe. Gütesicherung RAL-GZ 724 2012.
- [2] Bundesnetzagentur. Kraftwerkliste Bundesnetzagentur bundesweit 2011. https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/Erzeugungskapazitaeten/Kraftwerkliste/kraftwerkliste-node.html (accessed April 12, 2017).
- [3] Statistisches Bundesamt. Abfallentsorgung 2015. Fachserie 19 Reihe 1 2017. <https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/UmweltstatistischeErhebungen/Abfallwirtschaft/Abfallentsorgung.html>.
- [4] Statistisches Bundesamt. Abfallentsorgung 2014. Fachserie 19 Reihe 1 2014. https://www.destatis.de/GPStatistik/receive/DESerie_serie_00000202.
- [5] Statistisches Bundesamt. Abfallentsorgung 2013. Fachserie 19 Reihe 1 2015. https://www.destatis.de/GPStatistik/receive/DESerie_serie_00000202.
- [6] Statistisches Bundesamt. Abfallentsorgung 2012. Fachserie 19 Reihe 1 2014. https://www.destatis.de/GPStatistik/receive/DESerie_serie_00000202.
- [7] Statistisches Bundesamt. Abfallentsorgung 2011. Fachserie 19 Reihe 1 2013. https://www.destatis.de/GPStatistik/receive/DESerie_serie_00000202.
- [8] Statistisches Bundesamt. Abfallentsorgung 2010. Fachserie 19 Reihe 1 2012. https://www.destatis.de/GPStatistik/receive/DESerie_serie_00000202.
- [9] Statistisches Bundesamt. Abfallentsorgung 2009. Fachserie 19 Reihe 1 2011. https://www.destatis.de/GPStatistik/receive/DESerie_serie_00000202.
- [10] Statistisches Bundesamt. Abfallentsorgung 2008. Fachserie 19 Reihe 1 2004. https://www.destatis.de/GPStatistik/receive/DESerie_serie_00000202.
- [11] Statistisches Bundesamt. Abfallentsorgung 2007. Fachserie 19 Reihe 1 2009. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/sachstand-zu-den-alternativen-verfahren-fuer-die>.
- [12] Statistisches Bundesamt. Abfallentsorgung 2006. Fachserie 19 Reihe 1 2008. https://www.destatis.de/GPStatistik/receive/DESerie_serie_00000202.
- [13] Statistisches Bundesamt. Abfallentsorgung 2005. Fachserie 19 Reihe 1 2007. https://www.destatis.de/GPStatistik/receive/DESerie_serie_00000202.
- [14] Statistisches Bundesamt. Abfallentsorgung 2004. Fachserie 19 Reihe 1 2006. https://www.destatis.de/GPStatistik/receive/DESerie_serie_00000202.
- [15] Statistisches Bundesamt. Abfallentsorgung 2003. Fachserie 19 Reihe 1 2005. https://www.destatis.de/GPStatistik/receive/DESerie_serie_00000202.
- [16] Statistisches Bundesamt. Abfallentsorgung 2002. Fachserie 19 Reihe 1 2004. https://www.destatis.de/GPStatistik/receive/DESerie_serie_00000202.
- [17] Statistisches Bundesamt. Abfallentsorgung 2001. Fachserie 19 Reihe 1 2003. https://www.destatis.de/GPStatistik/receive/DESerie_serie_00000202.
- [18] ITAD. Internetauftritt der Interessengemeinschaft der thermischen Abfallbehandlung in Deutschland 2017:837–52. <https://www.itad.de/> (accessed July 21, 2017).
- [19] Abfallverwertung Augsburg 2017. <https://www.ava-augsburg.de/> (accessed July 28, 2017).
- [20] Müllheizkraftwerk Bremen n.d. <http://www.swb-entsorgung.de/anlagen/mhkw.php> (accessed July 28, 2016).
- [21] Bremerhavener Entsorgungsgesellschaft mbh. Betriebsstätten n.d. <http://beg-bhv.de/ueberuns/betriebsstaetten/> (accessed April 10, 2017).

- [22] Müllheizkraftwerk Darmstadt n.d. <http://www.zas-darmstadt.de/startseite.html> (accessed July 28, 2017).
- [23] Europark Verbrennungs Installation n.d. <http://www.evi-europark.de/de> (accessed July 28, 2017).
- [24] Müllheizkraftwerk Essen-Karnap n.d. <http://www.rwe.com/web/cms/de/614874/muellheizkraftwerk-essen-karnap/> (accessed July 28, 2017).
- [25] Müllheizkraftwerk Frankfurt 2015. <https://www.mhkw-frankfurt.de/> (accessed July 28, 2017).
- [26] Enertec Hameln 2017. <http://www.enertec-hameln.de/> (accessed July 28, 2017).
- [27] EEW Energy from waste 2017. <https://www.eew-energyfromwaste.com/de/standorte/helmstedt.html> (accessed July 28, 2017).
- [28] AMK - Abfall-entsorgungs-gesellschaft des Märkischen Kreises mbH 2016. <http://www.amk-entsorgung.de/geschaeftsfelder/thermische-verwertung/> (accessed July 28, 2017).
- [29] Müllheizkraftwerk Kassel n.d. <http://www.mhkw-kassel.de/> (accessed July 28, 2017).
- [30] TAV Betriebs GmbH n.d. <https://www.alba.info/standorte/ludwigslust/tav-betriebs-gmbh.html> (accessed July 28, 2017).
- [31] MVV Umwelt GmbH 2017. https://www.mvv.de/de/mvv_energie_gruppe/mvv_umwelt/index.jsp (accessed July 28, 2017).
- [32] Quicker P. Betreiberbefragung zur Erhebung des Stands der deutschen Abfallverbrennung 2017.
- [33] 320grad. Krefelder MVA mit Verbrennungsrekord 2017. <http://320grad.de/krefelder-mva-mit-verbrennungsrekord/> (accessed August 6, 2017).
- [34] Umweltbundesamt. Primärenergieverbrauch 2017. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie-als-ressource/primaerenergieverbrauch#textpart-1> (accessed October 16, 2017).
- [35] Thiel S. Ersatzbrennstoff-Kraftwerke in Deutschland und Österreich. In: Thomé-Kozmiensky KJ, Beckmann M, editors. *Energ. aus Abfall* Band 10, Neuruppin: 2013.
- [36] Alwast H. Ersatzbrennstoffmarkt in Deutschland. *Recycl. Alm.*, Eltville: 2009.
- [37] Romonta Abfallverwertung n.d. <http://www.wachs-und-mehr.de/index.php/de/abfallverwertung> (accessed July 28, 2017).
- [38] HKW Blumenthal n.d. <http://www.hkw-blumenthal.de/impressum.htm> (accessed July 28, 2017).
- [39] Mittelkalorik-Kraftwerk Bremen n.d. <http://www.swb-entsorgung.de/anlagen/mkk.php> (accessed July 28, 2017).
- [40] WIRA Schaltanlagen GmbH. Verbrennungsanlagen n.d. http://www.wira-schaltanlagen.de/_german/verbrennung.html (accessed July 28, 2017).
- [41] Infraser n.d. http://www.infraser.com/de/unternehmen/infraser_hoehst_gruppe/t2c/index.html (accessed July 28, 2017).
- [42] Stadtwerke Giessen n.d. <http://www.stadtwerke-giessen.de/energie/privatkunden/waerme/trea.html> (accessed July 28, 2017).
- [43] EBS Concept 2012. <http://www.ebs-concept.de/> (accessed July 28, 2017).
- [44] Ersatzbrennstoff (EBS) - Heizkraftwerk Glückstadt 2015. http://www.bls-energieplan.de/de/kraftwerke/kwk-anlagen-und-heizwerke/projektdetail/projekt/EBS_HKW_Glueckstadt.html (accessed July 28, 2017).
- [45] EEW Standort Großräschen 2017. <https://www.eew-energyfromwaste.com/de/standorte/grossraeschen.html> (accessed July 28, 2017).
- [46] EBS-HKW Hagenow n.d. <http://www.ebs-hkw.de/offen/willkommen.php> (accessed July 28, 2017).
- [47] IBS Technik GmbH n.d. <http://www.ibstechnik.de/projektentwicklung-planung/referenzen.php>

(accessed July 28, 2017).

- [48] EEW Heringen 2017. <https://www.eew-energyfromwaste.com/de/standorte/heringen.html> (accessed July 25, 2017).
- [49] Wirbelschichtkraftwerk – Energie aus alternativen Quellen. 2017. <http://www.remondis-production.de/rp/infrastruktur/energie-kraftwerk/> (accessed July 20, 2017).
- [50] EEW Knapsack 2017. <https://www.eew-energyfromwaste.com/de/standorte/knapsack.html> (accessed July 23, 2017).
- [51] Heizkraftwerk Meuselwitz-Lucka 2017. <http://hkw-meuselwitz.de/index.php/daten.html>.
- [52] Stadtwerke Neumünster n.d. <https://www.stadtwerke-neumuenster.de/unternehmen/innovationen/energieerzeugung/> (accessed July 28, 2017).
- [53] Heizkraftwerk Pforzheim 2012. <http://www.heizkraftwerk-pforzheim.de/index.php> (accessed July 1, 2017).
- [54] EEW Premnitz 2017. <https://www.eew-energyfromwaste.com/de/standorte/premnitz.html> (accessed June 25, 2017).
- [55] Die Thermische Verwertungsanlage Schwarza n.d. <http://www.zaso-tvs.de/> (accessed June 15, 2017).
- [56] Industriekraftwerk Rüdersdorf n.d. <https://corporate.vattenfall.de/ueber-uns/geschäftsfelder/erzeugung/energie-aus-abfall/ikw-rudersdorf/> (accessed July 12, 2017).
- [57] EEW Schwedt 2017. <https://www.eew-energyfromwaste.com/de/standorte/schwedt.html> (accessed July 25, 2017).
- [58] Spree Recycling n.d. <http://www.spreerecycling.com/> (accessed June 30, 2017).
- [59] Giessen R. Genehmigungsbescheid für die Errichtung und den Betrieb einer thermischen Reststoffbehandlungs- und Energieverwertungsanlage (TREA II) 2014. https://www.swg-konzern.de/fileadmin/user_upload/PDF/Konzern/Ueber_uns/Genehmigungsbescheid_TREA_2.pdf (accessed June 10, 2017).
- [60] Umweltbundesamt. Thermische Behandlung 2016. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/entsorgung/thermische-behandlung#textpart-1> (accessed August 4, 2017).
- [61] Ministerium für Umwelt und Naturschutz Landwirtschaft und Verbraucherschutz Nordrhein Westfalen. Abfallwirtschaftsplan Nordrhein-Westfalen Teilplan Sonderabfälle (gefährliche Abfälle) 2007. <https://www.umwelt.nrw.de/fileadmin/redaktion/Broschueren/abfallwirtschaftsplan.pdf>.
- [62] Senatsverwaltung für Umwelt Verkehr und Klimaschutz Berlin. Liste der Beseitigungs- und Verwertungsanlagen für gefährliche Abfälle im Land Brandenburg n.d. <http://www.berlin.de/senuvk/umwelt/abfallwirtschaft/de/sonderabfall/download/Sonderabfallbehandlungsanlagen2016.pdf>.
- [63] Sonderabfallgesellschaft Brandenburg Berlin. Stationäre Behandlungsanlagen in Brandenburg / Berlin für ausgewählte flüssige ölhaltige Sonderabfälle 2015. https://www.sbb-mbh.de/fileadmin/media/anlagenlisten/oelhaltige_abfaelle.pdf.
- [64] Bayerisches Landesamt für Umwelt. Sonderabfallstatistik 2015 für Bayern 2016. <https://www.lfu.bayern.de/abfall/sonderabfall/index.htm>.
- [65] Thörner T. Struktur und Organisation der Entsorgung gefährlicher Abfälle in den Bundesländern und ausgewählten Mitgliedstaaten der EU 2011. https://www.prognos.com/fileadmin/pdf/beratungsfelder/infrastruktur_dialogverfahren/Vortrag_Thoerner_Abfalltage_FINAL__PRINT.pdf.
- [66] Umweltbundesamt und Deutsche Emissionshandelsstelle. Emissionshandelspflichtige Anlagen in Deutschland 2014 2015.
- [67] Johnke B, Gleis M. Thermische Abfallbehandlung in Deutschland und Europa - Ein Überblick n.d. <https://www.sbb-mbh.de/fileadmin/media/publikationen/seminarunterlagen/2010-01->

- 20/thermik_10_p_johnke.pdf.
- [68] Niedersächsisches Ministerium für Umwelt und Klimaschutz. Abfallwirtschaftsplan Niedersachsen, Teilplan Sonderabfall 2011. https://www.umwelt.niedersachsen.de/download/56641/Abfallwirtschaftsplan_-_Teilplan_Sonderabfall_gefaehrlicher_Abfall_.pdf.
- [69] Bayerisches Landesamt für Umwelt. Für die Sonderabfallbeseitigung zur Verfügung stehende Anlagen 2013. http://www.gesetze-bayern.de/Content/Document/BayAbfPV-ANL_4.
- [70] Senatsverwaltung für Gesundheit Umwelt und Verbraucherschutz. Abfallwirtschaftsplan Berlin - Teilplan gefährliche Abfälle - 2010. http://www.berlin.de/senuvk/umwelt/abfall/wirtschaftsplan/download/AWP_Gefaehrliche_Abfaelle2010.pdf.
- [71] TRV. Thermische Rückstandverwertung n.d. <http://www.trv-wesseling.de/>.
- [72] Staatliches Gewerbeaufsichtsamt Hildesheim. Sonderabfälle in Niedersachsen 2014. http://www.bosch.de/de/de/about_bosch_home_1/about-bosch-in-germany.php.
- [73] INDAVER. Sustainable Waste Management in the Circular Economy 2015. http://www.indaver.ie/fileadmin/indaver/Publications/Sust_report/DZR2016_flyer_ENG.pdf.
- [74] HIM. The Biebesheim disposal centre n.d. http://www.him.de/download/broschueren/Broschuere_Biebesheim_engl_2010_web.pdf.
- [75] Ellerkmann A. Mitverbrennung gefährlicher Abfälle in Hausmüllverbrennungsanlagen. 11. Fachtagung Abfallrecht Budenheim 2015.
- [76] Infraser. Rückstandsverbrennung: Rechtssicher und Umweltschonend n.d. https://www.infraser.com/media/content/leistungen/RVA_dt_rz_web.pdf.
- [77] Currenta. Sonderabfallverbrennungsanlagen 2010. https://www.currenta.de/tl_files/currenta/medien/currenta/downloads/pdf/CUR_Verbrennung_d.pdf.
- [78] SAVA. Dienstleistungen für die fachgerechte Sonderabfallentsorgung 2006.
- [79] DBFZ Deutsches Biomasse-Forschungszentrum GmbH. Stromerzeugung aus Biomasse (Vorhaben Ila) Zwischenbericht 2015. https://www.dbfz.de/fileadmin/eeg_monitoring/berichte/01_Monitoring_ZB_Mai_2015.pdf.
- [80] Uffmann D. Deutschland – Sicherung des Altholz-Anlagenbestandes 2016.
- [81] BAV Bundesverband der Altholzaufbereiter und -verwerter e.V. Anlagenbestand Altholzkraftwerke EEG - Ausstiegsszenario n.d. http://www.altholzverband.de/client/media/207/3._bavmarktintegrationsmodellaltholzkraftwerkeeeeg_2016anlagenbestand_altholzkraftwerkeausstiegsszenario.pdf.
- [82] DBFZ Deutsches Biomasse-Forschungszentrum GmbH. Stromerzeugung aus Biomasse (Vorhaben Ila Biomasse) Zwischenbericht 2015. https://www.dbfz.de/fileadmin/eeg_monitoring/berichte/01_Monitoring_ZB_Mai_2015.pdf.
- [83] Bayrisches Landesamt für Umwelt (lfu). Energieatlas Bayern n.d. www.energieatlas.bayern.de (accessed May 15, 2017).
- [84] Heizkraftwerk Altstadt n.d. <http://www.heizkraftwerk-altenstadt.de/> (accessed May 12, 2017).
- [85] Standardkessel Baumgarte. Biomassekraftwerk Baruth, Deutschland. Referenzblatt n.d. http://www.standardkessel-baumgarte.com/uploads/tx_download/REFERENZBLATT_BARUTH_01.pdf.
- [86] Standardkessel Baumgarte. Biomasse-Kraftwerk Baruth, Deutschland n.d. <http://www.standardkessel-baumgarte.com/neuanlagen-und-komponenten/referenz/biomassekraftwerk-baruth.html> (accessed May 3, 2017).
- [87] Heitkamp Construction. Biomasseheizkraftwerk, Bergkamen n.d. <http://www.heitkamp-ikb.com/leistungen-referenzen/kraftwerksbau/biomasseanlagen/biomasseheizkraftwerk-bergkamen/>

- (accessed May 10, 2017).
- [88] Borchers Kreislaufwirtschaft. Borchers Biomasseheizkraftwerk n.d. <http://www.borchers-entsorgung.de/Anlagen/Biomasseheizkraftwerk/biomasseheizkraftwerk.html> (accessed May 12, 2017).
- [89] Landesamt für Natur Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein Westfalen. AIDA Informationsplattform Abfall in NRW n.d. <http://www.abfall-nrw.de/aida/> (accessed May 2, 2017).
- [90] Landesanstalt für Umwelt Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg. Energieatlas Baden Württemberg 2015. <http://www.energieatlas-bw.de/> (accessed April 19, 2017).
- [91] Steag. Das Biomasse-Heizkraftwerk Buchen 2012. http://www.bko-buchen.de/wp-content/uploads/2015/07/Broschuere-bko_DIN-A4.pdf.
- [92] Engie. Biomassekraftwerk Zolling n.d. <http://engie-kraftwerke.de/de/content/biomassekraftwerk-zolling> (accessed April 20, 2017).
- [93] Danpower. Biomassekraftwerk in Delitzsch n.d. <https://www.danpower-gruppe.de/des/referenzen/referenz/biomassekraftwerk-in-delitzsch.html> (accessed April 21, 2017).
- [94] Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft. Biomassekraftwerke in Sachsen. Drucksache 4/11274 2008. http://www.gruene-fraktion-sachsen.de/fileadmin/user_upload/Kleine_Anfragen/4_Drs_11274_-1_1_10_.pdf.
- [95] Steag. Biomasse-Heizkraftwerk Dresden 2012. https://www.steag.com/uploads/pics/Broschuere_Biomasse-Heizkraftwerk_Dresden_web_01.pdf (accessed April 19, 2017).
- [96] Landesamt für Umwelt Brandenburg. Danpower GmbH BioHKW Elsterwerda, Altholzskraftwerk 2016. <http://www.luis.brandenburg.de/a/asys/A7100004/default.aspx?p1=PA5000391> (accessed April 21, 2017).
- [97] Danpower. Biomasseheizkraftwerk in Elsterwerda n.d. <https://www.danpower-gruppe.de/danpower/referenzen/referenz/biomasseheizkraftwerk-in-elsterwerda.html> (accessed April 19, 2017).
- [98] Statkraft. Emden n.d. https://www.statkraft.de/globalassets/old-contains-the-old-folder-structure/documents/de/kraftwerke-in-deutschland/broschure_emden_tcm21-12484.pdf (accessed April 19, 2017).
- [99] EBS Holzheizkraftwerk Emlichheim. Umwelterklärung 2014, Aktualisierte und validierte Fassung 2015. http://www.emlichheim.de/pics/medien/1_1455787394/Umwelterklaerung_Aktualisierung_2015_unterschrieben.pdf.
- [100] Hessisches Ministerium für Umwelt Klimaschutz Landwirtschaft und Verbraucherschutz. Abfallwirtschaftsplan Hessen, Siedlungsabfälle und industrielle Abfälle 2015. https://umwelt.hessen.de/sites/default/files/media/hmuelv/awp_hessen_2015_stand_24_04_2015.pdf.
- [101] Biomasse Rhein-Main. Biomassekraftwerk Wicker n.d. <http://www.bioma-gmbh.de/index.html> (accessed April 19, 2017).
- [102] Städtische Werke Kassel. Kraftwerke - Unsere Anlagen n.d. <http://www.ew-kassel.de/anlagen/#c90> (accessed April 19, 2017).
- [103] Mainova. Das Biomasse-Heizkraftwerk Frankfurt-Fechenheim 2009. https://www.mainova.de/static/de-mainova/downloads/Biomasse_Mainova.pdf.
- [104] Ney P. Ein Tag im Biomasse-Kraftwerk Großaitingen: Auf dem Holzweg 2008. <http://www.gemeindezeitung.de/archiv99/Sonderdruck-Biomasse.PDF>.
- [105] Müllverwertung Borsigstrasse. Müllverwertung Borsigstrasse 2008. <http://www.mvb-hh.de/> (accessed April 19, 2017).
- [106] Biomasse Heizkraftwerk Ilmenau GmbH. Biomasse-Heizkraftwerk Ilmenau n.d. [139](http://www.bhi-</p>
</div>
<div data-bbox=)

- ilmenau.de/ (accessed April 19, 2017).
- [107] Boehringer Ingelheim. Standortprofil Ingelheim 2017. <https://www.boehringer-ingelheim.de/unternehmensprofil/unser-unternehmen/standort-ingelheim> (accessed April 19, 2017).
- [108] Stora Enso. Bioenergie - Energieträger der Zukunft n.d. <http://www.storaenso.com/products-and-services/wood-supply/wood-supply-germany/bioenergie---energietraeger-der-zukunft> (accessed April 19, 2017).
- [109] BEE Bio Energie Baden GmbH. Geschäftstätigkeit n.d. <http://www.koehlerenergy.com/kre/b-e-b/> (accessed April 20, 2017).
- [110] MVV Umwelt Asset GmbH. Biomassekraftwerk Königs Wusterhausen n.d. https://www.mvv.de/media/de/media/downloads/mvv_energie_gruppe_1/geschaeftsfelder_1/umwelt_1/datenblaetter_1/Datenblatt_Wusterhausen.pdf.
- [111] Statkraft. Energie aus dem Biomasseheizkraftwerk Landesbergen dient dem Klimaschutz 2015. <https://www.statkraft.de/globalassets/1-statkraft-public/06-statkraft-germany/biomasse/emissionswerte-biomasse-landesbergen-2015.pdf>.
- [112] Landesamt für Umwelt Naturschutz und Geologie. Einführung Enstsorgerhandbuch n.d. <http://www.entsorgerhandbuch.mv-regierung.de> (accessed January 1, 2017).
- [113] ESWE Bioenergie GmbH. Biomasseheizkraftwerk Wiesbaden n.d. <http://www.eswe-bioenergie.de/> (accessed April 19, 2017).
- [114] Fernwärme Ulm GmbH. Biomasse-Heizkraftwerk I n.d. <http://www.fernwaerme-ulm.de/kraftwerke/bio-hkw-l.html> (accessed April 19, 2017).
- [115] Plambeck Holding GmbH. Biomassekraftwerk Sieblitz n.d. <https://www.plambeck-holding.de/beteiligungen-referenzen/erneuerbare-energien/biomassekraftwerk-sieblitz/> (accessed April 20, 2017).
- [116] EnergieAgentur.NRW. Hightech aus NRW für Strom in Thüringen 2003. <http://energiertools.ea-nrw.de/presse/hightech-aus-nrw-fuer-strom-in-thueringen-1442.asp> (accessed April 19, 2017).
- [117] Metz Gruppe. Biomasse-Heizkraftwerk Wilmersdorf, Germany. Referenz Energietechnik n.d. Biomasse-Heizkraftwerk Wilmersdorf (accessed April 19, 2017).
- [118] Otto-Rüdiger Schulze GmbH & Co KG. Unsere Standorte n.d. <http://www.ors-recycling.de/standorte.php> (accessed April 19, 2017).
- [119] Enertec Hameln GmbH. Biomasseverstromung 2017. http://www.enertec-hamelnde/Abfall_und_Energie/Abfallverbrennung/Biomasseverstromung.php (accessed April 19, 2017).
- [120] Heizkraftwerk Pforzheim GmbH. Biomasseblock 2017. <https://www.heizkraftwerk-pforzheim.de/de/1462.php> (accessed April 19, 2017).
- [121] ESWE Bioenergie und Seeger Engineering. Kurzbeschreibung zum Antrag nach BImSchG. Biomasse-Heizkraftwerk Wiesbaden 2011. <http://www.eswe-bioenergie.de/fileadmin/files/BMHKW-Kurzbeschreibung.pdf> (accessed April 19, 2017).
- [122] B+S Papenburg Energie. Eckdaten n.d. http://www.bt-umwelt.de/Blog/wp-content/uploads/2016/10/Kurzpraesentation_Papenburg.pdf.
- [123] EEV Bioenergie GmbH & Co KG. Umwelterklärung 2012 für das Biomassekraftwerk Papenburg 2013. http://www.emas.de/fileadmin/user_upload/umwelterklaerungen/reg/DE-121-00006_EEV-BioEnergie-GmbH.pdf.
- [124] WER Wärme Energie und Rohstoff GmbH. Hückelhoven Altholz n.d. <http://www.wer-h.de/page8/page13/page13.html> (accessed April 19, 2017).
- [125] Ney P. BiomasseHeizkraftwerk Neufahrn/Eching 2011. https://www.kreisfreising.de/fileadmin/user_upload/Aemter/Energiewende/Startseite/Aktivitaeten/Ausstellung__Energ

erzeugende_Anlagen_aus_dem_Landkreis_Freising/Biomasse/Biomasse-Heizkraftwerk_Neufahrn_Eching.pdf.

- [126] BHKW Flohr GmbH. Biomasseheizkraftwerk zur Gewinnung von Bioenergie 2014. <http://www.flohr.de/flohr/de/BHKW> (accessed April 19, 2017).
- [127] Umweltdienste Kedenburg GmbH. Heizkraftwerk Mansfelder Land 2017. <http://www.hhkw-ml.de> (accessed April 19, 2017).
- [128] Aalborg Energie Technik a/s. Kronoply Power Plant No. 3, Germany n.d. <http://www.aet-biomass.com/en-GB/Home/References/Services-and-O-M/Kronoply.aspx> (accessed April 19, 2017).
- [129] Biomasseheizkraftwerk Herbrechtingen GmbH. Biomasseheizkraftwerk Herbrechtingen n.d. <http://www.biohkw.de/index.php> (accessed April 19, 2017).
- [130] Entsorgerdatenbank Rheinland-Pfalz n.d. <http://entsorgerdb.sam-rlp.de/index.php?kategorie=Altholz> (accessed April 19, 2017).
- [131] Steenova UG & Co KG. Biomasseheizkraftwerk Neubrücke 2017. <http://www.steenova.eu/de/home/referenzanlagen/opticom/biomasse-heizkraftwerk-neubruecke/> (accessed April 19, 2017).
- [132] BMK Biomassekraftwerk Lünen GmbH. Das Biomassekraftwerk Lünen n.d. <http://www.bmk-luenen.de/technik.php> (accessed April 20, 2017).
- [133] Aalborg Energie Technik a/s. Pfeleiderer - Neumarkt Energie Anlage, Deutschland n.d. <http://aet-biomass.de/de-DE/Home/Referenzen/Mit-Biomasse-befeuerte-Anlagen/Pfeleiderer-Neumarkt.aspx> (accessed April 21, 2017).
- [134] Aalborg Energie Technik a/s. Pfeleiderer - Gütersloh Energie-Anlage, Deutschland n.d. <http://aet-biomass.de/de-DE/Home/Referenzen/Mit-Biomasse-befeuerte-Anlagen/Pfeleiderer-Gütersloh.aspx> (accessed April 21, 2017).
- [135] biotherm Services GmbH. Unser Standort in Hagenow n.d. <http://www.biotherm-services.de/standorte/hagenow.html> (accessed April 19, 2017).
- [136] Umweltbundesamt. Erneuerbare Energien in Deutschland. Daten zur Entwicklung 2016 2017. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/erneuerbare_energie_n_in_deutschland_daten_zur_entwicklung_im_jahr_2016.pdf.
- [137] Wiechmann B, Dienemann C, Kabbe C, Brandt S, Vogel I, Roskosch A. Klärschlamm Entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland 2012. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/klaerschlammentsorgung-in-bundesrepublik>.
- [138] Statistisches Bundesamt. Umwelt Abwasserbehandlung – Klärschlamm, Ergebnisbericht 2013/2014 2017. https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/UmweltstatistischeErhebungen/Wasserwirtschaft/Klaerschlammm5322101139004.pdf?__blob=publicationFile (accessed June 6, 2017).
- [139] Statistisches Bundesamt. Pressemitteilung vom 12. Dezember 2016 - 446/16 2016. https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/2016/12/PD16_446_32214.pdf?__blob=publicationFile (accessed June 6, 2017).
- [140] Verein Deutscher Zementwerke e.V. Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2011 2012. https://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/Umweltdaten/Umweltdaten_2011.pdf.
- [141] Verein Deutscher Zementwerke e.V. Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2012 2012. https://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/Umweltdaten/Umweltdaten_2012_DE_GB.pdf.
- [142] Verein Deutscher Zementwerke e.V. Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2013 2014. https://www.vdz-online.de/uploads/media/VDZ_Umweltdaten_2013_DE_GB.pdf.
- [143] Verein Deutscher Zementwerke e.V. Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2014 2015.

- https://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/Umweltdaten/VDZ_Umweltdaten_2014_DE_EN.pdf.
- [144] Verein Deutscher Zementwerke e.V. Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2015 2016. https://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/Umweltdaten/VDZ-Umweltdaten_2015.pdf.
- [145] Verein Deutscher Zementwerke, editor. Zementindustrie im Überblick 2016/2017 2016. https://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/Zementindustrie_im_Ueberblick/VDZ_Zementindustrie_im_Ueberblick_2016_2017.pdf.
- [146] Oerter M. Hochwertige Verwertung von Abfällen – Der Beitrag der Zementindustrie zu einer modernen Kreislaufwirtschaft. In: Flamme et. al, editor. 15. Münsteraner Abfallwirtschaftstage. Münsteraner Schriften zur Abfallwirtschaft Band 17, Münster: IWARU; 2017.
- [147] CUTEC Institut Clausthaler Umwelttechnik GmbH. Differenzierung der energetischen Verwertung am Kriterium der Energieeffizienz 2016. http://www.bvse.de/images/pdf/alholz/2016_Cutec_Studie_Hochwertige_energetische_Verwertung_final_2.pdf.
- [148] Lipka K. Rahmenbedingungen in der Kraftwerkswirtschaft für die Mitverbrennung von SBS 2016. <http://emo.kylos.pl/lubuskaenergetyka.pl/images/lubuskaenergetyka/konferencja2016/prezentacje/5.LipaDE.pdf>.
- [149] RWE Generation. Kraftwerk Weisweiler 2015. <http://www.rwe.com/web/cms/mediablob/de/2915476/data/60142/2/rwe-power-ag/energetraeger/braunkohle/standorte/kw-weisweiler/Kraftwerk-Weisweiler-Standort-Flyer.pdf>.
- [150] RWE Power. Genehmigung Industriekraftwerk Frechen n.d. <http://www.rwe.com/web/cms/mediablob/de/1072754/data/60166/5/frechen/IKW-Frechen.pdf>.
- [151] Piel W. Frimmersdorf: Regelbetrieb endet 2017. Westdtsch Zeitung 2015. <http://www.wz.de/lokales/rhein-kreis-neuss/neuss/frimmersdorf-regelbetrieb-endet-2017-1.2044454>.
- [152] RWE Power. Genehmigung Industriekraftwerk Berrenrath n.d. GenehmigungenIndustriekraftwerk(IKW) Genehmigungen Industriekraftwerk (IKW) Berrenrath.
- [153] Bundesnetzagentur. Kraftwerksstilllegungsanzeigenliste der Bundesnetzagentur 2016. https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/Erzeugungskapazitaeten/KWSAL/KWSAL_2016_04_18.pdf?__blob=publicationFile&v=2.
- [154] LEAG Lausitz Energie Bergbau AG. Kraftwerk Lippendorf n.d. <https://www.leag.de/de/geschaeftsfelder/kraftwerke/kraftwerk-lippendorf/> (accessed April 25, 2017).
- [155] Gehrman H-J, Seifert H, Beckmann M, Glorius T. Ersatzbrennstoffe in der Kraftwerkstechnik. Chemie Ing Tech 2012;84:1085–98.
- [156] Sommer J, Trumpf R, Haas A. Reststoffverwertung in der Papierindustrie am Beispiel des Heizkraftwerkes Wörth der Papierfabrik Palm – Konzept, Realisierung, Inbetriebnahme und erste Betriebserfahrungen -. 06.08.2017: n.d.
- [157] Sommer J, Thalheimer J. Modernes GuD- und Reststoff-Heizkraftwerk für die Papierfabrik Palm in Wörth. VIK Mitteilungen 2008;1.
- [158] Pfeifer Holz GmbH. Uelzen/Deutschland n.d. <http://www.pfeifergroup.com/de/produktionsstandorte/uelzen/> (accessed August 5, 2017).
- [159] URBAS Energietechnik. Energie aus Biomasse n.d. <http://www.urbas.at/assets/dokumente/energie.pdf>.
- [160] Stockstadt Mill. Sappi n.d. <https://www.sappi.com/de/stockstadt-mill> (accessed August 2, 2017).
- [161] Umweltinitiative Pfaffenwinkel. Zusammenarbeit zwischen UPM und EVA 2017. <http://www.uip->

- online.de/?p=2420 (accessed August 5, 2017).
- [162] ForstPraxis.de. Mercer kauft Klausner Holz Thüringen 2017. <https://www.forstpraxis.de/mercer-kauft-klausner-saegewerk-in-friesau> (accessed August 5, 2017).
- [163] Kankowsky H. Bedeutung von Energieholz aus Sicht der EnBW 2010. <https://www.winterkolloquium.uni-freiburg.de/WK-Vortraege/2010/kankowsky>.
- [164] Bezirksregierung Arnsberg. Genehmigungsbescheid 53-AR-0065/15/8.1.1.3 vom 17.11.2015 2015. https://www.bezreg-arnsberg.nrw.de/bekanntmachungen/2015/11/15_11_24_wepa_arnsberg/bekanntmachung.pdf.
- [165] SCA Hygiene Products GmbH. Umwelterklärung 2017 2017. https://www.essity.com/Global/SCA_Germany/Standorte/170613/Umwelterklärung_2017_mit_US.pdf?epslanguage=de.
- [166] Sappi. Umwelterklärung 2015 2016. https://cdn-s3.sappi.com/s3fs-public/2015_Umwelterklärung.pdf.
- [167] Seeger Engineering. Pollmeier Aschaffenburg GmbH & Co. KG n.d. <http://www.seeger-engineering.eu/de/referenzen/portfolio-biomasseheizwerk/212-pollmeier-aschaffenburg-gmbh-a-co-kg> (accessed July 20, 2017).
- [168] Pfeifergroup. Unterbernbach/Deutschland n.d. <http://www.pfeifergroup.com/de/produktionsstandorte/unterbernbach/> (accessed July 25, 2017).
- [169] Rettenmeier Holding AG. Standorte n.d. <http://www.rettmeier.com/unternehmen/standorte.html> (accessed July 15, 2017).
- [170] Kern M, Raussen T. Biogas-Atlas 2014/2015. Anlagenhandbuch der Vergärung biogener Abfälle in Deutschland und Europa. Witzhausen: 2014.
- [171] Stadtreinigung Dresden GmbH. Biologisch-Mechanische Abfallaufbereitungsanlage (BMA) 2017. <https://www.srdresden.de/ueber-uns/anlagen/> (accessed June 10, 2017).
- [172] Abfallentsorgungsverband Schwarze Elster. Mechanisch-Biologische Abfallbehandlungsanlage Freienhufen 2015. <http://www.schwarze-elster.de/ihr-aev/mba-freienhufen/> (accessed June 2, 2017).
- [173] Westsächsische Entsorgungs- und Verwertungsgesellschaft mbH. MBA Cröbern n.d. <http://www.wew-sachsen.de/mba-croebern/mba-technik.html> (accessed June 12, 2017).
- [174] Zweckverbandes Abfallwirtschaft Saale-Orla (ZASO). Internetauftritt des Zweckverbandes Abfallwirtschaft Saale-Orla (ZASO) n.d. <http://www.zaso-online.de/index.php> (accessed June 11, 2017).
- [175] Kreisentsorgungs GmbH Vogtland (KEV). Internetauftritt der Kreisentsorgungs GmbH Vogtland n.d. <http://www.kev-falkenstein.de/index.html> (accessed June 15, 2017).
- [176] Abfallwirtschaftsverband Chemnitz. Restabfallbehandlungsanlage Chemnitz n.d. Kreisentsorgungs GmbH Vogtland (KEV) %0A (accessed June 15, 2017).
- [177] Berliner Stadtreinigung. MPS Anlagen n.d. <https://www.bsr.de/mps-anlagen-22307.php> (accessed June 12, 2017).
- [178] MEAB – Märkische Entsorgungsanlagen-Betriebsgesellschaft mbH. Internetauftritt der märkischen Entsorgungsanlagen Betriebsgesellschaft mbH 2015. <http://www.meab.de/> (accessed June 21, 2017).
- [179] Abfallbehandlungsgesellschaft Havelland mbH. MBA Schwanebeck n.d. http://abh-mbh.de/index.php?page_id=528.
- [180] Zweckverband Abfallbehandlung Nuthe-Spree (ZAB). Internetauftritt des Zweckverbandes Abfallbehandlung Nuthe-Spree n.d. <http://www.zab-mbs.de/de/der-zab/> (accessed June 26, 2017).
- [181] Kommunaler Abfallentsorgungsverband, Niederlausitz. MBV/EBS-Anlage n.d. <http://www.kaev.de/verband/ueber-den-kaev-kontakt-anfahrt/mbv-ebs-anlage/> (accessed June 12, 2017).

- [182] OVVD - Ostmecklenburgisch Vorpommersche Verwertungs- und Deponie GmbH. Betrieb der Abfallbehandlungsanlage n.d. <http://www.ovvd.de/entsorgungskonzept/abfallbehandlungsanlage/betrieb-der-aba> (accessed June 20, 2017).
- [183] Veolia Deutschland GmbH. Mechanisch-Biologische Abfallbehandlungsanlage Rostock 2017. www.evg-mba-rostock.de (accessed June 11, 2017).
- [184] GfA Lüneburg. MBV - Mechanisch-Biologische Vorbehandlung n.d. http://www.gfa-lueneburg.de/?tree_id=51 (accessed June 15, 2017).
- [185] Entsorgungsbetriebe Lübeck. Mechanisch-Biologische Abfallbehandlungsanlage (MBA) 2017. http://entsorgung.luebeck.de/ueber_uns/unsere_anlagen/mba.html (accessed June 20, 2017).
- [186] SWN - Stadtwerke Neumünster Beteiligungen GmbH. Die MBA Neumünster n.d. <http://www.mba-nms.de/> (accessed June 12, 2017).
- [187] Südharzwerke Nordhausen – Entsorgungsgesellschaft mbH. Abfallwirtschaftszentrum Nentzelsrode n.d. <http://www.abfall-nordhausen.de/index.php?id=164> (accessed June 14, 2017).
- [188] Erbenschwanger Verwertungs- und Abfallentsorgungsgesellschaft mbH. Abfallentsorgungszentrum (AEZ) Erbenschwang 2017. <http://www.eva-abfallentsorgung.de/aez-erbenschwang.html> (accessed June 20, 2017).
- [189] Zweckverband Abfallbehandlung Kahlenberg. Mechanisch-biologische Abfallbehandlung n.d. <http://www.zak-ringsheim.de/> (accessed June 21, 2017).
- [190] Ecowest Entsorgungsverbund Westfalen GmbH. Mechanische Abfallbehandlungsanlage (EBS Anlage) n.d. <https://www.ecowest.de/de/technik/ebs-anlage/> (accessed June 12, 2017).
- [191] MBS-Anlage Westerwald GmbH & Co. KG. MBS-Anlage Westerwald n.d. <http://www.mbs-anlage.de/mbs-anlage-westerwald.html> (accessed June 16, 2017).
- [192] Entsorgungsgesellschaft Westmünsterland mbH. Mechanisch-Biologische Abfallbehandlung (MBA) n.d. <http://egw.de/anlagen-standorte/entsorgungsanlagen/mechanisch-biologische-abfallbehandlung-mba/> (accessed June 15, 2017).
- [193] AWB Landkreis Graftschaft Bentheim. Entsorgungszentrum Wilsum 2017. <http://awb-grafschaft.de/staticsite/staticsite.php?menuid=496&topmenu=418> (accessed June 14, 2017).
- [194] KreisAbfallVerwertungsGesellschaft mbH Minden-Lübbecke. Internetauftritt des Entsorgungszentrum Pohlsche Heide 2017. www.pohlsche-heide.de (accessed June 1, 2017).
- [195] ASA e.V. Internetauftritt der Arbeitsgemeinschaft Stoffspezifische Abfallbehandlung 2017. <https://www.asa-ev.de/> (accessed July 21, 2017).
- [196] Ketelsen K, Kanning K. ASA Strategie 2030. Ressourcen- und Klimaschutz durch eine stoffspezifische Abfallbehandlung Herausforderungen, Chancen, Perspektiven 2016.
- [197] Quicker P, Neuerburg F, Noël Y, Huras A, Eyssen RG, Seifert H, et al. Sachstand zu den alternativen Verfahren für die thermische Entsorgung von Abfällen 2017. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/sachstand-zu-den-alternativen-verfahren-fuer-die>
- [198] Statistisches Bundesamt. Abfallbilanz 2015 2017. <https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/UmweltstatistischeErhebungen/Abfallwirtschaft/Abfallbilanz.html>.
- [199] Schüler K. Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen in Deutschland im Jahr 2014 2016. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/texte_64_2016_aufkommen_und_verwertung_von_verpackungsabfaellen_2014.pdf.
- [200] Statistisches Bundesamt. Bevölkerung und Erwerbstätigkeit Rückgerechnete und fortgeschriebene Bevölkerung auf Grundlage des Zensus 2011, 1991-2011 2016. https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Bevoelkerung/Bevoelkerungsstand/RueckgerechneteBevoelkerung5124105119004.pdf?__blob=publicationFile.

- [201] Flamme S, Hams S. Stand der Mitverbrennung in Deutschland. In: Kühle-Weidemeier M, Büscher K, editors. Waste-to-Resources. Int. Tagung MBA, Sortierung und Recycl., Göttingen: Cuvillier Verlag; 2017.
- [202] Durth A, Kolvenbach F-J. Abwasser und Klärschlamm in Deutschland – statistische Betrachtungen. Teil 2: Klärschlamm, Klärgas, Rechen- und Sandfanggut. Korrespondenz Abwasser, Abfall 2015;62.
- [203] Deutscher Bundestag (18. Wahlperiode). Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung. Drucksache 18/10884 2017. <http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/18/108/1810884.pdf>.
- [204] Bundesministerium für Justiz. Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung - DüMV) vom 5. Dezember 2012 (BGBl. I S. 2482), die durch Artikel 2 Absatz 3 des Gesetzes vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S 2017).
- [205] EFPRA/STN. Verarbeitung tierischer Nebenprodukte in Zahlen 2015. http://www.stn-vvtn.de/archiv/Grafik_150721.pdf.
- [206] STN Servicegesellschaft Verarbeitung tierischer Nebenprodukte. Verarbeitung tierischer Nebenprodukte n.d. http://www.stn-vvtn.de/fakten_zahlen.php (accessed August 5, 2017).
- [207] Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ. Kaskadennutzung von Holz: Bestandsaufnahme, Rechtsrahmen und Reformvorschläge für die Altholzverwertung in Deutschland, in Factsheet der Arbeitsgruppe „Governance der Bioökonomie“ 2016.
- [208] Mantau U. Holzrohstoffbilanz Deutschland. Entwicklung und Szenarien des Holzaufkommens und der Holzverwendung 1987-2015 2012. <http://epub.sub.uni-hamburg.de/epub/volltexte/2013/23574/pdf/dn051281.pdf>.
- [209] Mantau U, Weimar H, Kloock T. Standorte der Holzwirtschaft - Holzrohstoffmonitoring. Altholz im Entsorgungsmarkt - Aufkommens- und Vertriebsstruktur 2010. Abschlussbericht. 2012. http://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn051276.pdf.
- [210] Kreislaufwirtschaft Bau c/o Bundesverband Baustoffe - Steine und Erden e.V. Mineralische Bauabfälle Monitoring 2014. Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2014. 2017. <http://www.kreislaufwirtschaft-bau.de/Arge/Bericht-10.pdf>.
- [211] Rückstandsumfrage 2013. Aufkommen und Verbleib der Rückstände aus der Zellstoff- und Papierindustrie. Wochenblatt Für Pap 10/2014 2014.
- [212] Consultic Marketing & Industrieberatung GmbH. Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2015. Kurzfassung 2016. <http://www.kunststoffverpackungen.de/show.php?ID=5953>.
- [213] Statista. Gesammelte Menge an Altöl in Deutschland in den Jahren 2001 bis 2012 (in 1.000 Tonnen) 2017. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/169320/umfrage/gesammelte-menge-an-altoel-in-deutschland-seit-2001/>. Abruf 08.08.2017 (accessed August 6, 2017).
- [214] Statista. Gesammelte Menge an Altöl in Deutschland in den Jahren 2001 bi 2012 (in 1.000 Tonnen) n.d. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/169320/umfrage/gesammelte-menge-an-altoel-in-deutschland-seit-2001/>, (accessed August 6, 2017).
- [215] Verein Deutscher Zementwerke e.V. Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2010 2011. <https://www.vdz-online.de/publikationen/umweltdaten/>.
- [216] Verein Deutscher Zementwerke e.V. Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2009 2010. <https://www.vdz-online.de/publikationen/umweltdaten/>.
- [217] Verein Deutscher Zementwerke e.V. Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2008 2008. <https://www.vdz-online.de/publikationen/umweltdaten/>.
- [218] Verein Deutscher Zementwerke e.V. Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2007 2007. <https://www.vdz-online.de/publikationen/umweltdaten/>.
- [219] Verein Deutscher Zementwerke e.V. Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2006 2007.

- <https://www.vdz-online.de/publikationen/umweltdaten/>.
- [220] Verein Deutscher Zementwerke e.V. Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2005 2006. <https://www.vdz-online.de/publikationen/umweltdaten/>.
- [221] Verein Deutscher Zementwerke e.V. Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2004 2004. <https://www.vdz-online.de/publikationen/umweltdaten/>.
- [222] Verein Deutscher Zementwerke e.V. Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2003 2004. <https://www.vdz-online.de/publikationen/umweltdaten/>.
- [223] Verein Deutscher Zementwerke e.V. Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2000 2002. <https://www.vdz-online.de/publikationen/umweltdaten/>.
- [224] Verein Deutscher Zementwerke e.V. Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2001 2002. <https://www.vdz-online.de/publikationen/umweltdaten/>.
- [225] Verein Deutscher Zementwerke e.V. Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 1999 2001. <https://www.vdz-online.de/publikationen/umweltdaten/>.
- [226] Verein Deutscher Zementwerke e.V. Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 1998 2000. <https://www.vdz-online.de/publikationen/umweltdaten/>.
- [227] WdK Wirtschaftsverband der deutschen Kautschukindustrie e.V. Altreifenverwertung in Deutschland. Fachgespräch Verwertung von Altreifen. Umweltbundesamt, Berlin 2013.
- [228] Wirtschaftsverband der deutschen Kautschukindustrie. Effiziente Altreifenverwertung Altreifenverwertung 2015:2014–5. http://news.wdk.de/file/public/share/public/Presseportal/50521_PR_AltRf.pdf.
- [229] Bayerisches Landesamt für Umwelt. Gebraucht- und Altreifen 2017. http://www.abfallratgeber.bayern.de/publikationen/entsorgung_einzeln_abfallarten/doc/altreifen.pdf.
- [230] Weber B. Allgemeines über Deponiegas , n.d. http://www.deponie-stief.de/pdf/fachlit_pdf/2010buv-nms_allgemeines_ue_deponiegas_k1.pdf.
- [231] Kaltschmitt M, Hartmann H, Hofbauer H. Energie aus Biomasse. Springer-Verlag; 2009.
- [232] Bundesministerium für Umwelt Naturschutz Bau und Reaktorsicherheit. Sechster Nationalbericht 2013. http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/nationalbericht_6_de_bf.pdf.
- [233] Benndorf R, Bernicke M, Bertram A, Butz W, Dettling F, Drotleff J, et al. Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. UBA Hintergrund 2013. www.umweltbundesamt.de.
- [234] UBA. Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2014 2017:963. [c:%5CUsers%5Cwado3211%5CDocuments%5CCitavi%5CProjects%5CCitavi%5CAttachments%5CGniffke - Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/ueber-uns/5CUsers%5Cwado3211%5CDocuments%5CCitavi%5CProjects%5CCitavi%5CAttachments%5CGniffke%5CNationaler%5CInventarbericht%5CDeutsches%5CTreibhausgasinventar%5C2014%5C2017%5C963.pdf).
- [235] BDEW Bundesverbans der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. Erneuerbare Energien und das EEG : Zahlen, Fakten, Grafiken. Bdew 2013. [https://www.bdew.de/internet.nsf/id/17df3fa36bf264ebc1257b0a003ee8b8/\\$file/energieinfo_ee-und-das-ee-g-januar-2013.pdf](https://www.bdew.de/internet.nsf/id/17df3fa36bf264ebc1257b0a003ee8b8/$file/energieinfo_ee-und-das-ee-g-januar-2013.pdf).
- [236] BDEW Bundesverbans der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. Erneuerbare Energien und das EEG : Zahlen , Fakten , Grafiken (2017) 2017. [https://www.bdew.de/internet.nsf/res/86D8C4861B1E9D05C125815A0055BF85/\\$file/170710_Foliensatz Energie-Info_Erneuerbare Energien und das EEG \(2017\)_final.pdf](https://www.bdew.de/internet.nsf/res/86D8C4861B1E9D05C125815A0055BF85/$file/170710_Foliensatz%5CEnergie-Info%5Cerneuerbare%5CEnergien%5Cund%5Cdas%5CEEG%5C(2017)%5Cfinal.pdf).
- [237] BDEW Bundesverbans der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. Fast 1 , 5 Millionen Anlagen erzeugen Öko-Strom Öko. Anlage zur Presseinformation 2015. [https://www.bdew.de/internet.nsf/id/FEC1048098958F93C1257E430028B3A1/\\$file/150512_BDEW_ veröffentlicht_neue_Zahlen_zu_Erneuerbaren_Energien_Anlage_Tabelle.pdf](https://www.bdew.de/internet.nsf/id/FEC1048098958F93C1257E430028B3A1/$file/150512_BDEW_veroeffentlicht_neue_Zahlen_zu_Erneuerbaren_Energien_Anlage_Tabelle.pdf).

- [238] Statistisches Bundesamt. Land- und Forstwirtschaft, Fischerei - Wirtschaftsdünger, Stallhaltung, Weidehaltung - Landwirtschaftszählung/Agrarstrukturhebung 2010. Fachserie 3 Heft 6 n.d. https://www.destatis.de/GPStatistik/receive/DESerie_serie_00000022.
- [239] Statistisches Bundesamt. Land- und Forstwirtschaft , Fischerei. Geflügel. 2014. Fachserie 3 Reihe 4.2.3 2015. https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/LandForstwirtschaft/ViehbestandTierischeErzeugung/Gefluegel2030423147004.pdf?__blob=publicationFile.
- [240] Statistisches Bundesamt. Land- und Forstwirtschaft, Fischerei. Viehbestand, 3. November 2011, Fachserie 3 Reihe 4.1 n.d. https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/LandForstwirtschaft/ViehbestandTierischeErzeugung/Viehbestand2030410115324.pdf?__blob=publicationFile.
- [241] Statistisches Bundesamt. Datenbank Erhebung der Viehbestände (41311-0001) n.d. https://www-genesis.destatis.de/genesis/online/data;jsessionid=E008BD8EA2AA66F89E5E043742102B46.tomcat_GO_1_3?operation=abrufabelleAbrufen&selectionname=41311-0001&levelindex=1&levelid=1484768188900&index=1 (accessed January 18, 2017).
- [242] Statistisches Bundesamt. Landwirtschaftliche Betriebe mit Viehhaltung, Viehbestand. (411141-0004) n.d. https://www-genesis.destatis.de/genesis/online;jsessionid=4229453F17D07F3E37F97153ABFAF0F8.tomcat_GO_2_2?operation=previous&levelindex=2&levelid=1489066030019&step=2 (accessed March 9, 2017).
- [243] Statistisches Bundesamt. Tiere und tierische Erzeugnisse. Betriebe mit Einhufern und Einhuferbestand für März 2010 und März 2013 n.d. <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/LandForstwirtschaftFischerei/TiereundtierischeErzeugung/Tabellen/BetriebeEinhuferBestand.html> (accessed March 9, 2017).
- [244] Statistisches Bundesamt. Landwirtschaftszählung 2010. Weidehaltung von Rindern n.d. https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/LandForstwirtschaftFischerei/Landwirtschaftszaehlung2010/Tabellen/9_5_WeidehaltungRinder.html (accessed January 19, 2017).
- [245] Statistisches Bundesamt. Landwirtschaftszählung 2010. Weidehaltung von Milchkühen n.d. https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/LandForstwirtschaftFischerei/Landwirtschaftszaehlung2010/Tabellen/9_4_WeidehaltungMilchkuehe.html (accessed January 19, 2017).
- [246] Pein S. Arla bringt haltbare Weidemilch auf den Markt n.d. <https://www.topagrar.com/news/Rind-Rindernews-2318990.html> (accessed February 1, 2017).
- [247] Zühlsdorf A, Kühl S, Spiller A. Marketingtrend Weidemilch. *Mi* 2014;4–6.
- [248] Huber L. Qualitätstrends in der bayerischen Milchwirtschaft und ihre Perspektiven. *DMW Die Milchwirtschaft* 2015.
- [249] Bundesministerium für Landwirtschaft und Ernährung. Schweine n.d. http://www.bmel.de/DE/Tier/Nutztierhaltung/Schweine/schweine_node.html (accessed July 16, 2017).
- [250] Statistisches Bundesamt. Landwirtschaftszählung 2010. Weidehaltung von Schafen n.d. https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/LandForstwirtschaftFischerei/Landwirtschaftszaehlung2010/Tabellen/9_6_WeidehaltungSchafe.html (accessed January 19, 2017).
- [251] Gauly M, Moors E. Haltungsverfahren in der Schafhaltung 1999:1–9. https://www.ktbl.de/fileadmin/user_upload/artikel/Tierhaltung/Andere_Tiere/Schafe_Haltung/Schafhaltung.pdf.
- [252] Bohnenkemper O. Exkrementenanfall und -verwertung in der Eiererzeugung. *Landbauforsch - vTI Agric For Res* 2008;322:5.
- [253] Benning R, Börnecke S, Chemnitz C, Hansen-kuhn K, Holden P, Hudson U, et al. *Fleischatlas 2014* 2015:1–52.
- [254] Deutscher Bundestag. Sachstand. Statistiken zur Milcherzeugung n.d.

<https://www.bundestag.de/blob/422764/8be280ce9fb9c72069168911e3ee86ee/wd-5-028-16-pdf-data.pdf>.

- [255] Bio-markt.info. Bio-Eier haben einen Marktanteil von 9 %. n.d. http://bio-markt.info/kurzmeldungen/Bio-Eier_haben_Marktanteil_von_9_.html (accessed March 9, 2017).
- [256] Statistisches Bundesamt. Land- und Forstwirtschaft , Fischerei. Geflügel. 2015. Fachserie 3 Reihe 4.2.3 2017. https://www.destatis.de/GPStatistik/receive/DESerie_serie_00000051.
- [257] Statistisches Bundesamt. Land- und Forstwirtschaft , Fischerei. Geflügel. 2012. Fachserie 3 Reihe 4.2.3. 2013.
- [258] Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. Legehennenhaltung. Fragen und Antworten n.d. https://www.bmel.de/DE/Tier/Nutztierhaltung/_texte/HaltungLegehennen-Bioeier_FAQ_Tierschutz.html;jsessionid=85A8568B014F825EC41402613C41F8FC.2_cid296#doc3724080bodyText3 (accessed March 9, 2017).
- [259] Bundesministerium für Justiz. Verordnung über die Anwendung von Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung - DüV) 2012:24.
- [260] Bundesministerium für Justiz. Verordnung über die Anwendung von Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung - DüV) 2017:24.
- [261] Schultheiß U, Döhler H, Bach M. Festmistaußenlagerung. Kurat Für Tech Und Bauwes Der Landwirtschaft 2010:1–8.
- [262] Landwirtschaftskammer Niederösterreich. Ermittlung der 6monatigen Mindestlagermöglichkeit für Wirtschaftsdünger nach dem Aktionsprogramm Nitrat Erläuterungen : n.d.
- [263] Verband der Landwirtschaftskammern. Gülledaten Rinder n.d. <http://www.landwirtschaftskammern.de/pdf/guelledaten-rinder.pdf>.
- [264] Bayerische Landesanstalt Landwirtschaft. Rottemist und Jaucheanfall verschiedener Tierarten n.d. https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/iab/dateien/basisdaten_2013_6c.pdf.
- [265] Sommer M. Gestaltung und Größe von Dunglagern für Pferde n.d. <http://www.alb-bw.uni-hohenheim.de/2teOrdnung/FG-pdf-Dateien/2009/Sommer.pdf> (accessed March 9, 2017).
- [266] Natural Resources Conservation Service. Animal Manure Management n.d. https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/null/?cid=nrcs143_014211 (accessed March 9, 2017).
- [267] Landkreis Biberach. Merkblatt Gülle-Festmist-Jauche-Silagesickersaft-Gärreste. Gewässerschutz n.d. http://www.koeck-agrar.at/downloads/WD_Berechnung.pdf.
- [268] Staatliche Pflanzenbauberatung Rheinland-Pfalz. Staatliche Pflanzenbauberatung Wirtschaftsdünger ordnungsgemäß einsetzen n.d. [http://www.dlr.rlp.de/internet/global/themen.nsf/ALL/E134476FAD7067F0C125801E0025DA01/\\$FILE/3049_RLP-Merkblatt_Wirtschaftsduengereinsatz.pdf](http://www.dlr.rlp.de/internet/global/themen.nsf/ALL/E134476FAD7067F0C125801E0025DA01/$FILE/3049_RLP-Merkblatt_Wirtschaftsduengereinsatz.pdf).
- [269] Bayerische Landesanstalt Landwirtschaft. Biogasausbeuten verschiedener Substrate. Biogasausbeuten-Datenbank n.d. http://www.lfl.bayern.de/iba/energie/049711/?sel_list=51%2Cl&anker0=substratanker#substratanker (accessed March 8, 2017).
- [270] Sustainable Energy Authority Ireland. Gas Yields Table n.d.:9–11. http://www.seai.ie/Renewables/Bioenergy/Bioenergy_Technologies/Anaerobic_Digestion/The_Process_and_Techniques_of_Anaerobic_Digestion/Gas_Yields_Table.pdf.
- [271] Sierzputowski A. Biogaserträge - KTBL-Richtwerte auf dem Prüfstand 2012. http://www.eti-brandenburg.de/fileadmin/user_upload/downloads2012/21.11.2012_Biogas/03_Sierzputowski-Substrate.pdf.

- [272] Umweltbundesamt. Arbeitshilfe Biogasanlagen n.d. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/industriebzweige/biogasanlagen> (accessed March 9, 2017).
- [273] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe. Leitfaden - Biogas - Von der Gewinnung zur Nutzung. BiogasFnrDe 2013:247. http://mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/1/e/leitfadenbiogas2013_web_komp.pdf.
- [274] Institut für Hygiene und Umweltmedizin (RWTH Aachen). RiskAGuA - Risiken durch Abwässer aus der intensiven Tierhaltung für Grund- und Oberflächenwasser n.d. <http://riskagua.de/index.php?id=110> (accessed June 27, 2017).
- [275] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe. Biogas Stromerzeugung n.d. <https://biogas.fnr.de/nutzung/strom/> (accessed June 27, 2017).
- [276] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe. Faustzahlen Biogas n.d. <https://biogas.fnr.de/daten-und-fakten/faustzahlen/> (accessed July 11, 2017).
- [277] Ruhnau S, Fay P, Nowak W, Arthkamp J. BHKW-Kenndaten 2011. ASUE Arbeitsgemeinschaft Für Sparsamen Und Umweltfreundlichen Energieverbrauch eV 2011:1–64.
- [278] Dachs G, Rehm W. Der Eigenstromverbrauch von Biogasanlagen und Potenziale zu dessen Reduzierung 2006:1–42. <https://www.sev-bayern.de/content/bio-eigen.pdf>.
- [279] Zielbauer J, Gaida R, Knott G. Wärmenutzung bei Biogasanlagen. Schriftenr Der Sächsischen Landesanstalt Für Landwirtschaft 2007:44. <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/14152>.
- [280] Umweltbundesamt. Die Treibhausgase 2017. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgas-emissionen/die-treibhausgase> (accessed May 7, 2017).
- [281] Hoffman G, Wünsch C, Schnapke A, Schingnitz D, Baumann J, Brunn L, et al. Nutzung der Potenziale des biogenen Anteils im Abfall zur Energieerzeugung 2011. <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4116.pdf>.
- [282] Dehoust G, Gebhardt P, Gärtner S. Der Beitrag der thermischen Abfallbehandlung zu Klimaschutz, Luftreinhaltung und Ressourcenschonung 2002:65. <https://www.oeko.de/oekodoc/75/2002-013-de.pdf>.
- [283] AG Energiebilanzen e.V. Bruttostromerzeugung in Deutschland ab 1990 nach Energieträgern 2015:2015. http://www.ag-energiebilanzen.de/#20151112_brd_stromerzeugung1990-2014.
- [284] Icha P. Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990-2016 2017. <https://climate.nasa.gov/evidence/>.
- [285] Quicker P, Weber K. Biokohle. Herstellung, Eigenschaften und Verwendung von Biomassekarbonisaten. Wiesbaden: Springer Vieweg; 2016. doi:10.1007/978-3-658-03689-8.
- [286] Deutsche Bahn AG. Integrierter Bericht 2015 - Mehr Qualität, mehr Kunden, mehr Erfolg 2015:1–294. http://www.deutschebahn.com/file/de/2155664/jah93cDWNcoLOuvUYOdr7AWewMc/10948130/data/ib2015_dbkonzern.pdf.
- [287] Levihn F. CO2 emissions accounting: Whether, how, and when different allocation methods should be used. Energy 2014;68:811–8. doi:10.1016/j.energy.2014.01.098.
- [288] Pastowski A, Fishedick M, Arnold K, Bienge K, von Geibler J, Merten F, et al. Sozial-ökologische Bewertung der stationären energetischen Nutzung von importierten Biokraftstoffen am Beispiel von Palmöl 2007:1–235.
- [289] Gärtner S, Hienz G, Keller H, Müller-Lindenlauf M. Gesamtökologische Bewertung der Kaskadennutzung von Holz Umweltauswirkungen stofflicher und energetischer Holznutzungssysteme im Vergleich 2013:110.
- [290] Icha P. Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommixes in den Jahren 1990 bis 2016 2016. doi:10.1111/1467-8322.12302.

- [291] Klobasa M, Sensfuß F. CO₂-Minderung im Stromsektor durch den Einsatz erneuerbarer Energien im Jahr 2006 und 2007 – Gutachten –. Forschung 2009.
- [292] Pacher C. Nutzung der flexiblen Mechanismen des Kyoto-Protokolls zur Umsetzung von Reduktionsmaßnahmen klimarelevanter Treibhausgasemissionen in Müllverbrennungsanlagen. Dissertation. RWTH Aachen, 2015.
- [293] Grossklos M. Kumulierter Energieaufwand und CO₂-Emissionsfaktoren verschiedener Energieträger und – versorgungen 2014.
http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/werkzeuge/kea.pdf.
- [294] Herminghaus H. CO₂-Vergleich für die Gasheizung, Ölheizung, Wärmepumpe 2010. <http://www.co2-emissionen-vergleichen.de/Heizungsvergleich/CO2-Vergleich-Heizung.html> (accessed July 30, 2017).
- [295] IINAS Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien. GEMIS - Globales Emissions-Modell integrierter Systeme n.d. <http://iinas.org/gemis-de.html>.
- [296] Umweltbundesamt. Kohlendioxid-Emissionsfaktoren für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen 2016. <http://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/treibhausgas-emissionen> (accessed November 20, 2016).
- [297] Umweltbundesamt. Treibhausgas-Emissionen in Deutschland 2017.
<https://www.umweltbundesamt.de/daten/klimawandel/treibhausgas-emissionen-in-deutschland#textpart-1> (accessed August 6, 2017).
- [299] Eidgenössisches Departement für Umwelt Verkehr Energie und Kommunikation. Faktenblatt für den Umgang mit energie- und klimapolitischen Instrumenten 2017.
https://www.google.no/search?q=Faktenblatt+Abwärme+für+den+Umgang+mit+energie+und+klimapolitischen+Instrumenten&ie=utf-8&oe=utf-8&client=firefox-b&gfe_rd=cr&dcr=0&ei=edzjWcvzOYmDX_n0tfgK&gws_rd=cr.
- [300] Statistisches Bundesamt. Fachserie 1 Reihe 1.3, Bevölkerung und Erwerbstätigkeit - Bevölkerungsfortschreibung auf Grundlage des Zensus 2011, 2015 n.d.
- [301] Statistisches Bundesamt. Bevölkerung Deutschlands bis 2060, 13. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung 2015.
- [302] Statistisches Bundesamt. Bevölkerungsentwicklung bis 2060, Ergebnisse der 13. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung, aktualisierte Rechnung auf Basis 2015 2017.
- [303] Statistisches Bundesamt. Pressemitteilung vom 10.01.2017: Deutsche Wirtschaft im Jahr 2016 weiter auf Wachstumskurs 2017.
https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/2017/01/PD17_010_811.html, (accessed August 6, 2017).
- [304] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Strom 2030 2017.
<http://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/impulspapier-strom-2030.html>.
- [305] Bothe D. Mengennachweise der Dualen Systeme. Müll Und Abfall 2015;12:664 ff.
- [306] Umweltbundesamt. Trend Papiererzeugung, Papierverbrauch und Altpapierverbrauch n.d.
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/2_tab_papiererzeugung_2017-01-27.pdf (accessed August 6, 2017).
- [307] Albrecht W, Asam C, Schwitalia C, Breuer K. Recycling von WDVS – Dämmstoffen 2015.
- [308] Verordnung (EU) 2016/293 über persistente organische Schadstoffe (POP-Verordnung) der Kommission vom 1. März 2016, Nr. L 55, Seite 4, 2.3.2016 n.d.
- [309] Schubert M, Intraplan Consult GmbH. Verkehrsverflechtungsprognose 2030 2014;49:411.
- [310] Kraftfahrtbundesamt. Jahresbilanz des Fahrzeugbestands am 01. Januar 2017 2017.
https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/bestand_node.html (accessed August 6, 2017).
- [311] Verein Deutscher Zementwerke e.V. Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2002 2003.

<https://www.vdz-online.de/publikationen/umweltdaten/>.

- [312] Schlütersche Verlagsgesellschaft. Altreifenmenge bleibt laut GAVS konstant 2014. <http://www.gummibereifung.de/nachrichten/altreifenmenge-bleibt-laut-gavs-konstant> (accessed August 3, 2017).
- [313] Statista. Umsatz der Branche Herstellung von Zement in Deutschland von 2009 bis 2014 und Prognose bis zum Jahr 2020 (in Millionen Euro) n.d. <https://de.statista.com/prognosen/400225/herstellung-von-zement-in-deutschland---umsatzprognose> (accessed August 6, 2017).
- [314] Oerter M. Status quo und weitere Verwertungspotenziale in der Zementindustrie 2015.
- [315] Fritsche U, Gress H-W. Der nichterneuerbare kumulierte Energieverbrauch des deutschen Strommix im Jahr 2014 sowie Ausblicke auf 2015 und 2020 2015. http://www.iinas.org/tl_files/iinas/downloads/GEMIS/2015_KEV-Strom-2014_HEA.pdf.
- [316] Henning H-M, Palzer A. Was Kostet Die Energiewende? Wege Zur Transformation Des Deutschen Energiesystems Bis 2050 2015. https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/presseinformationen/2015/Fraunhofer-ISE_Transformation-Energiesystem-Deutschland_final_19_11.pdf.
- [317] Growitsch C, Baikowski M, Schwind H, Wagner J, Weiser F. Potentiale von Erdgas als CO₂-Vermeidungsoption. Studie des Energiewirtschaftlichen Instituts an der Universität zu Köln (EWI) 2014. http://www.ewi.research-scenarios.de/cms/wp-content/uploads/2015/12/2014-06-10_Studie_ERDGAS_als_CO2_Vermeidungsoption.pdf.
- [318] Durchführungsverordnung über Herkunftsnachweise für Strom aus erneuerbaren Energien (Herkunftsnachweis-Durchführungsverordnung – HkNDV, BGBl. I, S. 2147), geändert durch Artikel 20 des Gesetzes zur grundlegenden Reform des Erneuerbare-Energien-Gesetzes n.d.
- [319] Mühlenhoff J, Kajimura R, Boenigk N. Holzenergie in Deutschland, Status Quo und Potenziale. Renewes Spez 2014.
- [320] Statistisches Bundesamt. Erhebung zu Geflügel n.d. <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/LandForstwirtschaftFischerei/TiereundtierischeErzeugung/MethodischesGefluegel.html> (accessed January 19, 2017).
- [321] Statistisches Bundesamt. Land- und Forstwirtschaft, Fischerei. Geflügel 2013 2014;49:2–105. https://www.destatis.de/GPStatistik/receive/DESerie_serie_00000051.
- [322] Statistisches Bundesamt. Tiere und tierische Erzeugnisse. Betriebe mit Geflügel und Geflügelbestand für März 2010 bis März 2013 n.d. <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/LandForstwirtschaftFischerei/TiereundtierischeErzeugung/Tabellen/BetriebeGefluegelBestand.html> (accessed January 18, 2017).
- [323] Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung. Jeder Deutsche iss im Jahr rund 60 kg Fleisch 2015. <http://www.ble.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2015/150928-Fleisch.html> (accessed April 28, 2017).
- [324] Informationsgemeinschaft Deutsches Geflügel. Die Deutschen stehen auf Geflügel: Hähnchen & Co. werden immer beliebter. 2016. <https://www.gefluegel-charta.de/blog/blogdetail/news/gefluegelland-deutschland/> (accessed April 28, 2017).
- [325] Lechtenböhmer S, Nanning S, Hillebrant B, Buttermann H-G. Einsatz von Sekundärbrennstoffen 2006. [http://www.bvse.de/20/5755/VDZ:SteigenderEinsatzvonSekundärbrennstoffen\(Zugriff19.09.12\)](http://www.bvse.de/20/5755/VDZ:SteigenderEinsatzvonSekundärbrennstoffen(Zugriff19.09.12)).
- [326] Michael Lucht GS. Emissionshandel: Ökonomische Prinzipien, rechtliche Regelungen und technische Lösungen für den Klimaschutz. Springer; 2005.
- [327] Bilitewski B. Berechnung von CO₂-Vermeidungskosten für die Optimierung von Abfallverbrennungsanlagen. Thermische Abfallbehandlung, Band 11, 2006, p. 187–96.
- [328] Flamme S. Bericht über die Literaturrecherche zu biogenen Anteilen und Heizwerten in Altholz und Klärschlamm 2016.

https://www.itad.de/information/studien/20161219Bericht_iwaru_ITADBiogenerAnteilKlrschlammAltholz.pdf.

- [329] Umweltbundesamt. Wärmeverbrauch nach Energieträgern 2016.
<https://www.umweltbundesamt.de/energieverbrauch-fuer-waerme#textpart-1> (accessed July 30, 2017).
- [330] Fritsche U, Rausch L. Bestimmung spezifischer Treibhausgas-Emissionsfaktoren für Fernwärme 2008.
<https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3476.pdf>.
- [331] Mauch W, Corradini R, Wiesmeyer K, Schwentzek M. Allokationsmethoden für spezifische CO₂-Emissionen von Strom und Wärme aus KWK-Anlagen. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 2010;55:12–4.
- [332] VDI. Energiekenngrößen VDI 4661 2014.

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|----------------|--|----|
| Abbildung 3-1 | Müllverbrennungsanlagen in Deutschland | 19 |
| Abbildung 3-2 | In deutschen MVA zwischen 2012 und 2016 jährlich verbrannte Abfallmenge und die insgesamt verfügbare Verbrennungskapazität (Hochrechnung auf Basis Betreiberbefragung. Rücklaufquote: 92 % der Kapazität) | 22 |
| Abbildung 3-3 | Energieeinsatz und -erzeugung (Summe aus Strom, Wärme und Dampf) in deutschen MVA zwischen 2012 und 2016 (Hochrechnung auf Basis Betreiberbefragung. Rücklaufquote: 92 % der Kapazität) | 23 |
| Abbildung 3-4 | Elektrische und Gesamtnutzungsgrade deutscher MVA zwischen 2012 und 2016 (Hochrechnung auf Basis Betreiberbefragung; Rücklaufquote: 92 % der Kapazität) | 23 |
| Abbildung 3-5 | Ersatzbrennstoffkraftwerke in Deutschland | 26 |
| Abbildung 3-6 | In deutschen EBS-Kraftwerken zwischen 2012 und 2016 jährlich verbrannte Abfallmengen und die insgesamt verfügbare Verbrennungskapazität (Hochrechnung auf Basis einer Betreiberbefragung. Rücklaufquote: 39 % der Kapazität) | 27 |
| Abbildung 3-7 | Energieeinsatz, -bruttoerzeugung und Gesamtnutzungsgrad (Summe aus Strom, Wärme und Dampf) in deutschen EBS-Kraftwerken zwischen 2012 und 2016 (Hochrechnung auf Basis Betreiberbefragung. Rücklaufquote: 39 % der Kapazität) | 27 |
| Abbildung 3-8 | Überblick der Netto-Nutzungsgrade von EBS-Kraftwerken in Deutschland zwischen 2012 und 2016. Angegeben sind jeweils der Mittelwert sowie der Maximalwert des elektrischen und des Gesamtnutzungsgrades (Werte aus Betreiberbefragung) | 28 |
| Abbildung 3-9 | Verbrennungsanlagen für gefährliche Abfälle in Deutschland | 30 |
| Abbildung 3-10 | In Verbrennungsanlagen für gefährliche Abfälle In D zwischen 2012 und 2016 jährlich verbrannte Abfallmengen und insgesamt verfügbare Verbrennungskapazität (Hochrechnung auf Basis Betreiberbefragung. Rücklaufquote: 57 % der Kapazität) | 31 |
| Abbildung 3-11 | Energieeinsatz, -bruttoerzeugung und Gesamtnutzungsgrad (Summe Strom, Wärme, Dampf) in deutschen Verbrennungsanlagen für gefährliche Abfälle zwischen 2012 und 2016 (Hochrechnung auf Basis Betreiberbefragung. Rücklaufquote: 57 % der Kapazität) | 31 |
| Abbildung 3-12 | Überblick der Netto-Nutzungsgrade von Verbrennungsanlagen für gefährliche Abfälle in Deutschland zwischen 2012 und 2016. Angegeben ist jeweils der Bereich zwischen Minimal- und Maximalwert, sowie das arithmetische Mittel des Gesamtnutzungsgrades (Werte aus Betreiberbefragung) | 32 |
| Abbildung 3-13 | Anlagenanzahl und installierte elektrische Bruttoleistung EEG-fähige Biomasse-(H)KW (nach [79] – ohne Biomasse-Mitverbrennung und den nicht nach EEG vergüteten Anteil der | |

| | | |
|----------------|--|----|
| | Papier- und Zellstoffindustrie; Angaben basierend auf der Biomasse-(H)KW-Datenbank des DBFZ sowie Annahmen bzgl. des Zubaus an Holzvergaseranlagen [82])..... | 33 |
| Abbildung 3-14 | Linkes Bild: Jährlich in deutschen Altholzkraftwerken umgesetzte Brennstoffenergie und daraus pro Jahr erzeugte Menge an Strom und Wärme. Rechtes Bild: Altholzkraftwerke und ihre elektrische Leistung nach BAV [80,81]..... | 35 |
| Abbildung 3-15 | Altholzverbrennungsanlagen in Deutschland | 36 |
| Abbildung 3-16 | Klärschlammverbrennungsanlagen in Deutschland | 39 |
| Abbildung 3-17 | Abfalleinsatz in deutschen Zementwerken zwischen 2011 und 2015: Masse und Energie [140–144] | 41 |
| Abbildung 3-18 | Zementwerke in Deutschland | 42 |
| Abbildung 3-19 | Einsatz abfallstämmiger Brennstoffe in deutschen Zementwerken: Masse und Energie [140–144]..... | 43 |
| Abbildung 3-20 | Deutsche Kohlekraftwerke mit Genehmigung zur Abfallmitverbrennung | 45 |
| Abbildung 3-21 | Abfalleinsatz (Masse und Energie) in deutschen Kohlekraftwerken..... | 46 |
| Abbildung 3-22 | Jährlich in deutschen Kohlekraftwerken umgesetzte Brennstoffenergie aus Abfall und daraus pro Jahr erzeugte Menge an Strom und Wärme | 46 |
| Abbildung 3-23 | Jährlich in deutschen Industriekraftwerken aus Abfällen freigesetzte Brennstoffenergie und die daraus potenziell erzeugbare Menge an Strom und Wärme, bei angenommenen Nutzungsgraden von 25 % für Strom und 50 % für Wärme..... | 48 |
| Abbildung 3-24 | Industriekraftwerke | 49 |
| Abbildung 3-25 | Anlagen zur Biogaserzeugung aus biologischen Abfälle in Deutschland [170] | 50 |
| Abbildung 3-26 | Mechanisch-Biologische Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland | 56 |
| Abbildung 3-27 | Bewertung alternativer Verfahren für gemischte Siedlungsabfälle nach Aufwand und Nutzen [197] | 58 |
| Abbildung 3-28 | Einwohnerbezogene Mengenentwicklung für Hausmüll, Sperrmüll, Abfälle aus der Biotonne [198]..... | 59 |
| Abbildung 3-29 | Durchschnittliche Aufteilung der Inputmengen deutscher MBA-Anlagen [%] [196] | 60 |
| Abbildung 3-30 | Durchschnittliche Verteilung der Outputmengen deutscher MBA (links) und Abnehmer des Outputstroms „Energetische Verwertung“ (rechts; Angaben jeweils in %) [196] | 60 |
| Abbildung 3-31 | Entwicklung des Verpackungsverbrauchs privater Endverbraucher (alle Materialien) und BIP (verändert, nach [199])..... | 61 |

| | | |
|----------------|---|----|
| Abbildung 3-32 | Entwicklung der anfallenden Mengen an Marktabfällen, Park- und Gartenabfällen und Straßenkehricht 2008-2015 [199]..... | 61 |
| Abbildung 3-33 | Entwicklung der einwohnerbezogenen Menge an Hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen in Deutschland von 2008-2015 [198,200] | 62 |
| Abbildung 3-34 | Entwicklung der anfallenden Mengen an sonstigen Siedlungsabfällen 2008-2015 [198,200] | 63 |
| Abbildung 3-35 | Kommunale und industrielle Klärschlammengen, die für eine thermische Verwertung geeignet sind (* industrielle Schlämme, die deponiert werden, finden hier keine Berücksichtigung, da eine energetische Verwertung aufgrund zu geringer Heizwerte nicht infrage kommt) [138,139] | 64 |
| Abbildung 3-36 | Entwicklung Inputmengen Schredderleichtfraktion mit der Abfallschlüsselnummer 191203* und 191204 in Abfallbehandlungsanlagen gesamt und zur Thermischen Behandlung gemäß Destatis – Fachserie 19 [3–9] für die Jahre 2009 - 2015 | 65 |
| Abbildung 3-37 | Nutzungspfade von Altholz in Deutschland [207] | 67 |
| Abbildung 3-38 | Mengen an Rückständen (lutro) aus der deutschen Zellstoff- und Papierindustrie [211]..... | 67 |
| Abbildung 3-39 | Entwicklung des Verpackungsverbrauchs gewerblicher Endverbraucher (alle Materialien) und BIP [199] | 68 |
| Abbildung 3-40 | Übersicht Produktion, Verarbeitung, Verbrauch und Verwertung von Kunststoffen 2015 [212] | 69 |
| Abbildung 3-41 | Kunststoffabfallentsorgung in Deutschland 2015 im Überblick [212] | 69 |
| Abbildung 3-42 | Mengenentwicklung der Küchen- und Kantinenabfälle 2008 – 2015 nach [198]..... | 70 |
| Abbildung 3-43 | Übersicht zur Mengenentwicklung der gesammelten Altölmengen in Deutschland im Zeitraum 2001 – 2011 [214] | 71 |
| Abbildung 3-44 | Bauabfälle 2014 [Mio. Mg]. Gesamtanfall 202 Mio. Mg [210]..... | 72 |
| Abbildung 3-45 | Mengenentwicklung der Baustellenabfälle 2008 – 2014 [210] .. | 72 |
| Abbildung 3-46 | Mengenentwicklung gefährlicher Abfälle (ohne Sekundärabfälle) in Deutschland 2008 – 2015 [198] | 73 |
| Abbildung 3-47 | In deutschen Zementwerken eingesetzte Altreifen [140–144,215–226] | 73 |
| Abbildung 3-48 | Methanemissionen und gefasste Gasmengen aus Deponien [3,232,234–237] | 74 |
| Abbildung 3-49 | Allgemeine Vorgehensweise zur Bestimmung des Biogaspotentials..... | 75 |
| Abbildung 3-50 | Biogaspotenzial aus Tierexkrementen im Jahr 2014 | 75 |

| | | |
|----------------|--|-----|
| Abbildung 3-51 | Darstellung der in Deutschland anfallenden und behandelten Abfallströme mit energetisch nutzbaren Anteilen (Stoffströme mit vollständige inerten Materialien, wie Glas, Metall oder Mineralik, sind nicht berücksichtigt). Referenzjahr 2015 (*2014, **2016) .78 | |
| Abbildung 3-52 | Energie aus Abfall in Deutschland (Bezug 2015, soweit Daten verfügbar * Die Werte für Gülle sind nicht umgesetzt sondern beschreiben das Potenzial ** für MBA ist nur die Energieerzeugung durch Vergärung berücksichtigt) 80 | 80 |
| Abbildung 3-53 | Spezifische fossile CO ₂ -Emissionen der Stromerzeugung aus verschiedenen Energieträgern unter Berücksichtigung der Vorkette [285] 83 | 83 |
| Abbildung 3-54 | Anlagenspezifische CO ₂ -Emissionen der Energieerzeugung aus Abfällen, Allokation für KWK-Anlagen nach der Wirkungsgradmethode (Anlagen ohne KWK sind mit *gekennzeichnet)..... 87 | 87 |
| Abbildung 3-55 | Anlagenspezifische CO ₂ -Emissionen der Energieerzeugung aus Abfällen, Allokation für KWK-Anlagen nach der IEA-Methode (Anlagen ohne KWK mit * gekennzeichnet)..... 88 | 88 |
| Abbildung 4-1 | Überblick zur Ist-Entwicklung 2011-2015 und zu Prognosen der Bevölkerungsentwicklung nach Destatis, 2013-2030 (Bezug jeweils 31. Dezember des Jahres) [300–302]..... 93 | 93 |
| Abbildung 4-2 | Entwicklung des preisbereinigten Bruttoinlandproduktes in Deutschland im Zeitraum 2005-2016 [303]..... 94 | 94 |
| Abbildung 4-3 | Entwicklung und Prognose der installierten elektrischen Leistung von Anlagen zur Verstromung fester Biomasse bei Stilllegung der Anlagen nach Auslaufen des Förderzeitraumes [82] 99 | 99 |
| Abbildung 4-4 | Prognose der in Deutschland anfallenden und behandelten Abfallströme mit energetisch nutzbaren Anteilen im Jahr 2030 (Stoffströme mit vollständige inerten Materialien, wie Glas, Metall oder Mineralik, sind nicht berücksichtigt) 103 | 103 |
| Abbildung 4-5 | Energie aus Abfall in Deutschland: Prognose für 2030 verfügbar (* Die Werte für Gülle sind nicht umgesetzt sondern beschreiben das Potenzial ** für MBA ist nur die Energieerzeugung durch Vergärung berücksichtigt) 106 | 106 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|--------------|--|----|
| Tabelle 3-1 | Müllverbrennungsanlagen in Deutschland (fehlende Werte wurden vom Betreiber nicht angegeben und/oder konnten nicht recherchiert werden) [18–32]..... | 19 |
| Tabelle 3-2 | Ersatzbrennstoffkraftwerke in Deutschland ([18,32,35–59]; es sind die Gesamtkapazitäten angegeben. Einige Anlagen verwerten neben EBS auch weitere Brennstoffe, wie z.B. Papierschlämme. | 24 |
| Tabelle 3-3 | Anlagen zur Verbrennung gefährlicher Abfälle (Sonderabfälle) in Deutschland [32,60–78]..... | 28 |
| Tabelle 3-4 | Anlagen zur Altholzverbrennung mit einer Feuerungswärmeleistung > 20 MW in Deutschland (fehlende Werte konnten nicht recherchiert werden) [83–135]..... | 33 |
| Tabelle 3-5 | Anlagen zur Monoklärschlammverbrennung in Deutschland [137] | 37 |
| Tabelle 3-6 | Deutsche Zement- und Kalkwerke mit der Genehmigung zur energetischen Verwertung von Abfallfraktionen [145]..... | 40 |
| Tabelle 3-7 | Deutsche Kohlekraftwerke mit Genehmigung zur Abfallmitverbrennung [89,148–155]..... | 43 |
| Tabelle 3-8 | Industriekraftwerke mit der Genehmigung zur Verbrennung von Abfällen [83,89,90,94,156–169]..... | 47 |
| Tabelle 3-9 | Anlagen zur Vergärung von abfallstämmigen Biomassen in Deutschland [170] | 51 |
| Tabelle 3-10 | MBA-Anlagen zur mechanisch-biologischen Abfallbehandlung [171–196]..... | 54 |
| Tabelle 3-11 | Verordnung über Anforderungen an die Verwertung und Beseitigung von Altholz (Altholzverordnung - AltholzV) - § 2 Begriffsbestimmungen..... | 66 |
| Tabelle 3-12 | „Sonstige Kunststoffabfälle“ (eigene Berechnung auf Basis der Zahlen von [212])..... | 70 |
| Tabelle 3-13 | Darstellung der in Deutschland anfallenden und behandelten Abfallströme mit energetisch nutzbaren Anteilen [Mg] (Stoffströme mit vollständige inerten Materialien, wie Glas, Metall oder Mineralik, sind nicht berücksichtigt). Referenzjahr 2015 (*2014, **2016)..... | 77 |
| Tabelle 3-14 | Energie aus Abfall in Deutschland: Überblick und Zusammenfassung (Bezug 2015, soweit Daten verfügbar, inklusive Importanteil) | 79 |
| Tabelle 3-15 | Vergleichswerte für spezifische CO ₂ -Emissionen der Stromerzeugung des Jahres 2015..... | 84 |
| Tabelle 3-16 | Vergleichswerte für spezifische CO ₂ -Emissionen der Wärmeerzeugung des Jahres 2015 | 85 |

| | | |
|--------------|--|-----|
| Tabelle 3-17 | Brennstoffmixspezifische CO ₂ -Emissionen sowie durchschnittliche Wirkungsgrade der verschiedenen Anlagentypen | 87 |
| Tabelle 3-18 | CO ₂ -Einsparung durch Energieerzeugung aus Abfällen im Jahr 2015 [in 1000 Mg CO ₂] | 89 |
| Tabelle 4-1 | Vergleich der Annahmen für die Variante 2-A im Vergleich zur Variante 2 der aktualisierten 13. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung mit dem Basisjahr 2015 nach Destatis [302] | 91 |
| Tabelle 4-2 | Überblick zur Ist-Entwicklung 2011-2015 und zu Prognosen der Bevölkerungsentwicklung nach Destatis bis 2013 - 2030 [300–302] | 92 |
| Tabelle 4-3 | Prognose der in Deutschland anfallenden und behandelten Abfallströme mit energetisch nutzbaren Anteilen im Jahr 2030 (vollständig inerte Stoffströme nicht berücksichtigt. * Der Wert für „Sonstige Produktions- und Gewerbeabfälle zur energetischen Verwertung“ wurde unverändert aus der Abschätzung für 2015 übernommen) Einheit: [Mg] | 103 |
| Tabelle 4-4: | Energie aus Abfall in Deutschland: Prognose für 2030 | 105 |
| Tabelle 4-5: | CO ₂ -Einsparung durch Energieerzeugung aus Abfällen im Jahr 2030 [in 1000 Mg CO ₂] | 107 |