

**Energieversorgung und
Entsorgungswirtschaft im Kontext
der Bioökonomie im Mitteldeutschen
Revier und im Lausitzer Revier**

Sektorstudie

IMPRESSUM

Herausgeber:

DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH

Kontakt:

DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH

Torgauer Straße 116

04347 Leipzig

Tel. +49 (0)341 2434-112

E-Mail: info@dbfz.de

www.dbfz.de

Geschäftsführung:

Prof. Dr. mont. Michael Nelles (wiss. Geschäftsführer)

Dr. Christoph Krukenkamp (admin. Geschäftsführer)

Das dieser Sektorstudie zugrunde liegende FE-Vorhaben „Modellregionen Bioökonomie im Mitteldeutschen Revier und im Lausitzer Revier (MoreBio)“ wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) unter dem Kennzeichen A STAB 19-185 durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autor*innen.

Autorin:

Karoline Fürst

Zitierempfehlung:

Fürst, Karoline (2023): *Energieversorgung und Ernährungswirtschaft im Kontext der Bioökonomie im Mitteldeutschen Revier und im Lausitzer Revier. Seminararbeit im Rahmen des MoreBio Projekts.* DBFZ - Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH. Leipzig.

Inhalt

| | |
|--|-----------|
| 1. Einleitung | 4 |
| 2. Energieversorgung | 5 |
| 2.1 Vorbemerkungen | 5 |
| 2.2 Installierte Leistung und Verbrauch | 9 |
| 2.3 Biomasse für die Energiebereitstellung | 12 |
| 3. Entsorgungswirtschaft | 17 |
| 3.1 Vorbemerkungen | 17 |
| 3.2 Aufkommen (Rest- und Abfallstoffe sowie Nebenprodukte) | 21 |
| 3.3 Verwertung und Rückgewinnung von Sekundärrohstoffen | 25 |
| 4. Zusammenfassung und Ausblick | 29 |
| Literaturverzeichnis | 31 |
| Anhang | 36 |

1. Einleitung

Ziel der Kurzstudie zur Energieversorgung und Entsorgungswirtschaft im Kontext der Bioökonomie im Lausitzer und im Mitteldeutschen Revier ist es, die grundlegenden Strukturen, Chancen, Herausforderungen sowie Innovationsansätze dieser Branchen herauszuarbeiten. Betrachtet werden die Branchen, die in den Revieren eine hohe Bedeutung der Beschäftigung aufweisen und eine regionale Besonderheit darstellen – im Folgenden als „Potenzialbranchen“ bezeichnet. Dafür werden jeweils wesentliche Akteure identifiziert, die Rohstoffbasis erfasst sowie neue, innovative Methoden und Ansätze im Kontext der Bioökonomie abgebildet. Nach der Einleitung wird in Kapitel 2 die Branche der Energieversorgung mit Fokus auf das Thema Bioenergie beleuchtet. Kapitel 3 beschreibt die Entsorgungswirtschaft hinsichtlich des Abfallaufkommens und Verwertungsoptionen zur Rückgewinnung von Sekundärrohstoffen. Die Kurzstudie schließt in Kapitel 4 mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick.

Kern der Kurzstudie ist die Analyse der Energieversorgung und Entsorgungswirtschaft als sogenannte „Potenzialbranchen“. Die Erfassung der Potenzialbranchen beruht auf Ergebnissen, die in der Studie „Beschäftigungsstrukturen und Potenziale der Bioökonomie in den deutschen Braunkohlerevieren“ (Brödner et al. 2021) veröffentlicht sind. Potenzialbranchen sind demnach biobasierte Branchen, die regional von hoher Beschäftigungsbedeutung sind und/oder eine regionale Besonderheit darstellen. Ihre Entwicklung und Stärkung kann ein wichtiger Bestandteil der regionalen Entwicklungspfade der Bioökonomie in den Revieren sein.

Die inhaltliche Abgrenzung der Energieversorgung und Entsorgungswirtschaft orientiert sich an der Einordnung gemäß der Wirtschaftszweigklassifikation (2008) des Statistischen Bundesamtes. Berücksichtigt werden die Abteilungen D 35 „Energieversorgung“ und E 38 „Sammlung, Behandlung und Beseitigung von Abfällen; Rückgewinnung“. Die relevanten Potenzialbranchen im Mitteldeutschen Revier sind die Gasversorgung (D 35.2) und Abfallsammlung, -beseitigung, Rückgewinnung (E 38). Im Lausitzer Revier ist die Elektrizitätsversorgung (D 35.1) eine Potenzialbranche.

Die einzelnen Branchen der Energieversorgung und Entsorgungswirtschaft sind Bestandteil der Bioökonomie. Die vorliegende Studie orientiert sich an der Definition der Bunderegierung, die im Rahmen der Nationalen Bioökonomiestrategie ein systemisches Verständnis zugrunde legt (Bunderegierung 2020). Demnach umfasst die Bioökonomie die Erzeugung, Erschließung und Nutzung biologischer Ressourcen, um im Rahmen eines zukunftsfähigen, kreislauforientierten Wirtschaftssystems Produkte, Verfahren und Dienstleistungen in allen wirtschaftlichen Sektoren bereitzustellen. Die betrachteten Branchen können anteilig der Bioökonomie zugeordnet werden (Tabelle 1). Im Zuge der Entwicklung hin zu einer klimaneutralen Wirtschaftsweise steigt auch die Bedeutung biologischer Verfahren und Energieträger, das Recycling und die Kreislaufführung von Stoffen.

| Branche | Anteil Bioökonomie |
|---|--------------------|
| Energieversorgung D 35 | 10 – 20 % |
| Elektrizitätsversorgung (D 35.1) | 9,1 % |
| Gasversorgung (D 35.2) | 94,3 % |
| Abfallsammlung, -beseitigung, Rückgewinnung E 38 | 30 % |

Tabelle 1: Anteile der Branchen Energieversorgung, Wasserversorgung und Entsorgung an der Bioökonomie.
Quelle: Brödner et al. 2021.

2. Energieversorgung

2.1. Vorbemerkungen

Zur Energieerzeugung werden Energieträger in thermische oder elektrische Energie umgewandelt. Primärenergie kann aus fossilen Energieträgern wie Steinkohle, Braunkohle, Erdgas und Erdöl generiert werden. Zudem kann sie aus regenerativen Quellen stammen, wie z.B. aus Sonnenstrahlung, Biomasse, Wind, Wasser, Wellen, Meeresströmung oder Geothermie. Im zweiten Umwandlungsschritt entsteht aus der Primärenergie die sogenannte Sekundärenergie. Dazu gehören Strom oder Fernwärme, aber auch Kohlebriketts oder Kraftstoffe. Dieser Umwandlungsprozess muss möglichst effektiv ablaufen, um Energieverluste zu minimieren. Ein Beispiel dafür sind Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen, in denen auch die Abwärme zur Energiegewinnung genutzt wird. Die Energie, die nach dem Transport der Sekundärenergie beim Verbraucher ankommt, wird als Endenergie bezeichnet. Auch hier sind mit Blick auf die Effizienz Verluste möglichst gering zu halten, jedoch kaum vollständig zu vermeiden (Umweltbundesamt 2022b).



Effizienzverluste spielen eine wichtige Rolle bei der Energieversorgung.

Risikant für die Sicherheit der Energieversorgung ist die Importabhängigkeit von Energieträgern wie Erdöl und Erdgas im Hinblick auf aktuelle internationale Krisen. Seit Herbst 2021 sind aufgrund der erhöhten Energienachfrage am Ende der COVID-19-Krise steigende Energiepreise zu beobachten. Ab Februar 2022 verschärfte der Krieg in der Ukraine diese Entwicklung.

Neben Erdöl und Erdgas ist die Kohle seit der Industrialisierung fossiler Hauptenergieträger in der Europäischen Union (EU). So wie die Kohle den wirtschaftlichen Aufschwung Europas maßgeblich förderte, ist sie auch Treiberin der Klimakrise. Der technologische Wandel hat dazu geführt, dass Energieträger wie Wind- und Sonnenenergie, Biomasse und Wasserkraft wettbewerbsfähig und umweltverträglicher sind. Sie verhelfen dazu, die klimapolitischen Ziele der EU zu erreichen. Spätestens mit dem im Jahr 2019 vorgestellten Green Deal hat die Europäische Kommission die Weichen für eine klimaneutrale Wirtschaft bis zum Jahr 2050 gestellt. Um dieses Ziel zu erreichen, ist ein kontrollierter Ausstieg aus der Stein- und Braunkohleverstromung notwendig.

Vor dem Hintergrund des bevorstehenden Ausstiegs aus der Kohleverstromung kann der Bioökonomie eine Schlüsselrolle für die Transformation der Braunkohlereviere Mitteldeutschland und der Lausitz zukommen. Die Bioökonomie gilt als zentrales Zukunfts- und Innovationsfeld, das ökologische und ökonomische Entwicklungen miteinander in Einklang bringt. Ihr Ausbau ist grundlegend für den Übergang von einem fossilbasierten hin zu einem biobasierten, nachhaltigen und an natürlichen Stoffkreisläufen orientierten Wirtschaftssystem. Für das Mitteldeutsche und das Lausitzer Revier ergeben sich dadurch vielfältige Optionen, ihre wirtschaftliche Basis nachhaltig zu transformieren und eine biobasierte Wirtschaft strategisch zu forcieren. Grundlage für nachhaltige, industrielle Prozesse zur Herstellung umweltfreundlicher Güter ist die Bereitstellung von Energie aus erneuerbaren Quellen. Dieser Baustein ist entscheidend zur Etablierung der Bioökonomie.

Die Verfügbarkeit von Solar- und Windenergie ist an lokale Wetterbedingungen geknüpft. Deshalb sind Energieträger von Bedeutung, die auch während einer Flaute oder Dunkelheit Strom und Wärme liefern, wie z.B. Biomasse. Wenn Biomasse in elektrische oder thermische Energie oder Kraftstoffe umgesetzt wird, entsteht Bioenergie. Bei diesen Oxidationsprozessen wird die in der Bio-

masse gespeicherte Sonnenenergie der Photosynthese wieder freigesetzt. Wichtige Beispiele für Bioenergieträger sind Holz, Agrarrohstoffe wie Mais oder Weizen sowie organische Rest- und Abfallstoffe wie Stroh oder Gülle. Im Hinblick auf die Endlichkeit fossiler Brennstoffe und die Abhängigkeit vom internationalen Rohstoffmarkt rückt Bioenergie in den Fokus der nachhaltigen Energieerzeugung. In Deutschland fördert das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) den Ausbau der Bioenergie (Umweltbundesamt 2022d).

Gemäß der Klassifikation der Wirtschaftszweige (Ausgabe 2008) ist die Energieversorgung im Abschnitt D zu finden, wie Tabelle 2: zeigt. Darin sind die Abteilungen Elektrizitäts-, Gas-, Wärme- und Kälteversorgung inbegriffen. Unter diesen Abschnitt fallen der Betrieb und die Überwachung von Anlagen, die Elektrizität oder Gas erzeugen und verteilen. Eingeschlossen sind u.a. Stromerzeugungsanlagen, also fossilthermische Kraftwerke, Kernkraft-, Gasturbinen- und Dieselmotorkraftwerke sowie mit erneuerbaren Energieträgern wie Wind-, Wasserkraft oder Sonnenenergie betriebene Kraftwerke. Zur Gaserzeugung werden verschiedene Prozesse genutzt wie die Verkokung von Kohle, die Gaserzeugung aus landwirtschaftlichen Nebenerzeugnissen oder aus Reststoffen. Inbegriffen sind auch die Erzeugung bzw. Verteilung von Synthesegas und von Erdgas. Außerdem umfasst die Abteilung Energieversorgung die Gruppe Wärme- und Kälteversorgung. Dazu zählt z.B. die Erzeugung, Sammlung und Verteilung von Dampf und Warmwasser zum Heizen, zur Energiegewinnung und zu anderen Zwecken.

| Abteilung | Gruppe | Klasse | Unterklasse | |
|--|-------------------|--------|-------------|---|
| ABSCHNITT D – Energieversorgung | | | | |
| 35 | Energieversorgung | | | |
| | 35.1 | | | Elektrizitätsversorgung |
| | | 35.11 | | Elektrizitätserzeugung |
| | | | 35.11.1 | Elektrizitätserzeugung ohne Verteilung |
| | | | 35.11.2 | Elektrizitätserzeugung mit Fremdbezug zur Verteilung |
| | | | 35.11.3 | Elektrizitätserzeugung ohne Fremdbezug zur Verteilung |
| | | 35.12 | | Elektrizitätsübertragung |
| | | 35.13 | | Elektrizitätsverteilung |
| | | 35.14 | | Elektrizitätshandel |
| | 35.2 | | | Gasversorgung |
| | | 35.21 | | Gaserzeugung |
| | | | 35.12.1 | Gaserzeugung ohne Verteilung |
| | | | 35.12.2 | Gaserzeugung mit Fremdbezug zur Verteilung |
| | | | 35.12.3 | Gaserzeugung ohne Fremdbezug zur Verteilung |
| | | 35.22 | | Gasverteilung durch Rohrleitungen |
| | | 35.23 | | Gashandel durch Rohrleitungen |
| | 35.3 | | | Wärme- und Kälteversorgung |

Tabelle 2: Klassifikation der Wirtschaftszweige (2008) für die Energieversorgung. Quelle: Eigene Darstellung.

Wirtschaftliche Bedeutung

In Deutschland zählt die Energiewirtschaft zu den bedeutenden Industriezweigen. Die Beschäftigung lag 2020 bei etwa 258.000 Personen. 2019 erzielten knapp 95.000 Unternehmen einen Umsatz von 375,8 Mrd. Euro. Die Elektrizitätsversorgung trug dazu in hohem Maße bei: Hier waren 2019 fast 90.000 umsatzsteuerpflichtige Unternehmen tätig und der steuerbare Umsatz lag bei 332,5 Mrd. Euro. Mit 222.800 Personen waren 2020 knapp 0,7 Prozent der Gesamtbeschäftigten in Deutschland in dieser Branche tätig. Der Anteil der Gasversorgung an der Gesamtbeschäftigung lag hingegen mit rund 26.000 Beschäftigten bei gerade einmal 0,08 Prozent. In ca. 3.000 Unternehmen wurde ein Umsatz von 37,5 Mrd. Euro erwirtschaftet.

Im Lausitzer Revier zählt die Elektrizitätsversorgung zu den Potenzialbranchen. Im Vergleich zu den Ostdeutschen Flächenländern wurde ein Lokalisationskoeffizient von 1,83 festgestellt. Der Sektor ist also im Lausitzer Revier überdurchschnittlich stark vertreten, sodass hier eine Spezialisierung im Hinblick auf die Elektrizitätsversorgung vorliegt. Insgesamt waren im Lausitzer Revier 4.800 Personen im Jahr 2020 beschäftigt (Tabelle 3). Dies entspricht 0,87 Prozent der Gesamtbeschäftigung im Lausitzer Revier, liegt also etwas höher als für das gesamte Bundesgebiet. Die Entwicklung der Beschäftigung im Lausitzer Revier ist seit 2007 auf konstantem Niveau geblieben. 2019 wurden 518 Unternehmen gezählt, die einen Umsatz von 2,2 Mio. Euro erwirtschafteten.

| Elektrizitätsversorgung: Potenzialbranche im Lausitzer Revier | | |
|---|------------------|------------------------|
| | Lausitzer Revier | Mitteldeutsches Revier |
| umsatzsteuerpflichtige Unternehmen (2019) | 518 | 929 |
| sozialversicherungspflichtig Beschäftigte (2020) | 4.800 | 4.700 |
| steuerbarer Umsatz in Mio. Euro (2019) | 2.216,9 | 5.854,4 |
| Lokalisationskoeffizient (2020) | 1,83 | 0,95 |

Tabelle 3: Wirtschaftliche Kennzahlen der Branche Elektrizitätsversorgung.

Quelle: Statistische Ämter des Bundes und der Länder, Bundesagentur für Arbeit 2021; Brödner et al. 2021.

Die Gasversorgung hat sich im Mitteldeutschen Revier als bedeutsam herausgestellt. Im Vergleich zu den Ostdeutschen Flächenländern wurde ein Lokalisationskoeffizient von 1,64 festgestellt, was auf eine überproportionale Relevanz hindeutet. Insgesamt waren im Jahr 2020 1.300 Personen in der Gasversorgung beschäftigt (Tabelle 4). Der Anteil an der Gesamtbeschäftigung in Mitteldeutschland liegt damit bei 0,17 Prozent. Dieser Anteil ist im Vergleich zu Gesamtdeutschland etwa doppelt so hoch. Jedoch ist die Beschäftigung in Mitteldeutschland seit 2007 leicht zurückgegangen (-7,5%). Im Jahr 2019 waren 40 Unternehmen tätig. Der Umsatz lag bei 7,4 Mio. Euro.

| Gasversorgung: Potenzialbranche im Mitteldeutschen Revier | | |
|---|------------------|------------------------|
| | Lausitzer Revier | Mitteldeutsches Revier |
| umsatzsteuerpflichtige Unternehmen (2019) | 23 | 40 |
| sozialversicherungspflichtig Beschäftigte (2020) | 300 | 1.300 |
| steuerbarer Umsatz in Mio. Euro (2019) | 110,6 | 7.413,1 |
| Lokalisationskoeffizient (2020) | 0,60 | 1,64 |

Tabelle 4: Wirtschaftliche Kennzahlen der Branche Gasversorgung.

Quelle: Statistische Ämter des Bundes und der Länder, Bundesagentur für Arbeit 2021; Brödner et al. 2021.

Zentrale Akteure in der Energiebranche sind Stromerzeuger, Energieversorger, Netz- und Speicherbetreiber sowie aus dem Anlagen- und Systembau. Zu den fünf großen Stromerzeugungsunternehmen in Deutschland zählen RWE AG, EnBW AG, E.ON SE, Vattenfall AB sowie die LEAG AG. In Summe wurden im Jahr 2020 65 Prozent des deutschen Strombedarfs von diesen Unternehmen gedeckt. Noch immer herrschen die fossilen Energieträger Gas und Braunkohle vor. Doch die Einspeisung erneuerbarer Energien durch neue Anbieter steigt. Neben dem Anstieg der Stromimporte, sinkt daher der Marktanteil dieser großen fünf Unternehmen. Erneuerbare Energien hatten 2020 einen Anteil am Bruttostromverbrauch von 45 Prozent, was einem Zuwachs um 7,7 Terrawattstunden (TWh) im Vergleich zum Vorjahr entspricht. Die deutschlandweite Nettostromerzeugung lag 2020 bei 530,7 TWh (Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen und Bundeskartellamt 2022).

Energieversorgungsbetriebe sind Unternehmen, die elektrische Energie, Gas und Fernwärme über ein öffentliches Netz verteilen. Auf dem Energieversorgungsmarkt befassen sich insbesondere die Stadt- und Gemeindewerke mit der Versorgung mit Elektrizität, Gas und Wärme. In der Regel befinden sich diese kommunalen Unternehmen in öffentlicher Hand. Zusätzlich agieren private Energieversorger. Zu den umsatzstärksten Unternehmen in Deutschland zählen die genannten Firmen aus der Stromerzeugung: RWE AG, EnBW AG, E.ON SE und Vattenfall AB. Diese können auch Voll- oder Mehrheitseigentümer der kommunalen Energieversorger sein. Beispielsweise ist die E.ON SE Mehrheitseigentümer der Unternehmensgruppe Envia Mitteldeutsche Energie AG (Chemnitz). Envia Mitteldeutschland ist auf dem Energiemarkt im Osten Deutschlands führend und ihrerseits an knapp 70 Gesellschaften beteiligt, darunter an 26 kommunalen Energieversorgungsunternehmen. Zur Gruppe Envia Mitteldeutschland zählen z.B. die Mitteldeutsche Netzgesellschaft Strom mbH (Halle/Saale), envia THERM GmbH (Bitterfeld-Wolfen) und MITGAS Mitteldeutsche Gasversorgung GmbH (Halle/Saale) (envia Mitteldeutsche Energie AG 2022). In Sachsen stellt die Firma Vattenfall SE einen Großteil der Grundversorgung. In Sachsen-Anhalt agieren z.B. die InfraLeuna GmbH und GETEC GmbH aus Magdeburg als wichtige Energieerzeugungsunternehmen. Das Unternehmen DAH Biomethan GmbH widmet sich der Biomethanherzeugung in Teutschenthal. In Thüringen ist die TEAG Thüringer Energie AG ein wichtiges Unternehmen zur Energiebereitstellung, das Privathaushalte, Stadtwerke, Geschäftskunden und Industriebetriebe beliefert. Wichtige Unternehmen zur Energie- und Gaserzeugung sowie -verteilung sind in Brandenburg die Lausitz Energie Kraftwerke AG aus Cottbus, Naturwind Potsdam GmbH und EMB Energie Mark Brandenburg GmbH aus Michendorf im Landkreis Potsdam-Mittelmark. Daneben widmen sich zahlreiche kleinere Unternehmen im Bereich der Photovoltaik der Energiebereitstellung.

Die Unternehmen der Energiebranche sehen sich verschiedenen Trends und Herausforderungen gegenüber. Zur Verringerung der Abhängigkeit von volatilen internationalen Märkten soll der Einsatz erneuerbarer Energien und damit die Regionalisierung von Energieträgern vorangetrieben werden. Nicht nur deshalb ergeben sich Wachstumschancen für die Energiebranche, die sich vornehmlich auf die „Energiewende“ beziehen. Der Ausbau der erneuerbaren Energien zählt zu den zentralen Trends der Energiebranche, da er zur Emissionsminderung beiträgt und damit dem Klimawandel entgegenwirkt. Dies betrifft insbesondere die Wind- und Solarenergie, aber auch die Bioenergie. Politische Vorgaben müssen weiterhin den Rahmen für deren Ausbau verbessern. Dazu beitragen können auch fortschrittliche Technologien zur Digitalisierung z.B. intelligente Energiespeichersysteme, „SmartGrid“ und virtuelle Kraftwerke. Zum Schutz dieser kritischen Infrastrukturen sind darüber hinaus umfangreiche Sicherungssysteme notwendig (Sparkassen-Finanzportal GmbH 2021a).

Herausfordernd ist die Sicherung der Energiebereitstellung, sowohl im Sinne fehlender Rohstofflieferungen als auch hinsichtlich des Ausbaus der erneuerbaren Energien. Die Ausbauziele für Windkraftanlagen an Land und zur See sowie für die Photovoltaik sind noch immer gering (Sparkassen-Finanzportal GmbH 2021b). Um die Ziele bis 2030 zu erreichen, müssen pro Jahr rund 1.500 neue Windräder an Land errichtet werden. 2020 sind in Deutschland rund 770 Windräder genehmigt worden (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft 2021). In Sachsen-Anhalt wurden 2015 noch 100 neue Windkraftanlagen errichtet, 2019 waren es nur noch 15 (Falkner 2021).

2.2. Installierte Leistung und Verbrauch

Die Netto-Nennleistung¹ der in Deutschland installierten Kraftwerke lag 2021 bei insgesamt 232 Gigawatt (GW), wie in Abbildung 1 und Abbildung 2 zu sehen ist. Davon entfielen 138,6 GW (also knapp 60%) auf Anlagen, die erneuerbare Energieträger nutzen. Den größten Anteil hatten solare Strahlungsenergie (Photovoltaik) und On-shore-Windkraftanlagen. Biomassekraftwerke machten eine installierte Nennleistung von 9,5 GW aus und trugen damit zu etwa 4 Prozent der gesamten Erzeugungsleistung bei (Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen und Bundeskartellamt 2022).

In Sachsen, Brandenburg und Sachsen-Anhalt entfielen im Jahr 2021 umfangreiche Anteile der „installierten Netto-Nennleistung“ auf den Energieträger Braunkohle.²

In Prozenten ausgedrückt, betrug die potenzielle Stromerzeugung durch Braunkohle in Sachsen 42 Prozent, in Brandenburg 24 Prozent und in Sachsen-Anhalt ca. 10 Prozent (Abbildung 2). Damit decken die drei Bundesländer knapp die Hälfte der bundesweiten installierten Braunkohle-Netto-Nennleistung ab. Auf nationaler Ebene entfallen laut Bundesnetzagentur etwa 12 Prozent der installierten Nettonennleistung auf die Braunkohle (Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen und Bundeskartellamt 2022). Hinsichtlich des Braunkohleausstiegs ergeben sich Herausforderungen in der Versorgungssicherung.

In Bezug auf Wind- und Solarenergie weisen Sachsen-Anhalt und Brandenburg deutlich höhere Anteile installierter Netto-Nennleistung auf als Sachsen und Thüringen. Mit einem Anteil von ca. 46 Prozent des Energieträgers Wind und 26 Prozent Solarenergie finden sich in Sachsen-Anhalt die höchsten Anteile. Brandenburg kommt bei Wind- auf ca. 41 Prozent und Solarenergie auf 23 Prozent, gefolgt von Thüringen mit etwa 28,7 Prozent Windenergie und 30,4 Prozent Solarenergie. Der Freistaat Sachsen bildet mit einem Anteil von 12 Prozent Wind- und 22,0 Prozent Solarenergie das Schlusslicht der Betrachtung. In Thüringen stammen etwa 26 Prozent der erzeugten Leistung aus Pumpspeichern. Damit liegt Thüringen deutlich über dem bundesweiten Anteil von ca. 5 Prozent. Thüringen ist Standort des größten Pumpspeicherwerkes Deutschlands in Goldisthal (1.060 MW) (Vattenfall 2022a). In Sachsen ist der Anteil an Energie aus Pumpspeichern mit etwa 11 Pro-

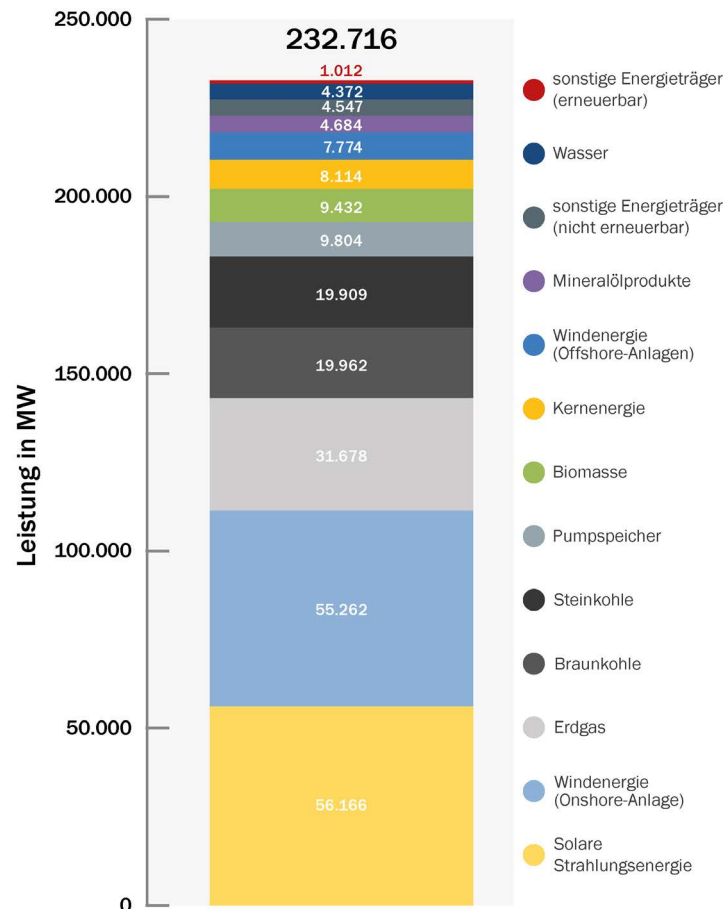


Abbildung 1: Installierte Nennleistung (netto) in Deutschland 2021.
Quelle: Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen und Bundeskartellamt 2022.

¹ Netto-Nennleistung ist die gesamte erzeugbare Energie eines Kraftwerkes.

² Für Thüringen wird von der Bundesnetzagentur keine auf dem Energieträger Braunkohle basierende installierte Netto-Nettonennleistung ausgewiesen.

zent erzeugter Netto-Nennleistung ebenfalls vergleichsweise hoch. Hier erzeugt das zweitgrößte Pumpspeicherwerk Deutschlands in Makersbach 1.046 MW (Vattenfall 2022b). Pumpspeicherwerke gehören aktuell zu den wenigen Technologien, die in der Lage sind, große Mengen an Energie flexibel zu speichern und freizusetzen. Sie haben das Potenzial, größere Netzschwankungen durch erneuerbare Energien auszugleichen, sodass ihnen eine wichtige Funktion bei der Energiewende zukommt (Deutsche Energie-Agentur 2022).

Der Primärenergieverbrauch schließt neben dem tatsächlichen Energieverbrauch auch Energieverluste ein. In Deutschland betrug dieser im Jahr 2021 etwa 12.000 Petajoule (PJ). Seit 1990 ist der Primärenergieverbrauch insgesamt rückläufig. Hinsichtlich der Verteilung auf die Energieträger hat der Anteil an erneuerbarer Energie und Erdgas in der Energieerzeugung an Bedeutung gewonnen. 2021 lag der Primärenergieverbrauch aus erneuerbaren Quellen bei etwa 16 Prozent. Gesunken ist dagegen der Einsatz von Kohle, Mineralöl und Kernfusion (Umweltbundesamt 2022c). Die Bundesregierung sieht in der Energieeffizienzstrategie die Senkung des Primärenergieverbrauchs bis 2030 um 30 Prozent auf 10.966 PJ und bis 2050 um 50 Prozent auf 7.190 PJ vor (Bezugsjahr 2008 mit 14.380 PJ) (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 2019).

Bei der Betrachtung der Entwicklung des Bruttoenergieverbrauchs wird ersichtlich, dass der Anteil erneuerbarer Energien seit Beginn der 2000er Jahre ebenfalls deutlich angestiegen ist (Abbildung 3).³ Zwischen 2000 und 2021 beträgt der Zuwachs mehr als 13 Prozent. Besonders deutlich fällt

3 Zur Berechnung der Anteile der einzelnen Energieträger am Primärenergieverbrauch werden spezifische Wirkungsgrade einbezogen. Diese liegen für erneuerbare Quellen Photovoltaik und Windkraft bei 100 Prozent, für Kernfusion bei nur 33 Prozent. Der Bruttoendenergieverbrauch schließt im Gegensatz zum Primärenergieverbrauch keine Umrechnung über den Wirkungsgrad verschiedener Energieträger ein. Für einen Vergleich des Anteils erneuerbarer und fossiler Energieträger eignet sich daher der Bruttoendenergieverbrauch (Umweltbundesamt 2022b)

Installierte Netto-Nennleistung 2021

nach Bundesländern, in Megawatt (MW)

< 0 0-6000 6000-12000 ≥ 12000

Energieträger

- Mineralölprodukte
- Braunkohle
- Erdgas
- Biomasse
- Solarenergie
- Windenergie
- Pumpspeicher
- Abfall
- Sonstige

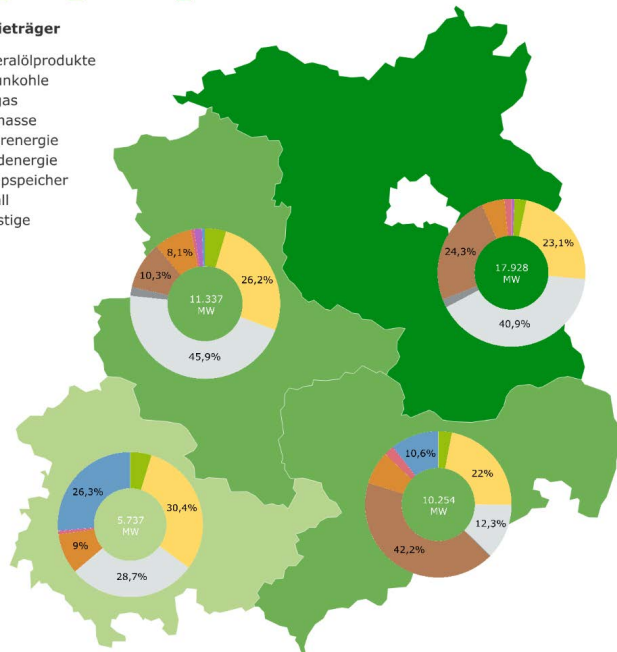
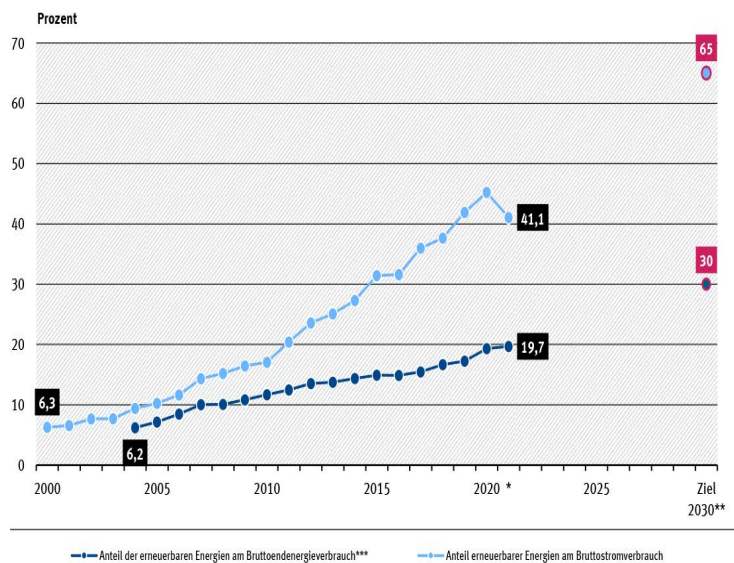


Abbildung 2: Installierte Netto-Nennleistung 2021 nach Bundesländern, in Megawatt (MW). Quelle: Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen und Bundeskartellamt 2022, Eigene Darstellung.

Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch und am Bruttoendenergieverbrauch



* vorläufig
 ** Quellen: Zielwerte 2030: Anteil am Bruttoendenergieverbrauch: Erneuerbare Energien Gesetz (EEG) 2021; Anteil am Bruttostromverbrauch 2030: Integrierter Nationaler Energie- und Klimaplan
 *** Anteil am Bruttoendenergieverbrauch berechnet nach Berechnungsregeln gemäß EU-Richtlinie 2009/28/EG
 Quelle: Umweltbundesamt auf Basis Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat), Stand 03/2022

Abbildung 3: Anteil erneuerbarer Energien am Bruttoenergieverbrauch. Quelle: Umweltbundesamt 2022b.

der Anstieg des Anteils für den Bruttostromverbrauch aus: hier lag der Anteil der Erneuerbaren 2021 bei 41 Prozent. Der Verlauf des Bruttostromverbrauchs in Abbildung 3 zeigt einen leichten Rückgang des Anteils am Stromverbrauch im Vergleich zum Jahr 2020, was auf ungünstige Witterungsbedingungen für Windkraftanlagen zurückzuführen ist (Umweltbundesamt 2022b). Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG 2021, vom 21.07.2014 (BGBl. I S. 1066), zuletzt am 20.07.2022 (BGBl. I S. 1353) geändert) sieht vor, dass der Anteil Erneuerbarer am Bruttostromverbrauch bis 2030 auf 65 Prozent steigen soll. Im Integrierten Nationalen Energie- und Klimaplan (NECP) ist eine Erhöhung des Anteils am Bruttoendenergieverbrauch auf 30 Prozent vorgesehen (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2020).

Bei der Wärme- und Kältegewinnung aus erneuerbaren Quellen liegt der Anteil in Deutschland mit etwa 200 TWh noch bei unter 20 Prozent. Die aus Biomasse erzeugte Wärmemenge betrug im Jahr 2020 rund 12 Prozent des gesamten Wärmeenergieverbrauchs. Mit über 80 Prozent stammt der Großteil der Wärmebereitstellung aus Biomasse aus der Nutzung biogener Festbrennstoffe. Biogas hatte im Jahr nur einen Anteil von 7 Prozent an den Erneuerbaren bzw. 1 Prozent an der Wärme- und Kälteerzeugung (Umweltbundesamt 2022d). Aus der 2019 erzeugten Wärmemenge aus Biogas und Biomethan konnten in Deutschland etwa 1,5 Mio. Haushalte mit Wärme versorgt werden (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) 2020).

Energiebedarf der Industrie

Im Mitteldeutschen Revier ist der Strombedarf der Industrie (nach verfügbaren Daten) etwa 40 Prozent höher als im Lausitzer Revier. Der Wärmebedarf beträgt sogar das dreifache. Allen voran fallen dabei der Saalekreis, der Landkreis Anhalt-Bitterfeld und Leipzig sowie der Burgenlandkreis ins Gewicht, wo 2020 jeweils knapp 3.000 GWh Wärme benötigt wurden. Maßgeblich ist der Verbrauch im „Chemiedreieck“ Leuna, Schkopau, Böhlen und Bitterfeld-Wolfen sowie im Industriepark in Zeitz. Im Saalekreis wird außerdem mit 3.298 GWh knapp die Hälfte des Stroms im Mitteldeutschen Revier verbraucht (Statistisches Bundesamt (Destatis) 2022a). Die Verbraucher der Industriezweige aus Chemie, Pharma- und Kunststoffbranche sind hierfür maßgeblich. Neben der Chemieindustrie trägt der Maschinenbau und die Ernährungsindustrie zum industriellen Energieverbrauch bei.

Im Lausitzer Revier wird von der Industrie insgesamt fast so viel Energie benötigt, wie von der Stadt und dem Landkreis Leipzig sowie dem Landkreis Nordsachsen zusammen. Im Lausitzer Revier ist neben dem Industriepark Schwarze Pumpe an der Grenze zwischen Sachsen (Landkreis Bautzen) und Brandenburg (Landkreis Oderspree-wald-Lausitz) auch das Industriegebiet in Schwarzheide (Landkreis Oderspree-wald-Lausitz) in der Hauptsache für den Energieverbrauch verantwortlich. Der Industriepark Schwarze Pumpe beheimatet u.a. ein Braunkohlekraftwerk, eine Papierfabrik, ein Wellpappenwerk und voraussichtlich in Zukunft ein Aluminiumwerk. In Schwarzheide sind das Unternehmen BASF Schwarzheide GmbH sowie einige mittelständische und zahlreiche kleinere Unternehmen angesiedelt.

Europäische Energie- und Klimaschutzkommune Leipzig

Die Stadt Leipzig will bis 2040 „klimaneutral“ werden. Die Emissionen sollen ausgehend von 5,18 Tonnen Kohlendioxid-Ausstoß pro Kopf im Jahr 2020 auf 1,9 Tonnen im Jahr 2030 gesenkt werden. Dafür sollen die Emissionen im Verkehr und in Gebäuden jeweils um gut 43 Prozent, bei der Industrie um 36,6 Prozent reduziert werden.

Die kontinuierliche Absenkung auf 0,25 Tonnen Kohlendioxid pro Kopf pro Jahr soll bis 2040 erreicht werden. Im städtischen Energie- und Klimaschutzprogramm EKSP 2030 werden dafür wichtige Maßnahmen aufgezählt. Darüber hinaus soll im Rahmen der Teilnahme am EU-Modellprojekt „100 klimaneutrale Kommunen“ der „Klimastadt-Vertrag“ geschlossen werden, um Gesellschaft und Wirtschaft verbindlicher zur Emissionsreduktion zu animieren. Die Teilnahme am Projekt SPARCS (Sustainable energy Positive & zero cARbon Communities) hilft der Stadt Leipzig auf ihrem Weg zur Verbesserung der Energieeffizienz. Darin wollen sieben europäische Städte zeigen, wie einzelne Gebäude, Blöcke oder Bezirke zu einem intelligenten Energiesystem vernetzt werden können. Die CO₂-Emissionen sollen um 64 Prozent gesenkt, der Einsatz erneuerbarer Energien um 65 Prozent gesteigert und Energieeinsparungen von 53 Prozent erzielt werden (Stadt Leipzig 2022).

2.3. Biomasse für die Energiebereitstellung

Die Nutzung von Biomasse zur Energiegewinnung ist für die Energiewende essenziell. Zusätzlich zur Solar- und Windkraft kann eine flexible Bioenergieerzeugung einen Ausgleich schaffen, um für eine konstante Energiebereitstellung zu sorgen. Im Jahr 2018 trug Biomasse z.B. mit 2,3 Prozent zur Stromerzeugung der Stadt Leipzig bei und damit etwa so viel wie Energie aus Photovoltaikanlagen. Der Anteil von Biomasse an der Wärmeversorgung lag bei etwa ein Prozent.⁴



Weizenstroh kann als lignozellulosehaltige Biomasse zur Energiegewinnung verwendet werden.

Die Stärken der Bioenergie liegen zunächst in der zeitlichen und räumlichen Flexibilität im Unterschied zu Wind- und Solarenergie. Bioenergieanlagen leisten somit einen wichtigen Beitrag für eine nachfragegerechte Energiebereitstellung und damit zur Versorgungssicherheit. Zudem ist Bioenergie als Allrounder in allen Energiesektoren einsetzbar: Neben Strom- und Wärmenutzung ist auch die Erzeugung von Kraftstoffen aus Biomasse möglich. Durch die Möglichkeit, Biomasse in feste, flüssige und gasförmige Energieträger umzuwandeln (z. B. Holzpellets, synthetische Kraftstoffe oder Biogas/-methan), kann Bioenergie die Energienachfrage in allen Wirtschaftssektoren decken (Sektorenkopplung). Nicht zuletzt kann Bioenergie als Basis nachhaltiger Kohlenstoffkreisläufe genutzt werden. Im Rahmen der energetischen Nutzung von Biomasse kann Kohlenstoff (in Form von CO_2) abgetrennt und langfristig im geologischen Untergrund gespeichert werden (BECCS, bioenergy with carbon capture and storage). Alternativ zur Speicherung kann der gewonnene biogene Kohlenstoff zur Schließung von Stoffkreisläufen etwa in der chemischen Industrie beitragen (BECCU, bio-energy with carbon capture and utilization) (Bett et al. 2020).

Grundsätzlich kommen stärke- und zuckerhaltige Biomassen wie Zuckerrüben, Mais und Getreide zur Energiegewinnung zum Einsatz. Daneben spielen ölhaltige Biomassen wie Rapssaat, Sonnenblumenkerne, Sojabohnen oder holzartige Biomassen verschiedener Baumarten (sowie Restholz) und andere lignozellulosehaltige Biomassen wie Miscanthus, Stroh oder Gras eine Rolle. Außerdem werden Rest- und Abfallstoffe wie z.B. Exkrememente oder Bioabfall eingesetzt.

Biomasse kann zur Energiegewinnung vergoren, verbrannt oder vergast werden (Abbildung 4). Die bei der Konversion entstehenden Energieträger können fest, flüssig oder gasförmig vorliegen. Mikrobiologische Vergärungsprozesse werden unter dem Begriff „Biochemische Biomassekonversion“ zusammengefasst, die entweder durch alkoholische oder anaerobe Fermentation abläuft. Erstere dient zur Produktion von Bioethanol als Kraftstoff. Dazu werden zucker- bzw. stärke- oder lignozellulosehaltige Biomassen eingesetzt. Der Abbau von Stärke oder Zellulose zu Zucker erlaubt die anschließende Vergärung des Zuckers mit Hilfe von Hefen. Neben Ethanol entsteht u.a. Kohlenstoffdioxid CO_2 . Deshalb ist auch die Integration von Verfahren zur Gewinnung von synthetischen Kraftstoffen mithilfe von „Power-to-X“ möglich.

⁴ Im Jahr 2018 wurden in der Stadt Leipzig 5.492 GWh Wärme und 2.304 GWh Strom verbraucht (in Summe 7.789 GWh). Den größten Anteil an der Strom- und Wärmeversorgung haben Kraftwerke, die mit Erdgas betrieben werden: darüber wurde mehr als die Hälfte der Energie erzeugt. Der Fernwärmebezug aus dem Braunkohlekraftwerk Lippendorf trug mit 20 Prozent zur Wärmeversorgung bei. Erneuerbare Energieträger leisteten einen Beitrag von knapp 7 Prozent zum Strom, davon am meisten Photovoltaik (2,5%), Biomasse (2,3%) und Wind (1,6%). Zur Wärmeversorgung trugen erneuerbare Energien zu lediglich 2 Prozent bei, hauptsächlich mit Holz, Umweltwärme und Solarthermie. Dennoch hat sich der Anteil am Strommix seit 2011 etwa verdoppelt. (Stadt Leipzig 2021)

Bei der anaeroben Fermentation wasserhaltiger Biomassen wird Biogas erzeugt. Infrage kommen neben Rest- und Abfallstoffen der Landwirtschaft (z.B. Gülle, Mist) auch Anbaubiomasse (z.B. Maissilage). Mikroorganismen setzen die enthaltenen Kohlenhydrate, Fett und Proteine zu einem Gasgemisch um. Neben 50 bis 75 Prozent Methan enthält Biogas hauptsächlich Kohlenstoffdioxid. Vor Ort kann daraus direkt Strom erzeugt werden. Biogas und Biomethan können auch in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen oder Heiz- und Brennwärtekesseln zur Wärmeabgewinnung eingesetzt werden. Möglich ist auch die nachgelagerte Methanaufbereitung zur Einspeisung von Biomethan ins Erdgasnetz, indem der CO_2 -Gehalt im Biogas gesenkt wird (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) 2016). Anfallendes CO_2 kann, wie bereits erwähnt, zu synthetischen Kraftstoffen umgewandelt werden (Power-to-X) (Dotzauer et al. 2017).

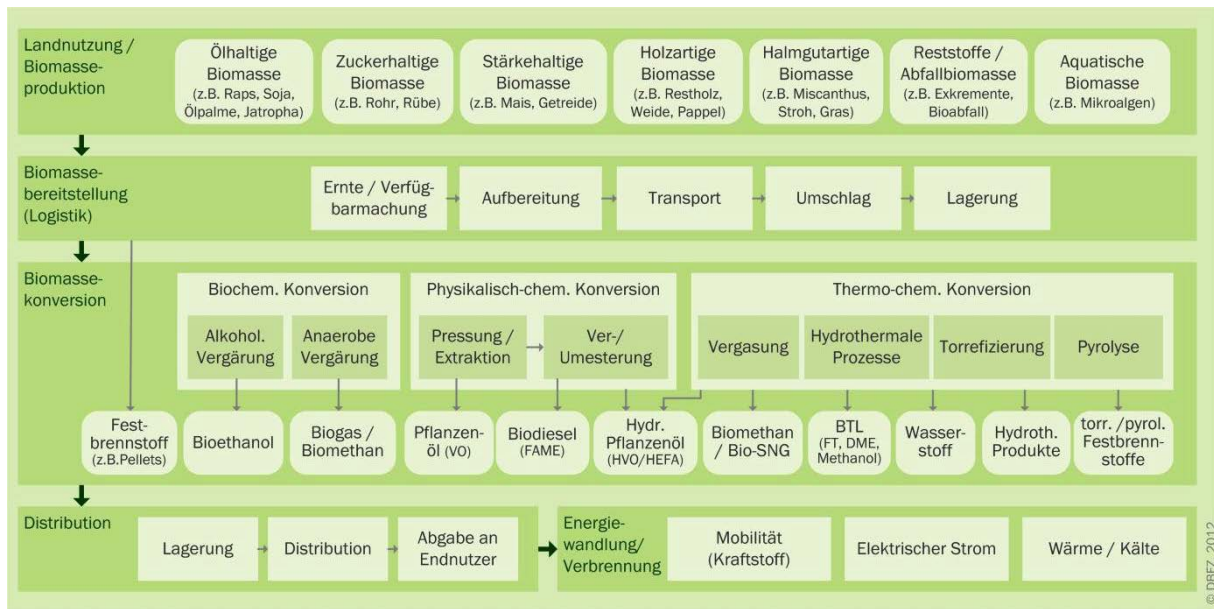


Abbildung 4 Übersicht zu Biomassearten und über grundlegende Konversionspfade und Einzeltechnologien zur Konversion von Biomasse. Quelle: Dotzauer et al. 2017.

Die Umwandlung von Biomasse mittels Verbrennung und Vergasung wird als „Thermochemische Konversion“ bezeichnet. Dabei wird Biomasse bei hohen Temperaturen zu energiereichen Produkten umgewandelt, die ihrerseits zur Energiegewinnung eingesetzt werden können. Auch die direkte Verbrennung von Biomasse zählt darunter. Dazu werden i.d.R. Blockheizkraftwerke mit möglichst wasserarmen Biomassen betrieben, wie Pflanzenöl oder biogenen Festbrennstoffen (wie z.B. Holz oder Stroh). Hauptaufgabe solcher Anlagen ist die Wärmeabgewinnung oder die gekoppelte Strom- und Wärmebereitstellung. Zur thermochemischen Konversion zählen auch die Torrefizierung, Biomassevergasung und sämtliche Pyrolysevarianten. Ziel ist die Herstellung von Produkten mit höherer Energiedichte und verbessertem Handling hinsichtlich Transport und Zerkleinerung. Gearbeitet wird je nach Verfahren unter (teilweisem) Sauerstoffabschluss oder -zufuhr. Wenn mit erhöhten Prozessdrücken kombiniert, können auch wasserhaltige Biomassen zu kohleähnlichen Festbrennstoffen umgesetzt werden. Dieser Prozess wird als hydrothermale Karbonsierung bezeichnet und erlaubt auch den Einsatz von Reststoffen wie Grünschnitt, Klär- oder Industrieschlämmen (Dotzauer et al. 2017).

Chancen der Bioenergie zur Stärkung einer industriellen Wertschöpfung liegen vor allem in der Kopplung der stofflichen und energetischen Nutzung von Biomasse. Vorrangig sollten Rest- und Abfallstoffe zur Energiegewinnung eingesetzt werden. Auch der Einsatz von lignozellulosehaltigen Biomassen, die nicht in Konkurrenz zur Lebensmittelerzeugung stehen, rückt ins Betrachtungsfeld. Anders als bei Wind- oder Sonnenenergie liegt der Schwerpunkt der weiteren Entwicklung der Bioenergie in Deutschland nicht auf der kontinuierlichen Steigerung der installierten Leistung, die eine weitere Inanspruchnahme von Agrar- und Forstflächen zur Folge hätte. Vorrangig ist stattdessen, vorhandene Potenziale sektorenübergreifend so einzusetzen, dass sie den höchsten Nutzen im

Energiesystem entfalten. Dabei ist die Priorität der stofflichen Nutzung zu beachten. Vor diesem Hintergrund leistet die Bioenergieforschung insbesondere folgende Beiträge (Bett et al. 2020):

- Identifizierung nachhaltiger Biomassepotenziale und Mobilisierungsstrategien
- Entwicklung von Technologien zur effizienten und umweltverträglichen Umwandlung von Biomasse insbesondere aus Abfällen und Reststoffen in feste, flüssige und gasförmige Energieträger
- Verbesserung technischer und wirtschaftlicher Bedingungen für eine integrierte stofflich-energetische Biomassenutzung
- Identifizierung optimaler Einsatzmöglichkeiten für Bioenergie im Energiesystem durch gesamtwirtschaftliche Betrachtungen inkl. damit verbundener Umweltwirkungen
- Bereitstellung umfassender Daten zur Entwicklung der Bioenergie (Monitoring)
- Praxisbezogene Forschung zur Förderung der gesellschaftlichen Akzeptanz von Bioenergie-Transformationspfaden

In der Forschungslandschaft des Mitteldeutschen Reviers befasst sich das Deutsche Biomasseforschungszentrum gGmbH (DBFZ) mit Sitz in Leipzig seit seiner Gründung 2008 mit diesen Schwerpunkten. In anwendungsorientierter Forschung werden vielfältige Konzepte zur Etablierung von Biomasse im Energiesystem entwickelt. Vorhaben orientieren sich an der Integration ins Energiesystem, der Verbesserung der Energieeffizienz, der Vermeidung von Nutzungskonkurrenzen sowie von Emissionen bei der Nutzung von Bioenergie. Im Folgenden werden Praxisbeispiele aus der Region präsentiert.

Teil der Optimierung von Wärme- und Stromerzeugung aus Biogasanlagen ist die Reduktion von Emissionen und die Steigerung der Gasausbeute. Das Vorhaben „Optiflex – Optimierung des Betriebs und Design von Biogasanlagen für eine bedarfsgerechte, flexibilisierte und effiziente Biogasproduktion unter Berücksichtigung der Prozessstabilität als Post-EEG Strategie“ widmet sich beispielsweise der Prozessoptimierung. Betrachtet werden dafür Zusammenhänge zwischen Substrateigenschaften, Prozessbedingungen, Strömungsprofil im Reaktor und Biogasausbeute (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) 2017). Die Produktion von Biogas ist nicht nur von



Bild 2: © Pixelio / Trebreh; restliche Bilder: © DBFZ

Einteilungsmöglichkeit von Biomassearten hinsichtlich ihrer Hauptinhaltsstoffe: ölhaltige, zuckerhaltige, stärkehaltige, holzartige, halmgutartige, Abfall- und aquatische Biomasse.

der Zusammensetzung der Substrate sondern auch von Prozessparametern und spezifischen Situation der Anlage abhängig (Weinrich et al. 2020).

Biogas, Biomethan (und Wasserstoff) können zukünftig zu wichtigen Bestandteilen der erneuerbaren Energieversorgung werden. Die verstärkte Flexibilisierung bestehender Biogasanlagen und stärkere Aufbereitung von Biogas zu Biomethan wird aufgrund der Auswirkungen des Kriegs in der Ukraine zum Ersatz für importiertes Erdgas empfohlen. Der Anteil von Biomethan am Gasmarkt kann mittelfristig auf drei Prozent des derzeitigen Gasverbrauchs erhöht werden. Der Beitrag zur gasbasierten Wärmeerzeugung lässt sich um etwa ein Prozent ausweiten. Bei konsequenter Flexibilisierung aller Biogasanlagen könnte immerhin die gasbasierte flexible Stromerzeugung fast zur Hälfte aus Biogas erfolgen (46%), und so einen Großteil des importierten Erdgases ersetzen (DBFZ 2022b). Dennoch ist momentan ein Rückgang der installierten Anlagenleistung von Biogasanlagen zu beobachten, der mit gesetzlichen Vorgaben des EEG zusammenhängt (Verminderung der Biogas-Förderung). Nur durch das Fortbestehen von Investitionsförderungen zur Flexibilisierung der Anlagen können Biogas und Biomethan einen wachsenden Beitrag zur Energiebereitstellung leisten (Dotzauer et al. 2022). Zur Mobilisierung von biogenen Nebenprodukten und Abfällen (sowie Anbaubiomasse) sind geeignete Anreize im EEG zu setzen (DBFZ 2022b).

Um Nutzungskonkurrenzen zwischen der Energiebereitstellung aus Biomasse und dem Anbau von Nahrungsmitteln zu vermeiden und frühzeitig Alternativen aufzuzeigen, ist die Verwendung von biogenen Rest- und Abfallstoffen sowie Nebenprodukten ein Forschungsschwerpunkt am DBFZ. Im Vorhaben „RestFlex“ wird die Eignung landwirtschaftlicher Reststoffe für die Flexible Biogasproduktion evaluiert. Modellgestützte Methoden fassen Daten zum Abbauverhalten verschiedener Reststoffe zusammen. Ziel ist die Unterstützung einer regionalisierten und bedarfsgerechten Stromerzeugung durch Biogas (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) 2022).

Im Rahmen des Vorhabens „Pilot-SBG: Bioressourcen und Wasserstoff zu Methan als Kraftstoff“ wird am DBFZ in Leipzig eine Pilotanlage zur Produktion von Biomethan errichtet. Ende Mai 2022 erfolgte der offizielle Baustart am Deutschen Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH in Leipzig. Als Ausgangsstoffe sollen bislang ungenutzte biogene Reststoffe, Nebenprodukte und Abfälle aus der Region umgesetzt werden. Dazu kommen agrarische Nebenprodukte wie Gülle und Stroh sowie urbane Abfälle wie Grüngut und Biogut zum Einsatz. Das Anlagenkonzept verbindet im Kern eine anaerobe Vergärung mit innovativen Vor- und Aufbereitungsprozessen, um Methan als Energieträger bzw. Kraftstoff (CNG) bereitzustellen. Die Integration von grünem Wasserstoff (der durch Elektrolyse mit Strom aus erneuerbaren Quellen hergestellt wird) erhöht dabei deutlich den Methanertrag des Gesamtprozesses. Für den finalen Pilotbetrieb ist die Verarbeitung von monatlich bis zu 1,2 Tonnen Rohstoffen geplant. Daraus können bis zu zwei Pkw-Tankfüllungen erneuerbares CNG bereitgestellt werden (DBFZ 2022d).

Einen ähnlichen Ansatz zur Kraftstofferzeugung verfolgt in Sachsen ein Forschungsverbund des Fraunhofer-Instituts für Keramische Technologien und Systeme (IKTS), der TU Bergakademie Freiberg und der TU Dresden mit den Unternehmen Ökotec Anlagenbau GmbH, Sunfire GmbH, DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH. An eine Biogasanlage wurde ein Dampfreformer zur Erzeugung von Synthesegas angeschlossen (Gemisch aus Wasserstoff und Kohlenstoffmonoxid). In einer nachfolgenden Fischer-Tropsch-Synthese wurde daraus Methan sowie Wachs und flüssige Kohlenwasserstoffe erzeugt. Aus diesen Kohlenwasserstoffen können Raffinerien Diesel oder Kerosin herstellen. So erzeugte die Pilotanlage aus Biogas bereits den Treibstoff für Flugzeuge. Diese Flexibilisierung von Biogasanlagen könnte beim Betrieb helfen, auf Marktschwankungen zu reagieren und zusätzlich biobasierte Alternativen zu fossilen Kraftstoffen bieten (Fraunhofer IKTS 28.07.2022).

Das Unternehmen Verbio Vereinigte Bioenergie AG mit Hauptsitz in Zörbig betreibt weltweit Anlagen zur Erzeugung von Bioethanol, Biodiesel und Biomethan. Eingesetzte Rohstoffe sind Rapsöl für Biodiesel, stärkehaltige Anbaubiomassen zur Herstellung von Bioethanol und Reststoffe für die Synthese von Biomethan, wie Stroh als Lignozellulose-Lieferant. Logistische Herausforderungen stellt insbesondere der Rohstoff Stroh dar aufgrund seiner geringen Dichte bei großen Volumina und der Brandgefahr bei der Lagerung. Die Biomethanherstellung erfolgt in Biogasanlagen mit

anschließender Aufreinigung zum Biomethan. Durch gestiegene Nachfrage nach diesen fortschrittlichen Biokraftstoffen der zweiten Generation (aus Non-Food Biomasse, also auch Biomethan aus Reststoffen wie Stroh) wird der Fokus zukünftig auf der Erzeugung von Biomethan und dessen Verflüssigung für den Kraftstoffsektor im Schwerlasttransport. Finanzielle Unterstützung zur Umrüstung der LKW-Flotten könnten durch regulatorische Anpassungen erwirkt werden. Der politische Rahmen kann außerdem die Verwendung lokal erzeugter Biomassen fördern (VERBIO Vereinigte BioEnergie AG 2022).⁵



Biokraftstoffe zweiter Generation sind insbesondere für den Schwerlasttransport relevant.

In der Erdölraffinerie des französischen Mineralölkonzerns TotalEnergies SE in Leuna werden u.a. Kraftstoffe und Heizöl hergestellt und die benachbarte Chemieregion mit Ausgangsstoffen beliefert. Die Strategien von TotalEnergies für nachhaltige Kraftstoffe sehen eine breite Diversifizierung vor, da nicht mehr nur auf die beiden fossilen Energieträger Erdöl und Erdgas gesetzt werden kann. Vorgesehen ist daher die kontinuierliche Steigerung der Zumischung von Biokraftstoffen, wie Biodiesel und Bioethanol. Daneben sollen verstärkt erneuerbares Gas, also Biomethan und Wasserstoff sowie Strom aus erneuerbaren Quellen zum Einsatz kommen. In Deutschland kann außerdem ein Zukunftsfeld in der Erzeugung von synthetischen und E-Kraftstoffen aus CO₂ und Wasserstoff liegen (Power-to-X). Erwartet wird eine Steigerung der Kraftstoffherzeugung aus Algen, Bakterien sowie Rest- und Abfallstoffen. Dafür sind die entsprechenden politischen Rahmenbedingungen zu schaffen. Die Fülle und Komplexität der Regelungen und Vorgaben wird als große Hürde zur Transformation wahrgenommen. Biokraftstoffe sind in Deutschland nur unter strengen Auflagen verwendbar und auch die Kraftstoffherzeugung wird zugunsten der Futtermittelerzeugung gedeckelt (TotalEnergies S.E. 2022).

Zur Wärmebereitstellung durch Biomasse eignen sich neben Biomethan beispielsweise Pelletheizungen. Zur Senkung der Kohlenstoffdioxidemissionen im Sinne des Nationalen Klimaschutzplans wird in Deutschland der Austausch von Ölheizungen angestrebt. Das DBFZ-Projekt „OBEN“ (Öl-Ersatz Biomasse-Heizung) befasst sich mit der Identifikation von Hemmnissen und Lösungen für einen Wechsel zu Biomasseheizungen. Forciert wird dafür der Dialog mit Hauseigentümer*innen, Installateur*innen, Schornsteinfeger*innen, Energieberater*innen, Herstellerfirmen und Akteur*innen aus Politik, Verbänden und Wissenschaft. Ferner sollen technische und organisatorische Lösungsansätze und politische Handlungsfelder herausgearbeitet werden (DBFZ 2021).

Der Fachverband Holzenergie (FHV) des Bundesverbands Bioenergie setzt sich für die Gleichbehandlung von Bioenergie und anderen erneuerbaren Energien ein. Bioenergie ist die wichtigste Wärmeenergiequelle aus erneuerbaren Quellen und ist lokal und regional verfügbar. Die Nutzung biogener Brennstoffe vermindert zudem den Strombedarf. Ausgegangen wird vom Einsatz von mehr Holz im Wärmesektor, da eine Steigerung des Anteils der erneuerbaren Energien andernfalls nicht möglich ist. Begleitet wird die Entwicklung vom Ausbau der Nutzung in Bezug auf industrielle Prozesswärme und Nah- und Fernwärmenetze. Biomasse stellt hierfür eine effiziente Energiequelle dar. Generell ist festzuhalten, dass die Holzverbrennung effizient für Prozesstemperaturen zwischen 100 und 300 °C genutzt werden kann. Auch der Fachverband kritisiert immer wieder gesetzliche Vorgaben, die zu Vorbehalten und Wettbewerbsnachteilen für Bioenergie führen können (Bundesverband Bioenergie e.V. (BBE) 02.06.2022).

⁵ VERBIO erhöht deutlich die EBITDA-Prognose für das Geschäftsjahr 2021/2022: <https://www.verbio.de/investor-relations/aktuelles-publikationen/detail/verbio-erhoeht-deutlich-die-ebitda-prognose-fuer-das-geschaeftsjahr-20212022/>.

3. Entsorgungswirtschaft

3.1. Vorbemerkungen

Abfall entsteht, wenn sich der Besitzer oder die Besitzerin von Materialien oder Substanzen an deren Lebensende entledigt, entledigen will oder muss. Der Verwendungszweck der von Menschen erzeugten und genutzten Materialien und Substanzen endet. Sowohl in der europäischen Abfallrichtlinie als auch im deutschen Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) ist diese Definition zu finden.⁶ Abfälle sind schadlos und ordnungsgemäß zu entsorgen, um das Gemeinwohl nicht zu gefährden. Der Begriff „Entsorgung“ greift die Beseitigung der mit dem Abfall verbundenen Gefahren auf. Zur Entsorgung zählt das Sammeln, die Behandlung sowie Beseitigung oder Aufbereitung von Abfällen. Sie landen entweder auf der Deponie oder werden energetisch oder stofflich verwertet.



Abfallvermeidung und -verwertung hat Vorrang vor der Abfallbeseitigung.

Auf dem Weg zu einer Kreislaufwirtschaft wird angestrebt, Ressourcen effizient zu nutzen. Sind Abfälle entstanden, sollten sie zunächst stofflich aufbereitet werden, um Materialien zurückzugewinnen und wiederverwenden zu können. Sekundärrohstoffe ermöglichen neue Lebenszyklen der Materialien. In Deutschland hat die Abfallvermeidung und -verwertung deshalb Vorrang vor der Abfallbeseitigung. Die energetische Verwertung schließt neben der direkten Energiegewinnung aus der Abfallverbrennung die Erzeugung von Brennstoffen aus Abfällen ein. Die Abfallbeseitigung auf Deponien nach entsprechender Behandlung sollte nur erfolgen, wenn keine stoffliche oder energetische Nutzung möglich ist.

Im Europäischen Abfallartenkatalog (EAK)⁷ sind mit mehr als 600 Abfallarten klassifiziert. Unter den Begriffsbestimmungen des KrWG finden sich ebenfalls Erläuterungen zu verschiedenen Abfallarten. Unterschieden wird in Siedlungsabfälle, Produktionsabfälle, Abfälle aus Land- und Forstwirtschaft sowie der Fischerei, Bau- und Abbruchabfälle und Altfahrzeuge. Im Gegensatz zu Abfällen fallen Nebenprodukte bei Herstellungsverfahren als integraler Bestandteil an und können weiterverwendet werden.

Auch Abwässer bspw. aus Industrie, Landwirtschaft und Haushalten fallen täglich in großen Mengen an und müssen fachgerecht entsorgt und aufbereitet werden.⁸ Dazu zählt Regenwasser, Schmutzwasser und Fremdwasser. Gesammelt werden Abwässer in der Kanalisation und werden nach dem Transport in Kläranlagen behandelt. Aufgereinigtes Wasser kann dem Wasserkreislauf zurückgeführt werden. Die zugrundeliegenden rechtlichen Vorgaben reichen über das Kreislaufwirtschaftsgesetz hinaus. Sie reichen von der EG-Wasserrahmenrichtlinie, im deutschen Wasserhaushaltsgesetz, der Abwasser- und Klärschammverordnung (AbfKlärV) bis zur Düngemittelverordnung (DüngMV) sowie einschlägigen Länderverordnungen usw. Im Wasserhaushaltsgesetz (WHG) ist Abwasser definiert als das durch häuslichen, gewerblichen, landwirtschaftlichen oder sonstigen Gebrauch in seinen Eigenschaften veränderte Wasser und das bei Trockenwetter damit zusammen abfließende Wasser (Schmutzwasser) sowie das von Niederschlägen aus dem Bereich von bebau-

⁶ Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle, Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG).

⁷ Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnis-Verordnung - AVV).

⁸ Die Abwasserentsorgung steht in dieser Kurzstudie nicht im Vordergrund, ist aber dennoch zentraler Bestandteil der Entsorgungswirtschaft.

ten oder befestigten Flächen gesammelt abfließende Wasser (Niederschlagswasser). Die aus Anlagen zum Behandeln, Lagern und Ablagern von Abfällen austretenden und gesammelten Flüssigkeiten gelten ebenfalls als Schmutzwasser (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz 2022).

In Deutschland fällt die Entsorgung klassischerweise den Kommunen zur Daseinsvorsorge zu. In den vergangenen Dekaden übernahmen jedoch immer mehr privatwirtschaftliche Unternehmen diese Aufgabe. Maßgeblich dafür waren gesetzliche Novellierungen. Eine Anpassung des Abfallgesetzes Mitte der 1980er Jahre beispielsweise deklarierte Industrie- und Gewerbeabfälle als Wertstoffe. Im Bereich der Hausmüllentsorgung fand ein ähnlicher Prozess statt. Die Privatisierung wurde außerdem durch steigende Abfallmengen in den 1990er Jahren vorangetrieben. Unumgängliche Investitionen in die Modernisierung von Abfallbehandlungsanlagen und Deponien stemmten die privatwirtschaftlichen Unternehmen. Allerdings führten fehlende Steuerungs- und Kontrollmöglichkeiten, die Krisenanfälligkeit und unsichere Leistungserbringungen der privatwirtschaftlichen Unternehmen seit kurzem zur erneuten Rekommunalisierung in der Entsorgungsbranche (Kraemer et al. 2017). Zur Einteilung privatwirtschaftlicher und kommunaler Unternehmen, die sich mit und der Sammlung, Behandlung und Beseitigung von Abfällen sowie Rückgewinnung befassen, kann die Klassifikation der Wirtschaftszweige (2008) herangezogen werden. Die Sammlung, Behandlung und Beseitigung von Abfällen sowie die Rückgewinnung ist zu finden unter E 38 (siehe Tabelle 5). Zur Abfallbehandlung und Beseitigung gehört auch die Energiegewinnung durch Abfallverbrennung.

| Abteilung | Gruppe | (Unter-)Klasse | |
|---|--|-----------------------------------|---|
| ABSCHNITT E – ABWASSER- UND ABFALLENTSORGUNG | | | |
| 38 | Sammlung, Behandlung und Beseitigung von Abfällen; Rückgewinnung | | |
| | 38.1 | Sammlung von Abfällen | |
| | | 38.11 | Sammlung nicht gefährlicher Abfälle |
| | | 38.12 | Sammlung gefährlicher Abfälle |
| | 38.2 | Abfallbehandlung und -beseitigung | |
| | | 38.21 | Behandlung und Beseitigung nicht gefährlicher Abfälle |
| | | 38.22 | Behandlung und Beseitigung gefährlicher Abfälle |
| | 38.3 | Rückgewinnung | |
| | | 38.31 | Zerlegen von Schiffs- und Fahrzeugwracks und anderen Altwaren |
| | | 38.32 | Rückgewinnung sortierter Werkstoffe |

Tabelle 5: Klassifikation der Wirtschaftszweige (2008) für die Abfallentsorgung. Quelle: Eigene Darstellung.

Die Abfallsammlung, Sortierung und -beseitigung sowie Rückgewinnung spielen eine wichtige Rolle in einem nachhaltigen Wirtschaftssystem. In dieser Branche spiegelt sich deutlich der Kreislaufgedanke der Bioökonomie wider. Die Nutzung von Sekundärrohstoffen birgt enorme Wertschöpfungspotenziale. Alle Bestandteile von Rohstoffen werden effizient genutzt und am Lebensende zur neuerlichen Verwendung aufbereitet. Solche Kreislaufansätze wirken sich positiv auf die Ressourcenschonung aus und reduzieren die Abhängigkeit von volatilen, internationalen Rohstoffmärkten. Insbesondere die Aufbereitung zu Sekundärrohstoffen geht mit einem ökologischen Vorteil einher und bringt im Idealfall ökonomischen Gewinn mit sich. Zur Förderung der stofflichen Abfallaufbereitung liegt eine weitere Stellschraube in der rechtlichen Definition von „Rest- und Abfallstoffen“. Daneben müssen Ökosystemleistungen biogener Rohstoffe honoriert und die Auswirkungen der Nutzung fossiler Rohstoffe vollständig in deren Bepreisung einfließen.

Bei der Abfallsammlung entstehen vergleichsweise hohe Kosten, sodass Prozesseffizienz eine große Rolle spielt. Gleichzeitig bieten Sammlung und Sortierung auch hohe Beschäftigungspotenziale. Moderne Sortieranlagen erzeugen aus getrennt erfassten Abfällen qualitativ hochwertige Einzelfraktionen, die vorrangig recycelt werden. Kunststoffarten werden beispielsweise getrennt und nach Farben sortiert. Aus Bioabfällen werden in Kompostierungs- und Vergärungsanlagen Kompost bzw. Biogas erzeugt. Restabfälle werden in Abfallverbrennungsanlagen energetisch verwertet oder in mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlagen (MBA) behandelt. MBA sortieren Wertstoffe aus, liefern heizwertreiche Fraktionen zur Energieerzeugung (Ersatzbrennstoffe, EBS) und bauen organische Substanz ab, die wesentlich verantwortlich für die von Deponien ausgehenden Emissionen sind (Deponiegas und Sickerwasser). Thermische Verwertungsanlagen und Abfall-Biomasse-Heizkraftwerke produzieren Energie. Daneben werden in Ersatzbrennstoffkraftwerken (EBS-Kraftwerken) aufbereitete Reststoffe als Brennstoffe eingesetzt. Die Nutzung von Sekundärrohstoffen z.B. der Produkte aus Kompostieranlagen, recycelte Kunststoffe und Metalle sowie von Ersatzbrennstoffen eröffnet neue Absatzmärkte (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit 2016).

Wirtschaftliche Bedeutung

Die Abfallwirtschaft in Deutschland ist technologisch hoch entwickelt und eine wirtschaftlich bedeutende Branche. 2020 waren 183.000 sozialversicherungspflichtige Mitarbeitende hier beschäftigt, was etwa 0,55 Prozent der Gesamtbeschäftigung in Deutschland ausmacht. Seit 2007 ist ein deutlicher Beschäftigungszuwachs um 36.800 Personen (+25%) zu verzeichnen. Im Jahr 2019 befassten sich knapp 5.500 Unternehmen mit der Sammlung, Abfallbeseitigung und Rückgewinnung, wobei in der Rückgewinnung mit 2.100 die meisten Unternehmen gezählt wurden. Der Umsatz belief sich 2019 insgesamt auf ca. 41 Mrd. Euro.

Im Mitteldeutschen Revier weist die Beschäftigung in der Branche „Abfallsammlung, -beseitigung und Rückgewinnung“ eine hohe Relevanz auf. Hier waren 2020 7.300 Personen beschäftigt (Tabelle 6). Dies entspricht knapp ein Prozent der insgesamt im Mitteldeutschen Revier beschäftigten Personen. Auch hier hat sich in den vergangenen Jahren die Beschäftigung positiv entwickelt (+5%). Allerdings ist die Zuwachsrate im Vergleich zu Deutschland geringer. Neben wenigen Großunternehmen, die deutschlandweit agieren und oft Standorte in vielen Bundesländern haben, arbeiten in der Branche regionale und mittelständische Unternehmen.

| Abfallsammlung, -beseitigung und Rückgewinnung: Potenzialbranche im Mitteldeutschen Revier | | |
|--|------------------|------------------------|
| | Lausitzer Revier | Mitteldeutsches Revier |
| umsatzsteuerpflichtige Unternehmen (2019) | 120 | - |
| sozialversicherungspflichtig Beschäftigte (2020) | 2.600 | 7.300 |
| steuerbarer Umsatz in Mio. Euro (2019) | 249.770 | - |
| Lokalisationskoeffizient (2020) | 0,82 | 1,24 |

Tabelle 6: Wirtschaftliche Kennzahlen der Abfallsammlung, -beseitigung und Rückgewinnung. Quelle: Statistische Ämter des Bundes und der Länder, Bundesagentur für Arbeit 2021; Brödner et al. 2021.

In Deutschland dominieren drei international tätige Unternehmensgruppen die Entsorgungsbranche, darunter REMONDIS SE & Co. KG, Veolia S.A. sowie Alba plc & CO. KG. Die Remondis-Gruppe ist mit 40.000 Beschäftigten eines der weltweit größten privaten Dienstleistungsunternehmen im Bereich Wasser- und Recyclingwirtschaft und verfügt über Niederlassungen und Anteile an Unternehmen in 34 Ländern. Dienstleistungen für Kommunen, Industrie, Handel, Handwerk und Gewer-

be prägen das Hauptgeschäftsfeld. Im Jahr 2019 hat die REMONDIS PET Recycling GmbH in Zeitz in Sachsen-Anhalt eröffnet. Die neue Aufbereitungsanlage für PET-Pfandflaschen erzeugt hochreinen Recyclingkunststoff (REMONDIS Recycling GmbH & Co. KG 2019). Die Geschäftsschwerpunkte der Veolia Deutschland GmbH liegen auf dem Entsorgungs- und Wassermanagement sowie Energiedienstleistungen. Veolia ist im Papierrecycling in Deutschland aktiv. Das Unternehmen beschäftigt rund 171.000 Mitarbeiter*innen. In Jänschwalde, dem Kohlestandort im Landkreis Spree-Neiße in der Lausitz, soll in einem Joint Venture von Veolia und dem Energiekonzern LEAG (Lausitzer Energieverwaltungs GmbH, Lausitz Energie Bergbau AG, Lausitz Energie Kraftwerke AG) eine Anlage für die energetische Verwertung von Ersatzbrennstoffen (EBS-Kraftwerk) mit einer Verbrennungskapazität von 480.000 Tonnen pro Jahr errichtet werden. Dort ist die Mitarbeit von etwa 50 Personen ab 2024 geplant (EVA Jänschwalde GmbH & Co. KG 24.11.2020). Die Alba Europe Holding ist ein Unternehmen der Entsorgungs- und Recyclingbranche mit Sitz in Berlin und insgesamt rund 5.400 Mitarbeitern. Alba betreibt Recyclingsanlagen für Kunststoffe und andere Wertstoffe. Im Gegensatz zu Veolia will Albas Geschäftsführung in Zukunft seine Aktivitäten für das chemische Recycling verstärken (Thissen 2022).



Zu zentralen Trends der Entsorgungsbranche zählt z.B. die Stärkung des Recyclings für Kunststoffe

Zu zentralen Trends der Entsorgungsbranche zählen die Reduktion der CO₂-Emissionen und die Stärkung des Recyclings, speziell für Elektroschrott, Seltene Erden und Kunststoffe. Teil der Rohstoffwende von fossil-basierten zu nachwachsenden Rohstoffen ist die verstärkte Bereitstellung von Sekundärrohstoffen. Zur Stärkung des Sekundärrohstoffmarktes und der Kreislaufführung werden daher neue Technologien wie optimierte Sammlung und Sortierung, Aufklärung der Verbraucher*innen sowie, im Fall von Kunststoffen, chemisches oder biologisches Recycling vorangetrieben. Die Digitalisierung kann zum Schlüssel werden, um solche Vorhaben umzusetzen. Teil dessen sind die intelligente Vernetzung von Maschinen, Werkzeugen und Transportmitteln, die Verwendung gechippter Mülltonnen, Sortierroboter, mobile Anwendungen und Softwarelösungen zur Tourenoptimierung. Solche Maßnahmen führen zu Erleichterungen für den Arbeitsalltag, steigern die Prozesseffizienz und tragen zur Ressourcenschonung bei. Zeit- und Kosteneinsparungen bedienen außerdem den Trend zur Entwicklung fairer Arbeitsbedingungen (Mederake 2022; Hiebel und Nühlen 2017).

Steigende Energiekosten und wachsender Fachkräftemangel zählen auch in der Entsorgungsbranche zu den zentralen Herausforderungen. Außerdem fehlen bislang Aufbereitungstechnologien zum werkstofflichen Recycling von bestimmten komplexen Materialien, wie z.B. einzelner Polymere oder Glasfaserverbundstoffe. Schwankende Preise für Sekundärrohstoffe führen häufig dazu, dass deren Einsatz nur zögerlich seitens der Industrie durchgesetzt wird. Die wachsende Konkurrenz zwischen kommunalen und privaten Entsorgungsunternehmen wird ebenfalls zur Herausforderung. Hohe Verbrennungskapazitäten hatten zu einem intensiven Preiskampf zwischen Abfallverbrennungsanlagen und EBS-Kraftwerken geführt. Bestehende politische Regelungen und Ansätze werden auch in der Abfallwirtschaft als zentrale Herausforderung betrachtet. Derzeit sind diese Regelungen nicht auf die Förderung einer Kreislaufwirtschaft ausgelegt. Erschwerend kommt hinzu, dass Novellen verschiedener Gesetze vom Gesetzgeber selten zusammengedacht werden. So stehen die Bemühungen zu den Themen Abfallwirtschaft, Abfallreduzierung und Ressourcenmanagement meist isoliert. Auch die fehlende Zusammenarbeit von Akteuren aus Werkstoff- und Produktentwicklung, Recycling, Behörden und Gesetzgebern sowie Forschungseinrichtungen wird als Hindernis betrachtet (Mederake 2022; Hiebel und Nühlen 2017).

3.2. Aufkommen (Rest- und Abfallstoffe sowie Nebenprodukte)

In Deutschland betrug das Brutto-Abfallaufkommen im Jahr 2019 etwa 417 Mio. Tonnen (inkl. Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen). Seit 2009 ist das Abfallaufkommen um 14 Prozent gestiegen. Diese Entwicklung wird maßgeblich durch die Zunahme von Bau- und Abbruchabfällen und Abfällen aus Abfallbehandlungsanlagen getrieben. In dieser Gruppe fällt mittlerweile die größte Menge Abfall an (231 Mio. t im Jahr 2019). Die Entwicklung ist eng verknüpft mit der Konjunkturentwicklung des Baugewerbes (Umweltbundesamt 2021d).

Siedlungsabfälle fallen in einer Größenordnung um 50 Mio. Tonnen jährlich an. Das Aufkommen haushaltsüblicher Siedlungsabfälle ist in den vergangenen Jahren leicht von 43,6 Mio. Tonnen (2010) auf 45,2 Mio. Tonnen (2019) gewachsen. Unter anderem stieg das Aufkommen von Abfällen aus der Biotonne von 3,8 Mio. auf 4,6 Mio. Tonnen. Ebenfalls angestiegen ist das Aufkommen von biologisch abbaubaren Garten- und Parkabfällen von 4,9 Mio. auf 5,7 Mio. Tonnen. Das Aufkommen von Glasabfall sank hingegen bereits vor 2010 auf unter 2,5 Mio. Tonnen, ebenso der Papp- und Papierabfall von knapp 8 Mio. auf unter 7 Mio. Tonnen. Pro Kopf liegt das spezifische Abfallaufkommen in Deutschland bei 476 Kilogramm (Umweltbundesamt 2021d).

Mehrere Kommunen und Städte aus der Untersuchungsregion fallen durch geringere Pro-Kopf-Abfallaufkommen im bundesdeutschen Vergleich auf. Im Lausitzer Revier betrug 2019 das Pro-Kopf-Aufkommen in den beiden Landkreisen Görlitz und Bautzen jeweils weniger als 350 Kilogramm jährlich. Im Mitteldeutschen Revier sticht der Landkreis Leipzig mit weniger als 300 Kilogramm pro Kopf heraus. Lediglich im Landkreis Anhalt-Bitterfeld und im Burgenlandkreis in Sachsen-Anhalt überschreitet das Aufkommen den nationalen Durchschnittswert (476 kg) (Landesamt für Umweltschutz (LAU) Sachsen-Anhalt 2019; Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz des Landes Brandenburg 2020; Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz 2019; Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie 2019).

Im Folgenden wird das Aufkommen einzelner Siedlungsabfallarten (Bioabfall, Altpapier, Klärschlamm) sowie Altholz betrachtet.

Die Aufkommensmengen von Bioabfall hängen vor allem von der Bevölkerungsentwicklung und dem Anschlussgrad an Sammelsysteme ab. Ebenso beeinflussen das Aufkommen wie Einwohner*innen Müll trennen, ob sie eigenkompostieren, wie Siedlungsstrukturen aufgebaut sind und wie hoch die Abfallgebühren sind. Insbesondere seit 2012 haben sich der Anschluss der Haushalte und damit die umweltverträgliche Bewirtschaftung von Abfällen kontinuierlich verbessert. Ausschlaggebend dafür ist das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG), das mit dem verstärkten Recycling von Abfällen auf die Schonung natürlicher Ressourcen und des Klimas abzielt (Kern und Raussen 2011).

„Zero Waste City“ – Reduktion von Abfall in Leipzig

In Leipzig wurden 2020 mehr als 80.000 Tonnen Restabfall aus Haushalten und Gewerben durch die Stadtreinigung entsorgt. In Zukunft will die Stadt etwa die Hälfte davon einsparen. Ermöglicht werden dadurch Investitionen in Arbeitsplätze für die Kreislaufwirtschaft. Leipzig hat sich 2021 dem Netzwerk Zero Waste Germany e.V. angeschlossen und entwickelt Strategien zur Reduktion des Abfallaufkommens. Ziel ist eine Halbierung des Restmüllaufkommens. Freiwerdende Gelder sollen direkt in Investitionen zur Kreislaufwirtschaft fließen.

Neben dem Restabfall trugen 2020 Papier und Pappe mit 28.000 und Sperrmüll, Verpackungswertstoffe (Kunststoff und Metall) sowie Bioabfälle mit je etwa 22.000 Tonnen zum Gesamtabfallaufkommen von 210.000 Tonnen in der Stadt Leipzig bei (Neubauer 2022). Der Pro-Kopf-Anteil des Gesamtabfalls lag bei etwa 360 Kilogramm.

| Landkreis / kreisfreie Stadt Bezugsjahr 2019 Bezugsjahr 2020 | Eingesammelte Abfälle insgesamt (kg/Kopf) |
|--|---|
| Lausitzer Revier: | |
| Bautzen | 334 |
| Görlitz | 340 |
| Cottbus | 455 |
| Dahme-Spreewald | 438 |
| Elbe-Elster | 438 |
| Oberspreewald-Lausitz | 438 |
| Spree-Neiße | 412 |
| Mitteldeutsches Revier: | |
| Leipzig, Stadt | 347 |
| Leipzig, Landkreis | 294 |
| Nordachsen | 403 |
| Altenburger Land | - |
| Halle (Saale), Stadt | 448 |
| Anhalt-Bitterfeld | 586 |
| Burgenlandkreis | 494 |
| Mansfeld-Südharz | 421 |
| Saalekreis | 429 |
| Deutschland | 476 |

Tabelle 7: Aufkommen Haushaltsabfällen nach kreisfreien Städten und Landkreisen im Lausitzer und Mitteldeutschen Revier. Quellen: Landesamt für Umweltschutz (LAU) Sachsen-Anhalt 2019; Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz des Landes Brandenburg 2020; Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz 2019; Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie 2019.

In urbanen Gebieten oder in Regionen mit niedrigem Anschlussgrad landen Bioabfälle oft im Restmüll. Diese biogenen Anteile werden dann in der Regel verbrannt. Wird biogener Abfall allerdings in der Biotonne gesammelt und anschließend bspw. einer Vergärung und damit der Biogasproduktion zugeführt, so wird dadurch eine positivere Klimaschutzwirkung im Vergleich zur Verrottung auf dem privaten Kompost oder der direkten Verbrennung erzielt. Zudem können die Gärreste einer Biogasanlage anschließend stofflich als z. B. Torfersatz für die Düngung genutzt werden. Wie in Abbildung 5 ersichtlich, lag das Aufkommen von Abfällen aus der Biotonne im Mitteldeutschen Revier 2018 bei 39.703 Tonnen Trockenmasse. Verglichen mit 2010 ist eine leichte Steigerung der erfassten Mengen zu beobachten (+7,9%). Im Lausitzer Revier lag das Aufkommen bei 17.131 Tonnen Trockenmasse. Für die Betrachtung des Altpapier-Aufkommens fällt auf, dass insbesondere in urbanen Regionen wie Leipzig und Halle hohe Aufkommensmengen vorliegen (vgl. Abbildung 6). Denn die anfallenden Mengen hängen von der Bevölkerungszahl ab. Insgesamt sind im Jahr 2019 rund 62.000 Tonnen im Lausitzer und 131.000 Tonnen Altpapier im Mitteldeutschen Revier angefallen.⁹ Das entspricht zusammen etwa 1,3 Prozent des nationalen Altpapieraufkommens von ca. 14,7 Mio. Tonnen. Das Pro-Kopf-Altpapieraufkommen liegt in den Revieren unter dem Bundes-

⁹ Die Daten zum Aufkommen von Altpapier ergeben sich aus der Summe aus öffentlich-rechtlichen sowie dualen Abfallentsorgungsträgern. Die Angaben wurden von den in den Bundesländern zuständigen Abteilungen für Abfallbilanzen übermittelt Landesamt für Umweltschutz (LAU) Sachsen-Anhalt 2019; Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz des Landes Brandenburg 2020b; Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz 2019; Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie 2019.

durchschnitt. Gründe dafür können sein, dass anderweitige und hier nicht erfasste (industriellebezogene) Altpapieraufkommen in anderen Regionen größer sind. Zudem werden gewisse Anteile des Altpapieraufkommens möglicherweise nicht vollumfänglich statistisch erfasst. Altpapier-Recycling ist ein gutes Beispiel für die umfassende Kreislaufwirtschaft. Altpapier bzw. Papier, Pappe, Kartonage (PPK) fallen bei der Abfallsammlung an.

In Kläranlagen wird Abwasser von Schmutz- und Nährstoffen befreit. Übrig bleibt der sogenannte Klärschlamm. Wie viel Klärschlamm anfällt, hängt von der Jahresabwassermenge ab. Diese wird u. a. von der Bevölkerungszahl, dem Trinkwasserverbrauch pro Person, dem Anschlussgrad an die öffentliche Abwasserbehandlung sowie dem Flächenversiegelungsgrad beeinflusst (Statistisches Bundesamt und DWA-Arbeitsgruppe KEK-1.2 „Statistik“ 2014). Klärschlamm kann stofflich verwertet werden und kommt so zum Beispiel in der Landwirtschaft zum Einsatz. Im Jahr 2018 wurde ca. ein Drittel des Klärschlammes im Lausitzer und im Mitteldeutschen Revier zur Düngung verwendet.¹⁰ Darüber hinaus kann Klärschlamm auch energetisch verwertet werden, in der Regel durch Verbrennung. Alternativ wird er nach der Behandlung in der Kläranlage in geringem Maße deponiert. Welcher Verwertung Klärschlamm zugeführt wird, variiert stark zwischen den Landkreisen. Ungenutzte Potenziale gibt es für Klärschlamm nicht. Neben der Verwertung spielt auch das Recycling von Klärschlamm eine bedeutende Rolle. So besteht für die Wasserwirtschaft in Deutschland die rechtliche Verpflichtung, Phosphat zurückzugewinnen.

Als Altholz bezeichnet man Holz, das bereits einem Verwendungszweck zugeführt worden ist und als „Abfall“ zum Recycling oder zur Entsorgung vorgesehen ist. Das meiste Altholz ist innerhalb des Lausitzer Reviers im Jahr 2016 mit 0,15 Mio. Festmeter im Landkreis Dahme-Spreewald angefallen. Im Mitteldeutschen Revier fanden sich die größten Altholzaufkommen in den Landkreisen Anhalt-Bitterfeld (0,12 Mio. m³), Nordsachsen (0,05 Mio. m³) und Leipzig (0,03 Mio. m³). Das Aufkom-

Entwicklung der Biotonne-Abfälle 2010 bis 2018

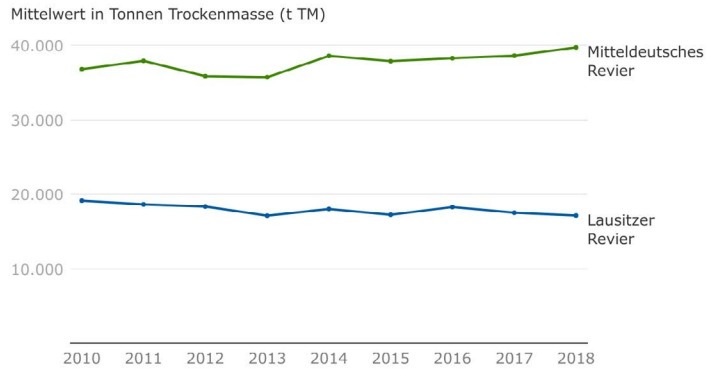


Abbildung 5: Entwicklung der Abfälle aus der Biotonne in den Revieren zwischen 2010 und 2018. Quelle: Statistische Ämter des Bundes und der Länder, Deutschland, Eigene Darstellung.

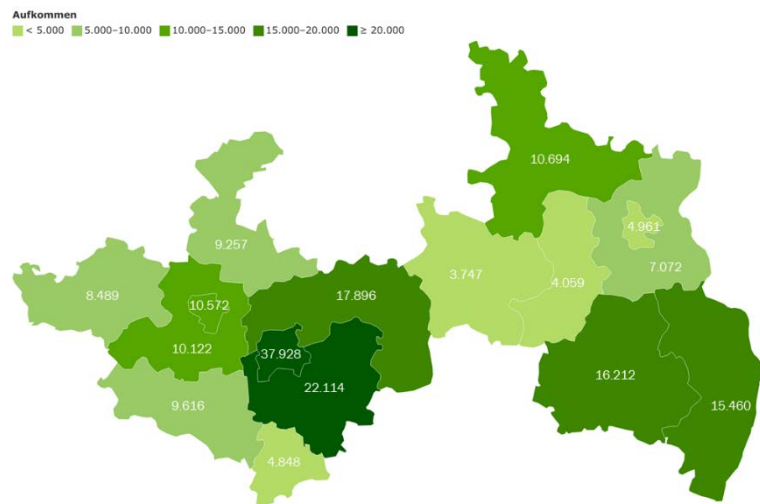


Abbildung 6: Altpapieraufkommen (PPK) in den Revieren 2019 in Tonnen. Quellen: Landesamt für Umweltschutz (LAU) Sachsen-Anhalt 2019; Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz des Landes Brandenburg 2020; Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz 2019.

¹⁰ Im Zuge der Klärschlammverordnungen (und Düngeverordnung) in 2015 und 2017 wurden Grenzwerte und Ausbringungsvorgaben geregelt. Die Nutzung von Klärschlamm zur Düngung wird nach einer Übergangsfrist bis zum Jahr 2029 bzw. 2032 eingestellt – vgl. Lenfers 2019 [3, Seite 611]

men von Altholz beinhaltet die Mengen in inländischen Altholzentsorgungsbetrieben und Importe, die von Entsorgungsbetrieben ausgeführt wurden. Unter Berücksichtigung von Import und Export fielen im Jahr 2016 in Deutschland rund 13,3 Mio. Festmeter Altholz an (Döring et al. 2018). Somit macht die Gesamtmenge an Altholz in den beiden Revieren einen Anteil von rund drei Prozent des deutschen Altholz-Aufkommens aus.

Weitere Daten zum Aufkommen von Rest- und Abfallstoffen sowie Nebenprodukten bietet die Ressourcendatenbank mit über 100 Einzelbiomassen. Die Ressourcendatenbank ist online verfügbar unter: <https://webapp.dbfz.de/resource-database/>. Landkreisscharfe Informationen über spezifische räumliche Biomassepotenziale bietet das DBFZ-Online-Tool „Dashboard Urbane Biomassen“.¹¹ Potenzialinformationen können u.a. für Klärschlamm aus kommunalen Kläranlagen, Bioabfälle, Garten- und Parkabfälle aufgerufen werden. Ziel ist es, ein möglichst vollständiges Bild der regionalen Reststoffbasis in Deutschland darzustellen (Kalcher et al. 2021a). Für die Entwicklung des Abfallaufkommens kann von keiner einheitlichen Prognose ausgegangen werden. Treiber für eine mögliche Zunahme sind kürzere Produktionszyklen und Mechanismen der Konsumgesellschaft. Die Veränderung gesetzlicher Rahmenbedingungen kann hingegen zur Abnahme der Abfallmenge führen: Etwa durch Umweltauflagen, Verpflichtungen zur Vermeidung von Verpackungsabfall an produzierende Betriebe, Stärkung von Reparaturmöglichkeiten oder Design-For-Recycle-Konzepten. Zu Diskussion steht ebenso eine zunehmende Fraktionierung des Abfallsystems zur Separation neuer Materialien und Substanzen. Durch sich ändernde Wertschöpfungsketten wird auch das Abfallaufkommen diverser und Entsorgungssysteme komplexer (Kraemer et al. 2017).

Exkurs: Nebenprodukte (Stroh aus der Landwirtschaft, Restholz aus der Holzwirtschaft)

Im Gegensatz zu Abfällen fallen Nebenprodukte bei Herstellungsverfahren als integraler Bestandteil an und können weiterverwendet werden. Hinsichtlich der Nutzung von Nebenprodukten sind seit einigen Jahren Gründungen von Netzwerken und Start-Ups auf Basis erfolgreicher Forschungsvorhaben zu beobachten. Beispiele dafür sind Verfahren zur Herstellung von Verpackungen auf Basis von Gras (Biowert GmbH, Baden-Württemberg), faserhaltigen Stoffen wie Getreidespelzen oder Tomatenstengeln (BIO-LUTIONS International AG, Hamburg) oder aus Stroh (Landpack GmbH, Bayern). Die Vergärung von Getreidestroh ist ebenfalls eine vielversprechende Nutzungsoption. Hierbei wird Biomethan erzeugt, das z.B. als Kraftstoff in Erdgasfahrzeugen eingesetzt werden kann. Das Getreidestrohaufkommen in den Revieren ist maßgeblich vom Anbau der wichtigsten Getreidearten in den jeweiligen Landkreisen bestimmt. Die höchsten Aufkommen im Mitteldeutschen Revier sind im Burgenlandkreis, Saalekreis und dem Landkreis Leipzig zu finden. Im Lausitzer Revier sticht der Landkreis Bautzen hervor.

Bei der Be- und Verarbeitung von Holz in der Sägeindustrie oder der Holzwerkstoffindustrie fallen Nebenprodukte wie Rinde, Sägenebenprodukte (Sägespäne, Schwarten, Spreißel und Hackschnitzel) oder sonstiges Industrierestholz an. Nennenswerte Vorkommen an Rinde, Sägespäne und Co. finden sich in den Landkreisen Görlitz, Nord-sachsen und Mansfeld-Südharz. Dort befinden sich einige der größten Sägewerke Deutschlands (Holzkurier-Redaktion 2021). Die Höhe des Aufkommens ist abhängig von der Betriebsanzahl, der Kapazität und der eingesetzten Technik der Holzverarbeitenden Industrie. So fielen allein im Lausitzer Revier im Jahr 2016 rund 1,0 Mio. Festmeter und im Mitteldeutschen Revier knapp 0,7 Mio. Festmeter Holz- und forstwirtschaftliche Nebenprodukte an.

11 Dashboard urbane Biomassen online verfügbar unter: <https://dbfz.maps.arcgis.com/apps/opsdashboard/index.html#/>

3.3. Verwertung und Rückgewinnung von Sekundärrohstoffen

(Biogene) Rest- und Abfallstoffe sollen, dem Kreislaufgedanken der Bioökonomie folgend, ebenso wie Nebenprodukte möglichst vollständig und effizient genutzt werden. Die sortenreine Erfassung am Anfallort ist eine kritische Voraussetzung zur stofflichen Verwertung. 2018 verabschiedete das europäische Parlament mit dem Kreislaufwirtschaftspaket Recyclingquoten: ab 2025 müssen mindestens 55 Prozent der Siedlungsabfälle recycelt werden, die Zielvorgabe bis 2035 liegt bei 65 Prozent. Spezifische Ziele sind darunter auch für Verpackungen, Plastik, Holz, Eisenmetalle, Aluminium, Glas sowie Pappe und Papier herausgegeben worden (Europäisches Parlament 18.04.2018). Der auf Basis des European Green Deals entwickelte Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft sieht die Stärkung des EU-Marktes für Sekundärrohstoffe vor, um den Rezyklateinsatz in der Industrie zu steigern.¹²

Die Verwertungsquoten für unterschiedliche Abfallarten in Deutschland werden vom Statistischen Bundesamt erfasst. Anhand der Daten lassen sich die Mengen für stoffliche und energetische Verwertungspfade aufzeigen (Tabelle 8). Siedlungsabfälle werden demnach nur zu geringem Anteil deponiert (0,4%, entspricht 0,2 Mio. t). Etwa 30 Prozent, also 15,5 Mio. Tonnen, landen in Anlagen zur Energiegewinnung, zwei Drittel, bzw. 34,4 Mio. Tonnen, werden stofflich verwertet. Maßgeblich sind hier die Kompostierung von Bioabfällen, die Verwertung von Altpapier sowie die Aufbereitung von Metall- und Kunststoffverpackungen. Die Beseitigung spielt eine größere Rolle bezüglich übriger Abfälle, insbesondere von Industrie- und Gewerbeabfällen (ausgenommen Bau- und Abbruchabfälle, Abfälle aus der Gewinnung von Bodenschätzen). Knapp 30 Prozent werden entweder deponiert, thermisch beseitigt oder zur Beseitigung behandelt. Industrie- und Gewerbeabfälle bestehen teilweise aus gefährlichen Abfällen, die eine Vorbehandlung oder thermische Beseitigung bedingen. Sekundärabfälle, also Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen (z.B. Abfälle aus Pyrolyseanlagen, aus der Verglasung, Gärreste, aus der mechanischen Behandlung) werden in der Hauptsache stofflich aufbereitet (55%), energetisch verwertet (34%) oder deponiert (9%). Bau- und Abbruchabfälle werden maßgeblich stofflich verwertet. Abfälle aus der Gewinnung von Bodenschätzen hingegen werden zu 99 Prozent deponiert (Statistisches Bundesamt (Destatis) 2022c). Regionalisierte Angaben

| Abfallart | Aufkommen | Beseitigung | | | Verwertung | | Verwertungsquote |
|--|-----------|----------------|-----------|-----------|-------------|-----------|------------------|
| | | Ablagerung | thermisch | behandelt | energetisch | stofflich | |
| | | in 1000 Tonnen | | | | | % |
| Siedlungsabfälle | 50.993 | 209 | 395 | 521 | 15.518 | 34.379 | 98 |
| Übrige (insbesondere aus Produktion und Gewerbe) | 47.333 | 8.854 | 2.383 | 1.535 | 11.610 | 22.951 | 73 |
| Sekundärabfälle (aus Abfallbehandlungsanlagen) | 57.719 | 5.243 | 291 | 859 | 19.625 | 31.701 | 89 |

Tabelle 8: Abfallbilanz für ausgewählte Abfallarten im Jahr 2020. Quelle: Statistisches Bundesamt (Destatis) 2022c.

12 Aktionsplan Kreislaufwirtschaft: Circular Economy Action Plan - CEAP.

Im Folgenden wird zunächst auf die energetische Verwertung eingegangen und anschließend exemplarisch innovative stoffliche Verwertungswege für Kunststoffe, Bio- und Lebensmittelabfälle und schließlich Klärschlämme sowie Exkremente dargestellt.

Die energetische Abfallverwertung wird als Schnittstelle zwischen Abfallwirtschaft und Energieversorgung betrachtet. In thermischen Behandlungsanlagen werden definierte Abfallarten verbrannt (z.B. Biomasseheizkraftwerke, Ersatzbrennstoffkraftwerke, Abfallverbrennungsanlagen etc.), um Strom bzw. Wärme zu produzieren. In der Untersuchungsregion befinden sich zur thermischen Verwertung von Abfällen u.a. das Kraftwerk Sonne in Freienhufen (Oberspreewald-Lausitz), eine Anlage in Lauta (Bautzen) mit einer Kapazität von jährlich bis zu 225.000 Tonnen und die thermische Restabfallbehandlungsanlage der SITA Abfallverwertung GmbH in Lützen (Burgenlandkreis). In Lützen werden jährlich etwa 300.000 Tonnen Müll verarbeitet, wobei eine Leistung von 107 MW erbracht wird. Die Anlage zur Energieerzeugung aus Restabfall im Chemiepark Leuna läuft mit einer jährlichen Kapazität von 390.000 Tonnen und wird vom Mannheimer Energieversorgungsunternehmen MVV betrieben. Im Chemiepark Bitterfeld-Wolfen unterhält das Unternehmen PD energy GmbH eine Anlage zur thermischen Verwertung von 140.000 Tonnen Restabfall pro Jahr. In den Chemieparks wird die produzierte Wärme direkt zur Dampf- und Wärmeversorgung genutzt.

Auch in mehreren Kohlekraftwerken ist die thermische Abfallverwertung üblich. Die hohe Temperatur eignet sich zur emissionsarmen Verbrennung von Abfällen. Im Kraftwerk Schwarze Pumpe (Bautzen) werden 600.000 Tonnen Abfälle jährlich verbrannt. Im Kraftwerk Jänschwalde (Spree-Neiße) wird mit behandelten und pelletierten Abfällen als „Ersatzbrennstoffen“ zur Energiegewinnung gearbeitet. Kürzlich wurde dort eine neue Müllverbrennungsanlage der Lausitz Energie Kraftwerke AG (LEAG) zur Strom- und Wärmebereitstellung genehmigt. Die Anlage soll ab dem Jahr 2026 maximal 480.000 Tonnen aufbereitete Abfälle jährlich verwerten (Lausitz Energie Bergbau AG 29.04.2022). Die LEAG plant außerdem die thermische Abfallverwertung im Kraftwerk Boxberg (Görlitz). Voraussichtlich ab 2023 sollen bis zu 300.000 Tonnen im Jahr verwertet werden (Lausitz Energie Bergbau AG 26.10.2020). Auch die Verbrennung von Klärschlämmen ist in einigen Kohlekraftwerken üblich.¹³

Die energetische Verwertung eignet sich aufgrund des vergleichsweise hohen Heizwertes auch für Kunststoffabfälle.¹⁴ Im Jahr 2019 wurden 3,3 Mio. Tonnen Kunststoffabfälle zur Energieerzeugung genutzt. Insgesamt lag die verwertete Menge bei 6,2 Mio. Tonnen. Etwa 47 Prozent wurden recycelt und zu neuen Werk- oder Rohstoffen umgesetzt (Umweltbundesamt 2021a).¹⁵ Die Menge verwerteter Kunststoffabfälle in Deutschland hat in den letzten Jahren zugenommen. Im Jahr 2005 wurden nur etwa 3,7 Mio. Tonnen verwertet. Dazu sinkt der Export von Kunststoffabfall. Im Jahr 2021 wurden mit 766.200 Tonnen ein Viertel weniger Kunststoffabfälle aus Deutschland exportiert als im Jahr 2020. Zehn Jahre zuvor wurden noch etwa doppelt so viel Kunststoffabfälle ausgeführt. Grund dafür ist der Importstopp von unsortiertem Plastikabfall von China seit 2018. Dennoch exportierte Deutschland 2021 die größte Menge Kunststoffabfälle im europäischen Vergleich (Statistisches Bundesamt 07.06.2022).

Beim stofflichen Recycling von Kunststoffen sind mechanische Methoden geläufig, bei dem die Stoffe eingeschmolzen und wieder zu Granulat des Ausgangskunststoffs verarbeitet werden. Neue Produkte aus Kunststoffabfällen herzustellen ist hingegen Kern des chemischen Recyclings. Dabei können Kunststoffabfälle thermo-chemisch in Pyrolyseöl umgewandelt werden, das fossile Rohstoffe in der Produktion ersetzt. Der Chemiekonzern BASF SE arbeitet im ChemCycling-Projekt auf die Umsetzung dieser Technologie im industriellen Maßstab hin. Alternativen zum mechanischen Kunststoffrecycling werden auch in Pilotanlagen des Fraunhofer-Institut UMSICHT in Oberhausen

¹³ Kraftwerke Boxberg, Lippendorf (Landkreis Leipzig), Wühlwitz (Burgenlandkreis), bis 2021 im Kraftwerk Deuben (Burgenlandkreis) - vgl. Umweltbundesamt 2004.

¹⁴ Heizwerte im Vergleich (in MJ/kg): Papier: 17; Holz: 18; Kohle: 25-35; Erdgas: 32-45; Polystyrol: 40; Polypropylen: 44; Heizöl: 44; Polyethylen: 46 - vgl. Martens und Goldmann 2016.

¹⁵ Rund 40.000 Tonnen sind weder für die stoffliche noch energetische Verwertung geeignet und müssen deponiert oder beseitigt werden.

erprobt (iCycle-Plattform). Auch in einer Pilotanlage des Projekts Reoil von OMV AG in Österreich werden Kunststoffabfälle zu synthetischem Rohöl umgewandelt, aus dem kurzkettige Ausgangsstoffe für chemische Synthese gewonnen werden können. Die APK AG aus Merseburg im Saalekreis hat eine lösemittelbasierte Recycling-Technologie für Kunststoffabfälle hochskaliert. Aus gemischten Kunststoffabfällen und Mehrschichtverpackungen werden sortenreine Kunststoffe herausgelöst. Farbloses PET-Rezyklat kann dort mit einer Produktionsmenge von etwa 8.000 Tonnen erzeugt werden (Scheuermann 2022).¹⁶

Neben Kunststoffabfällen werden auch Bio- und Lebensmittelabfälle stofflich verwertet. Im Jahr 2019 wurden in Deutschland etwa 4,6 Mio. Tonnen Bioabfälle und 0,9 Mio. Tonnen Speiseabfälle aus Kantinen und Restaurants behandelt. Stark wasserhaltige Bio- und Speiseabfälle sind für eine Vergärung mit Biogasnutzung und anschließender stofflicher Verwertung der Gärreste (Dünger) geeignet. Holzhaltige Bestandteile des Grünabfalls lassen sich energetisch nutzen. Für Lignin- und zellulosereiches Pflanzenmaterial ist die Kompostierung und die Herstellung von Qualitätskompost ein etablierter Verwertungspfad. In Kompostierungsanlagen verarbeiten Mikroorganismen organische Abfälle zu Humus. Darin enthalten sind zahlreiche Nährstoffe wie Magnesium, Kalium, Phosphor und Nitrate. Mehr als die Hälfte des in Deutschland erzeugten Komposts wird in der Landwirtschaft genutzt (Umweltbundesamt 2021c).

Ein Nachteil der Kompostierung ist, dass immer auch Kohlenstoffdioxid entsteht. Außerdem enthalten Bioabfälle, insbesondere Lebensmittelabfälle, teilweise hochwertige Komponenten. Die Waste-to-Resource-Unit des Instituts für Lebensmittel- und Umweltforschung e.V. aus Brandenburg widmet sich der Rückgewinnung von Wertstoffen aus Lebensmittelabfällen.¹⁷ In einer modularen Bioraffinerie werden aus den Rest- und Abfallstoffen Stickstoff- und Kohlenstoffverbindungen erzeugt. Mikroalgen nutzen diese Stoffe als Nahrung und produzieren bei ihrem Wachstum eine Mischung aus Antioxidanzien, Pigmenten und Vitaminen. Überall dort, wo Rest- und Abfallstoffe der Lebensmittelindustrie anfallen, z.B. in Kantinen und produzierenden Betrieben, können diese modularen Raffinerien zum Einsatz kommen. Idealerweise wird der Kreislauf geschlossen, indem die produzierten Wertstoffe in der Lebensmittelproduktion verwendet werden. Solche lokalen Stoffströme bieten Entwicklungsmöglichkeiten für neue Geschäftskonzepte und Arbeitsplätze.

Auch Insekten können Rest- und Abfallstoffe aus der Lebensmittelproduktion verwerten, wie z.B. Gemüseabfälle, Brot, Schlachtabfälle, unverwertbare Reststoffe. In kurzer Zeit entsteht daraus hochwertiges Protein im Insektenkörper. Die abgesiebten Maden oder Larven von Soldatenfliegen, Mehlwürmern etc. eignen sich in Form von Insektenmehl, extrahiertem Protein oder Fett für die tierische¹⁸ oder menschliche Ernährung. Der Insektenkot lässt sich als Produktionsrückstand abtrennen und als Kohlenstoffdünger für langfristige Düngeoptionen verwenden (Forschungsinstitut für biologischen Landbau (FiBL) 2021). Das Modell der Eiweißproduktion im Inland könnte zukünftig einen wichtigen Beitrag zur Futtermittelsicherung leisten und durch Expansion des Geschäftsmodells zur Schaffung von Arbeitsplätzen beitragen.¹⁹

Mit dem Ziel einer kommunalen Nährstoffwende haben sich im Rahmen der Arbeiten des Forschungskonsortiums "zirkulierBAR" elf Partner, darunter auch das DBFZ, und rund 20 Kommunen zusammengeschlossen.²⁰ Im Zentrum steht die Rückgewinnung von Nährstoffen aus menschlichen Exkrementen zur Düngung in der Landwirtschaft. Dazu kooperierten die Kreiswerke Barnim GmbH

16 Nähere Informationen zum Recycling von Kunststoffen finden sich auch bei Fürst, K. (2022): Chemische, Pharmazeutische und Kunststoffindustrie im Mitteldeutschen Revier und im Lausitzer Revier – Sektorstudie im Rahmen des MoreBio Projekts. DBFZ - Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH. Leipzig.

17 Waste-to-Resource-Unit des Instituts für Lebensmittel- und Umweltforschung ILU: <https://www.ilu-ev.de/portfolio-items/waste-to-resource-unit-w2ru/>, letzter Zugriff: 22.09.2022.

18 Insekten zählen natürlicherweise zur Kost von Allesfressern und sind damit für Schweine, Hühner und viele Speisefische geeignet – vgl. DLG e.V. 2022.

19 Für nähere Informationen sei auf Fürst, K. et al. (2022): Ernährungswirtschaft im Mitteldeutschen Revier und im Lausitzer Revier – Sektorstudie im Rahmen des MoreBio Projekts. DBFZ - Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH, Leipzig, verwiesen.

20 zirkulierBAR: <https://zirkulierbar.de/das-projekt/>, letzter Zugriff: 22.09.2022.

und die Finizio GmbH. In der bestehenden Pilotanlage „Future Sanitation“ in Eberswalde werden gewerblich gesammelte Inhalte aus Trockentoiletten zu Humus und flüssigem Mehrnährstoffdünger veredelt. Einerseits sollen die Qualität und hygienische Unbedenklichkeit der Recyclingdünger nachgewiesen und standardisiert werden. Andererseits sollen die rechtlichen und kulturellen Barrieren abgebaut werden. Ein Teil der Abwasseraufbereitung würde dadurch entfallen. Mittel- und langfristig könnten solche Systeme bundesweit (bei Neubausiedlungen, auf Festivals oder in Tourismusgebieten) zum Einsatz kommen und die lineare Entsorgung zu einem kreislaufwirtschaftlichen System transformieren.



Die Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlämmen ist ein gutes Beispiel für die Umsetzung des Kreislaufgedankens.

Abwässer aus Toiletten, Sanitäreinrichtungen, Küchen und Waschmaschinen sowie aus Industrie- und Gewerbebetrieben usw. werden klassischerweise in Kläranlagen aufbereitet. Der dabei entstehende Klärschlamm muss fachgerecht entsorgt werden. Seit 2005 ist in Deutschland dessen Deponierung untersagt. Auch Klärschlämme werden energetisch oder stofflich verwertet.

Die Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlämmen ist ein Paradebeispiel für die Umsetzung des Kreislaufgedankens. Das Bündnis Abonocare²¹ konzentriert sich auf Technologien und Dienstleistungen für die Produktion hochwertiger Düngerspezialprodukte aus entsorgungskritischen organischen Reststoffen wie Klärschlamm, Gülle und Gärprodukten. Das Nährstoffrecycling entlastet die Umwelt, da ein Entsorgungsproblem behoben wird. Die Deponierung beispielsweise von Klärschlammmasche ist gängige Praxis, allerdings bringt jede Deponierung Umweltproblem mit sich. Gleichzeitig kann die notwendige Menge an neuem Rohphosphat sowie dessen Abbau und Transport reduziert werden.

Bei Faulungen von Klärschlämmen laufen ähnliche Prozesse ab wie bei der Biogaserzeugung. Im Projekt „FLXsynErgy“ soll der Wissenstransfer zwischen Expert*innen für Biogas- und Kläranlagentechnik gefördert werden. Vorgesehen ist die Entwicklung eines Verfahrens und Anlagenkonzepts zur flexiblen vollenergetischen Nutzung biogener Rest- und Abfallstoffe durch Faulungen in Kläranlagen. Anstatt der teuren Entsorgung kann Klärschlamm in einer solchen Anlage zur Energieerzeugung und -speicherung verwendet werden (DBFZ 2022c).

21 Bündnis Abonocare: <https://abonocare.de/ueber-uns.html>, letzter Zugriff: 22.09.2022.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Die Analysen beziehen sich auf Strukturen der Energieversorgung sowie die Entsorgungswirtschaft. Potenziale sowie die wirtschaftliche Bedeutung in Deutschland und in den Revieren Mitteldeutschland und der Lausitz wurden herausgearbeitet. Für die Energieversorgung liegt der Fokus auf der Bereitstellung und der Nutzung von Energie aus Biomasse. Für die Entsorgungswirtschaft stehen das Abfallaufkommen und die Verwertung im Mittelpunkt. Bemerkenswert ist, dass zahlreiche innovative Lösungen im Kontext einer kreislauforientierten Bioökonomie vorangetrieben werden.

Wesentliche Trends der Energiebranche liegen in der Steigerung des Einsatzes von erneuerbaren Energien. Die Energiewende als wesentlicher Beitrag zur Emissionsminderung steht im Zentrum der Entwicklungen und birgt Wachstumschancen. Die Digitalisierung trägt zur Prozess- und Verteilungseffizienz bei. Zum Schutz dieser kritischen Infrastrukturen sind darüber hinaus umfangreiche Sicherungssysteme notwendig. Herausfordernd ist neben rechtlichen Vorgaben auch die Sicherung der Energiebereitstellung. Die hohe Abhängigkeit von fossilem Erdgas aus dem Ausland und der schleppende Ausbau der erneuerbaren Energien bergen große Risiken für die Energiebranche.

Die Anpassung rechtlicher Rahmenbedingungen kann Fortschritte der erneuerbaren Energien begünstigen. Zur Stärkung der Bioenergie für eine konsistente Klimaschutz- und Energiepolitik sind folgende Empfehlungen zu berücksichtigen (Bett et al. 2020):

- Politische und regulatorische Gestaltung eines fairen Wettbewerbs und die Beseitigung der üblichen Wettbewerbsverzerrungen zugunsten fossiler Energieträger
- Festlegung ökologischer Standards: zur Erzeugung, Verarbeitung und Verwendung von Biomasse (unter Berücksichtigung von Aspekten wie Biodiversitätsförderung, positiver Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, Insektenfreundlichkeit usw.)
- Klare Zielvorgaben: eindeutiges Bekenntnis zur Klimaneutralität bis 2045
- Ausrichtung der Forschung: Sektorenübergreifende Integration von Bioenergie, Innovationsförderungen zur Anhebung von TRL auf industrielle Maßstäbe (marktorientierte Forschungsverbände, Innovationscluster, Netzwerke, Plattformen)

In der Entsorgungsbranche zählen neben der Reduktion der CO₂-Emissionen die Stärkung des Recyclings zu den wesentlichen Handlungsfeldern. Neue Technologien wie das chemische Recycling von Kunststoffen, die optimierte Sammlung und Sortierung sowie Aufklärung der Verbraucher*innen liegen neben der Digitalisierung im Trend. Doch auch hier verursachen steigende Energiekosten, fehlende gesetzliche Rahmenbedingungen zur Etablierung neuer Technologien sowie wachsender Fachkräftemangel Unsicherheiten. Daneben wird die fehlende Kooperation zwischen Werkstoff- und Produktentwicklung, Recycling, Behörden und Gesetzgebern sowie Forschungseinrichtungen als Hindernis wahrgenommen.

Zielführende Maßnahmen hinsichtlich der Anpassung rechtlicher Rahmenbedingungen schließen Instrumente für besseres Recycling ein, um das Schließen der Kreisläufe bei möglichst vielen Stoffströmen zu erreichen. Dazu zählen neben Vorschriften auch marktgestützte Instrumente wie beispielsweise Steuern auf fossile Rohstoffe und Investitionsförderung zur Entwicklung der Abfallbewirtschaftungsinfrastrukturen. Der Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Kreislaufwirtschaft e.V. (BDE) empfiehlt folgende Maßnahmen:

- Stoff- und produktspezifische Rezyklateinsatzquoten
- Motivation zu einem nachhaltigeren Produktdesign zur Förderung des Recyclings von Wertstoffen gebrauchter Güter (Design-for-Recycling)

- Ausbau der Herstellerverantwortung (Recyclingfähigkeit neuer, komplexer Produkte)
- Stärkung von Netzwerken, die relevante Akteure zusammenbringen

Im Kontext der Bioökonomie wird in der Energie- und Entsorgungswirtschaft die Nutzung von Nebenprodukten, Rest- und Abfallstoffen von Interesse sein. Zum einen zur Energieerzeugung, zum anderen zur Vermeidung von Abfällen und deren aufwendiger Behandlung und Entsorgung. Neben der Entwicklung fortschrittlicher Technologien für Nutzung und Verarbeitung sind Verfügbarkeiten und Mobilisierungsstrategien Gegenstand der Forschung. Entscheidend ist die zielstrebige Etablierung neuer Nutzungsmöglichkeiten am Markt. Dazu leisten auch rechtliche Steuerungsmaßnahmen ihren Beitrag.

Literaturverzeichnis

Bett, Andreas W.; Krugel, Georg; O'Sullivan, Marlene; Gils, Hans Christian; Wenske, Jan; Hauch, Jens et al. (2020): Erneuerbare Energie. Chancen einer industriellen Wertschöpfung in Europa. FVEE-Tagungsband Wettbewerbsfähigkeit.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Hg.) (2016): Eine moderne Abfallwirtschaft. Ziele und Wege. Deutschlands Know-how für eine moderne Kreislaufwirtschaft. Berlin.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (2022): Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts. WHG, vom Wasserhaushaltsgesetz vom 31.07.2009 (BGBl. I S. 2585), das zuletzt durch Artikel 12 des Gesetzes vom 20.07.2022 (BGBl. I S. 1237) geändert worden ist, § 54 (1), S. 37.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hg.) (2020): Integrierter Nationaler Energie- und Klimaplan. Berlin.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hg.) (2019): Energieeffizienzstrategie 2050. Berlin.

Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen; Bundeskartellamt (Hg.) (2022): Monitoringbericht 2021. Bonn.

Bundesregierung (2020): Nationale Bioökonomiestrategie. Hg. v. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Berlin. Online verfügbar unter https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/nationale-biooekonomiestrategie-langfassung.pdf?__blob=publicationFile&v=5.

Bundesverband Bioenergie e.V. (BBE) (02.06.2022): Austausch mit UBA-Präsident Prof. Messner zur Holzenergie. Verbände betonen gegenüber Umweltbundesamt die Bedeutung moderner Holzenergie. Berlin. Milinski, Katharina.

DBFZ (Hg.) (2021): OBEN - Öl-Ersatz Biomasse Heizung. Online verfügbar unter <https://www.dbfz.de/oben-oelersatz-biomasse-heizung>, zuletzt geprüft am 08.08.2022.

DBFZ (Hg.) (2022a): Die Rolle von Biogas für eine sichere Gasversorgung in Deutschland.

DBFZ (Hg.) (2022b): FLXsynErgy - Flexible und vollenergetische Nutzung biogener Rest- und Abfallstoffe: Faulungen und Biogasanlagen als Energieverbraucher, -speicher und -erzeuger. Online verfügbar unter <https://www.energetische-biomassennutzung.de/projekte-partner/details/project/show/Project/FLXsynErgy-662>, zuletzt geprüft am 08.08.2022.

DBFZ (Hg.) (2022c): Pilot-SBG: Pilotanlage Synthetisiertes Biogas. Online verfügbar unter <https://www.dbfz.de/projektseiten/pilot-sbg/start>, zuletzt geprüft am 08.08.2022.

Deutsche Energie-Agentur (Hg.) (2022): Pumpspeicher. Wasserkraft als Stromspeicher. Online verfügbar unter <https://www.dena.de/themen-projekte/energiesysteme/flexibilitaet-und-speicher/pumpspeicher/>, zuletzt geprüft am 26.04.2022.

DLG e.V. (Hg.) (2022): Insektenprotein – eine Chance für die Nutztierfütterung? Podcast Netzwerk, Fokus Tierwohl. Online verfügbar unter <https://fokus-tierwohl.de/de/mediathek/podcasts/insektenprotein-in-der-nutztierfuetterung>, zuletzt geprüft am 08.04.2022.

Döring, Przemko; Cords, Marius; Mantau, Udo (2018): Altholz im Entsorgungsmarkt. Aufkommen und Verwertung 2016. Rohstoffmonitoring Holz - Teilbericht. Universität Hamburg; INFRO e. K. - Informationssysteme für Rohstoffe. Online verfügbar unter http://www.infro.eu/downloads/studien/5_Altholz%20im%20Entsorgungsmarkt%202016.pdf, zuletzt geprüft am 02.02.2021.

Dotzauer, Martin; Barchmann, Tino; Schmieder, Uta; Rensberg, Nadja; Stinner, Walter; Arnold, Karin; Krüger, Christine (2022): Kurzstudie zur Rolle von Biogas für ein klimaneutrales, 100 % erneuerbares Stromsystem 2035 (KS_BSKES). Hg. v. DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH.

Dotzauer, Martin; Pfeiffer, Diana; Thrän, Daniela; Lenz, Volker; Pohl, Marcel; Müller-Langer, Franziska (2017): Technologiebericht. Bioenergie innerhalb des Forschungsprojekts TF_Energiewende. (Technologien für die Energiewende - Teilbericht 2). Hg. v. Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH.

envia Mitteldeutsche Energie AG (Hg.) (2022): Energie für Ostdeutschland. Online verfügbar unter <https://www.enviam-gruppe.de/unternehmen/enviam-gruppe/unternehmen-der-gruppe>, zuletzt geprüft am 08.08.2022.

Europäisches Parlament (18.04.2018): Abfall- und Kreislaufwirtschaft: Mehr Recycling, weniger Müll. Brüssel. Chatain, Baptiste. Online verfügbar unter <https://www.europarl.europa.eu/news/de/press-room/20180411IPR01518/abfall-und-kreislaufwirtschaft-mehr-recycling-weniger-mull>, zuletzt geprüft am 01.09.2022.

EVA Jänschwalde GmbH & Co. KG (24.11.2020): Veolia und LEAG gründen Gemeinschaftsunternehmen. EVA Jänschwalde GmbH & Co. KG bietet Entsorgungslösung für die Region. Cottbus. Gerstner, Kathi. Online verfügbar unter <https://www.leag.de/de/news/details/veolia-und-leag-gruenden-gemeinschaftsunternehmen/>, zuletzt geprüft am 31.08.2022.

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (Hg.) (2016): Leitfaden Biogas. Von der Gewinnung zur Nutzung.

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (Hg.) (2017): OptiFlex: Biogasanlagen fit machen für die flexible Stromerzeugung im Post-EEG-Zeitalter. Online verfügbar unter <https://biogas.fnr.de/service/presse/news-archiv/archiv-nachricht/optiflex-biogasanlagen-fit-machen-fuer-die-flexible-stromerzeugung-im-post-eeg-zeitalter>, zuletzt aktualisiert am 02.11.2017, zuletzt geprüft am 08.08.2022.

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (Hg.) (2020): Wärme. Biogas und Biomethan im Wärmemarkt. Online verfügbar unter <https://biogas.fnr.de/biogas-nutzung/waerme>, zuletzt geprüft am 08.08.2022.

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (Hg.) (2022): Untersuchung der Eignung landwirtschaftlicher Reststoffe zur Flexibilisierung des Biogasprozesses mittels modellgestützter Methoden und Verschneidung der Ergebnisse mit vorhandenen Mengenpotenzialen. Akronym: RestFlex. Online verfügbar unter <https://www.fnr.de/index.php?id=11150&fkz=22041818>, zuletzt geprüft am 25.08.2022.

Falkner, Thomas (2021): Die Energiewende stockt. Koalitionsvertrag im Check, Teil 3. Hg. v. MDR Wirtschaft & Ratgeber. Online verfügbar unter <https://www.mdr.de/nachrichten/deutschland/wahlen/bundestagswahl/koalitionsvertrag-bilanz-energie-kohle-100.html>, zuletzt aktualisiert am 17.09.2021, zuletzt geprüft am 31.08.2022.

Forschungsinstitut für biologischen Landbau (FiBL) (Hg.) (2021): Insektenmehl im Geflügel- und Fischfutter. Potential und Grenzen der alternativen Proteinquelle. Frick. Online verfügbar unter <https://www.fibl.org/fileadmin/documents/shop/1161-hermetia.pdf>, zuletzt geprüft am

18.11.2021.

Fraunhofer IKTS (28.07.2022): Wie Essensreste künftig Flugzeuge antreiben. Dresden. Schwarz, Katrin. Online verfügbar unter https://www.ikts.fraunhofer.de/de/presse/pressemitteilungen/2022_7_28_p_wie_essensreste_kuenftig_flugzeuge_antreiben.html, zuletzt geprüft am 10.08.2022.

EEG 2021, vom 21.07.2014 (BGBl. I S. 1066), zuletzt am 20.07.2022 (BGBl. I S. 1353) geändert: Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien. Fundstelle: 754-27.

Hiebel, Markus; Nühlen, Jochen (2017): Herausforderungen und Grenzen einer Circular Economy. In: Müll und Abfall, 12.03.2017 (12/17), S. 596–602.

Kalcher, Jasmin; Naegeli de Torres, Friederike; Gareis, Elisa; Cyffka, Karl-Friedrich; Brosowski, André (2021): Dashboard biogene Rohstoffe in Deutschland. In: Open Agrar Repositorium. DOI: 10.48480/95ct-gn40.

Kern, Michael; Raussen, Thomas (2011): Biogas-Atlas 2011/12. Anlagenhandbuch der Vergärung biogener Abfälle in Deutschland. Witzhausen.

Kraemer, Gerrit; Weingarte, Jörg; Wohlert, Jale (2017): Branchenanalyse Abfallwirtschaft. Entwicklungstendenzen und strukturelle Herausforderungen unter besonderer Berücksichtigung der kommunalen Dienstleistungen. Hg. v. Hans-Böckler-Stiftung. Stuttgart (354).

Kropp, Per; Sujata, Uwe (2021): Beschäftigungsstrukturen und Potenziale der Bioökonomie in den deutschen Braunkohlerevieren. Nürnberg (IAB-Discussion Paper, 14).

Landesamt für Umweltschutz (LAU) Sachsen-Anhalt (2019): Abfallbilanzen. Online verfügbar unter <https://lau.sachsen-anhalt.de/wir-ueber-uns-publikationen/fachpublikationen/abfallbilanzen/>, zuletzt geprüft am 28.04.2022.

Lausitz Energie Bergbau AG (26.10.2020): Boxberg plant Investition in weitere thermische Verwertung. Neue technische Anlagen für die Kraftwerksblöcke Q und R geplant. Cottbus. Gerstner, Kathi. Online verfügbar unter <https://www.leag.de/de/news/details/boxberg-plant-investition-in-weitere-thermische-verwertung/>.

Lausitz Energie Bergbau AG (29.04.2022): EVA Jänschwalde erhält Genehmigungsbescheid. Perspektive für umweltgerechte Entsorgung mit Strom- und Wärmelieferung gesichert. Cottbus. Gerstner, Kathi. Online verfügbar unter <https://www.leag.de/de/news/details/eva-jaenschwalde-erhaelt-genehmigungsbescheid/>, zuletzt geprüft am 01.09.2022.

Lenfers, Christina (2019): Trockenheit sorgt für Rückgang bei Bioabfällen. Hg. v. Topagrar. Online verfügbar unter <https://www.topagrar.com/panorama/news/trockenheit-sorgt-fuer-rueckgang-bei-bioabfaellen-11945413.html>, zuletzt geprüft am 30.06.2021.

Martens, Hans; Goldmann, Daniel (Hg.) (2016): Recyclingtechnik. Fachbuch für Lehre und Praxis. 2. Aufl. Berlin: Springer.

Mederake, Linda (2022): Eine Kreislaufwirtschaft für Kunststoffe. Aktuelle Diskussionen, Trends und politische Herausforderungen. In: Müll und Abfall, 02.05.2022 (2/22), S. 77–83.

Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz des Landes Brandenburg (2020): Siedlungsabfallbilanzen. Online verfügbar unter <https://mluk.brandenburg.de/mluk/de/ueber-uns/oeffentlichkeitsarbeit/veroeffentlichungen/detail/~09-12-2021-abfallbilanzen-der-oeffentlich-rechtlichen-entsorgungstraeger>, zuletzt geprüft am 28.04.2022.

REMONDIS Recycling GmbH & Co. KG (Hg.) (2019): Neue PET-Aufbereitungsanlage in Betrieb. REMONDIS investiert weiter in das Recycling von Kunststoffverpackungen. Online verfügbar unter <https://www.remondis-recycling.de/aktuelles/detail/neue-pet-aufbereitungsanlage-in-betrieb/>, zuletzt aktualisiert am 12.08.2019, zuletzt geprüft am 08.08.2022.

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (2019): Abfallbilanzen. Online verfügbar unter <https://www.wertstoffe.sachsen.de/aufkommen-von-siedlungsabfaellen-9884.html>, zuletzt geprüft am 28.04.2022.

Scheuermann, Armin (2022): Dow schließt sich Recycling-Konsortium Cyclyx an. Kreislaufwirtschaft. Online verfügbar unter <https://www.chemietechnik.de/markt/dow-schliesst-sich-recycling-konsortium-cy Clyx-an-973.html>, zuletzt geprüft am 01.09.2022.

Sparkassen-Finanzportal GmbH (Hg.) (2021a): Branchenreport 2021. Energieversorgung. WZ-Code 35.

Sparkassen-Finanzportal GmbH (Hg.) (2021b): Branchenreport 2021. Erneuerbare Energien. WZ-Code 35.11.

Statistisches Bundesamt (07.06.2022): 2021 wurde 25 % weniger Plastikmüll exportiert als im Vorjahr. Nr. N 035. Wiesbaden. Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2022/06/PD22_N035_51.html, zuletzt geprüft am 01.09.2022.

Statistisches Bundesamt und DWA-Arbeitsgruppe KEK-1.2 „Statistik“ (2014): Abwasser und Klärschlamm in Deutschland - statistische Betrachtungen. Teil 1: Abwasserbehandlung, Korrespondenz Abwasser (Abfall, (61) Nr. 12).

Statistisches Bundesamt (Destatis) (Hg.) (2022a): Energieverbrauch - Jahressumme - regionale Tiefe: Kreise und krfr. Städte (43531-01-02-4).

Statistisches Bundesamt (Destatis) (Hg.) (2022b): Kurzübersicht Abfallbilanz - Zeitreihe. Abfallwirtschaft. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Tabellen/liste-abfallbilanz-kurzuebersicht.html>, zuletzt aktualisiert am 29.08.2022.

Thissen, Karin (2022): Chemisches Recycling: Kreislauf-Lösung für Mischkunststoffe. Kooperation von ALBA und OMV. recyclingnews. Hg. v. Interzero GmbH & Co. KG. Online verfügbar unter <https://www.recyclingnews.de/recycling/chemisches-recycling-kreislauf-loesung-fuer-mischkunststoffe/>, zuletzt geprüft am 31.08.2022.

Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz (2019): Abfallbilanzen. Online verfügbar unter <https://tlubn.thueringen.de/service/downloads-formulare>, zuletzt geprüft am 28.04.2022.

TotalEnergies S.E. (Hg.) (2022): Die Energie erfindet sich neu. TOTAL wird zu TotalEnergies. Online verfügbar unter <https://corporate.totalenergies.de/de/unsere-neue-identitaet-totalenergies>, zuletzt geprüft am 25.08.2022.

Umweltbundesamt (Hg.) (2004): Daten zur Anlagentechnik und zu den Standorten der thermischen Klärschlammbehandlung in der Bundesrepublik Deutschland. 3. Aufl. Unter Mitarbeit von Tim Hermann und Kerstin Goldau.

Umweltbundesamt (Hg.) (2021a): Kunststoffabfälle. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/kunststoffabfaelle>, zuletzt geprüft am 29.08.2022.

Umweltbundesamt (Hg.) (2021b): Bioabfälle. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/bioabfaelle#bioabfalle-gute-qualitat-ist-voraussetzung-fur-eine-hochwertige-verwertung>, zuletzt geprüft am 01.09.2022.

Umweltbundesamt (Hg.) (2021c): Abfallaufkommen. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/abfallaufkommen>, zuletzt geprüft am 29.08.2022.

Umweltbundesamt (Hg.) (2022a): Indikator: Erneuerbare Energien. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren/indikator-erneuerbare-energien>, zuletzt aktualisiert am 28.03.2022, zuletzt geprüft am 08.08.2022.

Umweltbundesamt (Hg.) (2022b): Primärenergieverbrauch. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/primaerenergieverbrauch>, zuletzt aktualisiert am 25.03.2022, zuletzt geprüft am 21.07.2022.

Umweltbundesamt (Hg.) (2022c): Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland. unter Verwendung von Daten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat). Online verfügbar unter <https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/zeitreihen-zur-entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-1990-2021.pdf>, zuletzt geprüft am 08.08.2022.

Vattenfall (Hg.) (2022a): Goldisthal – das größte Pumpspeicherkraftwerk Deutschlands. Online verfügbar unter <https://powerplants.vattenfall.com/de/goldisthal/>, zuletzt aktualisiert am 24.04.2022.

Vattenfall (Hg.) (2022b): Pumpspeicherkraftwerk Markersbach – eines der größten Wasserkraftwerke in Europa. Online verfügbar unter <https://powerplants.vattenfall.com/de/markersbach/>, zuletzt geprüft am 26.04.2022.

VERBIO Vereinigte BioEnergie AG (Hg.) (2022): Porträt. Online verfügbar unter <https://www.verbio.de/unternehmen/portraet/>, zuletzt geprüft am 31.08.2022.

Weinrich, Sören; Paterson, Mark; Roth, Ursula (2020): Leitfaden zur Substrat- und Effizienzbewertung an Biogasanlagen. Hg. v. gemeinnützige GmbH (DBFZ). Leipzig (DBFZ Report, 35).

Anhang

| Bezeichnung | Herkunft | Materialien |
|--|--|---|
| Abfälle aus der Herstellung und Verarbeitung von Lebensmitteln | Lebensmittelindustrie, Gastronomie | Obst- und Gemüseschalen und Kerngehäuse, Getreidespelzen, gebrauchtes Speiseöl, Kakaoschalen, Kaffeesatz, Abfälle aus der Produktion von Zucker, Melasse oder Hefeextrakt etc. |
| Landwirtschaftliche Abfälle | Pflanzenbau und Tierhaltung | Gülle, Gras, Einstreu, Futtermittel etc. |
| Landschaftspflegeabfälle | Kommunale Landschaftspflege, private Gärten | Grünschnitt, Äste, Wurzeln, Laub, Schilf etc. |
| Forstwirtschaftliche Abfälle | Forstbetrieb | Rinde, Äste, Laub, Sägespäne, Schadholz etc. |
| Abfälle aus der Leder-, Pelz- und Textilindustrie | Textil- und Lederherstellung | Fleischabschabungen und Häuteabfälle, Entfettungsabfälle, Lösungsmittelrückstände, unbehandelte Textilfasern etc. |
| Abfälle aus (an) organisch-chemischen Prozessen | Chemisch-pharmazeutische Industrie, Laboratorien | Verschiedene Säuren (Phosphor-, Salpeter-, Schwefelsäure etc.), Schwermetallhaltige Lösungen, Lösungsmittel und Waschflüssigkeiten, Filterkuchen etc. |
| Bau- und Abbruchabfälle | Baustellen | Bauschutt, Beton, Gipskarton, Dämmmaterialien, Bodenaushub etc. |
| Siedlungsabfälle | Aus privaten Haushalten oder vergleichbaren Einrichtungen | Papier, Pappe, Glas, Metall, Kunststoff, Bioabfälle, Holz, Textilien, Verpackungen, Elektro und Elektronik-Altgeräte, Altbatterien und -akkumulatoren, sowie Sperrmüll (wie Matratzen und Möbel) etc. |
| Nebenprodukte | Lebensmittelindustrie, Land- und Forstwirtschaft, Holzindustrie usw. | <ul style="list-style-type: none"> • Reststoffe aus der Lebensmittelproduktion (z.B. Brauereien, Brennereien, Fleisch-, Getreide-, Milchverarbeitung, Stärkeproduktion), Speiseöle und Fette • Getreidestroh, Kartoffel und Zuckerrübenkraut, Körnermaisstroh und -spindeln • Holz und Halmgut von Obstplantagen und Landschaftspflege sowie Weinbauflächen • Sägenebenprodukte, Hobelspäne, sonstiges Industrie-restholz |

Tabelle 9 Auswahl von Abfallarten und Nebenprodukten, Abfallarten angelehnt an das Abfallverzeichnis: Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnis-Verordnung - AVV) – Nebenprodukte Auswahl aus der Ressourcendatenbank des DBFZ; Fett: Biogene.