

TEXTE 00/2019

Ressortforschungsplan des Bundesministerium für
Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3716 43 102 0

UBA-FB XXX

BioRest

Verfügbarkeit und Nutzungsoptionen biogener Abfall- und Reststoffe im Energiesystem (Strom-, Wärme- und Verkehrssektor)

Abschlussbericht

von

Horst Fehrenbach, Jürgen Giegrich, Susanne Köppen
ifeu, Heidelberg

Bernhard Wern, Joachim Pertagnol, Frank Baur
IZES, Saarbrücken

Katja Hünecke, Günter Dehoust, Winfried Bulach,
Kirsten Wiegmann
Öko-Institut, Darmstadt

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

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

 [/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)

 [/umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

Durchführung der Studie:

ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung GmbH
Wilckensstraße 3
69120 Heidelberg

IZES - Institut für Zukunftsenergie- und Stoffstromsysteme gGmbH
Altenkessler Str. 17
66115 Saarbrücken

Öko - Institut e.V.
Rheinstraße 95
64295 Darmstadt

Abschlussdatum:

April 2019

Redaktion:

Fachgebiet V 1.3 Erneubare Energien
Dr. Katja Hofmeier

Publikationen als pdf:

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

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Juli 2019

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

Kurzbeschreibung: BioRest

Verfügbarkeit und Nutzungsoptionen biogener Abfall- und Reststoffe im Energiesystem (Strom-, Wärme- und Verkehrssektor)

Biomasse als relevanter Beitrag zur Bereitstellung erneuerbarer Energie steht vor allem aufgrund der knappen Ressource Fläche nur begrenzt zur Verfügung. Die Diskussion hat sich daher auf die bevorzugte Nutzung von biogenen Abfällen und Reststoffen verlagert. Mit diesem Vorhaben sollte untersucht werden, mit welchem Potenzial diese Stoffgruppe dem Energiesystem zur Verfügung gestellt werden kann, wenn insgesamt anspruchsvolle ökologische und stoffwirtschaftliche Restriktionskriterien angewendet werden und welches die zu priorisierenden Einsatzpfade sind.

Im ersten Schritt wurden insgesamt 24 biogene Reststoffe und Abfälle in einer Literaturstudie betrachtet. Insgesamt ergibt sich aus der restriktiven Analyse ein jährliches Potenzial von maximal rund 210 Mio. t biogener Abfälle und Reststoffe mit einem Energiegehalt von maximal rund 920 PJ. Im zweiten Schritt wurden 19 Technologien daraufhin betrachtet, die Abfälle und Reststoffe unter Berücksichtigung ihrer jeweiligen Stoffeigenschaften am besten energetisch nutzbar zu machen. Im dritten Schritt wurden die Stoffe und Technologien zunächst nach technischer Eignung zu sinnvollen Einsatzpfaden zusammengeführt und dabei auch zugeordnet, welcher Teil des Energiesystems damit jeweils bedient werden kann. Welche Kombinationsmöglichkeiten aus Einsatzpfaden und Energieprodukten zu priorisieren sind, wurde zum Schluss anhand ökologisch, ökonomisch und technischer Kriterien bewertet.

Das Ergebnis ist ein Gesamtnutzungskonzept für Abfälle und Reststoffe über Technologien zu Energieprodukten, welches einen schwerpunktmäßigen Einsatz der Abfälle und Reststoffe zur Nutzung für Prozesswärme, zu gewissen Anteilen auch als Kraftstoff für den Flug- und Schiffverkehr empfiehlt. Der Stromproduktion werden wenig Abfall- und Reststoffe zugesprochen. Dieses Konzept ist als eine Art Allokationsplan für die ökologisch sinnvolle Nutzung der verfügbaren biogenen Abfall-/Reststoffe im Energiesystem zu verstehen, stellt jedoch kein integriertes Szenario für das Energiesystem dar.

Abstract: BioRest - Availability and options for the utilization of biogenic waste and residues in the energy system (electricity, heat and transport sectors)

Biomass as a relevant contribution to renewable energy is only available to a limited extent due to the scarcity of land. The discussion has therefore shifted to the preferred use of biogenic waste and residues. The objective of this project was to investigate the potential with which this group of substances can be made available to the energy system if ambitious environmental restriction criteria and criteria for material management are applied overall and which are the pathways to be prioritised.

In a first step, a total of 24 residues and wastes were considered in a literature study. Overall, the restrictive analysis shows an annual potential of a maximum of around 210 million tonnes of biogenic waste and residues with an energy content of a maximum of 920 PJ.

19 technologies (incineration, gasification, fermentation, fermentation and transesterification) were considered. In a second step, 19 technologies were considered to make waste and residues usable in the most energy-efficient way, taking into account their respective material properties.

In the third step, the materials and technologies were first combined according to their technical suitability into meaningful application paths and then assigned which part of the energy system (electricity, heat, transport) can be served by them. The possible combinations of input paths and energy products to be prioritised were finally evaluated on the basis of ecological, economic and technical criteria.

The result is an overall utilisation concept for waste and residues using technologies to produce energy products, which recommends a focus on the use for process heat in some proportions also as fuel for aviation and sea transport. Small shares are attributed to the production of electricity. This concept

is kind of an allocation plan for the ecologically sensible use of available biogenic waste/residues in the energy system, but does not represent an integrated scenario for the energy system.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	12
Tabellenverzeichnis	14
Abkürzungsverzeichnis	16
Glossar der verwendeten Begriffe zu Abfällen und Reststoffen	18
Zusammenfassung	20
Summary	33
1 Hintergrund und Zielsetzung	46
2 Methoden	49
2.1 Potenzialanalyse	49
2.1.1 Vorbemerkung	49
2.1.2 Untersuchte Stoffströme	50
2.1.3 Festlegung der Kriterien zur Bewertung der untersuchten Studien	51
2.1.4 Auswahl der untersuchten Studien	51
2.1.5 Erarbeitung eines erschließbaren Potenzials	53
2.2 Konversionstechnologien	53
2.3 Charakterisierung der Einsatzpfade	53
2.3.1 Grundsätzliche Vorgehensweise	53
2.3.2 Erstellung einer technischen Eignungsmatrix	54
2.3.3 Modifikation der technischen Eignungsmatrix	61
2.3.4 Erstellung der Einsatzpfadmatrix	62
2.3.5 Herleitung des Gesamtnutzungskonzeptes	65
3 Review bestehender Potenzialstudien / Veröffentlichungen und Ableitung erschließbarer Potenziale	67
3.1 Review	67
3.1.1 Grundsätzliche Einschätzungen	67
3.1.1.1 Potenzialbegriff	67
3.1.1.2 Bezugsraum	67
3.1.1.3 Stoffstrom	67
3.1.1.4 Datenqualität	68
3.1.1.5 Aktualität	68
3.1.1.6 Basisjahr / Zeithorizont	69
3.1.1.7 Restriktionen	69

3.1.1.8	Nutzungskonkurrenz.....	69
3.1.1.9	Energetisch bereits genutzte Anteile.....	70
3.1.1.10	Zusammenfassung	70
3.1.2	Potenziale der Forstwirtschaft.....	71
3.1.3	Potenziale aus Landschaftspflegematerial.....	74
3.1.4	Potenziale der Landwirtschaft	76
3.1.4.1	Stroh.....	76
3.1.4.2	Tierische Exkremente.....	78
3.1.4.3	Ernterückstände.....	81
3.1.5	Potenziale aus kommunaler und gewerblicher Biomasse	83
3.1.5.1	Bio- und Grünabfälle.....	83
3.1.5.2	Altholz	86
3.1.5.3	Klärschlamm/Klärgas aus öffentlichen Anlagen	91
3.1.5.4	Sonstige Fraktionen im Siedlungsbereich	94
3.1.6	Potenziale aus industriellen biogenen Abfällen.....	96
3.1.6.1	Rückstände aus der Fleischverarbeitung und Tierkörperbeseitigung	96
3.1.6.2	Rückstände aus der Lebens- und Genussmittelindustrie	103
3.1.6.3	Rückstände aus der Wasserwirtschaft.....	114
3.1.6.4	Industrierestholz	117
3.1.6.5	Schwarzlauge	117
3.1.7	Zusammenfassung	117
3.2	Energetisch erschließbares biogenes Abfall- und Reststoffpotenzial	120
3.2.1	Potenzialansatz im Rahmen der Studie	120
3.2.2	Differenzierung der Potenzialansätze.....	120
3.2.3	Ergebnisse	123
3.2.3.1	Waldholzpotenziale	123
3.2.3.2	Straßenbegleitgrün	125
3.2.3.3	Strohpotenziale.....	126
3.2.3.4	Potenziale an tierischen Exkrementen	128
3.2.3.5	Potenzial an Ernterückständen	130
3.2.3.6	Biogut-Potenzial.....	132
3.2.3.7	Grüngut-Potenzial.....	133
3.2.3.8	Altholz-Potenziale	134

3.2.3.9	Klärschlamm- und Klärgas-Potenziale.....	135
3.2.3.10	Potenziale aus sonstigen Fraktionen im Siedlungsbereich	136
3.2.3.11	Potenziale aus industriellen biogenen Substraten	138
3.2.3.12	Zusammenfassung	138
4	Einsatzmöglichkeiten der Potenziale – Konversionstechnologien	141
4.1	Definition und Beschreibung von Konversionstechnologien für biogene Abfall- und Reststoffe in den Sektoren Strom/Wärme/Verkehr	141
4.2	Zukünftige Konversionskonzepte in den Sektoren Strom/Wärme/Verkehr.....	142
5	Bewertung der Eignung Abfall/Reststoff - Technologie	145
5.1	Grundlegende Eingangsinformationen	145
5.1.1	Potenziale der Abfall- und Reststoffe	145
5.1.2	Konversionstechnologien.....	148
5.1.3	Energieprodukte	149
5.2	Erstellung und Ergebnisse der Eignungsmatrix.....	150
5.2.1	Anwendung der Einzelkriterien.....	150
5.2.2	Zusammenfassung der Eignung Reststoff - Technik	153
5.2.3	Ergebnisse der Eignung Abfall-/Reststoffe - Technik.....	154
5.2.4	Modifikation der Eignung durch Vorbehandlung	156
5.3	Auswahl der Einsatzpfade	157
6	Bewertung der Einsatzpfade	162
6.1	Benennung der Einsatzpfade	162
6.2	Einzelbewertung der Einsatzpfade.....	166
6.2.1	Energieeffizienz.....	167
6.2.2	Treibhausgasbilanz.....	168
6.2.3	Kostensituation	169
6.2.4	Weitere ökologische Aspekte	170
6.2.5	Kompatibilität zur Transformation des Energiesystems.....	172
6.2.6	Gesamtergebnis der Bewertung	173
6.3	Rangbildungen der Einsatzpfade nach Abfall-/Reststoffarten.....	175
7	Gesamtnutzungskonzept.....	183
7.1	Ableitung des Gesamtnutzungskonzepts.....	183
7.1.1	Inputmenge an Abfall-/Reststoffen	183
7.1.2	Priorisierte Zuweisung der Abfall-/Reststoffe zu Konversionstechniken	184
7.1.3	Priorisierte Erzeugung der Energieprodukte	189

7.2	Mögliches Gesamtnutzungskonzept verschiedener (Zukunfts-)Modelle	194
7.2.1	Energiepotenziale der Gesamtnutzungskonzepte	194
7.2.2	THG-Einsparpotenziale der Gesamtnutzungskonzepte	194
7.3	Zusammenfassung.....	196
8	Fazit	199
9	Quellenverzeichnis	203
A	Anhang: Parameterlisten zur Charakterisierung der Abfall- und Reststoffe.....	209
A.1	Stoffstrom R1: Waldholz	209
A.2	Stoffstrom R2: Landschaftspflege – Halmgut Straße	210
A.3	Stoffstrom R2: Landschaftspflege – Holz Straße	211
A.4	Stoffstrom R4: Stroh.....	212
A.5	Stoffstrom R5 und R6: Tierische Exkremente	213
A.6	Stoffstrom R7: Ernterückstände.....	214
A.7	Stoffstrom R8: Biogut.....	215
A.8	Stoffstrom R9 und R10: Grüngut.....	216
A.9	Stoffstrom R11: Altholz	217
A.10	Stoffstrom R12: Klärschlamm, kommunal	218
A.11	Stoffstrom R14: Siedlungsmischabfälle.....	220
A.12	Stoffstrom 15: Altöle/-fette	222
A.13	Stoffstrom R16: Schwarzlauge	223
A.14	Stoffstrom R17: Industrierestholz	224
A.15	Stoffstrom R19: Klärgas , industriell.....	225
A.16	Stoffstrom R20: Feste industrielle Substrate	226
A.17	Stoffstrom R21: Schlachtabfälle/Tiermehl.....	227
A.18	Stoffstrom R22: Schlachtabfälle/Tierfett	228
A.19	Stoffstrom R 23: Fleischbrei	229
A.20	Stoffstrom R24: Küchen- und Kantinenabfälle.....	230
B	Anhang: Steckbriefe zur Charakterisierung der Konversionstechnologien.....	231
B.1	Holzpelletzentralheizung 15 kW _{th} (T1).....	231
B.2	Holzhackschnitzelkessel 500 kW _{th} (T2)	233
B.3	Heizkraftwerk 5 MW _{el} (T3)	235
B.4	ORC Heizkraftwerk 250 kW _{el} (T4).....	237
B.5	Klärschlammverbrennungsanlage 10 MW _{el} (T5)	240

B.6	Mitverbrennung fester Biomasse im Kohlekraftwerk (T6)	242
B.7	Abfallverbrennungsanlage 50 MW _{th} (T7).....	246
B.8	Kleinvergaser 30 kW _{el} (T8)	248
B.9	Holzvergaser 10 MW _{el} (T9)	250
B.10	Bio-SNG 25 MW (T10)	252
B.11	BtL 100 MW _{bioethanol} (T11).....	254
B.12	Biogasanlage 75 kW _{el} (T12)	256
B.13	Bioabfallvergärung 500 kW _{el} Nassvergärung (T13)	258
B.14	Bioabfallvergärung 800 kW _{el} – Trockenvergärung (T14).....	261
B.15	Biomethananlage 2 MW – Nassvergärung (T15)	263
B.16	Biomethananlage 2 MW – Trockenvergärung (T16).....	266
B.17	Ethanolanlage (Lignozellulose) (T17)	269
B.18	Ethanolanlage (Zucker) (T18)	271
B.19	Biodieselanlage	274
C	Anhang: Einzelbewertung der Einsatzpfade.....	276
C.1	Einzelbewertungen	276
C.2	Zusammenfassungen nach Kriterien:.....	311

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Energetische Potenziale ^{a)} der Abfall-/Reststoffe für die Modelle BAU und MER für die Jahre 2020, 2030 und 2050; über den Balkengruppen sind die Summen aufgeführt.	23
Abbildung 2:	Endenergiepotenziale der Abfall-/Reststoffe nach den Modellen BAU und MER für die Jahre 2020, 2030 und 2050.	31
Abbildung 3:	Nutzungshierarchie für die Verwendung von Biomasse	47
Abbildung 4:	Beispiel für die technische Eignungsmatrix am Beispiel Wassergehalt für Verbrennungstechniken.....	57
Abbildung 5:	Beispiel zur Ausführung der technischen Eignungsprüfung für Verbrennungstechnologien am Beispiel Wassergehalt (das Beispiel greift auf die konkrete Anwendung in Kapitel 5.2 vor)	58
Abbildung 6:	Ausschnitt der Zusammenfassung der Eignungsprüfung beim ersten Bewertungsschritt (das Beispiel greift auf die konkrete Anwendung in Kapitel 5.2 vor).....	60
Abbildung 7:	Ausschnitt der Auswahl geeigneter Abfall-/Reststoff – Technik – Kombinationen (das Beispiel greift auf die konkrete Anwendung in Kapitel 5.2 vor).....	60
Abbildung 8:	Beispiel der Modifikation der Eignung von Abfall-/Reststoff–Technik–Kombinationen durch Vorbehandlungsschritte (das Beispiel greift auf die konkrete Anwendung in Kapitel 5.2 vor)	63
Abbildung 9:	Landnutzungsänderungen vom Grünland hin zu Gehölzflächen.....	75
Abbildung 10:	Identifizierte Bandbreite des Potenzials an Stroh	77
Abbildung 11:	Identifizierte Bandbreite des Potenzials an Gülle	80
Abbildung 12 :	Identifizierte Bandbreite des Potenzials an Biogut	85
Abbildung 13:	Identifizierte Bandbreite des Potenzials an Grüngut	85
Abbildung 14:	Identifizierte Bandbreiten des Potenzials an Altholz.....	88
Abbildung 15:	Verwendung der Erzeugnisse aus tierischen Nebenprodukten	99
Abbildung 16:	Phosphorpotential in verschiedenen organischen Reststoffen in Deutschland	100
Abbildung 17:	Verteilung der Lebensmittelabfälle	105
Abbildung 18:	Entsorgungswege des industriellen Klärschlammes.....	115
Abbildung 19:	Entsorgungswege des industriellen Klärschlammes innerhalb des verarbeitenden Gewerbes (Stand 2013)	116
Abbildung 20:	Marktverfügbarkeit und Biomassebedarf von Konversionstechnologien	142
Abbildung 21:	Ergebnismatrix der Eignungsprüfung von Abfall- und Reststoffen für die untersuchten Konversionstechniken; grün = gute Eignung; gelb = partielle Eignung; rot = keine Eignung.....	154
Abbildung 22:	Geeignete Kombinationen von Abfall-/Reststoff mit Konversionstechniken (gelbe Balken, Anzahl jeweils in der Spalte oben-links neben den Benennungen dargestellt.)	155

Abbildung 23:	Geeignete Kombinationen von Abfall-/Reststoffen mit Konversionstechniken (gelbe Balken) ergänzt um Kombinationen, deren Eignung durch entsprechende Vorbehandlungsmaßnahmen erreicht wird (violette Balken, Anzahl in der Spalte oben-links)	156
Abbildung 24:	Auswahl der Einsatzpfade als Kombination von Abfällen/Reststoffen mit den Verbrennungstechniken zur weiteren Bewertung	159
Abbildung 25:	Auswahl der Einsatzpfade als Kombination von Abfällen/Reststoffen mit den Vergasungstechniken zur weiteren Bewertung	160
Abbildung 26:	Auswahl der Einsatzpfade als Kombination von Abfällen/Reststoffen mit den Vergärungstechniken zur weiteren Bewertung	161
Abbildung 27:	Matrix der Gesamtbewertung aller Einsatzpfade und Energieprodukte nach den Kriterien Energieeffizienz (E), Treibhausgasbilanz (T), Kosten (K), Ökologische Aspekte (Ö) und Transformation des Energiesystems (Tr)	174
Abbildung 28:	Energetische Potenziale der Abfall-/Reststoffe für die Modelle BAU und MER für die Jahre 2020, 2030 und 2050; über den Balkengruppen sind die Summen aufgeführt.	183
Abbildung 29:	Mögliches Gesamtnutzungskonzept nach dem Basisfall – Zuweisung der Abfall-/Reststoffe zu den Konversionstechniken (Massenstrom gilt für das Modell BAU 2020)	186
Abbildung 30:	Mögliches Gesamtnutzungskonzept „Ohne Kostenbetrachtung“ – Zuweisung der Abfall-/Reststoffe zu den Konversionstechniken (Massenstrom gilt für das Modell BAU 2020)	187
Abbildung 31:	Mögliches Gesamtnutzungskonzept nach dem Basisfall – Erzeugung von Energieprodukten für die Sektoren Strom, Wärme und Verkehr (Massenstrom gilt für das Modell BAU 2020)	191
Abbildung 32:	Gesamtnutzungskonzept „Ohne Kostenbetrachtung“ – Erzeugung von Energieprodukten für die Sektoren Strom, Wärme und Verkehr (Massenstrom gilt für das Modell BAU 2020)	192
Abbildung 33:	Gegenüberstellung der Sensitivitätsbetrachtungen: Basisfall, Variante A „Ohne Kostenbetrachtung“, Variante B „Hohe Bewertung von Biogas-Strom“, Kombination aus Variante A und B und Variante C „Schärfere Anforderung an THG-Minderung“ (Massenstrom gilt für das Modell BAU 2020)	192
Abbildung 34:	Treibhausgasbilanz des Gesamtnutzungskonzepts dargestellt als Energiepotenziale der Abfall-/Reststoffe nach den Modellen BAU und „Mit erweiterten Restriktionen“ für die Jahre 2020, 2030 und 2050	195

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Restriktionskriterien und Bewertung flächenbezogener Reststoffe	21
Tabelle 2:	Übersicht über die Konversionstechnologien und näher betrachteten Techniken.....	24
Tabelle 3:	Energieprodukte nach den verschiedenen Einsatzpfaden	27
Tabelle 4:	Kriterien zur Bewertung der untersuchten Studien	52
Tabelle 5:	Parameterliste zur Charakterisierung der Abfall- und Reststoffe	54
Tabelle 6:	Parameterliste zur Charakterisierung der Konversionstechniken.....	56
Tabelle 7:	Zusammenfassung der grundsätzlichen Einschätzungen	70
Tabelle 8:	Bewertung der Potenzialangaben für Waldholz.....	73
Tabelle 9:	Betrachtung der Landschaftspflegepotenziale in nationalen Studien	74
Tabelle 10:	Bewertung der Potenzialangaben für Stroh	78
Tabelle 11:	Bewertung der Potenzialangaben für tierische Exkremente.....	81
Tabelle 12:	Ernterückstände (Kartoffelkraut und Rübenblatt)	82
Tabelle 13:	Bewertung der Potenzialangaben für Ernterückstände	82
Tabelle 14:	Bewertung der Potenzialangaben für Bio- und Grünabfälle	86
Tabelle 15:	Bewertung der Potenzialangaben für Altholz.....	90
Tabelle 16:	Bewertung der Potenzialangaben für Klärschlamm/-gas.....	94
Tabelle 17:	Bewertung der Potenzialangaben für sonstige Fraktionen	95
Tabelle 18:	Einteilung der tierischen Nebenprodukte in Abhängigkeit des Gefahrenpotenzials.....	97
Tabelle 19:	Rohmaterial 2016 gem. Verordnung (EG) Nr. 1069 / 2009	98
Tabelle 20:	Verwendung der Erzeugnisse aus tierischen Nebenprodukten	99
Tabelle 21:	Künftige Entwicklung des Aufkommens Tiermehl, Tierfett und Fleischbrei (in 1.000 t)	102
Tabelle 22:	Energetische Potenziale Tiermehl, Tierfett und Fleischbrei (in 1.000 t)	103
Tabelle 23:	Bewertung Potenzial Tiermehl, Tierfett und Fleischbrei.....	103
Tabelle 24:	Aufkommen von organischen Abfällen in Industrie und Gewerbe	106
Tabelle 25:	Mengenmäßiger Anteil von ungenutzten Reststoffen in Bezug auf die eingesetzte Rohware bei ausgewählten industriell hergestellten Lebensmitteln	107
Tabelle 26:	Reststoffe aus der Zuckerindustrie und deren Verwendung	108
Tabelle 27:	Bewertung Potenziale aus der Lebens- und Genussmittelindustrie	113
Tabelle 28:	Potenziale industrieller Klärschlamm, industrielles Klärgas (in PJ/a).....	116
Tabelle 29:	Zusammenfassung der Potenzialansätze	117
Tabelle 30:	Restriktionskriterien und Bewertung flächenbezogener Reststoffe	121
Tabelle 31:	Restriktionskriterien und Bewertung von organischen Abfallbiomassen	122
Tabelle 32:	Einschätzung der Waldholzpotenziale.....	125
Tabelle 33:	Verwendete Kennzahlen zur Ableitung des Straßenbegleitgrüns, aus IZES (2012)	125
Tabelle 34:	Einschätzung der Straßenbegleitgrünbegleitgrünpotenziale	126

Tabelle 35:	Einschätzung der Strohpotenziale	128
Tabelle 36:	Veränderung der Tierzahlen von 2010 – 2017	129
Tabelle 37:	Einschätzung der Potenziale bei tierischen Exkrementen.....	130
Tabelle 38:	Einschätzung der Potenziale bei Ernterückständen (Zuckerrübenblatt und Kartoffelkraut)	132
Tabelle 39:	Einschätzung der Biogutpotenziale	133
Tabelle 40:	Einschätzung der Grüngutpotenziale	134
Tabelle 41:	Einschätzung der Altholz-Potenziale (inländisch).....	135
Tabelle 42:	Einschätzung der Klärschlamm-Potenziale (öffentliche Anlagen)	136
Tabelle 43:	Einschätzung der Klärgas-Potenziale (öffentliche Anlagen; Brennwert Rohgas)	136
Tabelle 44:	Zusammenfassung der Potenzialansätze	139
Tabelle 45:	Übersicht über die Konversionstechnologien und näher betrachteten Techniken.....	141
Tabelle 46:	Beispielhafter Technologiesteckbrief für eine Holzpelletzentralheizung	143
Tabelle 47:	Abfall- und Reststoffe, deren physikalische Eigenschaften und Mengen in Masse und Energiegehalt für das Modell BAU und das Jahr 2020	146
Tabelle 48:	Abfall- und Reststoffe nach Energiepotenzialen für die Modelle BAU und „Mit erweiterten Restriktionen“, jeweils für die Stützjahre 2020, 2030 und 2050	147
Tabelle 49:	Auswahl der betrachteten Konversionstechnologien	148
Tabelle 50:	Energietypen sowie weiter differenzierte Energieprodukte, die aus den verschiedenen Konversionstechnologien resultieren	149
Tabelle 51:	Charakteristika der Abfall- und Reststoffe, die zur technischen Eignungsprüfung Verwendung finden	150
Tabelle 52:	Charakteristika der Konversionstechnologien, die zur technischen Eignungsprüfung Verwendung finden	152
Tabelle 53:	Zusammenfassung der 32 abgeleiteten und zu bewertenden Einsatzpfade.....	162
Tabelle 54:	Energieprodukte nach verschiedenen Einsatzpfaden (laufende Nummern siehe Tabelle 53)	165
Tabelle 55:	Gestehungskosten für Strom, Wärme, Kraftstoffe aus Abfall- /Reststoffen nach verschiedenen Konversionstechniken (in Euro- Cent/MJ)	169
Tabelle 56:	Endenergiepotenziale der Abfall-/Reststoffe nach den Modellen BAU und MER für die Jahre 2020, 2030 und 2050.	194
Tabelle 57:	THG-Emissionsfaktoren für Strom, Prozesswärme und Kraftstoffe, biobasiert, fossil und als Netto-Faktor (in g CO ₂ -Äq./MJ).....	195

Abkürzungsverzeichnis

BfN	Bundesamt für Naturschutz
BGA	Biogasanlage
BHKW	Blockheizkraftwerk
bioPE	biobasiertes Polyethen
bioPET	biobasiertes Polyethylenterephthalat
BLE	Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung
BtL	Biomass to liquid
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CH₄	Methan
CO₂Äq	Kohlendioxid-Äquivalente
Destatis	Statistische Bundesamt (auch StBA abgekürzt)
DG	Directorate General (Generaldirektion der EU-Kommission)
E	Einwohner
EDW	Einwohnerdurchschnittswert
EEG	Erneuerbare Energie-Gesetz
EW	Einwohnerwert
FM	Frischmasse
fm	Festmeter
FQD	Fuel quality directive (Kraftstoffqualitäts-Richtlinie, 2009/30/EG)
GWP	Global Warming Potential
HHS	Holzhackschnitzel
HKW	Heizkraftwerk
ILUC	indirect land-use change (indirekte Landnutzungsänderung)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISO	International Standard Organisation
KEA	Kumulierter Energieaufwand
KUP	Kurzumtriebsplantage
KW	Kraftwerk
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
LNG	Liquified natural Gas (verflüssigtes Erdgas)

BfN	Bundesamt für Naturschutz
LUC	Land use change (Landnutzungsänderung)
MJ	Mega-Joule
N₂O	Distickstoffmonoxid, Lachgas
NawaRo	nachwachsende Rohstoffe
NM VOC	Gasförmige organische Verbindungen außer Methan
NO_x	Stickstoffoxide (NO, NO ₂)
ÖRE	Öffentlich-rechtlicher Entsorgungsträger
PE	Polyethen, Polyethylen
PET	Polyethylenterephthalat
PJ	Peta-Joule
PM₁₀	Particulate matter mit aerodynamischem Durchmesser <10 µm (Feinstaub)
ProgRess	Deutsches Ressourceneffizienzprogramm
RED	Renewable Energy Directive (Richtlinie 2009/28/EG)
RED II	Neufassung der RED (Richtlinie (EU) 2018/2001)
THG	Treibhausgas
TS	Trockensubstanz

Glossar der verwendeten Begriffe zu Abfällen und Reststoffen

Altholz	in der Altholzverordnung zusammengefasst aus (→) Industrierestholz und Gebrauchtholz; Wird in dieser Arbeit für die Definition von Gebrauchtholz verwendet: „gebrauchte Erzeugnisse aus Massivholz, Holzwerkstoffen oder aus Verbundstoffen mit überwiegendem Holzanteil (mehr als 50 Masseprozent)“
Altöle/Fette	aus Privathaushalten, der Gastronomie sowie der Lebensmittelverarbeitung über Behältersysteme oder Fettabscheider oder direkt beim Erzeuger gesammelte biogene Öle und Fette.
Bioabfall	im Sinne der Bioabfallverordnung: „Abfälle tierischer oder pflanzlicher Herkunft oder aus Pilzmaterialien zur Verwertung, die durch Mikroorganismen, bodenbürtige Lebewesen oder Enzyme abgebaut werden können, einschließlich Abfälle zur Verwertung mit hohem organischen Anteil tierischer oder pflanzlicher Herkunft oder an Pilzmaterialien“... „Bodenmaterial ohne wesentliche Anteile an Bioabfällen gehört nicht zu den Bioabfällen; Pflanzenreste, die auf forst- oder landwirtschaftlich genutzten Flächen anfallen und auf diesen Flächen verbleiben, sind keine Bioabfälle.“
Biogas	methanhaltiges Gas, das bei der anaeroben Vergärung von organischem Material in entsprechenden Bioreaktoren, erzeugt wird.
Biogut	Mittels Biotonne und/oder Biosack getrennt erfasste Nahrungs- und Küchenabfälle sowie Gartenabfälle aus Privathaushalten
Dendromasse	holzartige Biomasse, die in stofflichen, energetischen und chemischen Wertschöpfungsketten verwandt werden kann, sich aber aufgrund von Qualitätsmängeln (derzeit) nicht für die traditionellen höherwertigen Verwendungen von Holz (Möbel, Hausbau etc.) eignet; Wird in dieser Arbeit für das für die energetische Nutzung verfügbare Waldholz unter Berücksichtigung aller weiteren angewandten Restriktionskriterien verstanden; das ist insbesondere die Derbholzgrenze (d.h. verfügbar nur Durchmesser >7 cm).
Ernterückstände	oberirdischer Nutzpflanzenteil, der bei der Ernte von der Hauptfrucht getrennt wird.
Feste industrielle Substrate	Zusammenfassung verschiedener Reststoffe aus der industriellen Verarbeitung von Nahrungsmitteln, die unter die Biomasseverordnung fallen, z.B. Spelzen, Stäube, Kerne, Stiele, Nussschalen
Festmist	Mischung aus Kot und Harn aus der Stallhaltung von Nutztieren, eingedickt durch ein eingestreutes Bindemittel, i.d.R. Stroh.
Fleischbrei	ungetrocknete fett- und proteinreiche Nebenprodukte aus der Schlachtung und Lebensmittelindustrie
Grüngut	getrennt erfasste Gartenabfälle aus Privathaushalten sowie bei der kommunalen Pflege erzeugte Park- und Landschaftspflegeabfälle; wird in dieser Arbeit in die Anteile „holzige“ und „krautige“ unterschieden.
Gülle	Mischung aus Kot und Harn aus der Stallhaltung von Schweinen und Rindern

Altholz	in der Altholzverordnung zusammengefasst aus (→) Industrierestholz und Gebrauchtholz; Wird in dieser Arbeit für die Definition von Gebrauchtholz verwendet: „gebrauchte Erzeugnisse aus Massivholz, Holzwerkstoffen oder aus Verbundstoffen mit überwiegendem Holzanteil (mehr als 50 Masseprozent)“
Industrieholz	Rohholz, das für Zellstoff, Papier, Holzwerkstoffe, Hackschnitzel oder andere industrielle Produkte verwendet wird, vom Sortiment her i.d.R. gleichartig wie (→) Dendromasse; der Begriff wird in dieser Arbeit nicht verwendet.
Industrierestholz	gemäß Altholzverordnung: „die in Betrieben der Holzbe- oder -verarbeitung anfallenden Holzreste einschließlich der in Betrieben der Holzwerkstoffindustrie anfallenden Holzwerkstoffreste sowie anfallende Verbundstoffe mit überwiegendem Holzanteil (mehr als 50 Masseprozent)“
Klärgas	auch Faulgas; methanhaltiges Gas, das bei der Faulung von kommunalen oder industriellen (→) Klärschlämmen erzeugt wird.
Klärschlamm	der nach Durchlaufen von Reinigungsstufen einer (kommunalen oder industriellen) Kläranlage abgeschiedene Schlamm; wird ohne bzw. vor einer Faulung als Rohschlamm bezeichnet, nach einer Faulung (→ Klärgas) als Faulschlamm.
Küchen- und Kantinenabfälle	Organische Abfälle aus gewerblichen Küchen und Kantinen
Landschaftspflegematerial	Biomasse aus Wegebegleitgrün, von öffentlichen und privaten Grünflächen, aus der Biotoppflege; wird in dieser Arbeit in die Anteile „Holz“ und „Halm“ unterschieden
Restabfall	nach getrennter Wertstoffeffassung verbleibender Abfall aus Privathaushalten und kleineren Gewerbebetrieben
Schwarzlauge	Ablauge, die beim Aufschlussverfahren für die Zellstoffgewinnung anfällt; setzt sich aus dem herausgelösten Lignin, Hemicellulosen, verschiedenen prozessbedingten Chemikalien und Wasser zusammen
Stroh	ausgedroschene und trockene Halme und Blätter von Getreide, Ölpflanzen, Faserpflanzen oder Hülsenfrüchten; Die Anwendung des Begriffs konzentriert sich in dieser Arbeit auf Weizen-, Gerste- und Roggenstroh
Tierfett	fettreiche Nebenprodukte aus der Schlachtung und Lebensmittelindustrie
Tiermehl	getrocknete fett- und proteinreiche Nebenprodukte aus der Schlachtung und Lebensmittelindustrie
Waldholz	Grundsätzlich alles dem Wald entnehmbare Holz; die Anwendung des Begriffs erfolgt in dieser Arbeit auf die (→) Dendromasse begrenzt.
Waldrestholz	Definition unscharf; in den meisten Fällen verstanden als Holzsortiment unterhalb der sogenannten Derbholzgrenze (d.h. Durchmesser <7 cm) nach Mantau (2012), kann aber auch ungenutzte Derbholzanteile enthalten. In dieser Arbeit wird aufgrund der Unschärfe dieses Begriffs auf (→) Dendromasse Bezug genommen.

Altholz	in der Altholzverordnung zusammengefasst aus (→) Industrierestholz und Gebrauchtholz; Wird in dieser Arbeit für die Definition von Gebrauchtholz verwendet: „gebrauchte Erzeugnisse aus Massivholz, Holzwerkstoffen oder aus Verbundstoffen mit überwiegendem Holzanteil (mehr als 50 Masseprozent)“
Wegebegleitgrün	zu einem Verkehrsweg gehörenden Grünflächen und Gehölzpflanzungen.

Zusammenfassung

Ziele des Forschungsprojekts

Biomasse trägt derzeit in Deutschland in relevantem Umfang zur Bereitstellung von Strom, Wärme und Kraftstoffen aus erneuerbaren Energien bei. Derzeit beruht Bioenergienutzung jedoch überwiegend auf angebaute Biomasse und stößt somit an ökologische Grenzen. Vor allem die knappe Ressource Fläche bildet dabei eine generelle Grenze, durch die insbesondere auch Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion oder zu stofflich genutzter Biomasse besteht. Zudem ist die agrarische Flächenbewirtschaftung mit signifikanten und vielfältigen negativen Auswirkungen für die Umwelt verbunden. Dass die Nutzung der Agrarflächen zur Erzeugung von Nahrungsmitteln grundsätzlichen Vorrang hat, steht gemeinhin außer Frage. Im Sinne einer Nutzungshierarchie wird auch die stoffliche Nutzung gegenüber einer primären energetischen Nutzung höherwertig eingestuft, da die stoffliche Nutzung von Biomasse über das Kaskadenprinzip einen späteren Einsatz des biogenen Materials als Reststoff oder Abfall für die energetische Nutzung ermöglicht.

Dieses Forschungsprojekt konzentriert sich auf die Stoffgruppe der biogenen Abfälle und Reststoffe und untersucht folgende Fragen:

1. Welches Potenzial an biogenen Abfällen und Reststoffen steht für eine energetische Nutzung zur Verfügung, wenn alle aus rechtlichen oder ökonomischen Gründen stofflich zu verwertenden ausgeschlossen und anspruchsvolle weitere Restriktionskriterien (v.a. aus ökologischer Sicht) angewendet werden?
2. Welche der zur Verfügung stehenden Konversionstechnologien sind am besten geeignet die Abfälle und Reststoffe unter Berücksichtigung ihrer jeweiligen Stoffeigenschaften energetisch nutzbar zu machen?
3. Welche Nutzungspfade für die identifizierten Stoffströme und Mengenpotenziale sind geeignet, anspruchsvolle technische, ökonomische und ökologische Kriterien eines nachhaltigen Gesamtnutzungskonzeptes zu erfüllen und welchen Beitrag zum Energiemix der Zukunft können sie leisten.

Dieses Forschungsprojekt stellt jedoch keine integrierte Betrachtung des Energiesystems (Strom, Wärme und Verkehr) dar und liefert keine Energieszenarien. Es ermittelt mögliche für die Energieerzeugung sich eignende Stoffströme, die als Grundlage für die Nutzung von Bioenergie in Energieszenarien dienen können.

Potenziale biogener Abfall- und Reststoffe

Zunächst wurde anhand einer umfassenden Literaturstudie das Potenzial an biogenen Abfall- und Reststoffen nach Stoffgruppen ermittelt. Dabei wurden rund 50 Arbeiten analysiert, die nicht vor 2004 veröffentlicht wurden und die über eine allgemeine Nennung eines Reststoffpotenzials hinausgehen. Besonders im Fokus standen dabei die Stoffströme aus folgenden Bereichen:

- Forstwirtschaft
- Koppel- und Abfallprodukte der Holz- und Papierwirtschaft
- Landwirtschaft
- Kommunale und gewerbliche biogene Abfälle und Reststoffe
- Stoffströme aus der Landschaftspflege
- Industrielle biogene Abfälle

Zunächst wurden die z.T. sehr unterschiedlichen Studien über einen einheitlichen Kriterienkatalog auf Vergleichbarkeit von Ergebnissen und Vorgehensweisen geprüft. Die jeweilige Definition von Biomassepotenzial fällt dabei von Studie zu Studie unterschiedlich aus. Daher musste die für das Projekt anzuwendende Definition präzisiert werden, sodass im Zuge der Prüfung entschieden werden konnte, welche Quellen für den jeweiligen Stoffstrom als Grundlage für dessen Potenzialbandbreite gemäß der präzisierten Definition und des Kriterienkatalogs auszuwählen ist.

Für den zweiten Schritt wurden zusätzliche Restriktionskriterien definiert und angewandt, um den Nutzungskorridor für ein technisch-ökologisch erschließbares Potenzial beschreiben zu können. In einem Diskussionsprozess mit dem Auftraggeber wurden diese Kriterien für zwei Modelle hergeleitet:

1. Modell „BAU“ (business as usual) – als Mischung aus den derzeit existierenden und rechtlich bindenden mit freiwilligen Restriktionen
2. Modell „MER - Mit erweiterten Restriktionen“

Tabelle 1 zeigt die zur Bewertung der flächenbezogenen Reststoffe angewandten Restriktionskriterien.

Tabelle 1: Restriktionskriterien und Bewertung flächenbezogener Reststoffe

Stoffstrom	Restriktionskriterium	Status ^{a)}	Umsetzung ^{b)}
Für alle flächenbezogene Reststoffe geltend	• Keine Veränderung der Flächennutzung	2	+
	• Wiedervernässung landwirtschaftlich genutzter Flächen mit Torfböden	3	+/-
Agrarische Reststoffe allgemein	• Berücksichtigung Ökolandbau mit 20 % Fläche	3	+/-
	• Nährstoffbilanzen	2	+
	• Humusbilanzierung	3	+/-
	• Berücksichtigung ökologischer Vorrangflächen	3	+
	• Veränderungen von Anbausystemen	3	-
	• Ertragszuwächse	1	+/-
Zusätzliche Kriterien für:			
Stroh	• Technologische Entwicklungen	2	+
	• Nutzungskonkurrenzen	1	+
andere Ernterückstände	• Zwischen-/Untersaat als Reststoff ausgewiesen?	3	-
	• Entwicklung Tierproduktion	2	+
Wirtschaftsdünger	• Aufnahmefähigkeit der Region für Nährstoffe	3	+/-
	• Berücksichtigung Weidetierhaltung	3	-
	• Berücksichtigung Stallhaltungsform	3	-

Tabelle 1: Restriktionskriterien und Bewertung flächenbezogener Reststoffe

Stoffstrom	Restriktionskriterium	Status ^{a)}	Umsetzung ^{b)}
Forstliche Biomassen	• 10 % natürliche Waldentwicklung im Staatswald	1	+
	• Kahlschlagverbot	1	+
	• Berücksichtigung naturschutzfachl. belegter Flächen	1	+
	• Berücksichtigung Forstzertifizierungen		
	• Biodiversitätsziele in genutztem Wald	3	+/-
	• Derbholzgrenze	2	+
Landschaftspflegeholz		1	+/-
	• Umtrieb von Hecken berücksichtigt?	3	+/-
	• Freischneiden von Grasland berücksichtigt?	3	+/-

a) Kriterium ist (1) rechtlich bindend oder naturräumliche Voraussetzung, (2) durch formale (aber rechtlich nicht bindende) Leitlinien oder durch sozioökonomische Trends beschrieben, aber nicht bindend, (3) wünschenswert

b) Hier wird in einer dreiteiligen Skalierung dargestellt, ob das Kriterium in Zahlen ausgedrückt (+), gar nicht quantifizierbar ist (-) oder nur qualitativ beschrieben werden kann (+/-).

Es wurde geprüft, welche Restriktionskriterien bereits in den untersuchten Studien berücksichtigt, oder ob in irgendeiner Weise Abschlüsse von den Potenzialen in Anrechnung gebracht wurden. Hierbei zeigte sich, dass derartige Angaben zumeist fehlten und oft erwies sich das vorliegende Zahlengerüst – zumindest teilweise – als wenig aktuell. Eine direkte Anwendung der Literaturdaten auf die Modelle war somit in vielen Fällen nicht möglich.

Die Anwendung der Restriktionskriterien führt dazu, dass die Potenziale diverser Materialien deutlich reduziert werden, da sie bereits einer stofflichen Nutzung unterliegen (z.B. Stroh als Einstreu). Andererseits können die angewandten Restriktionen dazu führen, dass in energetischer Nutzung befindliche Mengen eines Materials auf ein (deutlich) geringeres Maß einzugrenzen sind (z.B. Waldholz).

Das Beispiel Waldholz verdient hier genauere Betrachtung. Gerade bei diesem Material ist die Definition in den ausgewerteten Studien sehr diffus. Der Begriff des sogenannten *Waldrestholzes* wird dabei uneinheitlich verwendet. In diesem Projekt wurde aus zwei Gründen von diesem Begriff abgesehen und stattdessen explizit auf *Waldholz* i.S. von Dendromasse abgestellt: Erstens führen bereits die BAU-Kriterien dazu, dass das kleinteilige Sortiment (< 7cm) ausgeschlossen wird. Zweitens sind die maßgeblichen Mengen an energetisch bereits genutztem Waldholz zum Derbholz zu zählen, bzw. zu geringer wertigem Stammholz, das aus ökonomischen Gründen nicht in der Sägeindustrie genutzt wird. In diesem Forschungsprojekt wurde daher beschlossen, genau dieses Material (mit dem Begriff der *Dendromasse*) für die Potenzialbestimmung zu Grunde zu legen. Hierbei wurde dann zwischen dem stofflich zu nutzenden Dendromasseteil und dem energetisch nutzbaren Teil unterschieden. Die letztlich abgeleitete Menge – ausschlaggebend die Studie des BfN (2017) – führt mit 11 Mio. t_{atro} zu einem energetisch nutzbaren Waldholzpotenzial, das deutlich unter der aktuell genutzten Menge liegt.

Nicht trivial ist im Übrigen auch der Schritt der Umrechnung der Abfall- und Reststoffmassen in Energieeinheiten. Viele Potenzialstudien legen von vornherein nur Angaben in Peta-Joule (PJ) vor, was die Nachvollziehbarkeit oft erheblich erschwert. In dieser Arbeit wurde daher besonderer Wert darauf gelegt, dass die Herleitung der in PJ angegebenen Daten für jeden Stoffstrom transparent nachvollziehbar ist.

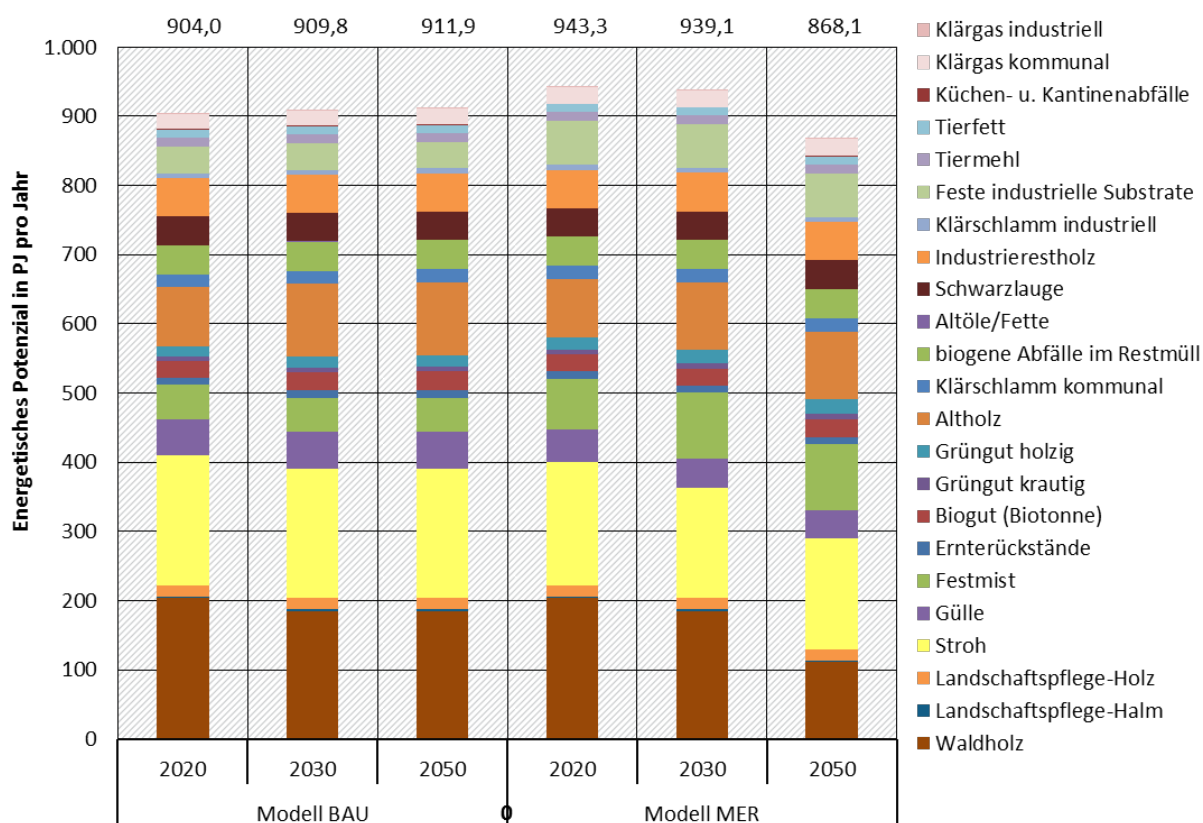
Wie Abbildung 1 zeigt stehen etwa 900 PJ (870 bis 940 PJ, je nach Jahr und Modell) an biogenen Abfall-/Reststoffen als technisch-ökologisch erschließbares Potenzial in Form von Brenn- oder Kraftstoffen für das Energiesystem zur Verfügung. Was die Genauigkeit dieser Zahlenangaben betrifft, sind die

oben angeführten Einschränkungen zu beachten. Für mehrere Stoffströme ließen sich die Restriktionskriterien nur mit qualitativer Einschätzung oder gar nicht anwenden. Für manche Stoffströme ist die Aktualität der Datengrundlagen nicht gegeben.

Es sei außerdem betont, dass Teile dieses Potenzials bereits energetisch genutzt werden (v.a. das Wald-, Alt- und Industrieholz). Nur bestimmte Stoffströme sind noch im größerem Umfang zusätzlich erschließbar (v.a. Stroh, Gülle/Festmist, Biogut).

Der höchste Energieinput kommt vom Holz (360 PJ), wobei das Waldholz mit ca. 200 PJ klar den größten Anteil hat. Auch Stroh stellt mit 187 PJ einen großen Anteil. Doch gerade beim Stroh zeigt sich die Schwierigkeit der Ergebnislage: Zum Beispiel kann das Stroh je nach Wetterereignis (z.B. Trockenheit) in einem Jahr mehr oder weniger anfallen. Somit verschieben sich die Potenziale.¹ Die Potenziale von Gülle bzw. Festmist haben mit ca. 110 PJ einen eher kleineren Anteil. Aufgrund der Notwendigkeit effektiver Klimaschutzmaßnahmen in der Landwirtschaft ist es jedoch wichtig, diese Stoffe in Biogasanlagen zu behandeln. Bei den vergärbaren Abfallmengen ist besonders die Biotonne (24,3 PJ) zu nennen. Interessant ist jedoch auch der biogene Abfall im Restmüll (42,5 PJ), der gezielt mobilisiert werden könnte. Die erweiterten Restriktionskriterien beinhalten hier auch Maßnahmen zur Vermeidung von Lebensmittelabfällen. Weitergehende Strategien zur Abfallvermeidung, die hier aber nicht untersucht werden konnten, würden das erschließbare Potenzial entsprechend verringern.

Abbildung 1: Energetische Potenziale^{a)} der Abfall-/Reststoffe für die Modelle BAU und MER für die Jahre 2020, 2030 und 2050; über den Balkengruppen sind die Summen aufgeführt.



a) Bezogen auf den unteren Heizwert oder das Biogasbildungspotenzial des Inputmaterials

¹ Für konkrete Projektierungen müssen somit vor Ort genaue Analysen bzgl. der Verfügbarkeit erarbeitet werden.

Quelle: Eigene Darstellung ifeu, IZES

Geeignete Konversionstechnologien²

Der Biomassebedarf unterscheidet sich stark zwischen den Konversionstechnologien, Anlagenleistungen, Anlagentypen und Nutzungskonzepten. Um präferierte Nutzungspfade im Strom-, Wärme- und Kraftstoffmarkt zu identifizieren müssen die technisch-ökonomischen Randbedingungen heutiger und zukünftiger Konversionstechnologien analysiert werden. Für Bioenergieträger auf Basis von biogenen Abfall- und Reststoffen werden vor diesem Hintergrund heute verfügbare und zukünftige technologische Konzepte zur Herstellung von Sekundär- und Endenergieträgern aus verfahrenstechnischer, umweltspezifischer und wirtschaftlicher Sicht analysiert und bewertet.

Dafür wurden für insgesamt 19 Techniken auf Basis einer Literaturrecherche Technologiesteckbriefe erstellt. Die Auswahl schloss alle Konversionstechnologien ein (Verbrennung, Vergasung, Vergärung, Alkoholische Fermentation und Umesterung). Des Weiteren wurden typischen Anlagen und Anlagengrößen ausgewählt, um die Bandbreite möglichst groß zu halten. Ziel der Analyse ist es, Informationen für die spätere Bewertung der Einsatzpfade bereitzustellen.

Tabelle 2: Übersicht über die Konversionstechnologien und näher betrachteten Techniken

Konversionstechnologie	konkret betrachtete Techniken
Verbrennung	Holzpelletzentralheizung 15 kW _{th}
	Holzhackschnitzelkessel 500 kW _{th}
	Heizkraftwerk 5 MW _{el}
	ORC HKW 250 kW _{el}
	Klärschlammverbrennungsanlage 10 MW
	Mitverbrennung fester Biomasse im Kohle-KW
	Abfallverbrennungsanlage 50 MW
Vergasung	Kleinvergaser 30 kW _{el}
	Holzvergaser 10 MW _{el}
	Bio-SNG 25 MW _{SNG}
	BtL 100 MW _{Biofuel}
Vergärung	Biogasanlage 75 kW _{el}
	Bioabfallvergärung 500 kW _{el} - Nassvergärung
	Bioabfallvergärung 800 kW _{el} - Trockenvergärung
	Biomethananlage 2 MW - Nassvergärung
	Biomethananlage 2 MW - Trockenvergärung
Alkoholische Fermentation	Ethanolanlage
Umesterung	Biodieselanlage

Quelle: eigene Zusammenstellung ifeu, IZES, Öko-Institut

² Der Begriff „Technologie“ wird in diesem Bericht dann verwendet, wenn von einer übergreifenden Bezeichnung von Techniken bzw. Technikkonzepten die Rede ist; sowie sich der Kontext auf konkretere oder spezifischere Zusammenhänge bezieht, wird der Begriff „Technik“ verwendet; die Abgrenzung zwischen beiden Begriffen verläuft im Einzelfall unscharf

Bewertung der Eignung der ausgewählten Techniken für Abfall-/Reststoffe

Aufgrund der Komplexität der Aufgabenstellung erfolgte die Bewertung der technischen Eignung von Technologien für Abfall-/Reststoffe in drei Schritten. Dies soll zur Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Teilentscheidungen beitragen und verdeutlichen, welche Kriterien bei welchem Teilschritt zum Einsatz kommen und wie sie die Gesamtentscheidung beeinflussen.

Die drei Schritte lauten:

1. Erstellung einer technischen Eignungsmatrix
2. Modifikation der technischen Eignungsmatrix
3. Erstellung der Einsatzpfadmatrix

Für jede einzelne Abfall- und Reststoffart wurde die Eignung für eine Behandlung zum Einsatz in einer der betrachteten 19 Techniken geprüft.

Für die Erstellung einer technischen Eignungsmatrix wurden Charakteristika der Abfall- und Reststoffe mit Parametern zur Charakterisierung der Konversionstechniken verknüpft. Das Ziel ist dabei möglichst objektive oder objektivierbare Kriterien zu verwenden, die unter rein technischen Gesichtspunkten eine Zuordnung von Reststoff und spezifischer Technik ermöglichen. So kann z.B. der Wassergehalt des untersuchten Materials mit den technischen Erfordernissen einer Technik bezüglich der gewünschten Feuchte des zu behandelnden Materials abgeglichen werden.

Auf der Basis geeigneter Informationen zu Abfällen und Reststoffen und technischer Gegebenheiten wurde eine möglichst überschneidungsfreie Auswahl von Kriterien für die technische Eignungsmatrix bestimmt. Sie umfasst die folgenden vier Kriterien:

- ▶ Wassergehalt
- ▶ Gasertrag (bei Vergärung)
- ▶ Anforderung Struktur Inputmaterial
- ▶ Materialreinheit

Die Bewertung wurde anhand eines dreistufigen „Ampelsystems“ (grün = gute Übereinstimmung, gelb = partielle Übereinstimmung, rot = keine Übereinstimmung) durchgeführt.

Als Regel gilt: Eine Abfall-/Reststoff und Technik Kombination gilt als geeignet, wenn sie keine mit „rot“ gekennzeichnete Einzelbewertung enthält.

Im zweiten Schritt wurde nochmals überprüft, ob eine „rot“-Bewertung durch die Berücksichtigung einer sinnvollen Vorbehandlung zu einer günstigeren Einzelbewertung führen kann. Die Auswahl, ob eine Vorbehandlung sinnvoll ist und eine vernünftigen optionale Behandlungsvariante ergibt, wurde per Expertenurteil vorgenommen.

Die am Ende der ersten zwei Arbeitsschritte vorliegenden Kombinationen (Einsatzpfade) aus Abfall-/Reststoff und Konversionstechnik (mit oder ohne Modifikation) wurden dann einer erweiterten Bewertung unterzogen. Diese erweiterte Bewertung bezieht die Anwendung des erzeugten Energieprodukts mit ein. Daraus wurde im dritten Schritt eine Einsatzpfadmatrix – wiederum schrittweise angewandt:

1. Aufstellung prioritärer Einsatzpfade
2. Zusammenfassung von ähnlichen Abfällen/Reststoffen innerhalb einer Konversionstechnik
3. Aufstellung der Einsatzpfadmatrix als Ausgangspunkt des nachfolgenden Bewertungsschritts

4. Auswahl der Einsatzarten und Zuordnung zu Energieprodukten und Energieanwendungen

Zu einer weiteren Differenzierung der Einsatzpfade führen die verschiedenen Energieprodukte, die von den Einsatzpfaden erzeugt werden:

- ▶ Strom;
- ▶ Wärme in Form verschiedener Anwendungen wie Gebäudeheizung oder Prozesswärme, die auch weiter auszudifferenzieren sind, wie z.B. in leitungsgebundene Gebäudewärme oder Einzelfeuerung, nieder- oder höherkalorischer Prozessdampf (je nach Druck und Temperatur);
- ▶ Kraftstoffe, die ebenfalls weiter auszudifferenzieren sind, wie z.B. Biokraftstoffe für straßengebundenen, Schiffs- oder Flugverkehr.

Manche Pfade können dabei verschiedene Energieprodukte hervorbringen. Tabelle 3 zeigt, welche Pfade mit welchen Energieprodukten verknüpft sind.

Im Falle von KWK gibt es außerdem folgende Möglichkeiten:

- ▶ Bei Kesselanlagen mit Dampfturbinen sind Strom- und Wärmenutzungsgrade (abhängig von der Bauart) variabel; mehr Stromkopplung bedeutet weniger Wärmekopplung und umgekehrt; daher werden für die Bewertung nur die beiden „Extremfälle“ betrachtet:
 - Reine Wärmekopplung und Nutzung als Prozesswärme mit niedrigen bzw. höheren Dampfparametern (150°C bzw. 300°C) oder
 - Reine Stromkopplung.

Für manche Einsatzpfade wurde in Tabelle 3 als Energieprodukt somit durchgängig Strom angesetzt. Diese Vorgehensweise/Festlegung auf ein Produkt ist notwendig, um die Bewertung der Einsatzpfade nachvollziehbar zu halten. Um zu zeigen, dass die Wärmenutzung eine komplementäre oder additive Option darstellt, sind diese Stellen in der Tabelle mit (KWK) in Klammern markiert.

Bei Gasmotorenanlagen (Biogas-BHKW) fällt die Abwärme zur Nutzung ohne Einschränkung des Stromwirkungsgrades an. Für Biogasanlagen ist die Wärmenutzung daher keine Alternative zur Stromnutzung sondern grundsätzlich additiv. Für die entsprechenden Pfade 19-25 wurde daher zusätzlich zum maximal möglichen Strom-Output immer die zusätzlich mögliche Abwärmenutzung einbezogen, für die Aufstellung in Tabelle 3 mit KWK ohne Klammern markiert.

Tabelle 3: Energieprodukte nach den verschiedenen Einsatzpfaden

Nr	Abfall-/Reststoff	Konversionstechnik	Strom	Gebäude- wärme		Prozess- wärme		Kraftstoff		
				Ltg	EGbd	ND	MD	Str. Pkw	Sch./ Flgwg	Str. Lkw
1	Waldholz	Holzpelletzentralheizung 15 kW			x					
2	Industrieholz, Feste in- dustrielle Substrate	Holzpelletzentralheizung 15 kW			x					
3	Waldholz, Industrieholz	Holzhackschnitzelkessel 500 kW		x		x	x			
4	Landschaftspflege-Holz, Grüngut holzig	Holzhackschnitzelkessel 500 kW		x		x	x			
5	Holzreststoffe	Heizkraftwerk 5 MW _{el}	X	(KWK)			x			
6	Stroh	Heizkraftwerk 5 MW _{el}	X	(KWK)			x			
7	Waldholz, Landschafts- pflege-Holz, Grüngut holzig	ORC HKW 250 kW _{el}	X	(KWK)						
8	Stroh	ORC HKW 250 kW _{el}	X	(KWK)						
9	kommunaler und in- dustrieller Klärschlamm	Klärschlammverbren- nungsanl.	X	(KWK)			x			
10	Biogut	Klärschlammverbren- nungsanl.	X	(KWK)			x			
11	Holzreststoffe	Mitverbrennung Kohle- HKW	X	(KWK)						
12	Tiermehl	Mitverbrennung Kohle- HKW	X	(KWK)						
13	12 Reststoffe	Abfallverbrennungsan- lage	X	(KWK)			x			
14	Holzreststoffe	Kleinvergaser 30 kW	X		x					
15	Waldholz, Altholz, In- dustrieholz	Holzvergaser 10 MW _{el}	X	(KWK)						
16	Waldholz, Altholz, In- dustrieholz	Bio-SNG-Anlage 25 MW	X	(KWK)		x			x	
17	Waldholz, Landschafts- pflege-Holz, Altholz, In- dustrieholz	BtL-Anlage 100 MW						x	x	x
18	Straw	BtL plant 100 MW _{biofuel}						x	x	X
19	herbaceous biomass from landscape and green waste, slurry and manure	Biogas plant 75 kW _{el} - wet	X	CHP						

Tabelle 3: Energieprodukte nach den verschiedenen Einsatzpfaden

Nr	Abfall-/Reststoff	Konversionstechnik	Strom	Gebäude- wärme		Prozess- wärme		Kraftstoff		
				Ltg	EGbd	ND	MD	Str. Pkw	Sch./ Flgwg	Str. Lkw
20	harvest residues	Biogas plant 75 kW _{el} - wet	X	CHP						
21	herbaceous green waste, slurry and manure	Biogas plant 500 kW _{el} - wet	X	CHP						
22	harvest residues	Biogas plant 500 kW _{el} - wet	X	CHP						
23	herbaceous green waste, manure, harvest residues black liquor	Biogas plant 800 kW _{el} - dry	X	CHP						
24	Straw	Biogas plant 800 kW _{el} - dry	X	CHP						
25	biowaste	Biogas plant 800 kW _{el} - dry	X	CHP						
26	herbaceous green waste, slurry and manure	Biomethane plant 2 MW - wet	X	(CHP)	x	x	x	x	x	x
27	harvest residues	Biomethane plant 2 MW - wet	X	(CHP)	x	x	x	x	x	x
28	herbaceous biomass from landscape and green waste, manure, harvest residues black liquor	Biomethane plant 2 MW - dry	X	(CHP)	x	x	x	x	x	x
29	Straw	Biomethane plant 2 MW - dry	X	(CHP)	x	x	x	x	x	x
30	Biowaste	Biomethane plant 2 MW - dry	X	(CHP)	x	x	x	x	x	x
31	Straw	LC Ethanol plant						x	x	
32	animal fat, used oils and fats	Biodiesel plant							x	x

Eigene Zusammenstellung ifeu

Ltg. = Leitungsgebundene Gebäudewärme; EGbd. = Einzelgebäude; ND. = Niederdruck-Prozessdampf, MD. = Mitteldruck-Prozessdampf; Str. Pkw= straßengebunden für Pkw; Str. Lkw= straßengebunden für Lkw; Sch./Flgwg. = Treibstoff für Schiffs- oder Flugverkehr;

x = zu bewertender Einsatzpfad, KWK = Abwärme aus KWK wird additiv einbezogen; (KWK): Abwärme aus KWK als Alternative zur vollständigen Stromkopplung, die hier zu Grunde gelegt wird.

Bewertung der Einsatzpfade und Entwicklung eines Gesamtnutzungskonzepts

Auf der Basis des energetisch erschließbaren biogenen Abfall- und Reststoffpotenzial, der für eine Nutzung im Energiesystem erforderlichen Konversionstechniken sowie der technischen Eignungsbewertung von Kombinationen aus Stoffen und Techniken und der ökologischen Bewertung der daraus resultierenden möglichen Einsatzpfade wurde abschließend ein Gesamtnutzungskonzept entwickelt.

Die Bewertung der 32 Einsatzpfade, in einigen Fällen noch differenziert nach verschiedenen Energieprodukten, erfolgte anhand folgender fünf Kriterien:

- ▶ Energieeffizienz
- ▶ Treibhausgasbilanz
- ▶ Kostensituation
- ▶ Weitere ökologische Aspekte
- ▶ Kompatibilität zur Transformation des Energiesystems

Jedes Kriterium wurde wiederum mit einer 3-skalierten Wertstufe ausgewertet. Anders als in der technischen Eignungsbewertung geht es hierbei nicht um den Ausschluss eines Pfades, sondern die Ausgestaltung einer Rangbildung. Die Stufen lauten dabei:

- ▶ hoher Erfüllungsgrad (3 Punkte)
- ▶ mittlerer Erfüllungsgrad (2 Punkte)
- ▶ geringer Erfüllungsgrad (1 Punkt)

Dieses soll eine Richtung weisen, welche Rolle die Abfall- und Reststoffbiomasse im künftigen Energiesystem spielen sollen und in welchem Umfang und in welchen Einsatzoptionen sie im Energiesystem genutzt werden sollen.

Das Ergebnis – das Gesamtnutzungskonzept – wurde in Form von Materialstrom-Diagrammen (siehe Kapitel 7.1, die Abbildung 29 bis Abbildung 32) dargestellt, die die aufgrund der Bewertung priorisierten Zuweisungen von Abfall-/Reststoff über konkrete Konversionstechniken zu erzeugtem Energieprodukt veranschaulichen. Neben dem *Basisfall* (Anwendung der Kriterien wie oben beschrieben) wurden als Sensitivitätsanalyse auch Einflüsse von bestimmten Festlegungen des Bewertungsansatzes auf die Ergebnisse geprüft (siehe letzter Anstrich der folgenden Auflistung). Das Ergebnis zeigt eine klare Priorisierung von Produkten für die Wärmebereitstellung:

- ▶ Im Basisfall stellt für ca. 88 % des energetischen Potenzials an Abfall-/Reststoffen die Wärmebereitstellung den zu bevorzugenden Einsatzbereich dar.
- ▶ Für alle festen Abfall-/Reststoffe mit geringen Feuchtegehalten erreicht in den meisten Fällen eine direkte energetische Nutzung in einer Kesselanlage oder einem Heizkraftwerk mit der Erzeugung von Prozesswärme die beste Bewertung.
- ▶ Für die mit höheren Feuchtegehalten verbundenen Abfall-/Reststoffe ist der Weg über eine Biomethananlage zu Biomethan, ebenfalls teils für die Wärmenutzung, überwiegend jedoch für die Kraftstoffherstellung (sprich dem Verkehr, dem 10 % des Inputs zugerechnet werden) die am besten

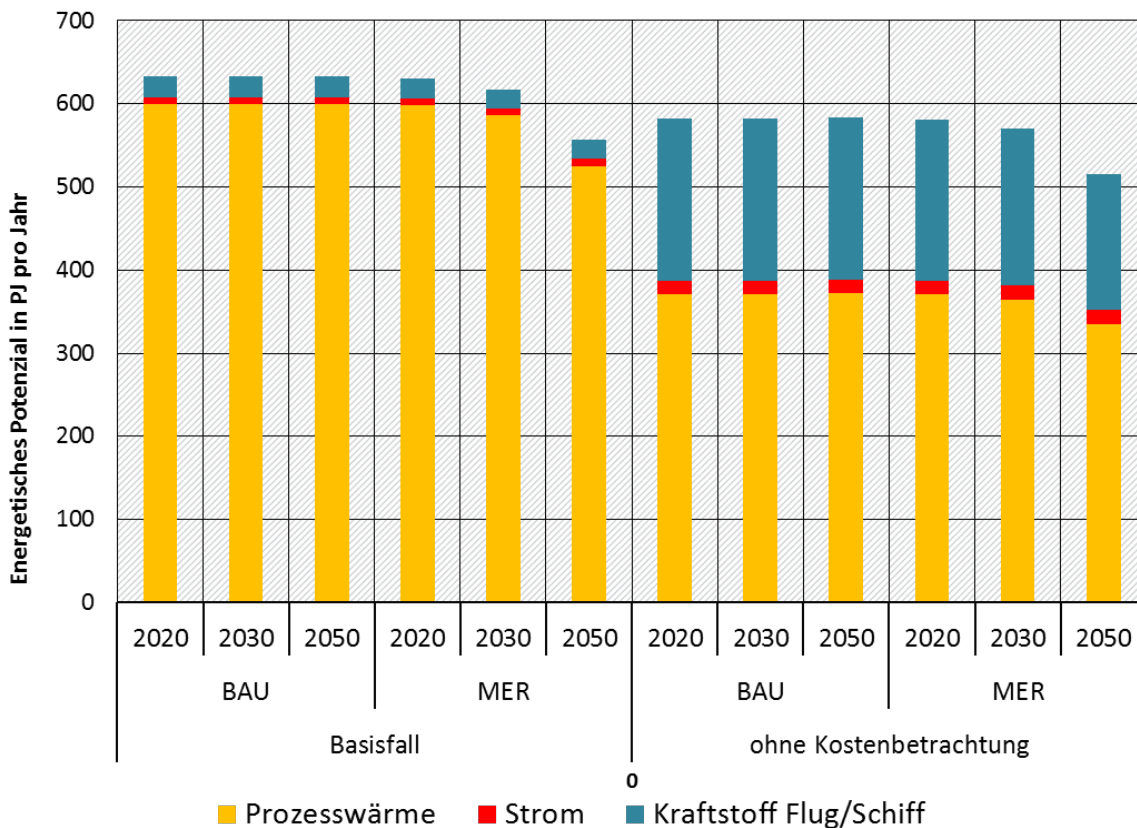
bewertete Option. Der Einsatz von Klärgas in BHKW für Strom- und Wärmeerzeugung nimmt etwa 2,5 % ein.

- ▶ Andere Pfade, wie Biogasanlage zu Strom und gekoppelter Wärme oder SNG- sowie BtL-Anlagen zu Kraftstoff liegen dagegen mit geringem Abstand hinter den dominierenden Wärmeoptionen. Ihnen werden im Basisfall somit keine Abfall- / Reststoffe zugerechnet.
- ▶ Zur Prüfung der Stabilität der Ergebnisse wurden die gesetzten Randbedingungen des Bewertungsansatzes im Sinne einer Sensitivitätsanalyse variiert.
Eine Verschiebung der Ergebnisse wird deutlich, wenn man das Kriterium „Kostenbetrachtung“ aus der Bewertung herausnimmt: Für mehrere Abfall-/Reststoffe zeigt sich dann zumindest Gleichrangigkeit eines Wegs über Biomethan, SNG oder BtL zu Kraftstoff.
Gegenüber dem Basisfall werden unter dieser Variante anstelle von 88 % nur noch 55 % der Wärmebereitstellung zugewiesen, 38 % dagegen dem Verkehr. Gut 6 % werden über Biogasanlagen der Stromproduktion zugerechnet.

Für den Basisfall unter dem das Abfall- / Reststoffpotenzial beschreibenden Modell „business as usual“ (BAU) und für das Jahr 2020 (wie auch die Jahre 2030 und 2050) resultieren:

- ▶ ca. 600 PJ Wärme
- ▶ ca. 8,2 PJ Strom
- ▶ ca. 25 PJ Kraftstoff

Es sei betont, dass die Fortschreibung für die Jahre 2030 und 2050 ohne weitere Annahmen zur Technikentwicklung (z.B. Veränderungen in Bezug auf Effizienzen, Treibhausgasbilanzen oder Kosten) erfolgt und sich lediglich durch Änderungen in den Potenzialmengen unterscheiden.

Abbildung 2: Endenergiepotenziale der Abfall-/Reststoffe nach den Modellen BAU und MER für die Jahre 2020, 2030 und 2050.

Eigene Darstellung ifeu; Quelle: Berechnungen ifeu

Die Werte weichen für das Modell „Mit erweiterten Restriktionen“ (MER) bis 2050 für die Wärme etwas nach unten ab (525 PJ), während dank Zunahme an Festmistverfügbarkeit der Output an Kraftstoff von 25 PJ in 2020 ein wenig auf 23,5 PJ abnimmt. Die Erzeugung von Strom bleibt über die Zeit konstant bei 8,2 PJ.

Für die Variante „Ohne Kostenbetrachtung“ ergeben sich ca. 370 PJ Wärme (unter MER abnehmend auf 335 PJ in 2050) und 195 PJ Kraftstoff (unter MER abnehmend auf ca. 160 PJ in 2050). Die Mengen an Strom dagegen nehmen von 16 PJ auf 17,3 PJ bis 2050 leicht zu.

Das Einsparpotenzial der energetischen Nutzung der biogenen Abfall- und Reststoffen liegt bei insgesamt ca. 46 Mio. t CO₂-Äq. pro Jahr im Modell BAU, Basisfall. In der Variante „ohne Kostenberechnung“ liegt die Einsparung bei ca. 43 Mio. t CO₂-Äq. pro Jahr. Im Modell MER reduzieren sich diese Werte bis zum Jahr 2050 auf ca. 37 Mio. t CO₂-Äq. pro Jahr.

Es ist zu betonen, dass diese Werte zum THG-Einsparpotenzial der Gesamtnutzungskonzepte nur der Veranschaulichung der Größenordnungen dienen. Wichtig ist dabei festzuhalten, dass bei einer Variation der Ansätze und Annahmen keine wesentlich anderen Ergebnisse zu erwarten sind.

Fazit

Aufgrund der detaillierten Auswertung der umfangreichen Literatur ist das Ergebnis als solide Basis für die Einschätzung der reststoffbezogenen Biomassepotenziale in Deutschland zu werten. Die zusätzlich eingerechneten Restriktionen weisen den oberen Grenzbereich für ein technisch-ökologisch

erschließbares Potenzial aus. Dies liegt für die Gesamtheit der Abfälle und Reststoff im Bereich von 900 PJ pro Jahr, bezogen auf den Energiegehalt (entweder als Heizwert oder als Biogaspotenzial).

Auf die bestehenden Unsicherheiten bezüglich der Unschärfe der Zahlenangaben wurde bereits hingewiesen – auch darauf, dass nur bestimmte Stoffströme noch in größerem Umfang zusätzlich erschließbar sind, da Teile dieses Potenzials bereits energetisch genutzt werden.

Unter Einbezug der Breite an technischen Optionen zur Konversion und Nutzung dieser Abfälle und Reststoffe erweist sich in der Gesamtbewertung am Ende die Nutzung als Energierohstoff für die Wärmebereitstellung mit vergleichsweise hoher Klarheit als die für die meisten Stoffe zu bevorzugende Wahl. Das Bild ist jedoch durchaus vielschichtig und es bleibt ebenfalls entscheidungsrelevant, die Stoffströme im Einzelnen zu betrachten. Dementsprechend differenziert fällt das hier entwickelte Gesamtnutzungskonzept aus.

Für eine konkrete Umlenkung von Stoffströmen, wie sie für eine Umsetzung insbesondere auf regionaler Ebene erforderlich wären, enthält das Gesamtnutzungskonzept keine Handlungsanleitungen. Es sei abschließend nochmals betont, dass im Rahmen der Arbeit nicht nach dem tatsächlichen Bedarf der Energieprodukte in den verschiedenen Systembereichen gefragt wurde. Dieses Konzept ist vielmehr als eine Form von Allokationsplan für die ökologisch sinnvolle Nutzung der verfügbaren biogenen Abfall-/Reststoffe im Energiesystem zu verstehen und nicht mit einem von der Nachfrage her definierten Energieszenario zu verwechseln. Es wäre jedoch eine interessante Aufgabe in anderen laufenden oder nachfolgenden Arbeiten, dieses Nutzungskonzept den entsprechenden Szenarien gegenüberzustellen bzw. darin einzubringen.

Summary

Objectives of the research project

Biomass currently contributes significantly to the provision of electricity, heat and fuels from renewable energies in Germany. At present, however, the use of bioenergy is predominantly based on cultivated biomass and thus reaches ecological limits. Above all, the scarce resource land area forms a general limit, which in particular also competes with food production or materially used biomass. In addition, agricultural land management is associated with significant and diverse negative impacts on the environment. It is generally beyond question that the use of agricultural land for the production of food has fundamental priority. In the sense of a usage hierarchy, material use is also classified as higher than primary energetic use, since the material use of biomass via the cascade principle enables a later use of the biogenic material as residues or waste for energetic use.

This research project focuses on the group of biogenic wastes and residues and investigates the following questions:

1. What potential of biogenic wastes and residues is available for an energetic use, if all feedstocks that should for legal or economic reasons materially recycled are excluded and if further restriction criteria (above all from an ecological point of view) are applied?
2. Which of the available conversion technologies are best suited to make waste and residues usable for energy purposes, taking into account the respective material properties?
3. Which use paths for the identified material flows and quantity potentials are suitable to fulfil demanding technical, economic and ecological criteria of an integrated utilisation concept and what contribution can they make to the energy mix of the future?

However, this research project does not represent an integrated view of the energy system (electricity, heat and transport) and does not provide any energy scenarios. It identifies possible material flows suitable for energy generation that can serve as a basis for the use of bioenergy in energy scenarios.

Potentials of biogenic waste and residues

First, a comprehensive literature study was conducted to determine the potential of biogenic waste and residues by material group. About 50 studies were analysed which were not published before 2004 and which go beyond a naming of a general residual potential. Particular focus was placed on the material flows from the following areas:

- Forestry
- By-products and waste of the wood and paper industry
- Agriculture
- Municipal and commercial biogenic waste and residues
- Material flows from landscape management
- Industrial biogenic waste

First, the studies, some of which were very different to each other, were tested for comparability of results and procedures using a uniform catalogue of criteria. The respective definition of biomass potential differs from study to study. Therefore, the definition to be applied for the project had to be clarified so that in the course of the examination it could be decided which studies for the respective material

flow were to be selected as the basis for the respective material flow's potential range according to the clarified definition and the catalogue of criteria.

For the second step, additional restriction criteria were defined and applied in order to describe the use corridor for a technically and ecologically exploitable potential. In a discussion process with the client, these criteria were derived for two models:

1. model "BAU" (business as usual) - as a mixture of the currently existing and legally binding restrictions and voluntary restrictions
2. model "MER" ("with extended restrictions", in German: "*Mit Erweiterten Restriktionen*") Table 1 shows the restriction criteria used to evaluate the area-related residues.

Table 1: Restriction criteria and evaluation of land-use-related residues

Material	Restriction criteria	State ^{a)}	Realization ^{b)}
valid for all area-related residues	• No land-use change	2	+
	• Rewetting of agriculturally used areas with peat soils	3	+/-
agricultural residues in general	• Consideration of organic farming with 20 % area	3	+/-
	• Nutrient balances	2	+
	• Humus balancing	3	+/-
	• Consideration of ecological conversation compensation areas	3	+
		3	-
	• Changes in cultivation systems	1	+/-
	• Yield increases		
additional criteria for:			
Straw	• Technological developments	2	+
	• Competition for use	1	+
other harvest residues	• Catch crops and crops being undersown reported as residue?	3	-
		2	+
manure	• Development of livestock	3	+/-
	• Region's capacity to absorb nutrients	3	-
	• Consideration of grazing livestock husbandry	3	-
	• Consideration of type of stable housing		
biomass from forests	• 10 % natural forest development in state-owned forests	1	+
		1	+
	• Clear cutting ban	1	+
	• Consideration of nature conservation areas		
	• Consideration of forest certifications	3	+/-
	• Biodiversity goals in used forests	2	+
	• Limit for non-solid wood (< 7 cm)	1	+/-
woody biomass from land management	• Regular cutting of hedges taken into account?	3	+/-
	• free cutting of grassland considered?	3	+/-

a) Criterion is (1) legally binding or natural environment requirement, (2) described by formal (but not legally binding) guidelines or by socio-economic trends, but not binding, (3) desirable

b) A three-part scale is used here to show whether the criterion is expressed in numbers (+), not quantifiable at all (-) or can only be described qualitatively (+/)

It was examined which restriction criteria had already been taken into account in the studies examined, or whether deductions from the potentials had been taken into account in any way. This showed that such information was mostly lacking and often the available numerical framework proved to be -

at least in part - not very up-to-date. A direct application of the literature data to the models was therefore not possible in many cases.

The application of the restriction criteria leads to a significant reduction in the potential of various materials, as they are already subject to material use (e.g. straw as bedding). On the other hand, the restrictions applied can lead to the fact that quantities of a material already in energy use are to be limited to a (significantly) smaller extent (e.g. forest wood).

The example of forest wood deserves closer consideration here. Especially with this material, the definition in the evaluated studies is very diffuse. The term "residual forest wood" is used inconsistently. In this project, this term was omitted for two reasons and it was instead explicitly referred to forest wood in the sense of dendromass: Firstly, the BAU criteria already lead to the exclusion of the small-sized assortment (< 7 cm). Secondly, the relevant quantities of forest wood already used for energy purposes are to be counted as solid wood (>7 cm) or low-value roundwood that is not used in the sawmill industry for economic reasons. In this research project it was therefore decided to use exactly this material (with the term dendromass) for the potential determination. A distinction was then made between the material dendro mass part and the energetically usable part. The final quantity derived - the BfN study (2017) was decisive - with 11 million t (absolutely dry) leads to a forest wood potential that can be used for energy purposes, which is significantly lower than the quantity currently used.

The step of converting the mass units of waste and residues into energy units is also not trivial. Many potential studies only provide data in Peta-Joule (PJ) from the outset, which often makes traceability considerably more difficult. In this paper, particular importance was therefore attached to ensuring that the derivation of the data given in PJ can be traced transparently for each material flow.

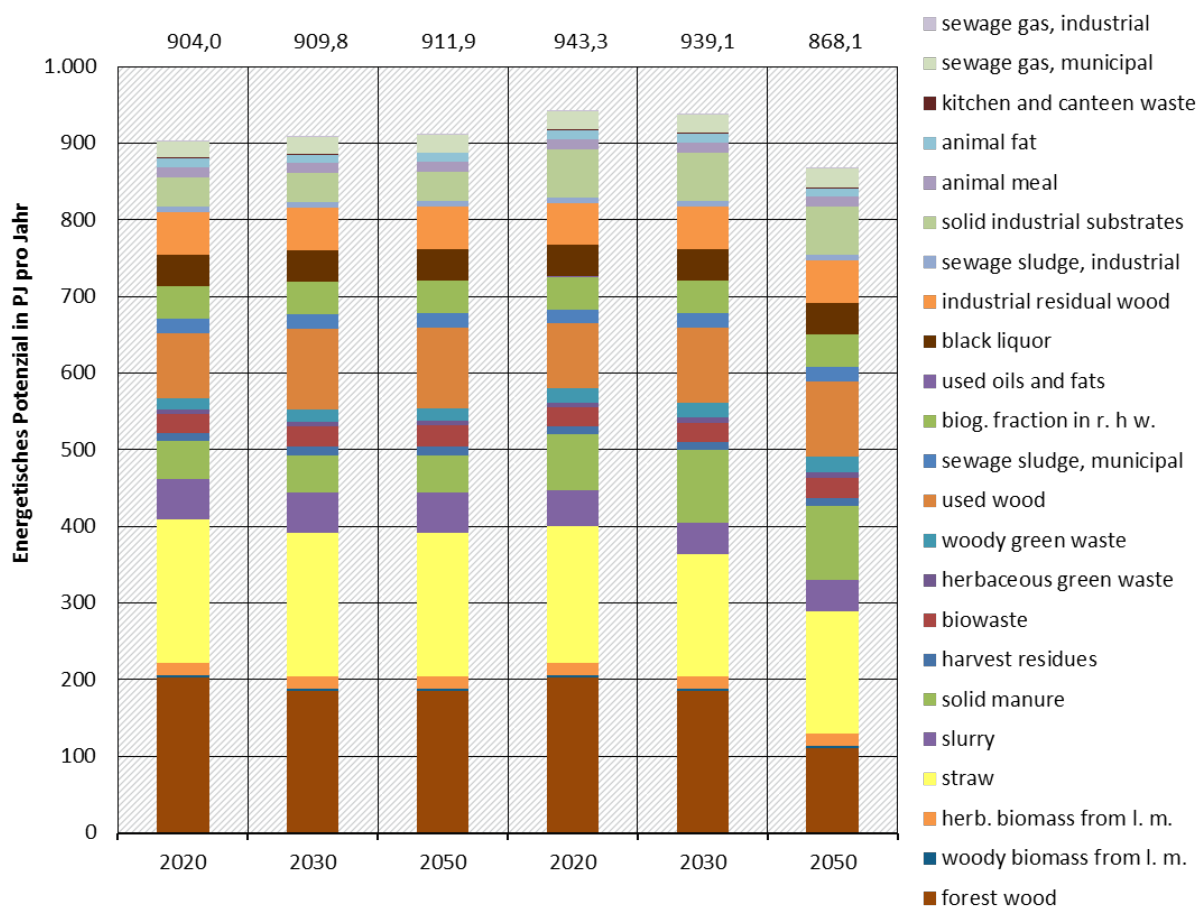
As Figure 1 shows, about 900 PJ (870 to 940 PJ, depending on the year and model) of biogenic waste/residues are available as technically and ecologically exploitable potential in the form of fuels for the energy system. As far as the accuracy of these figures is concerned, the limitations listed above must be observed. For several material flows, the restriction criteria could only be applied with a qualitative assessment or not at all. For some material flows the timeliness of the data bases is not given.

It should also be emphasised that parts of this potential are already being used for energy purposes (above all forest wood, waste wood and industrial wood). Only certain material flows can be exploited to a greater extent (e.g. straw, liquid manure/solid manure, organic material).

The highest energy input comes from wood (360 PJ) with forest wood clearly accounting for the largest share with approx. 200 PJ. Straw also accounts for a large share with 187 PJ. However, the difficulty of the result situation is particularly evident with straw: For example, depending on the weather event (e.g. drought), the straw can accumulate more or less in one year.³ This shifts the potential. The potentials of liquid manure or solid manure have a rather smaller share with approx. 110 PJ. Due to the need for effective climate protection measures in agriculture, however, it is important to treat these substances in biogas plants. The organic waste bin (24.3 PJ) is particularly worthy of mention among the fermentable quantities of waste. However, biogenic waste in residual household waste (42.5 PJ), which could be specifically mobilised, is also interesting. The extended restriction criteria also include measures to avoid food waste. Further strategies for waste avoidance, which could not be investigated here, would reduce the potential that could be tapped accordingly.

³ For concrete project planning, precise analyses regarding availability must therefore be carried out on site.

Figure 1: Energy potentials^{a)} of waste and residues for the BAU and MER models for the years 2020, 2030 and 2050; the totals are listed above the bar groups.



a) related to the net calorific value or biogas production potential of the input material

l.m. = landscape management; r.h.w. = residual household waste

Source: illustration ifeu, IZES, Öko-Institut

Appropriate conversion technologies⁴

The demand for biomass differs greatly between the conversion technologies, plant outputs, plant types and utilisation concepts. In order to identify preferred utilisation paths in the electricity, heat and fuel markets, the technical and economic boundary conditions of current and future conversion technologies must be analysed. Against this background, available and future technological concepts for the production of secondary and final energy sources for bioenergy sources based on biogenic waste and residues are analysed and evaluated from a process engineering, environmental and economic point of view.

For this purpose, technology profiles were compiled for a total of 19 technologies on the basis of a literature search. The selection included all conversion technologies (combustion, gasification, fermentation, alcoholic fermentation and transesterification). Furthermore, typical plants and plant sizes were selected in order to keep the bandwidth as large as possible. The aim of the analysis is to provide information for the later evaluation of the application paths.

⁴ The term "technology" is used in this report when a generic term for techniques or concepts of techniques is mentioned; when the context refers to more concrete or specific contexts, the term "technique" is used; the distinction between the two terms is indistinct in individual cases

Table 2: Overview of conversion technologies and techniques under consideration

Conversion technology	techniques under consideration
Combustion	wood pellet central heating 15 kW _{th}
	wood chips boiler 500 kW _{th}
	CHP plant 5 MW _{el}
	ORC cogeneration plant 250 kW _{el}
	sewage sludge combustion plant 10 MW
	co-combustion of solid biomass in coal power plant
	municipal solid waste incinerator 50 MW
Gasification	small-scale gasifier 30 kW _{el}
	wood gasifier 10 MW _{el}
	Bio-SNG 25 MW _{SNG}
	BtL 100 MW _{Biofuel}
Fermentation (biogas)	Biogas plant 75 kW _{el}
	Biogas plant 500 kW _{el} – wet fermentation
	Biogas plant 800 kW _{el} – dry fermentation
	Biomethane plant 2 MW – wet fermentation
	Biomethane plant 2 MW – dry fermentation
Fermentation (ethanol)	Ethanol plant
Transesterification	Biodiesel plant

Evaluation of the suitability of the selected techniques for waste/residues

Due to the complexity of the task, the evaluation of the technical suitability of technologies for waste and residues was carried out in three steps. This should contribute to the transparency and comprehensibility of the partial decisions and clarify which criteria are used in which partial step and how they influence the overall decision.

The three steps are as follows:

1. Preparation of a technical suitability matrix
2. Modification of the technical suitability matrix
3. Creation of the deployment path matrix

For each individual type of waste and residue, the suitability for treatment for use in one of the 19 techniques considered was tested.

For the preparation of a technical suitability matrix, characteristics of the waste and residues were combined with parameters for the characterisation of the conversion techniques. The aim is to use criteria which are as objective or objectifiable as possible and which, from a purely technical point of view, make it possible to classify residue to a specific technology. Thus, for example, the water content of the investigated material can be compared with the technical requirements of a technology with regard to the desired moisture content of the material to be treated.

On the basis of suitable information on waste and residues and technical conditions, a selection of criteria for the technical suitability matrix that was as free of overlap as possible was determined. It comprises the following four criteria:

- ▶ Water content
- ▶ Gas yield (by fermentation)

- ▶ Requested structure input material
- ▶ Material purity

The evaluation was carried out using a three-stage "traffic light system" (green = good agreement, yellow = partial agreement, red = no agreement).

As a rule, a waste/residue and technology combination is considered suitable if it does not contain an individual assessment marked "red".

In the second step, it was again examined whether a "red" rating could lead to a more favourable individual evaluation by considering a sensible pre-treatment. The selection as to whether pre-treatment is appropriate and whether a reasonable optional treatment option is available was made by expert judgement.

The combinations (application paths) of waste/residues and conversion technology (with or without modification) available at the end of the first two working steps were then subjected to an extended evaluation. This extended evaluation includes the application of the generated energy product. In the third step, an application path matrix was then applied - again step by step:

1. Establishment of priority deployment paths
2. Grouping of similar wastes/residues within a conversion technique
3. Listing the deployment path matrix as a starting point for the following assessment step
4. Selection of types of use and assignment to energy products and energy applications

The various energy products generated by the input paths lead to a further differentiation of the input paths:

- ▶ Electricity
- ▶ Heat in the form of various applications such as building heating or process heat, which can also be further differentiated, such as pipeline-bound building heat or individual firing, low or high calorific process steam (depending on pressure and temperature);
- ▶ Fuels that can also be further differentiated, such as biofuels for road, ship or air traffic.

Some paths can produce different energy products. Table 3 shows which paths are linked to which energy products.

In the case of CHP there are also the following possibilities:

- ▶ For steam turbine boilers, electricity and heat efficiencies (depending on type) are variable; more electricity generation means less heat generation and vice versa; therefore only the two "extreme cases" are considered for the assessment:
 - Pure heat generation and use as process heat with lower or higher steam parameters (150°C or 300°C) or
 - Pure electricity generation.

For some application pathways, the energy product used in Table 3 was therefore electricity throughout. In these cases it was necessary to determine the pathways on one product in order to keep the

evaluation of the application paths comprehensible. Since heat utilisation is a complementary or additive option, these entries in the table are marked with (CHP) in brackets.

In the case of gas engine plants (biogas CHP plants), the waste heat is generated for use without limiting the electricity efficiency. For biogas plants, the use of heat is therefore not an alternative to the use of electricity but is basically additional. For the corresponding paths 19-25, therefore, in addition to the maximum possible electricity output, the additional possible use of waste heat was always included; for the list in Table 3, (CHP) was marked without brackets.

Table 3: Energy products according to the various application pathways

Nr	waste/residue	conversion technique	electricity	building's heat		process heat		transport fuel		
				pipe	s.b.	l.p.	m.p.	str. p.v.	ship./av.	Str. truck
1	forest wood	wood pellet central heating 15 kW _{th}			x					
2	Industrial wood, solid industrial substrates	wood pellet central heating 15 kW _{th}			x					
3	Forest wood, industrial wood	wood chips boiler 500 kW _{th}		x		x	x			
4	woody biomass from landscape management and green waste	wood chips boiler 500 kW _{th}		x		x	x			
5	woody residues	CHP plant 5 MW _{el}	x	(CHP)			x			
6	Straw	CHP plant 5 MW _{el}	x	(CHP)			x			
7	forest wood, woody biomass from landscape management and green waste	ORC cogeneration plant 250 kW _{el}	x	(CHP)						
8	Straw	ORC cogeneration plant 250 kW _{el}	x	(CHP)						
9	municipal and industrial sewage sludge	sewage sludge incinerator	x	(CHP)			x			
10	organic waste	sewage sludge incinerator	x	(CHP)			x			
11	woody residues	co-combustion of solid biomass in coal power plant	x	(CHP)						
12	animal meal	co-combustion of solid biomass in coal power plant	x	(CHP)						
13	12 wastes and residues	municipal solid waste incinerator 50 MW	x	(CHP)			x			
14	woody residues	small-scale gasifier 30	x		x					
15	Forest wood, industrial wood, waste wood	wood gasifier 10 MW _{el}	x	(CHP)						
16	Forest wood, industrial wood, waste wood	Bio-SNG plant 25 MW _{SNG}	x	(CHP)		x			x	
17	Forest wood, industrial wood, waste wood, woody biomass from landscape management	BtL plant 100 MW _{biofuel}						x	x	x
18	Straw	BtL plant 100 MW _{biofuel}						x	x	x

Nr	waste/residue	conversion technique	electr icity	building's heat		process heat		transport fuel		
				pipe	s.b.	l.p.	m.p.	str. p.v.	ship./ av.	Str. truck
19	herbaceous biomass from landscape and green waste, slurry and manure	Biogas plant 75 kW _{el} - wet	X	CHP						

Table 3: Energy products according to the various application pathways

Nr	waste/residue	conversion technique	electricity	building's heat		process heat		transport fuel		
				pipe	s.b.	l.p.	m.p.	str. p.v.	ship./av.	Str. truck
20	harvest residues	Biogas plant 75 kW _{el} - wet	X	CHP						
21	herbaceous green waste, slurry and manure	Biogas plant 500 kW _{el} - wet	X	CHP						
22	harvest residues	Biogas plant 500 kW _{el} - wet	X	CHP						
23	herbaceous green waste, manure, harvest residues black liquor	Biogas plant 800 kW _{el} - dry	X	CHP						
24	Straw	Biogas plant 800 kW _{el} - dry	X	CHP						
25	biowaste	Biogas plant 800 kW _{el} - dry	X	CHP						
26	herbaceous green waste, slurry and manure	Biomethane plant 2 MW - wet	X	(CHP)	x	x	x	x	x	x
27	harvest residues	Biomethane plant 2 MW - wet	X	(CHP)	x	x	x	x	x	x
28	herbaceous biomass from landscape and green waste, manure, harvest residues black liquor	Biomethane plant 2 MW - dry	X	(CHP)	x	x	x	x	x	x
29	Straw	Biomethane plant 2 MW - dry	X	(CHP)	x	x	x	x	x	x
30	Biowaste	Biomethane plant 2 MW - dry	X	(CHP)	x	x	x	x	x	x
31	Straw	LC Ethanol plant						x	x	
32	animal fat, used oils and fats	Biodiesel plant							x	x

Source: compilation ifeu, IZES, Öko-Institut

pipe = pipe-based heat for buildings; s.b. = single building; l.p. = low pressure steam, m.p. = medium pressure steam;

str. P.v.= street-based for person vehicles; Str. truck= street-based for person vehicles for trucks; ship./av. = fuel for shipping or aviation;

x = pathway to be assessed, CHP = heat from CHP additionally included; (CHP): heat from CHP could be an alternatively produced instead of complete electricity production (condensation), on which this assessment is based.

Evaluation of the operational paths and development of an integrated utilisation concept

On the basis of the energy-related biogenic waste and residues potential, the conversion techniques required for use in the energy system and the technical suitability assessment of combinations of substances and techniques and the ecological evaluation of the resulting possible application paths, an integrated utilisation concept was finally developed. The 32 application paths were further specified according to different energy products.

The final evaluation was carried out on the basis of the following five criteria:

- ▶ Energy efficiency
- ▶ Greenhouse gas balance
- ▶ Cost situation
- ▶ Other ecological aspects
- ▶ Compatibility for the transformation of the energy system

Each criterion was again evaluated with a 3-scale value level. In contrast to the technical suitability evaluation, this does not involve the exclusion of a path, but the development of a ranking. The levels are as follows:

- ▶ High degree of fulfilment (3 points)
- ▶ Average degree of performance (2 points)
- ▶ Low degree of performance (1 point)

This should point the way, which role the respective waste and residual biomass should play in the future energy system and to what extent and in which application options they should be used in the energy system.

The result – the integrated utilisation concept – was presented in the form of material flow diagrams (see chapter 7.1, Figures 30 to 33), which illustrate the preferential assignment of a waste/residue via specific conversion techniques to the energy product generated on the basis of the evaluation. In addition to the base case (application of the criteria as described above), the sensitivity analysis was also used to examine the influences of certain provisions of the assessment approach on the results (see last line of the following list). The result shows a clear priority to use the waste/residues mostly for heat supply:

- ▶ In the base case, heat supply is the preferred area of application for approx. 88 % of the energetic potential of waste/remaining materials.
- ▶ For all solid waste/residues with low moisture contents, direct energetic use in a boiler plant or a combined heat and power plant with the generation of process heat achieves the best rating in most cases.
- ▶ For the waste/residues associated with higher moisture contents, the route via a biomethane plant to biomethane, also partly for heat utilisation, but predominantly for fuel production (i.e. traffic to

which 10% of the input is attributed) is the best evaluated option. The use of sewage gas in cogeneration plants for electricity and heat generation accounts for about 2.5%.

- ▶ Other paths, such as biogas plants for electricity and combined heat and power or SNG and BtL plants for fuel, on the other hand, are slightly behind the dominant heat options. In the base case, therefore, no waste/residues are attributed to them.
- ▶ To test the stability of the results, the set boundary conditions of the evaluation approach were varied in the sense of a sensitivity analysis.

A shift of the results becomes clear, if one takes the criterion "cost consideration" out of the evaluation: For several waste/remaining substances, at least the same ranking of a path from biomethane, SNG or BtL to fuel is then shown.

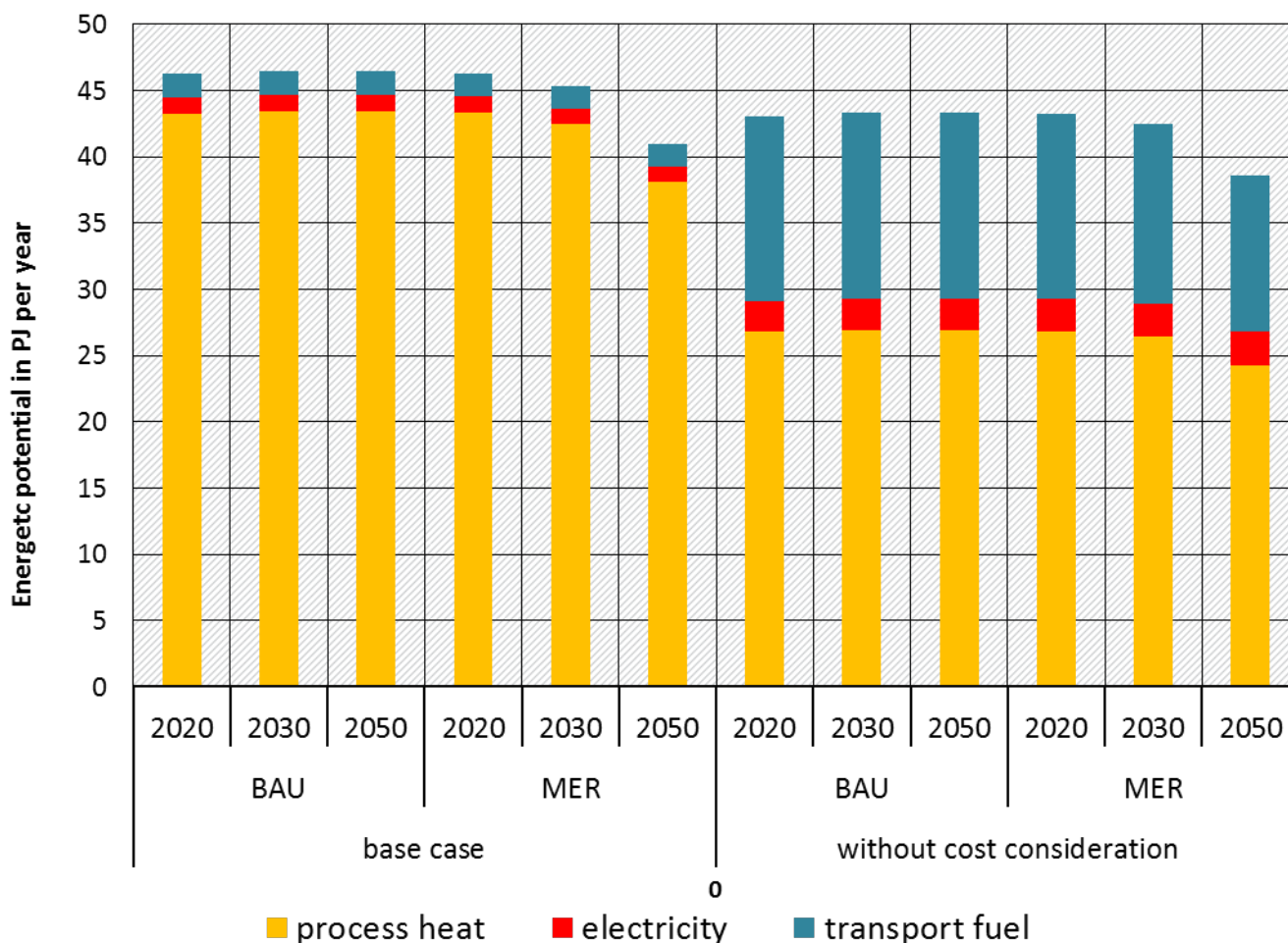
Compared to the base case, only 55 % of the heat supply is allocated under this variant instead of 88 %, while 38 % is allocated to transport. A good 6 % are allocated to electricity production via biogas plants.

For the base case, this results from the "business as usual" (BAU) model, which describes the waste/residue potential, and for the year 2020 (as well as the years 2030 and 2050) in:

- ▶ approx. 600 PJ Heat
- ▶ approx. 8.2 PJ Electricity
- ▶ approx. 25 PJ Fuel

It should be stressed that the update for the years 2030 and 2050 follows without further assumptions on technological development (e.g. changes with regard to efficiencies, greenhouse gas balances or costs) and differs only by changes in the potential quantities.

Figure 2: Final energy potentials of waste and residues according to the BAU and MER models for the years 2020, 2030 and 2050.



Own illustration; source: calculations ifeu

The values for the model "with extended restrictions" (MER) by 2050 deviate slightly downwards for heat (525 PJ), while the output of fuel decreases slightly from 25 PJ in 2020 to 23.5 PJ thanks to an increase in solid manure availability. The generation of electricity remains constant over time at 8.2 PJ.

For the variant "without cost consideration", there is about 370 PJ heat (decreasing under MER to 335 PJ in 2050) and 195 PJ fuel (decreasing under MER to about 160 PJ in 2050). The quantities of electricity, on the other hand, will increase slightly from 16 PJ to 17.3 PJ by 2050.

The savings potential of the energetic use of biogenic waste and residues amounts to a total of approx. 46 million t CO₂-eq. per year in the BAU model, base case. In the "without cost calculation" variant, the savings amount to approx. 43 million t CO₂ equivalent per year. In the MER model, these values will be reduced to approx. 37 million t CO₂ eq. per year by 2050.

It should be emphasised that these values for the GHG savings potential of the overall use concepts only serve to illustrate the orders of magnitude. It is important to note that no significantly different results can be expected from a variation of the approaches and assumptions.

Conclusions

On the basis of the detailed evaluation of the extensive literature, the result can be regarded as a solid groundwork for the assessment of the potentials of biogenic waste and residues in Germany. The additionally included restrictions indicate the upper limit range for a technically and ecologically exploitable potential. This is in the range of 900 PJ per year for the total of waste and residues, related to the energy content (either as calorific value or as biogas potential).

Reference has already been made to the existing uncertainties with regard to the uncertainty of the figures – also to the fact that only certain material flows can be additionally concluded to a larger extent, since parts of this potential are already being used energetically.

Taking into account the wide range of technical options for the conversion and use of these wastes and residues, the overall assessment at the end of the day shows that the use as energy raw material for heat supply with comparatively high clarity is the preferred choice for most substances. However, the picture is quite complex and it also remains relevant for the decision to consider the material flows in detail. The overall utilisation concept developed here is correspondingly differentiated.

For a concrete redirection of material flows, as they would be necessary for implementation especially at regional level, the overall use concept contains no instructions for action. Finally, it should be emphasised once again that the work did not ask about the actual demand for energy products in the various system areas. Rather, this concept is to be understood as a form of allocation plan for the ecologically sensible use of the available biogenic waste/residues in the energy system and should not be confused with an energy scenario defined on the basis of demand. However, it would be an interesting task in other ongoing or subsequent work to compare this utilisation concept with the corresponding scenarios or to introduce it into them.

1 Hintergrund und Zielsetzung

Nicht nur für fossile Energieressourcen, auch für jede Art von erneuerbarer Energie steht auf diesem Planeten nur ein begrenztes Potenzial zu Verfügung. Ob für Wasserkraft, Wind oder solare Einstrahlung, neben den Restriktionen die die Technik, die Ökonomie oder die Weltpolitik setzen, stößt jede Quelle vor allem auch an ökologische Grenzen. Diese lassen sich im Grunde immer an der verfügbaren Fläche festmachen.

Kein Energieträger ist jedoch so eng an die verfügbare Fläche gebunden wie die Biomasse. Aufgrund des biochemisch recht „trägen“ Umwandlungsprozesses der Photosynthese und des physiologischen Pflanzenwachstums ist der Flächenenertrag verglichen mit der Photovoltaik oder Windenergieanlagen gering, d.h. bei keinem erneuerbaren Energieträger sind mit Blick auf die planetaren Grenzen so eindeutige Nutzungseinschränkungen gegeben wie im Fall der Biomasse. Auf der anderen Seite sind Produktion und Nutzung von Biomasse essenzieller Bestandteil des Lebens. Die Biomassenutzung durch den Menschen ist dabei so alt wie die Menschheit und Grundbaustein für die Befriedigung vielfältiger Bedürfnisse, von der Ernährung über Gebrauchsmaterialien bis hin zur Energie.

Ausgehend von den Energiebedarfen der Industrieländer ist der vor zehn Jahren noch nahezu unumstrittene Ausbau der energetischen Biomassenutzung – unter Berücksichtigung der bislang thematisierten Ausbaupfade – inzwischen massiv als nachhaltige Lösung in Frage gestellt. Haberl et al. (2007) haben bereits 2007 errechnet, dass Europa schon heute weltweit erheblich mehr Produktivleistungen von Ökosystemen (Nettoprimärproduktion) in Anspruch nimmt, als es in der Lage ist, auf seinem eigenen Territorium zu mobilisieren. Zu keinen anderen Schlüssen ist auch das Umweltbundesamt gekommen, welches sich seit Jahren mit den komplexen Fragen zur Nachhaltigkeit von (insbesondere energetischer) Biomassenutzung befasst. Mit der Publikation „Globale Landflächen und Biomassen nachhaltig und ressourcenschonend nutzen“ stellt das Umweltbundesamt fest, dass *„durch den Anbau von Biomasse für die energetische Nutzung als Beitrag zur Deckung der hohen Energieverbräuche in den Industrieländern unverhältnismäßig große Anteile produktiver Ackerflächen beansprucht“* werden (UBA 2013).

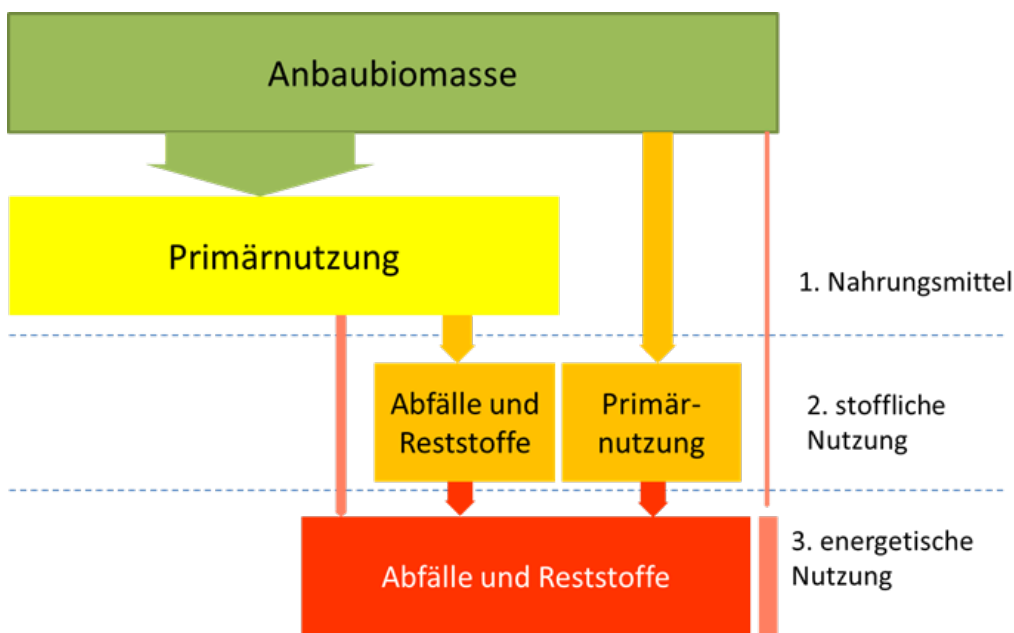
Nun stellt Fläche nicht nur eine knappe Ressource dar. Insbesondere die agrarische Flächenbewirtschaftung ist zudem mit signifikanten und vielfältigen Auswirkungen für die Umwelt verbunden: relevant sind hier v.a. die Folgen aus der Düngung (Eutrophierung von Gewässern, Grundwasserkontamination, Versauerung, Feinstaubpartikel), der Bodenbearbeitung (Verdichtung, Degradation) und den verschiedenen Mechanismen zum Verlust der Biodiversität (Umwandlung natürlicher Ökosysteme, Intensivierung, Pestizidwirkung etc.). Vor allem mit Blick auf die Globalisierung der Agrarmärkte ergeben sich außerdem sozioökonomische Implikationen, die in der einschlägigen Forschung zur Nachhaltigkeitsbewertung von Bioenergie in den letzten Jahren intensiv erörtert worden sind und mit der i-LUC-Richtlinie (Richtlinie (EU) 2015/1513) seitens der EU ein Umschwenken in der Biokraftstoffpolitik angezeigt haben. Auch eine intensivierte, nur auf Ertrag ausgerichtete Bewirtschaftung forstwirtschaftlicher Flächen führt zu negativen Effekten, insbesondere im Bereich der Biodiversität.

Gleichzeitig trägt die Nutzung von Biomasse in den aktuellen Energiesystemen (Strom, Wärme, Kraftstoff) maßgeblich zum mittlerweile signifikanten Anteil erneuerbarer Energien bei. In Anbetracht der obigen Einschränkungen lassen sich Prinzipien ableiten, die u.a. das Umweltbundesamt einer nachhaltigen Nutzung von Bioenergie zu Grunde legt:

1. Der Nahrungsmittelproduktion ist unter allen Umständen Vorrang einzuräumen, schließlich steht die Ernährungssicherung der Zukunft vor großen Herausforderungen, angesichts der weiteren Zunahme der Weltbevölkerung sowie der globalen Ernährungstrends (z.B. mehr tierischen Produkte, die gegenüber pflanzlichen Nahrungsmitteln ein Vielfaches an Flächen in Anspruch nehmen).
2. Die Energienutzung aus Biomasse soll daher
 - b) unter weitgehendem Ausschluss des Anbaus von Energiepflanzen erfolgen
 - c) sich auf jene unvermeidbaren⁵ Massenströme konzentrieren, die im Zuge der Nahrungsmittelproduktion gekoppelt anfallen oder durch Optimierung der Nutzungseffizienz, insbesondere durch Kaskadennutzung, verfügbar gemacht werden und
 - d) nicht in Konkurrenz zu einer möglichen höherwertigen stofflichen Verwertung stehen (darunter sind auch ökologische Leistungen wie die Humusbildung durch Belassen von Ernterückständen auf der Agrarfläche zu verstehen)

Diese Prinzipien führen im Hinblick auf das Projektverständnis zu folgender Nutzungshierarchie (Abbildung 3).

Abbildung 3: Nutzungshierarchie für die Verwendung von Biomasse



Eigene Darstellung ifeu

Damit konzentriert sich der Blickwinkel der hier vorliegenden Untersuchung auf die **Stoffgruppe der biogenen Abfälle und Reststoffe**. Mit den oben dargestellten hierarchischen Prinzipien als Maßgabe wurde, aus diesem sehr umfangreichen Kreis an Stoffen auf der Basis vorhandener Analysen jenes Potenzial herausgearbeitet, welches

1. aus rechtlichen oder ökonomischen Gründen keiner stofflichen Verwertung zugeführt werden kann und

⁵ Abfallvermeidung ist das oberste Gebot der Stoff-, Kreislauf- und Abfallwirtschaft; grundsätzlich ist daher immer anzustreben, das Potenzial an Abfällen und Reststoffen möglichst gering zu halten.

2. durch effiziente und umweltschonende Verfahren in einer hochwertig⁶ Weise energetisch genutzt werden kann.

Es war daher die Aufgabe dieses Forschungsprojekts, aus den vielfachen und umfangreichen Potenzialanalysen mit einem angepassten Kriterienraster aus dem Gesamtaufkommen an biogenen Abfällen und Reststoffen die Potenziale herauszuarbeiten, die nicht nur technischen, ökonomischen und einer Auswahl von ökologischen Aspekten Genüge tun, sondern Ansprüchen eines nachhaltigen Gesamtnutzungskonzeptes entsprechen. Auf dieser Basis soll auch begründet werden, welche Rolle die Abfall- und Reststoffbiomasse im künftigen Energiesystem spielen sollen, sprich in welchem Umfang und in welche Einsatzoptionen sie in einem zukünftig nahezu vollständig dekarbonisierten Energiesystem genutzt werden sollen.

Hierzu wurde in einem ersten Schritt auf der Basis einer Auswertung/Interpretation vorhandener Potenzialanalysen eine Datengrundlage zu Rohstoffpotenzialen erstellt, auf welcher die für die energetische Nutzung bereitstehende Abfall- und Reststoffbiomasse abgeleitet wurde (Kapitel 3). In einem zweiten Schritt wurden die verfügbaren Verarbeitungs- und Nutzungstechniken untersucht. Dabei wurden 19 Konversionsverfahren beschrieben (Kapitel 4). Im dritten Schritt wurden zunächst die verfügbaren Einsatzstoffe (aus Schritt 1) den Konversionsverfahren (Schritt 2) grundsätzlich zugeordnet. Dies erfolgte in einem ersten Teilschritt anhand technischer und stoffbezogener Kriterien (Kapitel 5). Im anschließenden Teilschritt wurden die identifizierten Materialpotenziale und damit kombinierbaren Konversionstechniken schließlich in quantitativer Weise den Sektoren Strom, Wärme und Verkehr zugerechnet. Hierzu wurde ein Charakterisierungsschema aufgestellt, welches dem Umweltbundesamt zur Entscheidungsunterstützung dienen soll, welche der identifizierten Potenziale in welcher Weise am sinnvollsten genutzt werden können. Es handelt sich dabei um ein Schema, welches verschiedene quantifizierende Elemente der Ökobilanz enthält (Treibhausgasbilanz, Energieeffizienz⁷) aber auch halbquantitative (weitere Umweltaspekte sowie Kostensituation) und qualitative Kriterien (Kompatibilität mit Klimaschutzzielen). Kapitel 6 fasst die Einzelbewertungen für jeden Stoff zusammen. Im Ergebnis wird daraus ein Gesamtnutzungskonzept erstellt, welches zukünftige Energiepotenziale und THG-Einsparpotenziale aufzeigt (Kapitel 7). In Kapitel 8 werden die wesentlichen Erkenntnisse der Studie als Fazit zusammengeführt.

In dem unmittelbar anschließenden Kapitel 2 werden die methodischen Ansätze für alle 3 Schritte zusammengefasst.

⁶ Der in diesem Vorhaben zugrunde gelegte Hochwertigkeitsbegriff orientiert sich an dem im § 8 Abs. 1 Satz 3 geforderten Hochwertigkeitsgebot im Sinne des „Leitfadens zur Anwendung der Abfallhierarchie nach § 6 KrWG“ (BMUB W II 2, Stand 25.09.2017); danach zielt die Hochwertigkeit im Kontext des Schutzes von Mensch und Umwelt „vorrangig auf die Ressourcenschonung und die Nutzung eines Ressourcenbilanzvorteils. Eine Verwertung ist hochwertig, wenn sie das stoffliche oder energetische Substitutionspotenzial in hohem Grade nutzt.“

⁷ Die Energieeffizienz stellt in Ökobilanzen zwar keine Wirkungskategorie dar, ist aber wesentliches Grundelement einer Lebensweganalyse.

2 Methoden

2.1 Potenzialanalyse

2.1.1 Vorbemerkung

Biomassepotenziale zur energetischen Nutzung wurden in den letzten Jahren im Rahmen diverser Studien auf nationaler, europäischer und globaler Ebene in Form von aktuellen Abschätzungen und Berechnungen von Ist-Werten sowie von definierten Szenarien bis ins Jahr 2050 hin erhoben. Im Oktober 2015 wurden auf der Basis einer kurzen Meta-Analyse zwölf Studien der letzten Jahre mit nationalem Bezug diesbezüglich miteinander verglichen (IZES 2016). Dabei stellte sich heraus, dass sich je nach Anlage und Zielstellung der Studie Ergebnisse einstellten, die bezüglich der Potenziale a) erheblich voneinander abwichen und b) auf sehr heterogenen und teilweise intransparenten methodischen Ansätzen aufbauten. Gerade für den Abfall- und Reststoffsektor wurde deutlich, dass die Definitionen der damit verbundenen Stoffströme voneinander abwichen und eine Vergleich- bzw. Interpretierbarkeit dadurch erschwert wird. Auch neuere Erkenntnisse, wie die im Kontext der Ressourceneffizienz identifizierte Anforderungen zur weiteren stofflichen Verwendung von Reststoffen in Kaskaden, waren nicht Teil der in der Metaanalyse analysierten Untersuchungen, ähnlich wie naturschutzfachliche Restriktionen wie z.B. FSC-Regelungen für den Wald.

Daher verfolgte die hier durchgeführte Zusammenstellung von Potenzialen die Zielsetzung, die bestehenden Arbeiten im Bereich der Potenzialanalyse hinsichtlich der jeweils zugrunde gelegten methodischen Ansätze und Prämissen im Sinne eines Review-Prozesses zu evaluieren um darauf aufbauend sowie unter Nutzung eines abgestimmten Kriterienkataloges eine belastbare Datengrundlage im Sinne eines „energetisch erschließbaren Potenzials“ für Abfall- und Reststoffe für die Zeiträume 2020 und 2030 sowie perspektivisch für 2050 zu benennen.

Folgende mögliche Effekte/Einflüsse waren dabei zu berücksichtigen:

- ▶ Mögliche Effekte aus einer veränderten Agrarstruktur (Anteil Ökolandbau, Verschiebungen im NawaRo-Anbau von Energiepflanzen hin zu Nahrungs-/Futtermitteln bzw. Rohstoffen für die stoffliche Produktion).
- ▶ Einschätzungen zur stofflichen Nutzbarkeit von biogenen Abfall- und Reststoffen sowohl als Primär- (z.B. Stroh), als auch als Sekundärrohstoff (z.B. Altholz) unter zusätzlicher Berücksichtigung der Anforderungsprofile z.B. des KrWG (hier insbesondere Problem der Anreicherung von Schadstoffen i.S. von § 6 Abs. 2 Nr. 4 KrWG). Der Charakter einer stofflichen Nutzung ist dabei festzulegen.
- ▶ Generelle Einschätzung potenzieller Effekte aus grundsätzlich möglichen Kaskadenprozessen für definierte Stoffströme/Produkte. Hier ist insbesondere zu berücksichtigen, dass die für Kaskadenprozesse eingesetzte Biomasse für energetische Zwecke nicht „verloren“ ist, aber erst mit einem Produkt-abhängig definierten zeitlichen Versatz und mit einer veränderten Qualität (z.B. Zustandsform, Composite, Fremd-/Schadstoffgehalte, etc.) genutzt werden kann.
- ▶ Berücksichtigung der ökologischen Leistungen, welche durch biogene Abfall-/Reststoffe derzeit erbracht werden bzw. erbracht werden könnten. Relevant sind hierbei insbesondere Effekte im

Bereich der Nährstoffkreisläufe, der naturschutzfachlichen Restriktionen, der Verhinderung von Bodendegradation, der Emissionen, etc.

Die Ergebnisse werden mit einem Fokus auf die stofflich nicht mehr nutzbaren Biomassen als Primärenergieäquivalente dargestellt. Die einzelnen Biomassefraktionen werden dabei im Hinblick auf Prozessketten bzw. Konversions-/Nutzungsverfahren nach ihrer Qualität (z.B. Wassergehalt, Fremd-/Schadstoffgehalt, Aschegehalt) charakterisiert.

Bezüglich der Definition unterschiedlicher Potenzialbegriffe wird z.B. nach dem Methodenhandbuch zur Ermittlung von Biomassepotenzialen des DBZF (2013) in theoretische, technisch-ökologische und wirtschaftliche Potenziale unterschieden. Diese Unterteilung ist jedoch teilweise irreführend, da eine theoretische Potenzialableitung zahlenmäßig das später umsetzbare Potenzial um ein Vielfaches überschätzen kann. Außerdem zeigt es sich, dass in vielen Untersuchungen unterschiedliche Annahmen bzw. Prämissen für diese Potenziale getroffen werden, was zu einer sehr heterogenen Datenlage führt. In einigen Studien sind z.B. rechtlich-ökonomische Restriktionen schon in den theoretischen Potenzialen integriert, in anderen nicht. Zudem wird in den meisten Studien unterstellt, dass die biogenen Reststoffe – wenn sie nicht im Futtermittelsektor bzw. für die Humusbilanz benötigt werden – für die energetische Nutzung verfügbar sind. Eine erweiterte Betrachtung hinsichtlich der stofflichen Nutzbarkeit findet kaum statt.

Somit wurde im Rahmen dieser Metastudie ein Fokus auf die in den betrachteten Arbeiten als umsetzbar charakterisierte Potenziale gelegt. Diese werden beschrieben, indem die jeweils angenommenen technischen, ökologischen und ökonomischen Restriktionen der Potenzialanalyse dargestellt werden. Neu definiert werden im Rahmen dieser Studie Kriterien für eine zukunftsorientierte Potenzialentwicklung, unter Einbezug von naturschutzfachlichen Restriktionen, weiteren ökologischen Kriterien (z.B. Wasserschutz und Bodenschutz) sowie der Darstellung von Aspekten der Kaskadennutzung. Als Ergebnis wurden – soweit möglich – stoffspezifisch definierte „erschließbare Potenziale“ hergeleitet, die dann in die Untersuchungen zu Konversions- und Nutzungstechniken überführt wurden.

2.1.2 Untersuchte Stoffströme

Im Rahmen einer Literaturstudie wurde das Potenzial an biogenen Abfall- und Reststoffen nach Stoffgruppen ermittelt. Besonders im Fokus standen dabei die Stoffströme aus folgenden Bereichen:

- ▶ Forstwirtschaft: Hier ist insbesondere zu definieren, bei welchem Holz es sich um Schwach- bzw. Waldrestholz und damit forstwirtschaftliche Reststoffe handelt. Zudem ist zwischen stofflichen und energetischen Nutzungsansätzen zu differenzieren.
- ▶ Koppel- und Abfallprodukte der Holz- und Papierwirtschaft: in diesem Bereich sind insbesondere Stoffströme wie Industrierestholz und Schwarzlaugen zu berücksichtigen.
- ▶ Landwirtschaft: in der Landwirtschaft und einigen sich direkt anschließenden Verarbeitungsprozessen für Biomasse existiert ein breites Spektrum an Reststoffen, welches von Stroh, Ernterückständen, Festmist, Gülle, gekippter Silage bis hin zu Schadgetreide reicht. Besonderer Fokus liegt hierbei – aufgrund der vorhandenen Mengenrelevanz sowie der Entsorgungsproblematik – auf dem Potenzial von Stroh und Gülle/Festmist.
- ▶ Kommunale und gewerbliche Biomasse: hierunter fallen insbesondere Bioabfälle, Speisereste, Altholz, Verpackungsholz und Holz aus dem Hausmüll, aber auch – mit zunehmender Tendenz – Komposite und biobasierte Produkte.

- ▶ Stoffströme aus der *Landschaftspflege*: im Bereich der Landschaftspflege wird das Potenzial von Gras und Holz in unterschiedlichen Studien als Reststoff beschrieben. Hierbei wird in der Regel nicht unterschieden, ob es sich bei dem Gras bzw. Holz rechtlich um ein Abfallprodukt oder ein landwirtschaftliches Produkt handelt.
- ▶ *Industrielle biogene Abfälle*: hinsichtlich der biogenen Rückstände aus der Industrie, wurden ebenfalls tierische Nebenprodukte wie Schlachtabfälle, die nach der gesetzlichen Definition unter das tierische Nebenprodukterecht fallen, untersucht.

2.1.3 Festlegung der Kriterien zur Bewertung der untersuchten Studien

Zur Bewertung der unterschiedlichen Studien wurde ein einheitlicher Kriterienkatalog aufgestellt, welcher ihre Vergleichbarkeit sowie die Herleitung einer belastbaren Datenbasis zur weiteren Bearbeitung und Abschätzung der Abfall- und Reststoffpotenziale ermöglichen soll. Anhand von neun Bewertungskriterien (vgl. Tabelle 4), die in weitere Unterpunkte gegliedert wurden, wurden in der Folge die unterschiedlichen Studien – soweit anhand der verfügbaren Daten und Informationen möglich – ausgewertet. Der Kriterienkatalog wurde dabei unter Einbindung externer Fachexpertise⁸ sowie im Rahmen einer Vernetzung u.a. mit einem parallel laufenden BfN-Projekt⁹ entwickelt. Vernetzung besteht auch zu weiteren laufenden Projekten in diesem Kontext.¹⁰

Der anschließenden Herleitung eines „erschließbaren“ Potenzials wurde ein zweiter Kriterienkatalog zugrunde gelegt (siehe hierzu die Kapitel 3.2.2).

2.1.4 Auswahl der untersuchten Studien

Neben den im Projektkonsortium schon bekannten Studien wurden im Rahmen einer Literaturrecherche weitere Quellen ermittelt, welche Aussagen zu biogenen Reststoffen und deren Potenzialen ermöglichen. Hierzu wurden Zugänge zu Universitätsbibliotheken wie auch zu digitaler Literatur/Veröffentlichungen genutzt.

Allgemein wurden Studien, die ab dem Jahr 2004 veröffentlicht wurden berücksichtigt. Ausgeschlossen wurden dabei Arbeiten, die nur ein allgemeines Reststoffpotenzial beschreiben, dieses aber nicht weiter aufschlüsseln. Schwerpunkt der Betrachtung war Deutschland, was zudem zu einem Ausschluss von Studien mit einer ausschließlichen Betrachtung von Europa bzw. der Welt ohne Rückschlussmöglichkeiten auf Einzelwerte für Deutschland führte. Regionale (deutsche) Ansätze, welche z.B. eine kennzifferbasierte Hochskalierung auf Deutschland ermöglichen, wurden dagegen aufgenommen.

Es sei an dieser Stelle betont, dass die Literaturanalyse in der ersten Phase des Projektes (2017) durchgeführt wurde. Neuere Arbeiten konnten daher nicht aufgenommen werden, wie z.B. das Rohstoffmonitoring von Mantau et al. (2018) oder die Studie von GfK (2018) zur systematischen Erfassung von Lebensmittelabfällen der privaten Haushalte in Deutschland.¹¹

⁸ Siehe Fachgespräch vom 16.05.2017 im Rahmen des Projektes (Protokolle siehe Anlage V)

⁹ BfN-Vorhaben: „Advanced (bio)fuels: Naturschutzfachliche Auswirkungen neuer Ansätze“

¹⁰ z.B.: „Modellhafte Erarbeitung regionaler und örtlicher Energiekonzepte unter den Gesichtspunkten von Naturschutz und Landschaftspflege“ (TU Berlin), „Anlagenbestand Biogas und Biomethan - Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland (DBFZ, FKZ: 37EV 16 111 0), „Ermittlung von Kriterien für eine hochwertige Verwertung von Bioabfällen und Ermittlung von Anforderungen an den Anlagenbestand“ (ifeu, FKZ 3715 34 314 0)

¹¹ Diese Studie schätzt die Menge an vermeidbaren Abfällen an Nahrungsmitteln auf mehr als 4 Mio. t/a, was darauf hindeutet, dass bei konsequenter Vermeidung dieser Abfälle, die Potenziale an verfügbaren Abfällen/Reststoffen entsprechend verringern würde.

Im Quellenverzeichnis sind alle Studien, die unter Berücksichtigung der obigen Einschränkungen für diese Untersuchung betrachtet wurden, aufgelistet.

Tabelle 4: Kriterien zur Bewertung der untersuchten Studien

Kriterium	Teilaspekte	Bemerkung
Bezugsraum		Der geographische Schwerpunkt der untersuchten Studien liegt auf Deutschland. Zudem soll auch differenziert werden, ob die Untersuchungen immer für Gesamtdeutschland gemacht wurden oder ob nur Regionen bzw. Bundesländer untersucht wurden.
Stoffstrom	Abfall-/Reststoffart, Logistik/Transportfähigkeit, ergänzende Kommentare	Bei der Logistik und der Transportwürdigkeit wird unterschieden, ob in der jeweiligen Studie diese Aspekte berücksichtigt wurden. So ist nicht jeder Reststoff zu jeder Zeit bzw. Menge transportwürdig. Dies kann wirtschaftliche wie auch ökologische Gründe haben.
Datenqualität	Generelle Datenqualität (z.B. eindeutige Definition als TM oder FM), Wassergehalte, Ertragsansätze, Flächennutzungen	Bei Wassergehalt und der Berücksichtigung des Ertrages gilt es, im ersten Schritt festzuhalten, ob diese Daten in der Untersuchung berücksichtigt wurden, um bei der späteren technischen Bewertung gegebenenfalls darauf zurückzugreifen. Des Weiteren sind nicht nur quantitative Angaben zu den Potenzialen relevant, sondern auch qualitative, z.B. hinsichtlich der Schadstoffbelastungen.
Aktualität/Datenerhebung	Quelle, Basisjahr/Zeitpunkt der Datengrundlage, Art und Kommentierung der Datenerhebung	Der Fokus liegt auf der Beantwortung der Frage, wann und wie die Daten erhoben wurden. Zusätzlich werden zu der Art der Datenerhebung (Statistik, Befragung usw.) Besonderheiten wie der Ausschluss eines Stoffes oder die Quantität von Untersuchungen festgehalten.
Zeithorizont	z.B. 2030 / 2050	Der Zeithorizont ist besonders bei früheren Studien interessant, deren (Szenarien-basierte) Potenzialansätze aktuell quantifiziert werden können und deren Ergebnisse bei der aktuellen Potenzialanalyse Berücksichtigung finden.
Restriktionen	Technische, ökologische und ökonomische Restriktionen z.B. im Kontext von Szenarienansätzen	Die Szenarien-Ansätze der Studien werden im Hinblick auf die zugrunde gelegten Restriktionen geprüft, um die erzielten Resultate einzuordnen. Weitere – ggf. nicht in die Potenzialbildung eingeflossene (aber benannte) – Restriktionen werden separat festgehalten (z.B. Bodenfruchtbarkeit, Schutz der Biodiversität, etc.).
Nutzungskonkurrenz	Generelle Ansätze, Kommentare zu indirekten Effekten, Kaskadennutzungen, Folgen der energetischen Nutzung	Es wurde geprüft, ob in den Studien Nutzungskonkurrenzen betrachtet wurden und welche indirekten Effekte dabei festzustellen sind. Zusätzlich sind die Aussagen zu Effekten der Kaskadennutzung und zu den Folgen der energetischen Nutzung in den Arbeiten zu prüfen.
Genutzte Anteile	Generelle Ausweisung, Art der Nutzung	Klärung, ob die bereits genutzten Potenziale hinsichtlich Menge und Art der Nutzung ausgewiesen wurden. Dabei sind stoffliche wie auch energetische Nutzungen, sowie eine kombinierte oder keine Nutzung möglich.
Beschreibung	Art der Datenangabe, Einheiten	Unter anderem Erfassung der Abfallschlüssel-Nr. wie auch die erfassten Abfall- bzw. Reststoffmengen unter Berücksichtigung der jeweils zugrunde gelegten Bezugsgrößen (t, PJ, Primär-/Endenergie, etc.).

Eigene Zusammenstellung: IZES, Öko-Institut, ifeu

2.1.5 Erarbeitung eines erschließbaren Potenzials

Auf der Grundlage der Auswertung der Potenzialanalysen wurden in einem Diskussionsprozess mit dem Auftraggeber, Kriterien für zwei Modelle im Sinne der Abbildung eines Nutzungskorridors erschließbarer Potenziale hergeleitet. Kapitel 3.2.2 beschreibt die hier betrachteten Potenzialrahmen welche sich im Wesentlichen in ein

1. Modell „BAU“ – als Mischung aus den derzeit existierenden und rechtlich bindenden mit freiwilligen Restriktionen - und ein
2. Modell „MER - Mit erweiterten Restriktionen“

differenzieren lassen. Anschließend wurden die Ergebnisse der Studienauswertung unter Berücksichtigung der jeweiligen Restriktionsansätze in die obigen beiden Modelle überführt. Hierbei zeigte sich jedoch, dass das vorliegende Zahlengerüst – zumindest teilweise – an Aktualität vermissen ließ und nicht in jedem Fall auf die Modelle angewandt werden konnte. Datenlücken wurden immer dann mit neuen Zahlen gefüllt, wenn dies durch einen einfachen Datenabgleich möglich war. In einigen Fällen musste jedoch auf – nicht kurzfristig zu schließende – Wissenslücken aufmerksam gemacht werden.

In Kapitel 3.2.3 werden die Ergebnisse dargestellt. Die Beschreibung der Stoffströme hinsichtlich ihrer Qualitäten schließt die Arbeiten zu den Potenzialen im Sinne einer Grundlage für die technischen Nutzungsoptionen ab (siehe die Steckbriefe zur Charakterisierung der Abfall- und Reststoffe in Anhang A).

2.2 Konversionstechnologien

Der Biomassebedarf unterscheidet sich stark zwischen konkreten Konversionstechniken, Anlagenleistungen, Anlagentypen und Nutzungskonzepten. Um präferierte Nutzungspfade im Strom-, Wärme- und Kraftstoffmarkt zu identifizieren müssen die technisch-ökonomischen Randbedingungen heutiger und zukünftiger Konversionstechnologien analysiert werden. Für Bioenergieträger auf Basis von biogenen Abfall- und Reststoffen wurden vor diesem Hintergrund die heute verfügbaren und die zukünftigen technologischen Konzepte zur Herstellung von Sekundär- und Endenergieträgern aus verfahrenstechnischer, umweltspezifischer und wirtschaftlicher Sicht analysiert und bewertet (siehe Kapitel 5).

Dafür wurden für insgesamt 20 Technologien auf Basis einer Literaturrecherche Technologiesteckbriefe erstellt (s. Kapitel 4). Ziel der Analyse war es, Informationen für die spätere Bewertung der Einsatzpfade bereitzustellen.

2.3 Charakterisierung der Einsatzpfade

2.3.1 Grundsätzliche Vorgehensweise

Im Sinne der Zielsetzung des Vorhabens galt es eine stimmige und transparente Vorgehensweise bei einer Charakterisierung der möglichen Einsatzpfade für die identifizierten Stoffströme zu entwickeln. Aus den Erkenntnissen der Analyse vorliegender Potenzialstudien wurden mit einem angepassten Kriterienraster aus dem Gesamtaufkommen an biogenen Abfällen/Reststoffen die Potenziale herausgearbeitet, die nicht nur technischen, ökonomischen und einer Auswahl ökologischer Aspekte Genüge tun, sondern auch den Ansprüchen eines nachhaltigen Gesamtnutzungskonzepts entsprechen.

Die identifizierten Potenziale (siehe Kap. 3.2) wurden in diesem Zusammenhang mit den damit kombinierbaren Konversionstechniken (siehe Kap 4) für die Sektoren Strom, Wärme und Verkehr im Sinne einer Gesamtbewertung zusammengeführt.

Um die Komplexität der Aufgabenstellung zu reduzieren, wurde ein vierstufiges Verfahren zur Erstellung eines Gesamtnutzungskonzeptes für biogene Abfall- und Reststoffe zur energetischen Nutzung

umgesetzt. Es soll zur Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Teilentscheidungen beitragen und verdeutlichen, welche Kriterien bei welchem Teilschritt zum Einsatz kommen und wie sie die Gesamtentscheidung beeinflussen.

Das vierstufige Verfahren, das im Weiteren genauer beschrieben wird, besteht aus:

1. Erstellung einer technischen Eignungsmatrix
2. Modifikation der technischen Eignungsmatrix
3. Erstellung der Einsatzpfadmatrix
4. Auswahl des Gesamtnutzungskonzeptes

Im Einzelnen verbergen sich dahinter die folgenden Aufgabenstellungen und Arbeitsschritte.

2.3.2 Erstellung einer technischen Eignungsmatrix

Charakteristika der Abfall- und Reststoffe

Eingangsparameter für die Erstellung des Gesamtnutzungskonzeptes sind Art und Menge der biogenen Abfall- und Reststoffe einerseits und die zur Verfügung stehenden Konversionstechniken andererseits. Auf der Basis dieser Informationen wurde eine Matrix erstellt, die stoffliche Charakteristika der Abfall- und Reststoffe in Beziehung zu den ausgewählten 19 Techniken setzt. Mit dieser Eignungsmatrix soll leicht erkennbar werden, welcher Abfall- und Reststoff für den Einsatz in einer bestimmten Technik geeignet ist.

Dazu wurden solche Kriterien benötigt, die es erlauben, die Eignung des Einsatzes eines Abfall- und Reststoffes zur Behandlung mit einer Technik festzustellen. Für jeden identifizierten Abfall- und Reststoffstrom wurden mit Hilfe vorliegender Informationen die relevanten Charakteristika identifiziert und in Form von Parametern operationalisiert, um als Grundlage für die Bewertung der technischen Eignung dienen zu können. Die Charakteristika zu den ausgewählten Abfall- und Reststoffen wurden in Steckbriefen zusammengestellt (siehe Anhang A).

Tabelle 5: Parameterliste zur Charakterisierung der Abfall- und Reststoffe

Kategorie	Parameter
Name/Bezeichnung	- Name - Beschreibung
Chemisch / Physikalische Parameter:	- Wassergehalt wie erfasst - Heizwert / Brennwert / Biogasertrag - Kohlenstoffgehalt - C/N Verhältnis
Struktur:	- Korngröße - holzig/krautig/in Lösung - fettige/wässrige Matrix - Störstoffart und Störstoffanteil
Anfall:	- Menge - Ort - Zeit - wie erfasst
Preis / Verbleib:	- positiver / negativer Preis pro Menge - derzeitiger Verbleib

Eigene Zusammenstellung: Öko-Institut, IZES, ifeu

Tabelle 5 zeigt die in den Steckbriefen erhobenen spezifischen Charakteristika der Abfall- und Reststoffe, die als stoffseitige Informationen für den Abgleich mit Kriterien zur technischen Eignungsprüfung herangezogen wurden.

Die Informationsgewinnung dabei ist breiter angelegt, da erst in der weiteren Bearbeitung ersichtlich wurde, welcher Parameter bei welchem Bearbeitungs- und Bewertungsschritt geeignet ist und verwendet werden konnte. Darüber hinaus musste der Informationsgehalt der Steckbriefe auch die Erfordernisse der weiteren Bewertungsschritte bedienen können. Die breitere Informationsbeschaffung machte zudem Lücken sichtbar, die es zu schließen galt oder die ein Ausweichen auf andere Parameter nahelegten. Als wesentliche Parameter wurden chemische/physikalische Parameter (wie Wassergehalt oder Brennwert), die Struktur (z.B. Korngröße), aber auch quantitativer und zeitlicher Anfall sowie derzeitiger Verbleib und Preis der betrachteten Stoffe erachtet.

Charakteristika der Konversionstechnologien

Auch für die Konversionstechnologien wurden in ähnlicher Weise Charakteristika benannt, die eine Gegenüberstellung mit den Eigenschaften der Abfall- und Reststoffe erlaubten. Der erste Schritt der Eignungsbewertung bezog sich dabei möglichst nur auf die technische Eignung der Kombination von Technik und Reststoff, während für das gesamte Bewertungsverfahren auch weitergehende Informationen benötigt wurden, z.B. zu ökonomischen und systembezogenen Kriterien.

Dementsprechend wurde auch für die ausgewählten Konversionstechnologien ein Informationsschema entwickelt, das als Steckbrief für jede einzelne Technik eine Grundlage für die weitere Bearbeitung darstellte. Wiederum wurde das Spektrum an möglichen Parametern breiter gewählt, als letztlich verwendet, um die Einschätzung der Datenlage oder die Auswahl der Vorgehensweise der Gesamtbewertung optimal zu adressieren. Für die Zwecke der Bestimmung der technischen Eignung von Abfall und Reststoffen zur Behandlung in einer Konversionstechnik genügten, als erster Bewertungsschritt, zunächst wenige ausgewählte technische Charakteristika.

Die Auswahl der Konversionstechnologien wird in Kapitel 4 beschrieben. Tabelle 6 umfasst die Parameterliste für die einzelnen Einsatzstoffe, erweitert durch:

- ▶ die Charakterisierung der Flexibilität der Technik. Hier wurde der zeitliche und mengentechnische Anfall des Einsatzstoffes beschrieben (Inputcharakteristik),
- ▶ die Charakterisierung des Energieproduktes als Strom, Wärme oder Kraftstoff (Outputcharakteristik),
- ▶ die Quantifizierung der Emission von Treibhausgasen und
- ▶ die Charakterisierung des Energieaufwandes, um den Abfall- und Reststoff für die Energieerzeugungstechnik einsatzfähig zu machen (Technologiecharakteristik).

Die Steckbriefe zur Charakterisierung der einzelnen Techniken sind in Anhang B zu finden.

Zum Abgleich der direkten Eignung eines Abfall- oder Reststoffes für eine spezielle Konversionstechnik ist eine Matrixdarstellung zielführend. In den Zellen einer solchen Kreuzmatrix lässt sich die Eignung oder der Grad der Eignung nachvollziehbar vornehmen und transparent darstellen.

Tabelle 6: Parameterliste zur Charakterisierung der Konversionstechniken

Kategorie	Parameter
Name/Bezeichnung	- Name - Beschreibung
Chemisch / physikalische Parameter:	- geeignet für Wassergehalt von-bis - geeignet für Heizwert/Brennwert von-bis - geeignet für Gasbildungspotenzial bei C/N Verhältnis von-bis
Struktur des Inputmaterials ohne aufwändige Vorbehandlung:	- geeignet für Korngröße von-bis - geeignet für Inputmatrix bezüglich: holzig/krautig/in Lösung - Risiko für Störstoffe
Inputcharakteristik:	- Flexibilität bei zeitlich unterschiedlichem Anfall (Batchbetrieb, kontinuierlich) - Flexibilität bei Mengenunterschieden im Input von-bis (typische Anlagengrößen)
Outputcharakteristik:	- Anwendungsbereich des erzeugten Energieprodukts (Strom, Wärme, Kraftstoff): (Strom, Wärme, Energieträger) - zeitliche und räumliche Flexibilität bei der Abnahme des Energieprodukts
Technologiecharakteristik:	- Energieaufwand bei Behandlung von Eingangsstoffen ohne größere Vorbehandlung - typische Größenordnung der Emission von Treibhausgasen bei der Behandlung - Komplexität der Technologie (Unterscheidung in einfach, komplex nach eigener Einschätzung bzw. Literaturreview) - Entwicklungsbedarf (Stand der Technik, Pilotanlage)
Kosten Erlöse:	- Behandlungskosten pro Mengeneinheit - Investitionskosten pro Anlage - Gestehungskosten (dafür wurden zusätzliche Informationen aus anderen Quellen genutzt, daher beziehen sich diese Angaben nicht auf die Anlage, für die auch Investitionskosten eruiert wurden) - Bereitstellungskosten

Eigene Zusammenstellung: Öko-Institut, IZES, ifeu

Technische Eignung von Kombinationen von Abfall- und Reststoffen mit Konversionstechniken

In ersten Bewertungsschritt wird zunächst die technische Eignung untersucht. Der Leitgedanke dabei ist, möglichst objektive oder objektivierbare Kriterien zu verwenden, die unter rein technischen Gesichtspunkten eine analysierende Zuordnung von Reststoff und Technik ermöglichen. So kann etwa der Wassergehalt des untersuchten Materials mit den technischen Erfordernissen einer Konversionstechnologie bezüglich der gewünschten Feuchte des zu behandelnden Materials abgeglichen werden.

Selbstverständlich ist auch eine solche technische Eignungsprüfung nicht frei von subjektiven Einschätzungen, die im Expertenkreis umstritten sein können. Die Übereinstimmung von Reststoff-Wassergehalt mit geeigneter Feuchte im Behandlungsgut in Abhängigkeit von der Konversionstechnologie muss z.B. bei unterschiedlichen Überschneidungen entsprechend eingeschätzt werden. Diesem subjektiven Element soll zumindest durch eine transparente Darstellung von technischen Informationsgrundlagen, Bewertungskriterien und schließlich der Bewertung selbst entgegengewirkt werden. Je

nach der Wahl des Eignungskriteriums kann der subjektiv einzuschätzende Schritt auch für die technische Eignung unterschiedlich ausgeprägt sein.

In Abbildung 4 wird am Beispiel Wassergehalt des Abfall- bzw. Reststoffs und der geeigneten Feuchte beim technischen Konversionsprozess verdeutlicht, wie die entsprechende Eignungsmatrix aussieht. Die Eintragungen des Wassergehalts bei Reststoffen und Techniken wurde im Einklang mit den Steckbriefen vorgenommen. In den Zellen lässt sich schließlich der Grad der Übereinstimmung eintragen.

Abbildung 4: Beispiel für die technische Eignungsmatrix am Beispiel Wassergehalt für Verbrennungstechniken

Abfälle / Reststoffe	in %	Verbrennung						
		Einzelfeuerung Wärme		KWK		KWK - Spezialanlagen		
		Holzpelletzentralheizung 15 kW bis 10	Holzhackschnittzessel 500 kW 15 - 40	HKW 5 MWel 15 - 50	ORC HKW 250 kWel 35 - 50	Klärschlammverbrennungsanlage 10 MW 45 - 55	Biomasse-Mitverbrennung im Kohle-HKW 5 - 50	Abfallverbrennungsanlage 50 MW bis 50
Waldholz	20 - 40							
L-pflege-Halm	50 - 80							
L-pflege-Holz	40							
Stroh	14							
Gülle	88 - 97							
Festmist	40 - 75							
Ernterückstände	82 - 85							
Biogut (-abfall)	60							
Grüngut krautig	75							
Grüngut holzig	45							
Altholz	15 - 18							
Klärschlamm komm.	65 - 75							
Klärgas komm.	irrelevant							
biog. Abfälle im RM	35 - 45							
Altöle/Fette	5							
Schwarzlauge	25							
Industrierestholz	10 - 30							
Klärschlamm ind.	65 - 75							
Klärgas ind.	irrelevant							
Feste ind. Substrate	7							
Tiermehl	0							
Tierfett	5							
Fleischbrei	64							
Kantinenabfälle	75 - 88							

Eigene Darstellung: ifeu

Im nachfolgenden Schema wird die Bewertung nach dem Ampelsystem operationalisiert. Jedoch wird ersichtlich, dass für die Bewertung einer Übereinstimmung von Wassergehalt des Reststoffes und Input in die Technik mit den Bewertungsurteilen „gute Übereinstimmung“ (grün), „partielle Übereinstimmung“ (gelb) und „keine Übereinstimmung“ (rot) ein gewisser Interpretationsspielraum bleibt. Der Interpretationsspielraum kann anhand von Regeln weiter verringert werden. Wo die Unsicherheiten nicht eliminiert werden können, wird mit einer transparenten Darstellung gewährleistet, dass die letztendliche Einzelbewertung nachvollziehbar gemacht und ihre Auswirkung auf weitere Bewertungsschritte verdeutlicht wird.

Mit einem Ausschnitt aus der technischen Eignungsmatrix am Beispiel Wassergehalt ist in Abbildung 5 die Art der Umsetzung des erläuterten Bewertungsschrittes und seine transparente Darstellung zu sehen. Als Vorgriff auf das Kapitel 5 sollen die methodischen Aspekte der Vorgehensweise damit verdeutlicht werden.

Abbildung 5: Beispiel zur Ausführung der technischen Eignungsprüfung für Verbrennungstechnologien am Beispiel Wassergehalt (das Beispiel greift auf die konkrete Anwendung in Kapitel 5.2 vor)

Abfälle / Reststoffe		Verbrennung							
		Einzelfeuerung Wärme		KWK		KWK - Spezialanlagen		Biomasse-	
		Holzpelletzentral- heizung 15 kW bis 10	Holzhackschnittel- kessel 500 kW 15 - 40	HKW 5 MWel 15 - 50	ORC HKW 250 kWel 35 - 50	Klärschlammver- brennungsanlage 10 MW 45 - 55	Mitverbrennung im Kohle-HKW 5 - 50	Abfallverbrennungs- anlage 50 MW bis 50	
	in %								
Waldholz	20 - 40	●	●	●	●	●	●	●	●
L-pflege-Halm	50 - 80	●	●	●	●	●	●	●	●
L-pflege-Holz	40	●	●	●	●	●	●	●	●
Stroh	14	●	●	●	●	●	●	●	●
Gülle	88 - 97	●	●	●	●	●	●	●	●
Festmist	40 - 75	●	●	●	●	●	●	●	●
Ernterückstände	82 - 85	●	●	●	●	●	●	●	●
Biogut (-abfall)	60	●	●	●	●	●	●	●	●
Grüngut krautig	75	●	●	●	●	●	●	●	●
Grüngut holzig	45	●	●	●	●	●	●	●	●
Altholz	15 - 18	●	●	●	●	●	●	●	●
Klärschlamm komm.	65 - 75	●	●	●	●	●	●	●	●
Klärgas komm.	irrelevant	-	-	-	-	-	-	-	-
biog. Abfälle im RM	35 - 45	●	●	●	●	●	●	●	●
Altöle/Fette	5	●	●	●	●	●	●	●	●
Schwarzlauge	25	●	●	●	●	●	●	●	●
Industrierestholz	10 - 30	●	●	●	●	●	●	●	●
Klärschlamm ind.	65 - 75	●	●	●	●	●	●	●	●
Klärgas ind.	irrelevant	-	-	-	-	-	-	-	-
Feste ind. Substrate	7	●	●	●	●	●	●	●	●
Tiermehl	0	●	●	●	●	●	●	●	●
Tierfett	5	●	●	●	●	●	●	●	●
Fleischbrei	64	●	●	●	●	●	●	●	●
Kantinenabfälle	75 - 88	●	●	●	●	●	●	●	●

Eigene Darstellung: ifeu

Auf der Basis geeigneter Informationen zu Abfällen und Reststoffen sowie technischer Gegebenheiten wurde eine möglichst überschneidungsfreie Auswahl technischer Kriterien für die Eignungsmatrix bestimmt. Sie umfasst die folgenden vier Kriterien:

► Wassergehalt

Abfälle und Reststoffe lassen sich gut hinsichtlich ihres natürlichen Wassergehalts charakterisieren. Ebenso kann für die Art der Konversionstechnologie bestimmt werden, was der optimal angepasste Wassergehalt des Inputmaterials einer Technik ist. Die Eignung soll zunächst ohne Beeinflussung des Wasserregimes durch Trocknung oder Bewässerung bestimmt werden, um möglichst die direkte Eignung zu bestimmen.

► Gasertrag (bei Vergärung)

Eine grundsätzliche Unterscheidung von Konversionstechnologien ist entlang der Fragestellung gegeben, ob die energetische Nutzung von Material direkt oder über eine Vergärung von statten geht. Selbstverständlich hängt die Gaserzeugungskapazität von der Kombination von biogenem Material und der eingesetzten Technik ab. Dennoch wird ein technisches Eignungskriterium benötigt, um zu bestimmen, ob ein Abfall- oder Reststoff prinzipiell für die Vergärung geeignet ist. Dazu wurde der Gasertrag als Kriterium ausgewählt.

► Anforderung Struktur Inputmaterial

Abfall- und Reststoffe weisen je nach ihrer Entstehung strukturelle Merkmale auf, wie die Art des Stoffes selbst, die jeweilige Korngröße oder der Aggregatzustand. Umgekehrt sind solche Konversionstechniken besonders für die spezifische Art und Struktur von Materialien geeignet, die keine

oder kaum Vorbehandlungsschritte erfordern. Die primäre Eignung einer Struktur im Abgleich mit Anforderungen (der Technik) an die Inputstruktur soll dabei als Bewertungskriterium herangezogen werden.

► **Materialreinheit**

Ein weiteres Merkmal der Eignung stellt die Materialreinheit dar. Unter Materialreinheit ist zum einen der Einflussgrad von störenden Materialien beim Einsatz einer Technik zu verstehen, wie z.B. mineralische Abfälle bei Altholz in Verbrennungsanlagen. Zum anderen ist auf Schadstoffe zu achten, die bei der Behandlung zu Umweltbelastungen führen können oder das angestrebte Energieprodukt beeinträchtigen, wie z.B. chlorhaltige Verbindungen bei der thermischen Behandlung.

Bei der Auswahl dieser vier Eignungskriterien wurden weitere Kriterien erwogen, die aber letztlich für den ersten Bewertungsschritt aus verschiedenen Gründen nicht in Frage kamen:

- Die Kosten- Erlössituation repräsentiert eine Bewertung, die wichtig für Abwägungszwecke ist, aber nicht a priori zu einem Ausschluss von Optionen führen sollte, was eine Eignung oder Nicht-Eignung aber impliziert. Damit ist dieses Kriterium erst für den zweiten – abwägenden – Bewertungsschritt sinnvoll anzuwenden.
- Der Heizwert steht für eine Information, ob ein Reststoff für eine bestimmte thermische Behandlung mehr oder weniger geeignet ist. Da der untere Heizwert als Leitgröße sehr stark vom Wassergehalt eines Abfall- oder Reststoffes abhängt, wird er durch dieses Kriterium schon ausreichend abgebildet. Außerdem geht der Heizwert im zweiten Bewertungsschritt in die energetische Betrachtung einer Konversionstechnik mit ein.

Basierend auf den Bewertungen der vier Einzelkriterien sind nun geeignete Kombinationen aus Abfall- und Reststoff mit Konversionstechnik zu identifizieren. Dazu werden Ergebnisse in einer zusammenfassenden Tabelle auf transparente Art vorgestellt, wie in Abbildung 6 beispielhaft zu sehen ist.

Nun bedarf es einer Regel, wann eine Kombination als geeignet angesehen werden kann. Angewendet wurde die Regel:

- Eine Abfall-/Reststoff und Technik Kombination gilt als geeignet, wenn sie keine mit „rot“ gekennzeichnete Einzelbewertung enthält.

Durch die Anwendung dieser Regel ergibt sich die Auswahl an Kombinationen, die dem zweiten Bewertungsschritt zugeführt werden sollen. Der methodische Schritt ist beim Übergang von Abbildung 6 zu Abbildung 7 nachzuvollziehen.

Abbildung 6: Ausschnitt der Zusammenfassung der Eignungsprüfung beim ersten Bewertungsschritt (das Beispiel greift auf die konkrete Anwendung in Kapitel 5.2 vor)

Abfälle/Reststoffe	Verbrennung															
	Einzelfeuerung Wärme								KWK							
	Pelletzentralheizung 15 kW				Hackschnitzelkessel 500 kW				HKW 5 MWel				ORC HKW 250 kWel			
	W%	Gas	Struk.	Störs.	W%	Gas	Struk.	Störs.	W%	Gas	Struk.	Störs.	W%	Gas	Struk.	Störs.
Waldholzhackschnitzel	●	-	●	●	●	-	●	●	●	-	●	●	●	-	●	●
L-pflege-Halm	●	-	●	●	●	-	●	●	●	-	●	●	●	-	●	●
L-pflege-Holz	●	-	●	●	●	-	●	●	●	-	●	●	●	-	●	●
Stroh	●	-	●	●	●	-	●	●	●	-	●	●	●	-	●	●
Gülle	●	-	●	●	●	-	●	●	●	-	●	●	●	-	●	●
Festmist	●	-	●	●	●	-	●	●	●	-	●	●	●	-	●	●
Ernterückstände	●	-	●	●	●	-	●	●	●	-	●	●	●	-	●	●
Biogut (-abfall)	●	-	●	●	●	-	●	●	●	-	●	●	●	-	●	●
Grüngut krautig	●	-	●	●	●	-	●	●	●	-	●	●	●	-	●	●
Grüngut holzig	●	-	●	●	●	-	●	●	●	-	●	●	●	-	●	●
Altholz	●	-	●	●	●	-	●	●	●	-	●	●	●	-	●	●
Klärschlamm komm.	●	-	●	●	●	-	●	●	●	-	●	●	●	-	●	●
Klärgas komm.	-	-	●	-	-	-	●	-	-	-	●	-	-	-	●	-
biog. Abfälle im RM	●	-	●	●	●	-	●	●	●	-	●	●	●	-	●	●
Altöle/Fette	●	-	●	●	●	-	●	●	●	-	●	●	●	-	●	●
Schwarzlauge	●	-	●	●	●	-	●	●	●	-	●	●	●	-	●	●
Industrierestholz	●	-	●	●	●	-	●	●	●	-	●	●	●	-	●	●
Klärschlamm ind.	●	-	●	●	●	-	●	●	●	-	●	●	●	-	●	●
Klärgas ind.	-	-	●	-	-	-	●	-	-	-	●	-	-	-	●	-
Feste ind. Substrate	●	-	●	●	●	-	●	●	●	-	●	●	●	-	●	●
Tiermehl	●	-	●	-	●	-	●	-	●	-	●	-	●	-	●	-
Tierfett	●	-	●	-	●	-	●	-	●	-	●	-	●	-	●	-
Fleischbrei	●	-	●	●	●	-	●	●	●	-	●	●	●	-	●	●
Kantinenabfälle	●	-	●	●	●	-	●	●	●	-	●	●	●	-	●	●

Eigene Darstellung: ifeu

Abbildung 7: Ausschnitt der Auswahl geeigneter Abfall-/Reststoff – Technik – Kombinationen (das Beispiel greift auf die konkrete Anwendung in Kapitel 5.2 vor)

Abfälle/Reststoffe	Verbrennung															
	Einzelfeuerung Wärme								KWK							
	Pelletzentralheizung 15 kW				Hackschnitzelkessel 500 kW				HKW 5 MWel				ORC HKW 250 kWel			
	W%	Gas	Struk.	Störs.	W%	Gas	Struk.	Störs.	W%	Gas	Struk.	Störs.	W%	Gas	Struk.	Störs.
Waldholzhackschnitzel																
L-pflege-Halm																
L-pflege-Holz																
Stroh																
Gülle																
Festmist																
Ernterückstände																
Biogut (-abfall)																
Grüngut krautig																
Grüngut holzig																
Altholz																
Klärschlamm komm.																
Klärgas komm.																
biog. Abfälle im RM																
Altöle/Fette																
Schwarzlauge																
Industrierestholz																
Klärschlamm ind.																
Klärgas ind.																
Feste ind. Substrate																
Tiermehl																
Tierfett																
Fleischbrei																
Kantinenabfälle																

Eigene Darstellung: ifeu

2.3.3 Modifikation der technischen Eignungsmatrix

Zur Reduktion der Komplexität und Feststellung der direkten Eignung einer Abfall-/Reststoff-Technik-Kombination wurden keine aufwändigen Vorbehandlungen der Abfall- und Reststoffe vorgesehen. Nun können aber durch Vorbehandlungsschritte die Eigenschaften des Inputmaterials angepasst werden, um für die jeweilige Verfahrenstechnik besser geeignet zu sein. Erkauft wird es in der Regel durch höheren technischen Aufwand und damit eventuell verbundene höhere Kosten. Höhere Kosten sind aber kein Ausschlussgrund im ersten Bewertungsschritt.

Um eine nachvollziehbare Änderung der Eignung der Reststoff-Technik-Kombination mit Hilfe von Vorbehandlungsschritten zu gewährleisten, ist nach folgender Regel verfahren worden:

- ▶ Es wird überprüft, durch welche „rot“-Bewertung eines Einzelkriteriums eine mögliche Kombination nicht ausgewählt wurde. Dann wird beurteilt, ob diese „rot“-Bewertung durch die Berücksichtigung einer sinnvollen Vorbehandlung zu einer günstigeren Einzelbewertung führt.
- ▶ Die Auswahl, ob eine Vorbehandlung sinnvoll ist und eine vernünftigen optionale Behandlungsvariante ergibt, wird per Expertenurteil vorgenommen.

Einige Beispiele für Vorbehandlungen sind u.a.:

- ▶ Vermischung verschiedener Abfall- und Reststoffe zur Einstellung des Wassergehalts
- ▶ Trocknung mit verschiedenen Verfahren ebenfalls zur Einstellung des Wassergehalts
- ▶ Mechanische Aufbereitung wie z.B. Zerkleinerung oder Kompaktierung, um die Eigenschaften des Inputmaterials an die Technik anzupassen
- ▶ Chemischer oder physikalischer Aufschluss von Materialien, um sie einer bestimmten Konversionstechnologie zugänglich zu machen
- ▶ Trennung von bestimmten Abfällen und Reststoffen bei der Erfassung oder mit technischen Maßnahmen aus einem Gemisch, um Stör- und Schadstoffe zu reduzieren.

Grundsätzlich ist denkbar, jeden Abfall oder Reststoff so vorzubereiten, dass er potenziell vielen der untersuchten Konversionstechniken zugänglich ist. Vieler solcher Kombinationen sind jedoch aus technischen oder kostenmäßigen Erwägungen nicht als sinnvoll einzuschätzen. Um nicht jede Kombination auf Sinnhaftigkeit aufwändig prüfen zu müssen, soll dieser Schritt mit Hilfe von Expertenurteilen vorgenommen werden. Eine transparente Darstellung soll jedoch gewährleisten, dass die Expertenurteile hinterfragt und ggf. revidiert werden können.

In Abbildung 8 wird beispielhaft dargestellt, wie durch die Einbeziehung von Vorbehandlungsschritten die „rot“-Bewertungen aus Abbildung 6 aufgehoben werden können und dadurch geeignete Kombinationen entstehen. Für die weitere Bewertung der Kombinationen im zweiten Schritt sind diese Vorbehandlungen konsequenterweise für die Berechnung von Energieeffizienz oder Treibhausgasbilanzen zwingend mit einzubeziehen.

2.3.4 Erstellung der Einsatzpfadmatrix

Am Ende der ersten zwei Arbeitsschritte stehen nun eine Reihe von Kombinationen (Einsatzpfade) aus Abfall-/Reststoff und Konversionstechnik (mit oder ohne Modifikation), die im Folgenden einer erweiterten Bewertung unterzogen werden. Diese erweiterte Bewertung bezieht das jeweilige Energiesystem mit ein, in dem ein erzeugtes Energieprodukt verwendet wird.

Des Weiteren umfasst die Bewertung einen erweiterten Kriterienkatalog, der auch normative Aspekte (z.B. Kompatibilität mit der Klimapolitik) umfasst und damit über eine reine technische Beurteilung hinausgeht. Hier sind nun wichtige Bewertungskriterien wie eine günstige Treibhausgasbilanz und die Berücksichtigung anderer Umweltkriterien von Bedeutung.

Abbildung 8: Beispiel der Modifikation der Eignung von Abfall-/Reststoff–Technik–Kombinationen durch Vorbehandlungsschritte (das Beispiel greift auf die konkrete Anwendung in Kapitel 5.2 vor)

Abfälle/Reststoffe		Verbrennung															
		Einzelfeuerung Wärme								KWK							
		Pelletzentralheizung 15 kW				Hackschnitzelkessel 500 kW				HKW 5 MWel				ORC HKW 250 kWel			
		W%	Gas	Struk.	Störs.	W%	Gas	Struk.	Störs.	W%	Gas	Struk.	Störs.	W%	Gas	Struk.	Störs.
Waldholzhackschnitzel		Trocknung & Pelletierung															
L-pflege-Halm																	
L-pflege-Holz																	
Stroh										Pressen/Kompaktieren				Pressen/Kompaktieren			
Gülle																	
Festmist																	
Ernterückstände																	
Biogut (-abfall)																	
Grüngut krautig																	
Grüngut holzig						Trocknung											
Altholz														Mischung			
Klärschlamm komm.																	
Klärgas komm.																	
biog. Abfälle im RM																	
Altöle/Fette																	
Schwarzlauge																	
Industrierestholz														Mischung			
Klärschlamm ind.																	
Klärgas ind.																	
Feste ind. Substrate																	
Tiermehl																	
Tierfett																	
Fleischbrei																	
Kantinenabfälle																	

Abfälle/Reststoffe		Verbrennung																			
		Einzelfeuerung Wärme								KWK											
		Pelletzentralheizung 15 kW				Hackschnitzelkessel 500 kW				HKW 5 MWel				ORC HKW 250 kWel							
		T1	W%	Gas	Struk.	Störs.	T2	W%	Gas	Struk.	Störs.	T3	W%	Gas	Struk.	Störs.	T4	W%	Gas	Struk.	Störs.
Waldholzhackschnitzel		R1	Wholz & Pelhgz R1+T1				Wholz & Hackkessel R1+T2				Wholz & HKW R1+T3				Wholz & ORC R1+T4						
L-pflege-Halm		R2																			
L-pflege-Holz		R3					Lpf Holz & Hackkes R3+T2				Lpf Holz & HKW R3+T3				Lpf Holz & ORC R3+T4						
Stroh		R4									Stroh & HKW R4+T3				Stroh & ORC R4+T4						
Gülle		R5																			
Festmist		R6																			
Ernterückstände		R7																			
Biogut (-abfall)		R8																			
Grüngut krautig		R9																			
Grüngut holzig		R10					Grgutholz & Hackk R10+T2				Grgutholz & HKW R10+T3				Grgutholz & ORC R10+T4						
Altholz		R11									Altholz & HKW R11+T3				Altholz & ORC R11+T4						
Klärschlamm kommunal		R12																			
Klärgas kommunal		R13																			
biog. Abfälle im RM		R14																			
Altöle/Fette		R15																			
Schwarzlauge		R16																			
Industrierestholz		R17	Indholz & Pelhgz R17+T1				Indholz & Hackkess R17+T2				Indholz & HKW R17+T3				Indholz & ORC R17+T4						
Klärschlamm ind.		R18																			
Klärgas ind.		R19																			
Feste ind. Substrate		R20	IndSub & Pelhgz R20+T1																		
Tiermehl		R21																			
Tierfett		R22																			
Fleischbrei		R23																			
Kantinenabfälle		R24																			

Eigene Darstellung: ifeu

Die einzelnen Arbeitsschritte zur Erstellung der Einsatzpfadmatrix werden wie folgt beschrieben:

1. Schritt: Aufstellung prioritärer Einsatzpfade

Die möglichen Kombinationen aus Abfall-/Reststoff und Konversionstechnik zu Einsatzpfaden fallen erwartungsgemäß äußerst zahlreich aus, zumal eine weitere Differenzierung nach den Energieprodukten erfolgt. Es ist daher im ersten Schritt eine Priorisierung von Einsatzpfaden erforderlich, um die Anzahl an zu bewertenden Fällen einzuschränken.

2. Schritt: Zusammenfassung von ähnlichen Abfällen/Reststoffen innerhalb einer Konversionstechnik

Dieser Schritt ist zur weiteren Konzentration der Fallbetrachtungen erforderlich. Dabei ist zu überprüfen, ob die Zusammenfassung ggf. zu Fehlurteilen führen kann. Beispielhaft sei eine mögliche Zusammenfassung von Landschaftspflegeholz und Grüngutholz zum Einsatz in einem Holzhackschnitzelkessel genannt, da für bei Reststoffströme ein ähnliches Bewertungsergebnis zu erwarten ist.

3. Schritt: Aufstellung der Einsatzpfadmatrix als Ausgangspunkt des zweiten Bewertungsschritts

Aus den verbleibenden Einsatzpfaden wird eine Matrix erstellt, um eine Zuordnung zu den Energieprodukten und die nächsten Bewertungsschritte zu ermöglichen.

4. Schritt: Auswahl und Zuordnung der Einsatzarten zu Energieprodukten und Energieanwendungen

Als nächstes gilt es, jedem Einsatzpfad die entsprechenden Energieprodukte und Energieanwendungen zuzuordnen. Für die Mehrzahl der Fälle erfolgt dies streng logisch (z.B. wird eine Pelletheizung immer als Energieprodukt Wärme erzeugen) in anderen Fällen bestehen verschiedenen Optionen: z.B. im Fall von KWK Strom und Wärme gekoppelt oder jeweils nur eines von beiden.

5. Schritt: Auswahl, Operationalisierung und Anwendung der Kriterien für den zweiten Bewertungsschritt

Wie bereits weiter oben ausgeführt, bedarf es für die Bewertung in der zweiten Stufe weitere Kriterien. Für diese Bewertungskriterien werden jeweils „Messvorschriften“ entwickelt, um eine Bewertung erst zu ermöglichen.

Der Kriterienkatalog umfasst:

- ▶ Energieeffizienz, ausgedrückt als Ausbeute an nutzbarer Energie von der Sammlung am Anfallort bis zur Produktion des Energieproduktes (Strom, Wärme, Antrieb) bezogen auf den Energieinhalt des Energieproduktes) in Verknüpfung mit der Hochwertigkeit des Energieprodukts (nach Maßgabe der Exergie)
- ▶ Treibhausgasbilanz, jeweils als THG-Emissionsintensität von der Sammlung des entsprechenden Abfall- oder Reststoffs bis zur Nutzenergie und im Vergleich mit der fossilen Alternative (Bezug: heute) zur Erstellung einer Netto-Bilanz.
- ▶ Kostensituation; wobei die Kosten bei der Bereitstellung des biobasierten Energieprodukts ins Verhältnis zu dem Preis des substituierten Energieprodukts gestellt werden.
- ▶ Weitere ökologische Aspekte: Das Umweltrisikopotenzial wird hierbei qualitativ anhand folgender Aspekte eingeschätzt:
 - relevante Nicht-THG Emissionen Luft (z.B. Feinstaub)
 - relevante Wasser- und/oder Bodenbelastung (z.B. durch Überdüngung)
 - Risiko durch Reststoff

► Kompatibilität mit der Klimapolitik: Ebenfalls qualitativ werden hier bewertet

- Die Substitutionsrelevanz bezogen auf fossile Energieträger (schwierige Ersetzbarkeit des fossilen Energieprodukts, Alleinstellungsmerkmale des biogenen Energieprodukts)
- Die klimapolitische Systemdienlichkeit (Verhinderung von Lock-in Effekten, wichtige positive Rolle in zukünftigen Energieszenarien)
- Speicherfähigkeit der Energie
- Räumliche und zeitliche Flexibilität

Jedes Kriterium wird wiederum mit einer dreistufigen Werteskala ausgewertet.

6. Schritt: Zusammenfassung aller Einzelbewertungen

Für jeden Abfall- und Reststoff werden die mit über alle fünf Kriterien hinweg bestplatzierten Einsatzpfade in Verbindung mit den Energieprodukten identifiziert. Dabei können durchaus mehrere Pfade mit gleichrangigem Ergebnis auftreten. In diesen Fällen wird entweder die Bewertung nochmals anhand verbal-argumentativer Aspekte vertieft oder mehrere Pfade werden schlussendlich gleichwertig für das Gesamtnutzungskonzept übernommen (das erfolgt in den im nächsten Abschnitt beschriebenen Schritten). Es geht bei diesem Schritt in erster Linie um die Ausbildung einer Rangfolge der Einsatzpfade und nicht um Ausschluss.

2.3.5 Herleitung des Gesamtnutzungskonzeptes

Um das Projektziel, das optimale Gesamtnutzungskonzept, zu erreichen, werden abschließend folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

1. Schritt: Aufstellung prioritärer Einsatzpfade anhand 2. Bewertungsschritt

Das Ergebnis der vorausgehenden Schritte dient der Darstellung des Gesamtnutzungskonzepts auf der Basis der als jeweils bestbewerteten Einsatzpfaden für die jeweiligen Abfall- und Reststoffe. Sind die Ergebnisse dieser Bewertungen eindeutig, so ist das Gesamtnutzungskonzept ebenfalls eindeutig definiert. Falls sich nach der Bewertung mehrere Einsatzpfade den vorderen Rang teilen, so wird abgewogen, ob

- Für eine der betreffenden Einsatzpfade Argumente vorliegen, insgesamt den Vorzug zu bekommen
- oder ob der Abfall- oder Reststoff auf mehrere bestplatzierte Einsatzpfade aufgeteilt wird.

2. Schritt: Verknüpfung des Gesamtnutzungskonzepts mit den Mengenpotenzialen

Die Zuteilung von den konkreten Abfall- oder Reststoffarten auf konkrete Einsatzpfade bedeutet auch eine Zuteilung von Mengen. Das Gesamtnutzungskonzept entsteht somit in Form eines Aufteilungsplans.

- Reststoff 1 (x t/a) → Technik A
- Reststoff 2 (y t/a) → Technik B
- etc.

3. Schritt: Verknüpfung mit Energie- und THG-Einsparungspotenzialen

Die mit den Mengen verbundenen Energiepotenziale (bezogen auf den Energieinhalt der Abfall- oder Reststoffe) wurden bereits am Ende von AP1 (Kapitel 3.2) ermittelt. Über die Bewertung mit den Kriterien *Energieeffizienz* und *Treibhausgasbilanz* können nur auch die daraus hervorgehenden Energieprodukte errechnet werden sowie die Treibhausgasemissionen bezogen auf das Gesamtnutzungskonzept.

4. Schritt: Darstellung des Gesamtnutzungskonzepts mit den Energie- und THG-Einsparungspotenzialen über verschiedene (Zukunfts-)Szenarien

Es wurden in AP1 verschiedene Potenzialansätze definiert, beschrieben als Modell „business as usual“ (BAU) und Modell „Mit erweiterten Restriktionen“ (MER), sowie Einschätzungen für die Zukunft getroffen, sodass beide Modelle auch für die Jahre 2020, 2030 und 2050 ausgewiesen werden können. Die Energie- und THG-Einsparungspotenziale werden für die sechs Kombinationen von Modellen und Jahren ausgewertet. Eine Differenzierung des Gesamtnutzungskonzeptes hinsichtlich Technologieentwicklung und damit verbundener Änderungen der genutzten Techniken in Szenarien wurde nicht vorgenommen.

3 Review bestehender Potenzialstudien / Veröffentlichungen und Ableitung erschließbarer Potenziale

3.1 Review

3.1.1 Grundsätzliche Einschätzungen

3.1.1.1 Potenzialbegriff

Die verschiedenen Potenzialbegriffe werden in den betrachteten Studien sehr unterschiedlich interpretiert. Unter Berücksichtigung der verschiedenen Ansätze zur Potenzial-Herleitung, die theoretisch, technisch, ökologisch, oder wirtschaftlich geprägt sein können, wird bei den betrachteten Studien im Regelfall ein technisches Potenzial zugrunde gelegt. Dieses beschreibt, z.B. gemäß der Definition im „Stoffstromprojekt“ *„den Anteil des theoretischen Potenzials, der unter Berücksichtigung der derzeitigen technischen Möglichkeiten nutzbar ist“* (Fritsche et al. 2004). In dieser benannten Studie werden zudem bei der Berechnung der technischen Potenziale weitere Kriterien wie z.B. die verfügbaren Nutzungstechniken, ihre Wirkungsgrade, die Verfügbarkeit von Standorten (auch im Hinblick auf konkurrierende Nutzungen) sowie unüberwindbare strukturelle, ökologische und weitere, nicht-technische Beschränkungen berücksichtigt. Das wird so nicht in allen Studien, die technische Potenziale betrachten, praktiziert bzw. hinreichend transparent dokumentiert. Eine in 2013 publizierte und mit verschiedenen Wissenschaftlern im Rahmen des Förderprogramms Bioenergie erstellte Definition des Potenzialbegriffs (DBFZ 2013) findet in den Studien noch keine Anwendung.

3.1.1.2 Bezugsraum

Die ausgewerteten Studien bezogen sich generell auf den Bezugsraum Deutschland. Die jeweiligen Potenzial-Herleitungen basierten dabei Stoffstrom-spezifisch auf unterschiedlichen Grunddaten. Neben nationalen Statistiken wurden in einzelnen Studien z.B. auch regionaltypische Angaben auf den Bund hochskaliert. In einigen Einzelfällen wurden reale Angaben für Kreise/kreisfreie Städte z.B. auf der Basis von Abfallbilanzen der öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger genutzt, bzw. wurde bei Stroh eine Ertragsermittlung über landkreisspezifische Getreideerträge gemacht. Bei den meisten Reststoffen (Ausnahme Altholz) wurden keine Im- bzw. Exporte berücksichtigt.

Der Bezugsraum wird aufgrund der obigen Punkte im Folgenden nicht mehr separat ausgewiesen. Mögliche Besonderheiten z.B. im Sinne einer regionalen Datenherkunft werden im Text vermerkt.

3.1.1.3 Stoffstrom

Dem Kriterium Stoffstrom wurde im Rahmen der Analyse ein besonderer Stellenwert zugesprochen. Insbesondere für die spätere Weiterverarbeitung der Ergebnisse (Zuordnung zu Konversions- und Nutzungstechniken) musste geklärt werden, um welche Stoffe (in welcher Zustandsform) es sich jeweils handelt. Dabei wurde in mehreren Studien nicht dargestellt, auf welche (Teil-)Stoffströme sich die Potenzialangaben beziehen. So wurde beispielsweise des Öfteren Stroh als Reststoff genannt. Dabei wurde aber nicht geklärt, welche Strohart dabei berücksichtigt wurden. Im Regelfall handelte es sich um die Betrachtung von Weizenstroh, das auch den größten Anteil am Strohpotenzial in Deutschland ausmacht. Andere Strohart, beispielsweise von Mais, wurden nur in zwei Studien erwähnt bzw. von der Betrachtung als Reststoff ausgeschlossen.

Ein weiterer Teil der Stoffstrombetrachtung zeigt, dass nicht immer eine konsequente/transparente Zuordnung einzelner Stoffströme bzw. Abfallmengen zu Stoffgruppen erfolgt und es so zu potenziellen Doppelnennungen/Überschneidungen kommt. Beispielsweise bei der Darstellung/Abgrenzung von

Friedhofsabfall / Grünschnitt / Garten-/Parkabfälle usw., oder der unterschiedlichen Zuordnung von Altholz, teils zu Forst- oder teils zu Siedlungsabfällen. Generell wurden in den Studien die Biomasse-Energiepotenziale von Mischabfällen (biogener Anteil der Siedlungsabfälle in Müllverbrennungsanlagen) nicht als Potenzial ausgewiesen.

Übergreifend auf alle Sektoren wurden in den meisten Studien – ausgehend von der Aufkommenscharakteristik der Stoffströme - logistische Fragen nicht thematisiert, z. B. im Sinn einer Zuordnung zu sinnvollen Kapazitäten/Transportmengen. So existieren z.B. im Strohsektor zum Teil nicht genutzte Potenziale, die allerdings so abgelegen bzw. bezüglich der Menge so gering sind, dass ein Transport aus wirtschaftlichen und ökologischen Gesichtspunkten nicht rentabel bzw. sinnvoll ist.

3.1.1.4 Datenqualität

Über alle Studien verteilt ergab sich ein heterogenes Bild hinsichtlich der für Potenzialangaben genutzten Einheiten. Die entsprechende Bandbreite reichte – in einer nicht immer eindeutigen Form - von Masse-Angaben bis hin zu Aussagen zur Primär- bzw. Endenergie. Charakterisierende Angaben wie Wassergehalt, C/N-Verhältnis, Aschegehalt, Heizwert etc. werden – wenn überhaupt – in einer für Deutschland einheitlichen Form oftmals erst im Kontext von Konversionstechnologien gemacht.

Teilweise kann nicht nachvollzogen werden, inwieweit Potenzial-relevante Veränderungen – wie z.B. die Konsumgewohnheiten im Kontext der Lebensmittelabfälle - nicht nur als möglicher Einflussfaktor thematisiert, sondern auch in konkreter Form bei der Potenzial-Ermittlung berücksichtigt wurden.

Die Einschätzungen zu mittel- / langfristigen Veränderungen basieren teilweise auf nicht näher begründeten Annahmen. So werden z.B. Erfassungsquoten im Bereich der Siedlungsabfälle (Biogut) entweder nicht berücksichtigt, oder undifferenziert für Deutschland hochskaliert.

Auch unrealistische Ansätze sind partiell in den Studien vorzufinden. Als Beispiel fallen hier insbesondere Aussagen zu forstwirtschaftlichen Potenzialen mit Blick auf den Waldsaum und den Mittelwald auf. Hölzer aus diesen Bereichen werden fast ausschließlich der energetischen Nutzung zugeordnet, obwohl auch hier stoffliche Nutzungen möglich sind.

3.1.1.5 Aktualität

Die letzte stark differenzierte und umfassende Potenzialerhebung datiert auf das Jahr 2004 mit Datenbezug auf das Jahr 2000 (Projekt „Stoffstromanalyse“). Auf diese Untersuchung verweisen die meisten Studien, oft auch unter Verwendung von deren Zahlenwerten und Ergebnissen. Aktuellere Aussagen liegen nur mit Bezug auf Biomasse-Teilströme vor.

Alle Studien beinhalten naturgemäß eine zeitliche Differenz zwischen der Veröffentlichung und dem Basisjahr der Datenerhebung. Dieser Zeitraum beläuft sich in der Regel auf vier Jahre. Bei zusätzlicher Berücksichtigung der entsprechenden Grunddaten ist der Zeitraum oftmals größer als sechs Jahre. Beispielsweise wird in der Landwirtschaft nur alle drei Jahre eine Agrarstrukturhebung durchgeführt, was die Datenerhebung bezüglich der Aktualität stetig beeinflusst. Die letzten Agrarstrukturhebungen waren in den Jahren 2013 und 2016. Das Basisjahr der betrachteten Studien lag jedoch oftmals deutlich vor diesen Erhebungen. Dies hat zur Folge, dass z.B. in der Vergangenheit abgeschätzte Tierzahlen und damit verbundene Potenziale nicht mit den aktuellen Erhebungen übereinstimmen.

Im Abfallbereich resultierten die Angaben im Hinblick auf die Datengenese teilweise aus Befragungen der öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger oder der Altholzakteure. Generell werden jedoch in diesem Sektor die Potenziale über einwohnerbezogene Hochrechnungen auf der Basis der jeweils aktuellsten Abfallbilanz (teilweise auf Landesebene) ermittelt.

3.1.1.6 Basisjahr / Zeithorizont

Aufgrund der Fülle von Stoffstromanalysen in den letzten Jahren sind für eine aktuelle Bewertung das jeweils zugrunde gelegte Basisjahr und darüber hinaus der – z.B. der im Rahmen einer Szenarienbetrachtung – hinterlegte Zeithorizont entscheidend. Untersucht wurden Studien bis zum Basisjahr 2000.¹² Die Potenzialerhebungen, die sich auf einen längeren, in die Zukunft weisenden Zeithorizont beziehen, basieren selten auf differenzierten Szenarien mit erläuterten zeitlichen Bezügen und Ansätzen. Die meisten Studien beziehen sich auf einen Zeitraum von 20 Jahren. Studien mit einem expliziten Blick auf Biomasse-Reststoffe beziehen sich eher selten auf die Jahre 2030 oder 2050. Insgesamt wurde meist auf Basis der „Status quo-Situation“ eine Potenzialabschätzung vollzogen. Dabei wurden im Abfallbereich wie auch für den Bereich der Landwirtschaft in der Regel Zahlen des Statistischen Bundesamts (Destatis) als Bezugsgröße genutzt.

3.1.1.7 Restriktionen

In den meisten Studien werden nur eine begrenzte Anzahl oft ähnlicher Restriktionen berücksichtigt wie beispielsweise der Derbholzdurchmesser im Forst oder die Humusbilanz im Ackerbau (DBFZ 2013). Weitere Effekte wie z. B. durch Berücksichtigung der FSC-Anforderungen oder Ökolandbau werden kaum bis gar nicht der Potenzial-Ermittlung zugrunde gelegt (vgl. Tabelle 30 und Tabelle 31).

Insbesondere in der Landwirtschaft gibt es eine Vielzahl an möglichen Bewirtschaftungsformen, die jeweils zu unterschiedlichen Potenzialansätzen führen. Diese Bewirtschaftungsformen werden aber nur in einzelnen Studien diskutiert bzw. differenziert. Dies betrifft auch eine zukünftig mögliche veränderte Ernährung, bei der in Deutschland beispielsweise weniger Fleisch konsumiert wird, oder der Ökolandbau an Bedeutung zunimmt. Dabei wird in den Studien, die diese Aspekte betrachten, beim Ökolandbau in der Regel nur vom Status quo ausgegangen. Mögliche gesetzliche Änderungen, die entsprechende Anforderungen formulieren und damit beispielsweise einen direkten Einfluss auf die Flächeninanspruchnahme des ökologischen Landbaues haben, werden – als Szenarien aspekt - nicht berücksichtigt.

Wie schon bei dem Bewertungskriterium „Stoffstrom“ ist auch bei den Restriktionen kaum eine regionalspezifische Differenzierung in den Studien zu erkennen. Dies trifft sowohl für die Heterogenität der Naturräume zu, als auch für unterschiedliche Aufkommensdichten und die damit verbundene Transportrelevanz (als Restriktion). Ausschlaggebend ist neben den technischen Fragen meist der Kosteneffekt, der eine Nutzung von Reststoffen beeinflusst.

3.1.1.8 Nutzungskonkurrenz

Effekte durch die stoffliche Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen werden in den betrachteten Studien weder hinsichtlich der Primär – noch hinsichtlich der Sekundärbiomasse adressiert. Dies betrifft sowohl die Kaskadenprozesse als auch die zeitliche Verlagerung von Potenzialen. So ist keine Studie bekannt, welche den zeitlichen Versatz der Biomasse-Verfügbarkeit für die energetische Nutzung bei einer stärkeren Verlagerung zu stofflichen Nutzungen adressiert (die Biomasse ist für die Energieerzeugung nicht „verloren“, sie steht nur erst zu einem späteren Zeitpunkt und in geänderter Qualität zur Verfügung).

Insgesamt werden Konkurrenzen zu stofflichen Nutzungen (wie z.B. beim Altholz, oder bei industriellen Reststoffen) fast ausschließlich als Beschreibung des Status Quo abgebildet. Szenarien-abhängige Verschiebungen werden nicht thematisiert.

¹² Von der jeweiligen Studie angegebenes Basisjahr; die darin genutzten Primärdaten sind allerdings teilweise älteren Datums

3.1.1.9 Energetisch bereits genutzte Anteile

In der Regel wird in den Studien ein technisches Gesamtpotenzial ausgewiesen, welches auf nur wenigen „Basis-Studien“ aufbaut. Energetisch bereits genutzte Anteile werden oftmals nicht benannt und müssen über ergänzende Quellen¹³ – die hinsichtlich der Datengenese nicht immer vergleichbar sind – hergeleitet werden. Im Abfallbereich berufen sich die Quellen hinsichtlich der aktuellen Nutzungsanteile auf die Zahlen des Statistischen Bundesamtes. Im Agrarsektor können über die für die Energieerzeugung belegten Flächen Hochrechnungen zu aktuellen Nutzungsanteilen gemacht werden. Im Forstsektor liegen Holzbilanzen vor, die aber nicht immer in den Studien berücksichtigt werden.

3.1.1.10 Zusammenfassung

Die oben beschriebenen grundsätzlichen Einschätzungen zu den Aussagen der untersuchten Studien lassen sich wie folgt zusammenfassen (siehe Tabelle 7).

Tabelle 7: Zusammenfassung der grundsätzlichen Einschätzungen

Kriterium	Einschätzung
Potenzialbegriff	• Unterschiedliche Interpretation der Potenzialbegriffe • In der Regel Ausweisung eines technischen Potenzials • Teilweise keine hinreichend transparente Dokumentation der jeweils angesetzten Kriterien
Bezugsraum	• Hauptsächlich Einschätzungen zu Deutschland • Teilweise „Kennziffer-basierte Herleitung regionaler Daten“ bzw. Hochrechnung aus regionaltypischen Angaben auf Deutschland (z.B. auf der Basis kg/E*a bei Biogut, Mg/km*a bei Straßenbegleitgrün) • In Einzelfällen reale Angaben für Kreise/kreisfreie Städte auf der Basis von Abfallbilanzen seitens der öRE sowie z.B. bei Stroh über Landkreis-spezifische Erträge • Import/Export-Fragen werden insbesondere bei Altholz thematisiert; teilweise Definition von undifferenzierten Importmengen zur Erreichung eines gesetzten Bioenergie-Ziels
Stoffstrom	• Teilweise keine eindeutige Erläuterung des Datenbezuges (z.B. betrachtete Stroharten) • Teilweise Vernachlässigung möglicher Mengenüberschneidungen (z.B. Friedhofsabfall / Grünschnitt / Garten-/Parkabfälle, etc.); dadurch potenzielle Doppelnennungen • Abweichende Zuordnung von Abfällen zu Sektoren (z.B. Altholz zu Forst oder Siedlungsabfall) • Generell Vernachlässigung der Biomasse-Energiepotenziale von Mischabfällen (Siedlungsabfälle in MVA) • Logistische Fragen z.B. im Sinne einer Zuordnung zu sinnvollen Kapazitäten werden – z.B. im Kontext der Aufkommenscharakteristik - i.d.R. nicht thematisiert (Transportwürdigkeit)
Datenqualität	• Heterogenes Bild hinsichtlich der Potenzialangaben (Masse, Primärenergie, Endenergie) mit nicht immer eindeutiger Zuordnung • Charakterisierende Angaben (Wassergehalt, C/N, Aschegehalt, Heizwert, etc.) werden oftmals erst im Kontext von Konversions- und Nutzungstechnologien gemacht. • Veränderungen z.B. in der Flächennutzung und den Konsumgewohnheiten (z.B. Lebensmittelabfälle) werden i.d.R. nicht im Kontext der Potenzialbildung berücksichtigt. • Einschätzungen zu mittel-/langfristigen Veränderungen sind teilweise grob abgeschätzt (z.B. Erfassungsquoten) • Teilweise unrealistische Ansätze (z.B. Waldsaum, Mittelwald)

¹³

z.B. Biomasse-Monitoringbericht (DBFZ 2014); AGEE-Stat-Daten

Tabelle 7: Zusammenfassung der grundsätzlichen Einschätzungen

Kriterium	Einschätzung
Aktualität	- Die letzte stark differenzierte und umfassende Potenzialerhebung datiert auf das Jahr 2004 mit Datenbezug 2000 (Fritsche et al. (2004)) - Aktuellere Erhebungen liegen für Biomasse-Teilströme vor - Die zeitliche Differenz zwischen Veröffentlichungsdatum und Basisjahr liegt i.d.R. bei 4 Jahren; unter zusätzlicher Berücksichtigung genutzter Grunddaten > 6 Jahre - Partiell beruhen die Angaben auf Befragungen (z.B. öRE, Altholzakteure), i.d.R. jedoch auf Flächen- bzw. Einwohner-bezogenen Hochrechnungen
Basisjahr/Zeithorizont	- Potenzialerhebung nur selten auf der Basis differenzierter Szenarien mit erläuterten Zeithorizonten - Das aktuellste Basisjahr für die Grunddaten beschreibt das Jahr 2012 (untersucht wurde bis Basisjahr 2000) - Im Abfallbereich/Landwirtschaft i.d.R. Nutzung von Destatis-Zahlen - Potenzialabschätzungen meist auf Basis der „Status quo-Situation“
Restriktionen	- Fast immer nur Berücksichtigung von „Standard-Restriktionen“ wie Derbholzdurchmesser, Humusbilanz, etc. (konkrete Beschreibung siehe Analyse der einzelnen Stoffströme) - Mögliche Verschiebungen im Reststoff-Aufkommen durch unterschiedliche Bewirtschaftungsformen werden i.d.R. nicht diskutiert. - Weitergehende Effekte wie z.B. durch Berücksichtigung der FSC-Anforderungen, weniger Fleischkonsum, Ökolandbau, etc. werden kaum berücksichtigt - Nebenprodukt-orientierte Betrachtungen z.B. Absetzbarkeit von Kompost (z.B. als Nebenprodukt der Bioabfallvergärung) finden nicht statt - Kaum regionalspezifische Differenzierung z.B. hinsichtlich der Aufkommensdichte/Transportwürdigkeit, naturräumliche Unterschiede. - Der Kosteneffekt wird oftmals ausgeklammert
Nutzungskonkurrenz	- Effekte durch die stoffliche Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen werden weder hinsichtlich der Primär – noch hinsichtlich der Sekundärbiomasse (u.a. Kaskadenprozesse) adressiert (u.a. zeitliche Verlagerung von Potenzialen) - Konkurrenzen zu stofflichen Nutzungen werden fast ausschließlich als Beschreibung des Status Quo abgebildet.
Energetisch bereits genutzte Anteile	In der Regel wird ein Gesamtpotenzial ausgewiesen; im Hinblick auf energetisch bereits genutzte Anteile ist ein Abgleich z.B. mit dem Biomasse-Monitoringbericht, Destatis-Zahlen, Holzbilanzen, etc. erforderlich

Zusammenstellung: IZES, Öko-Institut, ifeu

3.1.2 Potenziale der Forstwirtschaft

Die energetisch nutzbaren Potenziale aus der Forstwirtschaft werden in den Studien als Waldrestholz oder als Waldrestholz und Schwachholz bezeichnet (Fritsche et al. 2004, UBA 2010). Dabei wird meist mit verschiedenen Methoden für forstliche Betriebe abgeschätzt, ob das eingeschlagene Holz stofflich genutzt werden soll, oder aber keine stoffliche Nutzung möglich ist. Dies ist bei der Ermittlung von Waldrestholzpotenzialen die größte Herausforderung. Der generelle Anfall von Holz kann mit Hilfe von Daten aus der Bundeswaldinventur abgeschätzt werden.

Viele Studien mit Szenarien zur Abschätzung der künftigen Bereitstellung von Energie (z.B. die Leitstudien) beziehen sich auf die Arbeiten von Fritsche et al. (2004) bzw. DLR (2004). Die Studien berechnen in der Szenarienbildung Potenzialschätzungen bis 2030 bzw. 2050. Die Herangehensweise ist in diesen Studien dabei unterschiedlich. So legt die Studie DLR (2004) aus Naturschutzgesichtspunkten fest,

welche Bereiche im Wald als ausschließlich energetisch nutzbare Bereiche angesehen werden könnten: Biotopverbundflächen, Waldsaumflächen und Flächen des Mittel- und Niederwaldes. Andere Studien nutzen als Datengrundlage die Bundeswaldinventur und interpretieren diese. Z.B. definieren Fritsche et al. (2004) Potenziale aus Schwachholz und Waldrestholz, die im Rahmen der normalen forstlichen Bewirtschaftung anfallen. Die Verwendung von Marktdaten der Forstwirtschaft wird dagegen kritisch gesehen (Wenzelides 2009). Grund hierfür sind z.B. Sondernutzungen im Rahmen von Sturmereignissen oder aber die Einschätzung der Marktlage allgemein. Beides kann diese Daten beeinflussen, so dass die Marktdaten höchstens ergänzend zu einer Potenzialanalyse hinzugezogen werden können. Die Daten der Bundeswaldinventur eignen sich nur für Analysen in größeren Räumen, da in kleinen Räumen nicht genügend Messpunkte vorliegen (IZES et al. 2013). Das BfN Skript 455 Energiewende und Waldbiodiversität geht bei seiner Potenzialabschätzung den Weg über die Daten der Bundeswaldinventur und der Aufkommensprognose (WEHAM). Der Bericht wurde 2017 veröffentlicht und greift somit auf die neuesten Daten zurück. Schon hier wird jedoch vom Begriff des Restholzes Abstand genommen. Die WEHAM Szenarien betrachten Derbholz, also Holz größer einem Durchmesser von 7 cm. Nicht-Derbholz soll aus u.a. Gründen des Bodenschutzes und der Biodiversität im Wald verbleiben. Somit werden im Folgenden Studien mit dem Begriff des „Restholzes“ nur zu Vergleichszwecken beschrieben.

Für den Zahlenvergleich werden Daten aus Fritsche et al (2004), DLR et al. (2004) und BfN (2017) herangezogen. Die älteren Berichte werden trotz der fehlenden Aktualität mit betrachtet, da viele neue Energiestudien auf diese beiden Berichte in Bezug auf Biomasse zurückgreifen. Je nach Szenario weisen diese Studien für 2030 folgende Potenziale auf:

- ▶ Fritsche et al. (2004) 8,95 Mio. t bis 11,26 Mio. t
- ▶ DLR et al (2004) 169 PJ (ca. 9,1 Mio. t_{atro})

Die neuere BfN-Studie basiert auf den neuesten Daten der dritten Bundeswaldinventur (BWI), insbesondere auf den Zuwachsdaten von 2002-2012. Diese Daten wurden nun umgelegt auf Sortimente aus den Holzeinschlagsstatistiken des Jahres 2015. Diese Marktlage kann jedoch wie oben ausgeführt variieren. Auf diese Problematik wird in der Studie hingewiesen, Verschiebungen der Sortimentanteile werden jedoch nicht durch Berücksichtigung verschiedener Einschlagsjahre ausgeglichen. Es handelt sich bei dieser Studie somit um eine Momentaufnahme des heutigen Potenzials der unterschiedlichen Sortimente, das sich nach Marktlage verschieben kann.

Ein Vorteil der BWI-Daten als Grundlage einer Potenzialberechnung ist, dass z.B. Flächen, die auf Grund der Hanglage nicht bewirtschaftet werden, Naturschutzflächen, Flächen mit geringer Bodenfruchtbarkeit, Totholz sowie Ernteverluste mit in die Auswertungen eingerechnet werden können.

Die BfN-Studie gibt das Energieholzpotenzial mit 1,8 fm/ha und Jahr an. Unter der groben Annahme, dass dies bei einer Berücksichtigung eines hohen Hartholzanteils etwas mehr als 0,9 t/ha und Jahr entspricht, ergibt sich ein Energieholzpotenzial von etwa 11 Mio. t pro Jahr.

Zum Vergleich haben IZES et al (2013) ermittelt, dass im Jahr 2010 in etwa 30 Mio. t_{atro} pro Jahr in Deutschland energetisch verwendet wurde. Dabei ist neben Altholz (etwa 6 Mio. t Marktvolumen) auch weiteres Industrierestholz und importiertes Holz einbezogen.

In der Studie zu WEHAM-Szenarien wurde der Stoffstrom Waldholz analysiert und im Juli 2017 veröffentlicht.¹⁴ Hier werden Daten zur Holzverwendung bis 2030 dargestellt. Dabei wird ein Referenzsze-

¹⁴ Vgl. <http://www.weham-szenarien.de/>; Zugriff am 30.10.2017; Projektbearbeiter: vTI, UH, HNE Eberswald

nario von einem Förderszenario und einem Restriktionsszenario unterschieden, das auch Restriktionen aus Sicht der stofflichen Verwendung beinhaltet. Nach diesen Szenarien wird sich die energetische Holzverwendung aller Holzsortimente von rund 60 Mio. m³ (ca. 33 Mio. t) in 2010 auf 57,6 bis 70 Mio. m³ (bis zu ca. 38 Mio. t) in 2030 entwickeln.

Tabelle 8: Bewertung der Potenzialangaben für Waldholz

Kriterium	Einschätzung
Stoffstrom	Die Datenlage zum Waldholz ist gut, jedoch basieren viele Studien auf veralteten Angaben. Aus den Daten der BWI3 und aus WEHAM,¹⁵ zusammen mit aktuellen Holzmarktdaten zur Abschätzung der Sortimentsverteilung können sehr präzise Aussagen über den Anfall und zum Sortiment Energieholz getroffen werden.¹⁶ Ein Problem bei Einschätzungen zukünftiger Verwertungswege ist jedoch die Unterscheidung zwischen Industrie- und Energieholz, da diese Hölzer ähnliche Holzsortimente umfassen. In den Studien wird für Nebenprodukte der forstlichen Nutzung oft das Wort Waldrestholz verwendet, was jedoch in der Forstwirtschaft so nicht gebräuchlich ist. Es impliziert je nach Studie „Energieholz“ (Holz oberhalb der Derbholzgrenze) oder Holz auch unter der Derbholzgrenze.
Datenqualität	Die Angaben werden teilweise in PJ veröffentlicht, teilweise in t atro bzw. Festmeter pro ha. Somit ist der Vergleich ohne einen Umweg über Daten hinsichtlich der Verteilung der Baumarten sowie deren spezifische Zuwächse und Massenwerte und somit auch Energiewerte pro Baumart nicht möglich. In dieser Metastudie wurde dieser Vergleich nur überschlägig berechnet. Die Studie BfN (2017) ist nicht angelegt als Potenzialstudie für bundesweite Potenziale, die im Sinne von Szenarien modelliert werden. Es handelt sich um eine Aufnahme des Jahres 2015, verbunden mit der Fragestellung, ob noch zusätzliche Energieholzpotenziale vorhanden sind.
Aktualität	Die Studie BfN (2017) basiert auf aktuellen Zahlen aus dem Jahr 2015 (BWI 3 sowie Holzmarktdaten). Die Annahmen der beiden anderen Studien DLR (2004) und Fritsche et al. (2004) gehen von Datensätzen aus, die im Jahr 2001 bzw. 2002 liegen. Die älteste der verwendeten Kennzahlen stammte aus dem 19. Jahrhundert.
Basisjahr/ Zeithorizont	Das Basisjahr ist 2015 bzw. 2001. Die Zeithorizonte der älteren Studien gehen bis 2030. In der jüngeren Studie erfolgt keine Modellierung zukünftig möglicher Entwicklungen.
Restriktionen	Werden die Daten der BWI 3 verwendet, fließen durch die Methodik der Aufnahme und Auswertung innerhalb der BWI 3 folgende Restriktionen in die Untersuchung ein: Nicht erschlossene Gebiete, Schutzgebiete, Bodenfruchtbarkeit, Totholz, Ernteverluste, Zuwachsleistungen verschiedener Baumarten in unterschiedlichen Standorten sowie Eigentumsverhältnisse. Andere Studien berücksichtigen Waldgebiete wie Waldsaum oder Niederwälder. Wieder andere Studien arbeiten pauschal mit dem Begriff der nachhaltigen Waldbewirtschaftung.
Nutzungskonkurrenzen	Die Studien gehen dezidiert auf die Überlegung der Nutzungskonkurrenz ein. Einige Studien nehmen dabei die derzeitige Verteilung von stofflicher zu energetischer Verwendung als Kenngröße und spiegeln diese Kenngröße auf Inventurzahlen bzw. Zahlen von WEHAM. Andere versuchen nicht stofflich nutzbare Hölzer, oder aber Waldgebiete zur reinen energetischen Nutzung zu definieren.

¹⁵ Dritte Bundeswaldinventur (BWI3) bzw. Nachhaltigkeitsbewertung alternativer Waldbehandlungs- und Holzverwendungsszenarien unter besonderer Berücksichtigung von Klima- und Biodiversitätsschutz (WEHAM)

¹⁶ Das Rohstoffmonitoring Holz (Mantau 2018) konnte im Bearbeitungszeitraum dieses Forschungsprojekts nicht mehr berücksichtigt werden.

Tabelle 8: Bewertung der Potenzialangaben für Waldholz

Kriterium	Einschätzung
Bereits genutzte Anteile	Bereits genutzte Anteile werden nur teilweise besprochen oder explizit in Potenzialangaben differenziert ausgewiesen. In einigen Studien wird unterstellt, dass der gesamte Holzzuwachs genutzt werden kann und dieser Zuwachs der Nutzung gegenübergestellt. Andere Studien weisen hingegen nur das Potenzial aus ohne auf die bereits genutzten Anteile zu verweisen.

Zusammenstellung: IZES

3.1.3 Potenziale aus Landschaftspflegematerial

Der Begriff „Potenziale aus der Landschaftspflege“ wird in den analysierten Studien sehr unterschiedlich genutzt. Beispielhaft sind in Tabelle 9 die wichtigsten nationalen Studien genannt, die sich mit diesem Stoffstrom/diesen Stoffströmen auseinandersetzen. In den älteren Studien wird teilweise noch Biomasse von Grünlandflächen den Potenzialen zugeordnet. Diese Potenziale fallen heute eher in die Rubrik „Anbaubiomasse“, die im Rahmen dieser Untersuchung nicht betrachtet wird. Die jüngste Studie (DBFZ 2015) wiederum integriert Massen, die im Rahmen der hier vorliegenden Analyse unter kommunalem Bioabfall subsummiert sind oder als Reststoff der Landwirtschaft anzusehen wären (Obstplantagen und Weinbauflächen). Andere Untersuchungen wiederum lassen keine genaue Abgrenzung/Definition erkennen.

Tabelle 9: Betrachtung der Landschaftspflegepotenziale in nationalen Studien

Potenzialname	Betrachtete Teilströme	Quelle
Reststoffe von sonstigen Flächen	Holz und Halmgut aus kommunalen Grünanlagen, Friedhofsflächen, Heideflächen, Obstplantagen, Weinbauflächen, Moorflächen, Wegebegleitflächen, Treibsel/Schwemmh Holz, Wasserpflanzen, Landschaftspflegeholz	DBFZ (2015)
Potenziale aus der Biotop- und Landschaftspflege	Wegebegleitgrün, öffentliche und private Grünflächen, Biotoppflege	ifeu & Öko-Institut (2007)
Potenziale aus der Landschaftspflege	„Frei werdende Fläche“ von Grünland, ^{a)} Biomasse aus Naturschutz- und Ausgleichsflächen	Fritsche al. (2004)
Potenziale aus der Offenlandpflege	Holz und Halmgut aus folgenden Biotoptypen: Großseggenriede, Röhrichte, Zwergstrauchheiden, Hoch- und Übergangsmoore (teilweise), Feuchtgrünland (Teilweise), Trockenrasen (teilweise)	DLR (2004)

a) In dieser Studie wurde davon ausgegangen, dass langfristig auf Grund eines Rückganges des Futterbedarfs der Bedarf an Gras aus Grünland zurückgeht.

Zusammenstellung: IZES

Neben den nationalen Studien gibt es detailliert ausgearbeitete Studien auf Landes- bzw. Regional-Ebene. Eine der ersten Studien war dabei die Biomassestudie Rheinland-Pfalz (ifas 2004). Sie verstand unter Landschaftspflegematerialien Wegebegleitgrün und Massen aus der Biotoppflege. Neuere Studien zu Bundesländern (IZES 2011 für das Saarland) gehen ähnliche Wege. In Nordrhein-Westfalen

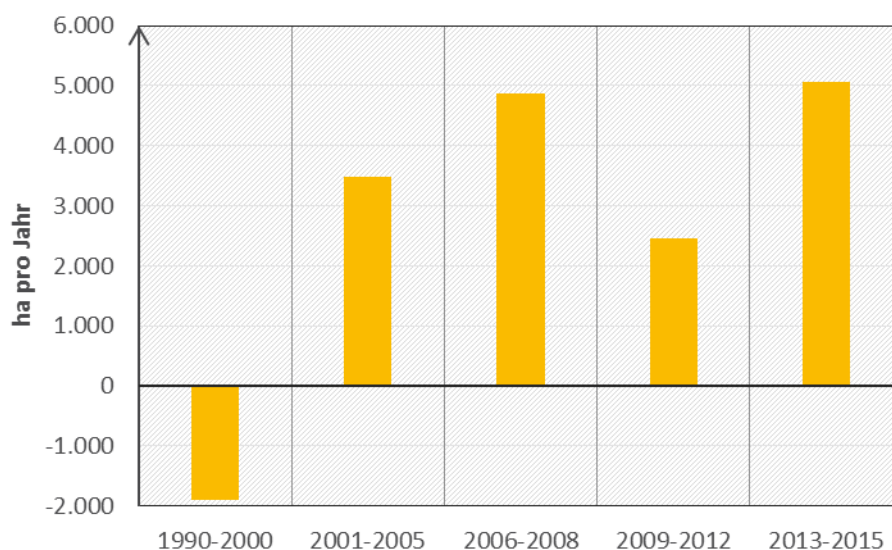
(Fraunhofer Umsicht & Öko-Institut 2014) jedoch werden wiederum Flächen wie Friedhöfe als Betrachtungshorizont hinzugezogen, auch wenn es dadurch die Gefahr der Redundanz mit der Erfassung des kommunalen Grüngutes gibt.

Aus diesen Untersuchungen kann kein einheitliches Potenzial für Landschaftspflegematerial abgeleitet werden. Auch die Definitionen jedes einzelnen Stoffstromes (z.B. Biomasse aus Naturschutz- und Ausgleichsflächen vs. Biotoppflege) werden unterschiedlich angewandt. Aus diesem Grund werden die Studien in diesem Kapitel nicht näher beschrieben.

Biotopflächen, die nicht unter landwirtschaftlicher Bewirtschaftung stehen, können nicht mit betrachtet werden da es derzeit keine bundesweit verfügbare Statistik gibt, welche diese Fläche belastbar darlegt. Zwar wird in UBA (2017, S. 566) Grünland in engerem Sinne ausgewiesen, jedoch werden hier landwirtschaftliches Grünland, Biotoppflegetflächen und straßenbegleitende Grasflächen als Summe dargestellt.

Die Betrachtung von Flächen der Biotoppflege wäre fachlich gesehen sinnvoll, weil es Grünlandflächen gibt, die derzeit durch Verbuschung verloren gehen (vgl. auch Abbildung 9). Hier könnte es sich evtl. gerade um das kostbare extensiv genutzte Grünland handeln, welches einen hohen naturschutzfachlichen Wert hat und bei dessen Pflege Biomasse anfällt, die man auf Basis der aktuell verfügbaren Literaturangaben jedoch nicht quantifizieren kann. Laufende Forschungsprojekte (z.B. AG Biomassereststoffmonitoring, BMEL/FNR, in 2018 laufend) lassen hier weitere Ergebnisse erwarten.

Abbildung 9: Landnutzungsänderungen vom Grünland hin zu Gehölzflächen



Eigene Darstellung IZES; Quelle: verändert nach UBA (2017) S. 567

Es werden im Folgenden also nur Straßenbegleitholzpoteziale neu berechnet, die (i) im Rahmen dieser Untersuchungen nicht doppelt gezählt werden oder Überschneidungen mit anderen Teilpotenzialen aufweisen, (ii) valide abgeschätzt werden können und (iii) auch Rest- und Abfallstoffe im Sinne des Projektes sind. Folgende Einschränkungen gelten dabei:

Aussagen zum Schienenbegleitgrün werden nicht getroffen, da hier bisher die Kosten der Holzbergung in keinem Verhältnis zu den Erlösen stehen und geborgene Mengen auf Basis vorhandener Daten nicht quantifizierbar sind. Die Strecken müssten für den Abtransport extra gesperrt werden (siehe IZES et al. 2013 für das Saarland oder bosch&partner & B³ für Brandenburg). Auch das Material von Schwemmholz oder die Bewirtschaftung von Wasserstraßen fließt nicht in die Betrachtung mit ein, da

die Massen zu sporadisch anfallen und es keine expliziten bundesweiten Studien zu diesen Materialien gibt.

Die Vorgehensweise und die Ergebnisse sind in Kapitel 3.2.3.2 beschrieben. Material aus kommunalen Grünanlagen und Friedhöfen sind unter Grüngut zusammengefasst.

3.1.4 Potenziale der Landwirtschaft

3.1.4.1 Stroh

Stroh stellt einen der klassischen Reststoffe in der Landwirtschaft mit einem vergleichsweise hohen Mengenaufkommen dar. Aus diesem Grund gibt es hierzu im Vergleich zu anderen landwirtschaftlichen Reststoffen verhältnismäßig viele Untersuchungen, die das Potenzial betrachten. Hierbei sind es aber nur Fritsche et al. (2004) und Zeddies & Bahrs (2014), die einen größeren Zeithorizont mit dokumentierten Entwicklungsperspektiven berücksichtigen. Studien von Zeller et al. (2012), Gaida et al. (2012), Thrän et al. (2015) und DBFZ (2015) konzentrieren sich auf das aktuelle Potenzial. Alle Studien fokussieren dabei auf das Strohaufkommen von Gesamtdeutschland. Da es sich bei Stroh um einen – je nach Agrarstruktur – dezentral anfallenden Stoffstrom handelt, ist die Transportfähigkeit ein zentraler Punkt. Durch das große Volumen von Stroh stoßen Transporttechniken schnell an Grenzen des Straßenverkehrsgesetzes,¹⁷ wodurch ein Transport über größere Strecken schnell unwirtschaftlich wird. Der Aspekt der Transportkosten wurden von Fritsche et al. (2004), Zeddies & Bahrs (2014) sowie Zeller et al. (2012) berücksichtigt. Fritsche et al. (2004) gehen davon aus, dass 90 % der in der Landwirtschaft entbehrlichen Strohmenge geerntet werden und ein Transport sinnvoll erscheint. Insgesamt wurden in den Studien neue Transporttechniken nicht betrachtet.

In allen Studien werden die Daten aus statistischen Erhebungen verwendet. Diese umfassen zunächst die Anbaufläche und den Ertrag Stroh liefernder Kulturen für Deutschland bzw. die Bundesländer. Unterschiede zwischen den Studien bestehen dann im Bereich der Potenzialermittlung. Zunächst wird über das Korn-Stroh-Verhältnis die vorhandene Strohmenge ermittelt. Hierbei ist zwischen den Getreidearten zu unterscheiden. Im zweiten Schritt wird der für die Humusbilanz erforderliche Stroh-Anteil berechnet, der wieder in den Boden eingearbeitet werden muss. Hinzu kommt noch die Strohmenge, die für die Tierhaltung benötigt wird. Fritsche et al. gelangen so auf eine entbehrliche – und damit für die energetische Nutzung grundsätzlich verfügbare – Menge von 20 % des Strohaufkommens. Zeller et al. (2012) haben dagegen drei Ansätze zur Berechnung der Humusbilanz. Sie unterscheiden in die Bilanzmethoden ‚VDLUFA untere Werte‘, ‚VDLUFA obere Werte‘ und ‚Humuseinheit (HE) dynamisch‘. Daraus ergibt sich eine 27- bis 43-prozentige Nutzbarkeit der Strohmenge. Hierbei ist die Tierhaltung ebenfalls mitberücksichtigt.

Bei künftigen Potenzialanalysen gilt es, den Strohbedarf in der Tierhaltung zu berücksichtigen. Dieser wird beeinflusst von der Tierzahl und der Haltungsform. Speziell die ökologische Landwirtschaft hat einen höheren Strohbedarf in der Tierhaltung. Hinzu kommen die Effekte, dass der Strohertrag in der ökologischen Landwirtschaft im Vergleich zur konventionellen Landwirtschaft geringer ist. Der Einfluss der ökologischen Landwirtschaft wurde in den Szenarien von Fritsche et al. (2004) und Zeddies & Bahrs (2014) berücksichtigt. In den Szenarien ist aber nur eine Berücksichtigung des ökologischen Ackerbaus als Bestandteil der ökologischen Landwirtschaft zu erkennen. Im Bereich der ökologischen Tierhaltung ist in den Studien keine quantitative Abschätzung des spezifischen Strohbedarfs vermerkt.

¹⁷ Auf Grund des großen Volumens von Stroh bzw. der geringen Masse wäre es aus technischer Sicht kein Problem große Massen zu transportieren. Im Straßenverkehrsgesetz sind aber die Länge, Breite und Höhe von Fahrzeugen begrenzt, so dass nur ein Teil der theoretisch technisch möglichen Menge an Stroh mit einem LKW transportiert wird.

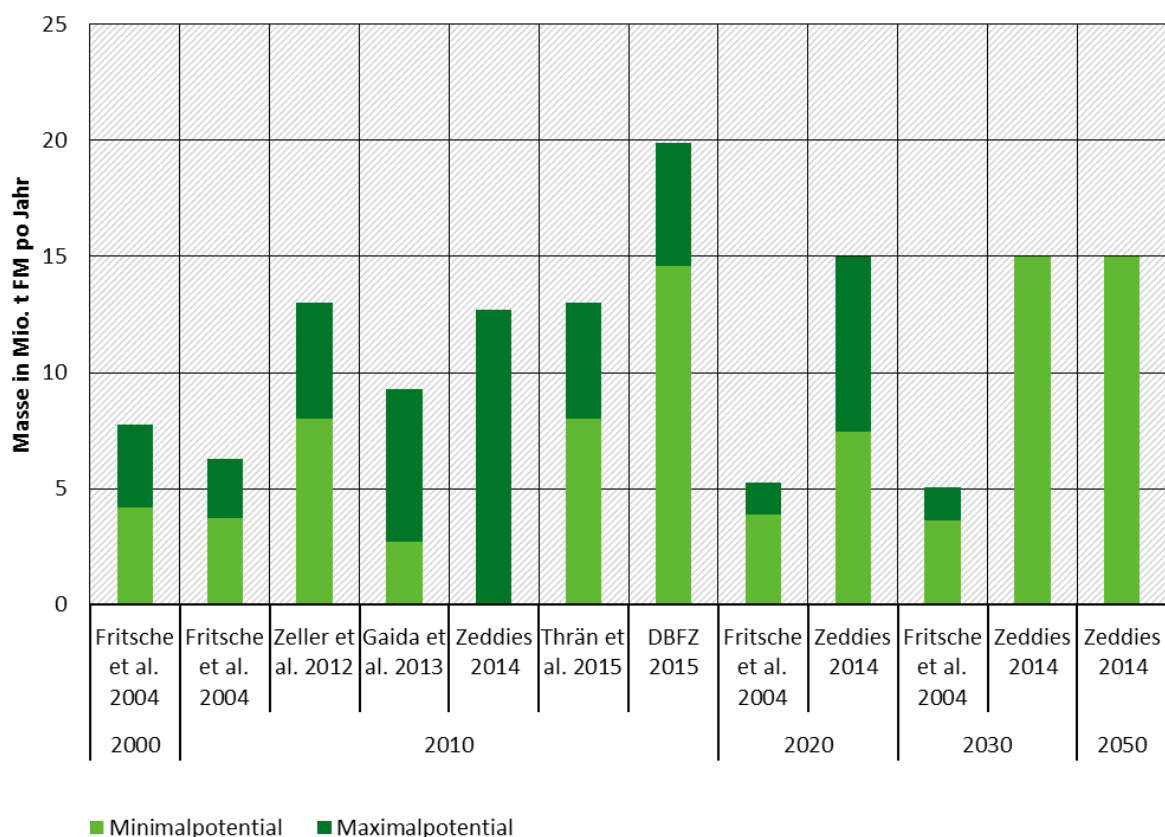
Nur bei Zeddies & Bahrs (2014) wird die ökologische Tierhaltung im Bereich der Kostenermittlung von Stroh erwähnt. Die Basisdaten beschreiben den Zeitraum von 2000 bis 2013.

Die Abgrenzungen im Bereich Stoffstrom weist zwischen den Studien große Schwankungen auf, insbesondere bei dem Begriff des Strohpotenzials. Hier wird beispielsweise bei Fritsche et al. (2004) kein Mais- oder Rapsstroh berücksichtigt. Nur in der Studie von DBFZ (2015) wird das technische Biomass-epotenzial von Rapsstroh gelistet. Das Bezugsjahr der verwendeten Daten ist aber 2007. Zu einem technischen Potenzial von Körnermaisstroh wird in keiner Studie eine Aussage getroffen. Primär bezieht man sich auf Weizen-, Gerste- und Roggenstroh, da diese Arten den größten Anteil in Deutschland ausmachen. Haferstroh wird oftmals nicht berücksichtigt, da der Haferanbau eng an die Pferdehaltung gekoppelt ist, die wiederum auch das Stroh verwendet und somit dieses nicht primär zur stofflichen oder energetischen Nutzung zur Verfügung steht.

Die in den Studien betrachteten Szenarien beinhalten als Kriterien den ökologischen Landbau wie auch die Bevölkerungsentwicklung oder die Entwicklung des Tierbestandes. Zusätzlich werden die technische Entwicklung und die zukünftig möglichen Verwertungsbereiche für Stroh betrachtet (Fritsche et al. 2004, Zeddies & Bahrs 2014).

Bei den als verfügbar beschriebenen Strohmenngen liegt das primäre Nutzungsziel in allen Studien auf der Energieerzeugung, mit einer Fokussierung auf thermische Nutzungstechniken. Alternative zukünftige Nutzungsansätze finden sich z.B. bei Thrän et al. (2015), wo eine mögliche Nutzung im Verkehrssektor als Treibstoff betrachtet wird.

Abbildung 10: Identifizierte Bandbreite des Potenzials an Stroh



Eigene Darstellung: IZES

Tabelle 10: Bewertung der Potenzialangaben für Stroh

Kriterium	Bemerkungen
Stoffstrom	Im Hinblick auf die unterschiedlichen Getreidesorten ist nicht immer gesichert, dass das gesamte Getreidestroh wie beispielsweise Maisstroh oder Haferstroh berücksichtigt wurde. Nicht in allen Studien wird Maisstroh, Weizenstroh jedoch immer berücksichtigt. In den Studien wurden in der Regel sowohl der Einstreubedarf, wie auch die nötige Menge Stroh zur Humusreproduktion eingebunden. Hierbei gibt es aber unterschiedliche Ansätze zur Mengenberechnung.
Datenqualität	Die Angaben beziehen sich auf die Frischmasse. Hierbei ist entscheidend, wie die Annahme des Korn-Stroh-Verhältnisses ist und welche Humusbilanzierung zu Grunde gelegt wurde. Die regionalen Differenzierungen werden nur in wenigen Studien berücksichtigt.
Aktualität	Die Angaben zu IST-Mengen beziehen sich meist auf destatis-Angaben und sind daher 3-4 Jahre älter, als das jeweilige Veröffentlichungsdatum der Studie. Dementsprechend datieren die aktuellsten Zahlen der untersuchten Studien auf das Jahr 2012.
Basisjahr/Zeithorizont	Das Basisjahr der ältesten untersuchten Studie datiert auf das Jahr 2000. Im Hinblick auf den Zeithorizont differenzieren nur wenige Studien hinsichtlich definierter Zeitabschnitte. Im Regelfall wird, ausgehend von der IST-Situation eine Potenzialeinschätzung bis 2050 vorgenommen.
Restriktionen	Es werden nur Berechnungen der Potenziale vorgenommen, die Vorgaben wie Cross Compliance, Veränderung der Flächennutzung, Veränderung des Anbausystems, Ertragszuwächse und technologische Entwicklungen generell berücksichtigen. Dagegen wird der Ökolandbau und Wiedervernässung nur in Teilen einzelner Studien aufgegriffen.
Nutzungskonkurrenzen	Als Konkurrenz wird die direkte Nutzung als Humuspotential gesehen, die bei einer energetischen Nutzung durch Verbrennung nicht mehr gegeben ist. Eine weitere Konkurrenz ist die Nutzung als Einstreu in der Tierhaltung, die bei einer steigenden ökologisch ausgerichteten Landwirtschaft bzw. bei mehr Tierwohl eine Rolle spielt. Durch eine Kaskadennutzung, wie beispielsweise die Nutzung von Stroh als Einstreu und anschließend in einer Biogasanlage, können diese mit Stroh versorgt werden. Hierbei kommt es zu einer Verlagerung zu Festmist bzw. tierischen Exkrementen.

Zusammenstellung: IZES

3.1.4.2 Tierische Exkremente

Tierische Exkremente, insbesondere Gülle, werden seit dem Aufkommen von Biogasanlagen vermehrt zur Biogasproduktion genutzt. Dennoch dominiert nach wie vor eine direkte Nutzung als Wirtschaftsdünger, so dass ein hoher Anteil des Stoffstroms derzeit energetisch noch nicht genutzt wird (Zeller et al. 2012). UBA (2016) befürworten daher einen Ausbau der energetischen Verwertung von Gülle.

Grundlage aller Potenzialanalysen für Gülle und Festmist sind die aktuellen Tierzahlen. Dabei ist nicht immer ersichtlich, von welchem Bezugsjahr die Basiszahlen stammen, die den Anfall von Exkrementen tierartspezifisch wiedergeben. Hier besteht das Problem, dass ältere Werte von der heutigen Leistungsphysiologie der einzelnen Tierarten abweichen.

Grundsätzlich wurde in den Studien – aus heutiger Sicht – die Entwicklung der Tierzahlen falsch eingeschätzt. Aktuell sind die Tierzahlen in Deutschland höher als z.B. von Fritsche et al. (2004) oder Öko-Institut et al. (2015) angenommen. Dies hat unterschiedliche Gründe. Zum einen wurden mehr Fleisch bzw. tierische Produkte verkauft (inkl. Export), als dies noch 2004 prognostiziert wurde. Andererseits

ist darauf hinzuweisen, dass politische Änderungen eine Prognose erschweren. So führen das Russlandembargo und der daraus folgende – für die Produzenten - schlechte Milchpreis zu einem stärkeren Rückgang der Tierzahlen, als dies noch in Studien von 2010 prognostiziert wurde. Eine andere gegenläufige Entwicklung ergibt sich aus der Bevölkerungszahl und damit der Verbraucherzahl in Deutschland. Die derzeit steigende Bevölkerungszahl korreliert mit einem höheren Nahrungsmittelbedarf. Die aktuellsten Schätzungen gehen zudem von einer erhöhten Geburtenzahl gegenüber beispielsweise 2010 aus.

In den Studien wurde die Transportfähigkeit der Exkreme im Kontext der regionalspezifisch oftmals sehr dezentral verteilten Herkunftsquellen nur partiell betrachtet. Das größte Problem von tierischen Exkrementen ist der hohe Wasseranteil sowie die geringe Energiedichte, die einen Transport über größere Strecken unrentabel und aus energetischer Sicht ineffizient machen. Eine Separation ist nur bei größeren Mengen und einer im Anschluss profitablen Nutzung sinnvoll. Auch die aktuelle Zahl an Kleinbiogasanlagen stellt immer noch einen Randbereich der Biogasproduktion dar. Ein weiterer Faktor, der insbesondere in Zukunft hinsichtlich der möglichen Potenziale eine Rolle spielt, ist die ökologische Tierhaltung. Dabei ist es das Ziel, allen Tieren möglichst viel Auslauf (außerhalb von Stallgebäuden und befestigten Flächen) zu geben, was Auswirkungen auf die Erfassbarkeit der Gülle hat. Entsprechende Zusammenhänge wurden in den untersuchten Studien nicht thematisiert.

Das methodische Vorgehen ist bei allen betrachteten Studien gleich. Über den statistisch angegebenen Tierbestand wird das Aufkommen der Exkremente berechnet. Wie für die statistischen Werte der Strohproduktion, so werden auch die statistischen Zahlen im Bereich der Tierproduktion und Tierhaltung im Turnus von mehreren Jahren durch das Statistische Bundesamt im Rahmen der Landwirtschaftszählung veröffentlicht. 2010 war die letzte Landwirtschaftszählung. Daraus resultiert, dass die Werte aus den Studien wie von Zeller et al. 2012 oder DBFZ 2015 älter als die Studie selbst sind. Zusätzlich gilt es die Haltungsformen (Weide- oder Stallhaltung) und den aktuellen Trend in dem Bereich zu berücksichtigen. Bei einem entsprechenden Vorgehen können sich hinsichtlich der Potenzialbildung zum Teil große Abweichungen ergeben.

Konkrete Aussagen zum Zeithorizont werden allein in der Studie von Fritsche et al. (2004) bis in das Jahr 2030 gemacht. In den anderen Studien werden nur die aktuellen Mengen an tierischen Exkremente bewertet.

Das Ende der Milchquote wurde in den betrachteten Studien berücksichtigt. Es kann allerdings erst jetzt bzw. in den nächsten zwei Jahren richtig abgeschätzt werden, wie sich die zukünftigen Tierzahlen in diesem Bereich entwickelt. In der Schweinehaltung sind die Zahlen in den letzten Jahren relativ konstant.

Die zukünftige Entwicklung der Tierzahlen wurde in den betrachteten Studien zum einen über die Bevölkerungszahl ermittelt. Zum anderen wurde eine mögliche Entwicklung des Konsumverhaltens zu Grunde gelegt (Fritsche et al. 2004). Dies beinhaltet sowohl einen erhöhten Konsum von ökologisch produzierten Lebensmitteln als auch einen Rückgang des Fleischkonsums. Nicht untersucht wurden Indikatoren wie beispielsweise die Anzahl an Neubauten im Stallbereich sowie die Absatz-Entwicklung von wichtigen Komponenten im Stall (wie z.B. Melkroboter), die Prognosen der Tierzahlen zulassen könnten.

Abbildung 11 stellt die gefundene Bandbreite für Gülle dar. Tabelle 11 fasst die Bewertungen der Studien zusammen.

Abbildung 11: Identifizierte Bandbreite des Potenzials an Gülle



Eigene Darstellung: IZES

Tabelle 11: Bewertung der Potenzialangaben für tierische Exkremente

Kriterien	Bemerkungen
Stoffstrom	Datenlage bezieht sich auf die Gesamtpopulation ohne Rassendifferenzierung. Die Potentialansätze für tierische Exkremente basiert auf statistischen Hochrechnungen. Dabei werden nicht alle rassenspezifische und Haltungsform bedingte Besonderheiten berücksichtigt.
Datenqualität	Die Angaben beziehen sich auf die Frischmasse. Hier gibt es große Schwankungen zwischen einzelnen Tierrassen, die in den Studien nicht berücksichtigt wurden. Auch die Mengenangaben sind meist nur Hochrechnungen, welche die unterschiedlichen Haltungsformen nur teilweise berücksichtigen. Nicht in allen Studien war die Basis (Exkrementenmenge pro Tier) ersichtlich.
Aktualität	Die Angaben zu den IST-Mengen beziehen sich meist auf Destatis-Angaben und sind daher 3-4 Jahre älter, als das jeweilige Veröffentlichungsdatum der Studie. Dementsprechend datieren die aktuellsten Zahlen der untersuchten Studien auf das Jahr 2012. Grundsätzlich wurde in den Studien von einer Abnahme des Fleischkonsums pro Person ausgegangen, was zu einem Rückgang der Tierzahlen führte. Zusätzlich wurde auch von einem Rückgang der Bevölkerungszahl ausgegangen. Beide Werte haben sich aber in der realen Entwicklung nicht so stark reduziert, wie dies in den Studien angesetzt wurde.
Basisjahr/Zeithorizont	Das Basisjahr der ältesten untersuchten Studie datiert auf das Jahr 2000. Im Hinblick auf den Zeithorizont differenzieren nur wenige Studien hinsichtlich definierter Zeitabschnitte. Im Regelfall wird, ausgehend von der IST-Situation eine Potenzialeinschätzung bis 2030 vorgenommen.
Restriktionen	In den Potenzialherleitungen wird nur in wenigen Studien die ökologische Landwirtschaft berücksichtigt, bei der die Menge an erfassbaren Exkrementen durch die ökologische Tierhaltung beeinflusst wird. Das Konsumverhalten sowie der Export von tierischen Lebensmittel wird in Teilen berücksichtigt, führte aber rückblickend in der Prognose zu keinen korrekten Ergebnissen für 2018.
Nutzungskonkurrenzen	Die Nutzung von Exkrementen in Biogasanlagen steht nach Aussagen der untersuchten Studien in keiner Konkurrenz zur praktizierten direkten Düngernutzung der Exkremente.
Bereits genutzte Anteile	Aussagen beziehen sich im Wesentlichen auf Destatis-Angaben. Die Nutzung liegt derzeit bei ca. 33 % (DBFZ, 2015).

Zusammenstellung: IZES

3.1.4.3 Ernterückstände

Die Datenlage bezüglich der Potenziale aus Ernterückständen ist sehr schlecht. Primärer Grund ist, dass die Reste wie Kartoffelkraut in der Regel auf dem Feld verbleiben und dort als Dünger dienen. In den Studien, die sich mit den Ernterückständen befassen, werden auch nur Kartoffelkraut und Rübenblatt als die wichtigsten Produkte bewertet (Fritsche et al, 2004; Zeller et al. 2012; DBFZ 2015).

In allen betrachteten Studien wird kein direkter Bezug zur Transportfähigkeit gemacht, bzw. das regionale Aufkommen der Güter dargelegt. In erster Linie werden die statistischen Daten von Destatis, wie Anbaufläche und Erträge der verschiedenen Kulturen verwendet (Zeller et al. 2012). Auch wird sich in aktuelle Studien (z.B. DBFZ 2015) nicht auf aktuelle Datenwerte bezogen. Die neuesten Zahlen beschreibt Zeller et al. (2012) mittels Mittelwerten von 1999 – 2007. Im Bezug zur Datenqualität sind natürliche Schwankungen des Wassergehaltes und der Ertragsmengen anzusetzen, dies wurde in den untersuchten Studien nur eingeschränkt berücksichtigt.

Von den betrachteten Studien gehen nur Fritsche et al. (2004) auf den Zeithorizont bis 2030 ein. Die Restriktionen beziehen sich nur auf die Humusbilanzierung. Ökolandbau wurde bezüglich Ernterückstände in keiner Studie betrachtet. Als Alternative zu einer energetischen Nutzung der Reststoffe bieten sich im Sinne einer Nutzungskonkurrenz das Belassen der Stoffe auf dem Feld zur Humusbildung bzw. die Nutzung als Futtermittel an. Dies wird aber in keiner Studie explizit betrachtet. In der Tabelle 12 werden die ermittelten Mengen an Ernterückständen dargestellt und in Tabelle 13 bewertet.

Tabelle 12: Ernterückstände (Kartoffelkraut und Rübenblatt)

Studie	Jahr	Minimal Mio. t FM	Maximal Mio. t FM
Fritsche et al. (2004)	2000	24,93	49,75
DBFZ (2015)a)	2000	5,88	11,26
Zeller et al. (2012)	2010	19,00	
Fritsche et al. (2004)	2010	24,25	42,05
Gaida et al. (2013)	2010	7	14
Fritsche et al. (2004)	2020	24,40	35,46
Fritsche et al. (2004)	2030	23,91	34,08

a) Rübenblätter und Reststoffe Gemüsebau
Zusammensetzung IZES

Tabelle 13: Bewertung der Potenzialangaben für Ernterückstände

Kriterien	Bemerkungen
Stoffstrom	Grundsätzlich ist die Datenlage sehr dünn und nur auf einzelne Teilstudien zurück zu führen.
Datenqualität	Die Angaben beziehen sich auf die Frischmasse.
Aktualität	Die Angaben zu IST-Mengen beziehen sich meist auf Destatis-Angaben und sind daher 3-4 Jahre älter, als das jeweilige Veröffentlichungsdatum der Studie. In den betrachteten Studien datieren die aktuellsten Zahlen der untersuchten Studien auf das Jahr 2010.
Basisjahr/Zeithorizont	Das Basisjahr der ältesten untersuchten Studie datiert auf das Jahr 1999. Im Hinblick auf den Zeithorizont differenzieren nur wenige Studien hinsichtlich definierter Zeitabschnitte. Im Regelfall wird, ausgehend von der IST-Situation eine Potenzialeinschätzung bis 2030 vorgenommen.
Restriktionen	Zur Berechnung der Potenziale wurde beispielsweise der Ertragszuwachs berücksichtigt. Dagegen wird der Ökolandbau nur in Teilen einzelner Studien aufgegriffen. Auswirkungen eines geänderten Konsumverhaltens (weniger Fleisch mehr Gemüse), wie auch die Transportwürdigkeit wurde nicht berücksichtigt.
Nutzungskonkurrenzen	Als Konkurrenz wird die direkte Nutzung als Humusbildner gesehen, die bei einer energetischen Nutzung durch Vergärung nur indirekt ist. Weitere Konkurrenz ist die Nutzung als Futter in der Tierhaltung, die bei einer steigenden ökologisch ausgerichteten Landwirtschaft eine größere Rolle spielt.

Zusammenstellung: IZES

3.1.5 Potenziale aus kommunaler und gewerblicher Biomasse

3.1.5.1 Bio- und Grünabfälle

Unter der Rubrik der Bio- und Grünabfälle werden im Regelfall die beiden Stoffströme ‚Biogut‘ (Material, welches über die Biotonne als Holsystem erfasst wird) und ‚Grüngut‘ (Material in Form von Garten- und Parkabfällen von privaten und öffentlichen Flächen, welches in der Regel über ein Bringsystem entsprechenden Sammelplätzen/Verwertungsanlagen angedient wird) betrachtet. Das theoretische Potenzial resultiert dabei einerseits aus den ca. 60 – 90 kg/(E*a) an Küchenabfällen (hauptsächlich Biogut)¹⁸ und andererseits aus den 1,5 – 3,5 kg/(m²*a), bzw. siedlungsstrukturell bedingt 20 – 330 kg/(E*a) an Garten- und Parkabfällen.¹⁹ Bezüglich des Grüngutaufkommens unterstellt Oetjen-Dehne (2015) eine bundesweite Gartenfläche von 7.700 km² und ein spezifisches Aufkommen von 1,9 kg/(m²*a).

Die jeweils bereits erfassten IST-Mengen werden größtenteils über Destatis-Zahlen abgebildet und schwanken je nach Bezugsjahr der jeweiligen Studie bei Biogut zwischen 3,76 Mio. t (Fricke et al. 2012) und 4,70 Mio. t (Öko 2014) sowie bei Grüngut zwischen 4,15 Mio. t (Fritsche et al. 2004) und 5,02 Mio. t (Öko 2014).²⁰

Die darüber hinaus gehenden Potenziale werden beim Biogut im Wesentlichen über die noch im Restmüll (Resthausmüll, Sperrmüll, haushälterischer Gewerbeabfall) beinhalteten Bio- und Grüngutanteile definiert, welche auf der Basis von –punktuell vorliegenden – Abfallsortieranaysen hergeleitet werden. Diesbezüglich gehen z.B. Fritsche et al. (2004) von einer noch in den Siedlungsmischabfällen beinhalteten Biomasse von ca. 6,1 Mio. t aus, das Witzenhausen-Institut (2010) berechnet für den Hausmüll einen Organikanteil von 4,89 Mio. t. Der Schluss von diesen theoretischen auf technische Potenziale erfolgt teils auf Basis der Anrechnung von „best practice-Erfassungsquoten“ (UMSICHT et al., 2015), oder durch typische, noch im Restmüll verbleibende Organikanteile bei gut angenommenen Erfassungssystemen (Fritsche et al., 2004).²¹ Für das Basisjahr 2000 werden durch Fritsche et al. (2004) grundsätzlich verfügbare Biogutmengen (inkl. der bereits erfassten Mengen) in einer Größenordnung von max. 7,6 Mio. t (zum Vergleich IST-Erfassung zum Basisjahr: 4,02 Mio. t) unterstellt.

Für den Stoffstrom Grüngut würde sich insbesondere ein zusätzliches Potenzial durch die Verlagerung von Mengen ergeben, die bislang entweder einer Eigenkompostierung im häuslichen Garten zugeführt, nur gemulcht, verbrannt, oder illegal entsorgt wurden. In Fritsche et al. (2004) werden hier Einschätzungen von Fricke (2000) benannt, die von einem jährlichen Mengenaufkommen von 3 – 7 Mio. t ausgehen. Vogt (2002) benennt ein Gesamtpotenzial für Grüngut von 8 – 10 Mio. t, Oetjen-Dehne (2015) geht von 14,46 Mio. t aus. Aufgrund der bislang vorherrschenden Einschätzung, dass Eigenkompostierungsaktivitäten aus abfallwirtschaftlicher Sicht zu präferieren sind, wurden diese zusätzlichen Potenziale in den untersuchten Studien bislang jedoch kaum zum Ansatz gebracht, so dass die Grüngutpotenziale in der Regel vergleichsweise konstant gehalten werden (Bezug: IST-Situation gemäß destatis-Angaben). Aktuellere Einschätzungen, welche die Eigenkompostierung aufgrund der nicht immer nachhaltigen Handhabungspraxis (z.B. einfache Ablagerung von Grasschnitt, keine Nutzungsmöglichkeit für Kompost mangels Nutzarten, etc.) in einem kritischeren Licht sehen („dezentrale Bio-/Grüngutdeponie“) schlagen sich bislang nicht als Potenzial-bildender Effekt nieder.

¹⁸ Kranert (2012) geht hier von insgesamt 81 kg/(E*a) an Lebensmittelabfällen aus.

¹⁹ Bandbreiten gemäß Fritsche et al. (2004), Doedens (1996)

²⁰ Aktuelle Destatis-Angaben siehe Kapitel 3.2.3.6 und 3.2.3.7

²¹ Hier wird z.B. ein Restorganikanteil im Hausmüll von 25 kg/(E*a) unterstellt (zum Bezugsjahr ca. 68 kg/(E*a))

An sonstigen Potenzial-bildenden und Stoffstrom-lenkenden Einflüssen, die im Rahmen der Studien thematisiert, aber nur teilweise bei der Potenzialberechnung in Form entsprechender Korrekturen berücksichtigt wurden, lassen sich – zusätzlich zu den oben bereits erwähnten Erfassungsquoten - insbesondere folgende Punkte benennen:

- ▶ Bevölkerungsentwicklung, Siedlungsstruktur
- ▶ Gesetzlich-administrative und organisatorische Maßnahmen (z.B. Vermeidung von Lebensmittelabfällen, Ernährungswende, verstärkte Nutzung biologisch abbaubarer Werkstoffe, mehr Eigenkompostierung, Ausbau der getrennten Erfassung/Anschlussgrad, Veränderung der qualitativen Anforderungen an Kompost, Gebührenbeaufschlagung)
- ▶ Sozioökonomische Faktoren (z.B. Umweltbewusstsein, Konsumverhalten)

In Szenarien überführte Einflüsse beziehen sich aber meist nur auf die Punkte ‚Bevölkerungsentwicklung‘ und ‚Erfassungsquote‘ (z.B. Fritsche et al., 2004). In Teilstrombetrachtungen zum Thema Biogut werden teilweise zudem regionalspezifische Effekte analysiert (z.B. Witzenhausen-Institut, 2010).

Die gemäß Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG 2012) ab 2015 erforderliche flächendeckende Erfassung von Biogut über die Biotonne wird dabei in einigen Studien (Oetjen-Dehne, 2015) bereits perspektivisch hinsichtlich des veränderten Mengenaufkommens modelliert. Die ermittelte Bandbreite der Potenzialangaben lässt sich unter Berücksichtigung der obigen Ausführungen gemäß den folgenden Abbildung 12 und Abbildung 13 darstellen. Alle Angaben beziehen sich auf Frischmasse (FM).²²

Die in den Stoffströmen in der Regel beinhalteten Stör- und Fremdstoffanteile werden teilweise benannt (z.B. bei Biogut ca. 5 - 8 %), aber bei den Potenzialangaben nicht zum Abzug gebracht.

Beim Grüngut werden zusätzlich teilweise ähnliche Stoffströme wie z.B. Biomassen von Friedhöfen benannt, was möglicherweise zu Dopplungen führen kann. Ansonsten wird das Grüngutaufkommen im Vergleich zur IST-Situation gemäß den Destatis-Angaben kaum variiert.

Sonstige Abfälle biogenen Ursprungs bzw. mit biogenen Anteilen, die keine Biomasse im Sinne der BiomasseV sind (z.B. PPK, Verbunde, Windeln, Textilien, etc.) werden nur in wenigen Studien benannt, auch dort jedoch nicht als Biomasse-Potenzial berücksichtigt. Nach Fritsche et al. (2004) ließe sich daraus ein weiteres Potenzial von ca. 4,23 Mio. t ableiten.

Aus technischer Sicht wird bei der Vergärung von Biogut keine Nutzungskonkurrenz zu Kompostierungsanlagen unterstellt, da am Ende nach wie vor ein Kompostprodukt vorliegt. Problematisch erscheint jedoch die teilweise erfolgte Zuordnung von signifikanten Grüngutanteilen zu thermischen Nutzungspfaden, da dadurch der Kompostierung Strukturmaterialien entzogen werden.

Hinsichtlich der bereits vergorenen Mengen weisen Fricke et al. (2012) für 2010 einen Anteil von ca. 1,1 Mio. t aus. Das Witzenhausen-Institut berichtet in UMSICHT et al. (2015) über 81 Biogut-Vergärungsanlagen mit einer Durchsatzkapazität von knapp 2 Mio. t. Der Biogas-Atlas 2014/15 dokumentiert 113 Anlagen mit einem Input gemäß BioAbfV, wovon 75 Anlagen mit einer Vergärungskapazität von ca. 1,9 Mio. t/a hauptsächlich Bio- und Grüngut verwerten. Die restlichen 38 Anlagen verarbeiten hauptsächlich gewerbliche Abfälle (Raussen et al., 2015).

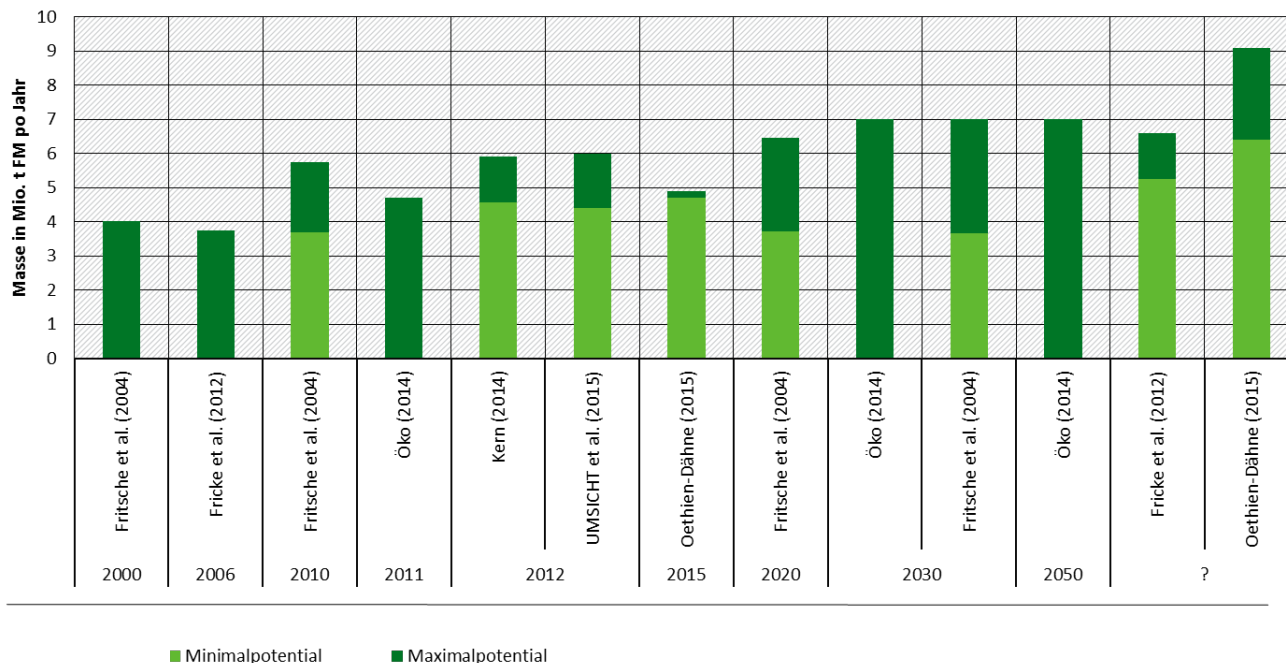
Für Grüngut lassen sich die bereits genutzten holzartigen Anteile nur schwer identifizieren. Kern et al. (2012) gehen davon aus, dass sich ca. 30 Gew.-% ohne negative Auswirkungen auf den Kompostierungsprozess vom restlichen Material als Energierohstoff abtrennen lassen.

²²

Angaben zu den Qualitäten: siehe stoffstromspezifische Kennblätter in Anhang A

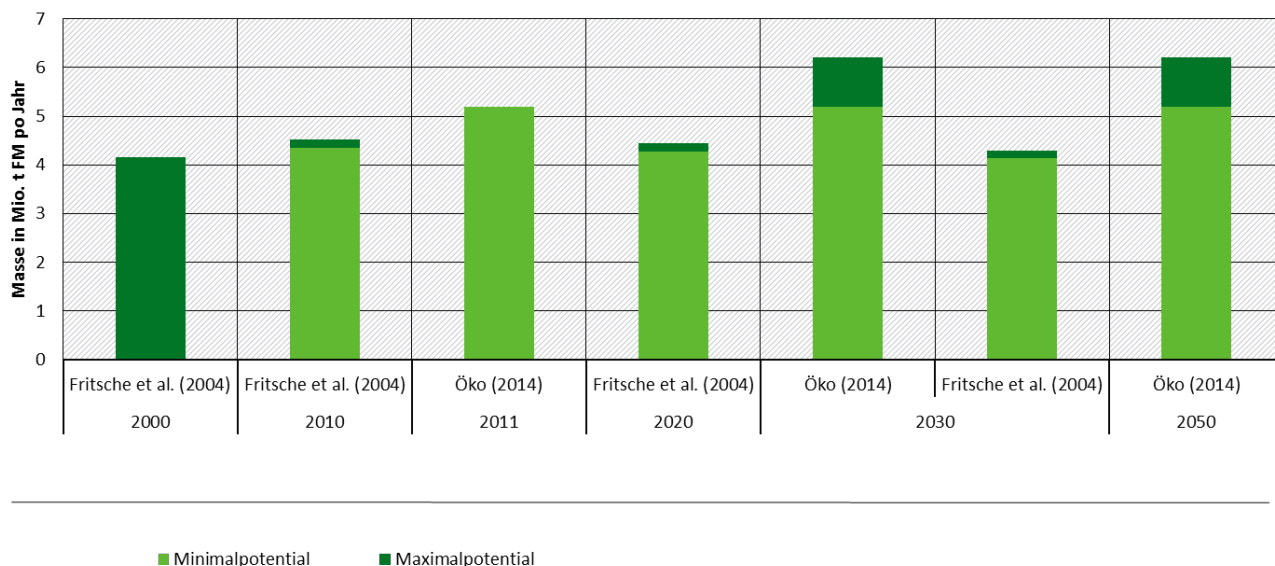
Zusammenfassend lässt sich für den Bereich der Bio- und Grünabfälle unter Berücksichtigung der im Kapitel 2.1.3 dargestellten Bewertungskriterien folgende quantitative (Abbildung 12 und Abbildung 13) und qualitative (Tabelle 14) Einschätzung vornehmen:

Abbildung 12 : Identifizierte Bandbreite des Potenzials an Biogut



Eigene Darstellung IZES

Abbildung 13: Identifizierte Bandbreite des Potenzials an Grüngut



Eigene Darstellung IZES

Tabelle 14: Bewertung der Potenzialangaben für Bio- und Grünabfälle

Kriterien	Bemerkungen
Stoffstrom	Grundsätzlich gute Datenlage zu den aktuell erfassten Mengen, Doppelnennungen sind tendenziell im Grüngutbereich möglich. Die Potenzialansätze für Biogut basieren zum Teil auf punktuellen (Sortier-)Analysen unter Nutzung einwohnerspezifischer Kennziffern sowie empirischer Erfassungsquoten. Aussagen zu den in Siedlungsmischabfällen vorliegenden biogenen Anteilen liegen zwar vor, werden jedoch potenziellseitig nicht weiter berücksichtigt (Energieerzeugung über die Abfallverbrennung).
Datenqualität	Die Angaben beziehen sich auf die Frischmasse. Ergänzende qualitative Angaben z.B. im Hinblick auf die Anteile an holzigen und krautartigen Materialien, Wassergehalte sowie Stör-/Fremdstoffgehalte werden nur teilweise benannt und im Rahmen der Potenzialangaben in der Regel nicht berücksichtigt. Nur in wenigen Studien wird der Versuch einer regionalen Differenzierung der Potenzialherleitung unternommen (Berücksichtigung unterschiedlicher Siedlungsstrukturen).
Aktualität	Die Angaben zu IST-Mengen beziehen sich meist auf destatis-Angaben und sind daher 3-4 Jahre älter, als das jeweilige Veröffentlichungsdatum der Studie. Dementsprechend datieren die aktuellsten Zahlen der untersuchten Studien auf das Jahr 2012. Teilweise wurden die Angaben z.B. im Hinblick auf mögliche Anschlüsse an die Biotonne durch Befragungen der öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger ergänzt.
Basisjahr/ Zeithorizont	Das Basisjahr der ältesten untersuchten Studie datiert auf das Jahr 2000. Im Hinblick auf den Zeithorizont differenzieren nur wenige Studien hinsichtlich definierter Zeitabschnitte. Im Regelfall wird, ausgehend von der jeweiligen IST-Situation eine Potenzialeinschätzung ohne konkretes Bezugsjahr vorgenommen.
Restriktionen	Die Potenzialherleitungen basieren in der Regel auf Bevölkerungszahlen sowie einwohnerspezifischen Kennziffern im Zusammenhang mit möglichen Erfassungsquoten. Nutzungs-/versorgungsorientierte Differenzierungen z.B. im Sinne von Veränderungen im Lebensmittelverbrauch werden im Rahmen der Berechnungen nicht berücksichtigt. Auch die Betrachtungen zu Nebenprodukten wie z.B. der Frage wieviel Kompost benötigt wird und entsprechend abgesetzt werden kann, finden nicht statt. Verschiebung aus der Eigenkompostierung sowie der illegalen Entsorgung/Verbrennung werden lediglich in einer Studie unterstellt.
Nutzungskonkurrenzen	Die Vergärung wird in der Regel nicht als Konkurrenz zu derzeit praktizierten Kompostierungsverfahren gesehen, da auch hier am Ende ein Kompostprodukt verfügbar ist. Differenziert wird daher eher aus technischen Gründen, indem – zumindest teilweise – zwischen holzigen und krautigen Materialien unterschieden wird. Problematisch erscheint dabei die Tatsache, dass in einigen Studien das holzige Material zu großen Teilen einer thermischen Nutzung zugeführt wird, und so als wichtiges Strukturmaterial für die Kompostierung der Gärrückstände nicht mehr zur Verfügung steht. Potenziell konkurrierende Prozesse im Sinne von neuen Verfahren z.B. zur Herstellung von Biokohle werden nicht thematisiert.
Bereits genutzte Anteile	Aussagen beziehen sich mit einer hohen Unschärfe im Wesentlichen auf Destatis-Angaben (Zuordnung zu Kompostierungs- und Vergärungsanlagen).

Zusammenstellung: IZES

3.1.5.2 Altholz

Die Potenzialherleitungen im Altholzbereich basieren im Wesentlichen auf Daten der statistischen Landesämter sowie auf Zahlen von Mantau (2005, 2010, 2012), die wiederum zu Teilen auf der Grundlage von Befragungen der Akteure des Altholzmarktes erhoben wurden. Dabei wurde hauptsächlich

das Markt-/bzw. Handelsvolumen erfasst. Anteile die sich z.B. noch in Siedlungsmischabfällen befinden, wurden kaum ausgewiesen.²³ Teilweise werden auch einwohnerspezifische Kennwerte in einer Größenordnung von 80 – 100 kg/(E*a) genutzt.

Die entsprechende Bandbreite an jährlichem Altholzpotezial die sich daraus ableiten lässt, reicht von 6,3 Mio. t (ifeu et al. 2016) bis 11,0 Mio. t (INTECUS et al., 2011). Die Interpretation der Daten wird dabei durch folgende, teilweise vorhandene Unklarheiten erschwert:

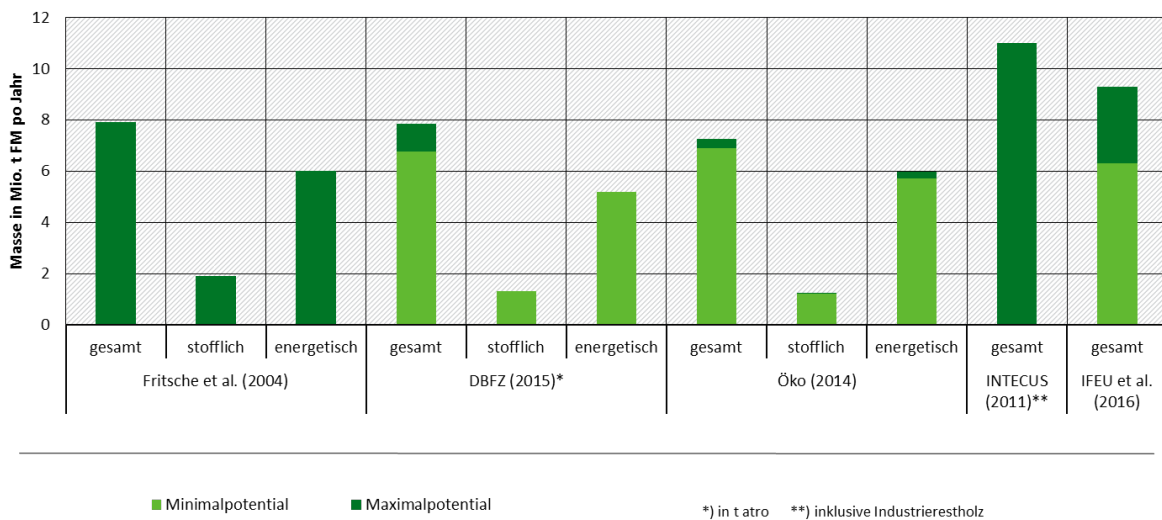
- ▶ Beziehen sich die Daten auf die Trockensubstanz, oder auf die Frischmasse (lutro, oder atro)?
- ▶ Ist Industrierestholz, welches per Definition kein Altholz ist, beinhaltet oder nicht (Unsicherheiten in der abfallrechtlichen Definition)?
- ▶ Beziehen sich die Angaben auf das Handels- oder das Marktvolumen (beim Handelsvolumen sind Doppelnennungen möglich)? Sind innerbetriebliche Nutzungsanteile ausgewiesen?
- ▶ Kann – hinsichtlich der Nutzungsoptionen - eine schlüssige Differenzierung nach Altholzkategorien vorgenommen werden?
- ▶ In welcher Weise werden stoffliche Nutzungsanteile bereits berücksichtigt und ausgewiesen? In der Regel wird hier der Status Quo (z.B. 20 %) ohne zeitliche Dynamik zugrunde gelegt.
- ▶ In welcher Form werden Import-/Export-Verhältnisse berücksichtigt?

Die ermittelten Potenzialangaben der jeweiligen Studien lassen sich unter Berücksichtigung der obigen Ausführungen gemäß der folgende Abbildung 14 darstellen. Die Angaben beziehen sich mit einer Ausnahme auf Frischmasse (FM).²⁴

²³ Fritsche et al. (2004) schätzen diesbezüglich einen Mengenanteil von ca. 2,2 Mio. t ab, wobei ein Großteil davon als Bestandteil von Möbeln/Verbunden im Sperrmüll zu finden ist.

²⁴ Nicht eingebunden, da derzeit nicht exakt validierbar (Studie liegt nicht vor), sind die Ergebnisse einer aktuellen Studie von trend:research („trend:research „Der Markt für Altholz in Deutschland bis 2030“, 2017). Auf der Basis einer Folienpräsentation mit anschließender Diskussion im Rahmen eines „Fachgespräches Altholzverbrennungsanlagen“ (Gatena, J. am 18.08.2017) können jedoch folgende Einschätzungen vorgenommen werden:

- Aktuelles Altholzaufkommen in D: 10 Mio. t, davon 1,1 Mio. t Importe (Potenzial D: 8,9 Mio. t)
- Altholznutzung in D: 1,3 Mio. t stofflich (davon 1,2 Mio. t Spanplatte), 8,4 Mio. t energetisch, 0,3 Mio. t Exporte
- Potenzialentwicklung in D: bis 2020 ca. 10 Mio. t, bis 2030 ca. 10 Mio. t (min) bis > 12 Mio. t (max); die dargestellt Potenzialentwicklung basiert im Wesentlichen auf einer Einschätzung konjunktureller Entwicklungen (insbesondere die der Baukonjunktur)
- Es wird eine ‚deutliche Steigerung‘ der stofflichen Verwertung unterstellt.

Abbildung 14: Identifizierte Bandbreiten des Potenzials an Altholz

Eigene Darstellung IZES

Zukünftige Altholz-Potenziale werden in den untersuchten Studien in der Regel nicht ausgewiesen. Fritsche et al. (2004) liefern zwar Aussagen bis 2030, variieren dabei aber nicht in den Mengenansätzen. Mögliche dynamische Prozesse – z.B. im Kontext einer Vergrößerung des Altholzaufkommens durch eine verstärkte stoffliche Nutzung von Rohholz im Sinne von Kaskadenprozessen - finden somit ebenso keine Berücksichtigung wie derzeitige Prozesse der Charta Holz 2.0. Des Weiteren werden mögliche Verbesserungen im Bereich der Trennung des Altholzes nach Altholzkategorien, z.B. durch neue Detektionsverfahren, nicht benannt. Dies könnte jedoch helfen, die derzeit diskutierten Schadstoffanreicherungen in dem stofflich zu nutzenden Holz zu mindern. Das dann in einem höheren Maße stofflich genutzte Holz ist für die energetische Verwertung nicht verloren, es fällt nur zu einem – produktabhängig – späteren Zeitpunkt an.

In diesem Zusammenhang ergeben sich aus einem von Fraunhofer IEE organisierten Fachgespräch²⁵ – bei einer insgesamt sowohl quantitativ, als auch qualitativ als heterogen eingeschätzten Datenlage – folgende potenzialbildende Faktoren:

- **Import- und Export-Situation²⁶:** in diesem Zusammenhang ist insbesondere die Umsetzung bestehender Gesetze zu hinterfragen, da im Bereich der stofflichen Verwertung europaweit unterschiedliche Standards zugrunde gelegt werden und die Branche vermutet, dass Export-Altholz im Ausland zu minderwertigen Produkten verarbeitet wird.
- **Der Europäische Kontext:** hier steht insbesondere die Umsetzung der europäischen Deponierichtlinie zur Diskussion, da es hier noch „Schlupflöcher“ im Sinne der Altholz-Deponierung gibt.
- **Perspektiven der stofflichen Rohholz-Nutzung:** durch eine – möglicherweise über die Charta Holz 2.0 induzierte – verstärkte stoffliche Nutzung von Rohholz wird möglicherweise die Altholz-Basis verbreitert. Geht diese Entwicklung mit einer schadstoffarmen Produktgestaltung einher, können

²⁵ IWES, „Fachgespräch Altholzanlagen“ im Rahmen des Projektes „Vorbereitung und Begleitung bei der Erstellung eines Erfahrungsberichtes gemäß § 97 Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG 2014) – Teillos 2 Stromerzeugung aus Biomasse und Gasen“, am 18.08.2017 in Kassel

²⁶ Gemäß EUWID 31. 2017 stehen den nur leicht zunehmenden Importmengen von ca. 950.000 t (2015/2016) „deutlich steigende Exporte gegenüber“. So erhöhten sich die Exportmengen von 315.000 t in 2015 auf ca. 400.000 t in 2016.

verstärkt Althölzer für die stoffliche Nutzung bereitgestellt werden. Dies unterstellt jedoch eine verstärkte Nachfrage nach Holzprodukten, die es angesichts der stagnierten Produktionsmengen jedoch erst anzureizen gilt.²⁷

- ▶ *Auswirkung rechtlicher Rahmenbedingungen:* Hier werden z.B. Effekte im Sinne eines Mengenwachses aus der seit August 2017 geltenden Gewerbeabfallverordnung erwartet. Des Weiteren wird hinsichtlich der Notwendigkeit der Novellierung der Altholzverordnung im Hinblick auf eine optimierte Zuordnung von Altholzqualitäten zu Kategorien bzw. Nutzungspfaden diskutiert.
- ▶ *Optimierung der getrennten Erfassung:* Hier geht es einerseits darum, Althölzer verstärkt aus Mischfraktionen zu separieren (z.B. aus dem Sperrmüll)²⁸, andererseits um technische Optimierungspotenziale z.B. im Sinne von Detektionssystemen, die eine bessere Zuordnung von Althölzern zu Altholz-Kategorien ermöglichen.
- ▶ *Zeitliche Verlagerungseffekte durch politische Maßnahmen:* Stofflich genutztes Altholz ist nicht für die energetische Nutzung verloren, es ist jedoch erst mit einem zeitlichen Versatz verfügbar. Diesbezüglich gibt es derzeit keinerlei Planspiele bzw. Szenarien hinsichtlich der Frage, was passieren würde, wenn z.B. durch politische Maßnahmen eine signifikante Verlagerung von Stoffströmen von der energetischen in die stoffliche Nutzung erfolgen würde und welche Infrastrukturen dann zu welchem Zeitpunkt zur Verfügung stehen müssten.
- ▶ *Konkurrenzsituation zwischen stofflicher und energetischer Altholznutzung:* Zwar stagniert die Spanplattenproduktion in Deutschland nach einer Abnahme von 50 % von 2005 bis 2015 (nach Döring et al. 2017), der Altholzeinsatz nimmt jedoch deutlich zu. Als Zielgröße werden ca. 50 % des gesamten Rohstoffeinsatzes bei der Spanplattenproduktion diskutiert. Die Altholzkraftwerke versuchen durch eine Steigerung der Wirtschaftlichkeit ihrer Anlagen²⁹ gegenzusteuern.
- ▶ *Sonstige Veränderlichkeiten:* Neben den konjunkturellen Effekten sind hier insbesondere punktuelle Veränderungen z.B. durch Hochwasserschäden und milde Winter zu nennen.
- ▶ *Effekte durch Bioraffinerien:* In der Branche ist das derzeit kein Thema.

Im Jahr 2018 arbeiten verschiedene Projektgruppen an dem Thema Altholzpotenzialbestimmung auf Basis von Abfallstatistiken. Die Ergebnisse dieser Arbeiten werden für 2019 erwartet.

Zusammenfassend lässt sich für den Bereich des Altholzes unter Berücksichtigung der im Abschnitt 2.1.3 dargestellten Bewertungskriterien folgende Einschätzung vornehmen.

²⁷ Hinsichtlich der stofflichen Altholznutzung in Deutschland ist im Kontext der europäischen/globalen Konkurrenz in den letzten Dekaden ein Strukturwandel zu konstatieren, der sich z.B. im Bereich der Holzwerkstoffindustrie in einem Produktionsrückgang von etwas über 10 Mio. m³ im Jahr 2005 auf aktuell etwas über 5 Mio. m³ sowie in Form rückläufiger Investitionen in Holzwerkstoffanlagen zeigt (Hasch, 2014)

²⁸ Hierbei sind folgende Punkte zu berücksichtigen: a) der Wille der öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger verstärkt Holz aus – derzeit ausgelasteten MVA's (u.a. mit Verwerterstatus) – auszuschleusen und b) die Aufnahmefähigkeit der Altholzmärkte angesichts der Sättigung im Jahr 2016 (2017 ist der Markt wieder stabil und ausgeglichen).

²⁹ z.B. durch technische Optimierungen (z.B. Nutzung von Wärmesenken/-erlöse, Reduktion der Stillstandzeiten, Systemdienstleistungen), Einsatz alternativer Brennstoffe und angepasste Abfallentsorgungspreise

Tabelle 15: Bewertung der Potenzialangaben für Altholz

Kriterien	Bemerkungen
Stoffstrom	Altholz-Daten liegen für den gesamten, getrennt erfassten Stoffstrom bei einer Abgrenzung von Markt- und Handelsvolumen vergleichsweise gut definiert vor. Teilweise erfolgen gemeinsame Nennungen mit den Industrieresthölzern, was hinsichtlich der Abgrenzung der Potenziale und der späteren Nutzung zu Interpretationsschwierigkeiten führt. Nur selten adressiert werden die Mengen, die derzeit noch über die Siedlungsmischabfälle (Hausmüll, Sperrmüll und Gewerbeabfälle) entsorgt werden. Bezogen auf den Bilanzraum Deutschland fehlen zudem oftmals Aussagen zu den – schwankenden – Import-/Exportströmen.
Datenqualität	Die ausgewerteten Studien weisen keine Differenzierung in unterschiedliche Altholzkategorien (Schadstoffbelastungen) aus. Dies wäre allerdings erforderlich um unterschiedliche Nutzungsoptionen einschätzen zu können. Es ist zudem nicht immer ersichtlich, ob die Mengenangaben sich auf die Trockensubstanz (atro = absolut trocken), oder die Frischmasse (lutro = lufttrocken) beziehen. Insgesamt ist die Datenlage bezüglich der Gesamtpotenziale – auch nach Einschätzung der Branche – sowohl quantitativ, als auch qualitativ als heterogen zu bezeichnen.
Aktualität	Als Grundlage werden Abfallbilanzen und Entsorgungsstatistiken genutzt. Die aktuelleren Studien beziehen sich insbesondere auf die Untersuchungen von Mantau aus den Jahren 2010 und 2012 (Aussagen zur aktuellen Studie von trend:research können derzeit nicht gemacht werden).
Basisjahr/ Zeithorizont	Die meisten Untersuchungen beziehen sich auf den Status Quo und schätzen darauf aufbauend – ohne weitere zeitliche Entwicklungsschiene – eine nutzbare Menge ab. Nur zwei Studien konnten identifiziert werden, die Aussagen bis 2030 trafen. Bei Fritsche et al. (2004) werden dabei allerdings die spezifischen Mengenansätze konstant gehalten. Trendresearch (2017) basiert auf 2014 und zeichnet eine Entwicklungslinie bis 2030. Die Quellen sind zum einen studienbasiert (Basisjahr 2012) und zum anderen umfragebasiert (Basisjahr 2016).
Restriktionen	Restriktionen hinsichtlich der Nutzungsoptionen ergeben sich insbesondere aus der Schadstoffbelastung und damit aus dem Design der jeweiligen Holzprodukte sowie der Trennbarkeit der unterschiedlichen Altholzkategorien an der Anfall- bzw. Sammelstelle. Das Ziel sollte dabei – konform zur Nutzungshierarchie des KrWG – sein, den Anteil an der stofflichen Nutzung entweder durch eine optimierte Produktgestaltung, oder durch verbesserte Trenntechniken (Detektionsverfahren) zu erhöhen. Dies bedingt auch einen Blick auf das Marktvolumen, um zu klären ob zusätzliche Holzprodukte (bei einer Erweiterung des Marktvolumens), oder Holzprodukte mit einer veränderten Qualität (bei einer Konstanz des Marktvolumens) überhaupt absetzbar sind. Entsprechende Zusammenhänge werden in den Potenzialstudien nur ansatzweise diskutiert und kaum in abgewandelte Potenzialansätze überführt. In der Regel wird der Status quo der stofflichen Nutzung (z.B. 20 %) konstant gehalten.
Nutzungskonkurrenzen	Als Konkurrenz wird fast ausschließlich die stoffliche Nutzung in Form der Spanplattenproduktion thematisiert und prozentual zum Gesamtaufkommen angesetzt. Andere Konversionsverfahren zur stofflichen Nutzung (Bioraffinerien, chem.-physikalische Prozesse) finden bislang kaum Beachtung. Auch dynamische Prozesse bei denen durch eine erhöhte stoffliche Nutzung gegebenenfalls kurz- bis mittelfristig Potenziale der energetischen Nutzung fehlen, dieser langfristig – da die Biomasse nicht verloren geht – aber nach Ende der stofflichen Nutzungskette wieder zur Verfügung stehen, konnten in den Studien nicht gefunden werden (trend:research (2017) geht hier von einer linearen Zunahme sowohl der stofflichen, als auch der energetischen Nutzung aus; Rückgang bei den Altholzkraftwerken, aber Zunahme bei der Mitverbrennung in Kohle-/Zementwerken).

Kriterien	Bemerkungen
Bereits genutzte Anteile	Genutzte Anteile werden i.d.R. mit Bezug auf Stoffstromanalysen von Mantau ausgewiesen. Nicht betrachtet werden über die Anlagen für Siedlungsabfälle entsorgte Anteile.

Zusammenstellung: IZES

3.1.5.3 Klärschlamm/Klärgas aus öffentlichen Anlagen

Das zukünftige Klärschlammaufkommen wurde in den Szenarien älterer Potenzialanalysen teils signifikant überschätzt. Während Fritsche et al. (2004) für das Basisjahr 2005 noch von einem maximalen Klärschlammaufkommen aus öffentlichen Anlagen von 2,8 Mio. t TS ausgehen und die Entwicklungslinie bis 2030 auch nur marginal auf einen Mindestwert von ca. 2,3 Mio. t TS reduzieren, berichtet die DWA (2015) in ihrer Abwasser-/Klärschlammstatistik (2015) für 2012 von einem Klärschlammaufkommen aus öffentlichen Anlagen von nur noch 1,85 Mio. t TS. Ein nicht nachvollziehbares theoretisches Potenzial liefert DBFZ (2015) mit einem Ansatz von ca. 4,7 Mio. t TS, zumal zudem Klärschlamm-potenziale aus anderen Herkunftsbereichen benannt werden (Fäkalschlamm, Nahrungsmittel-/Zellstoffindustrie, sonstige Industriebereiche).

Der reale Rückgang des Klärschlammaufkommens ist somit wesentlich deutlicher ausgefallen, als dies von den Potenzialstudien (hier insbes. Fritsche et al. 2004) unterstellt wurde. Bei einem Anschlussgrad an die öffentliche Abwasserbehandlung im Jahr 2010 von über 97 %³⁰ hat sich die einwohnerspezifische Klärschlammmenge seit 1991 von 24,2 kg TS/(E*a) auf 15,8 kg TS/(E*a) im Jahr 2010 um ca. 35 % reduziert. Die Gründe für den Rückgang liegen nach DWA (2015) unter anderem

- ▶ in dem Umstieg von Kalk-/Eisen- auf Polymerkonditionierung,
- ▶ in optimierten Verfahren der industriellen Abwasservorbehandlung und
- ▶ in der besseren Mengenermittlung.

Gegebenenfalls können zudem bessere Stabilisierungseffekte u.a. im Kontext einer erhöhten Klärgasausbeute (s.u.) herangezogen werden. Zu Unsicherheiten in der Interpretation der Angaben führt die Tatsache, dass die statistischen Daten zu öffentlichen Anlagen die aus anderen Anlagen bezogenen Klärschlamm-mengen berücksichtigen, die an andere Anlagen abgegebenen Mengen jedoch nicht (DWA 2015). Dies führt gegebenenfalls zu Grauzonen bzw. Überschneidungen mit z.B. industriellen Anlagen.

Als Potenzial-beeinflussende Faktoren werden in den betrachteten Studien im Regelfall folgende Effekte beschrieben, jedoch größtenteils nur pauschal im Sinne einer prozentualen Minderung rechnerisch berücksichtigt (z.B. Fritsche et al. 2004):

- ▶ technische Veränderungen (P-Rückgewinnung, Stabilisierungsverfahren, Entwässerung/Trocknung, Desintegration)
- ▶ gesetzliche Veränderungen (Reduktion der direkten landwirtschaftlichen Verwertung)
- ▶ Bevölkerungsentwicklung / Anschlussgrad an öffentliche Entsorgung (z.B. von 93 auf 96 %)

³⁰ Nach DWA (2015) werden im Jahr 2010 ca. 2,2 Mio. Einwohner nicht über die zentrale, öffentliche Abwasserbehandlung entsorgt, sondern über Kleinkläranlagen.

Rechnerisch werden z.B. in Fritsche et al. (2004) Szenarien-abhängige Varianzen hinsichtlich der Entwicklung der Stabilisierungsverfahren (z.B. von aerob-thermophil auf anaerob³¹) und der Nutzungspfade vorgenommen. Hinsichtlich der Nutzungspfade wird generell eine Zunahme der energetischen Verwertung unterstellt. Diese trifft bei der Modellierung von Fritsche et al. (2004) für das Jahr 2012 nach DWA (2015) fast genau den realen Wert von 55 % des Klärschlamm-aufkommens.³²

Insgesamt erscheint es somit sinnvoll hinsichtlich der Potenzialansätze von den aktuellen statistischen Basiswerten auszugehen und diese in der Nutzung unter zusätzlicher Berücksichtigung weiterer Restriktionen (hier insbesondere die P-Erfassung) zu variieren. Die Angabe einer Bandbreite (bis 2,8 Mio. t TS) macht hier keinen Sinn.

Klärgas wird als Produkt eines anaeroben Prozesses zur Klärschlammstabilisierung nur in wenigen (nationalen) Potenzialanalysen thematisiert. So weisen Fritsche et al. (2004), bei allerdings (mittlerweile) deutlich überhöhten Klärschlamm-mengen (s.o.) Szenarien-abhängig für den Zeitraum 2010 bis 2030 eine mögliche Bandbreite von 5,0 bis 19,1 PJ aus. Der obere Wert geht dabei davon aus, dass der gesamte Klärschlamm vergoren wird, was angesichts der Tatsache, dass die anaerobe Schlammstabilisierung nur bei größeren Anlagen³³ wirtschaftlich und betriebstechnisch darstellbar ist, kaum zum Tragen kommen wird. Es muss zudem ein Fehler im Rechenansatz vorliegen, da DWA (2015) bereits für 2013 von einer realen Klärgasmenge von 20,6 PJ (bzw. 5,73 Mio. MWh) ausgeht. Dehoust et al. (2010) ermitteln, ausgehend von den Realdaten des Basisjahres 2008 ein Gesamtpotenzial von 6,16 Mio. MWh (bezogen auf den Brennwert), so dass auf dieser Grundlage derzeit von einer – möglicherweise unterschätzten – Bandbreite von 5,7 bis 6,2 Mio. MWh auszugehen ist. Nach DWA (2015) hat die Klärgasgewinnung dabei von 2008 bis 2013 um ca. 12,5 % zugenommen.

Bundesweite Angaben zu den Anlagen zur Klärgasgewinnung und -nutzung sind nicht unmittelbar verfügbar. Sie müssen aus den Angaben der jeweiligen statistischen Landesämter abgeleitet werden. DWA (2015) geht hier auf der Basis der Daten für Baden-Württemberg für 2010 von 27 % der Kläranlagen aus, die eine Klärgasgewinnung aufweisen. Zum Vergleich: bundesweit weisen 2010 ca. 23 % der Kläranlagen in Deutschland eine Ausbaugröße >10.000 EW auf. Sie behandeln dabei ca. 88,5 % der insgesamt in Deutschland behandelten Abwassermenge.

Die Restriktionen für den Ausbau der – insgesamt als sinnvoll erachteten - Klärgasproduktion ergeben sich somit in erster Linie aus den technisch-wirtschaftlichen Rahmenbedingungen hinsichtlich der Integration einer anaeroben Schlammstabilisierung, auch in kleinen bzw. mittleren Anlagen. Die diesbezüglich erforderliche Datenlage ist bundesweit derzeit nicht verfügbar und müsste aus Landesstatistiken abgeleitet werden. Weitere Effekte könnten gegebenenfalls aus Maßnahmen zur Effizienzsteigerung im Bereich der Vergärung u.a. durch Integration einer Schlammdesintegration erzielt werden, allerdings verbunden mit einer weiteren Heizwertminderung der verbleibenden Rückstände.

Hinsichtlich der Klärgasnutzung ist nach DWA (2015) für 2013 davon auszugehen, dass knapp 80 % als Eigenversorgung der Kläranlagen im KWK-Betrieb, ca. 10 % als Eigenversorgung mit reiner Wärmeproduktion, ca. 5,5 % als Verluste (Fackel) und ca. 4,5 % als Abgabemengen an EVU ausgewiesen sind.

³¹ Hier Veränderungen im Heizwert: aerob-thermophile Stabilisierung 9 MJ/kg TS; anaerobe Stabilisierung 7 MJ/kg TS

³² Für 2030 gehen Fritsche et al. von fast 70 % aus; allerdings wird zusätzlich ein „Biogas-Kompost“-Pfad von über 30 % angenommen, dessen Umsetzbarkeit derzeit wenig wahrscheinlich ist. Die Nutzungspfade teilen sich im Jahr 2012 für die 1,85 Mio. t TS nach DWA (2015) wie folgt auf: ca. 55 % thermisch, ca. 29 % Landwirtschaft, ca. 13 % Landschaftsbau und ca. 3 % sonstiges (z.B. Vererdung)

³³ Während die Klärschlammfaulung in der Vergangenheit aus wirtschaftlichen Gründen erst bei größeren Anschlusswerten (>30.000 EW) als sinnvoll erachtet wurde, zeigen aktuelle Beispiele, dass eine Umstellung auf eine anaerobe Stabilisierung auch bei kleineren und mittleren Kläranlagen (>10.000 EW) möglich ist. Quelle: DWA Themen T1/2015 – Schlammfaulung oder gemeinsame aerobe Stabilisierung bei Kläranlagen kleiner und mittlerer Größe (BWA 2015)

Tabelle 16: Bewertung der Potenzialangaben für Klärschlamm/-gas

Kriterien	Bemerkungen
Stoffstrom	Im Hinblick auf den hier thematisierten Klärschlamm aus öffentlichen Anlagen sind aufgrund der Art der Datenerhebung Grauzonen bzw. Überschneidungen zu industriellen Schlämmen nicht auszuschließen. Die Angaben zu Klärgasmengen basieren statistisch auf jährlichen Erhebungen, ohne daraus eine exakte Zahl der Anlagen mit Klärgasgewinnung ableiten zu können. Im Rahmen der Potenzialstudien erfolgen beim Klärgas teilweise Kennziffer-basierte Hochrechnungen (oTS, spez. Gasertrag).
Datenqualität	Die Potenzialstudien gingen teilweise von falschen Einschätzungen hinsichtlich der Entwicklung und Berechnung von Klärschlamm/-gasmengen aus, so dass hier Korrekturen vorzunehmen wären. Zudem wird bei einer integrierten Betrachtung der Klärgas-/Klärschlammthematik das Wechselspiel im Bereich der Heizwerte nicht immer deutlich. Für die IST-Situation gibt es unter zusätzlicher Berücksichtigung der Landesstatistiken einen hinreichen Fundus an Basisdaten. Dies schließt auch die Entwicklung der Klärschlammqualitäten ein.
Aktualität	Die Angaben von Fritsche et al. (2004) sind für den Klärschlamm/-gasbereich überholt. Dehoust et al. (2010) beziehen sich auf 2008. Die Potenzialangaben für Klärgas bewegen sich noch in einem plausiblen Bereich. DWA (2015) liefert belastbare Zahlen für die IST-Situation im Jahr 2013, ohne jedoch auf weitere Potenziale einzugehen.
Basisjahr/ Zeithorizont	Lediglich Fritsche et al. (2004) modellieren hier einen Zeithorizont bis 2030, mit derzeit allerdings nicht mehr plausiblen Ansätzen.
Restriktionen	Als Potenzial-beeinflussende Effekte wurden insbesondere folgende Punkte thematisiert: • Bevölkerungsentwicklung / Anschlussgrad • Technische Veränderungen (Effizienzsteigerungen bei der Stabilisierung, Desintegration, Ausbau anaerobe Stabilisierung, P-Ausschleusung) • Gesetzliche Veränderungen im Sinne einer signifikanten Reduktion der direkten landwirtschaftlichen Verwertung. Die zukünftig relevante P-Ausschleusung (aus Abwasser, Schlamm, oder Asche) wird zwar als Faktor benannt, wurde jedoch bislang nicht in einer konkreten Form bei der Potenzialbildung berücksichtigt.
Nutzungskonkurrenzen	Die Potenzialstudien gehen in der Regel von einem Rückgang der direkten landwirtschaftlichen Verwertung zugunsten der energetischen Verwertung aus. Dieser Ansatz wird durch die aktuelle Novelle der Klärschlammverordnung (2017) gestärkt, wonach nur noch Anlagen < 50.000 EW von einer Beendigung der direkten Klärschlammdüngung ausgeschlossen sind (Übergangsfristen von 12 bis 15 Jahre).
Bereits genutzte Anteile	Im Regelfall werden in den untersuchten Studien Gesamtpotenziale ausgewiesen. Die aktuellen Verwertungswege sind auf der Basis von Destatis-Angaben gegenüberzustellen.

Zusammenstellung: IZES

3.1.5.4 Sonstige Fraktionen im Siedlungsbereich

Unter dieser Rubrik werden Stoffströme grob thematisiert, die entweder mittel- bis langfristig kaum relevant sind, oder eine hoch unsichere Datenlage aufweisen (auch im Hinblick auf aktuelle Nutzungspfade).

Der organische Anteil im Restmüll wird hier nicht ausgewiesen, da er auch in den untersuchten Potenzialstudien nicht als solcher thematisiert wird. Eine indirekte Berücksichtigung erfolgt durch höhere Erfassungsanteile z.B. von Biogut und Holz in den jeweiligen Stoffstrom-Betrachtungen. Sonstige biogene Anteile des Mischmülls wie z.B. Papier, Textilien und Leder werden nicht berücksichtigt (siehe hierzu auch die Parameterlisten zur Charakterisierung der Abfall- und Reststoffe in Anhang A).

Tabelle 17: Bewertung der Potenzialangaben für sonstige Fraktionen

Kriterien	Bemerkungen	Potenzialansatz
Deponiegas	Die Deponiegaspotenziale werden aufgrund des Ausstiegs aus der Deponierung biogener Abfallanteile seit Mitte 2005 – größtenteils Szenarien-unabhängig - signifikant rückläufig modelliert. Fritsche et al. (2004) gehen hier auf der Grundlage einschlägiger Gasprognosemodelle für 2020 noch von 3,7 PJ und für 2030 von 0,9 PJ aus, argumentieren jedoch auch, dass „die Phase der Gasnutzung 2016 bis 2019 beendet sein wird, da dann nur noch Schwachgase dem Deponiekörper entzogen werden können“. Dehoust et al. (2005) gehen im Rahmen ihrer THG-Modellierungen davon aus, dass 2020 kein Methan mehr aus Deponien emittiert, weisen jedoch auf die Theorielastigkeit dieses Ansatzes hin. Gleichwohl ist bekannt, dass in 2016 noch einige Deponiegas-BHKW im kleineren und mittleren Leistungsbereich (z.B. Ahaus-Alstätt 130 kW, Karlsruhe 600 kW; teilweise mit alternativen Brennstoffen) in Betrieb gesetzt wurden.	2020: 3,7 PJ 2030: 0,9 PJ
Textilien	Textilien werden trotz ihrer biogenen Anteile (Naturfasern) in der Regel bei Potenzialanalysen nicht betrachtet. Nach IFEU et al. (2016) ist in Deutschland auf der Basis von bvse-Daten (Inlandsverfügbarkeit an Alttextilien) für 2007 von einem Aufkommen an Alttextilien von ca. 1,1 Mio. t auszugehen. Ca. 1/3 davon wird nicht separat erfasst und landet im Siedlungsmischmüll. Die restlichen 2/3 werden als Second-hand-Ware, Putzlappen, Sekundärrohstoff oder Energieträger verwertet. Die Anteile der energetischen Verwertung bzw. Entsorgung liegen bei jeweils 10 %. Im Hinblick auf die Naturfasern (vorrangig Baumwolle) liegen die Anteile an der weltweiten Produktion bei ca. 30 %, an der Produktion in Deutschland bei 9 %. Wird von einem biogenen Anteil von 25 % und einem energetischen Nutzungsanteil von 20 % an den separat erfassten Mengen ausgegangen, lässt sich daraus ein Mengenansatz von ca. 37.000 t für die Energieerzeugung ableiten. DBFZ (2015) nennt ein Potenzial an Alttextilien von 100.000 t, ohne jedoch auf biogene Anteile einzugehen.	37.000 – 100.000 t
Küchen- und Kantinenabfälle	Insbesondere bei den Abfällen, die über die öffentliche Hand erfasst werden sind Überschneidungen mit den Bioabfällen nicht auszuschließen. DBFZ (2015) nennt hier Mengenansätze für ‚Küchen- und Kantinenabfälle‘ die durch die kommunale Abfallentsorgung erfasst werden (688.000 t) und ‚gewerbliche Speisereste‘ die nicht durch die kommunale Entsorgung erfasst werden (ca. 1,8 Mio. t). Das Witzenhausen-Institut (2010) beschreibt eine Menge an Küchen- und Kantinenabfällen von 500.000 – 600.000 t/a sowie ein Reststoffaufkommen aus der Lebensmittelverarbeitung von ca. 1,3 Mio. t.	500.000 – 688.000 t
Marktabfälle	Marktabfälle werden von DBFZ (2015) und Witzenhausen-Institut (2010) mit 70.000 t bzw. 87.600 t in einer ähnlichen Größenordnung eingeschätzt. Die Anteile nicht biogenen Ursprungs (z.B. in Verpackungen) werden nicht ausgewiesen.	70.000 – 87.600 t
Altöle/-fette	Die Auswertung von DBFZ (2015) und Witzenhausen (2010) ergibt hier eine recht heterogene Datenlage. DBFZ nennt bei ‚Altspeiseölen, die nicht durch eine kommunale Entsorgung (Erfassung über separate Behälter im Rahmen privatwirtschaftlicher Aktivitäten) erfasst werden‘ eine Potenzial-Bandbreite von 43.900 – 400.000 t während das Witzenhausen-Institut für ‚Speiseöle und -Fette‘ das Mengenaufkommen mit 33.500 t beziffert. Bei den Fettabscheiderinhalten kommt das DBFZ dagegen lediglich auf 1.300 t, während das Witzenhausen-Institut 428.500 t nennt.	45.000 – 460.000 t

Zusammenstellung: IZES

3.1.6 Potenziale aus industriellen biogenen Abfällen

In diesem Abschnitt erfolgt eine vertiefende Betrachtung der Verwertungswege industrieller Abfälle. Hierbei werden Materialien aus Groß- und Einzelhandel, Agrar- und Ernährungsindustrie sowie die Fischwirtschaft und Aquakulturindustrie betrachtet. Dazu zählen die folgenden Stoffgruppen:

- ▶ Rückstände aus der Fleischverarbeitung und Tierkörperbeseitigung (Schlachtabfälle, Knochenmehl, Tierfette, Tiermehl)
- ▶ Rückstände aus der Lebens- und Genussmittelindustrie (Trester aus der Getränkeherstellung, Schlempen und Molke, Pressrückstände der Ölgewinnung, Rückstände aus Brauereien)
- ▶ Rückstände aus der Wasserwirtschaft (Fettabscheiderinhalte, Klärschlämme, sonstige Kläranlagenabfälle)

3.1.6.1 Rückstände aus der Fleischverarbeitung und Tierkörperbeseitigung

Schlachthöfe/Fleischverarbeitung

In Deutschland werden die Schlachtnebenprodukte weitgehend stofflich (z. B. Lederproduktion), als Futtermittel (z. B. Tiermehl) oder in der Lebensmittelindustrie (z. B. Tierfette) verwertet. Tiermehle und -fette werden außerdem zunehmend in der Oleochemie, in Zementwerken und in der Düngemittelherstellung eingesetzt. Zusätzlich erfolgt z. T. auch eine thermische Verwertung insbesondere der Tierfette und -öle, die aus Hygienegründen einer höherwertigen Nutzung (z.B. Tierfutter) nicht zugeführt werden dürfen. Auch die Produktion von Methylester aus derartigen tierischen Ölen und Fetten ist möglich; in Deutschland ist aber der Einsatz dieses Flüssigenergieträgers als Biokraftstoff seit 2012 nicht mehr zulässig (Kaltschmitt et al. 2016).

Gaida et al. (2013) beschreiben die Verwertungswege der Schlachtnebenprodukte als gut etabliert. Die Borsten und die Haut der Tiere sind für die weiterverarbeitende Industrie (z.B. Leder) ein wertvoller Rohstoff. Die übrigen Reststoffe werden in einem weiteren Verarbeitungsprozess zu protein- und fettbasierten Produkten verarbeitet, die in unterschiedlicher Weise weiterverwendet werden können. Die proteinbasierten Produkte aus den Reststoffen der Kategorie 3 können Schweinemehl, Geflügelfleischmehl, Federnmehl oder Blutmehl sein und werden hauptsächlich als Futtermittel eingesetzt. Eine Verwendung als Düngemittel ist ebenfalls gängig. In geringen Teilen werden die Kat. 3-proteinbasierten Produkte auch zur Energiegewinnung thermisch verwertet. Die fettbasierten Produkte aus den Reststoffen der Kategorie 3 können Tierfette (inkl. Knochenfett, Geflügelfett) und Lebensmittelfette sein und werden hauptsächlich technisch in der Oleochemie verwendet. Eine Verwendung als Futtermittel oder Biodiesel ist ebenso üblich. Die Lebensmittelfette, die noch als genusstauglich klassifiziert werden, können auch in der Lebensmittelindustrie wiederverwendet werden. Gaida et al. (2013) sehen jedoch nur bedingt, dass Reststoffmengen, die generell für eine alternative, höherwertige Verwertung zur Verfügung stehen („umsteuerbare“ Kapazitäten), vorhanden sind. Sie bewerten die derzeitigen Verwertungen als bereits optimiert.

Tierische Nebenprodukte: Definition, Verwendung und Beseitigung

Tierische Nebenprodukte (TNP) sind Materialien tierischen Ursprungs, die nicht für den menschlichen Verzehr bestimmt sind. Dazu gehören z. B. Fleischabfälle, Schafwolle, Felle, Lebensmittelabfälle, Tierkadaver, spezifiziertes Risikomaterial, Gülle, Küchen- und Speiseabfälle. Der Umgang mit TNP ist von der Entstehung des Materials bis zur Beseitigung in den Hygienevorschriften für diese Stoffgruppe umfassend auf EU Ebene geregelt.³⁴ Die Leitgedanken der Hygienevorschriften umfassen den Schutz der

³⁴ Verordnung (EG) Nr. 1069/2009 und Verordnung (EU) Nr. 142/2011

Gesundheit von Mensch und Tier, den Schutz der Umwelt sowie den Schutz der Sicherheit der Lebensmittel- und Futtermittelkette. Entsprechend ihres Gefahrenpotentials werden TNP in folgende drei verschiedene Kategorien eingeteilt – vergl. die folgende Tabelle.

Tabelle 18: Einteilung der tierischen Nebenprodukte in Abhängigkeit des Gefahrenpotenzials

Kategorie	Beispielhafte Stoffströme	Behandlung, Verwendung
Kategorie 1 Material mit einem hohen Risiko	• spezifiziertes Risikomaterial, verdächtiges Material, • Küchenabfälle von international eingesetzten Verkehrsmitteln	kann grundsätzlich verbrannt oder als Biodiesel verwendet werden mit oder ohne Vorbehandlung
Kategorie 2 Material mit einem mittleren Risiko	• Tierkadaver (Tiere, die auf anderem Wege zu Tode kamen als durch Schlachtung oder Tötung zum menschlichen Verzehr, einschließlich Tieren, die zum Zweck der Seuchenbekämpfung getötet werden) • Gülle	kann verbrannt, teilweise in Biogas- oder Kompostierungsanlagen oder zur Herstellung von organischen Düngemitteln verwendet werden
Kategorie 3 Material mit einem geringen Risiko	• Schlachtkörperteile und Teile von gusstauglichen Tieren, Teile von (lebenden) Tieren (z.B. Schafwolle, Rohmilch, Federn, Felle) • Lebensmittelabfälle	Wie 1 und 2 sowie zur Herstellung von Futtermittelausgangsstoffen oder Heimtierfuttermitteln

Quellen:

BMEL: <https://www.bmel.de/DE/Tier/Tiergesundheit/TierischeNebenprodukte/texte/TierischeNebenprodukte.html?not-First=true&docId=4022728#doc4022728body>

STMUV: http://www.stmuv.bayern.de/themen/lebensmittel/allg_lebensmittel/tierische_nebenprodukte/index.htm

Zusammenstellung: Öko-Institut

Alle Betriebe, die mit TNP umgehen,³⁵ benötigen eine behördliche Zulassung oder Registrierung und werden von der zuständigen Behörde regelmäßig und risikoorientiert überwacht. Auf jeder Stufe der Behandlung müssen TNP stets getrennt von Lebensmitteln gehalten werden sowie eindeutig gekennzeichnet und identifizierbar sein; jeder Transport von TNP muss von einem Handelspapier begleitet sein, das die wesentlichen Angaben zur Herkunft, zur Art, zur Menge des Materials, zum Transporteur und zum Bestimmungsort enthält. Darüber hinaus hat jeder Betrieb für TNP entsprechende Aufzeichnungen zum Warenverkehr und zu den jeweiligen Tätigkeiten zu führen; so wird die Rückverfolgbarkeit sichergestellt.

Verarbeitung tierischer Nebenprodukte und deren Mengen

Im Jahr 2016 verarbeiteten laut Servicegesellschaft Tierische Nebenprodukte (STN) und Verband Verarbeitungsbetriebe Tierischer Nebenprodukte (VVTN) 34 Unternehmen in 56 Verarbeitungslinien etwas mehr als 3 Mio. Tonnen tierische Nebenprodukte. Zur Darstellung der Mengengerüste werden Verbandszahlen³⁶ herangezogen.

³⁵ Sammlung, den Transport, Lagerung, Verarbeitung, Verbrennung oder Mitverbrennung, Verwendung als Brennstoff, Herstellung von Heimtierfutter, Umwandlung zu Biogas oder Kompost, Herstellung organischer Düngemittel, Handhabung, Handel, Vertrieb, Verwendung und Beseitigung

³⁶ http://www.stn-vvtn.de/fakten_zahlen.php

Rohmaterial

In Deutschland wurden im Jahr 2014 8,2 Mio. Tonnen Fleisch erzeugt (Stat. Bundesamt 2015).³⁷ Bei Schlachtung, Zerlegung und Fleischverarbeitung fallen nach Angaben des Verbands Verarbeitungs- betriebe Tierischer Nebenprodukte etwa 2,6 Mio. Tonnen Schlachtnebenprodukte aus Schlacht- und Zer- legebetrieben an. Hinzu kommen rund 425.000 Tonnen sog. gefallener Tiere aus der landwirtschaftli- chen Nutztierhaltung sowie TNP aus Abfällen der Lebensmittelverarbeitung. Das ergibt zusammen ein Rohmaterialaufkommen von rund 3 Mio. Tonnen TNP.

Tabelle 19: Rohmaterial 2016 gem. Verordnung (EG) Nr. 1069 / 2009

Kategorie	2016 in Tonnen (t)
Material der Kategorie-1	923.133
Material der Kategorie-2 (ohne Gülle)	152.999
Summe der Kategorie 1 + 2	1.076.132
davon Tierkörper (gefallene Tiere)	424.613
Material der Kategorie-3	1.811.352
Abfälle aus der Lebensmittelverarbeitung	191.779
Gesamt:	3.079.263

Quelle: STN/VVTN (2018)

Zusammenstellung: Öko-Institut

Erzeugnisse und deren Verwendung

Insgesamt werden aus den 3 Mio. t Rohprodukten etwa 1,3 Mio. t Erzeugnisse durch die Tierkörper- verwertungsanlagen und andere Unternehmen hergestellt. Der Massenverlust ist vor allem durch Wasserverluste zu erklären.

In der Verwendung der Erzeugnisse überwiegen die stofflichen Nutzungen, lediglich 24 % werden energetisch genutzt, nämlich für die Herstellung von Biodiesel aus Tierfetten sowie die Verbrennung (hier v.a. Tiermehle). Über die aktuelle Vergärung von Resten in Biogasanlagen geben die Verbands- zahlen des STN keine weitere Auskunft, ebenso gehen der Fachverband Biogas und der DVGW nicht darauf ein.³⁸ Mittlerweile wird wieder vermehrte stoffliche Nutzung in Erwägung gezogen (Diskussion auf EU Ebene), um Protein zu nutzen, d.h. wenigstens ist zukünftig eine verstärkte stoffliche Nutzung eines Teilstroms erwartbar – und nicht die verstärkte energetische Nutzung.

³⁷ Statistisches Bundesamt, Pressemitteilung vom 11.02.2015 „Fleischproduktion in Deutschland im Jahr 2014 auf neuem Höchst- stand“, download (18.05.2018): https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilun- gen/2015/02/PD15_044_413pdf.pdf?__blob=publicationFile

³⁸ <https://www.dvgw.de/index.php?eID=dumpFile&t=f&f=2179&token=bcbcd000065dae2cf2cb9a62c3d00fdf8f4496d>

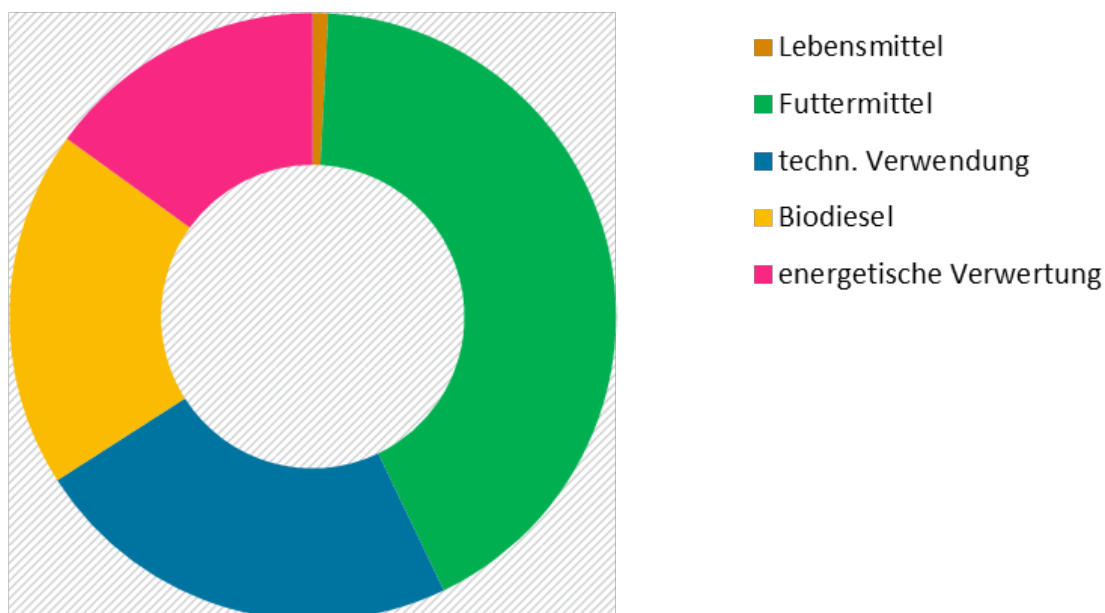
Tabelle 20: Verwendung der Erzeugnisse aus tierischen Nebenprodukten

2016 in [t]	Lebensmittel	Futtermittel	Technische Verwendung	Bio-diesel	Thermische Verwertung	Eigenverwertung	Verbrennung
Proteine Kat.-1					200.011		
Proteine Kat.-2			33.480				
Proteine Kat.-3 / Lebensmittelabfälle	78	429.143	91.517				
Tierfette aus Kat.-1			3.864	105.779	625	456	
Tierfette aus Kat.-2				18.003			
Tierfette aus Kat.-3		63.962	151.624	103.861	71		
Lebensmittelabfälle	10.700	60.050	27.717	21.891			
Summe	10.778	553.155	308.202	249.534	200.707	456	0
Summe über alles	1.322.832						

Quelle: STN/VVTN (2018)

Zusammenstellung: Öko-Institut

Für die Verwertung von Material der Kategorie 3 (Nebenprodukte aus Schlachtbetrieben, Lebensmittel, Küchen und Speiseabfälle) sind 1.100 Anlagen zugelassen bzw. registriert (BMELV, 2013 in DBFZ Erfahrungsbericht 2015).

Abbildung 15: Verwendung der Erzeugnisse aus tierischen Nebenprodukten

Quelle: eigene Darstellung Öko-Institut nach Zahlen von STN/VVTN (2018)

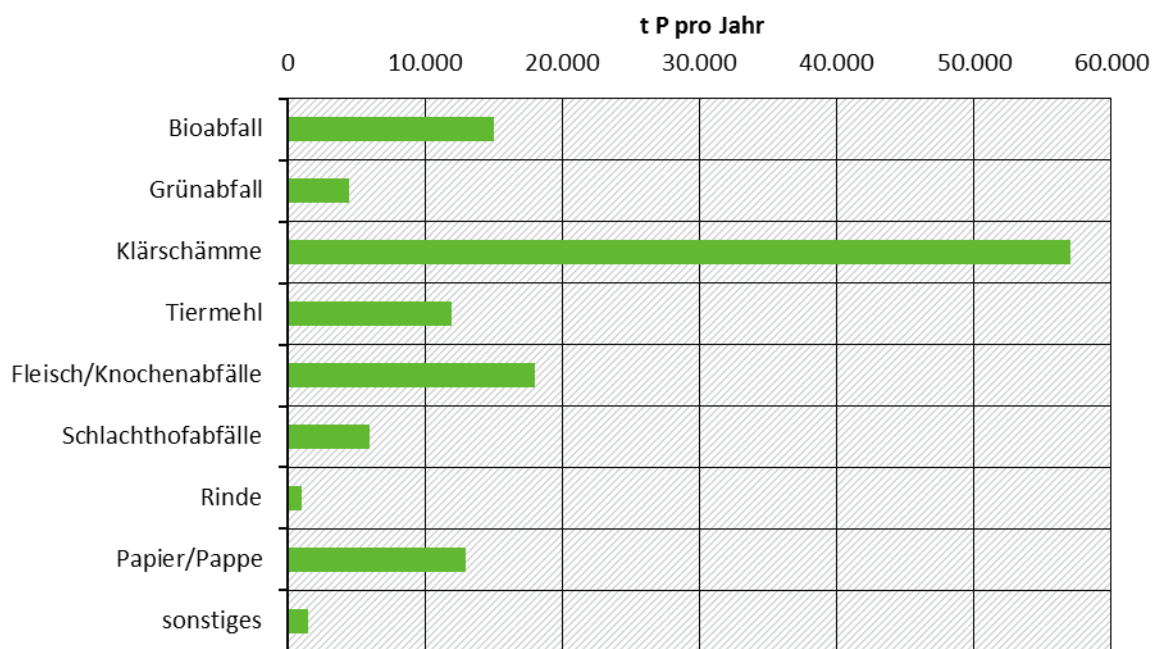
Optionen stoffliche Nutzung

Phosphorrückgewinnung

Da es innerhalb der EU keine nennenswerten Phosphorlagerstätten gibt und der Phosphorabbau mit verschiedenen Umweltproblemen (Kontaminationen verschiedener Art, Wasserverbrauch und -verschmutzung, Tagebau etc.) vergesellschaftet ist,³⁹ wird eine gezielte Nutzung von sekundären Phosphorquellen angestrebt. Nach Klärschlämmen bilden tierische Nebenprodukte die zweitgrößte sekundären Quellen.⁴⁰ Effiziente Recyclingverfahren und eine verbesserte Verteilung von Wirtschaftsdünger können dazu beitragen, dass der Einsatz von Rohphosphaten zur Herstellung von Düngemitteln eingeschränkt wird. Im Deutschen Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess 2012) ist Phosphor als relevanter Stoffstrom erwähnt und es wird bereits an einer Phosphorstrategie gearbeitet.

Tierische Nebenprodukte sind geeignete Stoffe zur Phosphorrückgewinnung. Für eine konzentrierte Rückgewinnung kommen sowohl Tier- und Fleischknochenmehle in Frage wie auch die Gärreste von TNP.

Abbildung 16: Phosphorpotential in verschiedenen organischen Reststoffen in Deutschland



Eigene Darstellung Öko-Institut; Quelle: Fricke und Bidlingmaier (2003), zitiert in SEG (2014)

Aus den Gärresten kann das Phosphat chemisch gefällt werden, aus den Aschen von Tiermehlen lässt es sich durch chemischen Aufschluss gewinnen. Viele Verfahren befinden sich noch in der Entwicklung und sind wegen der hohen Kosten bisher nicht in der praktischen Anwendung. Aufgrund der stark gestiegenen Preise für Phosphaterze geht das LfU Bayern jedoch davon aus, dass sich die Entwicklung

³⁹ Vergleiche z.B. http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Abfallwirtschaft/klaerschlammp_hosphor_konsultative_mitteilung_bf.pdf

⁴⁰ Von Bayerischen Zahlen auf Gesamtdeutschland geschlossen – vergleiche: https://www.lfu.bayern.de/abfall/klaerschlammp_hosphor_recycling/index.htm

der Recyclingverfahren beschleunigen wird und die Verfahren zunehmend wirtschaftlich konkurrenzfähig werden.⁴¹ Am aussichtsreichsten sind demnach Verfahren, die auf der Phosphorrückgewinnung aus Schlammwässern und Aschen aus einer Monoverbrennung basieren.

Derzeit findet zumeist keine Trennung von Material der Kategorien 1 und 2 statt, weshalb ein großer Teil dieser Materialien einfach verbrannt wird. Einer Phosphorrückgewinnung steht dies nicht im Wege, da diese ja lediglich auf die Aschen der verbrannten Tiermehle zugreift. Im Fall einer wieder stärkeren Verwendung der Tiermehle als Futtermittel würde sich der Stoffstrom zur Phosphatrückgewinnung entsprechend verkleinern, da der verbrannte Anteil kleiner würde.

Aktuell hat die Phosphorgewinnung aus den Aschen keine Bedeutung. Das könnte sich mit einer optimierten Stoffpolitik jedoch zukünftig verändern.

Nutzung der Proteine - Verwendung als Futtermittel

Bis zum Höhepunkt der BSE Krise Mitte der 1990er Jahre wurden Tiermehle an Nutztiere verfüttert und galten als ressourcenschonende Eiweißgrundlage. 1994 wurde dann zunächst ein Verfütterungsverbot an Wiederkäuer in der EU verhängt. Im Jahr 2001 wurde dies verschärft und damit war die Verfütterung von Tiermehl für Nutztiere (die Lebensmittel liefern) generell verboten (EU-Verordnung Nr. 999/2001). Über eine Lockerung des Verfütterungsverbotes wird seit 2010 in Europa diskutiert, da man bei der Fütterung von omnivoren Nutztieren (Allesfressern) bei der Versorgung mit hochwertigem Protein an seine Grenzen stieß. Die durch das Verfütterungsverbot entstandene Eiweißlücke wird durch Importe aus Drittländern gedeckt (v.a. Soja).

Seit dem 1. Juni 2013 ist der Einsatz von verarbeitetem tierischem Protein in Aquakulturen wieder erlaubt (EU-Verordnung Nr. 56/2013). Laut Niedersächsischem Landesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (LaVeS) sind weitere Lockerungen für Geflügel und Schweine vorgesehen. Die Intra-Spezies Verfütterung (Kannibalismus) und Wiederkäuer Protein bleiben jedoch tabu. Die Rücknahme der Restriktionen war und ist nur unter der Voraussetzung möglich, dass zuverlässige Nachweisverfahren für die verbotenen Stoffe verfügbar sind.

In der Futtermittelstatistik wird die Verwendung von verarbeiteten tierischen Proteinen seit dem Jahr 2009 nur noch unter „sonstiges“ geführt, gleiches gilt für Maniokprodukte. Aus diesem Grund liegen über den genauen Einsatz von TNP in der Futtermittelindustrie keine transparenten Angaben mehr vor und entsprechend sind keine differenzierten Schlüsse möglich.

Grundsätzlich müssen Futtermittel und Lebensmittel sicher sein, damit sich keine BSE-Krise oder vergleichbare Ereignisse aufgrund von verfütterten TNP wiederholen. Daher sind vom Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR) Grundsätze für deren Verwendung aufgestellt worden (Zagon, Schafft 2014). Diese umfassen u.a. qualitative Aspekte als auch solche von Akzeptanz und der Schließung von Stoffkreisläufen:

- ▶ Keinen negativen Einfluss auf
 - stoffliche Qualität der Futtermittel
 - Qualität der Lebensmittel tierischen Ursprungs
- ▶ Akzeptanz der Verwendung

⁴¹ https://www.lfu.bayern.de/abfall/klaerschlammp/phosphor_recycling/index.htm und [https://www.bestellen.bayern.de/application/eshop_app000004?SID=1065826902&ACTIONxSESSxSHOWPIC\(BILDxKEY:%27lfu_abfall_00184%27,BILDxCLASS:%27Artikel%27,BILDxTYPE:%27PDF%27\)](https://www.bestellen.bayern.de/application/eshop_app000004?SID=1065826902&ACTIONxSESSxSHOWPIC(BILDxKEY:%27lfu_abfall_00184%27,BILDxCLASS:%27Artikel%27,BILDxTYPE:%27PDF%27))

- seitens der Landwirte
- seitens der Verbraucher
- Recyclingstrategie – Ressourcenschonung – Kreislaufwirtschaft
- Artgerechtigkeit der Verwendung von tierischen Nebenprodukten
- Vertrauen
- Kosten

Zusammenfassend kann davon ausgegangen werden, dass langfristig die stoffliche Nutzung von TNP (wieder) zunehmen wird und das Maximum der energetischen Nutzung damit erreicht bzw. überschritten ist. Gründe hierfür sind die Diskussion um die Sicherung der Eiweißversorgung der Nutztiere in der EU sowie die fortschreitende technische Entwicklung zuverlässiger Nachweisverfahren für verbotene Stoffe in den Futtermitteln. Eine Aussage über die zukünftigen Mengenströme und Verwendungen ist aber aus heutiger Sicht nicht möglich. Für die Abschätzung von Potenzialen wird daher auf die Studie von Fritsche et al. (2004) zurückgegriffen. Hier wurde auf Basis der Aufkommensdaten ein Potenzial für Tiermehl, Tierfett und Fleischbrei modelliert. Dafür wurde das Aufkommen anhand des Gesamtverbrauchs sowie dessen zukünftig erwartbarer Entwicklung von Rind-, Kalb-, Schwein- und Geflügelfleisch abgeschätzt. Das Aufkommen entwickelt sich wie in Tabelle 21 zusammengestellt.

Für die Ableitung des Potenzials wird davon ausgegangen, dass Tiermehl zu 75 % für die energetische Nutzung zur Verfügung steht (Fritsche et al. 2004). Dies liegt u.a. daran, dass ein Fütterungsverbot besteht. Tierfett wird auch zu großen Anteilen in der chemischen Industrie 50 % genutzt. Nach Fritsche et al. (2004) ist diese Art der stofflichen Nutzung u.a. aufgrund der Verwertungsmöglichkeiten eingeschränkt. Eine weitere Ausweitung der stofflichen Nutzung wird nicht unterstellt.

Tabelle 21: Künftige Entwicklung des Aufkommens Tiermehl, Tierfett und Fleischbrei (in 1.000 t)

Reststoff	2000	2010	2020	2030
Tiermehl	670	680	684	674
Tierfett	309	314	316	311
Fleischbrei	1.803	1.831	1.842	1.816

Zusammenstellung: Öko-Institut; Quelle: Fritsche et al. (2004)

Für die Potenziale wird daher angenommen, dass 50 % des Tierfettaufkommens für die energetische Nutzung zur Verfügung stehen. Fleischbrei hat einen Wassergehalt von 60-70 % und wird zur Herstellung des fast wasserfreien Tiermehls getrocknet. Dies ist ein energieintensiver Prozess. Die Kessel zur Erzeugung des Dampfes werden mit Gas, Heizöl, elektrischem Strom oder durch die Verbrennung von selbsterzeugtem Fett betrieben. Da die Verwendung von Fett als Futtermittelbestandteil seit dem 1. Dezember 2000 untersagt ist, ist für viele Tierkörperbeseitigungsanlagen der Einsatz als Brennstoff wirtschaftlich attraktiv. Für das Potenzial aus Fleischbrei wird eine Menge von 12 % angenommen, die für die energetische Nutzung zur Verfügung steht (Fritsche et al. 2004).

Tabelle 22: Energetische Potenziale Tiermehl, Tierfett und Fleischbrei (in 1.000 t)

Reststoff	2000	2010	2020	2030
Tiermehl	503	510	513	505
Tierfett	154	157	158	155
Fleischbrei	216	219	221	217

Zusammenstellung: Öko-Institut Quelle: Fritsche et al. (2004)

Tabelle 23: Bewertung Potenzial Tiermehl, Tierfett und Fleischbrei

Kriterium	Bemerkungen
Stoffstrom	Daten beziehen sich auf das Aufkommen an Rohmaterial, d.h. Tierkörper und Tierkörper- teile. Dieses Aufkommen wird anhand des Verbrauches an Fleisch abgeschätzt und bein- hält den Nahrungsmittel- und Futterbedarf, die industrielle Verwertung und die Ver- luste. Tierische Nebenprodukte (TNP) sind nicht zum menschlichen Verzehr bestimmt. Ent- sprechende Hygienevorschriften regeln das mögliche Gefahrenpotenzial.
Datenqualität	Die ausgewerteten Studien gehen davon aus, dass sich die Produktionsverfahren zur Her- stellung von Tierfett, Tiermehl und Fleischbrei in den kommenden Jahren nicht ändern werden. Die Verwertungswege sind etabliert. Daher werden keine großen Schwankungen erwartet.
Aktualität	Die Mengenangaben beziehen sich auf Destatis 2015. In der Verwendung überwiegt die stoffliche Nutzung, lediglich 24% werden energetisch genutzt. Langfristig wird von einem Anstieg der stofflichen Nutzung ausgegangen, wobei das Maximum der energetischen Nutzung erreicht bzw. bereits überschritten ist. Die Daten von Fritsche et al. 2004 bezie- hen sich auf das Basisjahr 2000.
Basisjahr/ Zeithori- zont	Auf Basis aktueller Literatur konnten keine neueren Potenziale bzw. Potenzialberechnun- gen identifiziert werden. Damit bleibt Fritsche et al. die einzige Veröffentlichung, die Po- tenzialdaten für Tiermehl, Tierfett und Fleischbrei enthält. Bei Fritsche et al. (2004) wer- den Potenziale bis 2030 angenommen.
Restriktionen	Die Entwicklung des Fleischkonsums wurde berücksichtigt, ebenso wie Hygieneanforde- rungen und Verfütterungsverbot von Tiermehl. Ebenso wird angenommen, dass beste- hende Verwertungswege die Potenziale bereits optimal ausnutzen.
Nutzungskonkurren- zen	Konkurrenz besteht bei Tierfett durch den möglichen Einsatz in der chemischen Industrie. Fleischbrei kann alternativ zu Tierfett als Ko-Substrat in Biogasanlagen eingesetzt werden. Es wird daher in den Potenzialen ergänzend aufgeführt.
Bereits genutzte An- teile	Bereits genutzte Anteile werden berücksichtigt.

Zusammenstellung: Öko-Institut

3.1.6.2 Rückstände aus der Lebens- und Genussmittelindustrie

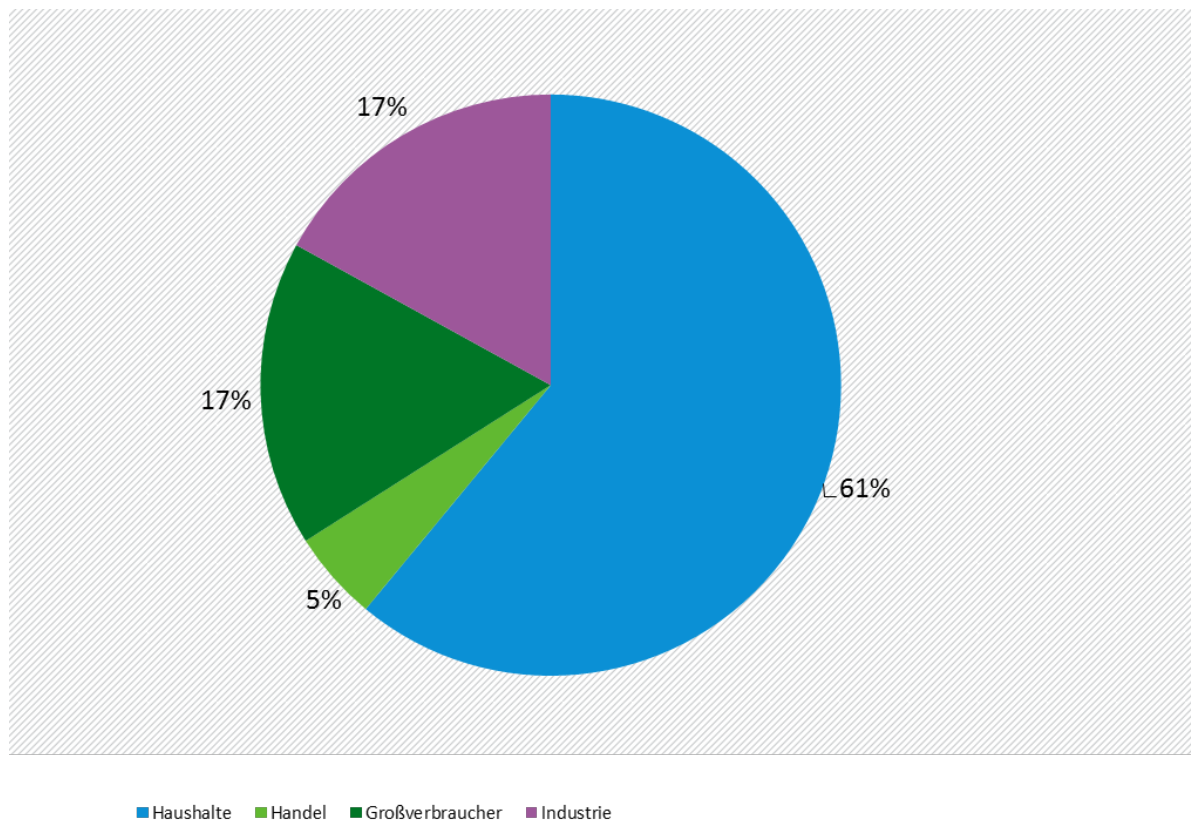
Daten der biogenen Reststoffströme aus dem Industriesektor, respektive der Nahrungsmittelerzeu-
gung basieren überwiegend auf Sekundärdaten. Offizielle Statistiken zu Reststoffströmen aus der In-
dustrie existieren nicht. Auf Basis von Umfragedaten können so – zumindest schematisch – Stoff-
stromdarstellungen für einzelne Reststoffe durchgeführt werden. Ziel ist es, den Stand der Verwertung
von biogenen Reststoffen aus dem Industriesektor der lebensmittelverarbeitenden Betriebe aufzuzei-
gen und mögliche Potentiale zur energetischen Nutzung dieser Reststoffe beispielhaft darzustellen.

Generell ist die Wegwerfrate bei Lebensmitteln hoch. Nach Angaben der FAO (2011) werden jährlich ca. ein Drittel aller für den Verzehr bestimmten Lebensmittel weggeworfen. Kranert et al. (2012) untersuchten die Mengen für Deutschland. Als Lebensmittelabfälle gelten hier Reste aus der landwirtschaftlichen Produktion, aus der (Weiter-)Verarbeitung von Lebensmitteln, aus dem Groß- und Einzelhandel, aus Küchen von Großverbrauchern sowie aus Privathaushalten. Des Weiteren zählen dazu noch rohe und verarbeitete Lebensmittel, welche genusstauglich wären. Potenziale aus Privathaushalten wurden bereits in Kapitel 3.1.5. diskutiert. Kranert et al. (2012) weisen darauf hin, dass besonders bei Industrie und Handel großen Datenlücken existieren, uneinheitliche Definitionen Verwendung finden und auch oft unterschiedliche Messsysteme die Erfassung der Zahlen erschweren. Daher liefert auch diese Studie nur Schätzwerte. Für die Menge der Lebensmittelabfälle in der Industrie ergibt sich danach eine Spannweite von 210.000 bis 4,48 Mio. Tonnen. Die Schwankungsbreite ist so groß, weil die Datengrundlage unzureichend ist, die Lebensmittelabfälle, die verfüttert oder zur Weiterverwertung abgegeben werden nicht erfasst werden. Als Mittelwert nehmen Kranert et al. (2012) 1,9 Mio. t pro Jahr aus der Lebensmittelindustrie an. Damit entfallen 17 % der Lebensmittelabfälle in Deutschland auf die Industrie (siehe Abbildung 18).

Im Bereich des Handels sind die Spannweiten ähnlich groß. Der Mittelwert für den Handel wird von Kranert et al. (2012) auf 550.000 t pro Jahr festgelegt. Hierin enthalten ist auch der Großhandel. Überschneidungen mit den Marktabfällen sind nicht auszuschließen. Neben den in Tabelle 15 genannten Mengen der analysierten Potenzialstudien weist Destatis 2017 für 2015 eine Menge von 60.000 t aus. Es ist weiterhin anzumerken, dass die Kranert et al. (2012) teils auf Befragungen mit relativ geringen Rücklaufquoten basiert und teilweise extreme Bandbreiten aufweist.

Bei Gaststätten, Hotels, Kliniken und Schulen als Großverbraucher fallen im Mittel ca. 1,9 Mio. t pro Jahr an Lebensmittelabfällen an und damit genauso viele wie in der Industrie (Kranert et al. 2012). Auch hier sind Überschneidungen (hier mit Küchen- und Kantinenabfällen) möglich und nicht auszuschließen. Destatis 2017 weist für 2015 eine Menge an „biologisch abbaubaren Küchen- und Kantinenabfällen von 928.000 t aus.

Abbildung 17: Verteilung der Lebensmittelabfälle



Eigene Darstellung: Öko-Institut; Quelle: Kranert et al. (2012)

Kaltschmitt et al. (2016) geben für das Aufkommen von organischen Reststoffen aus Industrie und Gewerbe von etwa 300 kg/EW/a Frischmasse bzw. 80 kg/EW a Trockenmasse an. Sie geben des Weiteren an, dass dieses Aufkommen durch hohe Wasser- und Nährstoffgehalte charakterisiert ist. Daher werde ein Großteil als Futtermittel verwertet und steht für die energetische Nutzung nicht oder nur sehr eingeschränkt zur Verfügung. Die folgende Tabelle zeigt die produktionsspezifischen Abfallmengen organischer Abfälle.

Tabelle 24: Aufkommen von organischen Abfällen in Industrie und Gewerbe

Industriesektor	Substrat	Menge (Frischmasse)
Getreideverarbeitung	Kleie, Spelzen, Teigreste, Retourware	0,2 - 0,3 kg/kg Getreide
Obst-, Gemüse- und Kartoffelverarbeitung	Schäl- und Putzreste	0,1 - 0,35 kg/kg
Zuckerherstellung	Schnitzel, Melasse	0,7 kg/kg Zucker
Pflanzenölproduktion	Presskuchen	1 - 3 kg/Liter
Bierherstellung	Treber, Hefe	0,25 kg/Liter
Weinherstellung	Trester	0,2 - 0,3 kg/Liter
Trinkalkohol (Brennereien)	Schlempe	1 - 3 kg/Liter Ethanol
Milchverarbeitung	Molke	1 - 2 kg/Liter
Schlachthofe/Fleischverarbeitung	Panseninhalt, Tiermehl, Tierfett	15 - 60 kg/Tier

Zusammenstellung: Öko-Institut; Quelle: (Kaltschmitt et al. 2016)

Neben denen in Tabelle 19 dargestellten Mengen fallen noch weitere sektorale Abfallströme an, u.a. bei der Tee- und Kaffeeverarbeitung, bei der Champignonproduktion usw. Diese Mengen sind jedoch in Deutschland und Mitteleuropa generell von untergeordneter Bedeutung und/oder es bestehen etablierte Entsorgungswege für eine stoffliche Nutzung als Tierfutter oder als Brennstoff für die innerbetriebliche Energieversorgung. Das bedeutet, dass keine freien Mengen für eine mögliche energetische Nutzung hierfür zur Verfügung stehen (Kaltschmitt et al. 2016).

Gaida et al. (2013) kommen in ihrer Studie zu dem Schluss, dass im Bereich der Lebensmittelindustrie grundsätzlich ein großes Nutzungspotential vorliegt. Dabei muss jedoch beachtet werden, ob und in welchem Maße Umsteuerungen möglicherweise an anderer Stelle zu Problemen führen. Dies gelte insbesondere für Reststoffe, die bisher im Futtermittelbereich genutzt werden. Gaida et al. (2013) beschreibt, dass innerhalb der Nahrungs- und Genussmittelindustrie nur Teile der verarbeiteten Früchte, Gemüse, Tiere oder Fische für die Produktherstellung verwendet werden. Daher bleibt ein Teil der verarbeiteten Biomasse als produktspezifischer Reststoff zurück. Weitere wichtige Entsorgungs- und Verwertungswege neben der Futtermittelverwendung sind die Verbrennung, Kompostierung oder Vergärung. Die Deponierung von Abfällen stellt in diesem Zusammenhang heute keine Lösung mehr dar, da seit dem Jahr 2005 nur noch organisch angereicherte Abfälle über diesen Weg entsorgt werden dürfen.

Verwendung von Reststoffen – Stoffströme der Lebens- und Genussmittelindustrie

Klöß und Nöke (2008) beschreiben, dass die lebensmittelverarbeitende Industrie in der Regel nur einen Teil der eingesetzten Rohstoffe nutzt. Beispielhaft genannt werden die Pflanzenöle, wo das Fruchtfleisch und die Schalen abgetrennt werden. Unter diesem Aspekt sehen sie ein Potenzial ungenutzter Reststoffe bezogen auf die eingesetzten Rohstoffe. So werden bei der Herstellung von Fischkonserven nur 35 – 70 % der Rohware genutzt, bei der Herstellung von Frucht- oder Gemüsesäften 50 – 70 %, und bei der Gewinnung von Kartoffelstärke gar nur 20 % (siehe Tabelle 25).

Tabelle 25: Mengenmäßiger Anteil von ungenutzten Reststoffen in Bezug auf die eingesetzte Rohware bei ausgewählten industriell hergestellten Lebensmitteln

Produkt	Reststoffanteil
Fischkonserven	30-65%
Fischfilet	50-75%
Rotwein	20-30%
Frucht- und Gemüsesäfte	20-30%
Pflanzenöl	40-70%
Zucker	86%
Kartoffelstärke	80%
Milchverarbeitung	Molke
Schlachthofe/Fleischverarbeitung	Panseninhalt, Tiermehl, Tierfett

Zusammenstellung: Öko-Institut; Quelle: (Klöck und Noke 2008)

Diese Mengen ungenutzter Rohware bieten grundsätzlich das Potential für eine vielfältige Verwendung, wobei unklar bleibt, ob diese Stoffe stofflich oder energetisch genutzt werden. Klöck und Noke (2008) gehen davon aus, dass die entscheidende Voraussetzung für eine weitergehende Verwendung darin liegt, dass die ungenutzten Anteile des Rohstoffs als potentielle Produkte und nicht als Abfall zu betrachten sind. Lebensmittelrohstoffe werden bei der industriellen Verarbeitung oft erst dann zu Abfall, wenn beispielsweise unhygienische Weiterverarbeitung von Fischresten oder Verderb von Pressrückständen durch „unsachgemäße“ Lagerung vorliegt.

Zur Darstellung der im Folgenden dargestellten Stoffströme und deren Verwendung wird u.a. auf eine Studie von Böczelt et al. (2002) zurückgegriffen. Hier wurden - auf Basis von Unternehmensbefragungen - Stoffflüsse und Reststoffmengen eruiert. Dies geschieht zwar speziell für den österreichischen Markt, ist aber dennoch mit Deutschland vergleichbar, da die Märkte für die Reststoffe nicht völlig unterschiedlich sind. Die Übertragbarkeit ist auch vor dem Hintergrund gegeben, dass Nutzungskonkurrenzprodukte global gehandelt werden. Bei Reststoffen ist das Preisgefüge ähnlich und die Bedarfe vor dem Hintergrund der Energieversorgung auch. Es ist daher davon auszugehen, dass Reststoffe auch global gehandelt würden, wenn es preislich attraktiv wäre. Die alternative Nutzung vor Ort, ob stofflich oder energetisch ist daher für Reststoffe auf Deutschland übertragbar.

Zuckerproduktion

Die Zuckerherstellung in Deutschland erfolgt auf Basis von Zuckerrüben. Folgende Reststoffe ergeben sich dabei:

Tabelle 26: Reststoffe aus der Zuckerindustrie und deren Verwendung

Reststoff	Menge pro kg Zucker	Verwendung
Melasse	0,25 kg/kg	Futtermittel
Rübenschnitzel	ca. 1,5 kg/kg	Futtermittel
Rübenerde und Überschussschlamm		Ackererde
Carbonkalk und Nichtzuckerstoffe		Düngerrohstoff

Zusammenstellung: Öko-Institut; Quelle: Böchzelt et al. (2002), Kaltschmitt et al. (2016)

Nach Kaltschmitt et al. (2016) liegt der Anteil der Reststoffe bei der Zuckerproduktion bei ca. 60%. Rund 17% der Zuckerrübe wird in Zucker verwandelt. Der Rest sind Rübenschnitzel und Melasse. Neben der Nutzung der Reststoffe in der Tierernährung, eignen sie sich auch für die Vergärung. Da jedoch der Futterwert der Melasse und der Rübenschnitzel den Wert des möglichen Biogases übersteigt, wird dieser Nutzungspfad nur eingeschränkt verfolgt. Böchzelt et al. (2002) stellen fest, dass auch die thermische Verwertung aufgrund des zu geringen Trockensubstanzgehaltes der Schnitzel und dem resultierenden, etwa vierfachen höheren Preis gegenüber fossilen Brennstoffen derzeit nicht in Betracht gezogen.

Die Rübenerde wird zusammen mit dem anfallenden Überschussschlamm der Kläranlage (Zuckerfabriken verfügen häufig über eine eigene Abwasserklärung) getrocknet, und kann dann als Ackererde wieder aufgebracht werden. Das Klarwasser wird in der Produktion wiederverwendet oder kann in einer Biogas- oder Klärgasanlage weiterverarbeitet werden (Böchzelt et al. 2002).

Gaida et al. (2013) stellen fest, dass bundesweit ca. 200.000 t biogene Reststoffe aus der Zuckerproduktion anfallen. Als etablierter Verwertungsweg wird auf die Futtermittelindustrie verwiesen. Jedoch sind die Produzenten an einer alternativen Verwertung, durchaus interessiert. Biomassen, z.B. werden Reststoffe aus Fermentationsprozessen zur Herstellung von Pharmawirkstoffen bislang in der Regel keiner Verwertung zugeführt, sondern in verschiedene Entsorgungswege, beispielsweise die Verbrennung, gegeben.

Milchverarbeitung

Ein wichtiger biogener Reststoff bei der Verarbeitung von Milch ist die Molke. Bei der Käseerzeugung entstehen aus 10 l Milch 1 kg Käse und beim Waschen 10 l Molke. Dies bedeutet, dass bei einer Betrachtung der Volumina gleichviel Reststoff entsteht wie Rohstoff eingesetzt wird. Rückstände mit einem Trockenmassegehalt von 6 bis 6,5 % werden zur Weiterverarbeitung gegeben, d.h. Fütterung von Schweinen, Molkepulverproduktion oder Herstellung von Getränken.

In einer Käserei fallen große Mengen an Molke an, die sich nur bedingt als Lebens- und Futtermittel eignen. Obwohl Molke einige sehr wertvolle Inhaltstoffe enthält, gilt sie heute allein aufgrund der täglich anfallenden Mengen und der fehlenden Nachfrage als Abfallprodukt. Eine Studie aus der Schweiz zeigt, dass 24 % der Molke für Lebensmittelzwecke genutzt wird, 31 % zu höherwertigen Futtermitteln verarbeitet und noch 45 % direkt an Schweine verfüttert wird. Eine stärkere Verwendung der Molke in Lebensmitteln wäre mit erweiterten Restriktionen, wird jedoch durch das dezentrale und damit transportintensive Anfallen vergleichsweise kleiner Molkenmengen erschwert. Aus lebensmitteltechnologischer Sicht bestehen die Optionen der Molkenvermeidung oder der Molkenverwertung, um

den Rohstoff Milch wirtschaftlich besser zu nutzen. Die bevorzugte Gewinnung idealer Molke mittels Mikrofiltration könnte Verbesserungen bringen. Dazu wären Prozessanpassungen in der Milchverarbeitung erforderlich, deren wirtschaftliche Relevanz noch zu bewerten ist.

Nach Kaltschmitt et al. (2016) werden vereinzelt auch Rückstände in Biogasanlagen vergoren. Bereits im Jahr 2003 zeigte ein Innovationsfondsprojekt der Breisgaumilch GmbH (heute Schwarzwaldmilch) in Freiburg im Breisgau, dass Molke energetisch wertvolle Biomasse ist. Dort wurde in einer Pilotanlage die Molke zu Biogas mit einem überdurchschnittlichen Methangehalt von 65 % vergärt (Schmidt et al. 2017). Insgesamt gehen Kaltschmitt et al. (2016) von einer potenziell energetisch nutzbaren biogenen Stoffstrommenge aus der Milchverarbeitung von etwa 800.000 t/a aus.

Auch Gaida et al. (2013) gehen davon aus, dass bei der Verwendung von Molke Kapazitäten, die „umsteuerbar“ sind prinzipiell vorhanden sind, die bei Nichtgebrauch in der Schweinemast energetisch genutzt werden könnten.

Nach Fritsche et al. (2004) sind in der milchverarbeitenden Industrie 1.500.000 t/a energetisch nutzbare Reststoffe vorhanden. Dies entspricht einem Energiepotenzial von 0,6 PJ. Im Rahmen dieser Studie wird konservativ das Potenzial nach Kaltschmitt et al. (2016) angenommen. Damit steht ein Potenzial von 800.000 t/a zur Verfügung. Dies entspricht einem Energiepotenzial von ca. 0,3 PJ.

Getreideverarbeitung

In den Getreidemöhlen fallen Kleie, Spelzen, Annahmestäube und Reinigungsabfälle an. Diese Stoffströme liegen in der Größenordnung von rund 20 % bezogen auf die vermahlene Getreidemenge. Der Anfall von Kleie hat daran einen Anteil von über 90 %. Dieser Stoffstrom wird schwerpunktmäßig als Futtermittel vermarktet. Die zusätzlich anfallenden Spelzen werden stofflich und/oder energetisch u. a. über Verbrennungsanlagen, Biogasanlagen bzw. eine Kompostierung entsorgt. Beim witterungsbedingten Anfall von mykotoxinbelastetem Getreide (d. h. Getreide, das durch eine Pilzbelastung für den menschlichen Verzehr nicht mehr geeignet ist) muss dieses – infolge der Ablagerungsverordnung – thermisch entsorgt bzw. energetisch verwertet werden. Eine derartige energetische Nutzung erfolgt dann im landwirtschaftlichen Bereich potenziell in Biogasanlagen und/oder in Feuerungsanlagen (Kaltschmitt et al. 2016).

Fritsche et al. (2004) stellen bezüglich der Mengenerhebungen zu den festen industriellen Bioabfällen fest, dass die Stoffstrommengen wenig belastbar. Daher werden sie aus den Potenzialüberlegungen ausgeklammert. Das Aufkommen an Spelzen wird mit 37.000 t/a angesetzt, die über Verbrennungsanlagen, Biogasanlagen und die Kompostierung bereits entsorgt werden. Zusätzliche Verwertungsmöglichkeiten wird in der Kleinf Feuerung gesehen sowie in der Pelletierung von Spelzen. Letzteres sei jedoch noch nicht wirtschaftlich. Das geschätzte Aufkommen wird auch für die weiteren Jahre als stabil beurteilt, da die Entwicklungen in der deutschen Getreidevermahlung gleichbleiben werden.

Böchzelt et al. (2002) stellen fest, dass die Verwertung von Kleie als Futtermittel hohe Erlöse erzielt und damit attraktiv ist.

Fritsche et al. (2004) errechneten ein Kleieaufkommen von ca. 1,44 Mio t/a. Dieses wird vollständig der Futtermittelindustrie verwertet.

Bei der Weiterverarbeitung des Mehls in der Backwarenindustrie fallen u. a. Teigreste, Retourware und Fehlchargen an, die etwa 10% der produzierten Backwaren umfassen. Sie können unter bestimmten Bedingungen beispielsweise in Biogasanlagen genutzt werden. Sämtliche Rückstände aus der Getreideverarbeitung haben einen hohen Trockensubstanzgehalt. Abwässer entstehen in geringem Maße durch Wasch- und Schälprozesse (Kaltschmitt et al. 2016). Gaida et al. (2013) stellen dazu in ihrer Studie fest, dass eine alternative und wirtschaftlich höherwertige Verwertung der Rück- und Restbrote

durchaus möglich und sinnvoll ist. Es gibt derzeit keine etablierten Verwertungswege für die Rück- und Restbrote. Daher stünden diese zu nahezu 100 % für eine alternative Verwertung, z.B. der energetischen Nutzung zur Verfügung.

Forschung im Bereich der thermischen Nutzung von Kleie brachte kein positives Ergebnis und auch deren Einsatz als Dämmstoffe wurde nicht weiterverfolgt (Böchzelt et al. 2002).

Gaida et al. (2013) stellen fest, dass Kleie größtenteils als Futtermittel verwendet wird. Es könnte jedoch, solange die Futtermittelindustrie darunter nicht leidet, eine alternative Verwendung der Reststoffe angestrebt werden. Die Menge an anfallenden Stäuben, die bei ca. 80 000 t/a liegt, bietet definitiv eine Möglichkeit, wirtschaftlich höherer Verwertungswege einzuschlagen. Diese Stäube werden derzeit verbrannt. Hier sehen auch die von den Autoren befragten Unternehmen einen großen Handlungsbedarf, gerade in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit bei der Verwertung dieser Reststofffraktion.

Pflanzenölproduktion

Die Produktion von einem Liter Rapsöl geht mit ca. 1,4 kg Rapspresskuchen oder Extraktionsschrot einher. Die Nebenprodukte können als Dünger ausgebracht oder anteilig zur Viehfütterung verwendet werden; derzeit werden sie erlöswirksam als Viehfutter verkauft. Die bei der Vorbereitung zur Pressung der Kerne anfallenden Schale sind nicht wirtschaftlich vermarktbare. Diese Schalen werden kostenlos abgegeben und als Einstreu für Stallungen in der Landwirtschaft verwendet (Böchzelt et al. 2002).

Nach Mahro (2010) fallen in Deutschland 4.173.000 t Verarbeitungsrückstände aus der Pflanzenölproduktion an.

Kaltschmitt et al. (2016) stellen fest, dass diese Stoffströme derzeit vorwiegend im Nahrungs- und Futtermittelsektor (z. B. als Viehfutter) genutzt werden. Für eine energetische Nutzung stehen maximal Fehlchargen (z. B. überlagertes Material, pilzbelastete Saaten), organisch belastete Abwässer und ggf. bei der Ölraffination anfallende Abfallstoffströme zur Verfügung.

Gaida et al. (2013) gehen davon aus, dass eine alternative Verwendung der Reststoffe aus der ölsaatenverarbeitenden Industrie, prinzipiell vorhanden sind. Nahezu 100 % der Ölschrote gehen in die Futtermittelindustrie und sind somit prinzipiell auch für andere Verwertungswege „verfügbar“. Hierbei entstehen jedoch Nutzungskonflikte mit der Futtermittelindustrie. Die derzeitige Verwendung der Ölschrote als eiweißreiches Futtermittel ist weit etabliert und durch die ansteigende Tierhaltung wird der Bedarf an Futtermitteln noch weiter erhöht, wodurch eine Umsteuerung dieser Reststoffe in eine alternative Verwertung kritisch zu betrachten ist.

Bierherstellung

Der Reststoff Treber, der bei der Bierherstellung überwiegend (ca. 90 %) anfällt, enthält Stickstoff und pflanzliche Fette. Aufgrund des relativ hohen Futterwertes wird er bevorzugt zur Tierernährung eingesetzt (vor allem in der Milchviehhaltung). Daneben fallen während der Endreinigung des Bieres geringe Mengen an Hefe sowie Heiß- und Kühltrub aus den Filterpressen an; aber auch diese Stoffströme werden bevorzugt stofflich genutzt und zusammen mit dem Treber als Viehfutter abgegeben (Kaltschmitt et al. 2016).

Nach Mahro (2010) fallen 2.800.000 t/a Treber aus der Bierherstellung an. Nach Fritsche et al. (2004) sind davon 600.000 – 1.300.000 t/a energetisch nutzbar. Dies entspricht einem Energiepotenzial von 1,6 – 3,2 PJ. Das Minimalpotenzial wird im BAU-Szenario angenommen, der Maximalwert im MER-Modell.

Die energetische Nutzung von Treber wurde nach Kaltschmitt et al. (2016) im Demomaßstab erprobt und kann bis zu 60% der Energienachfrage einer Brauerei decken. Zusätzlich entstehen pro Liter Bier

etwa 2,5 bis 6 Liter Abwasser, das – ggf. zusammen mit anderen sonstigen Rückständen beispielsweise aus der Reinigung des Getreides vor dem eigentlichen Brauprozess – u. U. in Biogasanlagen anaerob behandelt werden kann.

Auch Böchzelt et al. (2002) stellen fest, dass beinahe das gesamte Aufkommen an biogenen Reststoffen aus den Brauereibetrieben an die Futtermittelindustrie bzw. an Landwirte direkt weitergegeben wird. Dabei liegen die erzielten Erlöse recht niedrig. Ziel der Forschung ist es, Patente zur Verbrennung von Treber zu entwickeln, da es viele Länder gibt, in denen eine stoffliche Nutzung als Futtermittel aus strukturellen Gründen nicht möglich ist. Daneben geben sie zu Bedenken, dass Treber zwar nährstoffreich jedoch schwer verdaulich ist, weshalb Alternativen wie z.B. Nutzung als Substrat in der Pilzzucht sinnvoll wäre (Böchzelt et al. 2002).

Faulstich et al. (2012) diskutieren in ihrer Studie die optimierte energetische Nutzung von Biertreber. Durch die eingeschränkte biologische Stabilität und dem hohen Wassergehalt sind die Haltbarkeit und damit der Transportradius um die Brauereien eng begrenzt. Es entstehen immer häufiger Entsorgungsprobleme durch Umstrukturierungen in der Landwirtschaft sowie Unternehmenskonzentrationen in der Brauindustrie. Im Rahmen der Forschung stand die anaerobe Fermentation zu Biogas oder als Brennstoff in Feuerungsanlagen im Fokus. Dieses Forschungsprojekt kombiniert biologische, thermische und mechanische Verfahren mit dem Ziel, den Biertreber auf >40 % Trockensubstanzgehalt zu entwässern. Biertreber weist einen Wassergehalt von 80 % auf. Im Ergebnis wurde festgestellt, dass die thermische Verwertung von Biertreber wirtschaftlich möglich ist, allerdings nur in Kombination mit Holzhackschnitzeln in einer Biomassefeuerung.

Auch Daschner (2013) stellt fest, dass die typische Verwertung von Biertreber als Futtermittel zunehmend schwierig wird, da die Brauereien lokal konzentriert sind und entsprechend die Absatzmärkte fehlen. Die energetische Verwertung war bisher nicht möglich, da der hohe Faseranteil bei rein biologischer Verwertung störend ist und bei rein thermischer Verwertung stört der hohe Wasseranteil. Auch sie kommen zu dem Ergebnis, dass eine thermische Verwertung möglich ist, wenn eine mechanische Entwässerung bis zu 50 % TS vorgenommen wird. Eine stabile Verbrennung geschieht in der Kombination mit Holz. Damit wäre eine Eigenversorgung der Brauereien durchaus möglich.

Gaida et al. (2013) stellen in ihrer Unternehmensbefragung fest, dass die stoffliche Nutzung der Biertreber und Hefen als Tierfutter der derzeitige Verwertungsweg von Brauereireststoffen ist. Zu geringen Teilen erfolgt auch eine stoffliche Verwertung in der Pharma-, Kosmetik- und Lebensmittelindustrie. Die befragten Unternehmen denken über alternative Verwertungswege nach, wenn höhere Erlöse als in der Futtermittelindustrie erzielt werden können oder das Treberangebot die Nachfrage übersteigt. Die biogenen Reststoffe wären auch für eine energetische Verwertung, zum Beispiel zur Biogasproduktion, geeignet.

Weinherstellung

Je Hektoliter produziertem Wein fallen etwa 25 kg Trester (u. a. Beerenhülsen, Kerne, Stiele) sowie 2 bis 3 hL Abwasser als Rückstand an. Die Gesamtmenge der Reststoffe liegt etwa bei 33% des gewonnenen Traubensaftes oder ca. 25% der Traubenmenge (Böchzelt et al. 2002). Wegen der noch relativ hohen Gehalte an Zucker und Weinsäure im Trester wird er bevorzugt für die Herstellung von Tresterbränden bzw. Tresterbrandweinen in Brennereien verwendet. Der Trester kann auch als Dünge- oder Futtermittel in der Landwirtschaft eingesetzt werden. Alternativ ist auch eine Vergärung in Biogasanlagen möglich. Problematisch ist hier allerdings der stark saisonale Anfall des Tresters zur Zeit der Traubenernte, das einen kontinuierlichen Biogasanlagenbetrieb mit ausschließlich diesem Stoffstrom nur sehr eingeschränkt erlaubt (Kaltschmitt et al. 2016).

Nach Gaida et al. (2013) sind die derzeitigen Verwertungswege sehr unterschiedlich. Größere Weingüter nutzen Tresterabfälle zur Düngung. Die Winzergenossenschaften bieten dies ebenfalls an, es wird jedoch nur ein geringer Teil durch die Kleinwinzer wieder abgeholt. Hier erfolgt die Verwertung überwiegend in Biogasanlagen.

Nach Fritsche et al (2004) fallen aus Weinkelter Rückstände in Höhe von 265.000 t/a an. Davon sind 27.000 bis 54.000 t/a energetisch nutzbar. Dies entspricht einem Potenzial in Höhe von 0,2 bis 0,4 PJ.

Das Minimalpotenzial wird im BAU-Szenario angenommen, der Maximalwert im MER-Modell

Trinkalkohol (Brennereien)

In Brennereien erfolgt die fermentative Umwandlung von Zucker (z. B. aus Obst) und Stärke (z. B. aus Getreide) in Trink- und/oder Industrialkohol. Die nach der Alkoholgärung und der Destillation bzw. Rektifikation verbleibenden Nebenprodukte (d. h. Schlempe) können anschließend durch eine anaerobe Vergärung energetisch verwertet werden. Die Schlempe kann alternativ dazu auch direkt, in aufkonzentrierter Form oder getrocknet als DDGS verfüttert werden. Zusätzlich ist ein Einsatz als Dünger – im vergorenen und im unvergorenen Zustand – auf landwirtschaftlichen Nutzflächen möglich.

Bei der Herstellung von einem Liter Ethanol aus Getreide werden – je nach Anlagenkonzept – ca. 9 bis 14 L (ca. 3 kg) Schlempe (2 bis 8 % Trockensubstanz) produziert, die zu ca. 0,75 kg Trockenschlempe (88 bis 95 % Trockensubstanz) aufkonzentriert werden kann. Das bei der Eindampfung anfallende Brüdenkondensat wird weitgehend als Prozesswasser wiedereingesetzt (Kaltschmitt et al. 2016).

Gaida et al. (2013) kommen in ihrer Studie zum Ergebnis, dass unter Einbeziehung aller biogenen Reststoffe der Verschluss- und Abfindungsbrennereien in Deutschland hier rund 15000 Mg TS/a entstehen, die einer alternativen Nutzung zugeführt werden könnten. Allerdings entsteht der Großteil der Reststoffe in den rund 30000 Abfindungsbrennereien, die in gesamt Süddeutschland verteilt sind.

Nach Fritsche et al (2004) entstehen $9,9 \times 10^6$ hl/a Rückstände aus Brennereien. Davon sind 330.000 bis 660.000 t/a energetisch nutzbar. Dies entspricht einem Potenzial von 0,5-1,0 PJ. Das Minimalpotenzial wird im BAU-Modell angenommen, der Maximalwert im Modell MER (eigene Annahme).

Fischindustrie

Nach Mahro (2010) entstehen aus der Fischindustrie Rückstände in Höhe von 468.000 Mg.

Gaida et al. (2013) sehen keine umsteuerbare Kapazitäten bei den Reststoffen aus der Fischverarbeitung. Die derzeitige Verwertung der Fischreste zu Fischmehl oder Fischöl ist als optimal zu bezeichnen. Eine alternative Verwertung der Fischmehle und -öle, z.B. für die energetische Nutzung wäre eventuell denkbar. Derzeit werden die produzierten Fischmehle und -öle hauptsächlich in der Futtermittelindustrie genutzt.

Altspeisefette und Altspeiseöle

Für gebrauchte Speisefette im industriellen und gewerblichen Bereich findet eine getrennte Sammlung statt. Wird dieses getrennt gesammelte Altfett gereinigt, kann es direkt in einem BHKW verwendet, in Biogasanlagen vergoren oder zu Biodiesel weiterverarbeitet werden. Das theoretische Potenzial von Altspeisefetten und Altspeiseöl liegt in Deutschland bei etwa 250 000 t/a. Davon werden zwischen 25.000 und 170.000 t/a für die Produktion von Biodiesel verwendet. Dies steht in Konkurrenz zur Nutzung in der oleochemischen Industrie, die ebenfalls bestimmte Mengen einsetzt (Kaltschmitt et al. 2016).

Die Tatsache, dass Altfette in größerem Umfang nach Deutschland importiert werden (Stand 2013), deutet möglicherweise darauf hin, dass das heimische Aufkommen bereits weitgehend erschlossen ist.

Deutliche Steigerungen der Produktion von Biodiesel auf Basis von Altfetten sind daher für Deutschland nicht zu erwarten, sofern nicht die Sammelquote aus dem privaten Bereich verbessert werden kann. Unter der Annahme einer bundesweiten Einführung von Sammelquoten in Deutschland könnte theoretisch ein Potenzial von insgesamt rund 80 000 t/a an gebrauchtem Speisefett in Deutschland erschlossen werden (Kaltschmitt et al. 2016).

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Datenlage sehr heterogen ist. Doppelzählungen sind sehr wahrscheinlich. Aus diesem Grund und der Annahme, dass das heimische Aufkommen industrieller Altspeisefette und -öle bereits in Nutzung ist, wird kein Potenzial angesetzt.

Obst- und Gemüseverarbeitung

Die Obst- und Gemüse-Branche in Deutschland ist eine importabhängige Branche. Ca. 80% des in Deutschland verzehrten Obstes und ungefähr 60% des in Deutschland konsumierten Gemüses werden aus anderen Ländern nach Deutschland importiert. Die derzeitige Verwertung der Reststoffe aus der Obst- und Gemüseverarbeitung liegt hauptsächlich im Biogas- oder Tierfutterbereich. Eine andersartige Verwendung der Reststoffe ist möglich, jedoch nur unter einer kritischen Bewertung der Verluste für die Futtermittelindustrie, die dabei entstehen könnten. Aufgrund der schwierigen Datenlage kann nach (Gaida et al. 2013) keine genauere Quantifizierung erfolgen (Gaida et al. 2013).

Fazit zu Potenzialen aus der Lebens- und Genussmittelindustrie

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Futtermittelproduzenten mengenmäßig der größte Verwerter der biogenen Reststoffe aus der lebensmittelverarbeitenden Industrie sind. Dennoch ist eine alternative Verwendung der Reststoffe möglich, wo Veränderungen in der Landwirtschaft einen Rückgang der Tierhaltung bedingen und an dieser Stelle die Nachfrage nach Futtermitteln sinkt.

Tabelle 27: Bewertung Potenziale aus der Lebens- und Genussmittelindustrie

Kriterium	Bemerkungen
Stoffstrom	Daten beziehen sich auf das Aufkommen aus der Lebens- und Genussmittelindustrie. Hierzu zählen Reste aus der landwirtschaftlichen Produktion, der Verarbeitung, dem Groß- und Einzelhandel sowie aus den Küchen der Großverbraucher.
Datenqualität	Die Daten der ausgewerteten Studien basieren überwiegend auf Sekundärdaten. Offizielle Statistiken zu Reststoffströmen aus der Industrie existieren nicht. Auf Basis von Umfragedaten können Stoffströme dargestellt werden.
Aktualität	Die Mengenangaben beziehen sich auf ältere und aktuelle Literatur. Abschätzungen zu Potenzialen basieren überwiegend auf Fritsche et al. 2004.
Basisjahr/Zeithorizont	Bei Fritsche et al. (2004) werden Potenziale bis 2030 angenommen und eigene Annahmen für 2050 vorgenommen.
Restriktionen	Ebenso wird angenommen, dass bestehende Verwertungswege die Potenziale bereits optimal ausnutzen.
Nutzungskonkurrenzen	Konkurrenz besteht zur Futtermittelindustrie, die den größten Anteil an der Verwertung haben.
Bereits genutzte Anteile	Bereits genutzte Anteile werden berücksichtigt

Zusammenstellung: Öko-Institut

3.1.6.3 Rückstände aus der Wasserwirtschaft

Klärschlamm entsteht bei der Reinigung von Abwässern in Kläranlagen, die sowohl kommunal als auch industriell sein können.⁴² Dieser wird zur weiteren Behandlung mechanisch entwässert und zum Teil auch thermisch getrocknet. Abwässer im industriellen Bereich fallen im verarbeitenden Gewerbe, Bergbau und bei der Gewinnung von Steinen und Erden und in Wärmekraftwerken für die öffentliche Versorgung an (Fritsche et al. 2004).

Aufgrund der Art der Datenerhebung sind Grauzonen bzw. Überschneidungen zwischen industriellen und kommunalen Schlämmen nicht auszuschließen. Die Angaben zu Klärgasmengen basieren statistisch auf jährlichen Erhebungen, ohne daraus eine exakte Zahl der Anlagen mit Klärgasgewinnung ableiten zu können.

Sofern keine Verwendung in der Landwirtschaft erfolgt, können auch Deponierung und thermische Verwertung in Betracht kommen. Eine Deponierung ist seit 2005 nur nach vorheriger Verbrennung (oder ggf. mechanisch-biologischer Behandlung) zulässig. Die thermische Entsorgung wird voraussichtlich weiter zunehmen (BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft und Statistisches Bundesamt 2010).

Das industrielle Klärschlammaufkommen wird mit ca. 10 kg/EW a (Trockenmasse) angegeben und überwiegend thermisch genutzt (Kaltschmitt et al. 2016). Im Gegensatz dazu liegt das einwohnerspezifische Klärschlammaufkommen aus öffentlichen Abwasserbehandlungsanlagen bei ca. 22,3 kg/EW a (Trockenmasse). Davon werden 42 % in der Landwirtschaft sowie im Garten- und Landschaftsbau verwertet. Der Rest wird verbrannt (Kaltschmitt et al. 2016).

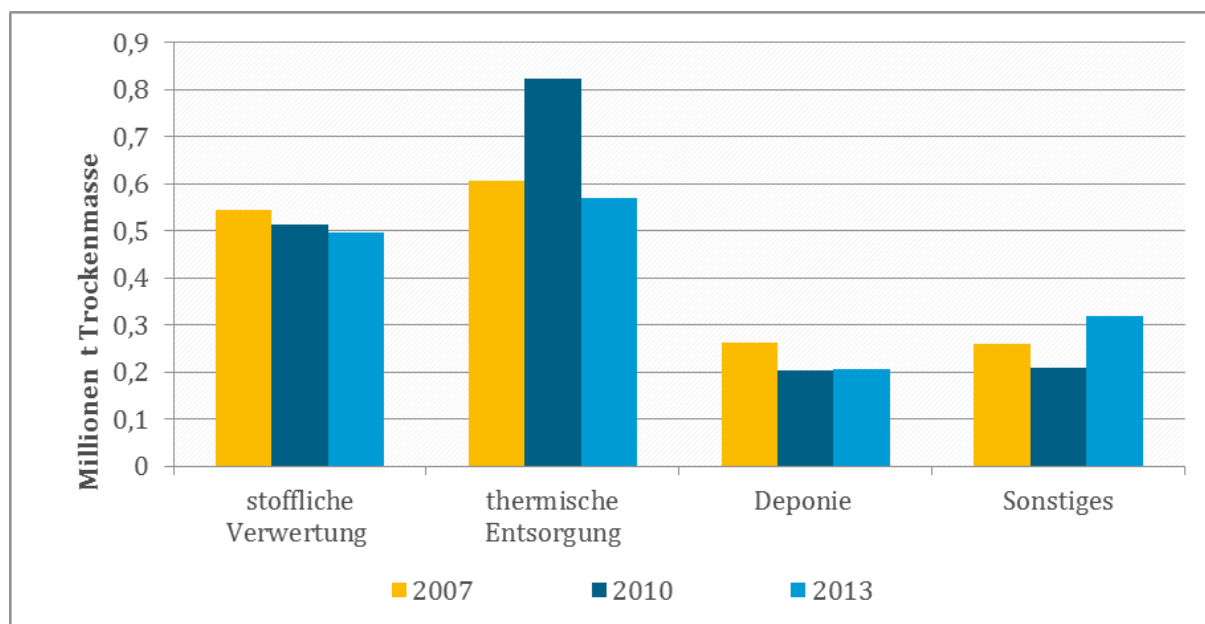
Die Entsorgungswege des industriellen Klärschlammes sind in Abbildung 18 dargestellt. Hier zeigt sich im Zeitverlauf, dass die stoffliche Verwertung zurückgeht. Die thermische Entsorgung hat den größeren Anteil, mit einem starken Anstieg in 2010, jedoch sank die thermische Entsorgung in 2013 dann unter das Niveau von 2007. Dies lag jedoch vor allem an methodischen Änderungen und daher sind die Ergebnisse von 2013 nicht mit den Vorjahren vergleichbar (Statistisches Bundesamt 2017).

Die thermische Entsorgung umfasst die Entsorgung in Monoverbrennungsanlagen (einschließlich Vergasungsanlagen), die Mitverbrennung im Kohlekraftwerk und in Zementwerken sowie einigen Abfallverbrennungsanlagen.

Durch Mitverbrennung von Klärschlamm können CO₂-Emissionen eingespart werden, da der Kohlenstoff im Klärschlamm biogener Natur ist. Die Zementindustrie nutzt Klärschlamm auch als Zuschlagsstoff (Klärschlamm ersetzt hier Rohstoffe wie Sand und Eisenerz), was wiederum zur Ressourcenschonung beiträgt. Aber, durch die Mitverbrennung wird der Phosphor für immer aus dem Kreislauf entfernt, da er entweder fest im Zement eingebunden ist oder er ist stark verdünnt in der Schlacke und in anderen Verbrennungsrückständen verteilt (Wiechmann et al. 2013).

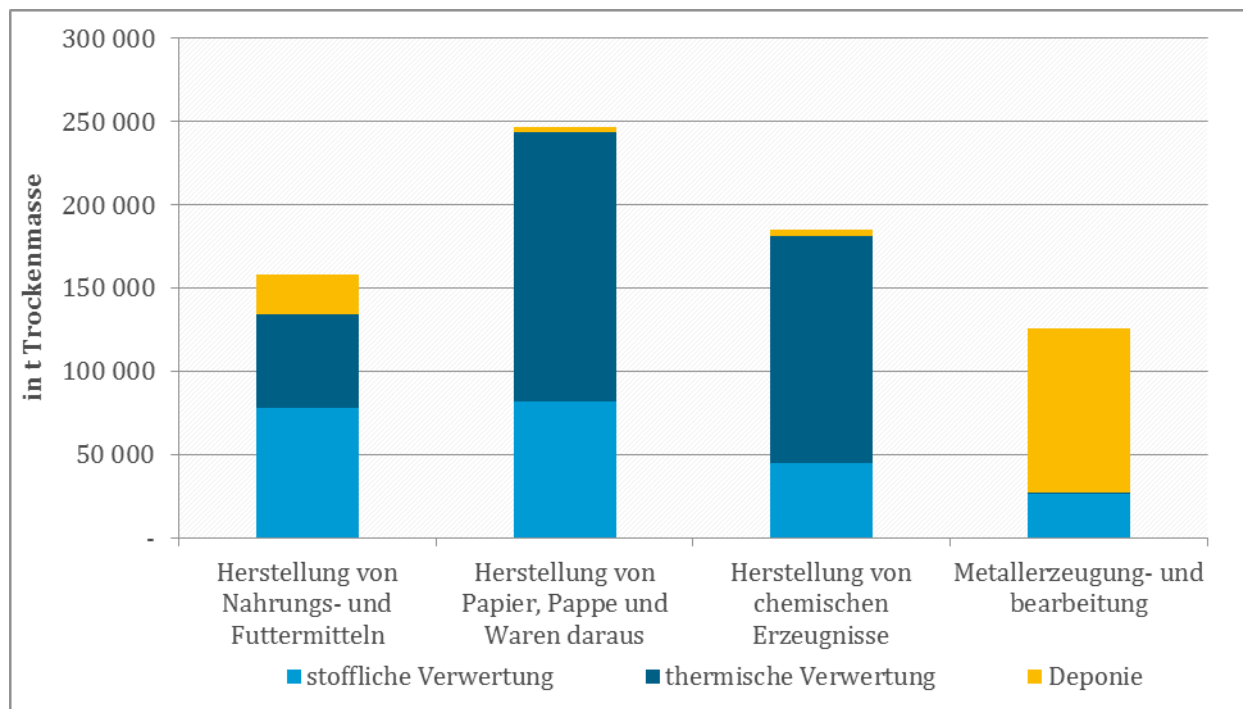
Die stoffliche Nutzung von Klärschlamm in der Landwirtschaft besteht darin, durch den Einsatz von Klärschlamm als Dünger einen Teil des Nährstoffbedarfes der Pflanzen abzudecken. Gleichzeitig kann damit auch die Humusbilanz verbessert werden, jedoch können auch Schadstoffe im Boden angereichert werden. Die tatsächliche Schadstoffbelastung von Boden, Pflanze oder Wasser ist jedoch nur schwer einschätzbar. Auch aus diesem Grund darf in der Landwirtschaft nur Klärschlamm genutzt werden, der aus kommunalen Abwasserbehandlungsanlagen stammt (Wiechmann et al. 2013). Für die industriellen Klärschlämme spielt die Nutzung in der Landwirtschaft also keine Rolle. Eine weitere stoffliche Verwertungsoption ist die Nutzung von Klärschlamm im Rahmen von landschaftsbaulichen Maßnahmen.

⁴² Zur detaillierten Betrachtung der kommunalen Klärschlämme s. Kapitel 3.1.5.3.

Abbildung 18: Entsorgungswege des industriellen Klärschlammes

Eigene Darstellung: Öko-Institut; Quelle: Statistisches Bundesamt (2017)

Der Großteil der industriellen Klärschlamm Entsorgung findet mit 68 % im verarbeitenden Gewerbe statt, gefolgt von der Energieversorgung mit 27 % (Stand 2013) (Statistisches Bundesamt 2017). Innerhalb des verarbeitenden Gewerbes dominieren 4 Wirtschaftssektoren die Entsorgung des industriellen Klärschlammes. Dies sind die Herstellung von Papier, Pappe und Waren daraus mit 26 %, Herstellung von chemischen Erzeugnissen (23%), Herstellung von Nahrungs- und Futtermitteln (21%) sowie die Metallherzeugung und -bearbeitung mit 16 %. Die Entsorgungswege für diese ausgewählten Wirtschaftssektoren gestalten sich wie in Abbildung 19 dargestellt.

Abbildung 19: Entsorgungswege des industriellen Klärschlammes innerhalb des verarbeitenden Gewerbes (Stand 2013)

Eigene Darstellung: Öko-Institut; Quelle: Statistisches Bundesamt (2017)

Wie schon im Kapitel zu kommunalem Klärschlamm festgestellt (Kapitel 3.1.5.3.), unterliegen die die genutzten Potenzialstudien teilweise falschen Einschätzungen der Entwicklung des Aufkommens von industriellem Klärschlamm und Klärgas. Eine Überschneidung bzw. Doppelzählung von kommunalem und industriellem Klärschlamm und Klärgas ist ebenfalls nicht auszuschließen. Des Weiteren werden keine Angaben über die Klärschlammqualitäten gemacht, was relevant für deren Einsatzoptionen wäre. Die einzige Studie, die diese Reststoffpotenziale bis 2030 modelliert ist Fritsche et al. (2004). Allerdings sind die Angaben für den Klärschlamm- und Klärgasbereich überholt, da Abfallmengen von 1998 zugrunde liegen. Aber, in der Studie wird davon ausgegangen, dass zukünftige rechtliche Rahmenbedingungen, die Verwertung von Klärschlämmen „erschweren“, u.a. wegen Schwermetallgehalten und Ausbringungsverboten auf landwirtschaftlichen Flächen. Trotz der genannten Unsicherheiten wird der Potenzialanteil für industriellen Klärschlamm und industrielles Klärgas in die Gesamtbewertung einbezogen (siehe Tabelle 39).

Tabelle 28: Potenziale industrieller Klärschlamm, industrielles Klärgas (in PJ/a)

	2010	2020	2030
Industrieller Klärschlamm	7,1	7,1	7,1
Industrielles Klärgas	1,1	1,1	1,1

Quelle: Fritsche et al. (2004)

Eine genaue Potenzialabschätzung und auch Abgrenzung zum kommunalen Klärschlamm/Klärgas ist nur über eine detaillierte Analyse möglich, die im Rahmen dieser Literaturlauswertung nicht vorgenommen werden kann.

3.1.6.4 Industrierestholz

Industrieresthölzer sind in Abgrenzung zum Altholz, Rückstände aus der Holzwirtschaft. Dies umfasst die bei der Holzbe- und -verarbeitung anfallenden Holzreste inklusive der anfallenden Holzwerkstoffreste. Ihrer Herkunft nach fällt Industrierestholz im Sägewerk, in der Holzwerkstoffindustrie sowie in der Holz- und Möbelindustrie an. Das Gesamtaufkommen der Sägenebenprodukte liegt dabei bei 8,5 Mio. t FM pro Jahr, wovon bereits 4,65 Mio. t FM stofflich genutzt werden, z.B. zur Herstellung von Spanplatten (Fritsche et al. 2004).

Nach Fritsche et al. (2004) liegt das Potenzial zur energetischen Nutzung bei 3,85 Mio. t FM pro Jahr. Dies entspricht einem energetischen Potenzial von 55 PJ pro Jahr.

3.1.6.5 Schwarzlauge

Schwarzlauge ist ein Nebenprodukt der Zellstoffherstellung. Sie entsteht bei der Trennung von Lignin und Zellulose und ist ein Gemisch aus Lignin, Wasser und den Chemikalien, die für die Extraktion benutzt werden.

Brosowski et al. (2015) geben das theoretische Potenzial von Schwarzlauge mit 1,7 Mio. t_{atro} an. Schwarzlauge wird für die Erzeugung von Strom –und Prozesswärme in der Zellstoffproduktion bereits genutzt. Es wird angenommen, dass keine Potenzialsteigerungen zukünftig zu erwarten sind und daher das Potenzial von Brosowski et al. (2015) zugrunde gelegt.

3.1.7 Zusammenfassung

Die in den obigen Abschnitten identifizierten Potenzialansätze lassen sich wie folgt zusammenfassend darstellen und kommentieren.

Tabelle 29: Zusammenfassung der Potenzialansätze

Stoffstrom	Bandbreite der Potenziale	Kommentar (Treiber für die Bandbreite)
Waldholz	8,95 – 11,26 Mio. t _{atro}	Die Bandbreite basiert v.a. auf unterschiedlichen Herangehensweisen der einzelnen Berechnungen. Sie sind nicht vergleichbar miteinander, da sowohl die Methoden als auch die Basisjahre verschieden sind.
Stroh	2,7 – 19,9 Mio. t FM	Das Strohpotenzial stellt die Menge an Stroh da, die weder für eine Humusreproduktion des Bodens, noch für die Nutztierhaltung benötigt wird. Zusätzlich sind Abzüge von Ernteverluste sowie nicht transportwürdigen Mengen zu machen. Je nach Ermittlung der einzelnen Faktoren ergeben sich unterschiedliche Potentialmengen. Insbesondere bei der Humusbilanzierung ergeben sich im Ergebnis große Spannweiten. Somit sind die methodischen Herangehensweisen auch hier verschieden und die Ansätze nicht miteinander vergleichbar.
Tierische Exkremente	80 – 162 Mio. t FM	Die Bandbreite der tierischen Exkremente ergibt sich zum einen aus unterschiedlichen Ansätzen des zukünftigen Tierbestandes, der aus differenzierten Betrachtungen der Bevölkerungsentwicklung und deren Konsumverhalten sich ergibt. Des Weiteren haben unterschiedliche Haltungsformen Auswirkungen auf die Nutzbache Menge an tierischen Exkrementen. Besondere Bandbreite ergeben sich bei der Ermittlung der Transportwürdigkeit von Beispielsweise Gülle, die eine geringe Trockenmasse besitzen.

Tabelle 29: Zusammenfassung der Potenzialansätze

Stoffstrom	Bandbreite der Potenziale	Kommentar (Treiber für die Bandbreite)
Ernterückstände	5,88 – 49,75 Mio. t FM	Es gibt nur wenige Studien, die ein Potential an Ernterückständen angeben. Dabei werden nur einzelne Bereiche im Pflanzenbau wie z. B. Zuckerrüben- oder Kartoffelanbau betrachtet. Daraus ergibt sich je nach Summierung der einzelnen Bereiche eine hohe Bandbreite. Wie auch bei Stroh ist die Menge für die Humusproduktion entscheidend, wie hoch der Reststoffanteil ist. Im Ökolandbau ist man auf einen höheren Anteil an Ernterückständen auf dem Feld angewiesen.
Biogut (Biotonne)	3,8 – 9,1 Mio. t FM	Im Regelfall wird hinsichtlich der zusätzlichen Potenziale darauf abgezielt, die derzeit noch im Hausmüll beinhalteten biogenen Anteile durch zusätzliche Maßnahmen separat zu erfassen. Die darauf aufbauenden Einschätzungen basieren auf Ansätzen zur Definition der Restmüllzusammensetzung und in diesem Zusammenhang auf erhöhten Erfassungsquoten. Dies führt zu maximalen Potenzialen im Bereich von ca. 7 Mio. t FM. Das obere Ende der Bandbreite berücksichtigt zusätzlich Verlagerungen insbesondere aus dem Bereich der Eigenkompostierung. In den Mengenansätzen sind Störstoffe noch beinhaltet.
Grüngut	4,1 – 6,0 Mio. t FM	Die Grüngutpotenziale werden meist nicht stark variiert und ergeben sich meist aus den jeweils aktuellen Erfassungsmengen. Grund dafür ist, dass die alternative Eigenverwertung (z.B. im Garten) als abfallwirtschaftlich sinnvoll erachtet wurde.
Altholz	6,3 – 11,0 Mio. t	Teilweise sind in den Potenzialangaben Industrieresthölzer (Definitionsproblem) integriert (oberer Grenzwert), teilweise nicht. Zudem ist nicht immer ersichtlich, ob über tatro oder tlutro berichtet wird. Die Potenzialangaben bauen in der Regel auf statistischen Angaben in Verbindung mit Marktabfragen auf. Holzabfälle in Rest-/Mischabfällen werden meist nicht adressiert. Insgesamt werden die Potenzialnennungen in der Branche kritisch diskutiert. Insbesondere die Differenzierung in unterschiedliche Altholzqualitäten ist derzeit nur eingeschränkt möglich.
Klärschlamm	1,85 (- 4,7) Mio. t TS	Das Klärschlammauftreten wurde in den untersuchten Studien signifikant zu hoch angesetzt. Durch technische/organisatorische Effekte hat es sich mittlerweile auf den unteren Wert der angegebenen Bandbreite reduziert. Ein höheres Potenzial anzugeben macht daher derzeit keinen Sinn. Es ist jedoch zu prüfen, wie sich weitergehende Maßnahmen (z.B. hinsichtlich der P-Erfassung) auf die Schlammengen auswirken. Das ist in den bisherigen Potenzialanalysen nicht erfolgt.

Tabelle 29: Zusammenfassung der Potenzialansätze

Stoffstrom	Bandbreite der Potenziale	Kommentar (Treiber für die Bandbreite)
Klärgas	5,7 – 6,2 Mio. MWh	Die Angaben beziehen sich im Wesentlichen auf den Status quo. Das weitere Klärgaspotenzial ergibt sich in erster Linie aus den technisch-wirtschaftlichen Rahmenbedingungen zur Integration einer anaeroben Schlammstabilisierung auch in kleinen bzw. mittleren Anlagen. Die diesbezüglich erforderliche Datenlage ist hinsichtlich bundesweiter Angaben schlecht, eine Ableitung aus den einzelnen Landesstatistiken wäre diesbezüglich erforderlich.
Landschaftspflegematerial	Unterschiedliche Herkünfte, deswegen können die Potenziale nicht verglichen werden.	Die Herkünfte der Landschaftspflegematerialien sind zu unterschiedlich. In einigen Quellen sind Friedhofsabfälle integriert, in anderem Grünland. Somit können auch keine Bandbreiten angegeben werden.
Deponiegas	Stark rückläufig	Nach Einschätzung der Studien wird die Produktion nutzbaren Deponiegases in Deutschland bis spätestens 2030 komplett auslaufen.
Textilien	37.000 – 100.000 t	Bei Textilien steht die stoffliche Nutzung im Vordergrund. Weltweit basieren zudem nur 30 % der Produktion auf Naturfasern.
Küchen-/Kantinenabfälle	0,50 – 0,69 Mio. t FM	Überschneidungen mit Bioabfällen sind nicht auszuschließen.
Marktabfälle	70.000 – 87.600 t FM	Anteile nicht biogenen Ursprungs sind nicht ausgewiesen.
Altöle/-fette	45.000 – 460.000 t	Sehr heterogene Datenlage, bereits in energetischer Nutzung
Feste industrielle Substrate (Reststoffe aus der Lebens- und Genussmittelindustrie)	1,7 Mio. t – 2,8 Mio. t.	Potenziale aus der Lebens- und Genussmittelindustrie zukünftig interessant (z.B. aus der Milchverarbeitung)
Industrierestholz	3,85 Mio. t FM	Reststoff wird überwiegend stofflich genutzt, aber Potenzial zur energetischen Nutzung vorhanden
Tiermehle, Tierfette, Fleischbrei	872.000 t -892.000 t	Anteil der stofflichen Nutzung langfristig durch steigenden Fleischkonsum möglich, aber Maximum der stofflichen Nutzungsmöglichkeiten u.a. in der Chemieindustrie erreicht.
Schwarzlauge	1,7 Mio. t atro	Ressource wird überwiegend für die interne Strom- und Prozesswärmeerzeugung bei der Zellstoff- und Papierproduktion genutzt. Keine Potenziale zur weiteren energetischen Nutzung vorhanden.

Eigene Zusammenstellung: IZES, Öko-Institut

Die Potenzialstudien treffen im Kontext der Mengenangaben in der Regel keine Aussagen zu den Qualitäten der jeweiligen Stoffströme. Da diese jedoch für den jeweiligen Nutzungspfad relevant sind, werden im Anhang A auf der Basis einer ergänzenden Recherche, Angaben zur Charakterisierung der Abfälle und Reststoffe für ausgewählte Hauptstoffströme hinterlegt.

3.2 Energetisch erschließbares biogenes Abfall- und Reststoffpotenzial

3.2.1 Potenzialansatz im Rahmen der Studie

Im Rahmen dieser Studie zeigte sich, dass eine Konkretisierung des Potenzialbegriffs notwendig ist. Viele wünschenswerte Restriktionskriterien wie z.B. die Kaskadennutzung oder naturschutzfachliche Kriterien lassen sich nicht starr in Konzepte zur Ermittlung theoretischer, technischer oder wirtschaftlicher Potenziale übertragen. Es stellte sich des Weiteren die Frage, wieso es eines theoretischen Potenzials bedarf, wenn dieses durch grundlegende Überlegungen und Eingrenzungen durch Restriktionen seinen Charakter als „umfassender Rahmen“ verliert. Daher wurde versucht, durch ökologische und ökonomische Kriterien Grenzen zu ziehen, die eine bessere Einschätzung zukünftiger Entwicklungen ermöglichen. Im Einzelnen sind diese Kriterien in der Beschreibung der Modelle (Kapitel 3.2.2) aufgeführt.

Im Ergebnis steht der Ansatz eines stoffspezifisch definierten „erschließbaren Potenzials“. Dieser berücksichtigt im Sinne der bisher in der Biomasseforschungsgemeinschaft üblichen Potenzialdefinition (DBFZ 2013) den theoretischen und technischen Rahmen der Potenziale wie die naturräumlichen Voraussetzungen und die Erschließbarkeit (bei Landwirtschaft und Forstwirtschaft) sowie die erfassten Mengen an Abfall. Zusätzlich finden der heutige Rechtsrahmen sowie – soweit darstellbar – heute bestehende und absehbare wettbewerbliche oder förderrechtliche Grenzen zwischen der stofflichen Nutzung und der energetischen Nutzung im Sinne einer Restriktion Berücksichtigung (vgl. z.B. Kapitel 3.2.3.1). In der Modellbildung werden darüber hinaus wünschenswerte Effekte der Kaskadennutzung sowie des Naturschutzes mit einbezogen.

Letztendlich hat der damit verbundene Ansatz – dessen Ergebnis Basis ist, für die nachfolgenden Arbeitsschritte zu Konversionstechniken und Einsatzpfaden (Kapitel 4 und 5) – den Charakter einer begründeten „Potenzial-Einschätzung“ auf der Grundlage einer Interpretation der analysierten Studien sowie der abgestimmten Restriktionskriterien. Er unterscheidet sich damit von dem Prozess einer eigenständigen Potenzial-Erhebung, welche nicht Gegenstand der hier vorliegenden Untersuchung war.⁴³

Diese „Potenzial-Einschätzung“ konnte dabei aufgrund der vorgefundenen Datenlage nicht für alle in Kapitel 3.1 thematisierten Stoffströme vorgenommen werden (siehe dazu Kapitel 3.2.3.10) und weist auch für die anderen Stoffströme Defizite auf, die in den einzelnen Kapiteln benannt werden.

3.2.2 Differenzierung der Potenzialansätze

Die in Kapitel 3.1 beschriebenen Ergebnisse und zu Grunde gelegte Restriktionen werden nun dahingehend analysiert, ob diese

- ▶ rechtlich bindend sind bzw. naturräumliche Voraussetzungen abbilden,
- ▶ formal z.B. in Form einer Zertifizierung oder durch sozioökonomische Trends beschrieben, aber nicht rechtlich bindend sind,
- ▶ sowie aus Sicht des Umwelt- und Naturschutzes wünschenswert sind.

Diese Unterscheidung ist aus Potenzialsicht erheblich, da insbesondere der heutige Rechtsrahmen (z.B. bestehende Naturschutzgebiete) in vielen Fällen potenzialbildend ist. Die Studien haben gezeigt, dass einige wünschenswerte Kriterien als Restriktion enthalten sind (z.B. cross compliance), andere

⁴³ Obgleich teilweise eigene Datenrecherchen als Grundlage zur späteren Szenarienarbeit durchgeführt wurden.

(z.B. FSC) jedoch nicht. Wünschenswerte Kriterien wurden oftmals nicht zur Bestimmung der Potenziale, sondern nur für die Entwicklung von Szenarien angesetzt.

In einem ersten Schritt war diesbezüglich zu klären, welche Kriterien für die weitere Betrachtung wichtig und welche Kriterien in einer Potenzialanalyse operationalisierbar sind. Die nachfolgenden Tabelle 30 und Tabelle 31 veranschaulichen den damit verbundenen Ansatz.⁴⁴

Tabelle 30: Restriktionskriterien und Bewertung flächenbezogener Reststoffe

Stoffstrom	Restriktionskriterium	Status a)	Umsetzung b)
Für alle flächenbezogene Reststoffe geltend	- keine Veränderung der Flächennutzung - Wiedervernässung landwirtschaftlich genutzter Flächen	2 3	+ +-
Agrarische Reststoffe allgemein	- Berücksichtigung Ökolandbau mit 20 % Fläche - Nährstoffbilanzen - Humusbilanzierung - Berücksichtigung ökologischer Vorrangflächen - Veränderungen von Anbausystemen - Ertragszuwächse	3 2 3 3 3 1	+- + +- + - +-
Zusätzliche Kriterien für:			
Stroh	- Technologische Entwicklungen - Nutzungskonkurrenzen	2 1	+ +
andere Ernterückstände	- Zwischen-/Untersaat als Reststoff ausgewiesen? - Entwicklung Tierproduktion	3 2	- +
Wirtschaftsdünger	- Aufnahmefähigkeit der Region für Nährstoffe - Berücksichtigung Weidetierhaltung - Berücksichtigung Stallhaltungsform	3 3 3	+- - -
Forstliche Biomassen	10 % natürliche Waldentwicklung im Staatswald - Kahlschlagverbot - Berücksichtigung wg.Naurschutz belegter Flächen - Berücksichtigung Forstzertifizierungen - Biodiversitätsziele in genutztem Wald - Derbholzgrenze	1 1 1 3 2 1	+ + + +- + +-
Landschaftspflegeholz	- Umtrieb von Hecken berücksichtigt? - Freischneiden von Grasland berücksichtigt?	3 3	+- +-

a) Kriterium ist (1) bindend, bzw. naturräumliche Voraussetzung, (2) formal oder durch sozioökonomische Trends beschrieben, aber nicht bindend, (3) wünschenswert

b) Hier wird dargestellt, ob das Kriterium in Zahlen ausgedrückt, oder nur qualitativ beschrieben werden kann. Es wurde eine dreiteilige Skalierung gewählt: Ja (+), Nein (-), noch nicht vorhanden, aber grundsätzlich möglich (+-)

Eigene Darstellung: IZES, Öko-Institut, ifeu

Tabelle 31: Restriktionskriterien und Bewertung von organischen Abfallbiomassen

Stoffstrom	Restriktionskriterium	Status ^{a)}	Umsetzung ^{b)}
Abfälle allgemein	• Abfallhierarchie	1	+
	• Grad der getrennten Erfassung	2	+/-
Kommunale u. gewerbl. Abfälle	•		
Vergärbare Abfälle	• Kompostbedarf	3	+
Altholz	• Sortierung	1	+/-
Sonstige brennbare Abfälle	• Organische Anteile im Restmüll zur MVA	2	+
	• Sortierung nicht in MVA	3	+
Deponiegas	• Rückgang nach Deponierungsverbot	3	- ^{c)}
Klärschlamm	• P-Recycling vor oder während thermischer Nutzung berücksichtigt	3	+
	• Faulung mit Klärgasnutzung und Faulschlammverbrennung ist berücksichtigt	2	+
Industrieabfälle	•		
Lebensmittelverarbeitung	• Veränderung von Ernährungsgewohnheiten berücksichtigt?	3	-
Lebensmittelhandel	• Produktionsüberschuss berücksichtigt?	3	+/-
Holzindustrie und Papierindustrie	• Entwicklungen der Sägeindustrie und der Holzwerkstoffindustrie berücksichtigt?	3	+/-
	• Interne energetische Nutzung (als Schwarzlauge bzw. Hackschnitzel) berücksichtigt	2	+

a) Kriterium ist (1) bindend, bzw. naturräumliche Voraussetzung, (2) formal oder durch sozioökonomische Trends beschrieben, aber nicht bindend, (3) wünschenswert

b) Hier wird dargestellt, ob das Kriterium in Zahlen ausgedrückt, oder nur qualitativ beschrieben werden kann. Es wurde eine dreiteilige Skalierung gewählt: Ja (+), Nein (-), noch nicht vorhanden, aber grundsätzlich möglich (+/-)

c) Eine Potenzialberechnung wäre theoretisch möglich, macht praktisch jedoch keinen Sinn, weil mit zu großen Ungenauigkeiten behaftet; mittel-/bis langfristig ist Deponiegas in Deutschland zudem nicht mehr relevant

Eigene Darstellung: IZES, Öko-Institut, ifeu

Ergänzend sind fallweise für die Stoffströme folgende Restriktionskriterien relevant:

- ▶ Bevölkerungsentwicklung⁴⁵ und Konsumverhalten
- ▶ Klima- und umweltpolitische Ziele im Umgang mit Abfällen/Reststoffen
- ▶ Lenkbarkeit der Stoffströme (rechtlich, wirtschaftlich, etablierte Wege, ...)
- ▶ Lager- und Transportwürdigkeit der Stoffströme

⁴⁵ Hinsichtlich der Bevölkerungsentwicklung werden die Ergebnisse der 13. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung (Variante 2-A; 2015: 82,2 Mio.; 2020: 83,5 Mio.; 2030: 82,9 Mio.; 2050: 79,0 Mio.) nach Destatis zugrunde gelegt. https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesellschaftStaat/Bevoelkerung/Bevoelkerungsvorausberechnung/Tabellen/2015_2A_Altersgruppen-Bis2060_.html

► Einfluss von Im- und Exporten

Unter Berücksichtigung der obigen Ansätze wird das „erschließbare“ Potenzial in Form von 2 Modellen im nachfolgenden Kapitel 3.2.3 als Restriktions-basierte „Einschätzung“ hergeleitet:

- **Modell „BAU“:** beinhaltet die gemäß Tabelle 30 und Tabelle 31 als bindend, oder als auf naturräumlichen Voraussetzungen aufbauend beschriebenen Restriktionen (1) sowie diejenigen, die zwar nicht bindend, aber formal oder durch sozioökonomische Trends beschrieben sind (2).
- **Modell „Mit erweiterten Restriktionen“:** beinhaltet (ergänzend) stoffstromspezifisch definierte, erweiterte Restriktionsansätze

3.2.3 Ergebnisse

3.2.3.1 Waldholzpotenziale

Auf Grund fehlender Zukunftsszenarien mit hinreichender Datenqualität und –aktualität wird im Folgenden auf Daten der BWI und deren Interpretation abgehoben. Das Projekt BfN (2017) basiert auf der BWI und hat dabei die Ergebnisse mit den Holzaufkommensprognosen nach WEHAM abgeglichen. Auf Grund der Ähnlichkeit der Ergebnisse kann davon ausgegangen werden, dass die Annahmen von WEHAM auch durch die BfN Studie repräsentiert werden.

Waldholzpotenziale zur energetischen Nutzung sind schwer herzuleiten, da letztlich die Nachfrage bestimmt, welche Hölzer in die energetische und welche in die stoffliche Nutzung gehen. Grundsätzlich wird bei Waldholz nur Derbholz genutzt. Sogenannte Resthölzer (oder nicht-Derbholz, also Hölzer <7 cm sowie sehr schadhaftes Holz)⁴⁶ bleiben als Koppelprodukte der Nutzung meist im Bestand aus Gründen des Bodenschutzes oder der Biodiversität liegen (in einigen Waldbaurichtlinien der Bundesländer ist dies sogar verpflichtend für den Staatswald hinterlegt).⁴⁷ Abgrenzbar ist grundsätzlich, dass hochwertige Sortimente wie Stammholz (hier v.a. Furnierholz und Sägestammholz) nicht energetisch verwendet wird. Alle Qualitäten, die schlechter als Stammholz sind, können unter dem Begriff Dendromasse zusammengeführt werden.

Definition „Dendromasse“

Unter Dendromasse wird im Rahmen dieser Untersuchung holzartige Biomasse verstanden, die in stofflichen, energetischen und chemischen Wertschöpfungsketten verwandt werden kann, sich aber aufgrund von Qualitätsmängeln (derzeit) nicht für die traditionellen höherwertigen Verwendungen von Holz (Möbel, Hausbau etc.) eignet.“ (verändert nach Schulte 2007)

Alle im Wald anfallenden und unter naturschutzrechtlichen sowie forstlich fachlichen Aspekten zu nutzenden Hölzer, die nicht einer höherwertigen Nutzung angedient werden können (wie z.B. Furnierhölzer oder Sägehölzer), können sowohl stofflich als auch energetisch genutzt werden. Es gibt demnach nach der strengen Reststoffdefinition somit keine „Reststoffe“ aus dem Wald auf Grund forstlichen Handelns, die nicht stofflich nutzbar wären (vgl. auch IZES et al. 2013). Es gibt in der Forstwirtschaft nur Reststoffe auf Grund der Lage am Holzmarkt oder Hölzer kleiner der Derbholzgrenze bzw. schadhafte Hölzer, die beide aus Naturschutz oder Bodenschutzgründen im Wald verbleiben sollten. Diese Hölzer werden in den Modellen „MER“ bzw. „BAU“ (siehe Kapitel 3.2.2) des Projektes nicht mit

⁴⁶ In der Forstwirtschaft auch als X-Holz bezeichnet

⁴⁷ Aus phytosanitären Gründen kann z.B. vor dem Hintergrund des Borkenkäferbefalls eine Vollbaumnutzung notwendig sein.

einbezogen, da die dort festgelegten Restriktionen (wie z.B. die FSC Kriterien) eine Potenzialzuordnung ausschließen. Aus diesem Grund wird im Folgenden die Marktlage betrachtet, um zu Massenströmen zu kommen: Die bisherige Aufteilung der Dendromasse zwischen Energieholz und Industrieholz am Markt kann auf die Inventurdaten übertragen werden. Daraus wird dann das Energieholzpotenzial abgeleitet. Genauere Ableitungen zum Beispiel auf Grund von Holzverwendungsszenarien sind im Rahmen dieses Projektes nicht möglich, da bis Ende 2017 keine diesbezüglichen Quellen veröffentlicht waren.

Modell „BAU“

In den für die Einschätzung für 2020 des Modell „BAU“ herangezogenen Studien wurden alle hierfür in Kapitel 3.2.2 als bindend (Kahlschlagverbot, Berücksichtigung naturschutzfachlich belegter Flächen, Derbholzgrenze) und nicht bindend (Veränderung der Flächennutzung, Biodiversitätsziele im genutzten Wald) definierten Restriktionskriterien berücksichtigt.

Zwischen Energieholz und Industrieholz⁴⁸ verschieben sich die Verwendungen je nach Marktlage. Laut dem Projekt WEHAM Szenarien wird die Nachfrage nach Energieholz in 2030 selbst beim Restriktionsszenario ungefähr gleich der Nachfrage von 2010 bleiben, obwohl im Restriktionsszenario angenommen wird, dass die EEG-Anlagenkapazitäten rückläufig sind und die Wärmeverwendung durch ein Auslaufen des MAP ebenfalls rückläufig ist (Schier und Weimar 2017). Aufgrund dieser Nachfrageentwicklung wird im BAU-Modell der volle in BfN (2017) verwendete Ansatz von rund 11 Mio. t/Jahr als Energieholzpotenzial im Jahr 2020 angenommen. Im BAU-Modell wird weiterhin angenommen, dass sich die Verwendung von Waldholz zu energetischen Zwecken bis in 2050 auf Grund der starken Nachfrage und des zusätzlichen Angebotes von Laubschwachholz kaum vermindern.⁴⁹ Schier und Weimar (2017) rechnen für 2050 dementsprechend mit rund 10 Mio. t_{atro} im Restriktionsszenario. Im BAU Szenario wurde dieser Ansatz schon für 2030 übernommen, da eine starke stoffliche Nutzung auch im BAU Szenario auf Grund der aktuellen Initiativen wie Charta Holz unterstellt wurde.

Modell „Mit erweiterten Restriktionen“

Aus Sicht einer verstärkten Holzkaskadennutzung wäre ein stärkerer Einsatz des Holzes in der Holzwerkstoffindustrie wünschenswert. Dieser verstärkte Einsatz ist in allen WEHAM-Szenarien berücksichtigt (Mantau 2017). Trotzdem schätzen Schier und Weimar (2017) in allen Szenarien ein, dass die Energieholzbereitstellung nicht zurückgeht. Auch im Nadelholzbereich werden seitens der Autoren noch Hölzer ins Energieholz modelliert. Auf Grund der guten Möglichkeiten, Nadelholz stofflich einzusetzen und des künftigen negativen Außenhandelssaldos bei Holzwerkstoffen im Restriktionsszenario der WEHAM-Szenarien wird jedoch im Rahmen dieser Arbeit davon ausgegangen, dass die Nadel-Energieholzpotenziale in 2050 komplett stofflich verwendet werden. Somit verringert sich das Energieholzpotenzial um rund 8 Mio. m^3 auf ca. 12 Mio. m^3 bzw. 6 Mio. t_{atro} (vgl. Tabelle 32).

⁴⁸ Das Sortiment Industrieholz subsummiert Papierholz und Holz für die Holzwerkstoffindustrie. Stammholz dagegen Sägewerksholz und Furnierhölzer.

⁴⁹ Die Baumartenfläche von Laubschwachholz wird sich auf Grund des Waldumbaus erhöhen, die Fläche von Nadelholz dagegen abnehmen (Oehmichen et al. 2017). Laubholz aus Erstdurchforstungen kann jedoch schlecht in der Holzwerkstoffindustrie in den prognostizierten Mengen komplett verwertet werden. Somit könnte sich künftig ein kostengünstiges Angebot an Laubholz einstellen.

Tabelle 32: Einschätzung der Waldholzpotenziale

Modell	Bandbreite Studien	2020	Einschätzung 2030	2050
„BAU“	9,0 – 11,3 Mio. t _{atro}	11 Mio. t _{atro}	10 Mio. t _{atro}	10 Mio. t _{atro}
„MER“ – „mit erweiterten Restriktionen“	9,0 – 11,3 Mio. t _{atro}	11 Mio. t _{atro}	10 Mio. t _{atro}	6 Mio. t _{atro}

Defizite und Daten-/Informationslücken:

- Das Ausmaß der derzeitigen Schadensereignisse (Windwurf, Borkenkäfer-Kalamitäten und Waldbrand) ist in den Potenzialen noch nicht berücksichtigt. Hier kann es zu sehr starken Änderungen bzgl. des Potenzialfalls kommen.
- Die Sortimentsabschätzung basiert nur auf einem Basisjahr. In einer weitergehenden Berechnung sollte dies auf Basis eines Durchschnittes gebildet werden.
- Energieholzpotenziale aus Nicht-Derbholz z.B. basierend auf Bundesland spezifischen Potenzialen zu Waldresthölzern (unter Berücksichtigung spezifischer Landesbestimmungen wie Waldbaurichtlinien)

3.2.3.2 Straßenbegleitgrün

In Kapitel 3.1.3 wurde ausgeführt, dass Wasserstraßen und Bahntrassen nicht mit in die Betrachtung aufgenommen wurden. Deswegen finden im Folgenden nur Autostraßen Berücksichtigung.

Zur Berechnung liegen folgende Zahlen zu Grunde: Deutschland hatte in 2017 ein Autobahnnetz von 13.000 km und 2015 ein Bundesstraßennetz von 38.000 km sowie ein Landes-, Staats- und Kreisstraßennetz von 86.000 km.⁵⁰ Die sonstigen Straßen werden nicht in die Rechnungen mit einbezogen. Hier sind die Biomasseansätze pro Straße zu gering⁵¹ und zu ungleichmäßig, so dass es keine verlässlichen Angaben diesbezüglich gibt (IZES et al. 2013).

Die Kennzahlen für Halmgut und Holz sind IZES (2012) entnommen. Hier wurden die Ansätze von Rösch (1996) mit denjenigen von Rommeiß (2006) kombiniert. Neuere Kennzahlen wurden bisher für ganz Deutschland nicht angenommen. Die Kennzahlen sind nur ein grober Anhaltspunkt. Sie wurden im Wesentlichen in einzelnen Landkreisen in Deutschland ermittelt. Es wäre dringend notwendig, diese Kennzahlen neu abzuleiten, wie auch DBFZ (2015) empfiehlt.

Tabelle 33: Verwendete Kennzahlen zur Ableitung des Straßenbegleitgrüns, aus IZES (2012)

Material	Kriterium	Kennzahl
halmgutartig	Flächenansatz:	2,1 ha / km bei Autobahnen 0,6 ha / km bei Bundes-/Landes-/Kreisstraßen
	Biomasseertrag:	8 – 13 t FM / ha*a
holzartig	Flächenansatz	0,6 ha / km bei Autobahnen 0,2 ha / km bei Bundes-/Landes-/Kreisstraßen
	Biomasseertrag:	5 t FM / ha*a

Da die Angaben mit großen Unsicherheiten behaftet sind, kann auch keine Einschätzung für die künftige Entwicklung gegeben werden. Die Modelle „BAU“ und „Mit erweiterten Restriktionen“ unterscheiden sich daher nicht. Die Materialien sind aufgrund von Stör- und Schadstoffgehalten teilweise nur schwer nutzbar für die stoffliche Nutzung (Siehe Anhang A).

⁵⁰ Statista, das Statistikportal, Zugriff am 20.12.2017

⁵¹ oftmals Straßenverläufe in Ortschaften

Aus den obigen Angaben ergeben sich folgende Potenziale für Straßenbegleitgrün.

Tabelle 34: Einschätzung der Straßenbegleitgrünbegleitgrünpotenziale

Modell	Bandbreite Studien	Einschätzung		
		2020	2030	2050
„BAU“ Halmgut	Nicht aussagekräftig	1 Mio. t FM	1 Mio. t FM	1 Mio. t FM
„BAU“ Holz		160.000 t FM	160.000 t FM	160.000 t FM
„Mit erweiterten Restriktionen“ Halmgut	Nicht aussagekräftig	1 Mio. t FM	1 Mio. t FM	1 Mio. t FM
„Mit erweiterten Restriktionen“ Holz		160.000 t FM	160.000 t FM	160.000 t FM

Defizite und Daten-/Informationslücken:

- Beschränkung auf Straßenbegleitgrün (Schienennetz und Wasserstraßen nicht berücksichtigt)
- Ökologische und wirtschaftliche Grenzen der Transportstrecke / des Belassens von Materialien in der Fläche
- Heutige Stör- und Schadstoffgehalte (Primäruntersuchungen über 20 Jahre alt)
- Sondereffekte (Bäume neben Autobahnen aus den 50er Jahren müssen heute aufgrund von Verkehrssicherungspflichten verstärkt geerntet werden)

Änderungen der Flächennutzung (Zu- oder Abnahme des Straßennetzes und Nutzung entlang von Straßen und Schienen (z.B. PV-Anlagen)) nicht einschätzbar

Gesamtbewertung

Die Potenziale fallen regional in unterschiedlichen Massen an. Die Graspotenziale versprechen wenig Energieertrag und werden nur regional ergänzende Optionen darstellen. Die Holzpotenziale weisen einen hohen Rindenanteil aus. Auch hier gilt, dass die Potenziale so gering sind, dass sie regional evtl. eine bedeutende Größe darstellen, jedoch insgesamt für das Energiesystem in Deutschland eine eher untergeordnete Bedeutung haben. Zusätzlich zu den hier betrachteten Straßenbegleitgrünpotenzialen können regional noch geringe Quantitäten von Stoffströmen an Schienen oder an Wasserstraßen anfallen.

Bei Biomasse von Parkflächen gibt es große Überschneidungen zu den Grüngutpotenzialen, weshalb diese dort diskutiert werden. Einschätzungen zu Biomasse, die durch die Pflege von Biotopflächen anfallen und zu Treibsel und Schwemmholz, konnten auf Basis der verfügbaren Daten nicht getroffen werden.

3.2.3.3 Strohpotenziale

Modell „BAU“

Auf Grund der großen Bandbreite des Strohpotentials in den betrachteten Studien wurde eine Festlegung auf den geschätzten Wert getroffen, der von den meisten Studien genannt wurde. Dieser wird auch für eine zukünftige Betrachtung nicht weiter verändert. Zukünftige Veränderungen des Marktanteiles von Getreide oder neue Anbausysteme wurden im Rahmen dieser Studie nicht weiter berücksichtigt.

Im Hinblick auf die Herleitung des Strohpotenzials zeigt sich, dass die meisten Bereiche wie die Zunahme des ökologischen Landbaus, oder die Änderung von Anbausystemen wünschenswerte Ziele sind, die aber aktuell nicht unter bindenden Voraussetzungen stehen. Die einzige Konstante, die sich in allen herangezogenen Studien gezeigt hat, ist der Ertragszuwachs, wobei dieser zwischen den Studien schwankt und stark an die Anbaumethode (ökologisch oder konventionell) gebunden ist. Zudem wird mit immer neuen Züchtungen das Korn/Stroh-Verhältnis zu Ungunsten des Strohs beeinflusst. Das

heißt der Ertragszuwachs beim Getreide lässt nicht direkt auf einen Ertragszuwachs beim Stroh schließen.

Für die Umsetzung einer Potenzialanalyse stehen aktuell die Zahlen des statistischen Bundesamts zur Verfügung. Diese zeigen, dass die Anbaufläche für Getreide zur Körnergewinnung nur geringfügig zurückgegangen ist. Im Vergleich zu 2010 hat sich die Anbaufläche um rund 3,0 % und im Vergleich zu 2013 um rund 1,8 % gegenüber 2016 verringert (Destatis 2017). Die Datengrundlage der Studie Zeller et al. (2011) zeigt damit nur eine geringe Abweichung von den heutigen Werte. Auch die Angaben der Untersuchungen von Zeddies (2014) spiegeln die aktuelle Flächennutzung wider. Beide Studien gehen auch von einem annähernd gleichen Reststoffpotenzial bei Stroh für den Zeitraum 2010 - 2015 aus. Die Menge beläuft sich auf 13 Mio. t. Dabei sehen Zeller et al. (2012) den Wert als obere Grenze an. Dagegen wurde in der Studie des DBFZ (2015) 13 Mio. t als unterer Wert angenommen. Der ökologische Anbau hat sich im dem Zeitraum von 2010 bis 2016 bezogen auf die Flächennutzung nicht nennenswert geändert (Destatis 2017).

Für den aktuellen Zeitraum bis 2050 wird hier ein Reststoffpotenzial für Stroh von 13 Mio. t angenommen. Dies wird auch von den Studien als technisch verfügbare Menge bestätigt (Zeller et al. 2012; Zeddies 2014). Zukünftig wird für die energetisch nutzbare Menge keine große Veränderung erwartet. So werden Zunahmen des Strohertrages beispielsweise durch einen höheren Bedarf in der Tierhaltung ausgeglichen.

Modell „Mit erweiterten Restriktionen“

Bei Stroh sind insbesondere die Anbauflächen ausschlaggebend für das spätere Potenzial an nutzbaren Reststoffen. Hier gilt es, die Entwicklung der letzten Jahre abzugleichen. Zukünftige Ziele wie z.B. eine Wiedervernässung ehemaliger Moore sind nur mit größerem Aufwand in ihrer Wirkung auf die Fläche abzuschätzen, da von heute noch nicht benannten Flächen abgeschätzt werden müsste, wie hoch die ausfallende Getreideernte auf diesen wäre.

Weitere Restriktionspunkte sind der Anteil an ökologischer Landwirtschaft wie auch die Fläche an ökologischen Vorrangflächen, die beide einen reduzierenden Einfluss auf das Strohpotenzial ausüben. Aktuelle Flächenangaben sind in Form von Anbauflächen (Destatis) vorhanden und können berücksichtigt werden. Für zukünftige Szenarien lassen sich hier jedoch nur Annahmen treffen. Laut BMEL ist das aktuelle Ziel, einen Anteil von 20 % ökologisch bewirtschafteter Fläche zu erreichen. Eine zukünftige Abschätzung, inwieweit sich der Anteil an ökologischen Vorrangflächen verändert, kann im Rahmen dieses Projektes nicht geleistet werden.

Mit dem Bundesziel, den Anbauanteil des Ökolandbaues auf 20 % zu steigern, ergeben sich hieraus Reduktionen im Reststoffpotenzial für Stroh. Hintergrund ist, dass im Ökolandbau das Stroh verstärkt zum Humusaufbau benötigt wird. Betriebe mit Tierhaltung nutzen dabei das Stroh zunächst als Einstreumaterial um es dann in Form von Mist wieder auf die Felder zu bringen. Ökobetriebe ohne Tierhaltung lassen das Stroh direkt bei der Ernte gehäckselt auf den Feldern. Unter der Berücksichtigung der aktuellen Entwicklung im ökologischen Landbau wird davon ausgegangen, dass 2020 maximal 10 % der Gesamtfläche ökologisch bewirtschaftet werden. Ab 2030 soll das Ziel 20 % erreicht sein.

Zur Berechnung des Modells „Mit erweiterten Restriktionen“ werden die aktuellen Einschätzungen von rund 13 Mio. t zu Grunde gelegt. Diese Menge enthält bereits den aktuellen Anteil an Ökolandbau im Getreide von ca. 4 %. Zum Erreichen der Ziele im Modell „Mit erweiterten Restriktionen“ für 2020 müsste der Anteil an ökologisch angebautem Getreide auf rund 5 % gesteigert werden. Dieser Anteil von Ökolandbau wird von den 13 Mio. t. für das Jahr 2020 abgezogen. Bis 2030 steigt der Ökolandbau nochmal um 15 Basispunkte auf dann 20 %. Daraus ergibt sich dann ein Strohpotenzial von rund 11,1 Mio. t.

Wie sich die technischen Entwicklungen und Bestrebungen zu einer verstärkten stofflichen Nutzung von Biomasse, z.B. der stofflichen Nutzung Stroh-basierten Ethanols, auf die für die energetische Nutzung bereitstehenden Strohmenge auswirken, ist auf Basis der vorliegenden Studien nicht einschätzbar.

Zusätzlich gibt es Hinweise seitens des derzeit laufenden Projektes „advanced biofuels, FKZ 2516822500“, dass die Berechnung von Strohpotenzialen mit Unsicherheiten behaftet ist. Zum einen können nicht die Folgen eines Eingriffes in den C-Haushalt des Bodens auf die Bodenfauna abgeschätzt werden. Zum anderen können bei den Methoden der Berechnung zur nachhaltigen Entnahme von Stroh nicht alle regionalen Faktoren der Bodenfruchtbarkeit Berücksichtigung finden. Forschungsergebnisse bzgl. dieser Fragestellungen liegen den Autoren noch nicht vor. Tabelle 35 fasst die Strohpotenziale zusammen.

Tabelle 35: Einschätzung der Strohpotenziale

Modell	Bandbreite Studien	Einschätzung		
		2020	2030	2050
„BAU“	2,7 – 19,9 Mio. t FM	13 Mio. t	13 Mio. t	13 Mio. t
„Mit erweiterten Restriktionen“	2,7 – 19,9 Mio. t FM	12,4 Mio. t	11,1 Mio. t	11,1 Mio. t

Defizite und Daten-/Informationslücken:

- Ökologische und wirtschaftlichen Grenzen der Transportstrecke
- Zukünftiges Ziel im Bereich des Humusaufbaus
- Flächenverlust durch Wiedervernässung
- Anbaukonkurrenz
- Nachfrageveränderungen des Strohs in der künftigen konventionellen Tierhaltung
- Entwicklung weitere Nutzungskonkurrenzen nicht einschätzbar
- Aufgrund von Wetterereignissen (z.B. Trockenheit) sind diese Potenziale im langjährigen Durchschnitt zu sehen. Bei konkreten Projektierungen müssen diese Fakten mit in Betracht genommen werden.

3.2.3.4 Potenziale an tierischen Exkrementen

Modell „BAU“

Wichtigster Ansatzpunkt zur Ermittlung der Potenziale bei tierischen Exkrementen bzw. bei Wirtschaftsdünger sind die aktuellen Bestandszahlen. Diese werden auch in regelmäßigen Abständen aktualisiert. Nicht so aktuell ist dagegen die Dokumentation der Haltungsformen. Hier gibt es im Bereich der Hühnerhaltung Bestandszahlen von 2016 (Destatis). Dagegen stammen die neusten Zahlen im Bereich der Rinder- und Schweinehaltung von 2010. Auf Grund der fehlenden Zahlen können in dem Bereich im Hinblick auf die aktuellen Werte nur Schätzungen vorgenommen werden.

Die Anzahl von landwirtschaftlichen Nutztieren ist im Zeitraum von 2010 bis 2016 angestiegen (siehe Tabelle 36). Dabei ist im Bereich Rinder ein Rückgang zu verzeichnen. Dagegen haben sich die jährlichen Zahlen für Schweine und Geflügel klar erhöht. Insbesondere die Geflügel-Tierzahlen stiegen in den letzten Jahren stark an.

Dies hat Auswirkungen auf die Zusammensetzung der tierischen Exkremente. Insbesondere der Trockensubstanzanteil steigt an, was ggfls. einen positiven Einfluss unabhängig von der generellen Diskussion um Haltungsformen auf die Transportwürdigkeit hat. Im Gegensatz zu Stroh oder anderen Ernterückständen bestehen bei Gülle keine Nutzungskonkurrenzen zu Biogasanlagen, wenn der Gär-

rest anschließend als Dünger wiederverwendet wird. Die Erschließbarkeit betreffende Einschränkungen sind nur die genannte Transportwürdigkeit oder die Nutzung von Mist zur Bodenstrukturverbesserung.

Tabelle 36: Veränderung der Tierzahlen von 2010 – 2017

Modell	2010	2016
Rinder gesamt	12.706.000	12.365.000
Schwein	26.901.000	27.175.000
Hühner gesamt	114.113.000	158.649.000

Quelle: destatis 2018

Auf der Basis der aktuellen Tierzahlen 2017 kann, auf Grund der fehlenden Aussagen zu derzeitigen Haltungsformen, nicht direkt die Menge an potenziell verfügbaren tierischen Exkrementen berechnet werden. Und auch wenn die Tierzahl insgesamt gestiegen ist, so ist auch der Anteil an ökologisch gehaltenen Nutztieren gestiegen, der zum Teil ein geringeres Nutzungspotenzial an Gülle aufweist (auf Grund der Weidehaltung). Deshalb wird für das aktuelle Potenzial der tierischen Exkremente die Studie des DBFZ (2013) herangezogen. Diese basiert auf dem Bezugsjahr von 2010. Damit sind auch die aktuellsten Daten der Haltungsformen erfasst. Mittels der Haltungsform wird auf das technische Potenzial geschlossen, das aber den Punkt der ökonomischen wie auch der ökologischen Betrachtung offen lässt.

Das aktuell geschätzte Reststoffpotenzial an tierischen Exkrementen liegt laut DBFZ Studie bei 96 Mio. t Gülle und 27 Mio. t Festmist. Diese Werte liegen unter den Schätzungen von Zeller et al. (2012) und Gaida et al. (2013) aber über den Werten von Fritsche et al. (2004). Die Transportwürdigkeit wird auch in Zukunft das ausschlaggebende Kriterium bzgl. der Ausschöpfung des Potenzials sein. Im Vergleich zu den geschätzten Werten von Fritsche et al. (2004) haben die Tierzahlen zugenommen, was auch zu einem höheren Gülleanfall führt. Zusätzlich sind die Tierzahlen pro Betrieb gestiegen, was die energetische Verwertung von Gülle evtl. rentabler macht.

Erschwerend für eine zukünftige Schätzung des Potenzials kommen die aktuellen Bedingungen der Tierhaltung hinzu, wie hohe Bauauflagen, Exportverbot nach Russland, stark schwankende Milchpreise, Änderung der Ernährung. Hier kann davon ausgegangen werden, dass diese tendenziell zu einem Rückgang der Tierzahlen führen. Dem entgegen steht möglicherweise aber die gestiegene Einwohnerzahl und die für die Zukunft höher eingeschätzte Geburtenrate, was zu einem höheren Verbrauch an (tierischen) Lebensmitteln führen kann. Aktuell wird durch mehrere Gesetze (Düngeverordnung, TA Luft etc.) der Neubau von Tierställen, insbesondere zur Schweinehaltung, erschwert und hat zu einem gesunkenen Zubau geführt. Auch für die Zukunft wird hier nicht von einer Vereinfachung des Baurechtes für Tierställe und der Haltung von Tieren ausgegangen, so dass im Modell „BAU“ die aktuell angenommenen Werte unter den zuvor genannten Gründen als konstant weitergeführt werden.

Modell „Mit erweiterten Restriktionen“

Im Pflanzenbau wird ein Anteil von 20 % Ökolandbau angestrebt. Dieser ist in vielen Fällen eng mit einer stärker extensiven Tierhaltung verzahnt (Kreislaufwirtschaft). Des Weiteren spielt in der konventionellen Tierhaltung das Tierwohl eine immer größere Rolle. In diesem Bereich ist noch nicht abzuschätzen, ob dies zu einer reinen Zunahme der strohbasierten Haltung und damit des Mistanteils führt, oder ob es nur eine geringere Auswirkung auf das Verhältnis Fest- und Flüssiganteil hat. Zudem ist von einer Zunahme der Weidehaltung und damit einer Reduktion der erfassbaren Wirtschaftsdün-

ger auszugehen. Die Effekte konnten aber auf Basis der betrachteten Studien nicht eingeschätzt werden. Auch nicht berücksichtigt werden konnten die Betriebsgrößen, was insbesondere im Bereich der Transportwürdigkeit eine zentrale Rolle spielt. Hierunter fällt auch die Berücksichtigung von Regionen mit intensiver Tierhaltung, die dadurch bedingt regional ein Problem der Aufnahmefähigkeit von Gärresten haben. Ob die regional hohen Nährstoffüberschüsse zu einer wünschenswerten Reduktion der Tierzahlen führt und wie sich diese auf die Potenziale an tierischen Exkrementen für ganz Deutschland auswirkt, konnte im Rahmen dieser Studie nicht betrachtet werden.

Unter den aktuellen am häufigsten vertretenen Haltungsformen im ökologischen Landbau und unter Betrachtung des Tierwohls wird davon ausgegangen, dass der Anteil an Festmist steigt. Durch eine geringere Tierleistung im Ökolandbau scheiden die Tiere weniger Exkremente aus (KTBL 2015). Grundlegend entscheidend sind jedoch die Entwicklungen der Tierzahlen.

Tabelle 37 zeigt die Abschätzungen der Potenziale an tierischen Exkrementen.

Tabelle 37: Einschätzung der Potenziale bei tierischen Exkrementen

Modell	Bandbreite Studien	Einschätzung		
		2020	2030	2050
„BAU“	80 – 162 Mio. t FM	Gülle 96 Mio. t Festmist 27 Mio. t	Gülle 96 Mio. t Festmist 27 Mio. t	Gülle 96 Mio. t Festmist 27 Mio. t
„Mit erweiterten Restriktionen“	80 – 162 Mio. t FM	Gülle 85 Mio. t Festmist 40 Mio. t	Gülle 74 Mio. t Festmist 53 Mio. t	Gülle 74 Mio. t Festmist 53 Mio. t

Defizite und Daten-/Informationslücken:

- Entwicklung Bevölkerung + Konsumverhalten
- Entwicklung Politik (Außenhandel)
- Haltungsformen aktuell und zukünftig
- Zukünftige Betriebsgröße (Verwertung der Reststoffe auf Kleinbetrieben unwirtschaftlich)
- Zukünftige Entwicklung der Tierzahlen regional und in Deutschland

3.2.3.5 Potenzial an Ernterückständen

Modell „BAU“

Stroh steht im Grunde für einen speziellen Bereich der Ernterückstände, weswegen die genannten Ansätze für Stroh zu großen Teilen auch auf andere Ernterückstände übertragbar sind.

Die Besonderheit in Bezug auf Ernterückstände ist, dass sich das Mengenaufkommen aus verschiedenen Pflanzenarten zusammensetzt, die wiederum Unterschiede im Anbau oder der Ernte haben. Je nach Pflanzenart und Anbauverfahren ergeben sich auch unterschiedliche Ansätze für eine Humusbilanzierung. Der Fokus liegt in den betrachteten Studien auf Kartoffelkraut und Zuckerrübenblatt. Diese Pflanzensorten stellen mit dem größten Flächenanteil neben dem Getreide- und Futtermittelanbau. Für zukünftige Szenarien kann insbesondere bei dem Zuckerrübenanbau im Rahmen der Untersuchung keine genaue Abschätzung hinsichtlich der Anbauflächen und des auslaufenden Zuckerrübenanbaus getroffen werden.

Aktuell schon praktizierte Anbauverfahren, wie beispielsweise Zwischenfrüchte bzw. Untersaaten, wurden in den betrachteten Untersuchungen nicht einbezogen, da in diesem Bereich zum einen nur eine sehr schlechte Datenlage vorhanden ist und zum anderen die Rolle der Verbesserung der Bodenstruktur oft keine Nutzung erlaubt.

Eine gesamte Abschätzung aller Ernterückstände, die in Deutschland anfallen und energetisch oder stofflich genutzt werden können, konnte – aufgrund der Vielfalt an Pflanzensorten mit jeweils differierenden Eigenschaften - im Rahmen dieser Studie nicht mit ausreichender Evidenz erarbeitet werden. Exemplarisch konzentriert sich diese Untersuchung wie auch die meisten untersuchten Studien auf die relevantesten Anbauarten. Dabei handelt es sich um Zuckerrübenblätter und Kartoffelkraut.

Im Kartoffelanbau ist über die letzten Jahrzehnte ein langsamer Rückgang der Anbauflächen zu verzeichnen. Zugleich nehmen die Erträge leicht zu. Beeinträchtigt wird dies aber durch ertragsschwache Jahre, in denen sich der verringerte Anbau verstärkt bemerkbar machte, so dass der Gesamtertrag im Schnitt unverändert ist (Destatis 2017).

Die Schwankungen im Zuckerrübenanbau und deren Ernte sind wesentlich stärker als diejenigen des Kartoffelanbaus. Die Anbaufläche der Zuckerrübe war primär durch die Quote gesteuert und beeinflusst. Das Ende der Quote 2017 hat dabei Auswirkungen auf den Anbau. So stieg die Anbaufläche von 312.000 ha (2015) auf 407.000 ha (2017) an. Damit erreichte man wieder das Anbauniveau von 2005. Zudem ist der Ertrag im Vergleich zu 2005 um über 100 dt/ha gestiegen. Die genauen Ertragszahlen für 2017 liegen noch nicht vor. Dennoch ist von einem erhöhten Rübenblätterertrag auszugehen. Genau Zahlen, wie das Verhältnis Rübe zu Blatt ist gibt es nicht, so dass hier mit bei Beispielwerten gerechnet wurde. Eine zukünftige Entwicklung bezüglich des Quotenendes kann wie bei der Milchviehwirtschaft nicht klar abgeschätzt werden. Es wird angenommen, dass das Potenzial gleich bleibt auf Grund des Quotenendes und dem verstärkten Druck von Zucker aus Zuckerrohr oder Mais.

2017 betrug die Anbaufläche von Kartoffeln 248.000 ha und Zuckerrüben 407.000 ha. Bei einem Ertrag von 30 t/ha Kartoffelkraut (Schönberger, 2010) und 40 t/ha Rübenblatt (Hoffmann, 2011) und einer technischen Nutzbarkeit von etwa 30 % ergibt sich ein Gesamtpotential von rund 7,9 Mio. t. Aufgrund nicht absehbarer Entwicklungen wird dieses geschätzte Potenzial bis 2050 als konstant angesehen.

Modell „Mit erweiterten Restriktionen“

Auch in diesem Bereich wird ein zukünftiger Ökolandbau von 20 % angestrebt. Wie schon beim Reststoffpotenzial von Stroh ist auch im Ökolandbau von Rüben davon aus zu gehen, dass die Rübenblätter als Futtermittel in der Tierhaltung soweit möglich eingesetzt werden. Aber auch in der konventionellen Landwirtschaft können Rübenblätter als Futtermittel dienen und wären in Zukunft ein möglicher Nutzungspfad. Für die Reststoffe ist eine energetische Nutzung in einer Biogasanlage möglich bei anschließender Wiederausbringung des Gärrestes auf den Anbauflächen. Wie auch in dem Kapitel zuvor erwähnt, wird davon ausgegangen, dass 2030 20 % der landwirtschaftlichen Fläche unter ökologischer Bewirtschaftung steht. Auf dieser Basis und unter Berücksichtigung der schon genutzten landwirtschaftlichen Flächen im Ökobau werden die Potentiale bis 2050 grob geschätzt. Es wird davon ausgegangen, dass zukünftig für die energetische Nutzung weniger Ernterückstände als aktuell zur Verfügung stehen werden.

Tabelle 38: Einschätzung der Potenziale bei Ernterückständen (Zuckerrübenblatt und Kartoffelkraut)

Modell	Bandbreite Studien	Einschätzung		
		2020	2030	2050
„BAU“	5,88 – 49,75 Mio. t FM	7,9 Mio. t	7,9 Mio. t	7,9 Mio. t
„Mit erweiterten Restriktionen“	5,88 – 49,75 Mio. t FM	7,9 Mio. t	6,3 Mio. t	6,3 Mio. t

Defizite und Daten-/Informationslücken:

- Potenziale weiterer Ernterückstände
- Entwicklung nach Quotenende Zuckerrüben
- Nutzung als Futtermittel im Ökolandbau
- Verteilung der Anbauflächen (Transportstrecken)

3.2.3.6 Biogut-Potenzial

Modell „BAU“

Biogut unterliegt als Abfall im Sinne des KrWG der dortigen Abfallhierarchie. Vermeidungsansätze (z.B. Vermeidung verdorbener Lebensmittel) sowie Aspekte der Eigenverwertung werden jedoch in den untersuchten Studien kaum thematisiert. Die Potenzialansätze resultieren daher im Wesentlichen aus der Bevölkerungszahl, den (empirischen) spezifischen Erfassungsmengen (kg/E*a), der Anschlussquote an die Biotonne sowie aus den möglichen Erfassungsquoten unter Berücksichtigung der derzeit noch im Restmüll befindlichen biogenen Abfallstoffe (Basis sind Abfallsortieranaysen). Insofern kommt bei neueren Studien der im KrWG (2012) festgelegten Pflicht zur flächendeckenden Einführung der Biotonne eine große Bedeutung – im Sinne steigender Biogut-Massen – zu. Eine mittel- bis langfristige Steigerung der erfassten Biogut-Mengen auf ca. 6 bis 7 Mio. t FM (siehe: Kern, 2014; UMSICHT et al., 2015; Öko 2014) erscheint dabei plausibel. Der Ansatz von Oetjen-Dehne (2015) mit über 9 Mio. t FM erscheint dagegen eher theoretischer Natur zu sein, ist aber aufgrund des Gesamtaufkommens an Organik darstellbar.

Modell „Mit erweiterten Restriktionen“

Erweiterte Restriktionskriterien bei Biogut beziehen sich insbesondere auf die Vermeidung von Küchen-/Lebensmittelabfällen sowie auf den Umgang mit dem Aspekt der Eigenkompostierung.

Kranert et al (2012) gehen von ca. 81 kg/(E*a) an Lebensmittelabfällen aus, von denen signifikante Anteile durch ein höheres Umweltbewusstsein, ein verändertes Konsumverhalten sowie eine angepasste Ernährungsweise vermieden werden könnte. Würden hier nur ca. 10 kg/(E*a) reduziert, könnte das Aufkommen um ca. 0,8 Mio. t FM verringert werden.

Der Umgang mit der Eigenkompostierung unterliegt dagegen derzeit einer ambivalenten Einschätzung. Einerseits ist die Nutzung organischer Reststoffe im eigenen Nutzgarten zur Schließung von Kreisläufen sinnvoll, andererseits werden die organischen Reststoffe oftmals nicht zielführend im Garten eingesetzt und die dortige Kompostierung läuft – im Zusammenhang mit unerwünschten Emissionen (Methan, Sickerwasser) – unzureichend ab (dezentrale „Bio-/Grüngutdeponie“). In diesem Fall wäre daher eine geordnete Erfassung der Materialien über die Biotonne (Küchenabfälle), oder die Grüngutschiene (Gartenabfälle) – in Verbindung mit dortigen Mengenzuwächsen – sinnvoller.

Insgesamt wird daher im Modell „Mit erweiterten Restriktionen“ im Vergleich zum Modell „BAU“ langfristig von einem leicht reduzierten Potenzialansatz ausgegangen.

Folgende Einschätzung wird diesbezüglich getroffen (IST-Wert 2015: 4,19 Mio. t gemäß Destatis Fachserie 19).

Tabelle 39: Einschätzung der Biogutpotenziale

Modell	Bandbreite Studien	Einschätzung		
		2020	2030	2050
„BAU“	3,8 – 9,1 Mio. t	6,0 Mio. t	6,5 Mio. t	7,0 Mio. t
„Mit erweiterten Restriktionen“	3,8 – 9,1 Mio. t	6,0 Mio. t	6,25 Mio. t	6,5 Mio. t

Defizite und Daten-/Informationslücken:

- Stör-/Fremdstoffanteile sind in den Angaben beinhaltet
- Keine Aussage darüber, wie sich eine Änderung der Ernährungsgewohnheiten sowie des Konsumverhaltens auf die Lebensmittelabfälle auswirkt
- Der Garten ist eine relativ große Quelle für biogene Abfälle; insofern wäre eine bessere Einschätzbarkeit der Eigenkompostierungsaktivitäten hilfreich
- Die Mengeneinsätze sollten mit den Bedarfen an Komposten (als Produkt) korrespondieren (derzeit sind hier keine Absatz-Grenzen gesetzt)

3.2.3.7 Grüngut-Potenzial**Modell „BAU“**

Ausgehend von den in den jeweiligen Studien ausgewiesenen aktuellen Erfassungsmengen in einem Bereich von 4 – 5 Mio. t FM pro Jahr wird das Gesamtpotenzial in den ausgewerteten Untersuchungen auf teilweise über 14 Mio. t FM geschätzt (siehe Kapitel 3.1.5.1). Diese hohe (theoretische) Menge resultiert aus dem Ansatz, dass große Teile der Garten- und Parkabfälle entweder im häuslichen Garten verbleiben (Eigenkompostierung, Mulch), verbrannt, oder illegal entsorgt werden. Die diesbezüglich erforderlichen Basisdaten sind allerdings kaum verfügbar.

Daher weichen die meisten Potenzialangaben nur wenig von den realen Erfassungsmengen ab. Eigenkompostierungsaktivitäten (sowie sonstige Entsorgungswege) werden mehr oder weniger konstant gehalten. Daraus resultiert in den Studien größtenteils ein – meist zeitlich undefinierter – Korridor von 4 – 5 Mio. t FM. Insbesondere der holzige Anteil des Grüngutes wird aber als Energieträger zunehmend interessant, so dass der Umgang mit Grüngut – z.B. aus einer kommunalen Sicht – besser organisiert wird. Vor diesem Hintergrund wird – trotz eines erhöhten (kostenpflichtigen) Aufwandes – im Modell „BAU“ von leicht zunehmenden Mengen ausgegangen (die IST-Menge für 2015 lag inkl. Friedhofsabfälle bereits bei ca. 4,65 Mio. t FM gemäß Destatis Fachserie 19).

Modell „Mit erweiterten Restriktionen“

Ziel muss es sein, die unerwünschten Entsorgungsprozesse (Verbrennung im Garten, illegale Verbringung etc.) zu unterbinden und die entsprechenden Mengen einem nachhaltigen Entsorgungsweg zuzuführen. Gleichmaßen sollten Angebote geschaffen werden, die – mangels Nutzgarten – reine Ablagerung von Grüngut (insbesondere Grasschnitt) im Garten zu vermeiden und die entsprechenden Stoffströme einer geordneten Verwertung zu übergeben. Beides kann zu einer signifikanten Erhöhung des Mengenaufkommens führen, so dass der Potenzialansatz unserer Einschätzung nach langfristig auf bis zu 7 Mio. t FM erhöht werden kann.

Folgende Einschätzung wird diesbezüglich getroffen (IST-Wert 2015: 4,65 Mio. t FM gemäß Destatis Fachserie 19).

Tabelle 40: Einschätzung der Grüngutpotenziale

Modell	Bandbreite Studien	Einschätzung		
		2020	2030	2050
„BAU“	4,1 – 6,0 Mio. t	5,25 Mio. t	5,5 Mio. t	5,5 Mio. t
„Mit erweiterten Restriktionen“	4,1 – 6,0 Mio. t	6,0 Mio. t	6,5 Mio. t	7,0 Mio. t

Defizite und Daten-/Informationslücken:

- Eigenkompostierungsaktivitäten sowie unerwünschte Entsorgungspraktiken sind größtenteils unbekannte Größen
- Teilweise schwierige Abgrenzung der Herkunftsbereiche (häuslicher Garten, Friedhofsabfälle, Landschaftspflegematerial, ...)
- Die Mengeneinsätze sollten mit den Bedarfen an Komposten (als Produkt) korrespondieren (derzeit sind hier keine Absatz-Grenzen gesetzt)

3.2.3.8 Altholz-Potenziale

Modell „BAU“

In der Altholz-Branche herrscht eine große Unzufriedenheit hinsichtlich der Belastbarkeit vorhandener Potenzialangaben, da sie zu großen Teilen auf Befragungen hinsichtlich der Marktversorgung aufbauen und – zumindest teilweise - grenzüberschreitende Effekte nicht hinreichend berücksichtigen⁵². Abseits klassischer Potenzialanalysen liefert die aktuellste Marktübersicht derzeit ‚trend research‘⁵³, die von einer Marktversorgung (inkl. 1,1 Mio. t Importe und 2,2 Mio. t Industrierestholz/Altholz aus der Holzverarbeitung) von ca. 10 Mio. t/a ausgehen. Davon werden ca. 1,3 Mio. t stofflich verwertet, 8,4 Mio. t werden energetisch genutzt und ca. 0,3 Mio. t werden exportiert. Die inländische Mengenentwicklung wird dabei – insbesondere aufgrund konjunktureller Effekte - als zunehmend erachtet, wobei bis 2030 von > 10 bis > 12 Mio. t auszugehen ist.

Das „BAU“-Modell wird nunmehr so interpretiert, dass es – ausgehend von den 6,7 Mio. t⁵⁴ (stofflicher Nutzungsanteil: 1,3 Mio. t) und einer guten konjunkturellen Entwicklung⁵⁵ (Charta Holz 2.0) – gelingt, die derzeit noch in Siedlungsmischabfällen befindlichen Holzanteile (ca. 3 Mio. t) verstärkt zu separieren (u.a. Umsetzung der Gewerbeabfallverordnung). Es wird von einem erfassbaren Anteil von 50 % ausgegangen. Das stofflich-energetische Nutzungsverhältnis wird beibehalten. Importe werden nicht berücksichtigt.

Problematisch ist die Einschätzung der als Abfall (und somit als Altholz) deklarierten Industrierestholzer⁵⁶. Trend research gibt hier ein Aufkommen von 2,2 Mio. t an. Es ist jedoch nur schwer nachzuvollziehen, inwieweit dieser Mengenansatz der gesetzlichen Altholzdefinition entspricht. Es wird davon ausgegangen, dass ein großer Anteil davon intern am jeweiligen Produktionsstandort stofflich/energetisch genutzt wird und somit kein Altholz im Sinne des Gesetzes ist.

⁵² Erkenntnisse aus Altholz-Workshop IWES 08/2017

⁵³ trend research GmbH – Institut für Trend- und Marktforschung Bremen, Der Markt für Altholz in Deutschland bis 2030, 29. Kasseler Abfall- und Bioenergieforum, 26.04.2017

⁵⁴ 10 Mio. t abzüglich Importe (1,1 Mio. t) und Industrierestholzanteile (2,2 Mio. t)

⁵⁵ Annahme: diese wird sich aufgrund der Holznutzungsdauer erst im Jahr 2030 in Form eines um 10 % erhöhten Altholzaufkommens bemerkbar machen

⁵⁶ Industrierestholz ist dann Altholz, wenn es als Abfall zur Entsorgung den Produktionsstandort verlässt und nicht zur internen Energieerzeugung/stofflichen Nutzung bzw. zur externen Pelletproduktion genutzt wird.

Modell „Mit erweiterten Restriktionen“

Es wird davon ausgegangen, dass sich – bei einer Beibehaltung der BAU-Gesamtpotenziale – im Sinne der verstärkten Umsetzung von Kaskadenprozessen der stoffliche Nutzungsanteil gegenüber dem Modell „BAU“ erhöht. Der Altholzanteil in der Spanplatte vergrößert sich dabei ab dem Jahr 2030 von ca. 30 % auf 50 %. Dies bedingt im Hinblick auf die Schadstoffproblematik jedoch umfangreiche Maßnahmen zur optimierten Stoffstromtrennung und Qualitätssicherung. Weitere Nutzungen z.B. in anderen Faserprodukten, oder in Bioraffinerien sind zwar grundsätzlich möglich, werden hier jedoch nicht berücksichtigt, da entsprechende Aussagen in den untersuchten Studien nicht erfolgten und dementsprechend ein zusätzlicher Erhebungs-/Untersuchungsaufwand erforderlich wäre.

Tabelle 41: Einschätzung der Altholz-Potenziale (inländisch)

Modell	Bandbreite Studien	Einschätzung		
		2020	2030	2050
„BAU“	6,7 Mio. t – 10 Mio. t	5,8 Mio. t energet. 1,4 Mio. t stofflich	7,2 Mio. t energet. 1,8 Mio. t stofflich	7,2 Mio. t energet. 1,8 Mio. t stofflich
„Mit erweiterten Restriktionen“	6,7 Mio. t – 10 Mio. t	5,8 Mio. t energet. 1,4 Mio. t stofflich	6,7 Mio. t energet. 2,3 Mio. t stofflich	6,7 Mio. t energet. 2,3 Mio. t stofflich

Defizite und Daten-/Informationslücken:

- Probleme hinsichtlich der definitorischen Abgrenzung von Industrieresthölzern
- Einfluss gesetzlicher Änderungen z.B. im Hinblick auf den weiteren Umgang mit der Gleichwertigkeit stofflicher und energetischer Verwertungswege gemäß Altholzverordnung
- Differenzierung nach Altholzkategorien im Hinblick auf die Einschätzbarkeit stofflicher Nutzungsmöglichkeiten; Potenziale neuer Detektionsverfahren
- Marktentwicklung bei Holzprodukten
- Schwierigkeiten bei der Einschätzung von Import-/Exportmengen durch die Anwendung der „Grünen Liste“
- Einschätzung zeitlicher Effekte einer erhöhten stofflichen Holznutzung (Nutzungsdauer der Produkte? Wann werden diese der energetischen Nutzung wieder zugeführt?)
- Effekte aus dem Auslaufen des EEG-Vergütungszeitraumes bei Altholz-Kraftwerken

3.2.3.9 Klärschlamm- und Klärgas-Potenziale

Hinsichtlich der **Klärschlammpotenziale** wird sowohl für das Modell „BAU“ als auch für das Modell „Mit erweiterten Restriktionen“ das aktuell gemäß DWA (2015) vorhandene Aufkommen von 1,85 Mio. t TS zugrunde gelegt und auch in der zeitlichen Dimension angesichts der unklaren demografischen Veränderungen nicht variiert. Es können sich zwar Potenzial-beeinflussende Effekte einstellen, diese sind jedoch in ihrer Auswirkung teilweise gegenläufig⁵⁷ und können im Rahmen der hier vorliegenden Untersuchung nicht abschließend beurteilt werden.

Im Bereich **Klärgas** ist die Daten- und Informationslage der analysierten Potenzialstudien vergleichsweise gering. Die meisten statistischen Daten sind auf Landesebene aggregiert (DWA 2015). Insofern wird im Modell „BAU“ davon ausgegangen, dass im Jahr 2030 das maximale Potenzial der in der Literaturstudie ermittelten Bandbreite erreicht wird. Im Modell „Mit erweiterten Restriktionen“ wird der

⁵⁷ z.B. potenzielle Mengensteigerung durch zusätzliche Fällstufen (P-Fällung) vs. potenzielle Mengenreduktion durch erhöhten Aufwand bei der Schlammstabilisierung (anaerob, Desintegration, etc.)

Umsetzung eines verstärkten Ausbaus der anaeroben Schlammstabilisierung durch einen um 10% erhöhten Ansatz Rechnung getragen.⁵⁸

Tabelle 42: Einschätzung der Klärschlamm-Potenziale (öffentliche Anlagen)

Modell	Bandbreite Studien	Einschätzung		
		2020	2030	2050
„BAU“	1,85 (- 4,7) Mio. t TS	1,85 Mio. t TS	1,85 Mio. t TS	1,85 Mio. t TS
„Mit erweiterten Restriktionen“	1,85 (- 4,7) Mio. t TS	1,85 Mio. t TS	1,85 Mio. t TS	1,85 Mio. t TS

Defizite und Daten-/Informationslücken:

- Statistisch bedingt mögliche Überschneidungen mit industriellen Anlagen
- Keine belastbaren Aussagen zu Effekten aus technischen Veränderungen (P-Rückgewinnung, Stabilisierung, Abwassermanagement z.B. im Hinblick auf Gelb, Braun-, Grau- und Schwarzwasser, etc.)

Tabelle 43: Einschätzung der Klärgas-Potenziale (öffentliche Anlagen; Brennwert Rohgas)

Modell	Bandbreite Studien	Einschätzung		
		2020	2030	2050
„BAU“	5,7 – 6,2 Mio. MWh	6,0 Mio. MWh	6,2 Mio. MWh	6,2 Mio. MWh
„Mit erweiterten Restriktionen“	5,7 – 6,2 Mio. MWh	6,6 Mio. MWh	6,8 Mio. MWh	6,8 Mio. MWh

Defizite und Daten-/Informationslücken:

- Keine bundesweiten Angaben zu den Anlagen zur Klärgasgewinnung und -nutzung
- Kaum Berücksichtigung des Sachverhaltes in Biomasse-Potenzialanalysen; z.B. hinsichtlich der möglichen Nutzung einer anaeroben Stabilisierung auch in kleineren/mittleren Kläranlagen (> 10.000 EW)
- Keine Aussage zu den Effekten technischer Ergänzungen z.B. im Hinblick auf einen verbesserten Zellaufschluss (Desintegration); auch im Hinblick auf die Auswirkungen auf den Heizwert der stabilisierten Schlämme

3.2.3.10 Potenziale aus sonstigen Fraktionen im Siedlungsbereich

Auf eine Ableitung von „BAU-“ und „Mit erweiterten Restriktionen-Modellen“ hinsichtlich der erschließbaren Potenziale aus sonstigen, in Kapitel 0 thematisierten Fraktionen des Siedlungsbereiches wird hier verzichtet. Für „Küchen- und Kantinenabfälle“ und „Altöle/-fette“ werden mangels Überprüfbarkeit und potenzieller Überschneidungen mit anderen Angaben lediglich orientierende Werte auf Basis der untersuchten Studien dargestellt (Kap. 3.2.3.11). Für „Deponiegas“, „Textilien“ und „Marktabfälle“ werden keine erschließbaren Potenziale für die Modelle „BAU“ und „Mit erweiterten Restriktionen“ angegeben und im weiteren Projektverlauf nicht weiter berücksichtigt. Folgende Gründe lassen sich bezüglich der einzelnen Stoffströme darstellen:

⁵⁸ Der Ansatz ist eine Schätzgröße, die es zu verifizieren gilt. Die Klärgasmenge ist zwischen 2008 und 2013 gemäß DWA (2015) um 19 % angestiegen. Es wird davon ausgegangen, dass sich die Ausbaukurve für anaerobe Stabilisierungsverfahren (Modifikation vorhandener Anlagen) abflacht, da diese bei kleineren Anlagen unwirtschaftlich werden und die großen Anlagen bereits zu großen Teilen umgestellt sind.

Deponiegas	Mittel- bis langfristig von abnehmender Relevanz (nur noch Schwachgase). Theoretische Gasmengenprognosen sind zwar möglich, korrespondieren jedoch – gerade bei rückläufigem Gasaufkommen – hinsichtlich Kontinuität und Qualität (Methangehalte) selten mit den praktischen (realen) Gegebenheiten.
Textilien	Werden im Rahmen von Potenzialanalysen in der Regel nicht thematisiert. Aufgrund von häufig privatwirtschaftlich oder caritativ organisierten Erfassungsaktivitäten existiert eine größtenteils unzureichende Datenbasis, welche zudem in der Regel Mischtextilien ohne Differenzierung hinsichtlich der biogenen Anteile (Naturfasern) ausweist. Hier sind eigene Erhebungen erforderlich.
Küchen- und Kantinenabfälle	Die Herkunftsbereiche sind heterogen (Gastronomie, Kantinen, Pflegeheime, Kindergärten, Handel, Lebensmittelproduzenten, etc.). Hier besteht die Gefahr von Überschneidungen mit kommunal erfassten Bioabfällen sowie mit gewerblich/industriellen Substraten (private Erfassung), so dass insgesamt von einer unscharfen Datenlage auszugehen ist. Studien im Sinne von Biomasse-Potenzialanalysen weisen diesen Stoffstrom nicht in separater Form aus. Aussagen sind in einer wenig spezifizierten Form lediglich bei Studien zu Teilströmen (hier: Bioabfallthematik) zu finden. Problematisch hinsichtlich der Erfassungs- und Verwertungsvorgänge ist dabei die erforderliche Differenzierung nach Stoffen tierischer und pflanzlicher Herkunft bzw. Gemischen. Bei den bereits separat erfassten Mengen kann aufgrund des hohen Gaspotenzials davon ausgegangen werden, dass diese mit zunehmender Tendenz anaerob verwertet werden. Zur Absicherung der in Kapitel 3.1.5.4 genannten Mengenansätze sind daher zusätzliche Erhebungen erforderlich.
Marktabfälle	Marktabfälle weisen ein – im Gesamtkontext - eher vernachlässigbares Mengenaufkommen auf. Sie bestehen zudem aus einem Gemisch aus biogenen Rückständen, aus Verpackungen (zumeist Holz, Kartonagen und Kunststoffe) sowie in geringeren Anteilen aus Restmüll, so dass differenzierte Betrachtungen bezüglich möglicher Biomasse-Verwertungsansätze erforderlich sind. Zur Absicherung der in Kapitel 3.1.5.4 genannten Mengenansätze sind daher zusätzliche Erhebungen erforderlich.
Altöle/-fette	Die wenigen Studien, die Aussagen zu Altölen und Altfetten machen, liefern eine sehr heterogene Datenlage einerseits hinsichtlich der Mengenangaben, andererseits hinsichtlich der Abgrenzung zwischen separat erfassten Mengen (z.B. ‚Fettbox‘) und der Entsorgung von Fettabscheiderinhalten. Daher sind auch hier separate Erhebungen erforderlich um zu belastbaren Aussagen zu kommen. Zudem mögliche Überschneidungen mit Küchen- und Kantinenabfällen.
Biogene Abfälle im Restmüll	Der organische Anteil im Restmüll wird hier nicht als solcher ausgewiesen, da er auch in den untersuchten Potenzialstudien nicht als solcher thematisiert wird. Eine indirekte Berücksichtigung erfolgt lediglich durch höhere Erfassungsanteile z.B. von Biogut und Holz. Sonstige biogene Anteile des Mischmülls wie z.B. Papier, Textilien und Leder werden jedoch nicht berücksichtigt. Um diesbezüglich im Rahmen der technischen Beurteilung Anhaltswerte zu haben wird eine Parameterliste zu Siedlungsmischabfällen im Anhang A dokumentiert.

3.2.3.11 Potenziale aus industriellen biogenen Substraten

Reststoffpotenziale aus der Industrie sind vorhanden jedoch zum Großteil in etablierten Nutzungen, v.a. als Futtermittel. Im Bereich der Rückstände aus der Lebens- und Genussmittelindustrie wäre eine alternative Verwendung der Reststoffe vor allem vor dem Hintergrund sich ändernder Bedingungen in der Landwirtschaft (Rückgang der Tierhaltung) und damit der Absatzmärkte eventuell möglich. Ein weiterer Aspekt betrifft die Wirtschaftlichkeit der Reststoffnutzung, die durch alternative Verwendungen interessanter werden könnte. Kaltschmitt et al. (2016) geben für das Aufkommen von organischen Reststoffen aus Industrie und Gewerbe von etwa 300 kg/(EW*a) Frischmasse bzw. 80 kg/(EW*a) Trockenmasse an. Sie geben des Weiteren an, dass dieses Aufkommen durch hohe Wasser- und Nährstoffgehalte charakterisiert ist. Daher werde ein Großteil als Futtermittel verwertet und steht für die energetische Nutzung nicht oder nur sehr eingeschränkt zur Verfügung.

Potenziale sehen die Studien (u.a. Gaida et al. 2013, Kranert et al. 2012, Klöck und Noke 2008, Mahro 2010) bei Reststoffen aus der Lebens- und Genussmittelindustrie. Das Potenzial dieser festen industriellen Substrate beläuft sich auf 1,7 Mio. t – 2,8 Mio. t. Für das Modell „BAU“ wird die untere Grenze angesetzt, die Werte für das „MER“ entsprechen der ambitionierten Hebung der oberen Grenze des Potenzials. Das Potenzial an industriellen Altspesiefetten und Altölen ist im Gegensatz zu kommunalen Altölen und -fetten bereits in Nutzung. Die hohe Importquote deutet ebenfalls daraufhin, dass die heimischen Kapazitäten aufgebraucht sind. Daher wird angenommen, dass aus industriellen Altölen und -fetten keinerlei Potenziale zur Verfügung stehen.

In Bezug auf die Nutzung von tierischen Nebenprodukten und Schlachtabfällen konnte festgestellt werden, dass langfristig die stoffliche Nutzung von TNP (wieder) zunehmen wird und das Maximum der energetischen Nutzung damit erreicht bzw. überschritten ist. Gründe hierfür sind vor die Diskussion um die Sicherung der Eiweißversorgung der Nutztiere in der EU sowie die fortschreitende technische Entwicklung zuverlässiger Nachweisverfahren für verbotene Stoffe in den Futtermitteln. Eine Aussage über die zukünftigen Mengenströme und Verwendungen ist aber aus heutiger Sicht nicht möglich, weshalb ausgehend von den Angaben in Kapitel 3.1.6.1 nur pauschal eine leichte Reduktion der Potenziale angenommen wurde und nicht zwischen den Modellen „BAU“ und „MER“ unterschieden wurde. Die Potenziale für Tiermehl, Tierfette und Fleischbrei liegen zw. 684.000 t und 1.816.000 t.

Industrierestholz wird überwiegend stofflich genutzt, aber Potenziale zur energetischen Nutzung konnten in Höhe von 3,85 Mio. t FM identifiziert werden. Weitere Abschlüsse im Sinne des Modell „MER“ werden angesichts der bereits sehr hohen der stofflichen Nutzung zugewiesenen Waldholz-mengen (4 Mio. t in 2050, siehe Kapitel 3.2.3.1) als schwer realisierbar eingeschätzt. Die aus dem Gesamtpotenzial an Wald-, Alt- und Industrieholz der künftigen stofflichen Nutzung zugerechneten Mengen setzen bereits große Ambitionen für eine Umsetzung voraus. Entsprechend wurde auf eine Differenzierung zwischen den Modellen „BAU“ und „MER“ verzichtet.

Das Substrat Schwarzlauge aus der Zellstoffproduktion wird zwar überwiegend für Strom- und Prozesswärmeerstellung genutzt. Hier wird nach Brosowski et al (2015) angenommen, dass 1,7 Mio. t_{atro} als Potenzial zur Verfügung stehen.

3.2.3.12 Zusammenfassung

Wie aus den vorausgehenden Beschreibungen zu den einzelnen Materialien bereits hervorgeht, unterliegen nicht unwesentliche Anteile der als verfügbar beschriebenen Potenziale bereits einer energetischen Nutzung. Bestimmte Abfälle wie Restmüll oder belastete Althölzer müssen von Rechts wegen mit energetischer Nutzung verbrannt werden. Bei Waldholz ist die Sachlage sogar so, dass das hier abgeleitete Potenzial von 11 Mio. t_{atro} deutlich unter der derzeit energetisch genutzten Waldholzmenge von ca. 17 Mio. t_{atro} liegt (nach Mantau et al. 2018)

Auf der Basis der obigen Herleitungen lassen sich für die Modelle „BAU“ und „Mit erweiterten Restriktionen“ (MER) die in Tabelle 44 zusammengefassten Potenzialansätze darstellen.

Tabelle 44: Zusammenfassung der Potenzialansätze

Stoffstrom	Modell	2020	2030	2050
Waldholz	BAU	11 Mio. t _{atro}	10 Mio. t _{atro}	10 Mio. t _{atro}
	MER	11 Mio. t _{atro}	10 Mio. t _{atro}	6 Mio. t _{atro}
Landschaftspflege Holz	BAU	1,084 Mio. t FM	1,084 Mio. t FM	1,084 Mio. t FM
	MER	1,084 Mio. t FM	1,084 Mio. t FM	1,084 Mio. t FM
Landschaftspflege Halm	BAU	1,215 Mio. t FM	1,215 Mio. t FM	1,215 Mio. t FM
	MER	1,215 Mio. t FM	1,215 Mio. t FM	1,215 Mio. t FM
Stroh	BAU	13 Mio. t	13 Mio. t	13 Mio. t
	MER	12,4 Mio. t	11,1 Mio. t	11,1 Mio. t
Gülle	BAU	96 Mio. t FM	96 Mio. t FM	96 Mio. t FM
	MER	85 Mio. t FM	74 Mio. t FM	74 Mio. t FM
Festmist	BAU	27 Mio. t FM	27 Mio. t FM	27 Mio. t FM
	MER	40 Mio. t FM	53 Mio. t FM	53 Mio. t FM
Ernterückstände	BAU	7,9 Mio. t FM	7,9 Mio. t FM	7,9 Mio. t FM
	MER	7,9 Mio. t FM	7,1 Mio. t FM	7,1 Mio. t FM
Biogut	BAU	6,0 Mio. t FM	6,5 Mio. t FM	7,0 Mio. t FM
	MER	6,0 Mio. t FM	6,25 Mio. t FM	6,5 Mio. t FM
Grüngut	BAU	5,25 Mio. t FM	5,5 Mio. t FM	5,5 Mio. t FM
	MER	6,0 Mio. t FM	6,5 Mio. t FM	7,0 Mio. t FM
Altholz - energetisch	BAU	5,8 Mio. t	7,2 Mio. t	7,2 Mio. t
	MER	5,8 Mio. t	6,7 Mio. t	6,7 Mio. t
Klärschlamm (kommunal)	o. Diff. ^{a)}	1,85 Mio. t TS	1,85 Mio. t TS	1,85 Mio. t TS
Klärgas (kommunal)	BAU	6,0 Mio. MWh	6,2 Mio. MWh	6,2 Mio. MWh
	MER	6,6 Mio. MWh	6,8 Mio. MWh	6,8 Mio. MWh
Küchen- und Kantinenabfälle	o. Diff. ^{a)}	0,6 Mio. t FM	0,6 Mio. t FM	0,6 Mio. t FM
Altöle/-fette	o. Diff. ^{a)}	0,05 Mio. t FM	0,05 Mio. t FM	0,05 Mio. t FM
Industrierestholz	o. Diff. ^{a)}	3,85 Mio. t FM	3,85 Mio. t FM	3,85 Mio. t FM
Industrielles Klärgas	o. Diff. ^{a)}	1,1 PJ	1,1 PJ	1,1 PJ
Industrieller Klärschlamm	o. Diff. ^{a)}	7,1 PJ	7,1 PJ	7,1 PJ

Tabelle 44: Zusammenfassung der Potenzialansätze

Stoffstrom	Modell	2020	2030	2050
Feste industrielle Substrate (Reststoffe aus der Lebensmittel- und Genussmittelindustrie)	BAU	1,7 Mio. t.	1,7 Mio. t.	1,7 Mio. t.
	MER	2,8 Mio. t	2,8 Mio. t	2,8 Mio. t
Schlachtverarbeitung Tiermehl	o. Diff. a)	0,684 Mio. t	0,674 Mio. t	0,674 Mio. t
Schlachtverarbeitung/Tierfett	o. Diff. a)	0,316 Mio. t	0,311 Mio. t	0,311 Mio. t
Fleischbrei	o. Diff. a)	1,842 Mio. t	1,816 Mio. t	1,816 Mio. t
Schwarzlauge	o.Diff.	1,757 Mio. t	1,757 Mio. t	1,757 Mio. t

a) ohne Differenzierung; siehe Erläuterungen in Kap. 3.2.3.10; die Schätzung für Altöle/-fette stellt den unteren Wert der in Kapitel 3.2.3.11 angegebenen Bandbreite dar, bei Küchen- und Kantinenabfällen den Mittelwert.

Eigene Zusammenstellung: IZES, Öko-Institut

Für die biogenen Anteile in Siedlungsmischabfällen werden hier keine Daten ausgewiesen, da die untersuchten Potenzialstudien diesbezüglich keine Angaben aufweisen und eine entsprechende Potenzialermittlung eine detaillierte Betrachtung der starken Interaktion mit der Entwicklung getrennter Erfassungsmengen erforderlich macht. Zudem müssten gegebenenfalls Effekte im Sinne einer vergrößerten Bandbreite Biomasse-basierter Produkte (z.B. Biokunststoff, Holzprodukte) berücksichtigt werden. Um im Rahmen der technischen Beurteilung trotzdem Größenordnungen analysieren zu können, werden quantitative und qualitative Angaben in den parameterlisten im Anhang A hinterlegt. Demnach ist gemäß Destatis (2017) von folgenden Mischmüllmengen auszugehen:

- Hausmüll 14,147 Mio. t,
- Sperrmüll 2,495 Mio. t und
- hausmüllähnliche Gewerbeabfälle 3,506 Mio. t.

Bei diesen Mischmüllmengen wurde für die weitere Betrachtung von einem durchschnittlichen biogenen Anteil von ca. 42 % ausgegangen.

4 Einsatzmöglichkeiten der Potenziale – Konversionstechnologien

4.1 Definition und Beschreibung von Konversionstechnologien für biogene Abfall- und Reststoffe in den Sektoren Strom/Wärme/Verkehr

Gegenwärtig werden biogene Abfall- und Reststoffe in drei verschiedenen Anwendungsbereichen energetisch genutzt – im Verkehr, zur Stromerzeugung und zur Wärmebereitstellung.

Die Beschreibung der im Rahmen dieser Studie untersuchten Technologien erfolgt für die Konversionsarten Verbrennung, Vergasung, Vergärung, alkoholische Fermentation und Umesterung. Enthalten sind sowohl etablierte Technologien als auch Technologien, die zukünftig möglicherweise eine Rolle spielen werden (s. Kapitel 4.2). Neben der Vielfalt der Konversionsarten war insbesondere auch die Vielfalt von Abfall- und Reststoffen, die genutzt werden können von Interesse.

Für die Bewertung der Einsatzmöglichkeiten wurden die in Tabelle 45 aufgeführten Technologiearten ausgewählt und in Steckbriefen (siehe Anhang B) beschrieben.

Tabelle 45: Übersicht über die Konversionstechnologien und näher betrachteten Techniken

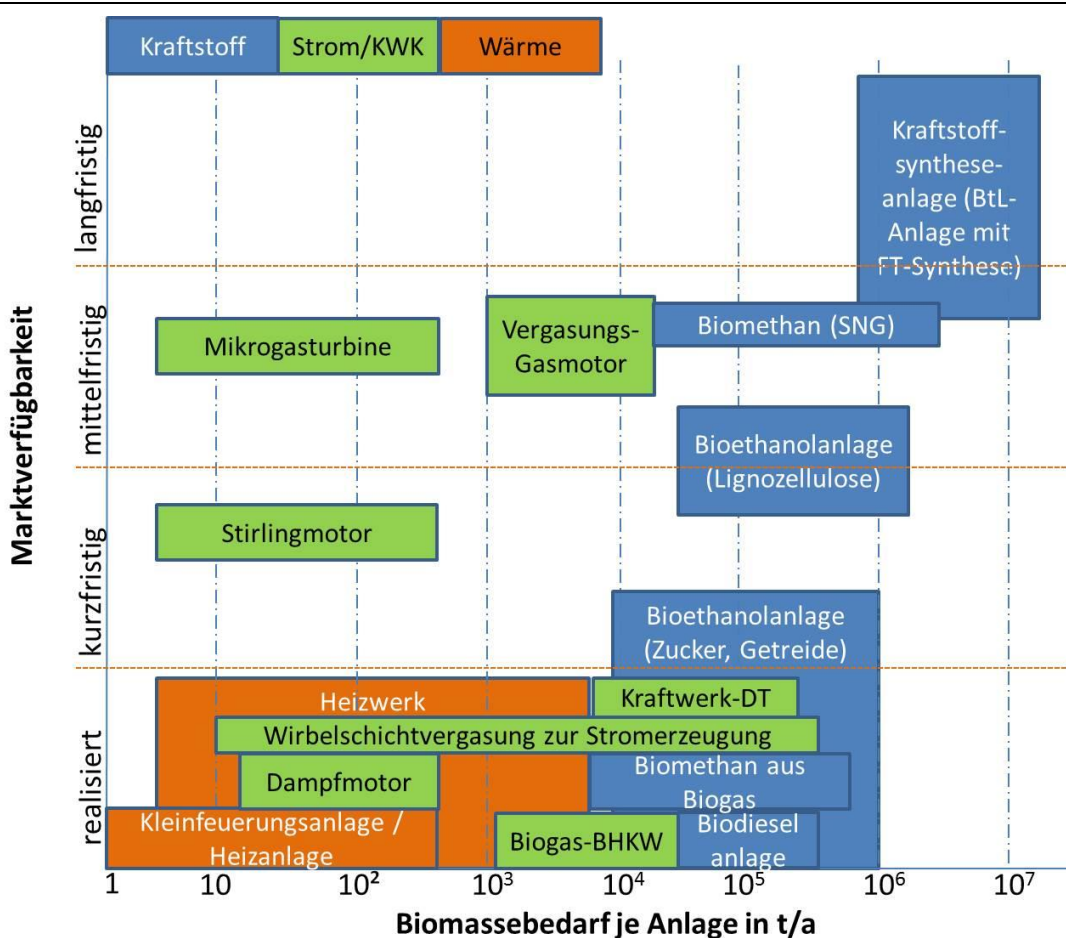
Konversionstechnologie	konkret betrachtete Konversionstechniken
Verbrennung	Holzpelletzentralheizung 15 kW _{th}
	Holzhackschnitzelkessel 500 kW _{th}
	Heizkraftwerk 5 MW _{el}
	ORC HKW 250 kW _{el}
	Klärschlammverbrennungsanlage 10 MW
	Mitverbrennung fester Biomasse im Kohle-KW
	Abfallverbrennungsanlage 50 MW
Vergasung	Kleinvergaser 30 kW
	Holzvergaser 10 MW _{el}
	Bio-SNG 25 MW
	BtL 100 MW
Vergärung	Biogasanlage 75 kW _{el}
	Bioabfallvergärung 500 kW - Nassvergärung
	Bioabfallvergärung 800 kW - Trockenvergärung
	Biomethananlage 2 MW - Nassvergärung
	Biomethananlage 2 MW - Trockenvergärung
Alkoholische Fermentation	Ethanolanlage
Umesterung	Biodieselanlage

Quelle: eigene Zusammenstellung Öko-Institut, IZES, ifeu

4.2 Zukünftige Konversionskonzepte in den Sektoren Strom/Wärme/Verkehr

Es ist davon auszugehen, dass der Strom-, Wärme –und Kraftstoffmarkt in den kommenden Jahrzehnten stärker integriert wird (Stichwort Sektorkopplung). Fortschrittliche Konversionstechnologien, Bio-raffinerien und die Kaskadennutzung von Biomasse werden vermutlich immer stärker in den Vordergrund rücken. Nach Kaltschmitt et al. (2016) werden mittel- und langfristig insbesondere die Produktion von Bioethanol auf Basis von Lignozellulose und die Gewinnung von synthetisiertem Biomethan als Kraftstoff relevant. Entsprechend wurden diese Technologien ebenfalls in Steckbriefen beschrieben. Im Stromsektor werden mittelfristig v.a. eine höhere Marktverfügbarkeit von Vergasungs-Gasmotoren und Mikrogasturbinen erwartet. Aus diesem Grund wird auch die Holzvergasung näher betrachtet. Der Wärmesektor wird hingegen als weniger innovativ angesehen, da hier die meisten Technologien bereits etabliert sind. Die Auswahl der in den Steckbriefen betrachteten Technologien ist entsprechend vorhanden. Sie sind aber nicht als Zukunftstechnologien, sondern als etablierte Technologien zu betrachten.

Abbildung 20: Marktverfügbarkeit und Biomassebedarf von Konversionstechnologien



Eigene Darstellung Öko-Institut, nach (Kaltschmitt et al. 2016)

Die einzelnen Technologiesteckbriefe mit der Beschreibung der Konversionskonzepte sind im Anhang B zu finden. Beispielhaft ist auf den folgenden Seiten der Steckbrief für eine Holzpelletzentralheizung dargestellt.

Tabelle 46: Beispielhafter Technologiesteckbrief für eine Holzpelletzentralheizung

Holzpelletzentralheizung 15 kW _{th} (T1)	
Konversion	Verbrennung
Technologie	Einzelfeuerung Wärme
Produkt	Wärme
Eingesetzter Abfall- und Reststoff (ggf. Beschreibung)	Holzpellets aus Waldrestholz (inklusive Vorkette, d.h. Energieaufwand für die Herstellung der Pellets aus Säge- und Hobelspänen enthalten)
Beschreibung der Technik	Beschreibung: Unterschubfeuerung und Verbrennung normierter Holzpellets Prozesskette: Unterschubfeuerung Holzpellets, Verbrennung der Produktgase in der Brennkammer, Kombispeicher zur Wassererwärmung, ein möglicher Pufferspeicher nimmt die aktuell nicht nachgefragte Wärme vom Pelletkessel auf und hält sie vorrätig, ist aber nicht zwingend erforderlich ¹ Leistungsspektrum: 10- 300 kW_{th}, meist monovalenter Einsatz durch gute Regelbarkeit, typisch sind 15 kW_{th} oder 220 kW_{th} ¹
Chemisch / Physikalische Eingangsparameter	Geeignet für Wassergehalt von bis: Je nach Jahreszeit und Behandlungsart 20-50% (lufttrocken bis Erntefrisch) geeignet für Heizwert/Brennwert von bis: Brennwert: pro t atro 18,5 GJ Heizwert W=20%: 14,4 GJ/t Heizwert W=40%: 10,1 GJ/t geeignet für Gasbildungspotenzial bei C/N Verhältnis von bis: nicht relevant, abhängig vom Rindenanteil
Struktur des Inputmaterials ohne aufwändige Vorbehandlung	geeignet für Korngröße von bis: Korngröße meist qualifiziert nach DIN EN ISO 17224 Teil 4: 1,5 – 4,5 cm geeignet für Inputmatrix bezüglich holzig/krautig/in Lösung: Holzig geeignet für Störstoffart und Störstoffanteil (z.B. Quecksilber): hohe Rindenanteile möglich, hier Gefahr der Schlackebildung und verstärkter Ascheanfall
Inputcharakteristik	Flexibilität bei zeitlich unterschiedlichem Anfall (Batchbetrieb, kontinuierlich): kontinuierlich Flexibilität bei Mengenunterschieden im Input von bis (typische Anlagengrößen): automatische Beschickung
Outputcharakteristik	Anwendungsbereich des erzeugten Energieprodukts (Strom, Wärme, Kraftstoff): Wärme zeitliche und räumliche Flexibilität bei der Abnahme des Energieprodukts: räumlich nicht flexibel, da feststehende Einzelanlage im Gebäude, über Pufferspeicher, kann die Wärme bei Bedarf abgerufen werden

Tabelle 46: Beispielhafter Technologiesteckbrief für eine Holzpelletzentralheizung

Holzpelletzentralheizung 15 kW _{th} (T1)	
Technologiecharakteristik	Energieaufwand bei Behandlung von Eingangsstoffen ohne größere Vorbehandlung: 2,7% der Endenergie von Pellets (zum Vergleich Erdgas 10%, Heizöl 12%) ⁴ Bewertung Gesamtwirkungsgrad bis Energieprodukt: niedriger Erfüllungsgrad ¹¹ typische Größenordnung der Emission von Treibhausgasen bei der Behandlung: 7,4 g CO₂Äq/MJ Wärme, Referenzwert 80 g CO₂Äq/MJ Wärme ⁴ Komplexität der Technologie (einfach, komplex): Einfach Entwicklungsstand (Stand der Technik, Pilotanlage): ausgereifte Technologie mit geringen Optimierungspotenzialen ¹ Entwicklungsbedarf: Bedarf besteht im Hinblick auf intelligente Steuerung der Anlage und Integration im Systemverbund, mögliche Erweiterung sind Mikro-KWK, zukünftig wird erwartet, dass Kleinvergasung als Technologie umgesetzt wird ¹
Kosten und Erlöse	Behandlungskosten / Herstellungskosten pro Menge: Rohstoffkosten Sägereistholz 160.225 €/t ⁶ Brennstoffkosten Pellets: 4,91 ct/kWh Investitionskosten pro Anlage: 500 -1.500 €/kW_{th} davon 300 - 1.100 €/kW für den Kessel (bei 15 kW_{th}) ¹ Gestehungskosten: ¹¹ 3,56 Cent/MJ_{th},. Referenz 2,8 Cent/MJ_{th} Bereitstellungskosten: ¹⁰ Mittel (eigene Abschätzung) Pellets 96 €/Mg TM
Verwendete Literatur	¹ DBFZ (2015): Bioenergie-Technologien. Fokusheft. 2. Auflage ² FNR (2015): Marktübersicht Scheitholzvergaserkessel. ³ FNR (2017): Basisdaten Bioenergie. ⁹ Kaltschmitt et al. (2016): Energie aus Biomasse ¹⁰ Leible et al. (2003): Energie aus biogenen Abfall- und Reststoffen. FZKA 6882 ¹¹ eigene Bewertung, siehe Kapitel 6, Gesamtbericht Aus dem Internet: ⁴ Deutsches Pellet-Institut: http://www.depi.de/de/heizen_mit_pellets/pelletheizsysteme/zentralheizungen/ http://www.depi.de/de/energietraeger_pellets/was_sind_pellets/herstellung/ ⁵ Heizsparer: https://www.heizsparer.de/energie/holzpellets/holzpellets-herstellung ⁶ Holz von hier: https://www.holz-von-hier.de/bioenergie/pdf/Info_Wirtschaftlichkeit_2.pdf ⁷ Deutscher Energieholz- und Pellet-Verband e.V.: www.depv.de ⁸ Carmen: https://www.carmen-ev.de/infotehk/preisindizes/holzpellets/graphiken/120-der-pellet-preis-in-dex-graghiken ¹² http://www.evur.tu-berlin.de/fileadmin/fg45/Projekte/Grossbeeren/Info_allg/Waermekosten_unt_Heizungsanlagen.pdf

5 Bewertung der Eignung Abfall/Reststoff - Technologie

5.1 Grundlegende Eingangsinformationen

5.1.1 Potenziale der Abfall- und Reststoffe

Die Mengen an verfügbaren biogenen Abfall- und Reststoffen wurden in Kapitel 3 ausführlich analysiert und definiert.

Um das gesamte Energiepotenzial für eine energetische Verwertung aller Rest- und Abfallstoffe zu ermitteln, wurden die gewählten Mengen mit ihren Heizwerten in Beziehung gebracht – das entspricht dem *Primärenergiepotenzial*. Daraus ergibt sich das in Tabelle 48 zusammengestellte Energiepotenzial, das den Konversionstechniken zur Verfügung gestellt wird. Diese Energiemenge entspricht nicht der letztendlich nutzbaren Energie, da die Umwandlungsverluste der jeweiligen Konversionstechnik bezogen auf erzeugte Energieprodukte zu einer anderen Energiemenge führen wird.

Der Energiewert wird dabei, wie in Tabelle 47 aufgeführt,

- ▶ entweder durch den unteren Heizwert (bei Abfall-/Reststoffen, die einen positiven Heizwert besitzen und grundsätzlich durch Verbrennung energetisch genutzt werden können)
- ▶ oder durch die spezifische Gasbildungsrate (bei Abfall-/Reststoffen, die aufgrund hohen Wassergehalts keinen positiven Heizwert besitzen und deren energetische Nutzung durch Vergärung erfolgt) ausgedrückt.

Tabelle 47: Abfall- und Reststoffe, deren physikalische Eigenschaften und Mengen in Masse und Energiegehalt für das Modell BAU und das Jahr 2020

Nr.	Bezeichnung Abfall / Reststoff	Heizwert H_i oder Wassergehalt	H_i Rechenwert	Biogasbildung	Primärnergiepotenzial für BAU 2020		
					in Masse		in PJ
R1	Waldholz	18,5 GJ / t_{atro}	18,5		11 Mio. t_{atro}		203,5
R2	Landschaftspfl.-Halm	WG:50-80%	-	6,1	1,22 Mio. t FM		2,6
R3	Landschaftspflege-Holz	15 GJ / t FM	15,0		1,08 Mio. t FM		16,3
R4	Stroh	14,4 GJ / t FM	14,4	7,9	13 Mio. t FM		187,2
R5	Gülle	WG:88-97%	-	5,5	96 Mio. t FM		52,8
R6	Festmist	WG:40-75%	-	6,1	27 Mio. t FM		49,0
R7	Ernterückstände	WG:82-85%	-	6,9	7,9 Mio. t FM		10,9
R8	Biogut (Biotonne)	3,1 -5,0 GJ / t FM	4,1	5,0	6,0 Mio. t FM		24,3
R9	Grüngut krautig a)	WG: 75%	-	6,1	3,68 Mio. t FM		5,6
R10	Grüngut holziga)	10 GJ / t FM	10		1,58 Mio. t FM		15,8
R11	Altholz	13,25 -16 GJ / t	14,6		5,8 Mio. t FM		84,8
R12	Klärschlamm komm.	6,8 -13,6 GJ / t TS H_s	10,2		1,85 Mio. t TS		18,9
R13	Klärgas kommunal				6,0 Mio. MWh		21,6
R14	biog. Abfälle im Restmüll	5 GJ / t FM	5		8,49 Mio. t FM		42,5
R15	Altöle/Fette	32 GJ / t	32	27,5	0,05 Mio. t		0,1
R16	Schwarzlauge	12,1 GJ / t	23,4		1,757 Mio. t_{atro}		41,1
R17	Industrierestholz	13,2 - 16 GJ / t	14,4		3,85 Mio t FM		55,4
R18	Klärschlamm industr.	6,8 -13,6 GJ / t TS	10		0,71 Mio. t TS		7,1
R19	Klärgas industriell				1,1 PJ		1,1
R20	Feste industr. Substrate	22,5 GJ / t	22,5		1,7 Mio. t		38,3
R21	Tiermehl	19,1 GJ / t	19,1		0,684 Mio. t		13,1
R22	Tierfett	36,6 GJ / t	36,6		0,316 Mio. t		11,6
R23	Fleischbrei	7,6 GJ / t	7,6		1,842 Mio. t		14,0
R24	Küchen- u. Kantinenabfälle	WG:75-88%	-	5,0	0,928 Mio. t		0,7
	Summe				201,7 Mio. t		918

Eigene Zusammenstellung: ifeu, IZES, Öko-Institut

a) Die Unterscheidung in krautiges und holziges Grüngut ergibt sich aus der unterschiedlichen Eignung für eine Verarbeitung (siehe dazu im Stoffsteckbrief in Anhang A)

Tabelle 48: Abfall- und Reststoffe nach Energiepotenzialen für die Modelle BAU und „Mit erweiterten Restriktionen“, jeweils für die Stützjahre 2020, 2030 und 2050

Nr.	Bezeichnung Abfall / Reststoff	Energiepotenziale					
		BAU 2020	MER 2020	BAU 2030	MER 2030	BAU 2050	MER 2050
R1	Waldholz	203,5	203,5	185,0	185,0	185,0	111,0
R2	Landschaftspflege-Halm	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6
R3	Landschaftspflege-Holz	16,3	16,3	16,3	16,3	16,3	16,3
R4	Stroh	187,2	178,6	187,2	159,8	187,2	159,8
R5	Gülle	52,8	46,8	52,8	40,7	52,8	40,7
R6	Festmist	49,0	72,6	49,0	96,2	49,0	96,2
R7	Ernterückstände	10,9	10,9	10,9	9,8	10,9	9,8
R8	Biogut (Biotonne)	24,3	24,3	26,3	25,3	28,4	26,3
R9	Grüngut krautig	5,6	6,4	5,8	6,9	5,8	7,4
R10	Grüngut holzig	15,8	15,8	16,5	19,5	16,5	21,0
R11	Altholz	84,8	84,8	105,3	98,0	105,3	98,0
R12	Klärschlamm kommunal	18,9	18,9	18,9	18,9	18,9	18,9
R13	Klärgas kommunal	21,6	23,8	22,3	24,5	22,3	24,5
R14	biogene Abfälle im Restmüll	42,5	42,5	42,5	42,5	42,5	42,5
R15	Altöle/Fette	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
R16	Schwarzlauge	41,1	41,1	41,1	41,1	41,1	41,1
R17	Industrierestholz	55,4	55,4	55,4	55,4	55,4	55,4
R18	Klärschlamm industriell	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1
R19	Klärgas industriell	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
R20	Feste industrielle Substrate	38,3	63,0	38,3	63,0	38,3	63,0
R21	Tiermehl	13,1	13,1	12,9	12,9	12,9	12,9
R22	Tierfett	11,6	11,6	11,4	11,4	11,4	11,4
R23	Fleischbrei	14,0	14,0	13,8	13,8	13,8	13,8
R24	Küchen- u. Kantinenabfälle	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
	Summe	918,0	957,3	923,6	952,9	925,7	882,0

Eigene Zusammenstellung: ifeu

5.1.2 Konversionstechnologien

In Kapitel 4 wurden die für die Verarbeitung als geeignet eingeschätzten Konversionstechnologien eingehend beschrieben. Weitere Details sind in den Technologiesteckbriefen in Anhang B zusammengestellt. Insgesamt wurden 19 Konversionstechniken ausgewählt.

Tabelle 49: Auswahl der betrachteten Konversionstechnologien

Nr.	Konversion	Technologie	ausgewählte Einzeltechnik
T1	Verbrennung	Einzelfeuerung Wärme	Holzpelletzentralheizung 15 kW _{th}
T2			Holzhackschnitzelkessel 500 kW _{th}
T3		KWK	Heizkraftwerk 5 MW _{el}
T4			ORC HKW 250 kW _{el}
T5		KWK -Spezialanlagen	Klärschlammverbrennungsanlage 10 MW _{th}
T6			Mitverbrennung Kohle-HKW < 100 MW _{el}
T7			Abfallverbrennungsanlage 50 MW _{th}
T8	Vergasung	direkte Gasnutzung	Kleinvergaser 30 kW _{el}
T9			Holzvergaser 10 MW _{el}
T10		Gasverarbeitung	Bio-SNG 25 MW
T11	BtL 100 MW		
T12	Vergärung	direkte Gasnutzung	Biogasanlage Nassvergärung 75 kW _{el}
T13			Biogasanlage Nassvergärung 500 kW _{el}
T14			Biogasanlage Trockenvergärung 800 kW _{el}
T15		Gasverarbeitung	Biomethananlage Nassvergärung 2 MW _{Nm3}
T16			Biomethananlage Trockenvergärung 2 MW _{Nm3}
T17	Fermentation		Ethanolanlage Lignozellulose
T18			Ethanolanlage Zucker/Stärke
T19	Umesterung		Biodieselanlage

Eigene Darstellung ifeu, IZES, Öko-Institut

5.1.3 Energieprodukte

Die Energieprodukte unterteilen sich gemäß dem Projekttitel primär in die Sektoren Wärme, Strom und Verkehr.⁵⁹ Der differenzierte Bewertungsansatz mit einer Vielzahl an Stoffeigenschaften und Technologien erfordert ebenfalls eine weitere Differenzierung bei den Produkten.

Tabelle 50 stellt die verschiedenen Energietypen und –produkte zusammen. Wärme wird dabei in Gebäudewärme und Prozesswärme unterschieden. Gebäudewärme wird weiter differenziert in Einzelgebäudewärme und leitungsgebundene Wärme. Einzelgebäudewärme kann dabei direkt über Biomassebrennstoffe (z.B. in Pelletöfen) oder mit über das Gasnetz bezogenem Biomethan erzeugt werden. Leitungsgebundene Wärme dagegen wird über ein Wärmenetz durch Einspeisung aus einer KWK-Anlage oder einem Heizwerk bereitgestellt.

Auch Prozesswärme wird in zwei typische Qualitätsniveaus unterschieden. Dampf mit höheren Parametern (z.B. mit Temperaturen von 400°C und höher) wird grundsätzlich nur mit dem Ziel der Stromerzeugung produziert. Diese wiederum kann über KWK oder auch vollständige Kondensation (bei Turbinen) erfolgen.

Brennstoffe werden unterteilt in solche, die als Ottokraftstoff (für Pkw), Diesellochstoff (für Lkw) oder Kraftstoff für Schiffsverkehr (v.a. Bio-LNG) bzw. Flugverkehr (z.B. BtL) dienen können. Diese Differenzierung stellt nur eine Auswahl dar, um die Bandbreite der Möglichkeiten angeben soll. Sie erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit (Diesel wird selbstverständlich auch im Pkw-Bereich eingesetzt oder auch im Bahn- und Schiffsverkehr). Kraftstoffe für den Flug- und den Schiffsverkehr weisen in Praxis zwar sehr unterschiedliche Qualitätsformen, werden hier aber dennoch gemeinsam betrachtet, weil beide Verkehrsbereiche gegenüber dem bodengebundenen Verkehr (Stichwort E-Mobilität) ähnlichen Einschränkungen begegnen, was den Einsatz erneuerbarer Energie für den Antrieb betrifft.

Tabelle 50: Energietypen sowie weiter differenzierte Energieprodukte, die aus den verschiedenen Konversionstechnologien resultieren

Sektor	Energietyp	Energieprodukt
Wärme	Gebäudewärme	Einzelgebäudewärme
		leitungsgebundene Wärme
	Prozesswärme	Niederdruckdampf (3 bar 150°C)
		Mitteldruckdampf (40 bar 300°C)
Strom	Elektrizität	Strom
Verkehr	Kraftstoff	Ottokraftstoff für Pkw
		Kraftstoff für Schiff/Flugzeug
		Diesel-Kraftstoff für Lkw

Eigene Zusammenstellung: ifeu, IZES, Öko-Institut

⁵⁹ Strom kann selbstverständlich auch im Verkehrssektor eingesetzt werden; hier geht es jedoch um den primären Umwandlungsschritt.

5.2 Erstellung und Ergebnisse der Eignungsmatrix

5.2.1 Anwendung der Einzelkriterien

Für die Prüfung der Eignung der Kombinationen von Abfall-/Reststoffarten mit Konversionstechniken wurde in Kapitel 2.3.2 ausführlich die methodische Vorgehensweise geschildert. In einer Kreuzmatrix werden den Charakteristika der identifizierten Abfälle/Reststoffe die Anforderungen der einzelnen Konversionstechniken gegenübergestellt. Die folgenden vier Kriterien werden dazu herangezogen:

- ▶ Wassergehalt (zur Prüfung der Eignung für eine Verbrennungstechnik)
- ▶ Gasertrag (zur Prüfung der Eignung für eine Biogastechnik)
- ▶ Struktur des Inputmaterials
- ▶ Materialreinheit

Die Angaben, die zur Eignungsprüfung für die Abfall-/Reststoffe benötigt werden, wurden den Parameterlisten zur Charakterisierung der Abfall- und Reststoffe in Anhang A entnommen. Sie sind zusammenfassend in Tabelle 51 dargestellt.

Tabelle 51: Charakteristika der Abfall- und Reststoffe, die zur technischen Eignungsprüfung Verwendung finden

Nr.	Bezeichnung Abfall / Reststoff	Wassergehalt in %	Gasertrag ^{a)}	Struktur des Inputmaterials	Materialreinheit
R1	Waldholz	20 - 40	gering	1,5-4,5 cm, stückig	ev. Rinde
R2	Landschaftspfl.-Halm	50 - 80	85 – 170 m ³ /t FM	Häcksel, Silage; krautig	Steine, Boden
R3	Landschaftspflege-Holz	40	gering	geschreddert; < 10 cm	Rinde, Gras
R4	Stroh	14	187 – 314 m ³ /t FM	unb. >100 cm, krautig	Steine, Boden
R5	Gülle	88 - 97	18 – 28 m ³ /t FM	fein, flüssig	Steine, Kunststoff
R6	Festmist	40 - 75	66 – 82 m ³ /t FM	> 80 cm, krautig	Steine, Kunststoff
R7	Ernterückstände	82 - 85	55 – 85 m ³ /t FM	Korngröße k.A., krautig	Steine, Boden
R8	Biogut (Biotonne)	60	80 – 120 m ³ /t FM	fein-grob, krautig-past.	Kunststoff, Fremdstoff
R9	Grüngut krautig	75	60 – 120 m ³ /t FM	< 5 cm; krautig	Steine, Boden
R10	Grüngut holzig	45	gering	> 5 cm; holzig	Steine, Boden
R11	Altholz	15 - 18	gering	grob, holzig	Bauschutt, Kunststoff
R12	Klärschlamm kommunal ausgefault	65 - 75	gering	fein, pastös	Mikrokunststoff
R13	Klärgas kommunal	irrelevant	ist Gas	Gasförmig	Schwefelver., Halogene
R14	biog. Abfälle im Restmüll	35 - 45	80 – 110 m ³ /t FM	grob, stückig	alle Stoffe des HM
R15	Altöle/Fette	5	1000 m ³ /t FM	flüssig bis fest	Speisereste

Tabelle 51: Charakteristika der Abfall- und Reststoffe, die zur technischen Eignungsprüfung Verwendung finden

Nr.	Bezeichnung Abfall / Reststoff	Wassergehalt in %	Gasertrag ^{a)}	Struktur des Inputmaterials	Materialreinheit
R16	Schwarzlauge	25	30 m ³ /t oTS	fein, pastös	Schwefel
R17	Industrierestholz	10 - 30	gering	grob, holzig	Metall, Pappe
R18	Klärschlamm industr. ausgefault	65 - 75	gering	fein, pastös	Mikrokunststoff
R19	Klärgas industriell	irrelevant	ist Gas	Gasförmig	Schwefelver, Halogene
R20	Feste industr. Substrate	7	gering	unregelmäßig grob	Steine, Boden, Kunst.
R21	Tiermehl	0	gering	fein, krümelig	
R22	Tierfett	5	1.000 m ³ /t oTS	Fest	
R23	Fleischbrei	64	20 m ³ /t oTS	fein, fest	Antibiotika, pathogene Keime
R24	Küchen- u. Kantinenabfälle	75 - 88	70 – 170 m ³ /t oTS	fein-mittel; pastös	Verpackungsanteile

a) Nur für Biogas-/Biomethananlagen

Eigene Zusammenstellung: ifeu, IZES, Öko-Institut

Zwei Kriterien – Wassergehalt und Gasertrag – sind numerische Größen, die durch Messungen ermittelt werden. Jedoch liegt es in der Natur der Sache, dass bei der Heterogenität eines bestimmten Abfall-/Reststoffes Schwankungen auftreten können, die nicht durch die Angaben in den Steckbriefen gänzlich abgedeckt sind. Die Angaben stellen somit Orientierungen dar, die allerdings ausreichend für die Zwecke der Eignungsprüfung erscheinen. Die transparente Dokumentation in den Steckbriefen erlaubt die Überprüfung der Herkunft der Zahlen.

Die Kriterien Struktur des Inputmaterials und Materialreinheit sind dagegen eher qualitativ zu bestimmen. Soweit sinnvoll, wurden bei der Struktur des Inputmaterials Korngrößen angegeben, oft auch als Größer- oder Kleiner-Beziehung. Ansonsten konnten Strukturbezeichnungen wie stückig, krautig, holzig, fein oder Aggregatzustände wie fest, pastös, flüssig und gasförmig angegeben werden. Dabei wurde der Zustand zugrunde gelegt, wie der Abfall/Reststoff typischerweise anfällt. Die Intention war, die Eignungsprüfung für eine Technik zunächst ohne aufwändige Vorbehandlungsprozesse wie Mahlen, Trocknen, Kompaktieren, etc. vorzunehmen und damit eine direkte Eignung zu testen.

Die Materialreinheit der Abfälle/Reststoffe ist mit ähnlichen Unsicherheiten behaftet wie die Prüfung zur Struktur des Inputmaterials. Das betrifft die Art von Störstoffen und Schadstoffen als auch deren Ausmaß als Maßstab für die Materialreinheit. Die Auswahl der Störstoffe oder Schadstoffe in den Abfällen/Reststoffen wurde im Hinblick auf die zur Verfügung stehenden Konversionstechniken aus Erfahrungswissen abgeleitet. Auf eine systematischere Herleitung der Materialreinheit anhand definierter Schadstoff- und Störstofflisten wurde verzichtet, da die Beurteilung durch Erfahrungswissen aus der Literatur als pragmatisch und zielführend angesehen wurde. Durch die transparente Darstellung in Kombination mit den Informationen aus den Steckbriefen kann die Auswahl und die Beurteilung der Materialreinheit nachvollzogen und hinterfragt werden.

Um die Eignungsprüfung zur Behandlung der Abfälle/Reststoffe mit den ausgewählten Konversionstechniken vornehmen zu können, müssen die charakteristischen Angaben der vier Eignungskriterien

nun für die Techniken herangezogen werden. Die notwendigen Informationen dazu, wurden den Technologiesteckbriefen in Anhang B entnommen. Sie sind zusammenfassend in Tabelle 52 dargestellt. Die Angaben beziehen sich darauf, welche Merkmale der Kriterien am geeignetsten für eine Technik unabhängig von einem konkreten Inputmaterial sind. Bei Technologien, die nicht bei der Gasbildung eines Materials ansetzen, wird der Gasertrag als „irrelevant“ bezeichnet und nicht bei der Eignungsprüfung verwendet. Für das Kriterium Materialreinheit wird aufgelistet, welche Stör- und Schadstoffe die Technik oder deren Umweltverträglichkeit beeinträchtigen. Bei der Eignungsprüfung wird abgeprüft, ob diese Substanzen im Inputmaterial vorhanden sind.

Tabelle 52: Charakteristika der Konversionstechnologien, die zur technischen Eignungsprüfung Verwendung finden

Nr.	Bezeichnung Abfall / Reststoff	Wassergehalt in %	Gasertrag ^{a)} in m ³ /t FM	Struktur des Inputmaterials	Materialreinheit (als Stör- und Schadstoffe)
T1	Holzpelletzentralheizung 15 kW	bis 10		1,5-3,0 cm; holzig	Ascheanteil; Schwermetalle, Fremdstoffe
T2	Holzhackschnitzelkessel 500 kW	15 -40		4,5-20 cm; holzig	Staub- und Feuchtebildner, Fremdstoffe
T3	Heizkraftwerk 5 MWel	15 - 50		4,5-20 cm; holzig	Steine, Boden, Metall, hohe Feinanteile
T4	ORC HKW 250 kWel	35 - 50		4,5-20 cm; holzig	Steine, Boden, Metall, hohe Feinanteile
T5	Klärschlammverbrennungsanlage 10 MW	45 - 55		Gemisch, pastös	Schwefel, Schwermetalle
T6	Mitverbrennung Kohle-HKW < 100 MWel	5 - 50		4,5-20 cm; holzig	Steine, Chlor, Chlorid, Schwermetalle
T7	Abfallverbrennungsanlage 50 MW	bis 50		fest bis pastös	Chlor, Schwermetalle, org. Schadstoffe
T8	Kleinvergaser 30 kW	15 -50		bis 7 cm; stückig	hohes Kalium, unterschiedliche Korngrößen
T9	Holzvergaser 10 MWel	10 - 15		bis 7 cm; stückig	Chlor
T10	Bio-SNG 25 MW	10 - 20		0,1-7 cm; holzig	Partikel, Teer in Methanisierung
T11	BtL 100 MW	10 - 40		1,5-2 cm; holzig	zu hoher Wasseranteil, Schwefel, Teere
T12	Biogasanlage Nassvergärung 75 kW	85	90 – 110	in Lösung; homogen	H ₂ S, NH ₃ im Gas; stückige Störstoffe
T13	Biogasanlage Nassvergärung 500 kW	85	90 – 110	dickflüssig; auch inhomogen	Schwermetalle, Salze, Sand, Glas, Steine, Plastik
T14	Biogasanlage Trockenvergärung 800 kW	50 - 70	80 – 100	Dickflüssig bis stückig	Schwermetalle, Salze, Sand, Glas, Steine, Plastik
T15	Biomethananlage Nassvergärung BHKW 2 MWel	85	90 – 110	dickflüssig; auch inhomogen	Schwermetalle, Salze, Sand, Glas, Steine, Plastik

Tabelle 52: Charakteristika der Konversionstechnologien, die zur technischen Eignungsprüfung Verwendung finden

Nr.	Bezeichnung Abfall / Reststoff	Wassergehalt in %	Gasertrag ^{a)} in m ³ /t FM	Struktur des Inputmaterials	Materialreinheit (als Stör- und Schadstoffe)
T16	Biomethananlage Trockenvergärung BHKW 2 MWel	50 - 70	80 – 100	dickflüssig, bis stückig	Schwermetalle, Salze, Sand, Glas, Steine, Plastik
T17	Ethanolanlage Lignozellulose	< 15		0,1-1,2 cm; in Lösung	Steine, metallische Störstoffe
T18	Ethanolanlage Zucker/Stärke	20 - 36		< 0,3 cm; in Lösung	Salzgehalt, Boden, Metalle, Glas, Plastik
T19	Biodieselanlage	0,1 - 0,18		flüssig	Verunreinigungen, Phosphor- und Schwefelsäure

a).Nur für Biogas-/Biomethananlagen

Eigene Zusammenstellung: ifeu, IZES, Öko-Institut

5.2.2 Zusammenfassung der Eignung Reststoff - Technik

Abbildung 21 fasst die Ergebnisse der Eignungsprüfung von Abfällen / Reststoffen für die untersuchten Konversionstechniken nach den zuvor vorgestellten Kriterien zusammen. Dabei wird die Übereinstimmung mit Hilfe von Ampelfarben – wie in Kapitel 2.3.2 beschrieben – ausgedrückt. Ein Strich „-“ bedeutet „nicht bewertbar“ und hat keinen Einfluss auf das Ergebnis.

Abbildung 21: Ergebnismatrix der Eignungsprüfung von Abfall- und Reststoffen für die untersuchten Konversionstechniken; grün = gute Eignung; gelb = partielle Eignung; rot = keine Eignung

Abfälle/Reststoffe	Verbrennung											
	Einzelfeuerung Wärme				Verbrennung				Verbrennung			
	Pelletzentralheizung 15 kW	Hackschnitzelkessel 500 kW	HKW 5 MWel	ORC HKW 250 kWel	KVA 10 MW	Mitverbrennung Kohle-HKW	MVA 50 MW					
	W% Gas Struk. Störs.	W% Gas Struk. Störs.	W% Gas Struk. Störs.	W% Gas Struk. Störs.	W% Gas Struk. Störs.	W% Gas Struk. Störs.	W% Gas Struk. Störs.					
Waldholzhackschnitzel	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
L-pflege-Halm	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
L-pflege-Holz	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Stroh	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Gülle	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Festmist	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Ernterückstände	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Biogut (-abfall)	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Grüngut krautig	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Grüngut holzig	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Altholz	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Klärschlamm komm.	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Klärgas komm.	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
biog. Abfälle im RM	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Altöle/Fette	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Schwarzlauge	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Industrierestholz	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Klärschlamm ind.	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Klärgas ind.	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Feste ind. Substrate	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Tiermehl	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Tierfett	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Fleischbri	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Kantinenabfälle	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					

Abfälle/Reststoffe	Vergärung											
	direkte Gasnutzung				Gasverarbeitung				Vergärung			
	Kleinvergaser 30 kW	Holzvergaser 10 MWel	Bio-SNG 25 MW	BTL 100 MW	Biogas 75 kW Nass	Biogas 500 kW Nass	Biogas 800 kW Trocken					
	W% Gas Struk. Störs.	W% Gas Struk. Störs.	W% Gas Struk. Störs.	W% Gas Struk. Störs.	W% Gas Struk. Störs.	W% Gas Struk. Störs.	W% Gas Struk. Störs.					
Waldholzhackschnitzel	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
L-pflege-Halm	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
L-pflege-Holz	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Stroh	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Gülle	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Festmist	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Ernterückstände	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Biogut (-abfall)	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Grüngut krautig	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Grüngut holzig	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Altholz	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Klärschlamm komm.	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Klärgas komm.	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
biog. Abfälle im RM	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Altöle/Fette	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Schwarzlauge	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Industrierestholz	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Klärschlamm ind.	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Klärgas ind.	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Feste ind. Substrate	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Tiermehl	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Tierfett	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Fleischbri	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Kantinenabfälle	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					

Abfälle/Reststoffe	Vergärung											
	Vergärung				Alkoholische Fermentation				Umesterung			
	Biomethan 2 MWel Nass	Biomethan 2 MWel Trocken	Ethanolanlage Lignocellulose	Ethanolanlage Stärke	Biogas 75 kW Nass	Biogas 500 kW Nass	Biogas 800 kW Trocken					
	W% Gas Struk. Störs.	W% Gas Struk. Störs.	W% Gas Struk. Störs.	W% Gas Struk. Störs.	W% Gas Struk. Störs.	W% Gas Struk. Störs.	W% Gas Struk. Störs.					
Waldholzhackschnitzel	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
L-pflege-Halm	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
L-pflege-Holz	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Stroh	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Gülle	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Festmist	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Ernterückstände	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Biogut (-abfall)	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Grüngut krautig	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Grüngut holzig	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Altholz	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Klärschlamm komm.	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Klärgas komm.	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
biog. Abfälle im RM	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Altöle/Fette	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Schwarzlauge	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Industrierestholz	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Klärschlamm ind.	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Klärgas ind.	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Feste ind. Substrate	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Tiermehl	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Tierfett	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Fleischbri	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					
Kantinenabfälle	grün	grün	grün	grün	grün	grün	grün					

Eigene Darstellung: ifeu

5.2.3 Ergebnisse der Eignung Abfall-/Reststoffe - Technik

Nach der in Kapitel 2.3.2 beschriebenen Auswertungslogik gilt eine Abfall-/Reststoff und Technik Kombination für die weitere Betrachtung in den folgenden Schritten als geeignet, wenn sie **keine** mit „rot“ gekennzeichnete Einzelbewertung enthält. In Abbildung 22 sind alle 75 Kombinationen, die

diese Vorgabe erfüllen mit einem gelben Balken gekennzeichnet. Somit stellt diese Abbildung eine vereinfachte Darstellung der Abbildung 21 dar und erlaubt die Nachvollziehbarkeit für die Auswahl der weiter untersuchten Einsatzpfade biogener Abfall- und Reststoffe.

Abbildung 22: Geeignete Kombinationen von Abfall-/Reststoff mit Konversionstechniken (gelbe Balken, Anzahl jeweils in der Spalte oben-links neben den Benennungen dargestellt.)

Abfälle/Reststoffe	Verbrennung																											
	Einzelfeuerung Wärme								KWK																			
	Pelletzentralheizung 15 kW				Hackschnitzelkessel 500 kW				HKW 5 MWel				ORC HKW 250 kWel				KVA 10 MW				KWK - Spezialanlagen				MVA 50 MW			
	W%	Gas	Struk.	Störst.	W%	Gas	Struk.	Störst.	W%	Gas	Struk.	Störst.	W%	Gas	Struk.	Störst.	W%	Gas	Struk.	Störst.	W%	Gas	Struk.	Störst.	W%	Gas	Struk.	Störst.
Waldholzackschnitzel	9																											
L-pflege-Halm	4																											
L-pflege-Holz	7																											
Stroh	3																											
Gülle	3																											
Festmist	6																											
Ernterückstände	0																											
Biogut (-abfall)	3																											
Grüngut krautig	5																											
Grüngut holzig	5																											
Altholz	3																											
Klärschlamm komm.	1																											
Klärgas komm.	0																											
biog. Abfälle im RM	1																											
Altöle/Fette	2																											
Schwarzlauge	1																											
Industrierestholz	9																											
Klärschlamm ind.	1																											
Klärgas ind.	0																											
Feste ind. Substrate	3																											
Tiermehl	2																											
Tierfett	2																											
Fleischbrei	0																											
Kantinenabfälle	5																											

Abfälle/Reststoffe	Vergasung												Vergärung															
	direkte Gasnutzung				Gasverarbeitung				direkte Gasnutzung				direkte Gasnutzung				direkte Gasnutzung											
	Kleingvergaser 30 kW				Holzvergaser 10 MWel				Bio-SNG 25 MW				BtL 100 MW				Biogas 75 kW Nass				Biogas 500 kW Nass				Biogas 800 kW Trocken			
	W%	Gas	Struk.	Störst.	W%	Gas	Struk.	Störst.	W%	Gas	Struk.	Störst.	W%	Gas	Struk.	Störst.	W%	Gas	Struk.	Störst.	W%	Gas	Struk.	Störst.	W%	Gas	Struk.	Störst.
Waldholzackschnitzel																												
L-pflege-Halm																												
L-pflege-Holz																												
Stroh																												
Gülle																												
Festmist																												
Ernterückstände																												
Biogut (-abfall)																												
Grüngut krautig																												
Grüngut holzig																												
Altholz																												
Klärschlamm komm.																												
Klärgas komm.																												
biog. Abfälle im RM																												
Altöle/Fette																												
Schwarzlauge																												
Industrierestholz																												
Klärschlamm ind.																												
Klärgas ind.																												
Feste ind. Substrate																												
Tiermehl																												
Tierfett																												
Fleischbrei																												
Kantinenabfälle																												

Abfälle/Reststoffe	Vergärung								Alkoholische Fermentation								Umesterung											
	Gasverarbeitung				Gasverarbeitung				Ethanolanlage Lignocellulose				Ethanolanlage Stärke				Biodieselanlage											
	Biomethan 2 MWel Nass				Biomethan 2 MWel Trocken				Ethanolanlage Lignocellulose				Ethanolanlage Stärke				Biodieselanlage											
	W%	Gas	Struk.	Störst.	W%	Gas	Struk.	Störst.	W%	Gas	Struk.	Störst.	W%	Gas	Struk.	Störst.	W%	Gas	Struk.	Störst.	W%	Gas	Struk.	Störst.	W%	Gas	Struk.	Störst.
Waldholzackschnitzel																												
L-pflege-Halm																												
L-pflege-Holz																												
Stroh																												
Gülle																												
Festmist																												
Ernterückstände																												
Biogut (-abfall)																												
Grüngut krautig																												
Grüngut holzig																												
Altholz																												
Klärschlamm komm.																												
Klärgas komm.																												
biog. Abfälle im RM																												
Altöle/Fette																												
Schwarzlauge																												
Industrierestholz																												
Klärschlamm ind.																												
Klärgas ind.																												
Feste ind. Substrate																												
Tiermehl																												
Tierfett																												
Fleischbrei																												
Kantinenabfälle																												

Eigene Darstellung: ifeu

Grundsätzlich könnten durch technische Maßnahmen wie Zerkleinerung, Kompaktierung, Trocknung, Vermischung, Aufschluss, Stör- und Schadstoffentfrachtung, etc. die Ausgangsstoffe für viele Technologien zugänglich gemacht werden. Doch steigt damit der Aufwand bezüglich Energie und Kosten durch die Behandlung und macht solche Einsatzpfade weniger erfolgversprechend. Aus der Vielzahl der Vorbehandlungsmöglichkeiten wurden in Absprachen aller Projektbeteiligten die 16 in Abbildung 23 dargestellten Maßnahmen (violette Balken) ausgewählt. Sie betreffen u.a. die Einstellung geeigneter Wassergehalte für Verbrennungstechnologien durch Trocknung oder Vermischung, ebenso wie den Ausschluss von schadstoffbelastetem Altholz für die Vergasungstechnologien. Im Falle der Vergärungsanlagen mussten insbesondere für manche Reststoffe eine Substratbehandlung vorgeschaltet werden, um das Material den gasbildenden Mikroorganismen zugänglich zu machen.

Nach Auflistung aller geeigneter Möglichkeiten zeigte sich, dass kein Abfall- oder Reststoff für den Einsatz in einer Anlage zur Ethanolgewinnung auf Zucker- oder Stärkebasis als geeignet befunden wurde. Solche Technologien werden hauptsächlich für Anbaubiomasse (z.B. Zuckerrohr) verwendet. Deshalb wird die *Alkoholische Fermentation – Ethanolanlage Stärke T 18* nicht weiter betrachtet.

Eine Besonderheit tritt auch bei dem Reststoff Fleischbrei auf. Nach der direkten Eignungsprüfung ist er für keine der 19 Konversionstechniken geeignet, da insbesondere bei den Vergärungstechniken die Gefahr des Austritts pathogener Keime über den Gärrest in die Umwelt besteht. So kommt nur eine Trocknung als Vorbehandlung mit nachfolgender Verbrennung in Frage. Genau dieser Weg wird derzeit auch beschritten und getrockneter Fleischbrei wird zusammen mit Tiermehl entsorgt. Gemäß Eignungsprüfung ist Tiermehl nur zur Mitverbrennung im Kohle-HKW oder in einer MVA vorgesehen.

Aufgrund des hohen Wassergehalts von 60 – 70 % wird dabei allerdings der gesamte Energieinhalt des Fleischbreis benötigt, um diesen Reststoff zu trocknen. Damit verliert er sein Potenzial zur energetischen Nutzung und trägt nicht zu einem Gesamtnutzen biogener Abfall- und Reststoffe bei. Es wurde daher darauf verzichtet, durch Modifikationen wie Trocknung den Reststoffstrom Fleischbrei dem Gesamtnutzungskonzept verfügbar zu machen. Aus dem Grund wurde davon abgesehen, getrockneten Fleischbrei in die nächste Bewertungsstufe mit aufzunehmen.

5.3 Auswahl der Einsatzpfade

Die technische Eignungsprüfung der 24 Abfall- und Reststoffarten zum Einsatz in 19 ausgewählten Konversionstechniken ergibt 91 geeignete Einsatzpfade aus einer Menge von 456 potenziell zur Verfügung stehenden Kombinationen. Wie oben beschrieben, setzen sich die Einsatzpfade aus 75 direkten Eignungen und 16 Eignungen nach Vorbehandlung zusammen.

Aus den grundsätzlich möglichen Kombinationen ergeben sich 91 Einsatzpfade für die weitere Bewertung im nächsten Schritt. Durch die Gleichartigkeit vieler Kombinationen lässt sich jedoch die Anzahl der Bewertungen reduzieren, ohne dass es zu Fehltritten kommen wird. Deshalb werden vergleichbare Abfälle/Reststoffe als Input in eine Konversionstechnik zusammengefasst und gemeinsam der weiteren Bewertung unterworfen. So ergeben sich aus 91 nun 32 Einsatzpfade, die ohne Einschränkung der Aussagekraft zusammen bewertet werden können. Sie werden im Folgenden in Abbildung 24 bis Abbildung 26 dargestellt.

Nach der Bewertung der 32 Einsatzpfade und den damit verbundenen Energieprodukten werden die Ergebnisse wieder auf die einzelnen Abfälle und Reststoffe bezogen, so dass für jeden biogenen Reststoffstrom eine Rangfolge des am besten geeigneten Einsatzpfades angegeben werden kann. Aus der Summe aller am besten geeigneten Einsatzpfade folgt schließlich das Gesamtnutzungskonzept.

In Abbildung 24 wird die Auswahl der Einsatzpfade – zunächst bezogen auf die Verbrennungstechniken – vorgenommen. Die 42 Einsatzpfade für Verbrennung können auf 13 verdichtet werden. Insbesondere die Müllverbrennung ist in der Lage, verschiedenste Abfälle und Reststoffe aufzunehmen, die alle gemeinsam bewertet werden können.

Abbildung 25: Auswahl der Einsatzpfade als Kombination von Abfällen/Reststoffen mit den Vergasungstechniken zur weiteren Bewertung

Abfälle/Reststoffe		Vergasung															
		direkte Gasnutzung				Vergasung								Gasverarbeitung			
		Kleinvergaser 30 kW T8				Holzvergaser 10 MWel T9				Bio-SNG 25 MW T10				BtL 100 MW T11			
		W%	Gas	Struk.	Störs.	W%	Gas	Struk.	Störs.	W%	Gas	Struk.	Störs.	W%	Gas	Struk.	Störs.
Waldholzhackschnitzel	R1	Wholz & Kleinverg R1+T8				Wholz & Holzverg R1+T9				Wholz & Bio-SNG R1+T10				Wholz & BtL R1+T11			
L-pflege-Halm	R2																
L-pflege-Holz	R3	Lpf Holz & Kleinverg R3+T8												Lpf Holz & BtL R3+T11			
Stroh	R4													Stroh & BtL R4+T11			
Gülle	R5																
Festmist	R6																
Ernterückstände	R7																
Biogut (-abfall)	R8																
Grüngut krautig	R9																
Grüngut holzig	R10	Grgholz & Kleinverg R10+T8															
Altholz	R11					Altholz & Holzverg R11+T9				Altholz & Bio-SNG R11+T10				Altholz & BtL R11+T11			
Klärschlamm kommunal	R12																
Klärgas kommunal	R13																
biog. Abfälle im RM	R14																
Altöle/Fette	R15																
Schwarzlauge	R16																
Industrierestholz	R17	Indholz & Kleinverg R17+T8				Indholz & Holzverg R17+T9				Indholz & Bio-SNG R17+T10				Indholz & BtL R17+T11			
Klärschlamm ind.	R18																
Klärgas ind.	R19																
Feste ind. Substrate	R20																
Tiermehl	R21																
Tierfett	R22																
Fleischbrei	R23																
Kantinenabfälle	R24																

Geeignete Einsatzpfade

T8 Kleinvergaser 30 kW	4
Wholz & Kleinverg R1+T8	
Lpf Holz & Kleinverg R3+T8	
Grgholz & Kleinverg R10+T8	
Indholz & Kleinverg R17+T8	
T9 Holzvergaser 10 MWel	3
Wholz & Holzverg R1+T9	
Altholz & Holzverg R11+T9	
Indholz & Holzverg R17+T9	
T10 Bio-SNG 25 MW	3
Wholz & Bio-SNG R1+T10	
Altholz & Bio-SNG R11+T10	
Indholz & Bio-SNG R17+T10	
T11 BtL 100 MW	5
Wholz & BtL R1+T11	
Lpf Holz & BtL R3+T11	
Stroh & BtL R4+T11	
Altholz & BtL R11+T11	
Indholz & BtL R17+T11	

Zusammengefasste geeignete Einsatzpfade

Kleinvergaser 30 kW	1
4 Holzreststoffe & Kleinverg R1/R3/R10/R17 + T8	
Holzvergaser 10 MWel	1
3 Holzreststoffe & Holzverg R1/R11/R17 + T9	
Bio-SNG 25 MW	1
3 Holzreststoffe & Bio-SNG R1/R11/R17 + T10	
BtL 100 MW	2
4 Holzreststoffe & BtL R1/R3/R11/R17 + T11	
Stroh & BtL R4 + T11	

Eigene Darstellung: ifeu

Insgesamt 15 Einsatzpfade ergeben sich für die Vergasungstechniken, die sich auf 5 zu untersuchende reduzieren lassen, wie in Abbildung 25 zu sehen ist.

In Abbildung 26 sind die Einsatzpfade für die Vergärungstechniken dargestellt. 31 verschiedene Einsatzpfade können zu 12 Gruppen zusammengefasst werden.

6 Bewertung der Einsatzpfade

6.1 Benennung der Einsatzpfade

Aus 22 Abfall- und Reststoffströmen (R1-R22) und 18 Techniken (T1-T19, T18 entfällt) wurden im vorangehenden Kapitel anhand von Eignungskriterien insgesamt 32 als technisch sinnvoll erachtete Einsatzpfade abgeleitet (siehe Tabelle 53).

Tabelle 53: Zusammenfassung der 32 abgeleiteten und zu bewertenden Einsatzpfade

Nr.	Abfall-/Reststoff	Vorbehandlung	Technik
1	Waldholz (R1)	Pelletierung	Holzpelletzentralheizung 15 kW (T1)
2	Industrieholz (R17), Feste industrielle Substrate (R20)	Pelletierung	Holzpelletzentralheizung 15 kW (T1)
3	Waldholz (R1), Industrieholz (R17)	Hackschnitzel	Holzhackschnitzelkessel 500 kW (T2)
4	Landschaftspflege-Holz (R3), Grüngut holzig (R10)	Trocknung / Hackschnitzel	Holzhackschnitzelkessel 500 kW (T2)
5	5 Holzreststoffe (R1/R3/R10/R11/R17)		Heizkraftwerk 5 MW _{el} (T3)
6	Stroh (R4)		Heizkraftwerk 5 MW _{el} (T3)
7	Waldholz (R1), Landschaftspflege-Holz (R3), Grüngut holzig (R10)		ORC HKW 250 kW _{el} (T4)
8	Stroh (R4)		ORC HKW 250 kW _{el} (T4)
9	kommunaler (12) und industrieller Klärschlamm (R18)		Klärschlammverbrennungsanlage (T5)
10	Biogut (R8)		Klärschlammverbrennungsanlage (T5)
11	6 Holzreststoffe (R1/R3/R10/R11/R17/R20)		Mitverbrennung Kohle-HKW (T6)
12	Tiermehl (R21)		Mitverbrennung Kohle-HKW (T6)
13	12 Reststoffe (R1/R3/R4/R10/R11/R14/R15/R16/R17/R20/R21/R22)		Abfallverbrennungsanlage (T7)
14	5 Holzreststoffe (R1/R3/R10/R11/R17)		Kleinvergaser 30 kW (T8)
15	Waldholz (R1), Altholz (R11), Industrieholz (R17)		Holzvergaser 10 MW _{el} (T9)
16	Waldholz (R1), Altholz (R11), Industrieholz (R17)		Bio-SNG-Anlage 25 MW (T10)
17	Waldholz (R1), Landschaftspflege-Holz (R3), Altholz (R11), Industrieholz (R17)		BtL-Anlage 100 MW (T11)
18	Stroh (R4)		BtL-Anlage 100 MW (T11)

Tabelle 53: Zusammenfassung der 32 abgeleiteten und zu bewertenden Einsatzpfade

Nr.	Abfall-/Reststoff	Vorbehandlung	Technik
19	Landschaftspflege-Halm (R2), Gülle (R5), Festmist (R6), Grüngut krautig (R9), Küchen- und Kantinenabfälle (R24)		Biogasanlage Nassvergärung 75 kW (T12)
20	Ernterückstände (R7)		Biogasanlage Nassvergärung 75 kW (T12)
21	Gülle (R5), Festmist (R6), Grüngut krautig (R9), Küchen- und Kantinenabfälle (R24)	Substrat-vorbehandlung	Biogasanlage Nassvergärung 500 kW (T13)
22	Ernterückstände (R7)	Substrat-vorbehandlung	Biogasanlage Nassvergärung 500 kW (T13)
23	Landschaftspflege-Halm (R2), Festmist (R6), Ernterückstände (R7), Grüngut krautig (R9), Schwarzlauge (R16)		Biogasanlage Trockenvergärung 800 kW (T14)
24	Stroh (R4)	Substrat-vorbehandlung	Biogasanlage Trockenvergärung 800 kW (T14)
25	Biogut (R8), Küchen- und Kantinenabfälle (R24)		Biogasanlage Trockenvergärung 800 kW (T14)
26	Gülle (R5), Festmist (R6), Grüngut krautig (R9), Küchen- und Kantinenabfälle (R24)		Biomethananlage Nassvergärung BHKW 2 MW _{el} (T15)
27	Ernterückstände (R7)	Substrat-vorbehandlung	Biomethananlage Nassvergärung BHKW 2 MW _{el} (T15)
28	Landschaftspflege-Halm (R2), Festmist (R6), Ernterückst. (R7), Grüngut krautig (R9), Schwarzlauge (R16)		Biomethananlage Trockenvergärung BHKW 2 MW _{el} (T16)
29	Stroh (R4)	Substratvorbehandlung	Biomethananlage Trockenvergärung BHKW 2 MW _{el} (T16)
30	Biogut (R8), Küchen- und Kantinenabfälle (R24)		Biomethananlage Trockenvergärung BHKW 2 MW _{el} (T16)
31	Stroh (R4)	Fermentation Lignin	Ethanolanlage Lignozellulose (T17)
32	Öle (R15), Tierfette (R22)		Biodieselanlage (T19)

Zusammenstellung: ifeu

Zu einer weiteren Differenzierung der Einsatzpfade führen die verschiedenen Energieprodukte (siehe auch Tabelle 50), die von den Einsatzpfaden erzeugt werden. Manche Pfade können dabei verschiedene Energieprodukte hervorbringen. Tabelle 54 zeigt, welche Pfade mit welchen Energieprodukten verknüpft sind.

Im Falle von KWK gibt es außerdem folgende verschiedene Möglichkeiten:

- ▶ Bei Kesselanlagen mit Dampfturbinen sind Strom- und Wärmenutzungsgrade (abhängig von der Bauart) variabel; da es hier theoretisch endlos viele Kombinationsmöglichkeiten gibt, werden hier drei mögliche „Extremfälle“ betrachtet:
 - Reine Wärmekopplung und Nutzung als Prozesswärme mit niedrigen Dampfparametern (150°C)
 - Reine Wärmekopplung und Nutzung als Prozesswärme mit mittleren Dampfparametern (300°C)
 - Reine Stromkopplung:
Für die Einsatzpfade 5-13 und 15-16 (feste Biomasse) sowie 26-30 (Biomethan-HKW) wird in Tabelle 54 als Energieprodukt somit durchgängig Strom angesetzt. Um zu zeigen, dass die Wärmenutzung eine komplementäre oder additive Option darstellt, sind diese Stellen in der Tabelle mit (KWK) in Klammern markiert. Für die Bewertung wurde für diese Anlagen die maximale Stromkopplung angesetzt.
- ▶ Bei Gasmotorenanlagen (Biogas-BHKW) fällt die Abwärme zur Nutzung ohne Einschränkung des Stromwirkungsgrades an. Für Biogasanlagen ist die Wärmenutzung daher keine Alternative zur Stromnutzung sondern grundsätzlich additiv.
Für die Pfade 19 - 25 wird daher zusätzlich zum maximal möglichen Strom-Output immer die zusätzlich mögliche Abwärmenutzung einbezogen, für die Aufstellung in Tabelle 54 mit KWK ohne Klammern markiert.

Tabelle 54: Energieprodukte nach verschiedenen Einsatzpfaden (laufende Nummern siehe Tabelle 53)

Nr.	Abfall-/Reststoff	Technologie	Strom	Gebäude- wärme		Prozess- wärme		Kraftstoff		
				Ltg	EGbd	ND	MD	Str. Pkw	Sch./ Flgzzg	Str. Lkw
1	Waldholz	Holzpelletzentralheizung 15 kW			x					
2	Industrieholz, Feste industrielle Substrate	Holzpelletzentralheizung 15 kW			x					
3	Waldholz, Industrie- holz	Holz hackschnitzelkessel 500 kW		x		x	X			
4	Landschaftspflege- Holz, Grüngut holzig	Holz hackschnitzelkessel 500 kW		x		x	X			
5	5 Holzreststoffe	Heizkraftwerk 5 MW _{el}	x	(KWK)			X			
6	Stroh	Heizkraftwerk 5 MW _{el}	x	(KWK)			X			
7	Waldholz, Land- schaftspflege-Holz, Grüngut holzig	ORC HKW 250 kW _{el}	x	(KWK)						
8	Stroh	ORC HKW 250 kW _{el}	x	(KWK)						
9	kommunaler und in- dustrieller Klär- schlamm	Klärschlammverbren- nungsanl.	x	(KWK)			X			
10	Biogut	Klärschlammverbren- nungsanl.	x	(KWK)			X			
11	6 Holzreststoffe	Mitverbrennung Kohle- HKW	x	(KWK)						
12	Tiermehl (R21)	Mitverbrennung Kohle- HKW	x	(KWK)						
13	12 Reststoffe	Abfallverbrennungsan- lage	x	(KWK)			X			
14	5 Holzreststoffe (	Kleinvergaser 30 kW	x		x					
15	Waldholz, Altholz, In- dustrieholz	Holzvergaser 10 MW _{el}	x	(KWK)						
16	Waldholz, Altholz, In- dustrieholz	Bio-SNG-Anlage 25 MW _{SNG}	x	(KWK)		x			x	
17	Waldholz, Land- schaftspflege-Holz, Altholz, Industrieholz	BtL-Anlage 100 MW _{BtL}						x	x	x
18	Stroh	BtL-Anlage 100 MW _{BtL}						x	x	x
19	Landschaftspflege- Halm, Gülle, Festmist, Grüngut krautig, Kü- chen- und Kantinen- abfälle	Biogasanl. Nassvergärung 75 kW	x	KWK						
20	Ernterückstände	Biogasanl. Nassvergärung 75 kW	x	KWK						
21	Gülle, Festmist, Grün- gut krautig, Küchen- und Kantinenabfälle	Biogasanl. Nassvergärung 500 kW (T13)	x	KWK						
22	Ernterückstände	Biogasanl. Nassvergärung 500 kW	x	KWK						

Tabelle 54: Energieprodukte nach verschiedenen Einsatzpfaden (laufende Nummern siehe Tabelle 53)

Nr.	Abfall-/Reststoff	Technologie	Strom	Gebäude- wärme		Prozess- wärme		Kraftstoff		
				Ltg	EGbd	ND	MD	Str. Pkw	Sch./ Flgwg	Str. Lkw
23	Landschaftspflege-Halm, Festmist, Ernterückstände, Grüngut krautig, Schwarzlauge, Küchen- und Kantinenabfälle	Biogasanl. Trockenvergärung 800 kW	x	KWK						
24	Stroh	Biogasanl. Trockenvergärung 800 kW	x	KWK						
25	Biogut, Küchen- und Kantinenabfälle	Biogasanl. Trockenvergärung 800 kW	x	KWK						
26	Gülle, Festmist, Grüngut krautig, Küchen- und Kantinenabfälle	Biomethananlage Nassvergärung, 2 MW _{Nm3}	x	(KWK)	x	x	x	x	x	x
27	Ernterückstände	Biomethananlage Nassvergärung 2 MW _{Nm3}	x	(KWK)	x	x	x	x	x	x
28	Landschaftspflege-Halm, Festmist, Ernterückst., Grüngut krautig, Schwarzlauge	Biomethananlage Trockenvergärung 2 MW _{Nm3}	x	(KWK)	x	x	x	x	x	x
29	Stroh	Biomethananlage Trockenvergärung 2 MW _{Nm3}	x	(KWK)	x	x	x	x	x	x
30	Biogut, Küchen- und Kantinenabfälle	Biomethananlage Trockenvergärung 2 MW _{Nm3}	x	(KWK)	x	x	x	x	x	x
31	Stroh	Ethanolanlage Lignozellulose						x	x	
32	Tierfette, Öle	Biodieselanlage							x	x

Zusammenstellung: ifeu

Ltg. = Leitungsgebundenen Gebäudewärme; EGbd. = Einzelgebäude; ND. = Niederdruck-Prozessdampf, MD. = Mitteldruck-Prozessdampf; Str. Pkw= straßengebunden für Pkw; Str. Lkw= straßengebunden für Lkw; Sch./Flgwg. = Treibstoff für Schiffs- oder Flugverkehr;

x = zu bewertender Einsatzpfad, KWK = Abwärme aus KWK wird additiv einbezogen; (KWK): Abwärme aus KWK als Alternative zur vollständigen Stromkopplung, die hier zu Grunde gelegt wird.

6.2 Einzelbewertung der Einsatzpfade

Die Vorgehensweise zur Bewertung wurde in Kapitel 2.3.4 bereits beschrieben. Sie wird hier nur noch kurz rekapituliert.

Der Ablauf der Bewertung für 32 Einsatzpfade, in einigen Fällen noch differenziert nach verschiedenen Energieprodukten, anhand von fünf Kriterien ist sehr umfangreich und repetitiv. Die Einzelbewertungen finden sich daher für jede Kombination in Anhang C.1.

Wie in Kapitel 2.3.4 beschrieben, wird folgender Kriterienkatalog angewandt:

- Energieeffizienz
- Treibhausgasbilanz

- ▶ Kostensituation
- ▶ Weitere ökologische Aspekte
- ▶ Kompatibilität zur Transformation des Energiesystems

Jedes Kriterium wird wiederum mit einer 3-skalierten Wertstufe ausgewertet. Anders als in der technischen Eignungsbewertung geht es hierbei nicht um den Ausschluss eines Pfades, sondern die Ausgestaltung einer Rangbildung. Die Stufen lauten dabei:

- ▶ hoher Erfüllungsgrad (3 Punkte)
- ▶ mittlerer Erfüllungsgrad (2 Punkte)
- ▶ geringer Erfüllungsgrad (1 Punkt)

6.2.1 Energieeffizienz

Energieeffizienz wird in diesem Fall ausgedrückt durch die Kombination des energetischen Gesamtwirkungsgrads vom Rohstoff bis zum Energieprodukt mit einer Zahl für die Wertigkeit des Energieprodukts. Dazu wird

1. der Gesamtwirkungsgrad als Quotient aus dem Energieprodukt (Strom, Wärme, Antrieb – in MJ) und durch den Energiegehalt des Abfall/Reststoffs gebildet und
2. mit der Wertigkeit des Energieprodukts nach Maßgabe der Exergie multipliziert.

Die Bewertung erfolgt nach folgendem Schema:

- ▶ Der **Gesamtwirkungsgrad** ergibt sich aufgrund der technischen Verhältnisse. Mit einbezogen ist z.B. der Energieverbrauch zur Herstellung des Brennstoffs/Kraftstoffs. Als Datenquelle werden die Energieeffizienzen aus den Bilanzen verschiedener verfügbarer Treibhausgasberechnungstools verwendet, insbesondere die Tools BioGrace I (für Biokraftstoffe und flüssige Bioenergieträger)⁶⁰ und BioGrace II (für feste und gasförmige Bioenergieträger)⁶¹ verwendet. Außerdem werden die Berechnungen für die Emissionsfaktoren aus dem Projekt BioEm (Fehrenbach et al. 2016) zu Grunde gelegt. Für den Antrieb mittels Verbrennungsmotor wurde einheitlich eine Effizienz von 50 % angesetzt.
- ▶ Die **Exergie** wird auf der Basis des Carnot-Faktors abgebildet, wobei mit Blick auf die Energieprodukte folgendes gilt:
 - Strom, mechanische Energie (Antrieb) und chemisch gebundene Energie (in Form eines Brennstoffs) = 1
 - Prozessdampf mit 300°C = 0,5
 - Prozessdampf mit 150°C = 0,3
 - Heißes Wasser mit 90°C = 0,2

⁶⁰ <https://www.biograce.net/content/ghgcalculationtools/recognisedtool/>

⁶¹ <https://www.biograce.net/biograce2/>

► Das Ergebnis der Bewertung resultiert aus dem Produkt von Gesamtwirkungsgrad und Carnotfaktor und folgender daran angelegten Bewertungsskala:

- hoher Erfüllungsgrad = $>0,3$
- mittlerer Erfüllungsgrad = $<0,3$ und $>0,15$
- niedriger Erfüllungsgrad = $<0,15$

In Anhang C.2 ist das Ergebnis für alle Einsatzpfade nach dem Kriterium „Energieeffizienz“ in Form der Bewertungsmatrix dargestellt.

6.2.2 Treibhausgasbilanz

Die THG-Emissionsintensität eines Einsatzpfades wird mit den Emissionen von der Sammlung des entsprechenden Abfall- oder Reststoffs bis zur Nutzenergie wird mit der fossilen Alternative (Bezug: heute) zu einer Netto-Bilanz saldiert, die ausdrückt, wie hoch die prozentuale Einsparquote (oder Nettoemission) eines Pfades ausfällt.

Als Einheit dienen g CO₂-Äq pro MJ Energieprodukt sowie des der RED II entnommenen Referenzwerte für substituierte Energieträger zugrunde legt, bzw. der %-Wert als Einsparung (oder Mehremission) gegenüber des Referenzsystems. Die Referenzwerte lauten:

- 80 g CO₂-Äq pro MJ Wärme
- 183 g CO₂-Äq pro MJ Strom
- 94 g CO₂-Äq pro MJ Kraftstoff

Die Berechnung der THG-Emissionsintensität der einzelnen Pfade erfolgt ebenfalls anhand verfügbarer Treibhausgasberechnungstools wie insbesondere BioGrace I (für Biokraftstoffe und flüssige Bioenergieträger)⁶² und BioGrace II (für feste und gasförmige Bioenergieträger)⁶³.

Außerdem werden die Berechnungen für die Emissionsfaktoren aus dem Projekt BioEm (Fehrenbach et al. 2016) zu Grunde gelegt. Für Pfade, für die diese Tools keine Daten enthalten (z.B. SNG, BtL) wurden weitere Ökobilanz-Studien oder auch Quellen wie Ecoinvent⁶⁴ oder GEMIS⁶⁵ herangezogen.

Die Bewertung erfolgt danach, wie groß die Einsparung gegenüber dem jeweiligen Referenzsystems ausfällt:

- hoher Erfüllungsgrad = >80 % Einsparung
- mittlerer Erfüllungsgrad = 80 % bis 50 % Einsparung
- niedriger Erfüllungsgrad = <50 % Einsparung

Diese Grenzsatzungen werden ebenfalls aus der RED II abgeleitet, nach welcher die niedrigste Mindestanforderung an Treibhausgasminderung nach Artikel 29 Nr. 10 (a) 50 % für bereits vor Oktober

⁶² <https://www.biograce.net/content/ghgcalculationtools/recognisedtool/>

⁶³ <https://www.biograce.net/biograce2/>

⁶⁴ <https://www.ecoinvent.org/>

⁶⁵ <http://iinas.org/gemis-de.html>

2015 in Betrieb befindliche Anlagen gilt. Die strengste Anforderung gilt nach Artikel 29 Nr. 10 (d) mit 80 % für Strom/Wärme-Anlagen die ab 2026 in Betrieb gehen. Diese Einsparrate ist bereits heute für viele Anlagen möglich (siehe hierzu Fehrenbach et al, 2016), nach BLE (2018) sogar für Biokraftstoffe.

In Anhang C.2 ist das Ergebnis für alle Einsatzpfade nach dem Kriterium „Treibhausgasbilanz“ dargestellt.

6.2.3 Kostensituation

Hier werden die Kosten bei der Bereitstellung des biobasierten Energieprodukts ins Verhältnis zu den Gestehungskosten des substituierten Energieprodukts (Referenzsystem) gestellt. Die Datenwerte dazu sind in Tabelle 55 aufgeführt. Die Zusammenstellung bezieht sich auf die Energieprodukte nach Konversionstechnologie. Es wurde nach Möglichkeit (je nach verfügbarer Datengrundlage) auch der Kosteneinfluss des jeweiligen Einsatzstoffs berücksichtigt. Dieser wird Vergleich zu den technikbezogenen Kostenangaben als eher gering gewertet. Ausnahmen sind bei solchen Stoffe möglich, die einen großen Aufbereitungsaufwand erfordern. Dies trifft in den vorliegenden Fällen jedoch kaum zu oder ist in den Kosten effektiv enthalten (z.B. Holzpellet-Herstellung)

Tabelle 55: Gestehungskosten für Strom, Wärme, Kraftstoffe aus Abfall-/Reststoffen nach verschiedenen Konversionstechniken (in Euro-Cent/MJ)

	Konversionstechnik	Strom in €-cent/MJ	Wärme in €-cent/MJ	Kraftstoff in €-cent/MJ	Datenquelle
T1	Pelletzentralheizung 15 kWth		3,56		TU Berlin a)
T2	Hackschnitzelkessel 500 kWth		1,78		TU Berlin a)
T3	HKW 5 MWel	4,29	1,39		TU Berlin a)
T4	ORC HKW 250 kWel	5			Stockmann, Wagner (2016)
T8	Kleinvergaser 30 kWel	6,1	2,44		Biomasseverband (2013)
T9	Holzvergaser 10 MWel	5,0	2,0		Biomasseverband (2013)
T10	Bio-SNG 25 MW	6,3	2,5	2,2	DBFZ (2009)
T11	BtL 100 MW			2,6	DBFZ (2009)
T12	Biogas 75 kWel Nass	8,33	3,52		KTBL/FNR b)
T13	Biogas 500 kWel Nass	4,72	1,99		KTBL/FNR b)
T14	Biogas 800 kWel Trocken	4,17	1,76		KTBL/FNR b)
T15	Biomethan 2 MW Nass	6,25	2,8	3,0	KTBL/FNR b)
T16	Biomethan 2 MW Trocken	5,6	2,5	2,7	KTBL/FNR b)
T17	Ethanolanlage Lignocellulose			3,0	Repenning (2015)
T19	Biodieselanlage			2,0	Repenning (2015)
REF	Ersetzte fossile Energieträger	2,22	2,8	1,7	Fraunhofer ISEc), TU Berlin ^{a)} Repenning (2015)

Zusammenstellung ifeu

a) http://www.evur.tu-berlin.de/fileadmin/fg45/Projekte/Grossbeeren/Info_allg/Waermekosten_unt_Heizungsanlagen.pdf

b) <https://biogas.fnr.de/daten-und-fakten/faustzahlen/>

c) <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2018/studie-zu-stromgestehungskosten-photo-voltaik-und-onshore-wind-sind-guenstigste-technologien-in-deutschland.html>

Die Bewertung erfolgt nach folgenden Relationen im Vergleich der Gesteungskosten in Euro-Cent pro MJ (Strom/Nutzwärme/Kraftstoff) gegenüber dem jeweiligen Referenzsystem:

- ▶ hoher Erfüllungsgrad = günstiger bis maximal um 20 % teurer als das Referenzsystem
- ▶ mittlerer Erfüllungsgrad = um mehr als 20 % bis 100 % teurer als das Referenzsystem
- ▶ niedriger Erfüllungsgrad = um mehr als 100 % teurer als das Referenzsystem

In Tabelle 55 sind aus verschiedenen genannten Quellen die angesetzten Gesteungskosten für Strom, Wärme, Kraftstoffe aus Abfall-/Reststoffen nach verschiedenen Konversionstechniken aufgeführt.

Nicht darin aufgeführt sind die Technologien Klärschlammverbrennungsanlage (KVA), die Mitverbrennung Kohlekraftwerk und die Abfallverbrennungsanlage (MVA), da für diese die Anwendung des Prinzips Gesteungskosten problematisch ist. Bei MVA und KVA steht das Behandlungsziel der Abfälle im Vordergrund und verursacht die vergleichsweise hohen Behandlungskosten. Die Energieerzeugung dagegen ist ein Nebennutzen, der in der Kostenkalkulation dieser Anlagen als Zusatzerlös dient. Bei der Mitverbrennung dienen Abfallstoffe zur Minderung von Kosten durch Regelbrennstoffe (hier Steinkohle). Die Gesteungskosten für 1 kWh Strom aus der Mitverbrennung sind auch hier schwer transparent zu machen. Für die Bewertung wird für alle drei Fälle daher ein „mittlerer Erfüllungsgrad“ angesetzt, um der Ambivalenz zwischen kostenträchtiger Behandlungstechnik und quasi zwangsläufigem Anfall von Strom oder Nutzwärme gerecht zu werden.

In Anhang C.2 ist das Ergebnis für alle Einsatzpfade nach dem Kriterium „Kostensituation“ dargestellt.

6.2.4 Weitere ökologische Aspekte

Das Umweltrisikopotenzial wird qualitativ anhand einer Reihe von Aspekten eingeschätzt. Folgende Aspekte stehen dabei im Vordergrund:

▶ *relevante Nicht-THG Emissionen in die Luft:*

Der Fokus liegt dabei v.a. auf Feinstaub und Stickstoffoxide (NO_x), in einzelnen Fällen können auch hochtoxische persistente organische Verbindungen (z.B. polyzyklische Aromaten) oder Schwermetalle relevant sein und in die Betrachtung einfließen.

Dabei steht die Frage im Vordergrund, ob mit dem Einsatz des betreffenden Abfallstoffs in dem entsprechenden Konversionsverfahren mit erhöhten Emissionen der genannten Luftschadstoffe zu rechnen ist.

▶ *relevante Wasser- und/oder Bodenbelastung:*

In die Bewertung geht hier ein, ob ein Pfad Abwasser verursacht und wenn ja, wie problematisch diese Abwässer eingeschätzt werden, oder ob der Pfad mit Phänomenen wie Überdüngung verbunden ist (z.B. durch räumlich konzentrierte Rückführung von Gärresten auf Ackerflächen)

▶ *Risiko durch Reststoff:*

Viele Verfahren sind mit Reststoffen verbunden. Treten solche auf und sind sie mit Belastungen verbunden (wie auch das obige Bsp. mit z.B. Gärrestrückführung) oder bedürfen sie einem höheren Aufwand für eine schadlose Entsorgung (z.B. Deponierung), fließt das hier in die Bewertung ein.

► *Sonstige Aspekte:*

Bei manchen Pfaden können sehr spezifische Umwelteffekte auftreten. Das Bewertungsverfahren ist an dieser Stelle offen, im gegebenen Fall diese speziellen Aspekte einzubeziehen. Diese können im Übrigen positiv wie negativ ausfallen, z.B. das Schließen von Stoffkreisläufen wäre positiv (mit Blick auf das oben mehrfach genannte Bsp. der Gärrestrückführung)

Es sei an dieser Stelle auch betont, dass die Frage der rechtlichen Zulässigkeit und der Einhaltung von Emissionsgrenzwerten für die Bewertung außer Frage steht. Es wird als selbstverständlich unterstellt, dass gesetzliche Regeln eingehalten werden. Wenn für Kleinf Feuerungsanlagen jedoch höhere spezifische Emissionen erlaubt sind als für größere Anlagen, dann ist das für die Bewertung an dieser Stelle relevant, weil sich die realen Gesamtemissionen zwischen den Alternativen schließlich deutlich unterscheiden können.

Die Kriterien werden, wie gesagt, anhand verbaler qualitativer Einschätzungen getroffen. Dabei wird je nach Richtung und Bedeutung des Aspekts folgende Einstufung vergeben:

- + positiv (oder schlicht: kein negativer Aspekt)
- (+) mit Einschränkung positiv
- +/- indifferent oder sowohl positiv als auch negativ
- (-) mit Einschränkung negativ
- negativ

Die Gesamteinschätzung für einen Einsatzpfad in einem Kriterium erfolgt wiederum durch den Gesamteindruck der vergebenen einzelnen Einstufungen: nur bis überwiegend + führt zu Stufe 3 (hoher Erfüllungsgrad), umgekehrt führt nur bis überwiegend - führt zu Stufe 1 (geringer Erfüllungsgrad) und alles Dazwischenliegende zu Stufe 2 (mittlerer Erfüllungsgrad).

Am Beispiel der *Pelletfeuerung für Wärme Einzelgebäude (T1) mit Holzpellets aus Waldholz (R1)* sei das Vorgehen der Bewertung kurz dargestellt:

► *Relevante Nicht-THG Emissionen Luft:*

Spezifische Feinstaub und NO_x-Emissionen vergleichsweise hoch;
 Es ist aufwändig, diese Emissionen bei Einzelheizungen weiter zu reduzieren;
 Problematisch v.a. in Ballungszentren mit hoher Dichte an Emittenten;
 Wertung: -

► *Relevante Wasser- und/oder Bodenbelastung:*

keine
 Wertung: +

► *Risiko durch Reststoff:*

Ascheaufkommen unkritisch, muss jedoch entsorgt werden;
 Wertung: (+)

Ergebnis: mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**

In Anhang C.2 ist das Ergebnis für alle Einsatzpfade nach dem Kriterium „sonstige Umweltrisiken“ grafisch dargestellt.

6.2.5 Kompatibilität zur Transformation des Energiesystems

Dieses Kriterium wird ebenfalls qualitativ bewertet. Die betrachteten Aspekte lauten dabei:

- ▶ Die *Substitutionsrelevanz* bezogen auf fossile Energieträger aufgrund der
 - schwierigen Ersetzbarkeit des fossilen Energieprodukts oder
 - Alleinstellungsmerkmale des biogenen Energieprodukts gegenüber erneuerbaren Alternativen.

Erneuerbare Energien lassen sich nicht in allen Sektoren und Anwendungsbereichen gleichmäßig gut und auf absehbare Zeit vollständig umsetzen. Während im Stromsektor erneuerbare Alternativen zu Biomasse im großem Umfang zur Verfügung stehen (ungeachtet von diversen infrastrukturellen und umsetzungsbezogenen Problemen), wird die Verfügbarkeit und Umsetzung im Wärmebereich differenzierter gesehen. Folgt man den Analysen verschiedener Szenarien und Prognosen (z.B. Pfluger, Tersteegen, Franke 2017), ist der Bedarf an Energieträgern vom Typ Biomasse für die ambitionierte Transformation des Energiesystems vor allem a.) im Wärmebereich und dort v.a. für den Industriesektor und b.) im Verkehrssektor, dort aber vorrangig im internationalen Flug- und Schiffsverkehr zu sehen.

Es wird daher in gewisser Weise eine weitgehend pfadunabhängige, vielmehr produktbezogene hierarchische Rangfolge der besseren oder weniger ausgeprägten Kompatibilität zur Transformation des Energiesystems zu Grunde gelegt:

- Hoch: Wärme (Prozesswärme für Industrie);
Verkehr (Kraftstoff für Flug- und Schiffsverkehr)
- Mittel-Hoch: Wärme (sonstige)
- Mittel: Verkehr (Straße)
- Niedrig bis gering: Strom (flexibel)
- Niedrig: Strom (wenig flexibel)

Bei der Bewertung der Einzelfälle (siehe in Anhang C.1) können sich auch pfadspezifische Aspekte für die konkrete Einstufung modifizierend auswirken.

- ▶ Die *klimapolitische Systemdienlichkeit*:
Dieser Aspekt stellt eine feinere Abstufung gegenüber dem vorangehenden dar. Im Wesentlichen geht es dabei darum, ob a.) mit dem jeweiligen Pfad spezifische Lock-in Effekte verbunden sind (bzw. verhindert wird), oder er eine wichtige positive Rolle im zukünftigen Energiesystem bzw. in Energieszenarien spielen kann.
- ▶ *Speicherfähigkeit* der Energie:
Diese kann auf der Ebene des Einsatzstoffs wie auch des Energieprodukts bewertet werden. Im ersten Punkt wird die Frage, ob sich das Material vergleichsweise schnell zersetzt, gestellt, im zweiten Punkt steht die Speicherfähigkeit von Strom und Wärme (beides derzeit eher schlecht) der von Kraftstoffen (gut) gegenüber.

► Räumliche und zeitliche *Flexibilität*:

Dieser Aspekt ist mit den vorgehenden ebenfalls verknüpft, beleuchtet aber die Frage, nach dem räumlichen und zeitlichen Aufkommen der Einsatzstoffe (räumlich: Waldholz an Waldregionen gebunden; zeitlich: saisonales Aufkommen wie z.B. Ernterückstände, Stroh)

Das Kriterium „Kompatibilität zur Transformation des Energiesystems“ wird analog zu „sonstigen Umwelttrisiken“ anhand verbaler qualitativer Einschätzungen getroffen. Die hilfsweise angesetzte Skala und die Herleitung einer Gesamteinschätzung entsprechen dabei dem vorangehenden Abschnitt beschriebenen Vorgehen.

Am Beispiel der *Pelletfeuerung für Wärme Einzelgebäude (T1) mit Holzpellets aus Waldholz (R1)* sei das Vorgehen der Bewertung kurz dargestellt:

► Die *Substitutionsrelevanz* bezogen auf fossile Energieträger:

kann fossile Wärme auch dort ersetzen, wo Wärmenetze schwierig umzusetzen sind, konkurriert mit alternativen erneuerbaren Wärmesysteme

Wertung: (+)

► Die *klimapolitische Systemdienlichkeit*:

kann auch bei breiter Umsetzung den Ausbau von Wärmenetzen blockieren:

Wertung: (-)

► *Speicherfähigkeit* der Energie:

ja, als Einsatzstoff

Wertung: +

► Räumliche und zeitliche *Flexibilität*:

gegeben

Wertung: +

Ergebnis: hoher Erfüllungsgrad → **Stufe 3**

In Anhang C.2 ist das Ergebnis für alle Einsatzpfade nach dem Kriterium „Kompatibilität zur Transformation des Energiesystems“ dargestellt.

6.2.6 Gesamtergebnis der Bewertung

Abbildung 27 fasst die Ergebnisse aller Einsatzpfade und Energieprodukte nach den fünf Kriterien in einer Gesamtbewertungsmatrix zusammen. Die Darstellung folgt der jeweils dreistufigen Bewertung wobei hier anders als in Kapitel 5 nicht um den Ausschluss ungünstiger Pfade, sondern um die Identifikation der insgesamt besten Pfade geht. Die dreistufige Skala in der Matrix enthält folgenden Code:



hoher Erfüllungsgrad (vergeben werden 3 Punkte)



mittlerer Erfüllungsgrad (vergeben werden 2 Punkte)



niedriger Erfüllungsgrad (vergeben wird 1 Punkt)

Abbildung 27: Matrix der Gesamtbewertung aller Einsatzpfade und Energieprodukte nach den Kriterien Energieeffizienz (E), Treibhausgasbilanz (T), Kosten (K), Ökologische Aspekte (Ö) und Transformation des Energiesystems (Tr)

	Elektrizität					Gebäudewärme					Prozesswärme					Kraftstoff				
	Strom					Leitung					Einzelgeb.					Mitteldruck				
	E	T	K	Ö	Tr	E	T	K	Ö	Tr	E	T	K	Ö	Tr	E	T	K	Ö	Tr
Konversionstechnologie / Abfall-Reststoff																				
Holzpelletzentralheizung: R1																				
Holzpelletzentralheizung: R17, R20																				
Holzhackschnittzettelkessel: R1, R17																				
Holzhackschnittzettelkessel: R3, R10																				
Heizkraftwerk: R1/R3/R10/R11/R17																				
Heizkraftwerk: R4																				
ORC HKW: R1/R3/R10																				
ORC HKW: R4																				
KVA: R12/R18																				
KVA: R8																				
Kohle-HKW: R1/R3/R10/R11/R17/R20																				
Kohle-HKW: R21																				
MVA: R1/R3/R4/R10/R11/R14/R15/R16/R17/R20/R21/R22																				
Kleinvergaser: R1/R3/R10/R11/R17																				
Holzvergaser: R1/R11/R17																				
Bio-SNG: R1/R11/R17																				
BtL-Anlage: R1/R3/R11/R17																				
BtL-Anlage: R4																				
Biogasanlage Nass 75 MW: R2/R5/R6/R9																				
Biogasanlage Nass 75 MW: R7																				
Biogasanlage Nass 500 MW: R5/R6/R9																				
Biogasanlage Nass 500 MW: R7																				
Biogasanlage Trocken: R2/R6/R7/R9/R16																				
Biogasanlage Trocken: R4																				
Biogasanlage Trocken: R8																				
Biomethananlage Nass: R5/R6/R9																				
Biomethananlage Nass: R7																				
Biomethananlage Trocken: R2/R6/R7/R9/R16																				
Biomethananlage Trocken: R4																				
Biomethananlage Trocken: R8																				
Ethanolanlage Lignozellulose: R4																				
Biodieselanlage: R15/R22																				

Eigene Darstellung: ifeu

6.3 Rangbildungen der Einsatzpfade nach Abfall-/Reststoffarten

Trotz verschiedener Schritte zur Reduktion des Umfangs an Einzelkombinationen gestaltet sich die Ergebnisdarstellung auch in dieser Phase sehr komplex. Abbildung 27 kann im Grunde jedes Einzelergebnis pro Pfad, Abfallart oder Technologie entnommen werden. Um Rückschlüsse daraus zu ziehen und diskutieren zu können, bedarf es jedoch einer Analyse im Einzelnen, die weiter unten in Form von Rangbildungen der Einsatzpfade nach Abfall-/Reststoffarten erfolgt.

Dabei werden auch folgende Aspekte hinsichtlich der Sensitivität auf das Ergebnis einbezogen:

- ▶ Wie gestaltet sich das Ergebnis, wenn man das Kriterium „Kosten“ ausschließt?
- ▶ Welchen Einfluss hat die Grenzsetzung für die Anforderungen an THG-Einsparung? z.B. wenn man die obere Grenze auf 90 % Einsparung anheben würde.
- ▶ Das Produkt Strom hat bei der Bewertung in allen Fällen im Kriterium „Kompatibilität zur Transformation des Energiesystems“ durchweg die Punktzahl 2 (mittel) erhalten (siehe Anhang C.1); dieser Ansatz ist diskussionswürdig angesichts einer ggf. flexiblen Betriebsweise zur Stromerzeugung sowie aufgrund des Sachverhalts, dass diese Anlagen im Prinzip ohne Abstriche beim Stromwirkungsgrad die Abwärme vollumfänglich nutzen können (Biogas-BHKW); Wie würde sich das Ergebnis darstellen, würde der Strom aus Biogas hier mit der Punktzahl 3 (hoch) bewertet?

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Rangbildungen für die einzelnen Abfall-/Reststoffarten nacheinander aufgeführt und erörtert.

Waldholz (R1)

Waldholz fließt ein in 29 Einsatzpfade mit 10 Techniken.

Als besonders geeignet, auf Grund der vollen Punktzahl (15) sind die zwei Einsatzpfade:

- ▶ Holzhackschnitzelkessel 500 kW (Prozesswärme Mitteldruck)
- ▶ Heizkraftwerk 5 MW_{el} (Prozesswärme Mitteldruck)

Dahinter folgen mit jeweils 14 Punkten drei weitere Pfade für den Wärmesektor (Holzhackschnitzelkessel mit Leitungswärme und mit Prozesswärme Niederdruckdampf sowie Bio-SNG mit Prozesswärme) und Bio-SNG für Kraftstoff (Schiff/Flugverkehr).

Lässt man das Kriterium „Kosten“ außer Acht, reiht sich der Pfad Bio-SNG für Kraftstoff (Schiff/Flugverkehr) zu den beiden Spitzenreitern ein.

Keine Veränderung auf die Bestplatzierung hat die Anhebung des THG-Kriteriums auf 90 % und die höhere Bewertung von Strom aus Biogasanlagen.

Für Waldholz empfiehlt sich auf Basis dieser Bewertung die Nutzung als Brennstoff zur (Prozess)Wärmeerzeugung. Kraftstoff über Bio-SNG-Weg zeichnet sich als weiterer gut bewerteter Pfad ab.

Landschaftspflege-Halm (R2)

Von den acht bewerteten Pfaden mit zwei Techniken schneidet folgende mit 12 Punkten am besten ab:

- ▶ Biomethananlage Trockenvergärung (Prozesswärme Mitteldruck)

Um einen Punkt dahinter liegen gleichauf die Pfade:

- ▶ Biomethananlage Trockenvergärung (Wärme Einzelgebäude)
- ▶ Biomethananlage Trockenvergärung (Prozesswärme Niederdruck)
- ▶ Biomethananlage Trockenvergärung (Kraftstoff Flug/Schiff)
- ▶ Biogasanlage Trockenvergärung (800 kW) (Strom)

Lässt man das Kriterium „Kosten“ außer Acht, teilen sich die Pfade „Biogasanlage Trockenvergärung (Strom)“ und „Biomethananlage Trockenvergärung (Kraftstoff Flug/Schiff)“ mit dem oben genannten Spitzenreiter die Bestplatzierung.

Vergibt man 3 Punkte außerdem im Kriterium „Transformation des Energiesystems“ für den Strom aus der Biogasanlage, liegt dieser Pfad allein an der Spitze.

Für Landschaftspflege-Halm empfiehlt sich auf Basis dieser Bewertung die Gewinnung von Biomethan und Bereitstellung von Prozesswärme, wobei sich ein paar weitere über Biogas bzw. Biomethan verlaufende Pfade nahe daran anschließen.

Landschaftspflege-Holz (R3) und Grüngut, holzig (R10)

Für diese beiden Reststoffe wurden jeweils 14 Einsatzpfade mit 7 Techniken bewertet. In beiden Fällen ergibt sich die gleiche Rangfolge wie für Waldholz (R1), die auch bei Weglassen des Kriteriums „Kosten“ Bestand hat.

Stroh (R4)

Von den 18 bewerteten Pfaden mit 8 Techniken schneiden folgende mit 14 Punkten am besten ab:

- ▶ Heizkraftwerk 5 MW_{el} (Prozesswärme Mitteldruck)

Der Pfad BtL 100 MW mit der Erzeugung von Kraftstoff (Flug/Schiff) liegt um einen Punkt dahinter und liegt gleichauf mit der Bestoption, lässt man das Kriterium „Kosten“ außer Acht. Die anderen variierten Kriterien führen zu keinen Veränderungen.

Für Stroh empfiehlt sich auf Basis dieser Bewertung die Nutzung als Brennstoff zur (Prozess)Wärmeerzeugung. Kraftstoff über den BtL-Weg zeichnet sich in diesem Sinne als zweitbesten Pfad ab.

Gülle (R5)

Für Gülle werden 10 Einsatzpfade mit 4 Techniken bewertet. Mit 12 Punkten liegt an der Spitze:

- ▶ Biomethananlage Nassvergärung (Prozesswärme Mitteldruck)

Es folgen mit jeweils einem Punkt weniger:

- ▶ Biomethananlage Nassvergärung (Wärme Einzelgebäude)
- ▶ Biomethananlage Nassvergärung (Prozesswärme Niederdruck)
- ▶ Biomethananlage Nassvergärung (Kraftstoff Flug/Schiff)
- ▶ Biogasanlage Nassvergärung (800 kW) (Strom)

Lässt man das Kriterium „Kosten“ außer Acht, teilen sich die Pfade „Biogasanlage Nassvergärung (Strom)“, „Biogasanlage Trockenvergärung (Strom)“ und „Biomethananlage Trockenvergärung (Kraftstoff Flug/Schiff)“ mit dem oben genannten Spitzenreiter die Bestplatzierung.⁶⁶

Vergibt man 3 Punkte außerdem im Kriterium „Transformation des Energiesystems“ für den Strom aus der Biogasanlage, liegen die Pfade „Biogasanlage Nassvergärung (Strom)“ und „Biogasanlage Trockenvergärung (Strom)“ an der Spitze.

Für Gülle empfiehlt sich auf Basis dieser Bewertung der Pfad über Biomethan und Prozesswärme, wobei sich ein paar weitere über Biogas bzw. Biomethan verlaufende Pfade nahe daran anschließen.

Festmist (R6)

Festmist in 17 Einsatzpfade mit 5 Techniken. Mit jeweils 12 Punkten teilen sich den Spitzenplatz:

- ▶ Biomethananlage Nassvergärung (Prozesswärme Mitteldruck)
- ▶ Biomethananlage Trockenvergärung (Prozesswärme Mitteldruck)

Es folgen sieben Pfade mit jeweils 1 Punkt weniger:

- ▶ Alle weiteren Pfade mit Biomethananlage Nassvergärung und Biomethananlage Trockenvergärung, sowie
- ▶ Biogasanlage Nassvergärung (800 kW) (Strom)

Lässt man das Kriterium „Kosten“ außer Acht, teilen sich die Pfade „Biogasanlage Nass- und Trockenvergärung (Strom)“, sowie „Biomethananlage Nass- und Trockenvergärung (Kraftstoff Flug/Schiff)“ mit den oben genannten Spitzenreitern die Bestplatzierung.

Vergibt man 3 Punkte außerdem im Kriterium „Transformation des Energiesystems“ für den Strom aus der Biogasanlage, liegen die Pfade „Biogasanlage Nassvergärung (Strom)“ und „Biogasanlage Trockenvergärung (Strom)“ alleine an der Spitze.

Würde man stattdessen die THG-Einsparsschwelle für 3 Punkte auf 90 % anheben, würden die beiden Biogasanlagen-Strom-Pfade wiederum zurückfallen.

Für Festmist liegen somit nahezu alle Pfade, die über Biogas verlaufen (mit Priorität Biomethan und Prozesswärme), sehr eng beieinander.

Ernterückstände (R7)

Sie werden in 17 Einsatzpfaden mit 5 Techniken bewertet. Mit 12 Punkten liegen vorne:

- ▶ Biomethananlage Nassvergärung (Wärme Einzelgebäude)
- ▶ Biomethananlage Nassvergärung (Prozesswärme Mitteldruck)
- ▶ Biomethananlage Nassvergärung (Kraftstoff Flug/Schiff)
- ▶ Biomethananlage Trockenvergärung (Prozesswärme Mitteldruck)

⁶⁶ Die Gründe, weswegen sich beim Weglassen des Kostenkriteriums die Rangfolgen verschieben, sind durchaus divers. So ist nicht allein der technische Aufwand einer Einsatzpfadoption ausschlaggebend, sondern auch das resultierende Energieprodukt. In Abschnitt 7.1.2 wird u.a. erläutert, warum durch Entfallen des Kostenkriteriums eine auf Stromerzeugung ausgerichtete Biogasnutzung im Ergebnis besser abschneidet als die technisch im Grunde teurere Aufbereitung zu Biomethan.

Es folgen acht Pfade mit jeweils 1 Punkt weniger:

- ▶ Alle weiteren Pfade mit Biomethananlage Nassvergärung und Trockenvergärung, sowie
- ▶ Biogasanlage Nass- und Trockenvergärung (Strom)

Lässt man das Kriterium „Kosten“ außer Acht, teilen sich die Pfade „Biogasanlage Nassvergärung (Strom)“ und „Biomethananlage Nassvergärung (Kraftstoff Flug/Schiff)“ den Spitzenplatz.

Vergibt man zusätzlich 3 Punkte im Kriterium „Transformation des Energiesystems“ für den Strom aus der Biogasanlage, würde sich der Pfad „Biogasanlage Nassvergärung (Strom)“ an die Spitze setzen.

Für Ernterückstände liegen somit alle Pfade, die über Biogas verlaufen, sehr eng beieinander.

Biogut (R8)

Biogut wird in 10 Einsatzpfaden mit 3 Techniken bewertet. Mit 12 Punkten liegen vorne:

- ▶ Biomethananlage Trockenvergärung (Prozesswärme Mitteldruck)

Einen Punkt dahinter liegen:

- ▶ Biogasanlage Trockenvergärung (Strom)
- ▶ Biomethananlage Trockenvergärung (Wärme Einzelgebäude)
- ▶ Biomethananlage Trockenvergärung (Prozesswärme Niederdruck)
- ▶ Biomethananlage Trockenvergärung (Kraftstoff Flug/Schiff)

Lässt man das Kriterium „Kosten“ außer Acht, teilen sich die Pfade „Biogasanlage Trockenvergärung (Strom)“ und „Biomethananlage Nassvergärung (Kraftstoff Flug/Schiff)“ mit der genannten besten Option den Spitzenplatz. Würde man zusätzlich 3 Punkte im Kriterium „Transformation des Energiesystems“ für den Strom aus der Biogasanlage vergeben, würde dieser Pfad alleine die höchste Punktzahl erreichen.

Für Bioabfall empfiehlt sich auf Basis dieser Bewertung die Erzeugung von Biomethan und Nutzung als Prozesswärme, wobei sich ein paar weitere über Biogas bzw. Biomethan verlaufende Pfade nahe daran anschließen.

Grüngut, krautig (R9) und Küchen-und Kantinenabfälle (R24)

Bei diesen beiden mit 24 Einsatzpfaden mit 5 Techniken bewerteten Pfad liegen mit jeweils 12 Punkten vorne:

- ▶ Biomethananlage Nassvergärung (Prozesswärme Mitteldruck)
- ▶ Biomethananlage Trockenvergärung (Prozesswärme Mitteldruck)

Es folgen 7 Pfade, die einen Punkt dahinter liegen:

- ▶ Biogasanlage Trockenvergärung 800 kW (Strom)
- ▶ Biomethananlage Nassvergärung (Prozesswärme Niederdruck)
- ▶ Biomethananlage Trockenvergärung (Prozesswärme Mitteldruck)

- Biomethananlage Nassvergärung (Wärme Einzelgebäude)
- Biomethananlage Trockenvergärung (Wärme Einzelgebäude)
- Biomethananlage Nassvergärung (Kraftstoff Flug/Schiff)
- Biomethananlage Trockenvergärung (Kraftstoff Flug/Schiff)

Lässt man das Kostenkriterium außer Acht, teilen sich Biogasanlage Nass- und Trockenvergärung (Strom) und Biomethananlage Nass- und Trockenvergärung (Kraftstoff Flug/Schiff) mit den oben genannten Spitzenreitern den ersten Platz.

Für Grüngut und Küchen-/Kantinenabfälle liegen somit nahezu alle Pfade, die über Biogas verlaufen, sehr eng beieinander, wobei wiederum die Nutzung für Prozesswärme auf Basis dieser Bewertung vorrangig zu empfehlen ist.

Altholz (R11)

Bei diesem mit 17 Einsatzpfaden mit 8 Techniken bewerteten Pfad liegt mit 15 Punkten vorne:

- Heizkraftwerk 5 MW_{el} (Prozesswärme Mitteldruck)

Lässt man das Kriterium Kosten außer Acht, liegt der Pfad Bio-SNG 25 MW (Kraftstoff Flug/Schiff) mit auf dem ersten Platz.

Ansonsten ändert keine der Varianten der Sensitivitätsanalyse etwas an der Rangfolge.

Klärschlamm kommunal (R12) und industriell (R18)

Nur zwei Einsatzpfade mit 1 Technik kommen nach der technischen Eignungsbewertung für beide Abfälle in Frage. Mit 8 Punkten liegt klar vorne:

- Klärschlammverbrennungsanlage 10 MW (Prozesswärme Mitteldruck)

Die Bereitstellung von Prozesswärme wäre aufgrund dieser Bewertung also gegenüber der Stromerzeugung zu bevorzugen.

Biogene Abfälle im Restmüll (R14)

Auch hier werden nur 2 Einsatzpfade mit 1 Technik betrachtet. Ebenfalls klar vorne liegt mit 12 Punkten:

- Abfallverbrennungsanlage 50 MW (Prozesswärme Mitteldruck)

Die Bereitstellung von Prozesswärme wäre aufgrund dieser Bewertung also gegenüber der Stromerzeugung zu bevorzugen.

Altöle/Fette (R15)

Für biogene Altöle und Fette kommen 4 Einsatzpfade mit 2 Techniken in Frage. Mit 14 Punkten liegt vorne:

- Biodieselanlage (Kraftstoff Flug/Schiff)

Die Bereitstellung von Kraftstoff für den Flug- oder Schiffsverkehr wäre aufgrund dieser Bewertung also gegenüber der Nutzung als Kraftstoff für den Straßenverkehr zu bevorzugen.

Schwarzlauge (R16)

Für Schwarzlauge werden 10 Einsatzpfaden mit 3 Techniken betrachtet. Mit 12 Punkten liegen gleichauf vorne:

- ▶ Abfallverbrennungsanlage 50 MW (Prozesswärme Mitteldruck)
- ▶ Biomethananlage Trockenvergärung (Prozesswärme Mitteldruck)

Es folgen vier Pfade, die einen Punkt dahinter liegen:

- ▶ Biogasanlage Trockenvergärung 800 kW (Strom)
- ▶ Biomethananlage Trockenvergärung (Wärme Einzelgebäude)
- ▶ Biomethananlage Trockenvergärung (Prozesswärme Niederdruck)
- ▶ Biomethananlage Trockenvergärung (Kraftstoff Flug/Schiff)

Lässt man das Kriterium Kosten außer Acht, nimmt die Abfallverbrennungsanlage allein den Spitzenplatz ein. Wie in Abschnitt 6.2.3 erläutert, werden die Kosten für die Abfallverbrennungsanlage als „mittel“ (2 Punkte) bewertet, da die Behandlung tatsächlich sehr kostspielig ist, auf der anderen Seite die Anlagen primär aus Gründen der notwendigen Abfallentsorgung betrieben werden.

Kombiniert man das Weglassen von Kosten mit den 3 Punkten für Biogas-Strom, so liegen die Abfallverbrennungsanlage und die Biogasanlage gemeinsam vorne.

Erhöht man das THG-Kriterium auf 90 % nötige THG-Reduktion für die Vergabe von 3 Punkten, so stellt sich allein die Abfallverbrennungsanlage allein an die Spitze.

Optionen über Biomethan/Biogas, prioritär für die Prozesswärmenutzung und der Einsatz in einer Abfallverbrennungsanlage ebenfalls mit Prozesswärmenutzung stellen daher auf Basis dieser Bewertung die zu bevorzugenden Pfade dar.

Industrierestholz (R17)

Für Industrierestholz kommen 18 Einsatzpfade mit 9 Techniken in Frage. Wie bei Waldholz liegen mit 15 Punkten vorne:

- ▶ Holzhackschnitzelkessel 500 kW (Prozesswärme Mitteldruck)
- ▶ Heizkraftwerk 5 MW_{el} (Prozesswärme Mitteldruck)

Es folgen fünf Pfade, die einen Punkt dahinter liegen:

- ▶ Holzhackschnitzelkessel 500 kW (Wärme Leitung)
- ▶ Holzhackschnitzelkessel 500 kW (Prozesswärme Niederdruck)
- ▶ Bio-SNG 25 MW (Prozesswärme Niederdruck)
- ▶ Bio-SNG 25 MW (Kraftstoff Flug/Schiff)
- ▶ Kleinvergaser 30 kW (Wärme Einzelgebäude)

Ebenso wie bei Waldholz steigt beim Weglassen der Kosten der Pfad Bio-SNG für Kraftstoff (Schiff/Flugverkehr) in diese Spitzengruppe auf.

Keine Veränderung auf die Bestplatzierung hat die Anhebung des THG-Kriteriums auf 90 % und die höhere Bewertung von Strom aus Biogasanlagen.

Für Industrieholz liegt damit die vorrangige Priorität gemäß dieser Bewertung auf der Nutzung als Brennstoff zur (Prozess)Wärmeerzeugung. Kraftstoff über Bio-SNG-Weg zeichnet sich als weiterer gut bewerteter Pfad ab.

Feste industrielle Substrate (R20)

Für diese Stoffgruppe kommen 4 Einsatzpfade mit 3 Techniken nach der technischen Eignungsbewertung in Frage. Mit 12 Punkten liegt vorne:

- Abfallverbrennungsanlage 50 MW (Prozesswärme Mitteldruck)

Mit zwei Punkten Abstand folgen die Holzpelletzentralheizung (Wärme Einzelgebäude) und die Mitverbrennung Kohle-HKW. An Rangfolge und Abstand ändert auch keine der Varianten der Sensitivitätsanalyse etwas.

Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass die Technologie der Holzpelletzentralheizung in der Praxis aufgrund anspruchsvoller Anforderungen an die Emissionen nur in geringem Umfang in Feuerungsanlagen der 1. BImSchV Eingang finden wird.⁶⁷

Tiermehl (R21)

Für Tiermehl kommen nach der technischen Eignungsbewertung 3 Einsatzpfade mit 2 Techniken in Frage. Wie bei biogenen Abfällen im Restmüll (R14) liegt mit 12 Punkten vorne:

- Abfallverbrennungsanlage 50 MW (Prozesswärme Mitteldruck)

Mit zwei Punkten Abstand dahinter liegt die Mitverbrennung Kohle-HKW. An Rangfolge und Abstand ändert keine der Varianten der Sensitivitätsanalyse etwas.

Tierfett (R22)

Für Tiermehl kommen nach der technischen Eignungsbewertung kommen 4 Einsatzpfade mit 2 Techniken in Frage. Wie bei wie für biogene Altöle und Fette (R15) liegt mit 12 Punkten vorne:

- Biodieselanlage (Kraftstoff Flug/Schiff)

Die Bereitstellung von Kraftstoff für den Flug- oder Schiffsverkehr wäre aufgrund dieser Bewertung also gegenüber der Nutzung als Kraftstoff für den Straßenverkehr zu bevorzugen.

⁶⁷ Nach einer Fachanfrage der Autoren beim zuständigen Fachgebiet im Umweltbundesamt zum möglichen Einsatz der Nr. 8 und 13 (1. BImSchV) in Pelletheizungen von Einzelgebäuden wurde festgehalten:

- Landwirtschaftliche feste Reststoffe wie z.B. Schadgetreide oder Spelzen dürfen nur in landwirtschaftlichen oder agrargewerblichen Betrieben eingesetzt werden (§ 5 Absatz 3 der 1. BImSchV)
- Stoffe der Nr. 8 und 13 benötigen ein aufwendiges Zulassungsverfahren um in automatisch beschickten Festbrennstoffkesseln der 1. BImSchV eingesetzt werden zu können. Bisher sind keine Feuerungsanlagen bekannt, die hierfür zugelassen sind.
- Auch in Zukunft sind diese Typenprüfungen aufgrund der strengen Grenzwerte, hier insbesondere wegen NO_x und CO nur in sehr geringem Umfang zu erwarten.

Klärgase, kommunal (R13) und industriell (R19)

Die Nutzung von Klärgas ist auf den Kläranlagen selbst in aller Regel eng in die Eigenenergieversorgung eingeschlossen. Grundsätzlich wäre eine alternative Nutzung (z.B. Aufbereitung zu Biomethan als Kraftstoff) denkbar und wurde auch von einzelnen Großkläranlagen erwogen, letztlich jedoch nicht umgesetzt, da dann die Energieversorgung der Kläranlage vollständig umzugestalten wäre. Angesichts der Vorteile, die die vorausgehenden Bewertung für Substrate zur Biomethanaufbereitung für die Nutzung zu Prozesswärmezwecke zeigt, wäre es daher wenig effizient, die bestehende direkte Nutzung von Klärgas für Prozesswärmezwecke durch einen Umweg über die Biomethanaufbereitung zu verkomplizieren.

Aus diesem Grund wird für die Klärgase innerhalb des Gesamtnutzungskonzepts (siehe anschließen des Kapitel 7) die etablierte Nutzung (Einsatz im BHKW zur gekoppelten Strom und Wärmenutzung) beibehalten. Da keine Gründe zur Annahme vorliegen, dass sich diese Ausgangslage in Zukunft technologisch ändern wird, wird an diesem Ansatz auch für die Zukunft (2030, 2050) für das Gesamtnutzungskonzept festgehalten.

7 Gesamtnutzungskonzept

7.1 Ableitung des Gesamtnutzungskonzepts

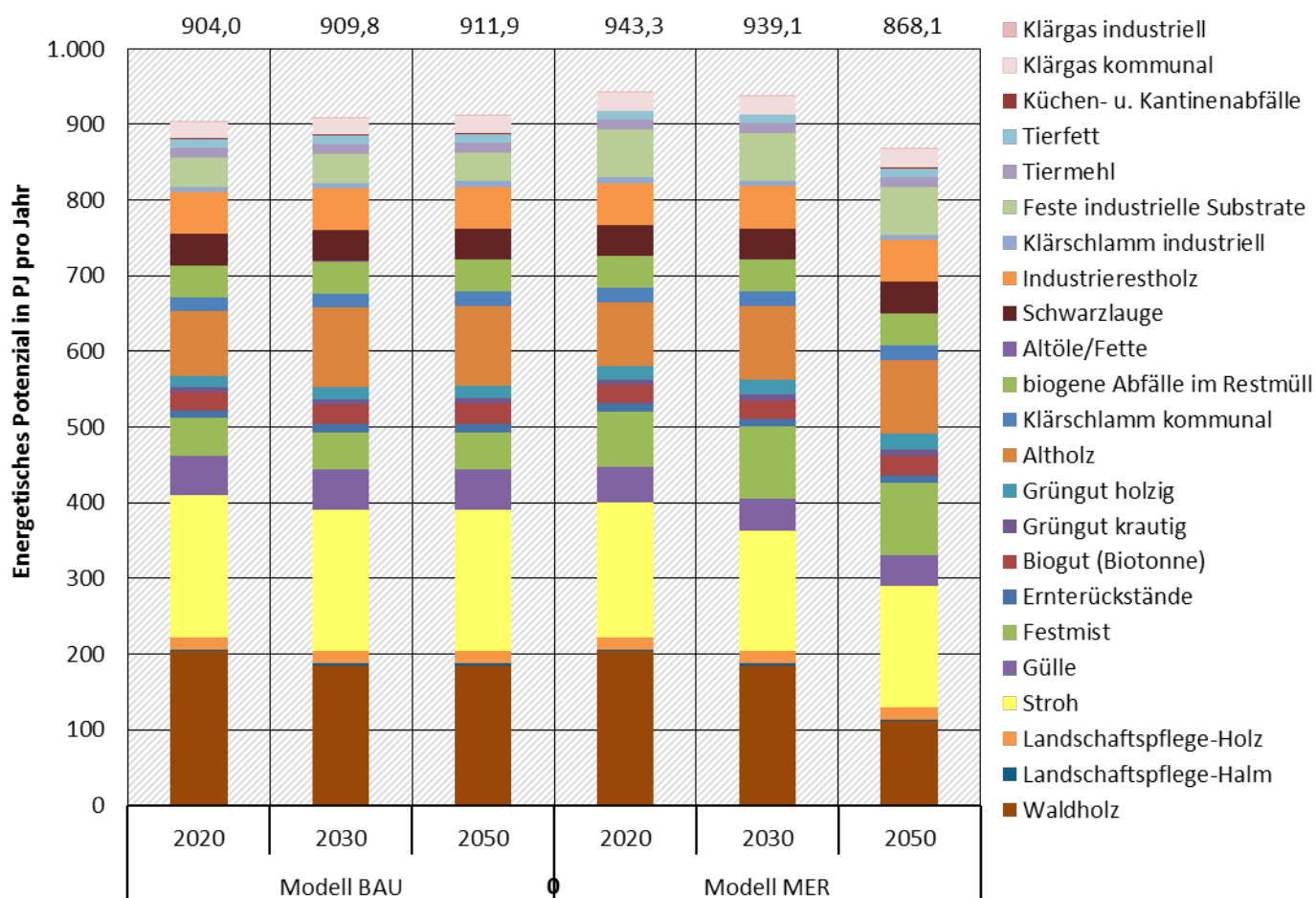
7.1.1 Inputmenge an Abfall-/Reststoffen

In Abschnitt 5.1.1 wurden die im Rahmen des ersten Arbeitspakets dieses Projekts abgeleiteten Potenzialmengen zusammengefasst. Die in Tabelle 47 zusammengefassten Massen an Abfall-/Reststoffe wurden dort bereits in Energiepotenziale umgerechnet.

Den Autoren ist bewusst, dass insbesondere die für das Jahr 2020 angegebenen Mengen in der Realität nicht erreichbar sein werden, da in Bezug auf einige Reststoffgruppen (z.B. Holz) die energetisch genutzten Mengen aktuell höher liegen, in anderen Reststoffgruppen (z.B. Stroh) die aktuelle energetische Nutzung deutlich geringer ist. Vielmehr müssen diese Zahlen als eine Art Szenario zur Darstellung von Obergrenzen aus v.a. ökologischer Sicht interpretiert werden.

In Abbildung 28 sind die energetisch bewerteten Potenziale aus Tabelle 48 (Abschnitt 5.1.1) grafisch dargestellt.

Abbildung 28: Energetische Potenziale^{a)} der Abfall-/Reststoffe für die Modelle BAU und MER für die Jahre 2020, 2030 und 2050; über den Balkengruppen sind die Summen aufgeführt.



a) Bezogen auf den unteren Heizwert oder das Biogasbildungspotenzial des Inputmaterials

Eigene Darstellung: ifeu

Aus der Darstellung wird ersichtlich, dass sich die Modelle nur geringfügig unterscheiden: das über die Jahresentwicklung konstant gehaltene Modell BAU („business as usual“) liegt dabei im mittleren Bereich zwischen den von 2020 bis 2050 abnehmenden Potenzialen des Modells MER („mit „erweiterten Restriktionen“). Dieses weist für das Jahr 2020 sogar einen etwas höheren Input auf (+3,5 %), weil nach diesem Ansatz die Erfassung von Festmist (R6) und festen industriellen Substraten (R20) gegenüber BAU ausgeweitet wird. Die erweiterten Restriktionen greifen dann ab 2030 v.a. für Waldholz (R1) und Stroh (R3), doch auch dann liegt das Potenzial lediglich knapp 5 % unter BAU 2020.

7.1.2 Priorisierte Zuweisung der Abfall-/Reststoffe zu Konversionstechniken

In Abschnitt 6.3 wurde für jeden Abfall-/Reststoff dargelegt, welcher Einsatzpfad bzw. welche Einsatzpfade anhand der fünf Bewertungskriterien jeweils am besten abschneidet bzw. abschneiden. Damit wurde bereits für jedes einzelne Material im Gesamtzusammenhang mit Konversionstechnik und Energieprodukt der zu empfehlende Pfad herausgearbeitet. In diesem Kapitel geht es nun darum, aus allen einzelnen Pfaden das Gesamtnutzungskonzept zu entwickeln. Zur besseren Übersicht wird dieser in sich einheitliche Schritt hier in zwei Teilschritten dargestellt: in diesem Kapitel der Schritt vom Abfall-/Reststoff zur Technik, im folgenden Kapitel 7.1.3 der Schritt von der Technik zu den Energieprodukten.

Da bei der Definition der Kriterien unvermeidlich subjektive Einschätzungen einfließen, wurden verschiedene Festlegungen bezüglich der Sensitivität gegenüber den Ergebnissen bereits geprüft.

Ein Aspekt war dabei die Frage, wie sich das Ergebnis darstellt, würde man das Kriterium „Kosten“ außer Acht lassen. Die Kostenfrage ist für die Realisierbarkeit der Einsatzpfade zwar von Relevanz, steht jedoch nicht im Fokus der Bewertung, die einen klaren Schwerpunkt auf die umweltbezogene Bewertung hatte. Zudem ist die Datensituation hier auch gegenüber den ökologischen Kriterien mit höheren Unsicherheiten verbunden ist und sich die Kosten im Zeitverlauf auch ändern können, was in der Bewertung nicht berücksichtigt werden konnte.

Folgende Vorgehensweise wird daher für die Ergebnisdarstellung gewählt:

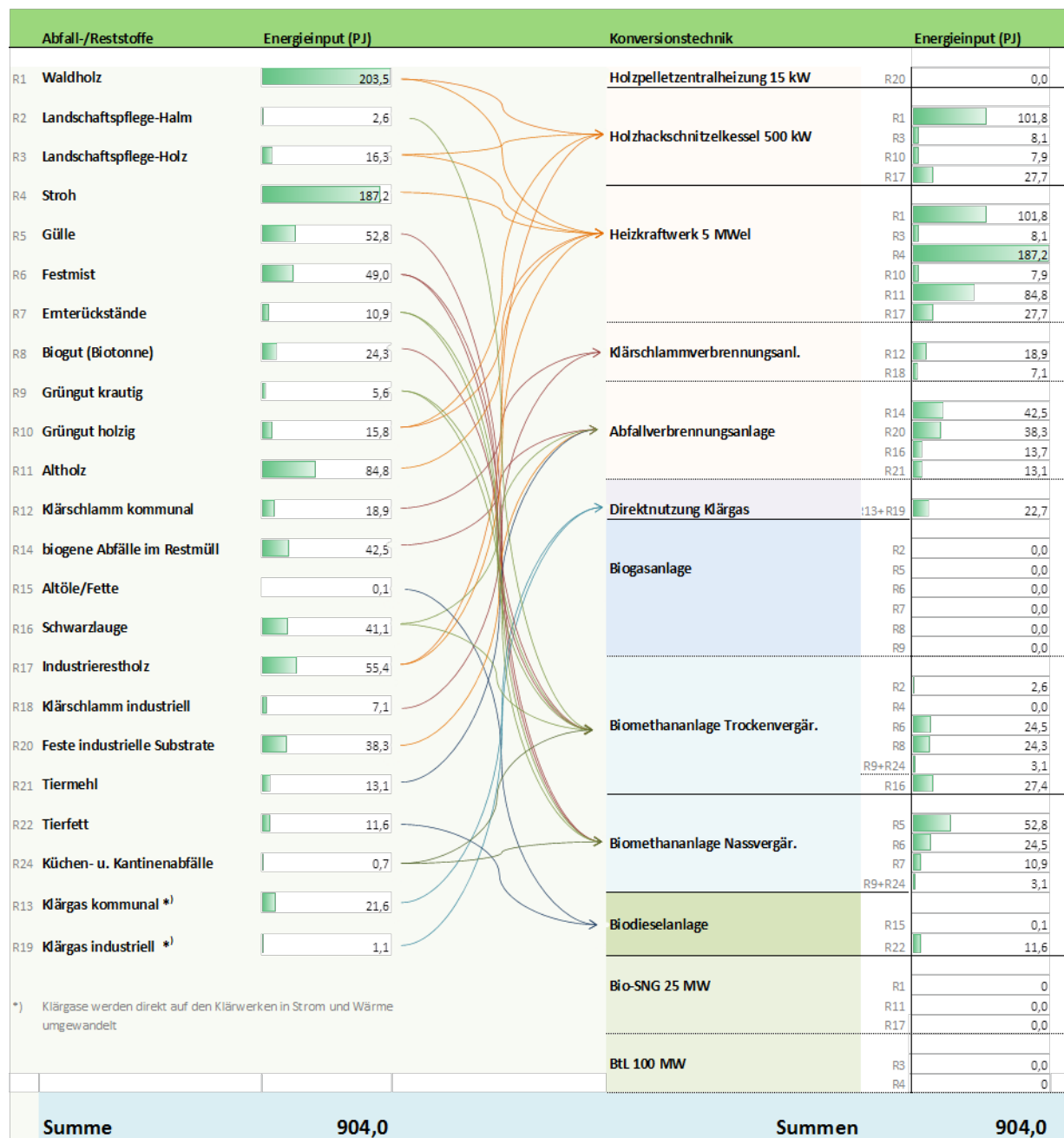
- ▶ Als Basisfall wird jeder Abfall-/Reststoff dem jeweils am besten bewerteten Einsatzpfad zugewiesen.
- ▶ Liegen mehrere Einsatzpfade gleichauf, wird der Massenstrom des entsprechenden Abfall-/Reststoffs unter den Einsatzpfaden aufgeteilt, wobei die Aufteilung nach
 - mehreren Konversionstechniken oder
 - den Sektor-Produkten erfolgt (d.h. Strom, Wärme, Kraftstoffe).
- ▶ Liegen mehrere Energieprodukte für die gleiche Konversionstechnik gleichauf (z.B. Niederdruckdampf UND Mitteldruckdampf aus einem Heizkraftwerk), dann wird dies einheitlich als ein Produkt betrachtet (in diesem Fall „Wärme“) und erhält auch nur einen Anteil am Massenstrom.
- ▶ Als Variante des Basisfalls wird dargestellt, wie das Ergebnis ausfällt, wenn bei ansonsten gleichem Vorgehen die Zuteilung der Abfall-/Reststoffe nach dem jeweils am besten bewerteten Einsatzpfad OHNE das Kriterium „Kosten“ erfolgt.

Für die weiteren Sensitivitätsbetrachtungen wird von einer Darstellung des gesamten Stoffstroms abgesehen, da der Einfluss auf das Gesamtergebnis sehr gering ausfällt. Die Effekte wurden bei der Diskussion der Rangbildung in Abschnitt 6.3 bereits diskutiert und werden weiter unten mit Blick auf das Gesamtergebnis bewertet.

Abbildung 29 zeigt die Materialflussverteilung von den Abfall-/Reststoffen ausgehend auf die Konversionstechniken nach dem oben beschriebenen Basisfall. Dabei wird der Massenstrom des Modells „business as usual“ (BAU) für das Jahr 2020 zu Grunde gelegt.

Weit wesentlicher zeigen sich Unterschiede der priorisierten Zurechnung, wenn z.B. die Variante „ohne Kostenbetrachtung“ gegen den Basisfall gesetzt wird, wie im Vergleich von Abbildung 29 mit Abbildung 30 zu erkennen ist.

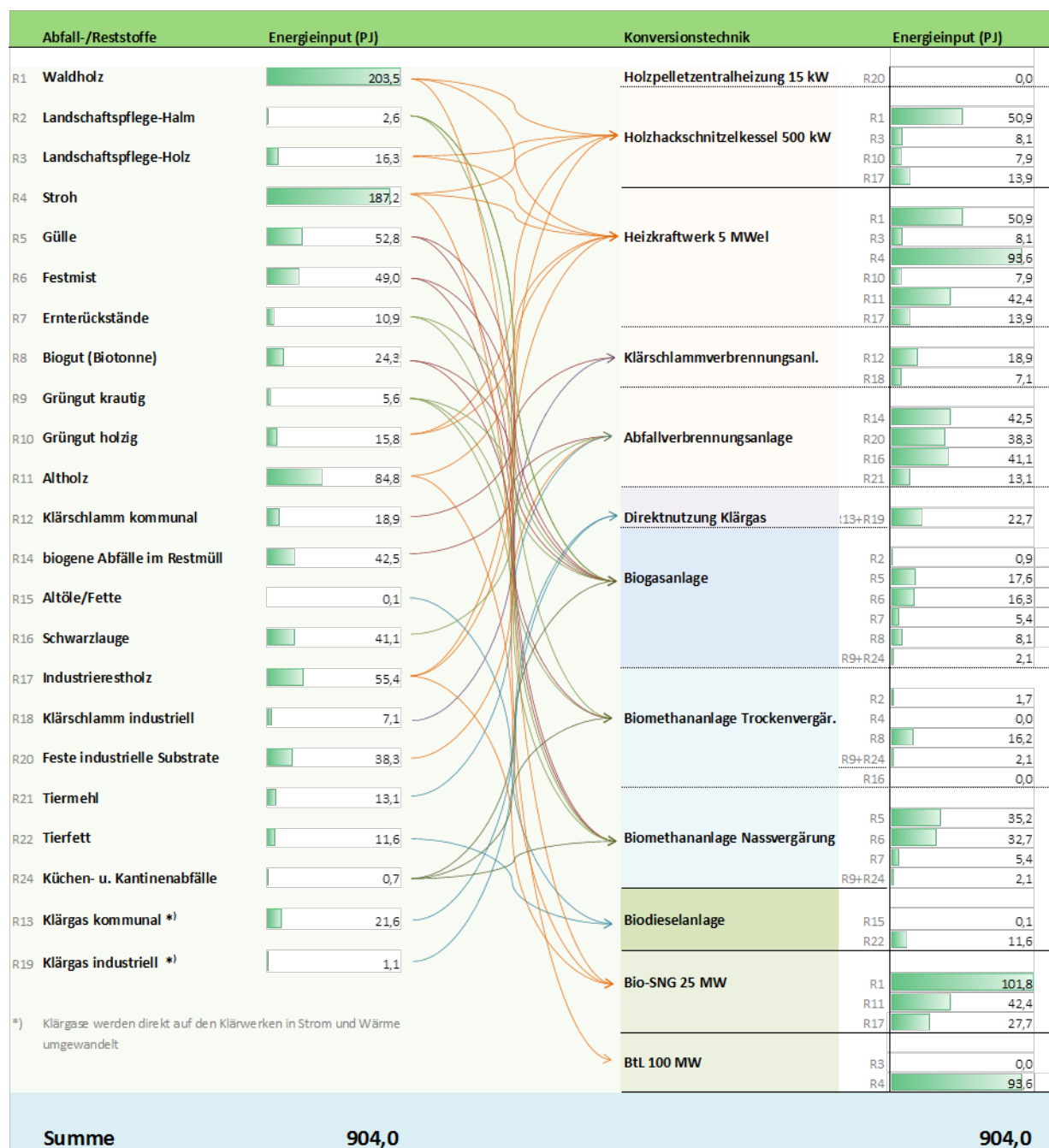
Abbildung 29: Mögliches Gesamtnutzungskonzept nach dem Basisfall – Zuweisung der Abfall-/Reststoffe zu den Konversionstechniken (Massenstrom gilt für das Modell BAU 2020)



Die Pfeilfarbe dient einer differenzierteren Anschaulichkeit: braun: holzartig; grün: grüngutartig, violett: nasse Abfall-/Reststoffe, dunkelblau: fetthaltige Abfälle, hellblau: Gase

Eigene Darstellung: ifeu

Abbildung 30: Mögliches Gesamtnutzungskonzept „Ohne Kostenbetrachtung“ – Zuweisung der Abfall-/Reststoffe zu den Konversionstechniken (Massenstrom gilt für das Modell BAU 2020)



Die Pfeilfarbe dient einer differenzierteren Anschaulichkeit: braun: holzartig; grün: grügutartig, violett: nasse Abfall-/Reststoffe, dunkelblau: fetthaltige Abfälle, hellblau: Gase

Eigene Darstellung: ifeu

Die Darstellungen zeigen Folgendes:

Basisfall (siehe Abbildung 29):

- Der Input an ca. 904 PJ verteilt sich zum größten Anteil auf die Feuerungsanlagen:
 - Holz hackschnitzelkessel und Heizkraftwerk mit allein 62 % des gesamten Inputs.

- Abfall- und Klärschlammverbrennung mit weiteren knapp 15 %
- ▶ Unter den verbleibenden Abfall-/Reststoffen dominieren die vergärbaren Materialien mit niedrigem bzw. negativem Heizwert; diese werden Biomethanlagen (je nach Art des Material mit vorge-schalteter Trocken- oder Nassvergärung) zugerechnet;
Sie nehmen insgesamt 22 % des Gesamtinputs ein (inklusive der ebenfalls zugerechneten Klär-gase).
- ▶ Ein verbleibender Rest (Altfette, Tierfette) von 1,3 % wird den Biodieselanlagen zu gerechnet.

„ohne Kostenbetrachtung“ (siehe Abbildung 35):

- ▶ Für viele Abfall-/Reststoffe teilen sich mehrere Einsatzpfade die Bestplatzierung, d.h. sie werden auf verschiedene Pfade verteilt.
- ▶ Zwar verteilt sich der Input noch immer überwiegend auf die Feuerungsanlagen, doch nehmen Holzhackschnitzelkessel und Heizkraftwerk nur noch 33 % davon ein; Abfall- und Klärschlamm-verbrennung bekommen mit 18 % sogar etwas mehr zugewiesen (Schwarzlauge, die zuvor mit der Biomethananlage geteilt wurde, da die Verbrennungsverfahren mit „mittleren“ Kosten eingestuft werden, siehe Kapitel 6.2.3).
- ▶ Etwa die Hälfte der brennbaren Abfall-/Reststoffe werden Bio-SNG- und BtL-Anlagen zugewiesen; das sind 29 % des Gesamtinput.
- ▶ Biogas- bzw. Biomethananlagen werden 19 % des Gesamtinputs zugerechnet.

Die Gründe, weswegen sich beim Weglassen des Kostenkriteriums die Rangfolgen verschieben, sind durchaus divers. So ist nicht allein der technische Aufwand einer Einsatzpfadoptio-n ausschlaggebend, sondern auch das resultierende Energieprodukt.

Wie aus Tabelle 47 in Abschnitt 6.2.3 hervorgeht, sind die Gestehungskosten für 1 kWh fossilen Strom niedriger als für 1 kWh Wärme. Eine auf Stromerzeugung ausgerichtete Biogasnutzung (v.a. durch die Kleinanlagen) erhält hierdurch im Basisfall einen Nachteil gegenüber der technisch teureren Aufberei-tung zu Biomethan, wenn dieses der Wärmenutzung zur Verfügung gestellt wird. Entfällt also das Kos-tenkriterium, dann ist nach dieser Bewertung die Biogasanlage mit Stromerzeugung genauso gut ein-zuschätzen wie die Biomethananlage.

7.1.3 Priorisierte Erzeugung der Energieprodukte

Mit der Priorisierung der Konversionstechnik je Abfall-/Reststoffart geht auch die Priorisierung der erzeugten Energieprodukte einher (siehe die Rangfolgen in Abschnitt 6.3). Aus Gründen der Übersicht werden die beiden Schritte nacheinander getrennt dargestellt.

Auch hier wird unterschieden zwischen Basisfall und der Variante „ohne Kostenbetrachtung“. Aus der Darstellung lassen sich folgende Schlüsse zusammenfassen:

Basisfall (siehe Abbildung 31):

- ▶ Das am höchsten bewertete Energieprodukt der Feuerungsanlagen ist Prozesswärme in Form von Mitteldruckdampf; dies betrifft alle Feuerungsanlagen, d.h. Holzhackschnitzelkessel und Heizkraftwerk, sowie Abfall- und Klärschlammverbrennung;
Gemäß dieser Priorisierung werden im Basisfall knapp 600 PJ Wärme bereitgestellt.
- ▶ Gebäudewärme und Strom zählen nicht zu den priorisierten Energieprodukten.
- ▶ Die priorisierten Energieprodukte aus den Biomethananlagen sind in den meisten Fällen gleichrangig
 - Kraftstoff (und zwar als Schiffs- oder Flugtreibstoff) mit ca. 45 PJ
 - und ebenfalls Prozesswärme

„ohne Kostenbetrachtung“ (siehe Abbildung 32):

- ▶ Aufgrund des höheren Anteils an den Bio-SNG- und BtL-Anlagen zugewiesenen Abfall-/Reststoffen verringert sich der Anteil von Prozesswärme (auf 380 PJ) unter den priorisierten Energieprodukten,
- ▶ Während im gleichen Zuge der Anteil an Kraftstoffen (Schiffs- oder Flugtreibstoff) auf etwa das Vierfache (205 PJ) steigt.
- ▶ Eine geringe Menge an Strom aus der Biogasanlage (7,8 PJ, gekoppelt mit leitungsgebundener Gebäudewärme in Höhe von 4,4 PJ) zeigt auf, dass dieses Energieprodukt aus dieser Konversionstechnologie in vielen Fällen nur knapp hinter den bestplatzierten Nutzungspfaden liegt.

Weitere Sensitivitätsbetrachtungen

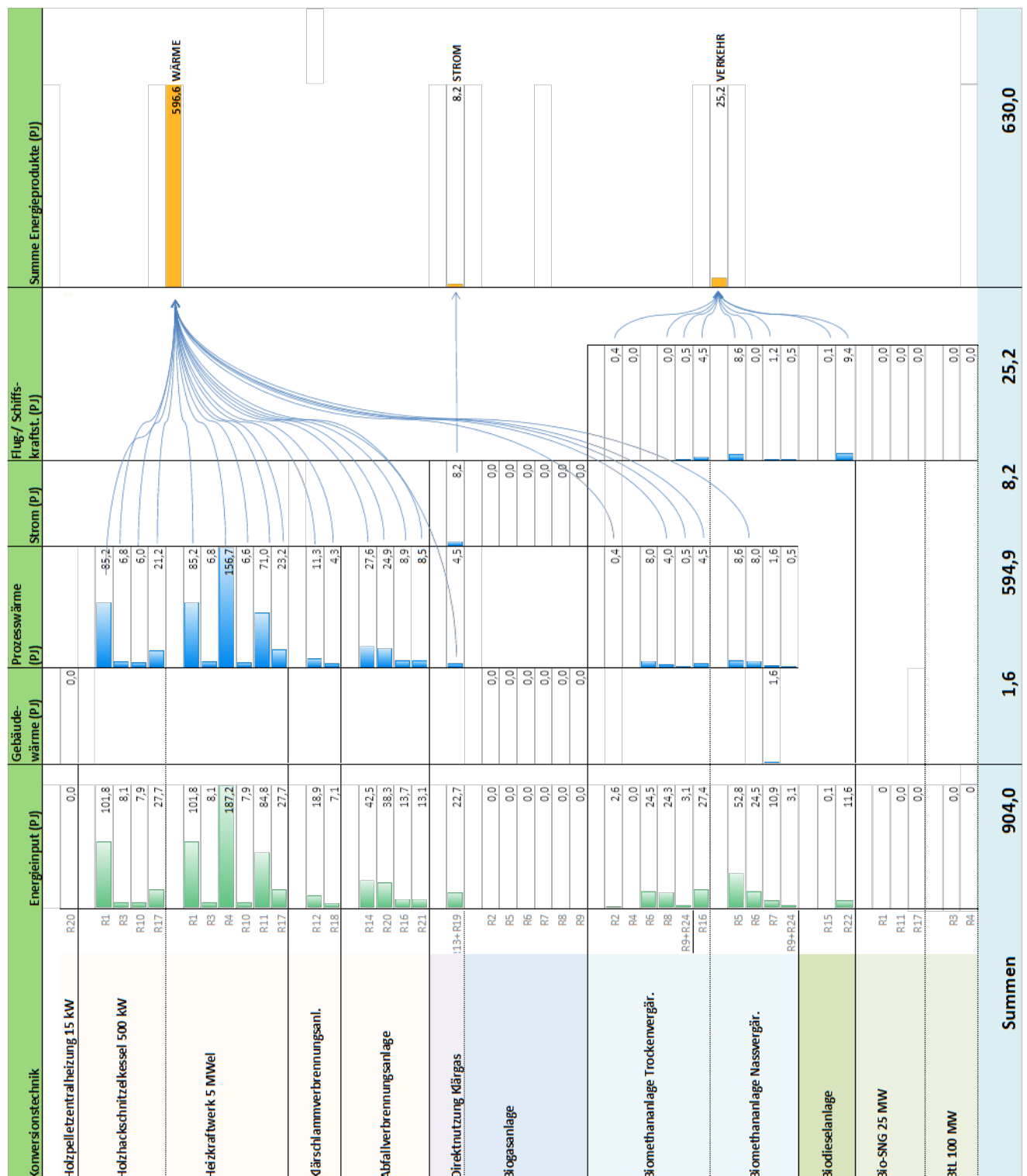
Wie in Abschnitt 6.3 diskutiert, würde eine höhere Punktvergabe für die **Biogasanlage** mit Strom-Wärme-Kopplung in Kriterium „Kompatibilität mit Transformation des Energiesystems“ diesem Einsatzzpfad mehr Anteile zukommen lassen – allerdings auch nur in der Variante „Ohne Kostenbetrachtung“. Bezieht man das Kostenkriterium mit ein, dann werden die Stoffströme Landschaftspflege-Halm (R2), Gülle (R5), Festmist (R6), Ernterückstände (R7), Biogut (R8) und Grüngut, krautig (R9) jeweils zwischen der Biogasanlage und den gleichrangigen Bestoptionen geteilt. Dies wären ca. 70 PJ des Gesamtenergieinputs und etwa 10 PJ Strom (gekoppelt mit 6 PJ Wärme).

In der Variante „ohne Kostenbetrachtung“ und gleichzeitiger höherer Bewertung im Kriterium „Kompatibilität mit Transformation des Energiesystems“ bekommt die Biogasanlage diese Abfälle und Reststoffe alleine zugerechnet. Sie würde damit etwa 150 PJ an Abfall-/Reststoffen zugeführt bekommen, die daraus erzeugte Strommenge würde dann bei etwa 22 PJ (gekoppelt mit 12 PJ Wärme) liegen.

Außerdem wurde der Einfluss der Grenzsetzung für die Anforderungen an THG-Einsparung geprüft. Erhöht man das Kriterium zum Erreichen von 3 Punkten auf 90 % THG-Einsparung,⁶⁸ ergäbe sich bei zwei Reststoffen eine Veränderung: Stroh würde nicht allein dem HKW zugerechnet, sondern zur Hälfte auch der BtL-Anlage. Die Ernterückstände würden dann nur noch der Biomethananlage zum Einsatz in der Prozesswärmeproduktion (Mitteldruck) zugerechnet.

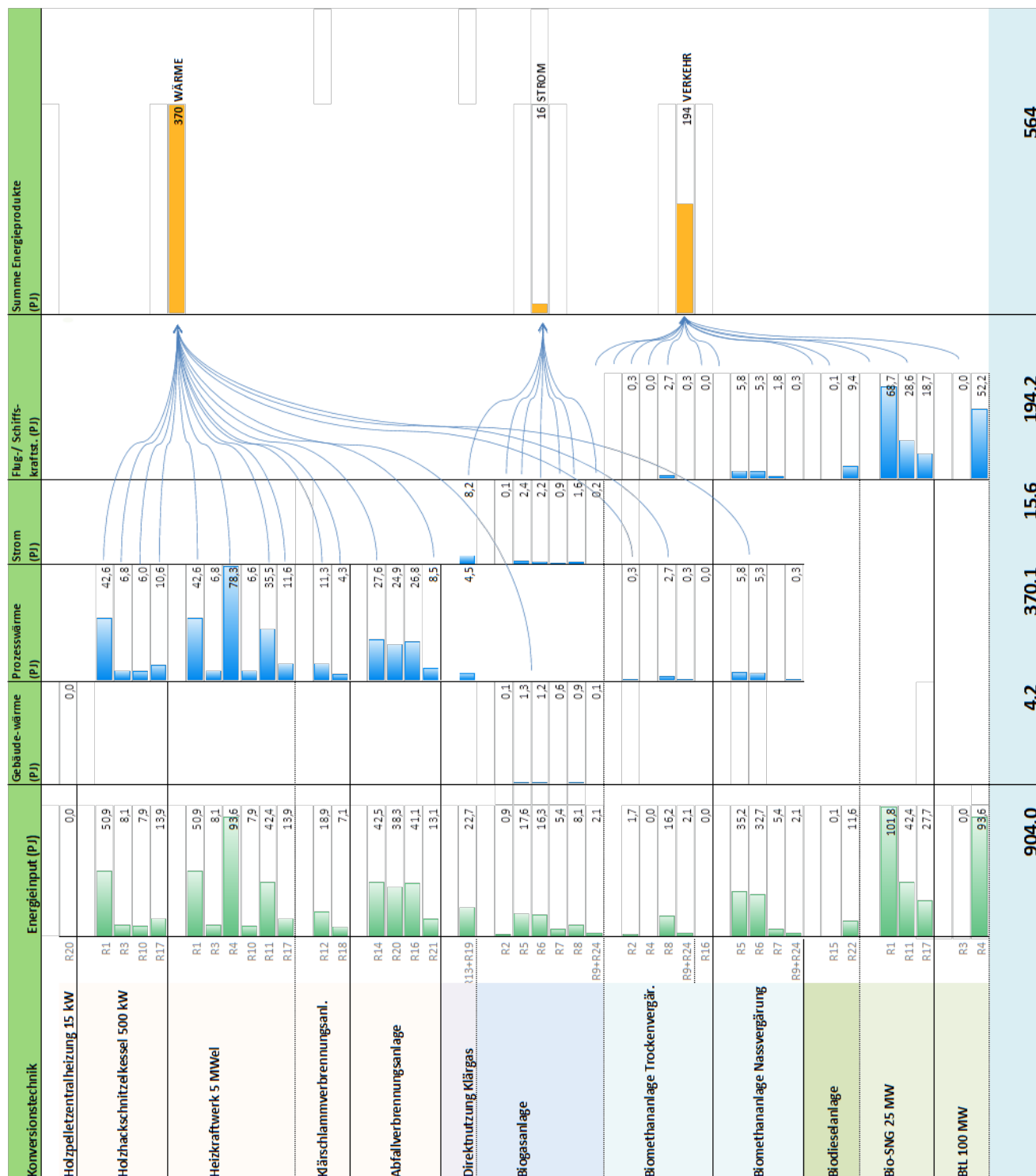
⁶⁸ Bei der Bewertung der THG-Bilanz werden im Basisfall mehr als 80 % Einsparung 3 Punkte vergeben. Diese Variante bedeutet eine schärfere Auslegung dieses Kriteriums.

Abbildung 31: Mögliches Gesamtnutzungskonzept nach dem Basisfall – Erzeugung von Energieprodukten für die Sektoren Strom, Wärme und Verkehr (Massenstrom gilt für das Modell BAU 2020)



Eigene Darstellung: ifeu

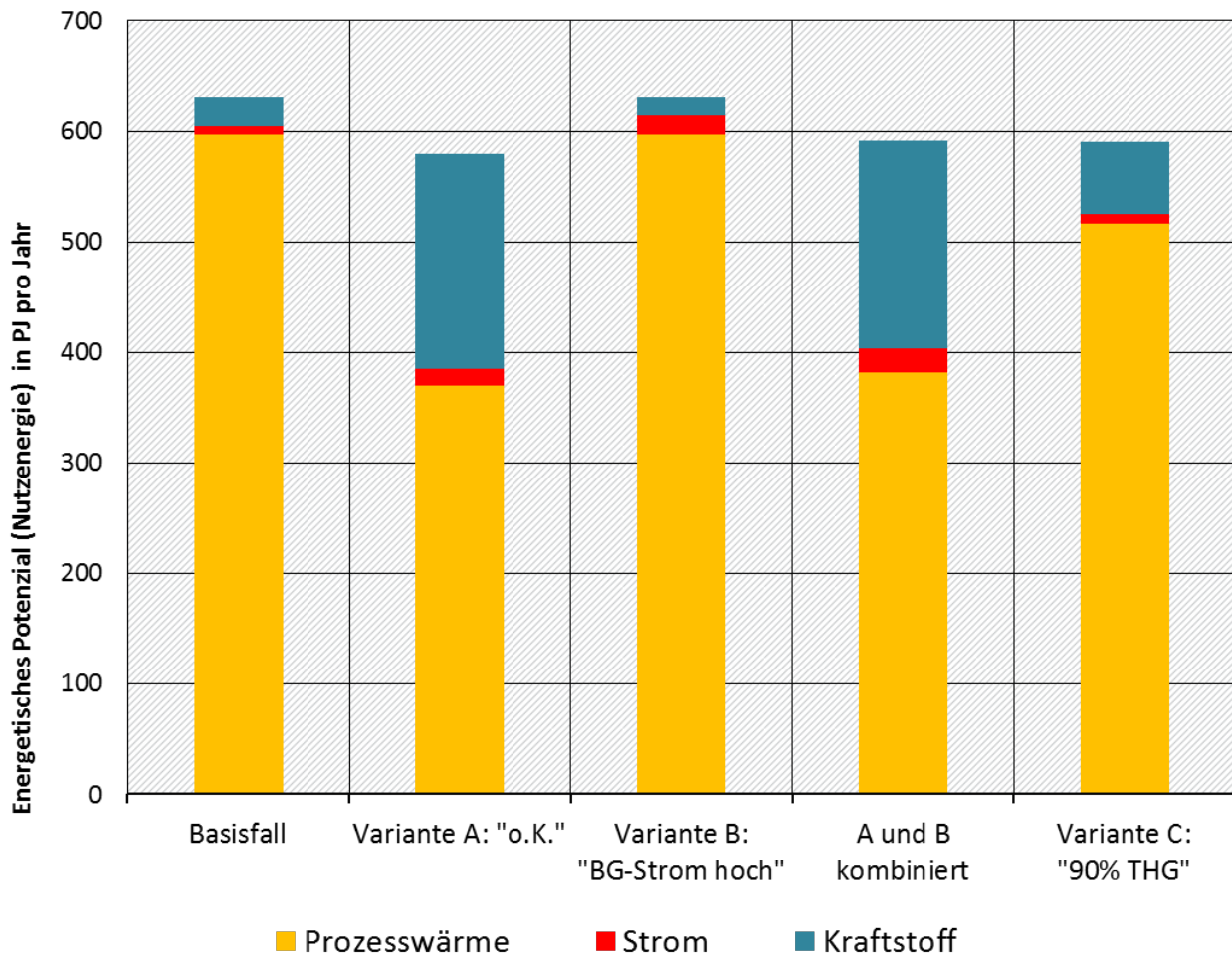
Abbildung 32: Gesamtnutzungskonzept „Ohne Kostenbetrachtung“ – Erzeugung von Energieprodukten für die Sektoren Strom, Wärme und Verkehr (Massenstrom gilt für das Modell BAU 2020)



Eigene Darstellung: ifeu

Abbildung 33: Gegenüberstellung der Sensitivitätsbetrachtungen: Basisfall, Variante A „Ohne Kostenbetrachtung“, Variante B „Hohe Bewertung von Biogas-Strom“, Kombination aus Variante A

und B und Variante C „Schärfere Anforderung an THG-Minderung“ (Massenstrom gilt für das Modell BAU 2020)



Erläuterung:

Variante A „o.K.“ = ohne Kostenbetrachtung; Variante B: BG-Strom hoch = Biogasanlage mit Stromproduktion mit 3 Punkten für Kompatibilität zur Energiesystemtransformation; Variante C: „90 % THG“ = schärferes THG-Kriterium mit 3 Punkten für >90 % Einsparung.

Darstellung: ifeu

7.2 Mögliches Gesamtnutzungskonzept verschiedener (Zukunfts-)Modelle

Vorangehend wurde das Gesamtnutzungskonzept anhand des Modells BAU für das 2020 dargestellt. Hier werden nun die Veränderungen durch das Modell MER sowie die Bezugsjahre 2030 und 2050 zusammengefasst. Es sei an dieser Stelle betont, dass über die Modelle und auch die Jahresentwicklung nur die Reststoffmenge differenziert wurde. Technische Aspekte der Nutzung (Wirkungsgrade, Substitutionswirkung) wurden dagegen konstant gehalten.

7.2.1 Energiepotenziale der Gesamtnutzungskonzepte

In Tabelle 56 sind die Energiepotenziale (Endenergie) der Abfall-/Reststoffe nach den Modellen BAU und MER für die Jahre 2020, 2030 und 2050 sowie den Basisfall und die Variante „ohne Kostenbe- trachtung“ zusammengestellt.

Tabelle 56: Endenergiepotenziale der Abfall-/Reststoffe nach den Modellen BAU und MER für die Jahre 2020, 2030 und 2050.

Jahr	Modell	Einheit	Basisfall			Variante „ohne Kosten“		
			Prozess- wärme	Strom	Flug-/Schiffs- kraftstoff	Prozess- wärme	Strom	Flug-/ Schiffs- kraftstoff
2020	BAU	PJ	597	8,2	25,2	370	15,6	194
	MER	PJ	598	8,2	24,4	370	16,5	194
2030	BAU	PJ	599	8,2	25,4	372	15,8	195
	MER	PJ	586	8,2	23,4	364	17,2	189
2050	BAU	PJ	600	8,2	25,4	372	15,9	195
	MER	PJ	525	8,2	23,5	335	17,3	164

Eigene Berechnungen ifeu

7.2.2 THG-Einsparpotenziale der Gesamtnutzungskonzepte

Die Energiepotenziale des Gesamtnutzungskonzepts der Abfall-/Reststoffe werden im Folgenden mit den Emissionsfaktoren, die im Kriterium „Treibhausgasbilanz“ für jeden Einsatzpfad ermittelt wurden, verrechnet. Auf diese Weise erhält man die Treibhausgasbilanz des Gesamtnutzungskonzepts.

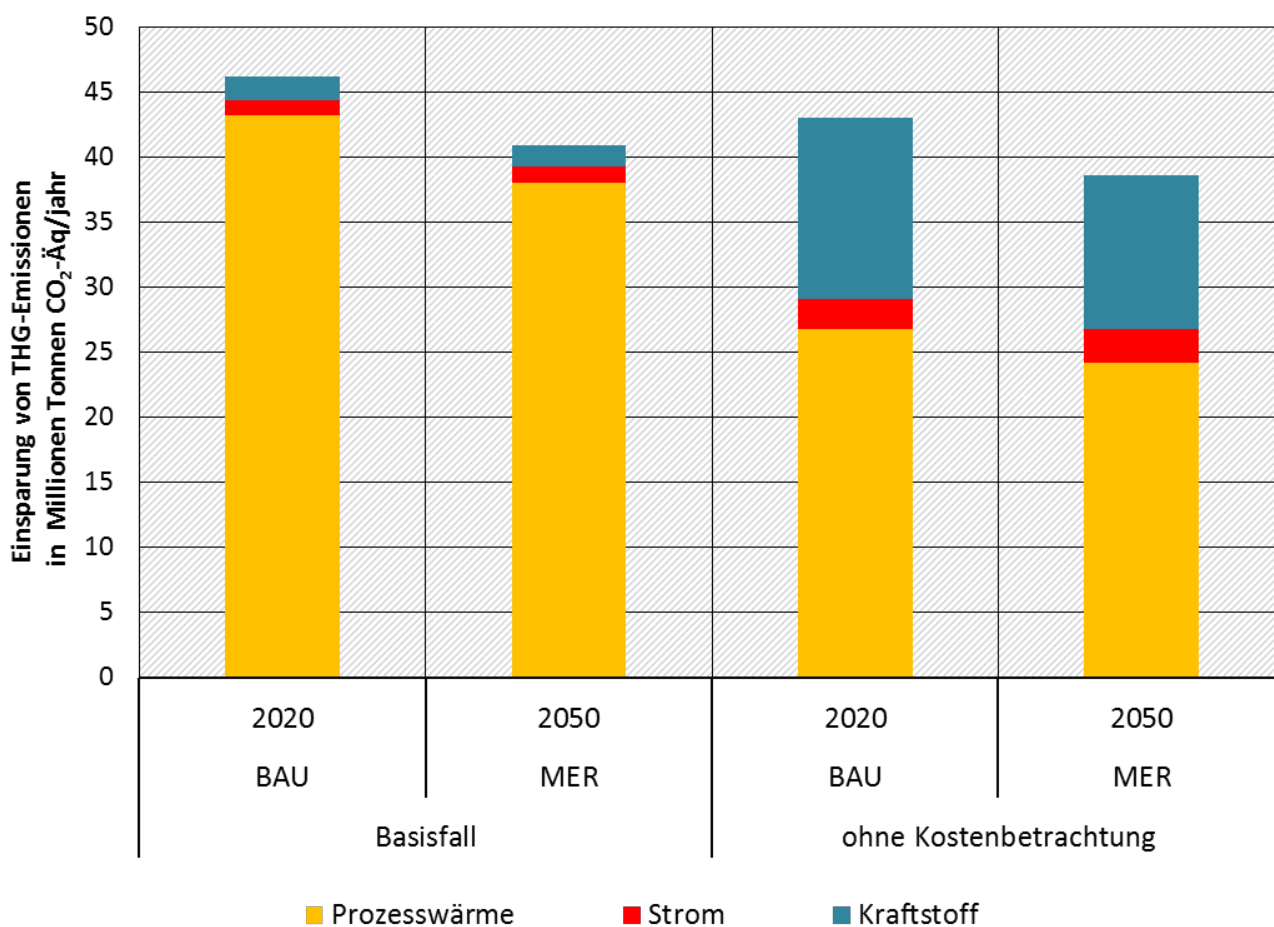
Angesetzt werden dabei die Netto-Emissionsfaktoren, d.h. die Differenz aus der Emission des Pfades selbst und dem Emissionswert des substituierten Referenzsystems. Diese sind in Tabelle 57 zusammengestellt. Was die Reststoffnutzung betrifft, weist jeder einzelne Pfad einen eigenen spezifischen Emissionsfaktor auf (wie in Anhang C.2 in Tabelle „Treibhausgasbilanz“ zu entnehmen ist). Für die Anwendung auf das Gesamtnutzungskonzept wird an dieser Stelle jedoch ein einheitlicher mittlerer Faktor aus der Bandbreite der entsprechenden Emissionsfaktoren (vgl. Tabelle 57), angesetzt.

Tabelle 57: THG-Emissionsfaktoren für Strom, Prozesswärme und Kraftstoffe, biobasiert, fossil und als Netto-Faktor (in g CO₂-Äq./MJ)

	Prozesswärme	Strom	Flug/Schiffskraftstoff
Reststoffnutzung	7,5	35,5	21,9
fossile Referenz	80	183	94
Netto-Emissionsfaktor	-74,7	-173	-78,2

Quelle: Referenzwerte aus RED II (RICHTLINIE (EU) 2018/2001); Reststoffnutzung: Eigene Berechnungen: ifeu

In Abbildung 34 sind die Ergebnisse für die Stützjahre 2020 (BAU) und 2050 (MER) dargestellt. Wie sich aus den Mengenverhältnissen in Tabelle 48 erkennen lässt, weichen die anderen Kombinationen (BAU 2030, 2050 sowie MER 2020 und 2030) nur um wenige Prozente vom BAU 2020-Modell ab. Wie oben betont, sei auch hier nochmals erwähnt, dass die Emissionsfaktoren weder über die Modelle noch über die Jahresentwicklung variiert werden. D.h. im Rahmen dieser Betrachtung wird auch für das Jahr 2050 noch von einer Substitutionswirkung gegenüber dem fossilen Referenzsystem ausgegangen, ungeachtet dass der Anteil an substituierbarem fossilen Brennstoff im Energiesystem 2050 gemäß den Klimaschutzzielen der Bundesregierung (BMUB 2016) gegen Null gehen sollte.

Abbildung 34: Treibhausgasbilanz des Gesamtnutzungskonzepts dargestellt als Energiepotenziale der Abfall-/Reststoffe nach den Modellen BAU und „Mit erweiterten Restriktionen“ für die Jahre 2020, 2030 und 2050

Eigene Darstellung ifeu; Quelle: Berechnungen ifeu

Im Ergebnis zeigt Abbildung 34, dass das Einsparpotenzial der energetischen Nutzung des dafür als verfügbar abgeleiteten Potenzials an biogenen Abfall- und Reststoffen bei insgesamt 46 Mio. t CO₂-Äq. pro Jahr im Modell BAU, Basisfall liegt. Im Modell MER reduziert sich diese Einsparung im Jahr 2050 durch das verringerte Biomassepotenzial auf 41 Mio. t CO₂-Äq. pro Jahr. Erhöht man den Anteil an Biokraftstoffen gegenüber der Prozesswärme (Variante „ohne Kostenberechnung“), dann würde THG-Einsparpotenzial mit 43 Mio. t CO₂-Äq. pro Jahr (BAU) bis 39 t CO₂-Äq. pro Jahr (MER 2050) etwas geringer ausfallen. Dies beruht darauf, dass der höhere Aufwand des Herstellungspfads für Kraftstoffe einem mittleren fossilen Referenzwert gegenübersteht.

Diese Darstellung der THG-Einsparpotenziale der Gesamtnutzungskonzepte dient ausschließlich der Veranschaulichung der Größenordnungen. Für eine Feinanalyse mit differenzierteren Aussagen wäre eine vertiefte Analyse mit stärker differenzierten Emissionsfaktoren erforderlich. Dies ist jedoch nicht Bestandteil in diesem Forschungsprojekt.

7.3 Zusammenfassung

Auf der Basis

- ▶ des energetisch erschließbaren biogenen Abfall- und Reststoffpotenzials (Kapitel 3),
- ▶ der für eine Nutzung im Energiesystem erforderlichen Konversionstechniken (Kapitel 4),
- ▶ sowie der technischen Eignungsbewertung von Kombinationen aus Stoffen und Techniken (Kapitel 5) und
- ▶ der ökologischen Bewertung der daraus resultierenden möglichen Einsatzpfade (Kapitel 6)

wurde in diesem Kapitel ein mögliches Gesamtnutzungskonzept entwickelt. Dieses kann eine Richtung weisen und aufzeigen welche Rolle die Abfall- und Reststoffbiomasse im künftigen Energiesystem spielen könnte, bzw. in welchem Umfang und mit welchen Einsatzoptionen sie entlang wesentlicher Optimierungskriterien in einem zukünftig nahezu vollständig dekarbonisierten Energiesystem genutzt würde.

Dieses Gesamtnutzungskonzept versteht sich nicht als Energieszenario und steht daher auch nicht im Konflikt zu den verschiedenen Szenarien, die für die Gestaltung der Energiewende bzw. der Erfüllung der Klimaschutzziele entwickelt wurden und werden, wie z.B. *Ressourcenschonendes und treibhausgasneutrales Deutschland* (RTD)⁶⁹ des UBA, die Langfristszenarien des BMWi (Pfluger, Terstegen, Franke 2017) oder die vom BMU beauftragten Klimaschutzszenarien 2050 (Repenning et al. 2015). Anders als in den Szenarien wird hier die Frage nach dem Bedarf bzw. der Nachfrage nicht gestellt, sondern allein das auf der Basis des erschließbaren Potenzials an biogenen Abfall- und Reststoffen bestehenden Angebot und dessen technisch-ökologisch optimierte Nutzung bewertet. Inwieweit sich die daraus ergebenden Energieprodukte in den ermittelten Quantitäten auch im Energiesystem insgesamt einrechnen lassen, ist nicht Bestandteil dieses Forschungsprojekts.

Insgesamt wird das in Kapitel 3 auf der Basis von zahlreichen vorhandenen Studien hergeleitete erschließbare Potenzial – differenziert nach 24 Abfall- und Reststoffarten – mit einem Energieinhalt von

⁶⁹ <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/szenarien-konzepte-fuer-die-klimaschutz/ressourcenschonendes-treibhausgasneutrales#textpart-1>

etwa 900 PJ pro Jahr beziffert. Durch Optimierung (z.B. mehr Erschließung von Festmist oder industriellen Substraten) kann es auf rund 940 PJ erhöht werden, durch erweiterte Restriktionen (v.a. bei Waldholz und Stroh) reduziert es sich jedoch auf etwa 870 PJ.

Für jede einzelne Abfall- und Reststoffart wurde die Eignung für eine Behandlung der in Kapitel 4 und Anhang B beschriebenen Konversionstechniken geprüft. Daraus ergaben sich – mit der Notwendigkeit, die Vielzahl an möglichen Einzelfällen durch Zusammenfassen ähnlicher Stoffe einzugrenzen – 32 Einsatzpfade (siehe Kapitel 5).

Des Weiteren können diese Einsatzpfade für unterschiedliche Sektoren des Energiesystems (Wärme, Strom, Verkehr) wie auch verschiedene Energieprodukte (z.B. Gebäudewärme, Prozesswärme) nutzbar gemacht werden. Auf der Basis dieser Differenzierung wurden alle Einsatzpfade und Nutzungsoptionen anhand von fünf Kriterien (Energieeffizienz, Treibhausgasbilanz, Kostenbetrachtung, weitere ökologische Aspekte, Kompatibilität mit Transformation des Energiesystems) bewertet und eine Rangfolge erstellt (Kapitel 6).

Das Ergebnis – das „Gesamtnutzungskonzept“ – wurde dargestellt in Form von Materialstrom-Diagrammen (siehe Abbildung 29 bis Abbildung 32), die die aufgrund der Bewertung priorisierten Zuweisungen von Abfall-/Reststoff über Konversionstechnologie bzw. Technik zu erzeugtem Energieprodukt veranschaulichen.

Dabei wurden auch Einflüsse von Festlegungen des Bewertungsansatzes auf die Ergebnisse geprüft. Das Ergebnis zeigt eine klare Priorisierung für Produkte für den Wärmesektor:

- ▶ Im Basisfall stellt für ca. 87 % des energetischen Potenzials an Abfall-/Reststoffen der Wärmesektor der zu bevorzugende Pfad dar.
- ▶ Für alle festen bzw. mit geringen Feuchtegehalten verbundenen Abfall-/Reststoffe erreicht in den meisten Fällen eine direkte energetische Nutzung in einer Kesselanlage oder einem Heizkraftwerk mit der Erzeugung von Prozesswärme die beste Bewertung.
- ▶ Für die mit höheren Feuchtegehalten verbundenen Abfall-/Reststoffe ist der Weg über eine Biomethananlage zu Biomethan, ebenfalls teils für die Wärmenutzung, überwiegend jedoch für die Kraftstoffherstellung (spricht den Verkehrssektor, dem 12 % des Inputs zugerechnet werden), die am besten bewertete Option.
- ▶ Andere Pfade, wie Biogasanlage zu Strom und gekoppelter Wärme oder SNG- sowie BtL-Anlagen zu Kraftstoff liegen dagegen mit geringem Abstand hinter den dominierenden Wärmeoptionen. Ihnen wird im Basisfall somit nichts zugerechnet. Strom wird im Basisfall lediglich aus der Nutzung von Faulgas erzeugt (über BHKW gekoppelt mit Wärme).
- ▶ Zur Prüfung der Stabilität der Ergebnisse wurden daher auch die gesetzten Randbedingungen des Bewertungsansatzes im Sinne einer Sensitivitätsanalyse variiert. Eine Verschiebung der Ergebnisse wird deutlich, wenn man das Kriterium „Kostenbetrachtung“ aus der Bewertung herausnimmt: Für mehrere Abfall-/Reststoffe zeigt sich dann zumindest Gleichrangigkeit eines Wegs über Biomethan, SNG oder BtL zu Kraftstoff. Gegenüber dem Basisfall werden unter dieser Variante anstelle von 87 % nur noch 56 % dem Wärmesektor zugewiesen, 36 % dagegen dem Verkehrssektor. Ca. 8 % werden im Übrigen über Biogasanlagen dem Stromsektor zugerechnet (inkl. gekoppelter Wärmeerzeugung).

Für den Basisfall unter dem Modell „business as usual“ (BAU) und das Jahr 2020 (wie auch die Jahre 2030 und 2050) resultieren:

- ▶ ca. 600 PJ Wärme
- ▶ ca. 8 PJ Strom
- ▶ ca. 25 PJ Kraftstoff

Die Werte weichen für das Modell „Mit erweiterten Restriktionen“ (MER) bis 2050 für die Wärme etwas ab (525 PJ), während dank Zunahme an Festmistvergärung der Output an Kraftstoff weitgehend konstant bleibt.

Für die Variante „Ohne Kostenbetrachtung“ ergeben sich ca. 370 PJ Wärme (unter MER abnehmend auf 335 PJ in 2050) und 195 PJ Kraftstoff (unter MER abnehmend auf 165 PJ in 2050). Die erzeugten Strommengen liegen bei 15 bis 17 PJ.

Das Einsparpotenzial der energetischen Nutzung der biogenen Abfall- und Reststoffe liegt bei insgesamt 46 Mio. t CO₂-Äq. pro Jahr im Modell BAU, Basisfall. In der Variante „ohne Kostenberechnung“ liegt die Einsparung bei 43 Mio. t CO₂-Äq. pro Jahr. Im Modell MER reduzieren sich diese Werte bis zum Jahr 2050 entsprechend der Reduktion des nutzbaren Potenzials.

Es ist zu betonen, dass diese Werte zum THG-Einsparpotenzial der Gesamtnutzungskonzepte nur der Veranschaulichung der Größenordnungen dienen. Wichtig ist dabei festzuhalten, dass bei einer Variation der Ansätze und Annahmen keine wesentlich anderen Ergebnisse zu erwarten sind.

Von der Größenordnung ist das Ergebnis mit folgenden Eckdaten als stabil zu werten:

- ▶ Maximal etwa 900 PJ (870 bis 940 PJ, je nach Jahr und Modell) stehen an biogenen Abfall-/Reststoffen als technisch-ökologisch erschließbares Potenzial für das Energiesystem zur Verfügung.
- ▶ Dieses Potenzial sollte bevorzugt für den Wärmesektor genutzt werden, wobei hier maximal 600 PJ, mindestens aber 350 PJ an Nutzwärme bereitgestellt werden können.
- ▶ Die übrigen Anteile des Potenzials sollten vorwiegend dem Verkehrssektor zur Verfügung gestellt werden. Die daraus erzeugbare Kraftstoffmenge bewegt sich im Bereich von 45 PJ, könnte aber bis maximal 200 PJ erhöht werden, lässt man das Kriterium der Kostenbetrachtung außer Acht.
- ▶ Die Einsparung an THG-Emissionen gegenüber fossiler Referenzenergie liegt im Bereich von 45 Mio. t CO₂-Äq. pro Jahr.

8 Fazit

Schlussfolgerungen aus der Analyse der Biomassepotenzialabschätzungen

Die Vorgehensweise im ersten Teil des Forschungsprojekts war nicht darauf ausgerichtet, eine eigenständige neue Erhebung des Biomassepotenzials durchzuführen, sondern konzentrierte sich darauf, die vorliegenden Studien auszuwerten und diese schlussendlich zur Entwicklung eigener Erkenntnisse zu „interpretieren“. Die besondere Herausforderung lag dabei weniger in der Menge an verfügbaren und auszuwertenden Studien, sondern darin, die jeweils angewandten unterschiedlichen Ansätze in den Studien nachzuvollziehen und die darin verarbeiteten Basisdaten und ggf. zu Grunde gelegte Kriterien für Potenzialeingrenzungen zu erkennen. Dies war notwendig, um später weitergehende, spezifisch definierte Restriktionskriterien auf das Datenmaterial anzuwenden. Leider boten etliche Arbeiten hierfür nicht die nötige Transparenz.

Eine weitere Herausforderung war es, im Einzelnen präzise zu erkennen, welche Definition von *Potenzial* jeweils den Studien zu Grunde liegt. Nach der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit sollen die biogenen Abfälle und Reststoffe aufsummiert werden, die für eine energetische Nutzung unter folgenden Bedingungen zur Verfügung stehen: Alle aus rechtlichen oder ökonomischen Gründen stofflich zu verwertenden Materialien werden ausgeschlossen und anspruchsvolle weitere Restriktionskriterien (v.a. aus ökologischer Sicht) werden angewendet.

Um den Einfluss der Restriktionskriterien differenziert untersuchen zu können, wurden die zwei Modellansätze BAU (als Mischung aus den derzeit existierenden und rechtlich bindenden sowie einigen freiwilligen Restriktionen) und MER (mit erweiterten Restriktionen) in gestufter Weise angewandt. Die Restriktionskriterien (unabhängig ob nach Modell BAU oder MER) mussten für jeden Abfall- und Reststoff individuell definiert werden, da sich die betrachteten ökologischen und z.T. auch ökonomischen Wechselwirkungen bei jedem Stoff unterschiedlich gestalten.

Diese Vorgehensweise führt dazu, dass diverse Materialien oder Anteile davon ausscheiden, da sie bereits einer stofflichen Nutzung unterliegen (z.B. Stroh als Einstreu). Andererseits können die angewandten Restriktionen dazu führen, dass in energetischer Nutzung befindliche Mengen eines Materials auf ein (deutlich) geringeres Maß einzugrenzen sind (z.B. Waldholz).

Das Beispiel Waldholz verdient hier genauere Betrachtung. Gerade bei diesem Material ist der Definitionsraum in den ausgewerteten Studien sehr diffus. Der Begriff des sogenannten *Waldrestholzes* wird uneinheitlich verwendet. In diesem Projekt wurde aus zwei Gründen von diesem Begriff abgesehen und stattdessen explizit auf *Waldholz* i.S. von Dendromasse abgestellt: Erstens führen bereits die BAU-Kriterien dazu, dass das kleinteilige Sortiment (< 7cm) ausgeschlossen wird. Zweitens sind die maßgeblichen Mengen an energetisch bereits genutztem Waldholz zum Derbholz zu zählen, bzw. zu Stammholz, das aus ökonomischen Gründen nicht in der Sägeindustrie genutzt wird. In diesem Forschungsprojekt wurde daher beschlossen, genau dieses Material (mit dem Begriff der *Dendromasse*) für die Potenzialbestimmung zu Grunde zu legen. Hierbei wurde dann zwischen dem stofflich zu genutzten Dendromasseteil und dem energetisch genutzten Teil unterschieden. Die letztlich abgeleitete Menge (ausschlaggebend die Studie des BfN 2017) führt mit 11 Mio. t_{atro} zu einem energetisch nutzbaren Waldholzpotenzial, das deutlich unter der aktuell genutzten Menge liegt.

Nicht trivial ist im Übrigen auch der Schritt der Umrechnung der Abfall- und Reststoffmassen in Energieeinheiten. Viele Potenzialstudien legen von vornherein nur Angaben in Peta-Joule vor, ohne Angaben zur Masse der Abfälle und Reststoffe zu machen, was die Nachvollziehbarkeit oft erheblich erschwert. In dieser Arbeit wurde daher besonderer Wert darauf gelegt, dass die in PJ gehandhabten Daten für jeden Stoffstrom transparent nachvollziehbar sind.

Etwa 900 PJ (870 bis 940 PJ, je nach Jahr und Modell) könnten an biogenen Abfall-/Reststoffen als technisch-ökologisch erschließbares Potenzial in Form von Brenn- oder Kraftstoffen für das Energiesystem zur Verfügung stehen. Diese Gesamtsumme beinhaltet auch alle bereits in der energetischen Nutzung befindlichen Abfall- und Reststoffmengen.

Der höchste Energieinput käme vom Holz (360 PJ), wobei das Waldholz mit ca. 200 PJ klar den größten Anteil hat. Auch Stroh stellt mit 187 PJ einen großen Anteil. Doch gerade beim Stroh zeigt sich die Schwierigkeit der Ergebnislage: Zum Beispiel kann das Stroh je nach Wetterereignis (z.B. Trockenheit) in einem Jahr mehr oder weniger anfallen. Somit verschieben sich die Potenziale. Für konkrete Projektierungen müssen somit vor Ort genaue Analysen bzgl. der Verfügbarkeit erarbeitet werden. Die Potenziale von Gülle bzw. Festmist sind mit ca. 110 PJ geringer. Auf Grund der Klimaschutzwirkungen in der Landwirtschaft ist es jedoch wichtig, diese Stoffe in Biogasanlagen zu behandeln. Bei den vergärbaren Abfallmengen ist besonders die Biotonne mit 24,3 PJ zu nennen. Es wurde im Modell MER auch eine Reduktion der Lebensmittelabfälle angenommen, sodass sich bis 2050 trotz Umsetzung der Vergärung statt Kompostierung ein Rückgang ergibt. Interessant ist jedoch auch der biogene Abfall im Restmüll (42,5 PJ), der gezielt mobilisiert werden könnte. Insgesamt könnte sich durch die notwendige Vermeidung der massiven Lebensmittelverschwendung⁷⁰ das Potenzial in allen von der Lebensmittelproduktion und -konsumption abhängigen Abfällen und Reststoffen jedoch signifikant mindern. Dies zu quantifizieren würde jedoch eine umfassende Stoffstromanalyse erfordern, die weder in den untersuchten Potenzialstudien geliefert, noch in diesem Projekt geleistet werden konnte. Dieser Aspekt bleibt somit, wie einige andere aufgrund von Datenlücken nicht quantifizierbare Effekte, weitgehend offen und die angegebenen Potenziale somit trotz ausführlicher Betrachtung mit gewissen Unsicherheiten behaftet.

Schlussfolgerungen aus der Analyse der Konversionstechnologien

Die Bandbreite der in Frage kommenden Konversionstechnologien erstreckt sich von sehr konventionellen und etablierten Techniken wie dem mit Biomasse befeuerten Holzheizkraftwerk oder der Biogasanlage, bis hin zu Techniken, die sich erst an der Schwelle zur Marktreife und kommerziellem Betrieb oder sogar erst auf der Ebene von Demonstrations- und Pilotanlagen befinden, wie z.B. die Synthese von Biokraftstoffen auf Basis von Vergasungstechniken. Somit ist die Datengrundlage für die Gesamtzahl von 19 Techniken uneinheitlich und mit entsprechenden Unsicherheiten verbunden. Innovative Ansätze können dabei unterschätzt werden, es bleibt aber gleichzeitig ungewiss, ob die eine oder andere derzeit noch nicht etablierte Konversionstechnik tatsächlich den Weg in den kommerziellen Betrieb finden wird.

Mittels der einheitlichen und möglichst differenzierten Beschreibung in den Technologiesteckbriefen wird nach bester Möglichkeit sichergestellt, dass die Grundlage für die bewertenden Vergleiche solide und nachvollziehbar ist.

Schlussfolgerungen aus den Bewertungsschritten

Der Umfang an verschiedenen Abfällen und Reststoffen, in Verbindung mit den zahlreichen technischen Optionen, führt zu einer Anzahl an möglichen Kombinationen, die ein stufenweises Vorgehen bei der Bewertung notwendig machen.

Der erste Schritt besteht dabei in einer stringenten Eingrenzung der technisch *sinnvollen* Kombinationen. Kriterien wie u.a. der Wassergehalt (zur Prüfung der Eignung für eine Verbrennungstechnik) oder der Gasertrag (zur Prüfung der Eignung für eine Biogastechnik) standen hier im Vordergrund. Im Ergebnis dieses ersten Schritts zeigten sich insgesamt 32 ausgewählte Einsatzpfade als geeignet für eine

⁷⁰ <https://www.bzfe.de/inhalt/lebensmittelverschwendung-1868.html>

weitere Bewertung. Dabei wurden Abfall-/Reststoffarten, für die angenommen wurde, dass sie sich in einer Konversionstechnik (ggf. mit Vorbehandlung) ähnlich verhalten, zusammengefasst.

Im zweiten Schritt werden die einzelnen Einsatzpfade anhand der Kriterien *Energieeffizienz*, *Treibhausgasbilanz*, *Kostenbetrachtung*, *sonstige Umweltrisiken* und *Kompatibilität zur Transformation des Energiesystems* bewertet. Die Auswahl der Kriterien ist darauf ausgerichtet, ein gleichzeitig umfassendes wie auch kompaktes Bild zu ermöglichen. Das Bewertungsverfahren mit jeweils 1 bis 3 Punkten für jedes der gleichgewichteten Kriterien soll eine belastbare Richtungsaussage ermöglichen und erhebt nicht den Anspruch einer Detailanalyse. Anhand von Sensitivitätsanalysen wurde die Robustheit des Ergebnisses eingeschätzt.

Aus der Bewertung erfolgt für jeden Abfall-/Reststoff eine empfohlene Rangbildung der Verfahren und Energieprodukte. Die Potenzialmenge des jeweiligen Abfall-/Reststoffs wird der am besten bewerteten Kombination zugerechnet. Bei Gleichstand von Kombinationen wird die Menge aufgeteilt. Daraus ergibt sich ein mögliches *Gesamtnutzungskonzept*.

Im Gesamtnutzungskonzept wird der überwiegende Teil der Abfall- und Reststoffe dem *Wärmesektor* zugerechnet. Im Basisfall sind dies sogar 85 % der 900 PJ an Input, überwiegend über den Weg von Kessel- und HKW-Anlagen – für vergärbare Stoffe über Biomethan. Dieses Ergebnis resultiert aus Vorzeichen in fast allen Bewertungskriterien: Hohe Effizienz (wobei für ein optimales Ergebnis hier eine hohe Wertigkeit der Wärme, v.a. als industriell nutzbare Prozesswärme, erforderlich ist; Gebäudewärme stellt hier nicht das Optimum dar), sehr gute Treibhausgasbilanz, günstige Kostensituation (da geringer Gestehungsaufwand bei vergleichsweise hohen Referenzkosten im Wärmesektor), gute Komptabilität mit den Erfordernissen der Transformation im Energiesystem (da für Wärme noch Bedarf an Lösungsansätzen für erneuerbare und klimafreundlichen Alternativen besteht).

Nach dem Energieprodukt Wärme stehen die *Kraftstoffe*⁷¹ an zweiter Stelle. Ihnen werden im Basisfall 15 % des Inputs zugerechnet, in der Variante ohne das Kostenkriterium (Sensitivitätsanalyse) erhöht sich deren Anteil jedoch auf 37 %, da sich die Umwandlung von u.a. Holz und Stroh über BtL- oder SNG-Verfahren in Kraftstoff dann mit der Prozesswärmeerzeugung als gleichrangig herausstellt. Doch wird diese Gleichrangigkeit nur für Kraftstoffe für den Flug- (BtL-Kerosin) oder Schiffsverkehr (als LNG) erreicht, denen hier eine höhere Kompatibilität mit künftigen Erfordernissen der Energiewende zugeschrieben wurde. Entlang von unterschiedlich denkbaren Erfordernissen eines Energiesystems der Zukunft sind grundsätzlich aber auch andere Einsatzoptionen möglich.

Der direkten Bereitstellung von *Strom* werden im Basisfall keine Abfall- und Reststoffmengen zugerechnet. Dies liegt v.a. an zwei Faktoren: Erstens wird Strom bezüglich der *Komptabilität zur Transformation im Energiesystem* gegenüber der Wärme nachteilig bewertet. Zweitens sind die Gestehungskosten für Strom im Referenzfall niedriger als für Wärme. Daher verschiebt sich das Ergebnis ein wenig in der Variante ohne das Kostenkriterium: dann werden aus den vergärbaren Abfall- und Reststoffen über die Biogasanlage 6 % der Strombereitstellung zugerechnet. Der Anteil erhöht sich auf 14 %, wenn man als weiteren Aspekt der Sensitivitätsanalyse der Wertung für Strom aus der Biogasanlage eine höhere Punktzahl im Kriterium *Komptabilität zur Transformation im Energiesystem* erteilt.⁷²

⁷¹ Die als Kraftstoffe einsetzbaren Produkte (Biomethan, SNG, BtL oder Bioethanol) können grundsätzlich auch als Feedstocks in der chemischen Industrie Verwendung finden. Zukünftige Nutzungskonkurrenzen sind hier somit auszuschließen, sie wurden jedoch im Rahmen der möglichen Restriktionen bei der Potenzialeinschätzung nicht betrachtet. Im Übrigen betrifft dies die Gesamtheit der biogenen Abfall- und Reststoffe, da auch Holz oder Stroh, welche hier vorrangig für den Wärmemarkt empfohlen werden, über die entsprechenden Konversionstechnologien der chemischen Industrie zugeführt werden könnten. Die hier vorliegende Studie beinhaltet jedoch nicht die Gegenüberstellung der hypothetischen Nutzung in der Chemiewirtschaft mit der Nutzung im Energiesystem.

⁷² Bei der Einzelbewertung in Anhang C.1 ist für verschiedene Pfade Biogasanlage mit Stromerzeugung (und Wärme in KWK) ausgeführt, dass die Wertung im Kriterium *Komptabilität zur Transformation im Energiesystem* mit 2 Punkten im Grenzbereich zu 3 Punkten liegt.

Die genannten Prozentwerte sind, wie oben betont, als belastbare Richtungsangabe zu verstehen. Diese weist auch nach Überprüfung verschiedener sensibler Faktoren **deutlich in Richtung Wärmenutzung**, wobei hier, wo immer möglich, Anwendungen im industriellen Bereich (Prozessdampf) der Vorzug zu geben ist. An zweiter Stelle rangiert die Bereitstellung von Energieträgern, welche flexibel im Verkehrsbereich (v.a. mit Eignung für Flug- und Schiffsverkehr) eingesetzt werden können. An dritter Stelle stellt sich gerade über den Biogaspfad auch der Einsatz zur Stabilisierung der Wärme- und schließlich auch der der Stromversorgung als sinnvoll dar.

Das Gesamtnutzungskonzept stellt eine generalisierte Empfehlung, keinesfalls aber eine Handlungsanweisung für konkrete Einzelsituationen dar, die in der Regel von regionalen Randbedingungen geprägt sind. Insbesondere wo Abfall- und Reststoffe jetzt schon energetisch genutzt werden, bedeutet die priorisierte Empfehlung des Gesamtnutzungskonzepts nicht notwendigerweise ein Umlenken dieses Stoffstroms.

Das in dieser Studie ermittelte Gesamtnutzungskonzept sollte vielmehr als Form eines Allokationsplans für eine ökologisch sinnvolle Nutzung der verfügbaren biogenen Abfall-/Reststoffe im Energiesystem verstanden werden. Keinesfalls ist es jedoch als *Energieszenario* zu verstehen, da das Gesamtnutzungskonzept nicht nach dem tatsächlichen Bedarf der Energieprodukte im System fragt.

9 Quellenverzeichnis

Im Bericht zitierte Quellen:

BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft; Statistisches Bundesamt (Hg.) (2010): Abwasserdaten Deutschland. Zahlen und Fakten der Abwasserentsorgung. Berlin, Bonn. Online verfügbar unter [http://ldew.de/bdew.nsf/id/DE_20100910_PM_BDEW_fordert_Abschaffung_der_Abwasserabgabe/\\$file/Informationsbroschuere_Abwasserdaten.pdf](http://ldew.de/bdew.nsf/id/DE_20100910_PM_BDEW_fordert_Abschaffung_der_Abwasserabgabe/$file/Informationsbroschuere_Abwasserdaten.pdf), zuletzt geprüft am 25.12.2018.

BfN - Bundesamt für Naturschutz (2017): Energiewende und Waldbiodiversität; Studie der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf (Prof. Dr. J. Ewald); FKZ 3512 83 0700; BfN-Skripten 455
https://www.natur-und-erneuerbare.de/fileadmin/Daten/Download_Dokumente/Skript_455_H%C3%B6ltermann_Wald_Gesamttext.pdf
geprüft am 20.01.2019

Biomasseverband (2013): Wirtschaftlichkeit von Holzvergasungsanlagen; Heizwerke Betreibertag 2013
www.biomasseverband.at

BLE (2018): Evaluations- und Erfahrungsbericht für das Jahr 2017 - Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung - Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung; <http://www.ble.de/Biomasse>

BMEL (2015): Statistisches Jahrbuch über Landwirtschaft und Ernährung. Landwirtschaftsverlag Münster

BMUB (2016): Klimaschutzplan 2050 - Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung
<https://www.bmu.de/publikation/klimaschutzplan-2050/>

Böchzelt, H. G., Graf, N., Habel, R. W., Lomsek, J., Wagner, S., Schnitze, H. (2002): Möglichkeiten der Wertschöpfungssteigerung durch Abfallvermeidung (biogener Reststoffe) und Nebenproduktnutzung. Feasibility study. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie und des Landes Steiermark. Joanneum Research Institut für Nachhaltige Techniken und Systeme. Frohnleiten, Österreich. Online verfügbar unter http://www.abfallwirtschaft.steiermark.at/cms/dokumente/10029679_46555/460e37e4/011-Endbericht.pdf, zuletzt geprüft am 28.05.2018.

Daschner, R. (2013): Energetische Nutzung von Biertreber; Sommersymposium am 27. Juni 2013. Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, Institutsteil Sulzbach-Rosenberg, 2013. Online verfügbar unter <https://www.umsicht.fraunhofer.de/content/dam/umsicht/de/dokumente/vortraege/2013/sommersymposium-suro/daschner.pdf>, zuletzt geprüft am 30.05.2018.

DBFZ (2009): Ökonomische und ökologische Bewertung von Erdgassubstituten aus nachwachsenden Rohstoffen; im Auftrag der FNR; 2009

DBFZ (2013): Methodenhandbuch Stoffstromorientierte Bilanzierung der Klimagaseffekte - Methoden zur Bestimmung von Technologiekenwerten, Gestehungskosten und Klimagaseffekten von Vorhaben im Rahmen des BMU-Förderprogramms „Energetische Biomassenutzung“. Hrsg. Prof. Dr.-Ing. Daniela Thrän und Diana Pfeiffer, Programmbegleitung des BMU-Förderprogramms „Energetische Biomassenutzung“ am DBFZ, DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH, Version 4 2013

DBFZ (2014): Vorbereitung und Begleitung der Erstellung des Erfahrungsberichts 2014 gemäß § 65 EEG. Im Auftrag des BMWi

Dehoust et al (2010): Ausgewählte Klimaschutzpotenziale der Abwasserwirtschaft, im Auftrag des BDE e.V., Januar 2010

Döring, P.; Glasenapp, S.; Mantau, U. (2017): Holzwerkstoffindustrie 2015. Entwicklung der Produktionskapazität und Holzrohstoffnutzung. Hamburg. S 24

DWA (2015): Abwasser und Klärschlamm in Deutschland – statistische Betrachtungen, in Korrespondenz Abwasser, Abfall, 2015 (62) Nr. 1

Faulstich, M.; Weger, A., Binder, S. (2012): Optimierte energetische Nutzung eines nassen Abfalls (Biertreber) durch Kombination biologischer, mechanischer und thermischer Verfahren. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Natur-schutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), www.bmub.bund.de . Technische Universität München. München, zuletzt geprüft am 05.06.2018.

Fritsche, U., Dehoust, G., Jenseit, W., Hünecke, K., Rausch, L., Schüler, D., Wiegmann, K., Heinz, A., Hiebel, M., Ising, M., Kabasci, S., Unger, C., Thrän, D., Fröhlich, N., Scholwin, F., Reinhardt, G., Gärtner, S., Patyk, A., Baur, F., Bemmann, U., Groß, B., Heib, M., Ziegler, C., Flake, M., Schmehl, M. Simon, S. (2004): Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse; Hg. Öko-Institut; ISBN 3-934490-20-4
<https://www.oeko.de/oekodoc/236/2004-025-de.pdf>

Gaida, B.; Schüttmann, I.; Zorn, H.; Mahro, B. (2013): Bestandsaufnahme zum biogenen Reststoffpotential der deutschen Lebensmittel und Biotechnik-Industrie. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben. Hochschule Bremen, Institut für Umwelt- und Biotechnik; Justus-Liebig-Universität Gießen. Bremen, Gießen. Online verfügbar unter https://oeko-teamwork.de/uba-ab-fall/Freigegebene%20Dokumente/Literatur/Aktuelle%20Literatur/2013%20Reststoffpotential%20Lebens- und Biotechnik-Industrie%20BLE%20Gaida_Sch%C3%BCttmann_Zorn_Mahro%20Bremen%20Gie%C3%9Fen.pdf , zuletzt geprüft am 05.06.2018.

GfK (2018): Systematische Erfassung von Lebensmittelabfällen der privaten Haushalte in Deutschland. durchgeführt für das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Ernaehrung/WvL/Studie_GfK.pdf

Haberl, H., Erb, K.-H., Krausmann, F., et al. Quantifying and mapping the human appropriation of net primary production in earth's terrestrial ecosystems. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 104 (2007). 12942-12947

ifas (2004): Analyse von Biomassepotenzialen der Naturlandstiftung und der Ökoflächenmanagement Saar gGmbH. Abschlussbericht, Auftraggeber Naturlandstiftung ÖKOFLÄCHENMANAGEMENT gGmbH

ifas (2009): Etablierung eines beispielhaften regionalen Energiekreislaufes mit Biomasse aus der Landschaftspflege im Naturpark Unteres Saaletal unter besonderer Berücksichtigung einer GIS-gestützten Abschätzung des langfristig zur Verfügung stehenden Biomassepotenzials. Abschlussbericht, DBU, AZ 24692-33

IZES (2016): Metaanalyse Bioenergie. Im Auftrag der AEE, Bericht und Zahlenwerk, veröffentlicht durch die AEE unter <http://www.forschungsradar.de/metaanalysen.html>

IZES, ifeu, IIWH (2013): Holzkaskade – Regionale Konzepte zum Ausbau der Bioenergieerzeugung aus Holz - nachhaltige und energieeffiziente Strategieentwicklung unter besonderer Berücksichtigung der Holzkaskadennutzung; Abschlussbericht, Fördermittelgeber BMU, Saarbrücken, Heidelberg, Münster

Kaltschmitt, M., Hartmann, H., Hofbauer, H. (Hg.) (2016): Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren. 3. Aufl. 1 Band. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, zuletzt geprüft am 08.06.2018.

Kay, S., Baur, F. (2014): Analyse der Rohstoffbereitstellung für die verschiedenen Konzepte der Kaskadennutzung von Biomasse; Teilbericht zum Projekt: BIOMASSEKASKADE - Mehr Ressourceneffizienz durch stoffliche Kaskadennutzung von Biomasse - von der Theorie zur Praxis; Förderkennzeichen: 3713 44 100.

Klöck, G., Noke, A. (Hg.) (2008): Veredelungsprodukte aus ungenutzten Stoffströmen der Lebensmittelverarbeitung. Unter Mitarbeit von Gleich A., Gößling-Reisemann S. (eds): Vieweg+Teubner (Industrial Ecology), zuletzt geprüft am 08.06.2018.

- Kranert, M.; Hafner, G.; Barabosz, J.; Schuller, H.; Leverenz, D.; Kölbig et al. (2012): Ermittlung der weggeworfenen Lebensmittelmengen und Vorschläge zur Verminderung der Wegwerfrate bei Lebensmitteln in Deutschland. Universität für Bodenkultur Wien (BOKU), Institut für Abfallwirtschaft; Universität Stuttgart, Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft (ISWA). Stuttgart. Online verfügbar unter https://oeko-teamwork.de/uba-abfall/Freigegebene%20Dokumente/Literatur/Erg%C3%A4nzung%20Studien%20Abfall/Studie_Lebensmittelabfalle_Langfassung.pdf , zuletzt geprüft am 08.06.2018.
- KTBL (2009): Faustzahlen für die Landwirtschaft. 14. Auflage, Hrsg. KTBL, Darmstadt
- Mantau, U. (2018): Rohstoffmonitoring Holz - Erwartungen und Möglichkeiten; Hg: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR)
- Mantau, U., Döring, P., Weimar, H., & Glasenapp, S. (2018). Rohstoffmonitoring Holz: Daten und Botschaften. Hg: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR); https://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/Rohstoffmonitoring_SR38_Final_Web_20180612.pdf
- Mahro, Bernd (2010): Biogene Reststoffe aus der Lebensmittelindustrie - Ein wertvoller Sekundär-rohstoff. In: Müll und Abfall (02), S. 56–62, zuletzt geprüft am 15.06.2018.
- Pfluger, B., Terstegen, B., Franke, B. (2017): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland; Modul 0: Zentrale Ergebnisse und Schlussfolgerungen Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie;
<https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/langfrist-und-klimaszenarien.html>
- Repenning, J.; Emele, L.; Blanck, R.; Böttcher, H.; Dehoust, G.; Förster, H.; Greiner, B.; Harthan, R.; Hennenberg, K.; Hermann, H.; Jörß, W.; Loreck, C.; Ludig, S.; Scheffler, M.; Schumacher, K.; Zell-Ziegler, C.; Braungardt, S.; Eichhammer, W.; Elsland, R.; Fleiter, T.; Hartwig, J.; Kockat, J.; Pfluger, B.; Schade, W.; Schlomann, B.; Sensfuß, F. & Ziesing, H.-J. (2015). Klimaschutzszenario 2050. 2. Endbericht. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Öko-Institut e. V., Hrsg.), Berlin.
- Schulte, A. (2007): Dendromasse – Trends und Interdependenzen. Forstarchiv 78 (2007), 59 - 64
- Roskosch, A., Heidecke, P. (2018): Klärschlamm entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland; Herausgeber: Umweltbundesamt. Oktober 2018
- SEG - Stadtentwässerung Göppingen (2014): Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm – Machbarkeitsstudie
- Schmidt et al. (2017): 100 Betriebe für Ressourceneffizienz - Band 1, Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- Statistisches Bundesamt (Hg.) (2017): Abwasserbehandlung - Klärschlamm - Ergebnisbericht. 2013/2014. Statistisches Bundesamt (Destatis). Wiesbaden. Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/UmweltstatistischeErhebungen/Wasserwirtschaft/Klaerschlamm5322101139004.pdf;jsessionid=0DE67590F3A56F55366C641337FBD25B.InternetLive2?_blob=publicationFile , zuletzt geprüft am 19.06.2018.
- UBA – Umweltbundesamt (2013): Globale Landflächen und Biomasse - nachhaltig und ressourcenschonend nutzen; UBA Positionen
<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/globale-landflaechen-biomasse>
- UBA (2016): Bioenergie, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/bioenergie#textpart-1> 30.08.2017
- UBA (2017): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2017. Climate Change 13/2017, Hrsg. UBA, Dessau-Roßlau
- Wenzelides, M. (2009): Entwicklung einer Methode zur Erfassung des Potenzials und des Verbrauchs von Dendromasse am Beispiel des Bundeslandes Nordrhein.-Westfalen. Dissertation, WWU Münster

Wiechmann, B., Dienemann, C., Kabbe, C., Brandt, S., Vogel, I., Roskosch, A. (2013): Klärschlamm Entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/klaerschlammentsorgung_in_der_bundesrepublik_deutschland.pdf, zuletzt geprüft am 20.06.2018.

Zagon, J., Schafft, H. (2014): Tierische Nebenprodukte als Rohstoffe: Rückverfolgbarkeit, Warenketten sowie Verwendungsmöglichkeiten in der Tierernährung; <http://www.bfr.bund.de/cm/343/tierische-nebenprodukte-als-rohstoffe-rueckverfolgbarkeit-warenketten-sowie-verwendungsmoeglichkeiten-in-der-tierernaehrung.pdf>

In AP 1 untersuchte Literatur

Agora Energiewende (2017): Stromwelten 2050

Bahrs, E., Zeddies, J., Gamer, W., Schönleber, N. (2014): Optimierung der Biomassenutzung nach Effizienz in Bereitstellung und Verwendung: gefördert durch FNR

Benndorf et al. (2014): Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. UBA

Bio-Reststoffe 2010, UBA Aufwand und Nutzung einer optimierten Bioabfallverwertung

BMEL (2016): Anwendung von organischem Düngern und organischen Reststoffen in der Landwirtschaft, Berichte über Landwirtschaft, Band 94 – Ausgabe 1 Mai 2016

Böske (2015): Biogasenertrag von Reststoffen aus der Pferdehaltung unter besonderer Berücksichtigung der kontinuierlichen Feststofffermentation im Aufstromverfahren

Bringezu et al. (2008): Nutzungskonkurrenzen bei Biomasse

DBFZ (2015): Potenziale biogener Rest- und Abfallstoffe für eine nachhaltige Energie- und Rohstoffbereitstellung. Gefördert von der FNR, DBFZ, Leipzig

Dehoust et al. (2005): Statusbericht zum Beitrag der Abfallwirtschaft zum Klimaschutz und mögliche Potenziale

Dehoust et al. (2010) Klimaschutz Abfallwirtschaft - Am Beispiel von Siedlungsabfällen und Altholz -

Destatis (2014): Abwasser und Klärschlamm in Deutschland - statistische Betrachtungen

EEA (2013), EU bioenergy potential from a resource-efficiency perspective, EEA Report No 6/2013;

Endbericht biogener Anteil, UBA 2010, Nutzung der Potenziale des biogenen Abfalls zur Energieerzeugung

EVA I, II, III- „Entwicklung und Vergleich von optimierten Anbausystemen für die landwirtschaftliche Produktion von Energiepflanzen unter den verschiedenen Standortbedingungen Deutschlands“, Im Auftrag des BMEL, seit 2005

FAO (2011) Global Food losses and food waste; Study conducted for the International Congress SAVE FOOD! at Interpack2011 Düsseldorf, Germany; www.fao.org/3/a-i2697e.pdf

Ferranti, F. (2014): Energy wood: A challenge for European forest, EFI Technical Report 95, European Forest Institute

Fehrenbach, H., Köppen, S., Kauertz, B., Detzel, A., Wellenreuther, F., Breitmayer, E., ... Geibler. (2017). BIOMASSE-KASKADEN - Mehr Ressourceneffizienz durch Kaskadennutzung von Biomasse – von der Theorie zur Praxis, UBA, FKZ 3710 93 109, TEXTE 53/2.

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-06-13_texte_53-2017_bio-kaskaden_abschlussbericht.pdf

Forsell, N.; Korosuo, A.; Havlík, P.; Valin, H.; Lauri, P.; Gusti, M.; Kindermann, G.; Böttcher, H.; Hennenberg, K.; Hünecke, K.; Wiegmann, K.; Pekkanen, M.; Nuolivirta, P.; Bowyer, C.; Nanni, S.; Allen, B.; Poláková, J.; Fitzgerald, J. & Lindner, M. (2016). Study on impacts on resource efficiency of future EU demand for bioenergy - ReceBio. Available at

Gaida, B., Schüttmann, I., Zorn, H., Mahro, B. (2013): Bestandsaufnahme zum biogenen Reststoffpotenzial der deutschen Lebensmittel- und Biotechnik-Industrie

Grieb, B. und U. Zerger (2015): Erfassung des biologischen Potentials für die Biogasenerzeugung im Ökologischen Landbau, FiBL, FNR „Biogasanlagen im Ökolandbau“

ICU (2014): Erweiterte Bewertung der Bioabfallsammlung, 2014, itad

IEA (2015); Bioenergy, Mobilizing Sustainable Bioenergy Supply Chains,

- IZES (2011): Biomasse-Potenzialanalyse für das Saarland. Der Teilplan Biomasse zum Masterplan Neue Energie. Auftraggeber: MWA EV des Saarlandes
- IZES (2014): Perspektiven der Biomethaneinspeisung und instrumentelle Weiterentwicklung des Förderrahmens, im Auftrag des BMWi, FKZ 03MAP283
- Kohler, C. (2013): Energiewende in Deutschland - Roadmap bis 2020/2050, Deutsche-Energie-Agentur, Berlin.
- Kranert et al. 2010: Ermittlung der weggeworfenen Lebensmittelmengen und Vorschläge zur Verminderung der Wegwerfrate bei Lebensmitteln in Deutschland BMEL, Boku Wien
- Mantau, U. (2015): Wood flow analysis: Quantification of resource potentials, cascades and carbon effects, ScienceDirect, 2015;
- Nitsch et al. (2012): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global – Leitstudie 2011. Stuttgart, Kassel, Teltow: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Technische Thermodynamik, Abt. Systemanalyse und Technikbewertung Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES), Ingenieurbüro für neue Energien (IFNE).
- Öko-Institut e.V.; Fraunhofer ISI; Ziesing, H.-J. (2015): Klimaschutzszenario 2050. Studie im Auftrag des BMUB, Berlin, 18.12.2015
- Öko-Institut/ifeu (o.J.), „Naturschutzfachliche Optimierung der Rohstoffbereitstellung für Biomasseanlagen“ (FKZ 3517861100); „Advanced (bio)fuels: Naturschutzfachliche Auswirkungen neuer Ansätze“ (FKZ 2516822800)
- Peters (2013): Potenzial von Landschaftspflegematerial für Verbrennung und Vergärung
- Scarlat, N. et al., The role of biomass and bioenergy in a future bioeconomy: Policies and facts, ScienceDirect, 2015
- Schonhoff, Berger, Khalsa. Arti, Lenz, Teltewskaja, Werner (2016): Innovatives bedarfsangepasstes Kommunal-Energie-träger-Konzept (IbeKET)
- Thrän et al. (2015): Meilensteine 2030. Elemente und Meilensteine für die Entwicklung einer tragfähigen und nachhaltigen Bioenergiestrategie. Schriftenreihe des Förderprogramms „Energetische Biomassenutzung“ 18, Leipzig
- Fricke K. et al. (2017): Steigerung der Energieeffizienz in der Verwertung biogener Reststoffe; FKZ 03KB 0322
- UBA (2013) Energieziel 2050
- UBA (2014): verpflichtende Umsetzung der Getrenntsammlung von Bioabfällen
- Lehrmann, F. (2010): Stand und Perspektiven der thermischen Klärschlamm Entsorgung, Klärschlammbehandlung: Technologien – Wertstoffrückgewinnung – Entwicklungen.
- UBA (2006): Energie aus Abfall, Ein bedeutender Beitrag zum Klimaschutz
- UBA/Öko-Institut/DIW/Fraunhofer ISI (2013): Politiksznarien für den Klimaschutz VI.
- WBGU (2008): Welt im Wandel. Zukunftsfähige Bioenergie und Landnutzung
- Wern, B. et al. (2012): Holzkaskade – Regionale Konzepte zum Ausbau der Bioenergieerzeugung aus Holz - nachhaltige und energieeffiziente Strategieentwicklung unter besonderer Berücksichtigung der Holzkaskadennutzung; Projekt-partner: Internationales Institut für Wald und Holz NRW e.V., Ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Auftraggeber: FKZ: 03KB016
- WWF Deutschland et al.(2014): Klimafreundlicher Verkehr in Deutschland. Weichenstellungen bis 2050 unter Berücksichtigung von Nachhaltigkeitszielen und Welternährungssicherung.
- Zeller et al. (2012): Basisinformationen für eine nachhaltige Nutzung von landwirtschaftlichen Reststoffen zur Bioenergiebereitstellung

A Anhang:

Parameterlisten zur Charakterisierung der Abfall- und Reststoffe

A.1 Stoffstrom R1: Waldholz

Stoffstrom R1: Waldholz (Kap. 3.2.3.1)	
Kategorie	Parameter
Name/Bezeichnung	- Name: Waldholzhackschnitzel und Scheitholz - Scheitholz wird nicht weiter ausgeführt, zukünftig eher nur Holzhackschnitzel - Holzhackschnitzel ist durch einen Schredder oder aber Hacker zerkleinertes Waldholz
Chemisch / Physikalische Parameter:	- Wassergehalt (w): Je nach Jahreszeit / Behandlungsart 20 – 40 % (Lufttrocken bis Erntefrisch) - Brennwert: Pro t_{atro} 18,5 GJ; - Heizwert (nach Abzug der Verdampfungsenthalpie): $w=20\% \rightarrow H_u=14,4 \text{ GJ/t}$ $w=40\% \rightarrow H_u=10,1 \text{ GJ/t}$ - Kohlenstoffgehalt: 50 % der Trockenmasse ist C - C/N Verhältnis: Unrelevant, abhängig von Rindenanteil - Aschegehalt 0,5 – 4 % bezogen auf t_{atro}¹
Struktur:	- Korngröße meist qualifiziert nach DIN EN ISO 17225 Teil 4: Klassifizierung von Holzhackschnitzeln; 1,5 – 4,5 cm - Störstoffart und Störstoffanteil: hohe Rindenanteile möglich, hier: Gefahr der Schlackebildung und verstärkter Ascheanfall
Anfall:	- Menge: 11 Mio t_{atro} - Ort: Waldstraße oder Biomassezentrum - Meist von November bis März - Mengenangaben in Festmeter (fm), Schüttraummeter oder Tonne Atro. So sind 1 fm Buche in etwa 2,5 Schüttraummeter und 0,5 t (bei $w=20\%$). Und 1 fm Fichte in etwa 2,5 Schüttraummeter und 0,34 t (bei $w=20\%$)
Preis / Verbleib:	40 €/t bis zu 100 €/t (bei $w=20\%$) - derzeitiger Verbleib: Scheitholz, Totholz, im Wald als indifferenter Zwischenstand⁷³

¹ Neff (2007): Aufbereitung von Holzhackschnitzel zur energetischen Verwertung unter besonderer Berücksichtigung der Qualitätsparameter. Dissertation, Universität Göttingen, S. 202

⁷³ Indifferenter Zwischenstand ist Holz, welches aus waldbaulichen Gründen im Wald verbleiben könnte und nur aus wirtschaftlichen Gründen genutzt wird, wenn ein Markt vorhanden ist.

A.2 Stoffstrom R2: Landschaftspflege – Halmgut Straße

Stoffstrom R2: Landschaftspflege – Halmgut Straße (Kap. 3.2.3.2)	
Kategorie	Parameter
Name/Bezeichnung	- Name: Halmgut Straße - Beschreibung: gemähtes Gras aus der Straßenpflege
Chemisch / Physikalische Parameter:	- Zellulose 25-40 %, Lignin 10 – 30 %, Hemizellulose 35 – 50 %¹ - Wassergehalt: 50-80 % schwankend, abhängig von den Erntebedingungen² - Biogasertrag: 85 – 170 m³/t FM⁵ - C/N Verhältnis: ca. 36 (12 – 60)⁵
Struktur:	- Korngröße: Häcksel oder Silage (Wegebegleitgrün), Ballen (Biotoppflege) - krautig - Störstoffart und Störstoffanteil bei Straßenbegleitgrün: Steine, Bodenmaterial (Anteil bis zu 15 %)¹; sonstige Störanteile (Kunststoff, Metall) - Störstoffe bei Biotoppflege: Lignin
Anfall:	- Menge: 1 Mio t FM Halmgut Straßenbegleitgrün - Ort: Wegebegleitgrün (Straßen und Wasserwege) - Zeit: Mai – Ende September; - Mengenangaben i. d. R. in m³
Preis / Verbleib:	derzeitiger Verbleib: gemulcht neben Straße

¹ AA.VV., BAT's and best practices for grass residue collection and valorization, Report of the IEE GR3 "GRass as a GReen Gas Resource: Energy from landscapes by promoting the use of grass residues as a renewable energy resource", pp.96, 2014; ² De Vocht 2012 in¹; ³ Uni Hohenheim 2014; ⁵KTBL (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (2013): Faustzahlen Biogas, Darmstadt S. 133)

A.3 Stoffstrom R2: Landschaftspflege – Holz Straße

Stoffstrom R3: Landschaftspflege – Holz Straße (Kap. 3.2.3.2) und Holz Biotop (Kap. 3.2.3.3)	
Kategorie	Parameter
Name/Bezeichnung	- Name: Holz Straße, Holzhackschnitzel - Beschreibung: Busch- und Strauchschnitt sowie Bäume aus dem Freischneiden von Autostraßen und Wasserstraßen
Chemisch / Physikalische Parameter:	- Nachfolgende Charakterisierungen u.a. nach CEN/TS 14961:2005 (CEN 2005 a) - Wassergehalt: 40 % - schwankend, abhängig von den Erntebedingungen - Aschegehalt: 2,5 – 10 % an TS¹ - C/N Verhältnis: 50-200¹
Struktur:	- Geshreddert, eher unregelmäßig, meist kleiner als 10 cm - Störstoffart und Störstoffanteil: hohe Rindenanteile, hier: Gefahr der Schlackebildung und verstärkter Ascheanfall - Erhöhte Schwermetallgehalte (Cd, Pb) sowie erhöhte Cl und S Werte möglich² - Gras als Störstoff
Anfall:	- Menge: 160.000 t FM (ca. 96.000 t TM) bei Wegebegleitgrün - Ort: Straßen - Zeit: Oktober – Ende Februar; - Mengenangaben i. d. R. m³
Preis / Verbleib:	- positiver Preis pro Menge: ca. 10 €/Srm - derzeitiger Verbleib: geshreddert neben Straße

¹ Neff (A.): Aufbereitung von Holzhackschnitzeln zur energetischen Verwertung – unter besonderer Berücksichtigung der Qualitätsparameter. Dissertationsschrift, Göttingen; ² Ronmeiß et al. (2006): Energetische Verwertung von Grünabfällen aus dem Straßenbetriebsdienst. in bast Heft V 150, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach

A.4 Stoffstrom R4: Stroh

Stoffstrom R4: Stroh (Kap. 3.1.3.1)	
Kategorie	Parameter
Name/Bezeichnung	- Name: Stroh - Beschreibung: Halmrest der erntereifen Getreidepflanze ohne Getreidekorn, entsteht beim Getreideanbau bzw. der Getreideernte
Chemisch / Physikalische Parameter:	- Wassergehalt: 14 % schwankend, abhängig von den Erntebedingungen ¹ - Heizwert: 4 kWh/kg FM ² - Kohlenstoffgehalt: 0,1 Mg/Mg FM ² - C/N Verhältnis: Getreidestroh 100, Maisstroh 50 - Aschegehalt: 5,68 %
Struktur:	- Korngröße: ungehäckselt >1m - krautig - Störstoffart und Störstoffanteil: Steine, Bodenmaterial; sonstige Störanteile (Kunststoff, Metall <1 %)
Anfall:	- Menge: 2,7 – 19,9 Mio. t FM - Ort: Agrarflächen - Zeit: Getreide Juni – Ende August; Körnermais September - November - Mengenangaben i. d. R. über Korn/Strohverhältnis und Getreideertrag
Preis / Verbleib:	- positiver / negativer Preis pro Menge: 50 – 112 €/t Regionalspezifisch - derzeitiger Verbleib: auf dem Feld, Tierhaltung

¹ Zeller et al. 2011; ² Uni Hohenheim 2014; ³

A.5 Stoffstrom R5 und R6: Tierische Exkremente

Stoffstrom R5 und R6: Tierische Exkremente (Kap. 3.1.3.2)

Kategorie	Parameter
Name/Bezeichnung	- Name: Tierische Exkremente - Beschreibung: Kot und Harn von Nutztierassen, der Einstreumaterialien wie Stroh, Sägespäne enthalten kann, Aufteilung in Gülle und Mist
Chemisch / Physikalische Parameter:	- Wassergehalt: Gülle 88 – 97 %, Festmist 40 - 75 %¹; Tierart, Haltungsform und Alter abhängig - Biogasertag: Gülle 11 – 17 Nm³ Methan/m³ FM; Mist 66 – 82 Nm³/t FM ² - C/N Verhältnis: Gülle 5-8; Mist 14-20
Struktur:	- Korngröße: Gülle fein; Mist Strohlänge teils > 800 mm - Störstoffart und Störstoffanteil: Kunststoffe, Steine, Futterreste
Anfall:	- Menge: 80 – 162 Mio. t FM - Ort: Stallungen - Zeit: ganzjährig - Mengenangaben über Tierzahlen
Preis / Verbleib:	- positiver / negativer Preis pro Menge: Mineraldüngerwert Gülle 9 – 20 €/m³; Mist 14 – 85 €/t; Regionale Schwankungen 7,50 – 10 €/t Entsorgungskosten - derzeitiger Verbleib: Dünger für Felder und Wiesen, Biogasanlagen

¹ Zeller et al. 2011; ² Faustzahlen Biogas KTBL 2013;

A.6 Stoffstrom R7: Ernterückstände

Stoffstrom R7: Ernterückstände (Kap. 3.1.3.3)	
Kategorie	Parameter
Name/Bezeichnung	- Name: Ernterückstände - Beschreibung: oberirdischer Pflanzenteil, der von der Hauptfrucht getrennt wird.
Chemisch / Physikalische Parameter:	- Wassergehalt: 82 – 85 % - Biogasertrag: Kartoffelkraut 55 Nm³/t FM Biogas 54,5 % CH₄; Rübenblatt 85 Nm³/t FM Biogas 54 % CH₄ - Kohlenstoffgehalt: max. 5 % der FM - C/N Verhältnis: Kartoffelkraut 25; Rübenblatt 15 - 25
Struktur:	- Korngröße - krautig - Störstoffart und Störstoffanteil: Steine, Bodenmaterial; sonstige Störanteile
Anfall:	- Menge: 5,88 – 49,75 Mio. t FM - Ort: Agrarflächen - Zeit: Kartoffel Juni – Oktober; Zuckerrübe September - November - Mengenangaben über Erntemengen
Preis / Verbleib:	derzeitiger Verbleib: Auf den Ackerflächen, Tierfutter

A.7 Stoffstrom R8: Biogut

Stoffstrom R8: Biogut (Kap. 3.1.4.1)	
Kategorie	Parameter
Name/Bezeichnung	- Name: Biogut - Beschreibung: Über die Biotonne vornehmlich aus dem Haushaltsbereich erfasst Küchen- und Gartenabfälle
Chemisch / Physikalische Parameter:	- Wassergehalt: 60 %¹; Schwankungen in Abhängigkeit der Siedlungsstruktur (städtisch: feucht; ländlich: trockener) und der Jahreszeit (Sommer: trockener; Winter: feuchter) - Heizwert: 3,1² – 5,0¹; über den Gaspfad: Gasertrag: 70 – 170 Nm³/Mg FM (tendenziell eher 80 – 120 Nm³/Mg FM), H_u Biogas: 5,0 – 7,5 kWh/Nm³³ - Kohlenstoffgehalt: 0,10⁵ - 0,16 Mg C/Mg FM⁴ - C/N Verhältnis: 10 - 36³
Struktur:	- Korngröße: Anteil der Mittel- / Feinfraktion (< 40 mm) an der FM: 46,3 – 67,8 %; Anteil der Grobfraktion (> 40 mm): 29,8 – 52,8 %³ - holzig/krautig/pastös: in Abhängigkeit der Siedlungsstruktur und der Jahreszeit; ländlich/Sommer: tendenziell höhere Strukturanteile; städtisch/Winter: tendenziell höhere Anteile an Küchenabfällen - Störstoffart und Störstoffanteil: Glas, Kunststoff, Metall, Steine, Boden, PPK, etc. 0,9 – 4,7 %³; 8 % Fremdstoffe⁶; 1 – 12 %⁷
Anfall:	- Menge: IST-Mengen: 4,02 bis 4,70 Mg FM/a; Potenzial bis 9,1 Mio. Mg FM/a - Ort: Haushalte - Zeit: saisonale Abhängigkeit (warme Jahreszeit tendenziell mehr als im Winter) - Sammlung: Holsystem (Haushaltssammlung), [Mg]
Preis / Verbleib:	- Kosten (inkl. Erlöse): Erfassung: 65 – 150 €/Mg; Behandlung (Kompostierung/Vergärung): 30 – 80 €/Mg (120 €/Mg)⁸; 30 – 100 €/Mg (Mittelwert: 75 €/Mg)³ - derzeitiger Verbleib: zum großen Teil Kompostierung; bundesweit ca. 300 Biogutkompostierungsanlagen mit einer Kapazität von ca. 5,65 Mio. Mg/a und 81 Vergärungsanlagen (2014) mit einer Kapazität von 1,94 Mio. Mg/a⁹

¹ Bode et al. in Hoffmann et al., 2011; ² ICU, 2008 in UMSICHT et al., 2015; ³ Kern et al., 2010; ⁴ Dehoust et al., 2010; ⁵ Schuchardt et al., 2010; ⁶ Krause et al., 2014; ⁷ Fricke et al., 2012; ⁸ Kranert et al., 2016; ⁹ UMSICHT et al., 2015

A.8 Stoffstrom R9 und R10: Grüngut

Stoffstrom R9 und R10: Grüngut (Kap. 3.1.4.1)	
Kategorie	Parameter
Name/Bezeichnung	- Name: Grüngut - Beschreibung: aus dem kommunalen und gewerblichen Sektor sowie aus dem Haushaltsbereich angelieferte/abgeholte Garten- und Parkabfälle
Chemisch / Physikalische Parameter:	- Wassergehalt¹: - gesamt: 50 % - holzartiger Anteil: 45 % - krautartiger Anteil: 75 % - Heizwert / Brennwert: H_u holzartig: ca. 10 MJ/kg FM (2,2 – 12,8 MJ/kg²); Gasertrag krautiger Anteil: 60 – 120 Nm³/Mg FM (ca. 55 % CH₄), jahreszeitliche Schwankungen³ - oTS: holzartig: ca 87 % TS; krautig: ca. 71 % TS¹ - C/N Verhältnis: holzartig: ca 125 (100 – 150); krautig: ca. 36 (12 – 60)¹; Gemisch: 15 – 76²
Struktur:	- Korngröße: Siebschnitt bei 50 – 60 mm zur Abtrennung der holzartigen Anteile; < 15 mm „sandiger“ Anteil - holzig/krautig: thermisch nutzbarer holzartiger Anteil: ca 20-30 % - Störstoffart und Störstoffanteil: hauptsächlich Steine, Bodenmaterialien; sonstige Störstoffanteile (Kunststoff, Glas, etc.) liegen i.d.R. bei < 1 Gew.-%
Anfall:	- Menge: IST-Mengen: 4,15 bis 5,02 Mg FM/a; Potenzial bis 6,0 Mio. Mg FM/a - Ort: Sammelstellen, Verwertungsanlagen - Zeit: saisonale Abhängigkeit (warme Jahreszeit tendenziell mehr als im Winter) - Sammlung: i.d.R. Bringsystem
Preis / Verbleib:	- Kosten: 20 – 60 €/Mg¹ - derzeitiger Verbleib: hauptsächlich Kompostierung; verstärkte Verlagerung zur energetischen Holznutzung sowie zur Teilstromvergärung, gemeinsam mit Biogut

¹ Bohland, M., Quellenauswertung, 2012; ² Kern et al., 2010; ³ Buchheit, M., 2011

A.9 Stoffstrom R11: Altholz

Stoffstrom R11: Altholz (Kap. 3.1.4.2)	
Kategorie	Parameter
Name/Bezeichnung	- Name: Altholz - Beschreibung: Industrierestholz und Gebrauchtholz (Definition gemäß § 2 Altholzverordnung); hier in erster Linie gebrauchtholz (Industrierestholz siehe Kap. 3.1.6); Differenzierung in 4 Altholzkategorien
Chemisch / Physikalische Parameter:	- Wassergehalt: 15¹, 18² %, 10 – 30 %³; im Projekt zu übernehmen: 15% - Heizwert: 16 MJ/Kg¹; 13,5 MJ/kg²; 13,25 MJ/kg⁴ - Kohlenstoffgehalt: 0,38 kg C/kg FM⁴; 0,37 kg C/kg FM² - C/N Verhältnis: ca. 0,53 % Stickstoff²
Struktur:	- Korngröße: Shredergut, uneinheitlich - holzig - Störstoffart und Störstoffanteil: Bauschutt, Metall (Hauptgruppe), Pappe, Anhaftungen; 1,3 – 3,5 % (Bezug Altholzaufbereiter)⁵
Anfall:	- Menge: 6,3 – 11,0 Mio. Mg - Ort: Wertstoffhöfe, Sperrmüll-/Altholzaufbereitung - Zeit: teilweise konjunkturelle Abhängigkeiten - Sammlung: Wertstoffhöfe, gewerbliche Abholung, Altholzaufbereiter
Preis / Verbleib:	- positiver / negativer Preis pro Menge: für sauberes, aufbereitetes Altholz Zahlungen im Bereich von 20 – 35 €/Mg; für Hackschnitzel zur energetischen Nutzung Zahlungen von bis zu – 30 €/Mg (AIV-Holz bis zu -60 €/Mg)⁶ - derzeitiger Verbleib: zum großen Teil in Altholzkraftwerke; ca. 19 % der getrennt erfassten Mengen werden stofflich genutzt⁷

¹ Hoffmann, et al., 2011; ² GEMIS; ³ Kaltschmitt et al., 2009; ⁴ Dehoust et al., 2010; ⁵ Erbreich, M., 2004; ⁶ EUWID, 31.2017; ⁷ Mantau et al. 2012

A.10 Stoffstrom R12: Klärschlamm, kommunal

Stoffstrom R12: Klärschlamm, kommunal (Kap. 3.1.4.3)

Kategorie	Parameter
Name/Bezeichnung	- Name: Klärschlamm - Beschreibung: aerob oder anaerob stabilisierter Schlamm aus öffentlichen Abwasserreinigungsanlagen
Chemisch / Physikalische Parameter:	- Wassergehalt: je nach Entwässerungsgrad; Primärschlamm: 95 %; entwässerter Schlamm 65 – 75 %¹; bei Trocknung ca. < 60 % (dann selbstgängige Verbrennung möglich) - Brennwert: in Abhängigkeit des Stabilisierungsgrades H_o = 6,8 – 13,6 MJ/kg TS³ - Kohlenstoffgehalt: 55 % TS² - C/N Verhältnis: 7 % TS Stickstoff² - Matrix: wässrig, pastös, krümelig
Struktur:	- Korngröße: fein - Störstoffart und Störstoffanteil: potenziell Mikrokunststoffe
Anfall:	- Menge: 1,85 Mio. Mg TS - Ort: Kläranlage - wie erfasst: abhängig vom Entwässerungsgrad
Preis / Verbleib:	- Kosten: je nach Entsorgungsweg (inkl. Kosten für Entwässerung und Transport) 150 € / Mg TS (Landwirtschaft) bis 600 € / Mg TS (Monoverbrennung)⁵; 120 €/Mg TS (Landwirtschaft) bis 400 €/Mg TS (Monoverbrennung)⁶ - derzeitiger Verbleib: 10,5 % Landschaftsbau, 23,7 % Landwirtschaft, 63,7 % Thermische Entsorgung⁴

¹ Wiechmann et al. 2012; ² Lehrmann, 2010; ³ ATV-Handbuch, 1996; ⁴ BMUB, 2016; ⁵ DWA-Positionen, 2010; ⁶ Wiechmann et al. 2013

Stoffstrom R13: Klärgas, kommunal (Kap. 3.2.3.9)

Kategorie	Parameter
Name/Bezeichnung	- Name: Klärgas (Biogas) - Beschreibung: Produkt einer anaeroben Stabilisierung von Primär- und Überschuss-schlämmen aus der Abwasserreinigung
Chemisch / Physikalische Parameter¹:	- CH₄: 55 – 75 Vol.-% - CO₂: 24 – 44 Vol.-% - Begleitstoffe: Siloxane, Schwefelverbindungen, Halogenide (Cl, F), BTEX - Feuchte: 90 – 100 % - Heizwert H_u: 5,5 – 7,5 kWh/m³ (i.M. 6,5 kWh/m³) - Matrix: gasförmig
Struktur:	Störstoffart und Störstoffanteil: Siloxane, H₂S (0,1 – 0,7 Vol.-%)
Anfall:	- Menge: 275 – 480 l/kg oTS (Versuche zur Erhöhung der Klärgasausbeute durch Schlammintegration) - Ort: Kläranlage - in der Regel vor-Ort-Verstromung
Preis / Verbleib:	Nutzung zur Eigenversorgung der Kläranlage (Strom; Wärme zur Fermenterheizung)

¹ u.a. nach ATV-Handbuch: Klärschlamm, Verlag Ernst und Sohn

A.11 Stoffstrom R14: Siedlungsmischabfälle

Stoffstrom R14: Siedlungsmischabfälle (Kap. 3.1.5.1)

Kategorie	Parameter																																																																																																								
Name/Bezeichnung	- Name: Siedlungsmischabfall - Beschreibung: Siedlungsmischabfälle bestehen im Wesentlichen aus Haus(rest)müll, Sperrmüll und hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen, welche im Zuständigkeitsbereich öffentlich-rechtlicher Entsorgungsträger entsorgt (MVA, MBA) werden. In diesen Stoffströmen sind Biomasse-Anteile in Form z.B. von Bio- und Grünabfällen, Papier/Pappe, Verbundstoffe, Windeln, Holz und Textilien/Leder beinhaltet. Fritsche et al. (2004) weisen hier ein Potenzial von 6,1 Mio. t, Kern (2010) von 4,89 Mio. t (bezogen auf Hausmüll) aus.																																																																																																								
Chemisch / Physikalische Parameter:	- In diesen Mischabfällen (ohne Sperrmüll) sind nach Dehoust et al. (2010)¹ folgende Biomassen mit ihren jeweiligen regenerativen C-Anteilen und Heizwerten beinhaltet². <table><tr><th>Fraktion</th><th>Anteil [%]</th><th>C gesamt [kg C/kg Abfall]</th><th>C biogen [% von C gesamt]</th><th>Heizwert H_u [kJ/kg]</th></tr><tr><td>Bio-/Grünabfall</td><td>17,5</td><td>0,16</td><td>100</td><td>4.620</td></tr><tr><td>PPK</td><td>8,9</td><td>0,37</td><td>100</td><td>13.020</td></tr><tr><td>Verbunde</td><td>8,4</td><td>0,43</td><td>49</td><td>18.017</td></tr><tr><td>Glas</td><td>8,7</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>Windeln</td><td>6,0</td><td>0,18</td><td>75</td><td>4.447</td></tr><tr><td>Kunststoffe</td><td>4,9</td><td>0,68</td><td>0</td><td>30.481</td></tr><tr><td>Metalle</td><td>2,5</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>Holz</td><td>2,7</td><td>0,38</td><td>100</td><td>13.250</td></tr><tr><td>Textilien/Leder</td><td>3,4</td><td>0,39</td><td>56</td><td>15.020</td></tr><tr><td>Feinmüll < 8 mm</td><td>19,7</td><td>0,13</td><td>65</td><td>5.133</td></tr><tr><td>Sonstige Abfälle</td><td>17,2</td><td>0,21</td><td>53</td><td>7.800</td></tr><tr><td>Gesamt</td><td>100,0</td><td>0,225</td><td>0,062</td><td>8.478</td></tr></table> - Für den Sperrmüll wird auf die Untersuchungen von Hoffmann et al. (2011)³ zurückgegriffen; dort wurden folgende Gesamt- bzw. biogene Anteile ausgewiesen: <table><tr><th>Fraktion</th><th>Anteil [%]</th><th>Biogener Anteil [%]</th></tr><tr><td>Metalle</td><td>5,0</td><td>0</td></tr><tr><td>PPK</td><td>2,4</td><td>100</td></tr><tr><td>Glas</td><td>0,1</td><td>0</td></tr><tr><td>Kunststoffe</td><td>4,7</td><td>0</td></tr><tr><td>Organik</td><td>0,6</td><td>100</td></tr><tr><td>Holz</td><td>42,6</td><td>100</td></tr><tr><td>Textilien</td><td>5,3</td><td>20</td></tr><tr><td>Mineralstoffe</td><td>1,7</td><td>0</td></tr><tr><td>Verbunde</td><td>26,3</td><td>43</td></tr><tr><td>Feinfraktion</td><td>0,2</td><td>60</td></tr><tr><td>sonstige</td><td>11,0</td><td>10</td></tr><tr><td>Gesamt</td><td>100,0</td><td></td></tr></table>	Fraktion	Anteil [%]	C gesamt [kg C/kg Abfall]	C biogen [% von C gesamt]	Heizwert H _u [kJ/kg]	Bio-/Grünabfall	17,5	0,16	100	4.620	PPK	8,9	0,37	100	13.020	Verbunde	8,4	0,43	49	18.017	Glas	8,7	0	0	0	Windeln	6,0	0,18	75	4.447	Kunststoffe	4,9	0,68	0	30.481	Metalle	2,5	0	0	0	Holz	2,7	0,38	100	13.250	Textilien/Leder	3,4	0,39	56	15.020	Feinmüll < 8 mm	19,7	0,13	65	5.133	Sonstige Abfälle	17,2	0,21	53	7.800	Gesamt	100,0	0,225	0,062	8.478	Fraktion	Anteil [%]	Biogener Anteil [%]	Metalle	5,0	0	PPK	2,4	100	Glas	0,1	0	Kunststoffe	4,7	0	Organik	0,6	100	Holz	42,6	100	Textilien	5,3	20	Mineralstoffe	1,7	0	Verbunde	26,3	43	Feinfraktion	0,2	60	sonstige	11,0	10	Gesamt	100,0	
Fraktion	Anteil [%]	C gesamt [kg C/kg Abfall]	C biogen [% von C gesamt]	Heizwert H _u [kJ/kg]																																																																																																					
Bio-/Grünabfall	17,5	0,16	100	4.620																																																																																																					
PPK	8,9	0,37	100	13.020																																																																																																					
Verbunde	8,4	0,43	49	18.017																																																																																																					
Glas	8,7	0	0	0																																																																																																					
Windeln	6,0	0,18	75	4.447																																																																																																					
Kunststoffe	4,9	0,68	0	30.481																																																																																																					
Metalle	2,5	0	0	0																																																																																																					
Holz	2,7	0,38	100	13.250																																																																																																					
Textilien/Leder	3,4	0,39	56	15.020																																																																																																					
Feinmüll < 8 mm	19,7	0,13	65	5.133																																																																																																					
Sonstige Abfälle	17,2	0,21	53	7.800																																																																																																					
Gesamt	100,0	0,225	0,062	8.478																																																																																																					
Fraktion	Anteil [%]	Biogener Anteil [%]																																																																																																							
Metalle	5,0	0																																																																																																							
PPK	2,4	100																																																																																																							
Glas	0,1	0																																																																																																							
Kunststoffe	4,7	0																																																																																																							
Organik	0,6	100																																																																																																							
Holz	42,6	100																																																																																																							
Textilien	5,3	20																																																																																																							
Mineralstoffe	1,7	0																																																																																																							
Verbunde	26,3	43																																																																																																							
Feinfraktion	0,2	60																																																																																																							
sonstige	11,0	10																																																																																																							
Gesamt	100,0																																																																																																								

Der Heizwert für Sperrmüll wird mit 15.988 kJ/kg veranschlagt.
Der Gasertrag für Siedlungsmischabfälle (MBA) variiert je nach Input und Vorbehandlung; er kann für die heizwertabgemagerte Fraktion auf 80 – 110 Nm³/Mg abgeschätzt werden.

Stoffstrom R14: Siedlungsmischabfälle (Kap. 3.1.5.1)

Kategorie	Parameter
Struktur:	• Der Wassergehalt kann für Hausmüll in Abhängigkeit der Siedlungsstruktur auf 35 – 45 % abgeschätzt werden.
Anfall:	○ Als Mengenaufkommen für Hausmüll und hausmüllähnliche Gewerbeabfälle wurde in Dehoust et al. (2010) für 2020 ein Ansatz von 12.980.748 t zugrunde gelegt. Die Basiswerte für 2006 lagen wie folgt: ○ Hausmüll: 14,260 Mio. t ○ Sperrmüll: 2,247 Mio. t (nicht berücksichtigt) ○ Hausmüllähnlicher Gewerbeabfall: 3,821 Mio. t ○ Für 2015 werden durch die DESTATIS-Abfallbilanz 2017 folgende Mengenaufkommen für Siedlungsmischabfälle ausgewiesen: ○ Hausmüll: 14,147 Mio. t ○ Sperrmüll: 2,495 Mio. t ○ Hausmüllähnliche Gewerbeabfälle: 3,506 Mio. t ○ Straßenkehrschutt: 0,986 Mio. t ○ Küchen- / Kantinenabfälle (Speiseabfälle): 0,928 Mio. t ○ Marktabfälle: 0,060 Mio. t
Preis / Verbleib:	• Die Entsorgungspreise in MVAs liegen nach EUWID 50.2017 regionalspezifisch zwischen 40 und 180 €/Tonne frei Anlage • Die Entsorgungspreise in MBAs liegen nach EUWID 50.2017 regionalspezifisch zwischen 50 und 150 €/Tonne frei Anlage

¹ Dehoust et al., Klimaschutzpotenziale der Abfallwirtschaft, UBA FKZ 3708 31 302;

² Hausmüll und hausmüllähnliche Gewerbeabfälle; Variante für 2020 mit einer erhöhten Erfassung von Wertstoffbestandteilen

³ Hoffmann, G. Et al., Nutzung der Potenziale des biogenen Anteils im Abfall zur Energieerzeugung, UBA FKZ 3707 33 303

A.12 Stoffstrom 15: Altöle/-fette

Stoffstrom 15: Altöle/-fette (Kap. 3.2.3.11)

Kategorie	Parameter
Name/Bezeichnung	- Name: Altfett/Altöl - Aus Privathaushalten, der Gastronomie sowie der Lebensmittelverarbeitung kommende Öle und Fette, welche entweder über Behältersysteme oder über Fettabscheider direkt beim Erzeuger erfasst werden.
Chemisch / Physikalische Parameter:	- Heizwert Öle und Fette: 32 MJ/kg¹ - TS-Frittierfett: 95 %¹; - TS-Fettabscheiderinhalt: 5,6 %; oTS: 86,6 %; N_{ges.}: 1,6 % an TS; P_{ges.}: 0,166 % an TS² - Gasproduktion Frittierfett: 875 m³/t¹ - Matrix: flüssig bis fest
Struktur:	Störstoffart und Störstoffanteil
Anfall:	- Menge: siehe Heterogenität der Bandbreite in Kapitel 3.1.5.4 - Ort: Privathaushalt, Gastronomie, Lebensmittelindustrie - Sammlung: Behälter, Fettabscheider
Preis / Verbleib:	- getrennt erfasste Altfette/-öle: Nutzung in der Regel zur Biodieselproduktion; teilweise Einsatz in Biogasanlagen - entwässerte Fettabscheiderinhalte werden teils an die Fettchemie verkauft, teils in Biogasanlagen eingesetzt

1 Fraunhofer UMSICHT, Screening von biogenen Abfallschubstanzen zur Umwandlung in Benzin- und Dieselmkraftstoffe durch katalytisches Cracken, Abschlussbericht zum BMU-Projekt FKZ 03KB007, 2012; 2 Knappe, F. et al., Stoffstrommanagement von Biomasseabfällen mit dem Ziel der Optimierung der Verwertung organischer Abfälle, UBA – FKZ 205 33 313, 2007

A.13 Stoffstrom R16: Schwarzlauge

Stoffstrom R16: Schwarzlauge (Kap. 3.2.3.11)	
Kategorie	Parameter
Name/Bezeichnung	- Name: Schwarzlauge - Beschreibung: im Rahmen des Aufschlussverfahrens bei der Zellstoffgewinnung fallen Ablaugen an (auch Schwarzlauge bzw. Dicklauge genannt), die sich aus dem herausgelösten Lignin (Anteil 30-50% bezogen auf Feststoffanteil), den Hemicellulosen, verschiedenen prozessbedingten Chemikalien und Wasser zusammensetzen.
Chemisch / Physikalische Parameter:	- Wassergehalt: 10%³, bei TS-Gehalten über 75 % sehr hohe Viskosität - Brennwert: 13 MJ/kg³ - Heizwert: 12,1 MJ/kg³ - Kohlenstoffgehalt: 32,5%³ - C/N Verhältnis: 0 % TS Stickstoff³ (stickstoffhaltige Lignine sind als Humusersatzstoff geeignet) - Matrix: pastös
Struktur:	- Korngröße: fein - Störstoffart und Störstoffanteil: Schwefelgehalt im Lignin, Wasseranteil
Anfall:	- Menge: 1.757.000-1.756.800 t atro - Ort: Zellstoffproduktion
Preis / Verbleib:	- Kosten: je nach Entsorgungsweg: innerbetriebliche Nutzung, daher fallen keine Kosten an, nur vergleichsweise geringe Mengen werden als preiswerte Ligninsulfonate stofflich genutzt⁵ - derzeitiger Verbleib: Ressource wird überwiegend für die interne Strom- und Prozesswärmeerzeugung bei der Zellstoff- und Papierproduktion genutzt⁴

1 IE et al. 2005, 2Thrän et al. 2012, 3GEMIS, 4Brosowski 2015, 5FNR 2014

A.14 Stoffstrom R17: Industrierestholz

Stoffstrom R17: Industrierestholz (Kap. 3.2.3.11)	
Kategorie	Parameter
Name/Bezeichnung	Name: Industrierestholz Beschreibung: Industrierestholz, in erster Linie Gebraucht-holz aus der Bau-, Möbel- und oder Holzwerkstoffindustrie, Altholz nach AltholzVO ist hier explizit ausgenommen, Industrierestholz fällt bei der Weiterverarbeitung von Schnittholz und Holzprodukten in der Holzbe- und-verarbeitenden Industrie (Möbel- und Holzwerkstoffindustrie, Holzverpackungsindustrie, sowie Brettschichtholz- und Hobelwerke) und im Holzhandwerk (z.B. Zimmereien, Schreinereien, Fertighausbau) an.
Chemisch / Physikalische Parameter:	- Wassergehalt: $15^1 - 18^2$ %; $10 - 30$ %³ - Heizwert: 16 MJ/Kg^1; $13,5 \text{ MJ/kg}^2$; $13,25 \text{ MJ/kg}^4$ - Kohlenstoffgehalt: $0,37 - 0,38 \text{ kg C/kg FM}^{4, 2}$ - C/N Verhältnis: ca. $0,53$ % Stickstoff²
Struktur:	- Korngröße: grob - holzig - Störstoffart und Störstoffanteil: Verunreinigungen wie Metall oder Pappe, wobei es dann unter Altholz fällt, siehe Parameterbeschreibung Altholz
Anfall:	- Menge: ca. $10 \text{ Mio. t}_{\text{atro}}/\text{a}$, d.h. etwa $120 \text{ kg/Einwohner}^3$ - Ort: Holzver- und bearbeitende Industrie - Zeit: teilweise konjunkturelle Abhängigkeiten - Mengenangaben über Daten aus Sägewerken, schnitt-holzverarbeitenden Industrie, Kenntnis der Zahl und Struktur der Holzver- und -bearbeitenden Industrie (z.B. Sägewerk, Spanplattenhersteller, Möbelindustrie etc.)
Preis / Verbleib:	- positiver / negativer Preis pro Menge: Preis für Sä-genebenprodukte ca. 14 EUR/SRM^6 - derzeitiger Verbleib: ca. $2/3$ werden stofflich genutzt, der Rest steht für die energetische Nutzung zur Verfügung, ca. 55 PJ^3

1 Hoffmann, et al., 2011; 2 GEMIS; 3 Kaltschmitt et al., 2009; 4 Dehoust et al., 2010; 5 Erbreich, M., 2004;

<http://www.lwf.bayern.de/forsttechnik-holz/biomassenutzung/033138/index.php6>, „Fachverband Holzindustrie“⁷

A.15 Stoffstrom R19: Klärgas , industriell

Stoffstrom R19: Klärgas , industriell (Kap. 3.2.3.9)

Kategorie	Parameter
Name/Bezeichnung	- Name: Klärgas - Beschreibung: Klärgas aus dem Faulschlamm der Abwasserreinigung im Klärwerk
Chemisch / Physikalische Parameter:	- Wassergehalt: 0% - Heizwert: 6,0 – 7,0 kWh/m³ bzw. 23 MJ/m³ oder 20 MJ/kg¹ - Brennwert: 22,3 MJ/kg¹ - Kohlendioxidgehalt: 25-55%¹ - Anteil Methan: 40-75%¹ - C/N Verhältnis: 0-5 % Stickstoff² - Matrix: gasförmig
Struktur:	- Korngröße: - - Störstoffart und Störstoffanteil: potenziell Mikrokunststoffe
Anfall:	- Menge: Im Jahr 2012 wurden aus Klärgas etwa 1,3 TWh Strom und knapp 4 PJ Wärme erzeugt² - Mengenangaben durch Destatis
Preis / Verbleib:	- Kosten: ohne Kosten - derzeitiger Verbleib: thermische Nutzung

¹ GEMIS, ²Kaltschnitt

A.16 Stoffstrom R20: Feste industrielle Substrate

Stoffstrom R20: Feste industrielle Substrate (Kap. 3.2.3.11)

Kategorie	Parameter
Name/Bezeichnung	- Name: feste industrielle Substrate - Beschreibung: industrielle Reststoffe im Sinne der Biomasseverordnung, z.B. Spelze, Stäube, Kerne, Stiele, Nussschalen,
Chemisch / Physikalische Parameter:	- Wassergehalt: 7%¹ - Heizwert: 22,5 MJ/kg¹ - Brennwert: 23,5 MJ/kg¹ - Kohlenstoffgehalt: 60%¹ - C/N Verhältnis: 4 % Stickstoff¹ - Matrix: fest
Struktur:	- Korngröße: unregelmäßig, eher gröber - Störstoffart und Störstoffanteil: potenziell Mikrokunststoffe, Bodenmaterial, Steine
Anfall:	- Menge: 210.000 bis 4,48 Mio. Tonnen, große Schwankungsbreite, da nicht genügend erfasst - Mengenangaben durch Statistiken der Lebensmittelverarbeitenden Industrie
Preis / Verbleib:	- Kosten: - - derzeitiger Verbleib: überwiegend Futtermittel, aber auch energetische Verwertung

¹GEMIS

A.17 Stoffstrom R21: Schlachtabfälle/Tiermehl

Stoffstrom R21: Schlachtabfälle/Tiermehl (Kap. 3.2.3.11)

Kategorie	Parameter
Name/Bezeichnung	- Name: Schlachtnebenprodukte (Tiermehl) - Beschreibung: Nebenprodukte aus der Schlachtung und Lebensmittelindustrie
Chemisch / Physikalische Parameter:	- Wassergehalt: 0% - Heizwert: 19,1 MJ/kg¹ - Brennwert: 20,7 MJ/kg¹ - Kohlenstoffgehalt: 41%¹ - C/N Verhältnis: 0,7 % Stickstoff² - Matrix: krümelig
Struktur:	- Korngröße: fein - Störstoffart und Störstoffanteil: Abwasseranfall in Schlachtereien, die in unterschiedlichem Ausmaß von organischen Stoffen belastet sein können²
Anfall:	- Menge: rund 400.000 t /a (Trockenmasse) an Schlachtnebenprodukten², ca. 400.000 t/a Tiermehl⁴ - Mengenangaben durch Verband Fleischmehlindustrie
Preis / Verbleib:	- Kosten: orientieren sich an den Preisen für Sojaschrot, ca. 240 EUR/t⁴ - derzeitiger Verbleib: Futtermittel, zunehmend in Oleochemie, Zementfabriken und Düngemittelherstellung, thermische Verwertung

¹GEMIS; ² Kaltschmitt 2016, ³ Fraunhofer 2015 <https://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2015/Dezember/tiermehl-als-phosphorquelle.html>

⁴Foodwatch 2004

A.18 Stoffstrom R22: Schlachtabfälle/Tierfett

Stoffstrom R22: Schlachtabfälle/Tierfett (Kap. 3.2.3.11)	
Kategorie	Parameter
Name/Bezeichnung	- Name: Schlachtnebenprodukte (Tierfett) - Beschreibung: Nebenprodukte aus der Schlachtung und Lebensmittelindustrie, Entfettung
Chemisch / Physikalische Parameter:	- Wassergehalt: 0% - Heizwert: 36,6 MJ/kg¹ - Brennwert: 39,3 MJ/kg¹ - Kohlenstoffgehalt: 76%¹ - C/N Verhältnis: 0,1 % Stickstoff² - Matrix: fest
Struktur:	- Korngröße: fein - Störstoffart und Störstoffanteil: Abwasseranfall in Schlachtereien, die in unterschiedlichem Ausmaß von organischen Stoffen belastet sein können²
Anfall:	- Menge: rund 400.000 t /a (Trockenmasse) an Schlachtnebenprodukten², ca. 400.000 t/a Tierfett³ - Mengenangaben durch Destatis - Zeit: ganzjährig
Preis / Verbleib:	derzeitiger Verbleib: Futtermittel, zunehmend in Oleochemie, Zementfabriken und Düngemittelherstellung, thermische Verwertung

¹ GEMIS, ² Kaltschmitt 2016, ³ Foodwatch 2004

A.19 Stoffstrom R 23: Fleischbrei

Stoffstrom R 23: Fleischbrei (Kap. 3.2.3.11)

Kategorie	Parameter
Name/Bezeichnung	- Name: Fleischbrei - Beschreibung: Nebenprodukte aus der Schlachtung und Lebensmittelindustrie
Chemisch / Physikalische Parameter:	- Wassergehalt: 64%¹ - Brennwert: 9,9 MJ/kg¹ - Heizwert: 127,5MJ/kg¹ - Kohlenstoffgehalt: 19,4%¹ - C/N Verhältnis: 1,74% TS Stickstoff¹ - Matrix: fest
Struktur:	- Korngröße: fein - Störstoffart und Störstoffanteil: eventuell Antibiotika
Anfall:	- Menge: 1.800 t in 2010² - Ort: Schlachtereien, - Mengenangaben über Berechnung aus Rohmaterialaufkommen (Tierkörper und Tierkörperteile)
Preis / Verbleib:	derzeitiger Verbleib: Weiterverarbeitung zu Tiermehl und Tierfett

A.20 Stoffstrom R24: Küchen- und Kantinenabfälle

Stoffstrom R24: Küchen- und Kantinenabfälle (Kap. 3.1.5.4)

Kategorie	Parameter
Name/Bezeichnung	- Name: Küchen- und Kantinenabfälle oder Speiseabfälle - Beschreibung: Kern et al. (2010)¹ weisen hier auf die Unschärfen der begrifflichen Definition hin. Während Küchen- und Speisereste aus Privathaushalten in der Regel über das Biogut entsorgt werden, werden diesem Stoffstrom „auch häufig Abfälle verdorbener ... Lebensmittel aus Supermärkten, Marktabfälle oder Lebensmittelabfälle aus Produktionsbetrieben“ zugeordnet, „die im engeren Sinn als organische Gewerbeabfälle zu bezeichnen sind“.
Chemisch / Physikalische Parameter:	- TS: 12 – 25 %; oTS: 85 – 94 % - N_{ges}: 1,33 % an TS; P: 0,55 % an TS - Gasertrag: 70 – 170 Nm³/t FM; 450 – 900 Nm³/t oTS; abh. vom Fettgehalt - Matrix: nass, pastös
Struktur:	- Korngröße: fein bis mittel - Störstoffart und Störstoffanteil: Verpackungsanteile
Anfall:	- Menge: die Mengenangaben einzelner Studien streuen sehr stark und reichen von < 1 Mio. t bis über 2 Mio. t; der aktuelle Wert gemäß DESTSTIS (2017) liegt für 2015 bei 0,928 Mio. t - Ort: Gastronomiebetrieb, Unternehmen - Sammlung: werden – als gewerblicher Abfall - durch den Abfallerzeuger eigenverantwortlich, in der Regel durch die Beauftragung eines Unternehmens, entsorgt. Verlagerungen in die Biotonnen können nicht ausgeschlossen werden.
Preis / Verbleib:	es wird davon ausgegangen, dass ein Großteil Vergärungsanlagen zugeführt wird IFEU et al. (2008)²

¹ Kern et al., Aufwand und Nutzen einer optimierten Bioabfallverwertung hinsichtlich Energie-effizienz, Klima- und Ressourcenschutz, UBA – FKZ 3707 33 304;

² IFEU et al., Optimierungen für einen nachhaltigen Ausbau der Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland. Endbericht mit Materialband

B Anhang: Steckbriefe zur Charakterisierung der Konversionstechnologien

B.1 Holzpelletzentralheizung 15 kW_{th} (T1)

Holzpelletzentralheizung 15 kW _{th} (T1)	
Konversion	Verbrennung
Technologie	Einzelfeuerung Wärme
Produkt	Wärme
Eingesetzter Abfall- und Reststoff (ggf. Beschreibung)	Holzpellets aus Waldrestholz (inklusive Vorkette, d.h. Energieaufwand für die Herstellung der Pellets aus Säge- und Hobelspänen enthalten)
Beschreibung der Technik	Beschreibung: Unterschubfeuerung und Verbrennung normierter Holzpellets Prozesskette: Unterschubfeuerung Holzpellets, Verbrennung der Produktgase in der Brennkammer, Kombispeicher zur Wassererwärmung, ein möglicher Pufferspeicher nimmt die aktuell nicht nachgefragte Wärme vom Pelletkessel auf und hält sie vorrätig, ist aber nicht zwingend erforderlich ¹ Leistungsspektrum: 10- 300 kW_{th}, meist monovalenter Einsatz durch gute Regelbarkeit, typisch sind 15 kW_{th} oder 220 kW_{th} ¹
Chemisch / Physikalische Eingangsparmeter	Geeignet für Wassergehalt von bis: Je nach Jahreszeit und Behandlungsart 20-50% (lufttrocken bis Erntefrisch) geeignet für Heizwert/Brennwert von bis: Brennwert: pro t atro 18,5 GJ Heizwert W=20%: 14,4 GJ/t Heizwert W=40%: 10,1 GJ/t geeignet für Gasbildungspotenzial bei C/N Verhältnis von bis: nicht relevant, abhängig vom Rindenanteil
Struktur des Inputmaterials ohne aufwändige Vorbehandlung	geeignet für Korngröße von bis: Korngröße meist qualifiziert nach DIN EN ISO 17224 Teil 4: 1,5 – 4,5 cm geeignet für Inputmatrix bezüglich holzig/krautig/in Lösung: Holzig geeignet für Störstoffart und Störstoffanteil (z.B. Quecksilber): hohe Rindenanteile möglich, hier Gefahr der Schlackebildung und verstärkter Ascheanfall
Inputcharakteristik	Flexibilität bei zeitlich unterschiedlichem Anfall (Batchbetrieb, kontinuierlich): kontinuierlich

Holzpelletzentralheizung 15 kW _{th} (T1)	
	Flexibilität bei Mengenunterschieden im Input von bis (typische Anlagengrößen): automatische Beschickung
Outputcharakteristik	Anwendungsbereich des erzeugten Energieprodukts (Strom, Wärme, Kraftstoff): Wärme zeitliche und räumliche Flexibilität bei der Abnahme des Energieprodukts: räumlich nicht flexibel, da feststehende Einzelanlage im Gebäude, über Pufferspeicher, kann die Wärme bei Bedarf abgerufen werden ⁵
Technologiecharakteristik	Energieaufwand bei Behandlung von Eingangsstoffen ohne größere Vorbehandlung: 2,7% der Endenergie von Pellets (zum Vergleich Erdgas 10%, Heizöl 12%) ⁴ Bewertung Gesamtwirkungsgrad bis Energieprodukt: niedriger Erfüllungsgrad ¹¹ typische Größenordnung der Emission von Treibhausgasen bei der Behandlung: 7,4 g CO ₂ Äq/MJ Wärme, Referenzwert 80 g CO ₂ Äq/MJ Wärme ⁴ Komplexität der Technologie (einfach, komplex): Einfach Entwicklungsstand (Stand der Technik, Pilotanlage): ausgereifte Technologie mit geringen Optimierungspotenzialen ¹ Entwicklungsbedarf: Bedarf besteht im Hinblick auf intelligente Steuerung der Anlage und Integration im Systemverbund, mögliche Erweiterung sind Mikro-KWK, zukünftig wird erwartet, dass Kleinvergasung als Technologie umgesetzt wird ¹
Kosten und Erlöse	Behandlungskosten / Herstellungskosten pro Menge: Rohstoffkosten Sägereistholz 160.225 €/t ⁶ Brennstoffkosten Pellets: 4,91 ct/kWh Investitionskosten pro Anlage: 500 -1.500 €/kW _{th} davon 300 - 1.100 €/kW für den Kessel (bei 15 kW _{th}) ¹ Gestehungskosten: ¹¹ 3,56 Cent/MJ _{th} , Referenz 2,8 Cent/MJ _{th} Bereitstellungskosten: ¹⁰ Mittel (eigene Abschätzung) Pellets 96 €/Mg TM
Verwendete Literatur	¹ DBFZ (2015): Bioenergie-Technologien. Fokusheft. 2. Auflage ² FNR (2015): Marktübersicht Scheitholzvergaserkessel. ³ FNR (2017): Basisdaten Bioenergie. ⁹ Kaltschmitt et al. (2016): Energie aus Biomasse ¹⁰ Leible et al. (2003): Energie aus biogenen Abfall- und Reststoffen. FZKA 6882 ¹¹ eigene Bewertung, siehe Kapitel 6, Gesamtbericht Aus dem Internet: ⁴ Deutsches Pellet-Institut: http://www.depi.de/de/heizen_mit_pellets/pelletheizsysteme/zentralheizungen/

Holzpelletzentralheizung 15 kW_{th} (T1)

http://www.depi.de/de/energietraeger_pellets/was_sind_pellets/herstellung/

⁵ Heizsparer: <https://www.heizsparer.de/energie/holzpellets/holzpellets-herstellung>

⁶ Holz von hier: https://www.holz-von-hier.de/bioenergie/pdf/Info_Wirtschaftlichkeit_2.pdf

⁷ Deutscher Energieholz- und Pellet-Verband e.V.: www.depv.de

⁸ Carmen: <https://www.carmen-ev.de/infothek/preisindizes/holzpellets/graphiken/120-der-pellet-preis-in-dex-graghiken>

¹² http://www.evur.tu-berlin.de/fileadmin/fg45/Projekte/Grossbeeren/Info_allg/Waermekosten_unt_Heizungsanlagen.pdf

B.2 Holzhackschnitzelkessel 500 kW_{th} (T2)

Holzhackschnitzelkessel 500 kW_{th} (T2)

Konversion	Verbrennung
Technologie	Einzelfeuerung Wärme
Produkt	Gebäudewärme
Eingesetzter Abfall- und Reststoff (ggf. Beschreibung)	Holzhackschnitzel aus Waldrestholz (inkl. Vorkette)
Beschreibung der Technik	Beschreibung: Verbrennung von Hackschnitzeln unterschiedlicher Qualitäten durch gesteuerte Rostfeuerung oder Unterschubfeuerung in automatischen Kleinf Feuerungskesselanlagen Prozesskette: Brennstofflager/-silo mit Befüllvorrichtung und Austragungssystem, Brennstoffförderung zur Feuerung, Hackschnitzelfeuerung/-heizkessel, Wärmeabgabesystem, Brauchwasserspeicher und ggf. Pufferspeicher, Abgasanlage (Schornstein und ggf. sekundäre Rauchgasreinigung), Ascheaustragssystem. ² Leistungsspektrum: 30- 2.000 kW_{th} (typisch 300 - 1.000 kW_{th}) ^{1 und 4}
Chemisch / Physikalische Eingangsparameter	Geeignet für Wassergehalt von bis: 20-40% ³ geeignet für Heizwert/Brennwert von bis: 18,5 GJ/t_{atro} ³
Struktur des Inputmaterials ohne aufwändige Vorbehandlung	geeignet für Korngröße von bis: 45-200 mm Länge ² geeignet für Inputmatrix bezüglich holzig/krautig/in Lösung: Holz

Holzhackschnitzelkessel 500 kW_{th} (T2)

	Risiko für Störstoffe (z.B. Quecksilber): keine
Inputcharakteristik	Flexibilität bei zeitlich unterschiedlichem Anfall (Batchbetrieb, kontinuierlich): kontinuierlich oder Batch möglich Flexibilität bei Mengenunterschieden im Input von bis (typische Anlagengrößen): hohe Varianz der Brennstoffparameter durch die flexible Technologie
Outputcharakteristik	Anwendungsbereich des erzeugten Energieprodukts (Strom, Wärme, Kraftstoff): Wärme zeitliche und räumliche Flexibilität bei der Abnahme des Energieprodukts: zeitlich und räumlich flexibel
Technologiecharakteristik	Energieaufwand bei Behandlung von Eingangsstoffen ohne größere Vorbehandlung: 0,2 – 0,6% der im Holz enthaltenen Energiemenge ⁵ Bewertung Gesamtwirkungsgrad bis Energieprodukt: mittlerer Erfüllungsgrad ⁹ typische Größenordnung der Emission von Treibhausgasen bei der Behandlung: 6–7 g CO₂Äq/MJ Wärme; angesetzt werden 6,5 g CO₂Äq/MJ Wärme, Referenzwert: 80 g CO₂Äq/MJ Wärme ¹⁰ Komplexität der Technologie (einfach, komplex): einfach, aber hohes Lagervolumen des Energieträgers, daher sollte das Brennstofflager unmittelbar neben dem Heizungsraum liegen ¹ Entwicklungsstand (Stand der Technik, Pilotanlage): ausgereift und marktetabliert, in diesem Leistungsbereich eine der wenigen erneuerbaren Wärmebereitstellungsoptionen ¹ Entwicklungsbedarf: Verbesserung der Nutzungsgrade bei kleineren Leistungen durch verbesserte Auslegung und Systemintegration, bei größeren Leistungen sind zukünftig KWK-Systeme aus Effizienzgründen vorzusehen ¹
Kosten und Erlöse	Behandlungskosten / Herstellungskosten pro Menge: Waldhackschnitzel 10-20 EUR/Srm, Sägerest-Hackschnitzel > 5-25 EUR/Srm ⁷ Investitionskosten pro Anlage: bis zu 2.000 EUR/kWh ^{1 und 2} Gestehungskosten: 1,78 Cent/MJ_{th}, Referenz 2,8 Cent/MJ_{th} ¹¹ Bereitstellungskosten: ⁸ Mittel Erntefrisch 75 Euro/Mg TM (bei 50% Restfeuchte)

Holzhackschnitzelkessel 500 kW_{th} (T2)

	Gelagert 94 Euro/Mg TM (bei 35% Restfeuchte) Getrocknet 122 Euro/Mg TM (bei 10% Restfeuchte)
Verwendete Literatur	¹ DBFZ (2015): Bioenergie-Technologien. Fokusheft. 2. Auflage ² FNR (2017): Marktübersicht Hackschnitzelheizungen ³ FNR (2017): Basisdaten Bioenergie ⁴ Kaltschmitt et al. (2016): Energie aus Biomasse ⁸ Leible et al. (2003): Energie aus biogenen Abfall- und Reststoffen. FZKA 6882 ⁹ eigene Bewertung, siehe Kapitel 6, Gesamtbericht Aus dem Internet: ⁵ Carmen: https://www.carmen-ev.de/infothek/preisindizes/holzpellets/graphiken/120-der-pellet-preis-in-dex-grahiken ⁶ Deutscher Energieholz- und Pellet-Verband e.V.: http://www.dep.v.de/de/presse/pressearchiv/pressemitteilung_lesen/presse_archiv/88898324421/ ⁷ Holz von hier: https://www.holz-von-hier.de/bioenergie/pdf/Info_Wirtschaftlichkeit_2.pdf ¹⁰ https://www.biograce.net/biograce2/ ¹¹ http://www.evur.tu-berlin.de/fileadmin/fg45/Projekte/Grossbeeren/Info_allg/Waermekosten_unt_Heizungsanlagen.pdf

B.3 Heizkraftwerk 5 MW_{el} (T3)

Heizkraftwerk 5 MW_{el} (T3)

Konversion	Verbrennung
Technologie	KWK
Produkt	Strom, Prozesswärme
Eingesetzter Abfall- und Reststoff (ggf. Beschreibung)	Hackschnitzel aus Waldrestholz, (Strohballen, Strohpellets)
Beschreibung der Technik	Beschreibung: Heizkraftwerk mit Holzfeuerung im Dampfprozess mit flexibilisierter Wärmeauskopplung durch Hochdruck (HD)-Gegendruckturbine Prozesskette: Clausius-Rankine-Dampfprozess, einsträngige Rauchgasführung und mehrstufige Luftvorwärmung, Wirbelschichtfeuerung, Hochdruck-Gegendruckturbine, Niederdruckkondensationsturbine ¹ Leistungsspektrum: 1-20 MW_{el} ¹
Chemisch / Physikalische Eingangparameter	Geeignet für Wassergehalt von bis: 15-50% (Qualität A1 bis 25%, Qualität A2 bis 35%, 50% bei waldfrischen Hackschnitzeln) ³ geeignet für Heizwert/Brennwert von bis:

Heizkraftwerk 5 MW_{el} (T3)

	Hackschnitzel: 18,5 GJ/t_{atro} 8 Stroh: 14,4 GJ/t FM
Struktur des Inputmaterials ohne aufwändige Vorbehandlung	geeignet für Korngröße von bis: Länge 45 mm bis 200 mm, Querschnittsfläche 2cm² - 6 cm², Grobanteil 31,5 mm - 63 mm 3 geeignet für Inputmatrix bezüglich holzig/krautig/in Lösung: holzig oder krautig bei Stroh Risiko für Störstoffe (z.B. Quecksilber): Hackschnitzel: keine Stroh: keine
Inputcharakteristik	Flexibilität bei zeitlich unterschiedlichem Anfall (Batchbetrieb, kontinuierlich): kontinuierlich Flexibilität bei Mengenunterschieden im Input von bis (typische Anlagengrößen): prinzipiell hohe Varianz, sofern Brennstoff in Feuerung fluidisierbar, aber gleichmäßige Wärmenachfrage notwendig, da Lastwechsel nur langsam möglich ist, wenn keine Wärme benötigt wird, kann der gesamte Dampf verstromt werden; Vorteil liegt auch in der Entkopplung von Strom und Wärmeerzeugung 1 und 2
Outputcharakteristik	Anwendungsbereich des erzeugten Energieprodukts (Strom, Wärme, Kraftstoff): Strom, Wärme zeitliche und räumliche Flexibilität bei der Abnahme des Energieprodukts: zeitlich und räumlich flexibel, aber je stärker die Wärmenachfrage, desto geringer ist die realisierbare Strommenge
Technologiecharakteristik	Energieaufwand bei Behandlung von Eingangsstoffen ohne größere Vorbehandlung: 0,2 – 0,6% der im Holz enthaltenen Energiemenge 3 Bewertung Gesamtwirkungsgrad bis Energieprodukt: hoher Erfüllungsgrad 11 typische Größenordnung der Emission von Treibhausgasen bei der Behandlung: 9 Wirkungsgrad 90%: 5,3 g CO₂Äq/MJ Wärme, Referenzwert: 80 g CO₂Äq/MJ Wärme Wirkungsgrad 30% Strom 14,9 g CO₂Äq/MJ Strom, Referenzwert: 183 g CO₂Äq/MJ Strom Komplexität der Technologie (einfach, komplex): Einfach Entwicklungsstand (Stand der Technik, Pilotanlage): ausgereifte Technologie, marktetabliert 1 Entwicklungsbedarf: Anpassung des Anlagenbetriebs auf flexible Fahrweise zur bedarfsgerechten Wärme- und Strombereitstellung, Erhöhung der Wirkungsgrade bei Verbreiterung des einsetzbaren Brennstoffsortiments, sinkender Biomasseverbrauch durch steigende Wirkungsgrade und sinkende Volllaststunden 1
Kosten und Erlöse	Behandlungskosten / Herstellungskosten pro Menge: Waldhackschnitzel 10-20 EUR/Srm, Sägereis-Hackschnitzel > 5-25 EUR/Srm 3

Heizkraftwerk 5 MW_{el} (T3)

Investitionskosten pro Anlage:

3,3 – 4,4 Euro/kW_{el} (netto) ⁴

Gestehungskosten:

1,4 Cent/MJ Wärme – Referenz: 2,8 Cent/MJ ¹⁰

4,3 Cent/MJ Strom – Referenz: 228 Cent/MJ ¹⁰

Bereitstellungskosten: ⁵

Mittel

Erntefrisch 75 Euro/Mg TM (bei 50% Restfeuchte)

Gelagert 94 Euro/Mg TM (bei 35% Restfeuchte)

Getrocknet 122 Euro/Mg TM (bei 10% Restfeuchte)

Verwendete Literatur

- ¹ DBFZ (2015): Bioenergie-Technologien. Fokusheft. 2. Auflage
- ² Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.; Hofbauer, H. (2016): Energie aus Biomasse
- ³ FNR (2017): Marktübersicht Hackschnitzelheizungen
- ⁴ Weidner et al. (2016): Bioenergie. Technologiesteckbriefe zur Analyse „Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050. Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft
- ⁵ Leible et al. (2003): Energie aus biogenen Abfall- und Reststoffen. FZKA 6882
- ⁸ FNR (2017): Basisdaten Bioenergie
- ¹¹ eigene Bewertung, siehe Kapitel 6, Gesamtbericht
- Aus dem Internet:
- ⁶ UBA: <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id=%7BB5DDF90C-DD94-4AD2-AFFD-1EAA5726ACAA%7D>
- ⁷ Gemis 4.95 <http://iinas.org/gemis-download-121.html>
- ⁹ <https://www.biograce.net/biograce2/>
- ¹⁰ http://www.evur.tu-berlin.de/fileadmin/fg45/Projekte/Grossbeeren/Info_allg/Waermekosten_unt_Heizungsanlagen.pdf

B.4 ORC Heizkraftwerk 250 kW_{el} (T4)

ORC Heizkraftwerk 250 kW_{el} (T4)

Konversion	Verbrennung
Technologie	KWK
Produkt	Strom, Wärme
Eingesetzter Abfall- und Reststoff (ggf. Beschreibung)	Hackschnitzel aus Waldrestholz
Beschreibung der Technik	Beschreibung: Verfahren basiert auf einem Heizkraftwerk auf Basis biogener Festbrennstoffe mit ORC-Technologie (Organic Rankine Cycle). Beim ORC-Prozess wird eine organische Flüssigkeit (anstelle von Wasser) mit einer oft niedrigen Verdampfungstemperatur verwendet. Dazu gehören Silikonöle, Kohlenwasserstoffe oder Kältemittel. Man kann Wärmeströme mit Temperaturen zw. 120 und 450°C verstromen 2. Durch den ORC-Prozess können höhere Wirkungsgrade bei

ORC Heizkraftwerk 250 kW_{el} (T4)

	niedrigen Verbrennungstemperaturen erzielt werden. Bei der Verbrennung biogener Festbrennstoffe werden hohe Temperaturen erreicht, so dass eine größere Temperaturdifferenz (im Vergleich zu Wasserdampf) für den ORC ausgenutzt werden kann. Bei einem mit Biomasse betriebenen ORC-Prozess, wird die in der Biomasse-Feuerung bereitgestellte und im heißen Verbrennungs- bzw. Abgas befindliche Wärme zunächst einem nahezu drucklosen Thermoöl-Kreislauf zugeführt. Mit dem Thermoöl wird die Wärmeenergie, die aus der Verbrennung der biogenen Festbrennstoffe stammt, in einem Verdampfer auf das organische Arbeitsmittel des ORC-Prozesses übertragen. Dadurch wird das hier zirkulierende organische Kreislaufmittel in die Dampfphase überführt. Das verdampfte Arbeitsmedium wird anschließend in einer, konventionellen Dampfturbine entspannt. Durch die Entspannung des Dampfes wird mechanische Arbeit abgegeben und in einem über die Turbinenwelle gekoppelten Generator verstromt. Bei der Kraft-Wärme-Kopplung wird der entspannte Arbeitsmitteldampf anschließend in einem Heizkondensator bei 50 bis 90 °C kondensiert. Die dabei anfallende Wärme kann in einem Nah- oder Fernwärmenetz genutzt werden. ⁴ Prozesskette: ORC-HKW (Heizkraftwerk) auf Holzhackschnitzelbasis mit Rostfeuerung, Schlangrohrwärmeübertrager, Economizern, Rauchgasreinigung, Sekundär- und Primärkreislauf mit Thermofluiden anschließender Turbine ¹ Leistungsspektrum: 0,2-3 MW_{el} mit Feuerungswärmeleistungen von 1,5 - 20 MW_{th} ¹
Chemisch / Physikalische Eingangparameter	Geeignet für Wassergehalt von bis: 35-50% geeignet für Heizwert/Brennwert von bis: Hackschnitzel: 18,5 GJ/t_{atro} ⁸
Struktur des Inputmaterials ohne aufwändige Vorbehandlung	geeignet für Korngröße von bis: Länge 45 mm bis 200 mm, Querschnittsfläche 2cm² - 6 cm², Grobanteil 31,5 mm - 63 mm ³ geeignet für Inputmatrix bezüglich holzig/krautig/in Lösung: Holz Risiko für Störstoffe (z.B. Quecksilber): Keine
Inputcharakteristik	Flexibilität bei zeitlich unterschiedlichem Anfall (Batchbetrieb, kontinuierlich): kontinuierlich Flexibilität bei Mengenunterschieden im Input von bis (typische Anlagengrößen): prinzipiell hohe Varianz, sofern Brennstoff in Feuerung fluidisierbar, aber gleichmäßige Wärmenachfrage notwendig, da Lastwechsel nur langsam möglich ist, wenn keine Wärme benötigt wird, kann der gesamte Dampf verstromt werden; Vorteil liegt auch in der Entkopplung von Strom und Wärmeerzeugung
Outputcharakteristik	Anwendungsbereich des erzeugten Energieprodukts (Strom, Wärme, Kraftstoff): Strom, Wärme zeitliche und räumliche Flexibilität bei der Abnahme des Energieprodukts:

ORC Heizkraftwerk 250 kW_{el} (T4)

	zeitlich und räumlich flexibel, Abwärme kann zur Nachverstromung eines Biogas-BHKW verwendet werden
Technologiecharakteristik	Energieaufwand bei Behandlung von Eingangsstoffen ohne größere Vorbehandlung: 0,2 – 0,6% der im Holz enthaltenen Energiemenge Bewertung Gesamtwirkungsgrad bis Energieprodukt: mittlerer Erfüllungsgrad ¹⁴ typische Größenordnung der Emission von Treibhausgasen bei der Behandlung: 17,9 g CO₂Äq/MJ Strom, Referenzwert: 183 g CO₂Äq/MJ Strom ¹¹ Komplexität der Technologie (einfach, komplex): Einfach Entwicklungsstand (Stand der Technik, Pilotanlage): Technik wird primär für die Verstromung von industrieller Abwärme verwendet, Technik etabliert und am Markt verfügbar ⁴ Entwicklungsbedarf: Prozessoptimierung und neue Thermoöle würden höhere Flexibilität und Betriebsparameter erlauben, höhere Wirkungsgrade werden angestrebt ¹
Kosten und Erlöse	Behandlungskosten / Herstellungskosten pro Menge: Waldhackschnitzel 10-20 EUR/Srm, Sägerest-Hackschnitzel > 5-25 EUR/Srm ³ Investitionskosten pro Anlage: 480.000 Euro/MW_{th} ⁸ Gestehungskosten: 5 Cent/MJ Strom – Referenz: 2,2 Cent/MJ ¹² Bereitstellungskosten: ⁵ Mittel Erntefrisch 75 Euro/Mg TM (bei 50% Restfeuchte) Gelagert 94 Euro/Mg TM (bei 35% Restfeuchte) Getrocknet 122 Euro/Mg TM (bei 10% Restfeuchte)
Verwendete Literatur	¹ DBFZ (2015): Bioenergie-Technologien. Fokusheft. 2. Auflage ² Hirzel, Simon (Hrsg.) (2017): Energiekompendium. Fraunhofer Verlag ³ FNR (2017): Marktübersicht Hackschnitzelheizungen ⁴ Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.; Hofbauer, H. (2016): Energie aus Biomasse ⁵ Leible et al. (2003): Energie aus biogenen Abfall- und Reststoffen. FZKA 6882 ⁹ Neff (2006) Aufbereitung von Holzhackschnitzeln zur energetischen Verwertung – unter besonderer Berücksichtigung der Qualitätsparameter. Dissertation ¹⁰ Weidner et al. (2016): Bioenergie. Technologiesteckbriefe zur Analyse „Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050. Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft ¹² Stockmann, Wagner (2016): ORC-Technik, Wirtschaftlichkeit und Grenzen. ¹³ FNR (2017): Basisdaten Bioenergie ¹⁴ eigene Bewertung, siehe Kapitel 6 im Gesamtbericht Aus dem Internet: ⁶ Gammel Engineering: https://www.gammel.de/de/lexikon/Biomasse-Heizkraftwerk/4757? ⁷ ORC Fachverband: http://www.orc-fachverband.de/argumente_pro_orc.html ⁸ Gemis 4.95 http://iinas.org/gemis-download-121.html

ORC Heizkraftwerk 250 kW_{el} (T4)

¹¹ <https://www.biograce.net/biograce2/>

B.5 Klärschlammverbrennungsanlage 10 MW_{el} (T5)

Klärschlammverbrennungsanlage 10 MW_{el} (T5)

Konversion	Verbrennung
Technologie	KWK-Spezialanlagen
Produkt	Strom, Wärme
Eingesetzter Abfall- und Reststoff (ggf. Beschreibung)	Klärschlamm
Beschreibung der Technik	Beschreibung: Verbrennung von Klärschlamm durch stationäre Wirbelschichtverfahren (Monoklärschlammverbrennung) bei Temperaturen zwischen 850 und 950°C, weil unter 850°C Geruchsprobleme und über 950°C die Versinterung der Asche drohen. möglichst unter 900°C ⁴ Prozesskette: ⁴ Bunker, Trocknung, Verbrennung, Energieauskopplung, Verstromung, Wärmeabgabe, Rauchgasreinigung Leistungsspektrum: 1-10 MW_{el}
Chemisch / Physikalische Eingangssparameter	Geeignet für Wassergehalt von bis: Wassergehalt ist abhängig vom Entwässerungsgrad, Primärschlamm: 95%, entwässerter Schlamm 65-75%, bei Trocknung ca. < 60% (dann selbstgängige Verbrennung möglich) ³ geeignet für Heizwert/Brennwert von bis: 6,8-13,6 GJ/t TS
Struktur des Inputmaterials ohne aufwändige Vorbehandlung	geeignet für Korngröße von bis: wasserhaltiges Vielstoffgemisch geeignet für Inputmatrix bezüglich holzig/krautig/in Lösung: in Lösung Risiko für Störstoffe (z.B. Quecksilber): Aschen müssen entsorgt werden, ggf. problematisch; Phosphorrecycling ist allerdings möglich; potenzielle Schwermetallbelastung, Feinstaub und Stickoxidemissionen, hoher Aufwand für Abscheidetechnologie, aber gut kontrollierbar ¹
Inputcharakteristik	Flexibilität bei zeitlich unterschiedlichem Anfall (Batchbetrieb, kontinuierlich): schnelles An- u. Abfahren durch kurze Aufheiz- u. Abkühlzeiten, intermittierender Betrieb möglich

Klärschlammverbrennungsanlage 10 MW _{el} (T5)	
	Flexibilität bei Mengenunterschieden im Input von bis (typische Anlagengrößen): flexibel, da in Abfallverbrennungsanlagen Klärschlamm mitverbrannt wird
Outputcharakteristik	Anwendungsbereich des erzeugten Energieprodukts (Strom, Wärme, Energieträger): Strom und Wärme zeitliche und räumliche Flexibilität bei der Abnahme des Energieprodukts: zeitlich und räumlich flexibel
Technologiecharakteristik	Energieaufwand bei Behandlung von Eingangsstoffen ohne größere Vorbehandlung: spezifischer thermischer Energieverbrauch 900 kWh/t, spezifischer elektrischer Energieverbrauch 106 kWh/t ² Bewertung Gesamtwirkungsgrad bis Energieprodukt: mittlerer Erfüllungsgrad ¹⁰ typische Größenordnung der Emission von Treibhausgasen bei der Behandlung: 106 g CO₂Äq/MJ Strom, Referenzwert: 80 g CO₂Äq/MJ Wärme ¹¹ Komplexität der Technologie (einfach, komplex): Einfach Entwicklungsstand (Stand der Technik, Pilotanlage): etablierte Technik Entwicklungsbedarf: Phosphorrückgewinnung befindet sich noch im Versuchsstadium, es wird an großtechnischer Umsetzung gearbeitet
Kosten und Erlöse	Behandlungskosten / Herstellungskosten pro Menge: Anlage mit 30.000 Mg TS/a oder 120.000 Mg/a bei 25 % TS vor Trocknung und ca. 40 % TS nach Trocknung, bei einem Invest von 33,5 Mio. Euro (= 279 Euro je Mg OS/a) = Behandlungskosten von 39,5 Euro je Mg OS bzw. 158 Euro je Mg TS ⁴ Anlage mit 4.000 Mg TS/a oder 16.000 Mg OS/a bei 25 % TS vor Trocknung und ca. 40 % TS nach Trocknung, bei einem Invest von 10,5 Mio. Euro (= 656 Euro je Mg OS/a) = Behandlungskosten von 121,7 Euro je Mg OS bzw. 487 Euro je Mg TS ⁴ Nach Franck (2016) entwickelten sich die Behandlungskosten in einer KVA von 50 Euro (2011) über 72 Euro (2015) zu 85 Euro (2016) €/Mg OS Netto ohne Transport. Investitionskosten pro Anlage: 168.000 EUR/MW_{el} ⁷ Gestehungskosten: Die Anwendung des Prinzips Gestehungskosten ist problematisch, da das Behandlungsziel der Abfälle im Vordergrund steht und dieses vergleichsweise hohen Behandlungskosten verursacht. Die Energieerzeugung dagegen ist ein Nebennutzen, der in der Kostenkalkulation dieser Anlagen als Zusatzerlös dient. Für die Bewertung wird daher ein „mittlerer Erfüllungsgrad“ angesetzt, um der Ambivalenz zwischen kostenträchtiger Behandlungstechnik und zwangsläufigem Anfall von Strom oder Nutzwärme folgen. Bereitstellungskosten: ⁹ Flüssig 553 €/Mg TM

Klärschlammverbrennungsanlage 10 MW_{el} (T5)

	Entwässert 186 €/Mg TM Getrocknet 294 €/Mg TM
Verwendete Literatur	¹ Kaltschmitt, M. ; Hartmann, H. ; Hofbauer, H. (2016): Energie aus Biomasse ² Schmid, F. (2006): Ökonomische Klärschlamm-Trocknung ³ UBA (2013): Klärschlamm Entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland ⁶ Lehrmann 2010: Stand und Perspektiven der Klärschlamm Entsorgung. Vortrag ⁸ ATV Handbuch 1996: Lehr- und Handbuch der Abwassertechnik ⁹ Leible et al. (2003): Energie aus biogenen Abfall- und Reststoffen. FZKA 6882 ¹⁰ eigene Bewertung, siehe Kapitel 6 im Gesamtbericht ¹¹ eigene Berechnung ifeu Aus dem Internet: ⁴ Glatzer, A.;Friedrich: Mhttps://www.dwa-no.de/files/_media/content/PDFs/LV_Nord-Ost/Klaerschlammforum/6_V_Glatzer_Friedrich.pdf ⁵ Probas: http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/web2pdf.php?id=%7B7682ABED-3BEE-4C01-9A17-A7ADD5EED421%7D&filename=kl%C3%A3rschlamm_getr_mitverbr_kohle_kw_dt_2020&style=export ⁷ Gemis 4.95 http://iinas.org/gemis-download-121.html

B.6 Mitverbrennung fester Biomasse im Kohlekraftwerk (T6)

Mitverbrennung fester Biomasse im Kohlekraftwerk (T6)

Konversion	Verbrennung
Technologie	KWK-Spezialanlagen
Produkt	Prozesswärme
Eingesetzter Abfall- und Reststoff (ggf. Beschreibung)	Holz und Kohle (Kontaminiertes Altholz ist nicht sinnvoll für die Mitverbrennung in Kohlekraftwerken. Besonders geeignet sind Stückgut, Hackschnitzel oder Pellets. Bei der Verbrennung entstehen Abgase und Asche)
Beschreibung der Technik	Beschreibung: Feste Biobrennstoffe werden in vorhandenen mit Stein- oder Braunkohle gefeuerten Kraft oder Heizkraftwerken zum Ersatz fossiler Energieträger eingesetzt. Es kann zwischen direkter, indirekter und paralleler Mitverbrennung unterschieden werden. Bei direkter Verbrennung werden Kohle und Biomasse gemeinsam zugeführt und verbrannt. Bei indirekter Verbrennung erfolgt eine thermo-chemische Vorbehandlung der Biomasse zu Biokohle vor der eigentlichen Verbrennung. In der parallelen Mitverbrennung erfolgt die Verbrennung in unterschiedlichen Feuerungsanlagen. Diese sind nur dampfseitig gekoppelt. ⁵ Prozesskette: Anlieferung, Lagerung, Verbrennung, Dampfturbine, Strom/Wärme/Prozessdampf Leistungsspektrum: Einsatz in kleineren Heizkraftwerken im Leistungsbereich unterhalb von etwa 100 MW_{el} Leistung die oft in KWK betrieben werden und in großen, ausschließlich der Elektrizitätserzeugung dienenden Kraftwerksblöcke mit installierten elektrischen Leistungen von 500 bis 1.000 MW. ⁵

Mitverbrennung fester Biomasse im Kohlekraftwerk (T6)	
Chemisch / Physikalische Eingangsparmeter	Geeignet für Wassergehalt von bis: Stückgut und Hackschnitzel können einen Wassergehalt bis zu 50% vorweisen. Typischer Wassergehalt von Braunkohle liegt bei 40-50%. Typischer Wassergehalt Hackschnitzel: 20-40 % (lufttrocken) Stückgut (Scheitholz): 35-50 % Pellets: <10 % Veredelte Pellets: <5 % geeignet für Heizwert/Brennwert von bis: Steinkohle: 6,97 MWh/t Braunkohle: 2,45 MWh/t Pellets: 2,84 - 4,92 MWh/t Hackschnitzel: 18,5 GJ/t _{atro} Altholz: 13,25-16 GJ/t
Struktur des Inputmaterials ohne aufwändige Vorbehandlung	geeignet für Korngröße von bis: Hackschnitzel: 1,5 – 4,5 cm geeignet für Inputmatrix bezüglich holzig/krautig/in Lösung: Holz Risiko für Störstoffe (z.B. Quecksilber): geringere Rauchgasreinigung durch geringere gesetzliche Anforderungen, erlaubt die Emission von mehr Luftschadstoffen aus der Kohle; Aschen müssen entsorgt werden, ggf. problematisch
Inputcharakteristik	Flexibilität bei zeitlich unterschiedlichem Anfall (Batchbetrieb, kontinuierlich): kontinuierlich, da Verbrennungsprozess in Kohlekraftwerken aufrechterhalten werden Flexibilität bei Mengenunterschieden im Input von bis (typische Anlagengrößen): nicht flexibel, Menge muss so gewählt werden, dass keine signifikanten Nachteile (z. B. Korrosion, Emissionen, Strömungsverhältnisse) durch den Biomasseinsatz hervorgerufen werden. Biomasseanteil von etwa 10% sollte bei Steinkohlestaubfeuerungen nicht überschritten werden um abgasseitigen Veränderungen möglichst gering zu halten. Bei Braunkohlefeuerungen, von Braun- auf Steinkohle umgebauten Feuerungen mit Abgas-Rezirkulation und bei Wirbelschichtanlagen sind auch höhere Anteile möglich. Bei der gemeinsamen Nutzung der für Kohle vorhandenen Mahleinrichtungen sollte der Anteil der Biomasse < 5% der Brennstoffleistung entsprechen.
Outputcharakteristik	Anwendungsbereich des erzeugten Energieprodukts (Strom, Wärme, Energieträger): Strom, Wärme zeitliche und räumliche Flexibilität bei der Abnahme des Energieprodukts: nicht flexibel, Strom, Wärme und Prozessdampf können nicht wirtschaftlich gespeichert werden, sondern müssen sofort ins Netz eingespeist bzw. bei Dampf an den Erzeuger abgegeben werden
	Energieaufwand bei Behandlung von Eingangsstoffen ohne größere Vorbehandlung:

Mitverbrennung fester Biomasse im Kohlekraftwerk (T6)	
Technologiecharakteristik	Notwendige Aufbereitung ist abhängig von der Biomasseart und der Feuerungsanlagentechnik. Torrefizierung lässt den Brennwert ansteigen auf bis 23 MJ/kg. Energieaufwand für torrefiziertes Holz: 1,2 GJ/m³ ⁵ Bewertung Gesamtwirkungsgrad bis Energieprodukt: hoher Erfüllungsgrad ¹² typische Größenordnung der Emission von Treibhausgasen bei der Behandlung: 10 g CO₂Äq/MJ Strom (eigene Berechnung ifeu), Referenzwert: 183 g CO₂Äq/MJ Strom Komplexität der Technologie (einfach, komplex): einfach (vor allem bei direkter Mitverbrennung) Entwicklungsstand (Stand der Technik, Pilotanlage): In Großbritannien, Dänemark, Niederlande, Belgien und Polen wurden in den letzten Jahren mehrere ältere Kohlekraftwerke auf die Mitverbrennung von Holzpellets umgerüstet. ² Entwicklungsbedarf: Wenngleich die Stromerzeugung aus Kohle in Deutschland derzeit eine wichtige Rolle spielt, wird die Mitverbrennung von Biomasse in diesen Anlagen zukünftig als nicht tragfähig angesehen.
Kosten und Erlöse	Behandlungskosten / Herstellungskosten pro Menge: Die Mehrkosten für die Mitverbrennung werden vor allem durch höhere Holzpreise gegenüber den Kohlepreisen verursacht. Spezifischen Mehrkosten für die Rohstoffbeschaffung können bei 6 - 15 Euro/MWh liegen. ¹⁰ Investitionskosten pro Anlage: Die spezifischen Investitionskosten für die Mitverbrennung (Anteil 10%) liegen bei Holzhackschnitzeln im Kohlekraftwerk bei 620 Euro/kW_{el}, Pellets sind mit 300 Euro/kW_{el} deutlich niedriger bei den Investitionskosten. ¹⁰ Gestehungskosten: Die Anwendung des Prinzips Gestehungskosten ist problematisch, da das Behandlungsziel der Abfälle im Vordergrund steht und dieses vergleichsweise hohen Behandlungskosten verursacht. Die Energieerzeugung dagegen ist ein Nebennutzen, der in der Kostenkalkulation dieser Anlagen als Zusatzerlös dient. Bei der Mitverbrennung dienen Abfallstoffe zur Minderung von Kosten durch Regelbrennstoffe (hier Steinkohle). Für die Bewertung wird daher ein „mittlerer Erfüllungsgrad“ angesetzt, um der Ambivalenz zwischen kostenträchtiger Behandlungstechnik und zwangsläufigem Anfall von Strom oder Nutzwärme folgen.
Verwendete Literatur	¹ Binderup Hansen PF, Lin W, Dam-Johansen K. (1997): Chemical Reaction Conditions in a Danish 80 MWth CFB-Boiler Co-firing Straw and Coal. 14th International Conference on Fluidized Bed Combustion. ² Bloche-Daub K, Witt J, Janczik S, Kaltschmitt M (2015): Erneuerbare Energien ³ Fahlke J (1996): Spurenelementbilanzierungen bei Steinkohlefeuerungen am Beispiel einer Trocken- und einer Schmelzkammerfeuerung unter Berücksichtigung der Rauchgasreinigungsanlagen. VDI-Fortschrittsberichte Reihe 15 „Umweltechnik“, Bd. 120. ⁴ Fichtner (2002): Markt- und Kostenentwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse - Gutachten ⁵ Kaltschmitt, M. ; Hartmann, H. ; Hofbauer, H. (2016): Energie aus Biomasse ⁶ Kern, M. et al (2009): Nutzung von Biomasse in Berlin ⁷ Öko-Institut (2014): CO₂-Emissionen auf der Kohleverstromung ⁸ Ponitka, Jens et al. (2016): Bioenergie-Technologien ⁹ Tauber C, Klemm J, Schönrok M (1996): Mitverbrennung kommunaler Klärschlämme in Steinkohlekraftwerken

Mitverbrennung fester Biomasse im Kohlekraftwerk (T6)

¹⁰ Vogel et al. (2011): Die Mitverbrennung holzartiger Biomasse in Kohlekraftwerken

¹¹ Leible et al. (2003): Energie aus biogenen Abfall- und Reststoffen. FZKA 6882

¹² eigene Bewertung, siehe Kapitel 6 im Gesamtbericht

Aus dem Internet:

¹² Bayernwerk: https://www.bayernwerk.de/content/revu-global/bayernwerk/de/fuer-kommunen/ver-und-entsorgung/biomasse/kommunale-biomasseverwertung/jcr_content/par/adaptiveimage.img.jpg/1498134777942.jpg

¹³ Gemis 4.95 <http://iinas.org/gemis-download-121.html>

B.7 Abfallverbrennungsanlage 50 MW_{th} (T7)

Abfallverbrennungsanlage 50 MW _{th} (T7)	
Konversion	Verbrennung
Technologie	KWK-Spezialanlage
Produkt	Wärme, Strom
Eingesetzter Abfall- und Reststoff (ggf. Beschreibung)	biogener Abfall wie Hausmüll, Industrieabfälle
Beschreibung der Technik	Beschreibung: In den Müllverbrennungsanlagen (MVA) und Ersatzbrennstoff-Heizkraftwerk werden überwiegend Abfälle aus Haushalten einschließlich Sperrmüll sowie hausmüllähnliche Gewerbeabfälle verbrannt. Sperrmüll wird ggf. in einem separaten Bereich vorzerkleinert. Ersatzbrennstoff wird vor der Verbrennung u.U. noch in einer Aufbereitungsanlage aufbereitet (Heizwerterhöhung, Homogenisierung, Pelletierung). Der Verbrennungsrost ist in MVAs in der Regel als Walzenrost ausgeführt in Ersatzbrennstoff-HKW als Rost- oder Wirbelschichtfeuerung. Mittels der heißen Rauchgase wird Dampf erzeugt, der zum einen die Turbine antreibt und über einen Generator elektrischer Strom erzeugt wird oder der als Fernwärme zum Heizen von Haushalten bzw. als Prozesswärme für industrielle Produktionsprozesse genutzt wird. Prozesskette: Anlieferung (evtl. Vorzerkleinerung), Bunker (Durchmischung), Verbrennung, Dampfturbine, Strom/Wärme/Prozesswärme Leistungsspektrum: >50 MW_{th}
Chemisch / Physikalische Eingangsparameter	Geeignet für Wassergehalt von bis: 35-45 % (stichfest), Wassergehalt ist abhängig vom Inputmaterial und kann durch Mischen von verschiedenen Abfällen eingestellt werden Industrierestholz: 10-30%_s geeignet für Heizwert/Brennwert von bis: 6-10 GJ/t Abfall bei MVAs Industrierestholz: 13,2 – 16 GJ/t_s
Struktur des Inputmaterials ohne aufwändige Vorbehandlung	geeignet für Korngröße von bis: Grob geeignet für Inputmatrix bezüglich holzig/krautig/in Lösung: fest bis pastös, Beimengung von Schlämmen insb. Klärschlamm Risiko für Störstoffe (z.B. Quecksilber): hohe gesetzliche Anforderungen an Rauchgasreinigung, dafür hohes Abgasvolumen mit insgesamt hohen spezifischen Luftschadstoffgehalten, Aschen fallen an und müssen entsorgt werden, Volumen durch Einsatzstoffe mit geringem Schadstoffbelastungen unnötig erhöht

Abfallverbrennungsanlage 50 MW _{th} (T7)	
Inputcharakteristik	Flexibilität bei zeitlich unterschiedlichem Anfall (Batchbetrieb, kontinuierlich): sehr flexibel trotz kontinuierlichem Betrieb der Feuerung, da durch den Bunker immer Abfall vorgehalten werden kann. Flexibilität bei Mengenunterschieden im Input von bis (typische Anlagengrößen): sehr flexibel, da unterschiedliche Abfälle gemischt werden können, um gewünschte Inputparameter zu erreichen
Outputcharakteristik	Anwendungsbereich des erzeugten Energieprodukts (Strom, Wärme, Energieträger): Wärme, Strom zeitliche und räumliche Flexibilität bei der Abnahme des Energieprodukts: nicht flexibel, Strom, Wärme und Prozessdampf können nicht wirtschaftlich gespeichert werden, sondern müssen sofort ins Netz eingespeist bzw. bei Dampf an den Erzeuger abgegeben werden. Kurzfristiges an- und abschalten nicht möglich (Grundlastbetrieb).
Technologiecharakteristik	Energieaufwand bei Behandlung von Eingangsstoffen ohne größere Vorbehandlung: Hausmüll brennt ab einem Heizwert von rund 6.000 kJ/kg selbstgänglich, Hausmüll liegt generell weit darüber, so dass zusätzliche Energie generell nicht notwendig ist. ² Bewertung Gesamtwirkungsgrad bis Energieprodukt: mittlerer Erfüllungsgrad ⁸ typische Größenordnung der Emission von Treibhausgasen bei der Behandlung: ⁹ 5 g CO₂Äq/MJ Wärme (ifeu Daten), Referenzwert: 80 g CO₂Äq/MJ Dampf 14 g CO₂Äq/MJ Strom (ifeu Daten), Referenzwert: 183 g CO₂Äq/MJ Strom Komplexität der Technologie (einfach, komplex): Einfach Entwicklungsstand (Stand der Technik, Pilotanlage): etablierte Technologie Entwicklungsbedarf: Gering
Kosten und Erlöse	Behandlungskosten / Herstellungskosten pro Menge: 35 -100 €/t für MVA; 110 - 180 € für Verbraucher ³ Investitionskosten pro Anlage: Beispiel: 243 Mio. € für den Bau der MVA in Nürnberg 2002 ⁷ Gestehungskosten: Die Anwendung des Prinzips Gestehungskosten ist problematisch, da das Behandlungsziel der Abfälle im Vordergrund steht und dieses vergleichsweise hohen Behandlungskosten verursacht. Die Energieerzeugung dagegen ist ein Nebennutzen, der in der Kostenkalkulation dieser Anlagen als Zusatzerlös dient. Für die Bewertung wird daher ein „mittlerer Erfüllungsgrad“ angesetzt, um der Ambivalenz zwischen kostenträchtiger Behandlungstechnik und zwangsläufigem Anfall von Strom oder Nutzwärme folgen.
Verwendete Literatur	⁴ Kaltschmitt, M. ; Hartmann, H. ; Hofbauer, H. (2016): Energie aus Biomasse ⁵ Dehoust et al (2010) : Klimaschutzpotenziale der Abfallwirtschaft ⁸ eigene Bewertung, siehe Kapitel 6 im Gesamtbericht ⁹ eigene Berechnung ifeu

Abfallverbrennungsanlage 50 MW_{th} (T7)

	Aus dem Internet: ¹ Abfallwirtschaft Stadt Nürnberg: https://www.nuernberg.de/internet/abfallwirtschaft/faq_mva.html#18 ² Itad: https://www.itad.de/ITAD/klimaenergie/327...html https://www.itad.de/information/wiefunktionierteinemva/338..html ³ Statista: https://de.statista.com/statistik/daten/studie/219745/umfrage/kosten-und-gebuehren-der-muellverbrennung-in-deutschland-nach-unternehmen/ ⁶ Gemis 4.95 http://iinas.org/gemis-download-121.html ⁷ https://www.nuernberg.de/internet/abfallwirtschaft/faq_mva.html#18
--	---

B.8 Kleinvergaser 30 KW_{el} (T8)

Kleinvergaser 30 KW_{el} (T8)

Konversion	Vergasung
Technologie	Direkte Gasnutzung
Produkt	Wärme, Strom
Eingesetzter Abfall- und Reststoff (ggf. Beschreibung)	Hackschnitzel aus Waldrestholz (inkl. Vorkette)
Beschreibung der Technik	Beschreibung: Kleinvergasanlage von Holzhackschnitzeln mit anschließender Gasaufbereitung und Verbrennung in einem Gasmotor unter KWK, kleine Holzvergaser sind i.d.R. Gleichstromvergaser ¹ Prozesskette: Vergasung, Produktgaskühlung, Gasreinigung, Produktgasverbrennung im Otto-Prozess mit Generator und Wärmetauscher ¹ Leistungsspektrum: 15-250 kW_{el} (45-500 kW_{th}) ¹
Chemisch / Physikalische Eingangsparameter	Geeignet für Wassergehalt von bis: 20-40% (lufttrocken bis erntefrisch) geeignet für Heizwert/Brennwert von bis: 18,5 GJ/t_{atro}
Struktur des Inputmaterials ohne aufwändige Vorbehandlung	geeignet für Korngröße von bis: 1,5 - 4,5 cm geeignet für Inputmatrix bezüglich holzig/krautig/in Lösung: Holz Risiko für Störstoffe (z.B. Quecksilber): erhöhte Kaliumwerte können Vergasung erschweren; unterschiedliche Körnergrößenverteilung hat Einfluss auf Vergasungseigenschaften und kann ggf. zu Verstopfung der Zubringung

Kleinvergaser 30 KW_{el} (T8)	
	führen, hohe Rindenanteile möglich, aufwändig um Feinstaub bei Kleinanlagen weiter zu reduzieren
Inputcharakteristik	Flexibilität bei zeitlich unterschiedlichem Anfall (Batchbetrieb, kontinuierlich): kontinuierlich Flexibilität bei Mengenunterschieden im Input von bis (typische Anlagengrößen): nur begrenzt flexibel, relativ hohe Anforderungen an den Rohstoff bei Gleichstromvergasung, gute Leistungsregelbarkeit, hohe Varianz der Brennstoffparameter durch die flexible Technologie, teilweise können auch Pellets, Miscanthus-Hackgut oder andere Biobrennstoffe eingesetzt werden ¹
Outputcharakteristik	Anwendungsbereich des erzeugten Energieprodukts (Strom, Wärme, Energieträger): Strom, Wärme zeitliche und räumliche Flexibilität bei der Abnahme des Energieprodukts: räumlich relativ flexibel, Holzvergasungsanlagen erreichen auch im niedrigen Leistungsbereich relativ hohe elektrische Leistungsausbeuten bei geringen anfallenden thermischen Leistungen, was eine Grundlasteinordnung in Nah- und Fernwärmenetzen erleichtert
Technologiecharakteristik	Energieaufwand bei Behandlung von Eingangsstoffen ohne größere Vorbehandlung: 0,2 – 0,6% der im Holz enthaltenen Energiemenge Bewertung Gesamtwirkungsgrad bis Energieprodukt: hoher Erfüllungsgrad ⁸ typische Größenordnung der Emission von Treibhausgasen bei der Behandlung: ⁷ 7,6 g CO₂-Äq/MJ Wärme (GEMIS), Referenzwert: 80 g CO₂-Äq/MJ Dampf 36,1 g CO₂-Äq/MJ Strom (GEMIS), Referenzwert: 183 g CO₂-Äq/MJ Strom Komplexität der Technologie (einfach, komplex): Einfach Entwicklungsstand (Stand der Technik, Pilotanlage): etablierte Technologie Entwicklungsbedarf: Potenziale bestehen in der Rohstoffvarianz, da ungünstige Rohstoffparameter noch zu großen Problemen in der Produktgasqualität führen; Entwicklung und Anwendung von Brennstoffzellen könnten zu einem Technologiesprung führen, Reduktion der Investitionsaufwendungen ¹
Kosten und Erlöse	Behandlungskosten / Herstellungskosten pro Menge: Waldhackschnitzel 10-20 EUR/Srm, Sägerest-Hackschnitzel > 5-25 EUR/Srm Investitionskosten pro Anlage: ca. 12.000 EUR für eine Beispielanlage mit 30 kW ⁷ Gestehungskosten: ⁹ 2,4 Cent/MJ Wärme – Referenz: 2,8 Cent/MJ 6,1 Cent/MJ Strom – Referenz: 2,2 Cent/MJ
Verwendete Literatur	¹ DBFZ (2015): Bioenergie-Technologien. Fokusheft. 2. Auflage ² Kaltschmitt, M. ; Hartmann, H. ; Hofbauer, H. (2016): Energie aus Biomasse

Kleinvergaser 30 KW_{el} (T8)

- ³ Kilburg, S. (2011): Kleine Holzvergasungsanlagen - Handlungsempfehlungen für Kapitalgeber
⁴ Schöberl (2014): Holzvergasung
⁵ Wimmer, W. (2013): Optimierung regionaler Kreisläufe zur Bereitstellung biogener Brennstoffe für Energieerzeugungsanlagen am Beispiel
⁸ eigene Bewertung, siehe Kapitel 6 im Gesamtbericht
⁹ Biomasseverband 2013: Wirtschaftlichkeit von Holzgasanlagen
¹⁰ FNR (2017): Basisdaten Bioenergie
 Aus dem Internet:
⁶ Fee (2013): http://www.fee-ev.de/11_Branchenguide/2013_BG_Biomassevergasung.pdf
⁷ Gemis 4.95 <http://iinas.org/gemis-download-121.html>

B.9 Holzvergaser 10 MW_{el} (T9)

Holzvergaser 10 MW_{el} (T9)

Konversion	Vergasung
Technologie	Direkte Gasnutzung
Produkt	Strom, Wärme
Eingesetzter Abfall- und Reststoff (ggf. Beschreibung)	Waldrestholz Holzhackschnitzel
Beschreibung der Technik	Beschreibung: Vergasungsanlage für Holzhackschnitzel, Pellets mit anschließender Nutzung des Holzgases in einem Gasmotor oder Gasturbine im ORC-Prozess im Kondensationsbetrieb; die im Holzgas enthaltene fühlbare (sensible) Wärme als interne Prozesswärme, zur Brennstofftrocknung und/oder zur Fernwärmeversorgung genutzt werden. Nach verschiedenen Reinigungs- und Abkühlkonzepten wird das Holzgas trocken (heiß) und/oder nass gereinigt, um die Anforderungen zur Nutzung im Gasmotor zu erfüllen ¹ Prozesskette: Holz, Holzgas, Reinigung/Kühlung, Motor/Generator, Strom/Wärme Leistungsspektrum: 1-20 MW_{el} ⁴
Chemisch / Physikalische Eingangsparameter	Geeignet für Wassergehalt von bis: 20-40% geeignet für Heizwert/Brennwert von bis: 18,5 GJ/t_{atro} geeignet für Korngröße von bis: 1 bis 7 cm geeignet für Inputmatrix bezüglich holzig/krautig/in Lösung:

Holzvergaser 10 MW_{el} (T9)	
Struktur des Inputmaterials ohne aufwändige Vorbehandlung	Holzig Risiko für Störstoffe (z.B. Quecksilber): Luftemissionen inkl. Feinstaub durch Abscheidetechnologie bei großer Anlage gut kontrollierbar
Inputcharakteristik	Flexibilität bei zeitlich unterschiedlichem Anfall (Batchbetrieb, kontinuierlich): vergleichsweise eingeschränkt flexibel durch beschränkte Leistungsregelbarkeit und komplexes Anfahrverhalten Flexibilität bei Mengenunterschieden im Input von bis (typische Anlagengrößen): begrenzt flexibel
Outputcharakteristik	Anwendungsbereich des erzeugten Energieprodukts (Strom, Wärme, Energieträger): Strom, Wärme zeitliche und räumliche Flexibilität bei der Abnahme des Energieprodukts: flexibel
Technologiecharakteristik	Energieaufwand bei Behandlung von Eingangsstoffen ohne größere Vorbehandlung: 0,2 – 0,6% der im Holz enthaltenen Energiemenge Bewertung Gesamtwirkungsgrad bis Energieprodukt: mittlerer Erfüllungsgrad ⁸ typische Größenordnung der Emission von Treibhausgasen bei der Behandlung: 14,8 g CO₂Äq/MJ Strom (eigene Berechnung ifeu), Referenzwert: 183 g CO₂Äq/MJ Strom Komplexität der Technologie (einfach, komplex): technologische Herausforderungen sind hoch, daher wird auf Holz zurückgegriffen, außerdem bei Holz Prozentsatz an nicht brennbaren Stoffen, die als Asche oder Staub zurückbleiben, gering Entwicklungsstand (Stand der Technik, Pilotanlage): entwickeln sich von Demo- und Pilotanlagen zunehmend zu marktreifen Serienmodellen und verzeichnen daher einen hohen Zubau, noch keine etablierte Technologie ¹ Entwicklungsbedarf: Entwicklung hin zu Wärme-Kraft-Kälte (WKK)-Technologie, Potenziale in der Rohstoffvarianz, Optimierung im Bereich Wärmerückführung, Aufbereitungsverluste und Gasreinigung notwendig ¹
Kosten und Erlöse	Behandlungskosten / Herstellungskosten pro Menge: Waldhackschnitzel 10-20 EUR/Srm, Sägerest-Hackschnitzel > 5-25 EUR/Srm Investitionskosten pro Anlage: 2,9 Mio €/MW_{el} ¹ Gestehungskosten: 5 Cent/MJ Strom – Referenz: 2,2 Cent/MJ ⁹
Verwendete Literatur	¹ DBFZ (2015): Bioenergie-Technologien. Fokusheft. 2. Auflage ² Kaltschmitt, M. ; Hartmann, H. ; Hofbauer, H. (2016): Energie aus Biomasse ³ Schöberl (2014): Holzvergasung ⁸ eigene Bewertung, siehe Kapitel 6 im Gesamtbericht

Holzvergaser 10 MW_{el} (T9)

- ⁹ Biomasseverband 2013: Wirtschaftlichkeit von Holzgasanlagen
¹⁰ FNR (2017): Basisdaten Bioenergie
- Aus dem Internet:
⁴ Bmdw (2016): <https://www.bmdw.gv.at/Unternehmen/gewerbetechnik/Documents/Informationspapier%20Holzvergasanlagen.pdf>
⁵ Carmen (2014): <http://www.duesse.de/znr/pdfs/2014/2014-01-29-waerme-08.pdf>
⁶ FEE (2013): http://www.fee-ev.de/11_Branchenguide/2013_BG_Biomassevergasung.pdf
⁷ Gemis 4.95 <http://iinas.org/gemis-download-121.html>

B.10 Bio-SNG 25 MW (T10)

Bio-SNG 25 MW

Konversion	Vergasung
Technologie	Gasverarbeitung
Produkt	Biomethan (auf Erdgasqualität aufbereitetes und in das Erdgasnetz eingespeistes Biogas)
Eingesetzter Abfall- und Reststoff (ggf. Beschreibung)	Hackschnitzel aus Waldrestholz
Beschreibung der Technik	Beschreibung: Vergasungsanlage mit Holzhackschnitzeln oder Pellets mit anschließender Gasaufbereitung und katalytischer Synthese zu Synthetic Natural Gas (SNG) ¹ Prozesskette: allotherme Wirbelschichtvergasung, Produktgaskühlung mit Wärmetauscher, Kaltproduktgaswäsche, CO-Methanisierung mit Shiftreaktion, Veredelung ¹ Leistungsspektrum: 1-100 MW_{SNG}
Chemisch / Physikalische Eingangparameter	Geeignet für Wassergehalt von bis: 10 bis 20% ⁴ geeignet für Heizwert/Brennwert von bis: ³ 18,5 GJ/t_{atro}
Struktur des Inputmaterials ohne aufwändige Vorbehandlung	geeignet für Korngröße von bis: 1 bis 70 mm, homogene Brennstoffstücke erwünscht geeignet für Inputmatrix bezüglich holzig/krautig/in Lösung: Holzig Risiko für Störstoffe (z.B. Quecksilber):³ und ⁴ Luftemissionen inkl. Feinstaub bei großer Anlage durch Abscheidetechnologie gut kontrollierbar

Bio-SNG 25 MW	
Inputcharakteristik	Flexibilität bei zeitlich unterschiedlichem Anfall (Batchbetrieb, kontinuierlich): kontinuierlich Flexibilität bei Mengenunterschieden im Input von bis (typische Anlagengrößen): nicht flexibel, hohes Biomasseaufkommen notwendig (ca. 300.000 t/a)
Outputcharakteristik	Anwendungsbereich des erzeugten Energieprodukts (Strom, Wärme, Energieträger): Biomethan zeitliche und räumliche Flexibilität bei der Abnahme des Energieprodukts: Flexibel, da Einspeisung ins öffentliche Gasnetz und einfacher Transport
Technologiecharakteristik	Energieaufwand bei Behandlung von Eingangsstoffen ohne größere Vorbehandlung: Brennstoffwärmeleistung des Vergasers von 32 MW auf Basis Waldrestholz erzeugt eine Leistung von 20 MW_{SNG} ³ Bewertung Gesamtwirkungsgrad bis Energieprodukt: hoher Erfüllungsgrad ⁸ typische Größenordnung der Emission von Treibhausgasen bei der Behandlung: 2,5 kg/MWh ⁷ Komplexität der Technologie (einfach, komplex): Komplex, besonders bei Wärmeintegration ¹ Entwicklungsstand (Stand der Technik, Pilotanlage): an der Schwelle zur Marktreife und kommerziellem Betrieb ¹ Entwicklungsbedarf: Potenziale in der Rohstoffvarianz, Optimierung im Bereich Wärmerückgewinnung, Aufbereitungsverluste, Gasreinigung notwendig, Integration in bestehende Standorte können zu Kostensenkungen führen ¹
Kosten und Erlöse	Behandlungskosten /Herstellungskosten pro Menge: 7,7 bis 11,7 Euro/kg ² Investitionskosten pro Anlage: ca. 65 Mio Euro/MW für 25 MW-Anlage (Abschätzung nach ¹¹) Gestehungskosten: ¹⁰ 2,5 Cent/MJ Wärme – Referenz: 2,8 Cent/MJ 6,3 Cent/MJ Strom – Referenz: 2,2 Cent/MJ 2,4 Cent/MJ Kraftstoff – Referenz: 1,7 Cent/MJ
Verwendete Literatur	1 DBFZ (2015): Bioenergie-Technologien. Fokusheft. 2. Auflage 2 dena (2011): Biomethan als Kraftstoff: Quotenübertragung. 3 Kaltschmitt, M. ; Hartmann, H. ; Hofbauer, H. (2016): Energie aus Biomasse 4 Rösch, F. (2011): Optimierung und Bewertung von Anlagen zur Erzeugung von Methan, Strom und Wärme aus biogenen Festbrennstoffen 5 Zeymer et al. 2011 (Technische, ökonomische und ökologische Aspekte der Bereitstellung von Biomethan. BMU-Förderprogramm „Energetische Biomassenutzung“, Kiew ⁸ eigene Bewertung, siehe Kapitel 6 im Gesamtbericht ⁹ FNR (2017): Basisdaten Bioenergie

Bio-SNG 25 MW

	¹⁰ DBFZ (2009): Ökonomische und ökologische Bewertung von Erdgassubstituten aus nachwachsenden Rohstoffen; im Auftrag der FNR; 2009 ¹¹ Billig (2016): Bewertung technischer und wirtschaftlicher Entwicklungspotenziale künftiger und bestehender Biomasse-zu-Methan-Konversionsprozesse. Dissertation. Aus dem Internet: ⁶ UBA: http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id=%7B8BF2AEEC-7AFB-4CBA-83BF-F11DC0129E76%7D ⁷ Gemis 4.95 http://iinas.org/gemis-download-121.html
--	--

B.11 BtL 100 MW_{bioethanol} (T11)

BtL 100 MW_{bioethanol} (T11)

Konversion	Vergasung
Technologie	Gasverarbeitung
Produkt	Bioethanol
Eingesetzter Abfall- und Reststoff (ggf. Beschreibung)	Lignocellulose z.B. Hackschnitzel, Stroh
Beschreibung der Technik	Beschreibung: Zunächst werden die biogenen Ausgangsstoffe zu einem Synthesegas umgewandelt, aus dem sich dann verschiedene Kraftstoffsorten erzeugen lassen (Designerkraftstoffe). Diese sind zu 100% und ohne Umstellung in herkömmlichen Motoren einsetzbar, z.B. durch Fischer-Tropsch-Synthese (FT-Synthese) von Synthesegas aus der Holzvergasung: Die BTL-Produktion umfasst grundsätzlich die Schritte Aufbereitung der Biomasse, Synthesegaserzeugung, Gasreinigung und –konditionierung. ² Prozesskette: Biomassevergasung, Synthesegaserzeugung, Reinigung und Konditionierung des Synthesegases (FT-Synthese), Produktaufbereitung, Kraftstoff ² Leistungsspektrum: bis 200 MW_{btl} ²
Chemisch / Physikalische Eingangsparmeter	Geeignet für Wassergehalt von bis: 10% bis 40 % (darf 50% nicht überschreiten) ² geeignet für Heizwert/Brennwert von bis: Hackschnitzel: 18,5 GJ/t _{atro} Stroh: 14,4 GJ/t FM
Struktur des Inputmaterials ohne aufwändige Vorbehandlung	geeignet für Korngröße von bis: 15-20 mm ³ geeignet für Inputmatrix bezüglich holzig/krautig/in Lösung: Holz

BtL 100 MW_{bioethanol} (T11)	
	Risiko für Störstoffe (z.B. Quecksilber): Keine
Inputcharakteristik	Flexibilität bei zeitlich unterschiedlichem Anfall (Batchbetrieb, kontinuierlich): kontinuierlich Flexibilität bei Mengenunterschieden im Input von bis (typische Anlagengrößen): es können Rohstoffe mit wenig Konkurrenzen eingesetzt werden, flexibel
Outputcharakteristik	Anwendungsbereich des erzeugten Energieprodukts (Strom, Wärme, Energieträger): Kraftstoff zeitliche und räumliche Flexibilität bei der Abnahme des Energieprodukts: Flexibel
Technologiecharakteristik	Energieaufwand bei Behandlung von Eingangsstoffen ohne größere Vorbehandlung: Bewertung Gesamtwirkungsgrad bis Energieprodukt: mittlerer Erfüllungsgrad ¹¹ typische Größenordnung der Emission von Treibhausgasen bei der Behandlung: 4 g CO₂-Äq/MJ Kraftstoff (ifeu Daten, Differenzierung nach unterschiedlichen Einsatzstoffen aufgrund Datenlage nicht möglich), Referenzwert: 94 g CO₂-Äq/MJ Kraftstoff Komplexität der Technologie (einfach, komplex): komplex durch hohen verfahrenstechnischen Aufwand Entwicklungsstand (Stand der Technik, Pilotanlage): Demonstrations- und Pilotanlagen, wirtschaftliche noch nicht herstellbar ² Entwicklungsbedarf: Ausbeutesteigerung des Fischer-Tropsch-Prozesses, Diversifizierung des Biomasseinputs ²
Kosten und Erlöse	Behandlungskosten pro Menge: 24€/GJ entspricht ca. 56 ct/l ⁴ Investitionskosten pro Anlage: 4.000 Euro/kW_{output} ² Gestehungskosten: ¹² 2,6 Cent/MJ Kraftstoff – Referenz: 1,7 Cent/MJ
Verwendete Literatur	¹ Brysch, S. (2008): Biogene Kraftstoffe in Deutschland ² DBFZ (2015): Bioenergie-Technologien. Fokusheft. 2. Auflage ³ Kaltschmitt, M. ; Hartmann, H. ; Hofbauer, H. (2016): Energie aus Biomasse ⁴ FNR (2009): Biokraftstoffe – eine vergleichende Analyse. ⁸ Trippe 2013: Techno-ökonomische Bewertung alternativer Verfahrenskonfigurationen zur Herstellung von Biomass-to-Liquid (BtL) Kraftstoffen und Chemikalien ⁹ Müller-Langer 2011: Analyse und Bewertung ausgewählter zukünftiger Biokraftstoffoptionen auf der Basis fester Biomasse ¹¹ eigene Bewertung, siehe Kapitel 6 im Gesamtbericht

BtL 100 MW_{bioethanol} (T11)

¹² DBFZ (2009): Ökonomische und ökologische Bewertung von Erdgassubstituten aus nachwachsenden Rohstoffen; im Auftrag der FNR; 2009

Aus dem Internet:

⁵ FNR: <https://biokraftstoffe.fnr.de/kraftstoffe/btl-biomass-to-liquid/herstellung/>

⁶ UBA: <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id=%7B66DAC27A-9995-4894-A1FD-F8C9232DCDD1%7D>

⁷ KIT: http://ludwigsburg.landwirtschaftsverwaltung-bw.de/ph/site/pbs-bw-new/get/documents/MLR.LEL/PB5Documents/lel_themenpakete/pdf/l/LRALB_DrDahmenPflbautag2008.pdf

⁸ Boles (2011): Lignocellulose Ethanol - der Kraftstoff der nahen Zukunft. <http://www.pentalco.de/6.html>

¹⁰ Gemis 4.95 <http://iinas.org/gemis-download-121.html>

B.12 Biogasanlage 75 kW_{el} (T12)

Biogasanlage 75 kW_{el} (T12)

Konversion	Vergärung
Technologie	Biogasherstellung
Produkt	Strom, Wärme
Eingesetzter Abfall- und Reststoff (ggf. Beschreibung)	Gülle, andere landwirtschaftliche Rest- und Abfallstoffe
Beschreibung der Technik	Beschreibung: anaerobe Vergärung organischer Substrate mit anschließender Reinigung und Verbrennung im Blockheizkraftwerk (BHKW) (Nassfermentation), Unterscheidung nach Prozesstemperatur im Fermenter welches Verfahren angewendet wird, z.B. thermophil = 50°C - 60°C, mesophil = 30 bis 35°C und psychrophil = bis 20°C ^{1 und 8} Prozesskette: Substratbereitstellung, anaerobe mikrobielle Vergärung zu Biogas und Gärrest, Entschwefelung, Trocknung, Verbrennung im Gasmotor oder Zündstrahler, Gärrestrückführung als Dünger ¹ Leistungsspektrum 75-150 kW_{el}
Chemisch / Physikalische Eingangsparameter	Geeignet für Wassergehalt von bis: 88% - 97% ⁶ geeignet für Heizwert/Brennwert/Gasertrag von bis: Gülle 11 – 17 Nm³ Methan/m³ FM Ernterückstände 55-85 Nm³ Methan/m³ FM (Rübenblatt, Kartoffelkraut) geeignet für Gasbildungspotenzial bei C/N Verhältnis von bis:

Biogasanlage 75 kW _{el} (T12)	
	5-8 (5,5)
Struktur des Inputmaterials ohne aufwändige Vorbehandlung	geeignet für Korngröße von bis: Fein geeignet für Inputmatrix bezüglich holzig/krautig/in Lösung: in Lösung Risiko für Störstoffe (z.B. Quecksilber): Bei kleinen Anlagen ggf. schwierigere Kontrolle von Geruch und anderen Emissionen, Problematik der Stickstoffkonzentration bei Nutzung der Gärreste, ist aber bei kleinen Anlagen kein großes Problem
Inputcharakteristik	Flexibilität bei zeitlich unterschiedlichem Anfall (Batchbetrieb, kontinuierlich): kontinuierliche Substratzufuhr bei Nassvergärung (Durchlaufzufuhr) Flexibilität bei Mengenunterschieden im Input von bis (typische Anlagengrößen): flexibel beim Einsatz von verschiedenen Substraten, flexibel in der Anwendung ⁸
Outputcharakteristik	Anwendungsbereich des erzeugten Energieprodukts (Strom, Wärme, Energieträger): Strom, Wärme zeitliche und räumliche Flexibilität bei der Abnahme des Energieprodukts: flexibel sowohl bei der Gas- als auch Strom- und Wärmebereitstellung, an den jeweiligen Bedarf gut anpassbar
Technologiecharakteristik	Energieaufwand bei Behandlung von Eingangsstoffen ohne größere Vorbehandlung: keine Vorbehandlung notwendig, außer der Ertrag soll erhöht werden, dann Dünngülle und Feststoffe separieren Bewertung Gesamtwirkungsgrad bis Energieprodukt: geringer Erfüllungsgrad ¹³ typische Größenordnung der Emission von Treibhausgasen bei der Behandlung: 36,7 g CO₂Äq/MJ Strom (ifeu Daten) , Referenzwert: 183 g CO₂Äq/MJ Strom Komplexität der Technologie (einfach, komplex): einfach, robust und sichere Betreibbarkeit, geringer Betriebsaufwand bei Wartung und Reparatur ¹⁰ Entwicklungsstand (Stand der Technik, Pilotanlage): ausgereifte Technologie Entwicklungsbedarf: Baukastensystem für die Technologie würde Kostensenkungspotenzial beinhalten, Entwicklung von Brennstoffzellen zur weiteren Effizienzsteigerung wichtig, sonst keine technologischen Weiterentwicklungen zu erwarten ¹
Kosten und Erlöse	Behandlungskosten pro Menge: Es fallen keine Behandlungskosten beim Einsatz von Gülle an (Energieversorgung aus Eigenbedarf) Investitionskosten pro Anlage: 9.000 Euro/kW_{el} ³

Biogasanlage 75 kW_{el} (T12)

	Gestehungskosten: 8,3 Cent/MJ Strom – Referenz: 2,2 Cent/MJ ⁴
Verwendete Literatur	¹ DBFZ (2015): Bioenergie-Technologien. Fokusheft. 2. Auflage ² FNR (2013): Leitfaden Biogas ³ FNR (2015): Gülle-Kleinanlagen ⁴ FNR; KTBL (2015): Faustzahlen Biogas, 3. Ausgabe ⁵ FNR (2017): Basisdaten Bioenergie ⁶ Hölzl, F. X. (2015): Mist ist nicht gleich Mist ⁷ Kaltschmitt, M. ; Hartmann, H. ; Hofbauer, H. (2016): Energie aus Biomasse ⁸ Hirzel, Simon (Hrsg.) (2017) Energiekompendium. Fraunhofer Verlag ¹³ eigene Bewertung, siehe Kapitel 6 im Gesamtbericht Aus dem Internet: ¹⁰ FNR: https://basisdaten.fnr.de/bioenergie/biogas/ ¹¹ Fraunhofer: https://www.energetische-biomassenutzung.de/fileadmin/Steckbriefe/dokumente/03KB050A_Endbericht_Ligno_Biogas.pdf ¹² Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen: https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/duengung/guelle/duenger/guelleinhaltsstoffe.htm

B.13 Bioabfallvergärung 500 kW_{el} Nassvergärung (T13)

Bioabfallvergärung 500 kW_{el} - Nassvergärung (T13)

Konversion	Vergärung
Technologie	Bioabfallvergärung
Produkt	Strom, Wärme
Eingesetzter Abfall- und Reststoff (ggf. Beschreibung)	Bioabfälle aus Haushalten und Industrie und landwirtschaftliche biogene Rest- und Abfallstoffe, Gülle,
Beschreibung der Technik	Beschreibung: Umwandlung von Bioabfällen mit Hilfe von Mikroorganismen unter anaeroben Bedingungen zu Biogas und einem Gärrest (flüssig und/oder fest). Anlagen werden üblicherweise meso- (30°C - 35°C) oder thermophil (50°C - 60°C) betrieben. Psychrophile Anlagen (< 20°C) existieren ebenfalls. Energetische Nutzung des Biogases erfolgt meist durch Verbrennung und Verstromung in nachgeschaltetem Blockheizkraftwerk. Die Überschusswärme wird zur Beheizung der Fermenter (Gärreaktor) eingesetzt. ⁷ Prozesskette: Substratbereitstellung, Anaerobisierung, Hydrolyse, Hygienisierung, Vergärung im Fermenter, Gasreinigung mit Entschwefelung und Trocknung, Verbrennung, bodenbezogene Verwertung der Gärreste ¹⁷ Leistungsspektrum:

Bioabfallvergärung 500 kW_{el} - Nassvergärung (T13)

	500–1.000 kW _{el} ; 8
Chemisch / Physikalische Eingangsparameter	Geeignet für Wassergehalt von bis: Nassvergärung: Bioabfälle mit Wassergehalt > 90 % -95% 5 geeignet für Heizwert/Brennwert/Gasertrag von bis: Siedlungsmischabfall 80-110 Nm³ Methan/m³ FM Ernterückstände 55-85 Nm³ Methan/m³ FM (Rübenblatt, Kartoffelkraut) Biogut: 3,1² – 5,0 GJ/t; über den Gaspfad: Gasertrag: 70 – 170 Nm³/Mg FM (tendenziell eher 80 – 120 Nm³/Mg FM), H_u Biogas: 5,0 – 7,5 kWh/Nm³ (14, 15, 16) Küchen- und Kantinenabfälle oder Speiseabfälle: 70 – 170 Nm³/t FM; 450 – 900 Nm³/t oTS; abh. vom Fettgehalt Gülle 11 – 17 Nm³ Methan/m³ FM geeignet für Gasbildungspotenzial bei C/N Verhältnis von bis: 5 Das Gasbildungspotential von Bioabfällen aus der Biotonne in der Nassvergärung liegt bei 90 - 110 m³ Biogas/Mg Abfall.
Struktur des Inputmaterials ohne aufwändige Vorbehandlung	geeignet für Korngröße von bis: feiner, da kleine Partikel aufgrund der größeren Oberfläche leichter abbaubar sind. 9 geeignet für Inputmatrix bezüglich holzig/krautig/in Lösung: Flüssig Risiko für Störstoffe (z.B. Quecksilber): Bioabfälle enthalten Risiken für Störstoffe, wodurch ggf. eine aufwendige mechanische Aufbereitung nötig ist. Insbesondere Ursache ist, dass Biogut mit einem Fremdstoffanteil von 5 % und mehr bei den Verwertungsanlagen angeliefert wird. Dies beinhaltet z.B. Sand, Steine, Glas, Metalle, Plastik. Dabei besteht das Risiko, dass Störstoffe im Gärrest verbleiben. (9) Problematik der Stickstoffkonzentration bei Nutzung der Gärreste, ist bei Großanlagen aufgrund der räumlichen Konzentration eher ein Problem
Inputcharakteristik	Flexibilität bei zeitlich unterschiedlichem Anfall (Batchbetrieb, kontinuierlich): kontinuierlich bei Nassvergärung (Durchlaufzufuhr) Flexibilität bei Mengenunterschieden im Input von bis (typische Anlagengrößen): wenig flexibel
Outputcharakteristik	Anwendungsbereich des erzeugten Energieprodukts (Strom, Wärme, Energieträger): Strom, Wärme zeitliche und räumliche Flexibilität bei der Abnahme des Energieprodukts: flexibel, da Biogas zwischengespeichert werden kann
Technologiecharakteristik	Energieaufwand bei Behandlung von Eingangsstoffen ohne größere Vorbehandlung: Bei der Aufbereitung besteht z.T. ein hoher Aufwand die Störstoffe bis auf die geforderten Qualitäten auszuschleusen, daher ist eine Vorsortierung notwendig. Insbesondere bei Nassvergärungsverfahren ist der Aufbereitungsgrad hoch. 9 Der technische Aufwand (Energie) zur Vorbehandlung ist hoch.

Bioabfallvergärung 500 kW_{el} - Nassvergärung (T13)

	Bewertung Gesamtwirkungsgrad bis Energieprodukt: geringer Erfüllungsgrad ¹³ typische Größenordnung der Emission von Treibhausgasen bei der Behandlung: 33,3 g CO₂-Äq/MJ Strom (ifeu Daten)⁷⁴, Referenzwert: 183 g CO₂-Äq Komplexität der Technologie (einfach, komplex): einfach, robust und sichere Betreibbarkeit, geringer Betriebsaufwand bei Wartung und Reparatur ⁸ Entwicklungsstand (Stand der Technik, Pilotanlage): Ausgereifte, permanent weiterentwickelte, kommerziell breit verfügbare Technologie ¹⁵ Entwicklungsbedarf: Zukünftig haben für die Entwicklung der Bioabfallvergärung die gesellschaftlichen Entwicklungen (z. B. demographischer Wandel) und die administrativen Auflagen (u.a. verpflichtende Einführung Biotonne) einen großen Einfluss. Ausbaupotenziale sind demnach gegeben, verglichen mit den landwirtschaftlichen Potenzialen aber auf einem geringeren Niveau. ⁸
Kosten und Erlöse	Behandlungskosten pro Menge: Die Kosten liegen abhängig von den Randbedingungen, den Erlösen aus der Energie und der Reststoffbehandlung bei ca. 40 EUR/Mg bis hin zu 200 EUR/ Mg. ⁴ Investitionskosten pro Anlage: Die Investitionskosten liegen in einer relativ breiten Spannweite von 200 EUR/Mg bei einfachen Anlagen bis hin zu ca. 700 EUR/Mg a bei komplexen Abfallvergärungsanlagen bezogen auf den Eintrag. ⁴ Gestehungskosten: ⁹ 4,7 Cent/MJ Strom – Referenz: 2,2 Cent/MJ
Verwendete Literatur	¹ Bilitewski, B.; Härdtle, G. (2013): Abfallwirtschaft, 4. Auflage ² Strobl, M. (2016): Biogas: Aktuelle Vergütungssätze im Überblick, agrarheute.com, https://www.agrarheute.com/energie/biogas-aktuelle-verguetungssaetze-ueberblick-526712 ⁹ FNR; KTBL (2015): Faustzahlen Biogas, 3. Ausgabe ³ Destatis 2015: Abfallbilanz ⁴ Cord-Landwehr, K.; Kranert, M. (2010): Einführung in die Abfallwirtschaft, Vieweg+Teubner, 2010 ⁵ FNR (2010): Biogas Basisdaten Deutschland ⁶ Kern, M.; Raussen, T. (2014): Biogas-Atlas 2014/15 ⁷ LUBW (2011): Vergärung von Bio- und Grünabfällen ⁸ Ponitka, Jens et al. (2016): Bioenergie-Technologien ⁹ Raussen, T. et al. (2016): Optionen zur Reduktion von Fremdstoffen bei Biogutvergärungen ¹⁰ Scherer, P.A.: Grundlagen und Besonderheiten der anaeroben Prozessführung. Thomé Kozmiensky, K.J. (Hrsg.): Biogas – Anaerobtechnik in der Abfallwirtschaft. Berlin: EF-Verlag 1989, S. 85 ff. ¹³ eigene Bewertung, siehe Kapitel 6 im Gesamtbericht ¹⁴ Kern et al (2010): Aufwand und Nutzen einer optimierten Bioabfallverwertung hinsichtlich Energie-effizienz, Klima- und Ressourcenschutz, UBA – FKZ 3707 33 304 ¹⁵ ICU (2008): Szenarien zur Optimierung der Bioabfallsammlung in Berlin. Aktualisierung/Ergänzung der Studie 2004. In Zusammenarbeit mit IGW Witzenhausen und IFEU Heidelberg ¹⁶ Bode et al. (2008) :Biomasse aus Bioabfall: Eine Alternative zur Vergärung; in: Müll und Abfall, 09/2008 ¹⁷ Kaltschmitt, M. ; Hartmann, H. ; Hofbauer, H. (2016): Energie aus Biomasse

⁷⁴ Ein THG-Bonus für die Vergärung von Gülle anstelle deren direkten Aufbringung, ist bei dieser Berechnung nicht einbezogen. Eine höhere Punktzahl als 3 ist im Übrigen nicht erreichbar.

Bioabfallvergärung 500 kW_{el} - Nassvergärung (T13)

Aus dem Internet:

¹¹ agrarheute.com: <https://www.agrarheute.com/energie/biogas-aktuelle-verguetungssaetze-ueberblick-526712>

¹² Gemis 4.95 <http://iinas.org/gemis-download-121.html>

B.14 Bioabfallvergärung 800 kW_{el} – Trockenvergärung (T14)

Bioabfallvergärung 800 kW_{el} - Trockenvergärung (T14)

Konversion	Vergärung
Technologie	Bioabfallvergärung
Produkt	Strom, Wärme
Eingesetzter Abfall- und Reststoff (ggf. Beschreibung)	andere landwirtschaftliche Rest- und Abfallstoffen, Bioabfälle aus Haushalten und Industrie
Beschreibung der Technik	Beschreibung: Umwandlung von Bioabfällen mit Hilfe von Mikroorganismen unter anaeroben Bedingungen zu Biogas und einem Gärrest (flüssig und/oder fest). Anlagen werden üblicherweise meso- (30°C - 35°C) oder thermophil (50°C – 60°C) betrieben. Psychrophile Anlagen (< 20°C) existieren ebenfalls. Energetische Nutzung des Biogases erfolgt meist durch Verbrennung und Verstromung in nachgeschaltetem Blockheizkraftwerk. Die Überschusswärme wird zur Beheizung der Fermenter (Gärreaktor) eingesetzt. ¹ Prozesskette: Substratbereitstellung, Anaerobisierung, Hydrolyse, Hygienisierung, Vergärung im Fermenter, Gasreinigung mit Entschwefelung und Trocknung, Verbrennung, bodenbezogene Verwertung der Gärreste ¹⁷ Leistungsspektrum: 500–1.000 kW_{el} ³
Chemisch / Physikalische Eingangsparameter	Geeignet für Wassergehalt von bis: Biogut 60% Grüngut 50%, dabei holzartiger Anteil 45% und krautartiger Anteil 75% ⁴ geeignet für Heizwert/Brennwert/Gasertrag von bis: Siedlungsmischabfall 80-110 Nm³ Methan/m³ FM Ernterückstände 55-85 Nm³ Methan/m³ FM (Rübenblatt, Kartoffelkraut) Grüngut: H_u holzartig: ca. 10 MJ/kg FM (2,2 – 12,8 MJ/kg²); Gasertrag krautiger Anteil: 60 – 120 Nm³/Mg FM (ca. 55 % CH₄) ⁽¹⁴⁾ Biogut: 3,1² – 5,0; über den Gaspfad: Gasertrag: 70 – 170 Nm³/Mg FM (tendenziell eher 80 – 120 Nm³/Mg FM), H_u Biogas: 5,0 – 7,5 kWh/Nm³

Bioabfallvergärung 800 kW _{el} - Trockenvergärung (T14)	
	geeignet für Gasbildungspotenzial bei C/N Verhältnis von bis: Grüngut holzartig 6,1 ₂ Biogut 5 ₂ Ernterückstände: 6,9
Struktur des Inputmaterials ohne aufwändige Vorbehandlung	geeignet für Korngröße von bis: 2 Biogut Feinfraktion < 40 mm, Grobfraktion > 40 mm Grüngut 50-60 mm geeignet für Inputmatrix bezüglich holzig/krautig/in Lösung: holzlig, krautig Risiko für Störstoffe (z.B. Quecksilber): Bioabfälle enthalten Risiken für Störstoffe, wodurch ggf. eine aufwendige mechanische Aufbereitung nötig ist. Insbesondere Ursache ist, dass Biogut mit einem Fremdstoffanteil von 5 % und mehr bei den Verwertungsanlagen angeliefert wird. Dies beinhaltet z.B. Sand, Steine, Glas, Metalle, Plastik. Dabei besteht das Risiko, dass Störstoffe im Gärrest verbleiben. ⁽¹⁸⁾ Problematik der Stickstoffkonzentration bei Nutzung der Gärreste, ist bei Großanlagen aufgrund der räumlichen Konzentration eher ein Problem
Inputcharakteristik	Flexibilität bei zeitlich unterschiedlichem Anfall (Batchbetrieb, kontinuierlich): Batchbetrieb Flexibilität bei Mengenunterschieden im Input von bis (typische Anlagengrößen): wenig flexibel
Outputcharakteristik	Anwendungsbereich des erzeugten Energieprodukts (Strom, Wärme, Energieträger): Strom, Wärme zeitliche und räumliche Flexibilität bei der Abnahme des Energieprodukts: flexibel, da Biogas zwischengespeichert werden kann
Technologiecharakteristik	Energieaufwand bei Behandlung von Eingangsstoffen ohne größere Vorbehandlung: Nicht zwingend vorherige Aufbereitung notwendig Bewertung Gesamtwirkungsgrad bis Energieprodukt: geringer Erfüllungsgrad ¹¹ typische Größenordnung der Emission von Treibhausgasen bei der Behandlung: 36,1 g CO₂Äq/MJ Strom (ifeu Daten), Referenzwert: 183 g CO₂Äq/MJ Strom Komplexität der Technologie (einfach, komplex): einfach, robust und sichere Betreibbarkeit, geringer Betriebsaufwand bei Wartung und Reparatur ₃ Entwicklungsstand (Stand der Technik, Pilotanlage): Ausgereifte, permanent weiterentwickelte, kommerziell breit verfügbare Technologie Entwicklungsbedarf:

Bioabfallvergärung 800 kW_{el} - Trockenvergärung (T14)

	Zukünftig haben für die Entwicklung der Bioabfallvergärung die gesellschaftlichen Entwicklungen (z. B. demographischer Wandel) und die administrativen Auflagen (u.a. verpflichtende Einführung Biotonne) einen großen Einfluss. Ausbaupotenziale sind demnach gegeben, verglichen mit den landwirtschaftlichen Potenzialen aber auf einem geringeren Niveau. ³
Kosten und Erlöse	Behandlungskosten pro Menge: ² Grüngut 20-60 €/Mg Biogut 75 €/Mg (Mittelwert) Investitionskosten pro Anlage: Die Investitionskosten liegen in einer relativ breiten Spannweite von 200 EUR/Mg bei einfachen Anlagen bis hin zu ca. 700 EUR/Mg · a bei komplexen Abfallvergärungsanlagen bezogen auf den Eintrag. ¹⁰ Gestehungskosten: 4,1 Cent/MJ Strom – Referenz: 2,2 Cent/MJ ¹³
Verwendete Literatur	¹ LUBW (2011): Vergärung von Bio- und Grünabfällen ² Kern, M.; Raussen, T. (2014): Biogas-Atlas 2014/15 ³ Ponitka, Jens et al. (2016): Bioenergie-Technologien ⁴ Bohland 2012: Quellenauswertung ⁵ Bode et al. in Hoffmann et al. 2011: ⁶ ICU 2008 in UMSICHT et al. 2015 ⁷ Scherer, P. A. (1989): Biogastechnik ⁸ Bilitewski, B.; Härdtle, G. (2013): Abfallwirtschaft, 4. Auflage ¹⁰ Cord-Landwehr, K.; Kranert, M. (2010): Einführung in die Abfallwirtschaft, Vieweg+Teubner, 2010 ¹¹ eigene Bewertung, siehe Kapitel 6 im Gesamtbericht ¹³ FNR; KTBL (2015): Faustzahlen Biogas, 3. Ausgabe ¹⁴ Kern et al (2010): Aufwand und Nutzen einer optimierten Bioabfallverwertung hinsichtlich Energie-effizienz, Klima- und Ressourcenschutz, UBA – FKZ 3707 33 304 ¹⁵ ICU (2008): Szenarien zur Optimierung der Bioabfallsammlung in Berlin. Aktualisierung/Ergänzung der Studie 2004. In Zusammenarbeit mit IGW Witzenhausen und IFEU Heidelberg ¹⁶ Bode et al. (2008) :Biomasse aus Bioabfall: Eine Alternative zur Vergärung; in: Müll und Abfall, 09/2008 ¹⁷ Kaltschmitt, M. ; Hartmann, H. ; Hofbauer, H. (2016): Energie aus Biomasse ¹⁸ Raussen, T. et al. (2016): Optionen zur Reduktion von Fremdstoffen bei Biogutvergärungen Aus dem Internet: ¹² agrarheute.com: https://www.agrarheute.com/energie/biogas-aktuelle-verguetungssaetze-ueberblick-526712 ⁹ Gemis 4.95 http://iinas.org/gemis-download-121.html

B.15 Biomethananlage 2 MW – Nassvergärung (T15)

Biomethananlage 2 MW- Nassvergärung (T15)

Konversion	Vergärung
Technologie	Biomethanherstellung
Produkt	Biomethan zur Anwendung als Strom, Wärme, Kraftstoff

Biomethananlage 2 MW- Nassvergärung (T15)	
Eingesetzter Abfall- und Reststoff (ggf. Beschreibung)	Bioabfälle aus Haushalten und Industrie und landwirtschaftliche biogene Rest- und Abfallstoffe, Gülle
Beschreibung der Technik	Beschreibung: Umwandlung von Gülle, anderen landwirtschaftlichen Rest- und Abfallstoffen sowie Bioabfällen aus Haushalten und Industrie mit Hilfe von Mikroorganismen unter anaeroben Bedingungen zu Biogas und einem Gärrest (flüssig und/oder fest). Anlagen werden üblicherweise meso- (30°C - 35°C) oder thermophil (50°C - 60°C) betrieben. Psychrophile Anlagen (<20°C) existieren ebenfalls. Das Biogas wird aus dem Fermenter abgeführt, gereinigt (Entfernung von Partikeln/Staub), getrocknet und entschwefelt. ¹ Bei der Aufbereitung von Biogas zu Biomethan wird der Methangehalt von 50-55% auf bis zu 98% erhöht. Die Höhe des Methangehaltes ist von der Methankonzentration im Gasnetz abhängig, in das eingespeist werden soll. Für die Aufbereitung gibt es verschiedene Verfahren: Druckwechseladsorption (Pressure Swing Adsorption), Druckwasserwäsche, Physikalische Absorption mit organischen Lösungsmitteln, Chemische Absorption mit organischen Lösungsmitteln und ein Membranverfahren. Kryogene Verfahren sind großtechnisch noch nicht implementiert: ¹² Biomethan kann energetisch zur gekoppelten Erzeugung von Strom und Wärme (Kraft-Wärme-Kopplung in Blockheizkraftwerken), als Kraftstoff in Erdgasfahrzeugen und als Erdgas-substitut in Erdgas-Brennern zur Wärmeerzeugung eingesetzt werden. ¹² Prozesskette: Substrataufbereitung, anaerobe mikrobielle Vergärung zu Biogas und Gärrest, (Fein-) Entschwefelung, Trocknung, Gastrennung, Konditionierung, Verdichtung, Einspeisung; häufigste Aufbereitungsverfahren in Deutschland sind Aminwäsche, Druckwasserwäsche (DWW) sowie Druckwechseladsorption (PSA) ³ Leistungsspektrum: ca. 1–10 MW Äquivalenzleistung ³
Chemisch / Physikalische Eingangparameter	Geeignet für Wassergehalt von bis: 88% - 97% ⁴ geeignet für Heizwert/Brennwert/Gasertrag von bis: Bioabfall (Siedlungsmischabfall) 80-110 Nm³ Methan/m³ FM Ernterückstände 55-85 Nm³ Methan/m³ FM (Rübenblatt, Kartoffelkraut) Biogut: 3,1² – 5,0; über den Gaspfad: Gasertrag: 70 – 170 Nm³/Mg FM (tendenziell eher 80 – 120 Nm³/Mg FM), H_u Biogas: 5,0 – 7,5 kWh/Nm³ (^{14, 15, 16}) Küchen- und Kantinenabfälle oder Speiseabfälle: 70 – 170 Nm³/t FM; 450 – 900 Nm³/t oTS; abh. vom Fettgehalt Gülle 11 – 17 Nm³ Methan/m³ FM geeignet für Gasbildungspotenzial bei C/N Verhältnis von bis: 5-8 geeignet für Korngröße von bis:

Biomethananlage 2 MW- Nassvergärung (T15)

Struktur des Inputmaterials ohne aufwändige Vorbehandlung	Fein geeignet für Inputmatrix bezüglich holzig/krautig/in Lösung: Flüssig Risiko für Störstoffe (z.B. Quecksilber): Im Detail können durch die Bereitstellung der verschiedenen Reststoffarten (Gülle, Landschaftspflegematerial, Stroh, Biogut) auch verschiedene Umweltwirkungen im Kontext der Bereitstellung der Stoffe verbunden sein. Eine Differenzierung hier würde jedoch das Maß an Detailgenauigkeit dieser Bewertung übersteigen. Sie werden daher einheitlich bewertet auf der Basis der potenziellen Auswirkungen durch Behandlung und Nutzung. Bei größeren Anlagen keine schwierigere Kontrolle von Geruch und anderen Emissionen, dafür große Transportstrecken, v.a. für Gülle (großes Volumen, geringer vergärbare Gehalt Nutzung der Gärreste (Problematik der Stickstoffkonzentration), ist bei Großanlagen aufgrund der räumlichen Konzentration eher ein Problem. Eine Option wäre die Aufbereitung der Gärreste zu Düngern, die damit transportfähig sind.
Inputcharakteristik	Flexibilität bei zeitlich unterschiedlichem Anfall (Batchbetrieb, kontinuierlich): kontinuierlich Flexibilität bei Mengenunterschieden im Input von bis (typische Anlagengrößen): flexibel beim Einsatz von verschiedenen Substraten, flexibel in der Anwendung, z.B. für Nahwärmenetze od. Prozesswärme in Industrieanwendungen, kann auch verflüssigt als Kraftstoff eingesetzt werden ⁸
Outputcharakteristik	Anwendungsbereich des erzeugten Energieprodukts (Strom, Wärme, Energieträger): Strom und Wärme Bewertung Gesamtwirkungsgrad bis Energieprodukt: geringer Erfüllungsgrad ¹⁰ zeitliche und räumliche Flexibilität bei der Abnahme des Energieprodukts: flexibel sowohl bei der Gas- als auch Strom- und Wärmebereitstellung, an den jeweiligen Bedarf gut anpassbar ⁶
Technologiecharakteristik	Energieaufwand bei Behandlung von Eingangsstoffen ohne größere Vorbehandlung: keine Vorbehandlung notwendig, außer der Ertrag soll erhöht werden, dann Dünngülle und Feststoffe separieren typische Größenordnung der Emission von Treibhausgasen bei der Behandlung: 0,06 CO₂äq./kWh_{el} oder - 0,04 kg CO₂-äq./kWh_{el} ⁹ Komplexität der Technologie (einfach, komplex): Biogasanlage: einfach, robust und sichere Betreibbarkeit, geringer Betriebsaufwand bei Wartung und Reparatur, Aufbereitungsanlage: komplexer und wartungsaufwändiger ³ Entwicklungsstand (Stand der Technik, Pilotanlage): Erprobte Technologie und seit einigen Jahren kommerziell verfügbar Entwicklungsbedarf:

Biomethananlage 2 MW- Nassvergärung (T15)

	Weitere Effizienzsteigerungen im Bereich der biochemischen Konversion und insbesondere der Verstromung (Brennstoffzelle) sind zu erwarten. Die Produktion des Energieträgers Biomethan bietet ein hohes Maß an Flexibilität sowohl der Rohstoffbasis als auch der Nutzungsoptionen. Biomethan bietet die Möglichkeit eines sehr flexiblen Einsatzes. Im KWK-Bereich sind je nach Anlagenkonzept gezielt die Wärmesenken zu erschließen und die Möglichkeiten eines netzdienlichen Betriebes zu nutzen. Die Wirtschaftlichkeit von Biomethan hängt mittelfristig von stabilen Rahmenbedingungen für Produktion von Biomethan im Zusammenhang mit den Absatzmöglichkeiten (KWK-Markt, Wärme- und Kraftstoffmarkt) ab. ³
Kosten und Erlöse	Behandlungskosten pro Menge: Die Betriebskosten liegen abhängig von den Randbedingungen, den Erlösen aus der Energie und der Reststoffbehandlung bei ca. 40 EUR/Mg bis hin zu 200 EUR/Mg. ^{3, 7} Investitionskosten pro Anlage: Die Investitionskosten für den Biogasanlagenteil liegen in einer relativ breiten Spannweite von 200 EUR/Mg bei einfachen Anlagen bis hin zu ca. 700 EUR/Mg bei komplexen Abfallvergäranlagen bezogen auf den Eintrag. Die Investitionskosten für die gesamte Anlage liegen zw. 4 und 10 Mio Euro. ^{4 und 13} Gestehungskosten: ¹¹ 2,5 Cent/MJ Wärme – Referenz: 2,8 Cent/MJ 6,25 Cent/MJ Strom – Referenz: 2,2 Cent/MJ 3,0 Cent/MJ Kraftstoff – Referenz: 1,7Cent/MJ
Verwendete Literatur	¹ LUBW (2011): Vergärung von Bio- und Grünabfällen ² Kern, M.; Raussen, T. (2014): Biogas-Atlas 2014/15: Anlagenhandbuch Der Vergärung Biogener Abfälle in Deutschland Und Europa', Witzenhausen-Institut ³ Ponitka, Jens et al. (2016): Bioenergie-Technologien ⁴ Hölzl, F. X. (2015): Mist ist nicht gleich Mist ⁶ Kaltschmitt, M. ; Hartmann, H. ; Hofbauer, H. (2016): Energie aus Biomasse ⁷ Cord-Landwehr, K.; Kranert, M. (2010): Einführung in die Abfallwirtschaft, Vieweg+Teubner, 2010 ¹⁰ eigene Bewertung, siehe Kapitel 6 im Gesamtbericht ¹¹ FNR; KTBL (2015): Faustzahlen Biogas, 3. Ausgabe ¹²: FNR (2012): Biomethan. ¹³ Scholwin et al. (2014): Ist-Stand der Biomethannutzung. Kosten, Klimawirkung, Verwertungswege. KWK aus Biogas, Biomethan und Erdgas im Vergleich. Aus dem Internet: ⁵ https://www.energetische-biomassenutzung.de/fileadmin/Steckbriefe/dokumente/03KB050A_Endbericht_Ligno_Biogas.pdf ⁸ http://www.biogaspartner.de/fileadmin/biogas/KWK/Leitfaden_Biomethan_BHKW.pdf ⁹ Gemis 4.95 http://iinas.org/gemis-download-121.html

B.16 Biomethananlage 2 MW – Trockenvergärung (T16)

Biomethananlage 2 MW - Trockenvergärung (T16)

Konversion	Vergärung
Technologie	Biomethanherstellung

Biomethananlage 2 MW - Trockenvergärung (T16)

Produkt	Biomethan zur Anwendung als Strom, Wärme, Kraftstoff
Eingesetzter Abfall- und Reststoff (ggf. Beschreibung)	andere landwirtschaftliche Rest- und Abfallstoffen, Bioabfälle aus Haushalten und Industrie
Beschreibung der Technik	Beschreibung: Umwandlung von anderen landwirtschaftlichen Rest- und Abfallstoffen sowie Bioabfällen aus Haushalten und Industrie mit Hilfe von Mikroorganismen unter anaeroben Bedingungen zu Biogas und einem Gärrest (flüssig und/oder fest). Anlagen werden üblicherweise meso- (30°C - 35°C) oder thermophil (50°C - 60°C) betrieben. Psychrophile Anlagen (<20°C) existieren ebenfalls. Das Biogas wird aus dem Fermenter abgeführt, gereinigt (Entfernung von Partikeln/Staub), getrocknet und entschwefelt. Die abschließende energetische Nutzung des Biogases erfolgt meist durch Verbrennung und Verstromung in nachgeschaltetem Blockheizkraftwerk. Die Überschusswärme kann im Gegensatz zur direkten Verbrennung in Nähe zur Biogasanlage für den Standort verwendet werden beispielsweise zur Beheizung von Gebäuden in denen auch der Strom verwendet wird. ¹ Prozesskette: Substrataufbereitung, anaerobe mikrobielle Vergärung zu Biogas und Gärrest, (Fein-) Entschwefelung, Trocknung, Gastrennung, Konditionierung, Verdichtung, Einspeisung; häufigste Aufbereitungsverfahren in Deutschland sind Aminwäsche, Druckwasserwäsche (DWW) sowie Druckwechseladsorption (PSA) ³ Leistungsspektrum: Ca. 1–10 MW (Äquivalenzleistung) ³
Chemisch / Physikalische Eingangsparameter	Geeignet für Wassergehalt von bis: Trockenvergärung: Bioabfälle mit Wassergehalten < 85 % ⁴ geeignet für Heizwert/Brennwert/Gasertrag von bis: Bioabfall (Siedlungsmischabfall) 80-110 Nm³ Methan/m³ FM Ernterückstände 55-85 Nm³ Methan/m³ FM (Rübenblatt, Kartoffelkraut) Grüngut: H_u holzartig: ca. 10 MJ/kg FM (2,2 – 12,8 MJ/kg²); Gasertrag krautiger Anteil: 60 – 120 Nm³/Mg FM (ca. 55 % CH₄) ⁽¹⁴⁾ Biogut: 3,1² – 5,0; über den Gaspfad: Gasertrag: 70 – 170 Nm³/Mg FM (tendenziell eher 80 – 120 Nm³/Mg FM), H_u Biogas: 5,0 – 7,5 kWh/Nm³ ^(14, 15, 16) geeignet für Gasbildungspotenzial bei C/N Verhältnis von bis: Grüngut holzartig 6,1 ² Biogut 5 ² Ernterückstände: 6,9
Struktur des Inputmaterials ohne aufwändige Vorbehandlung	geeignet für Korngröße von bis: Fein geeignet für Inputmatrix bezüglich holzig/krautig/in Lösung: Flüssig

Biomethananlage 2 MW - Trockenvergärung (T16)

	Risiko für Störstoffe (z.B. Quecksilber): Im Detail können durch die Bereitstellung der verschiedenen Reststoffarten (Gülle, Landschaftspflegematerial, Stroh, Biogut) auch verschiedene Umweltwirkungen im Kontext der Bereitstellung der Stoffe verbunden sein. Eine Differenzierung hier würde jedoch das Maß an Detailgenauigkeit dieser Bewertung übersteigen. Sie werden daher einheitlich bewertet auf der Basis der potenziellen Auswirkungen durch Behandlung und Nutzung. Bei größeren Anlagen keine schwierigere Kontrolle von Geruch und anderen Emissionen, dafür große Transportstrecken, v.a. für Gülle. Nutzung der Gärreste (Problematik der Stickstoffkonzentration), ist bei Großanlagen aufgrund der räumlichen Konzentration eher ein Problem.
Inputcharakteristik	Flexibilität bei zeitlich unterschiedlichem Anfall (Batchbetrieb, kontinuierlich): Batchbetrieb Flexibilität bei Mengenunterschieden im Input von bis (typische Anlagengrößen): flexibel beim Einsatz von verschiedenen Substraten, flexibel in der Anwendung, z.B. für Nahwärmenetze od. Prozesswärme in Industrieanwendungen, kann auch verflüssigt als Kraftstoff eingesetzt werden
Outputcharakteristik	Anwendungsbereich des erzeugten Energieprodukts (Strom, Wärme, Energieträger): Strom, Wärme, Kraftstoff zeitliche und räumliche Flexibilität bei der Abnahme des Energieprodukts: hohe Flexibilität, Biogas und Biomethan können zwischengespeichert werden
Technologiecharakteristik	Energieaufwand bei Behandlung von Eingangsstoffen ohne größere Vorbehandlung: keine Vorbehandlung notwendig, außer der Ertrag soll erhöht werden, dann Dünngülle und Feststoffe separieren Bewertung Gesamtwirkungsgrad bis Energieprodukt: mittlerer Erfüllungsgrad ⁸ typische Größenordnung der Emission von Treibhausgasen bei der Behandlung: Gülle: 29,7 g CO₂-Äq/MJ Wärme (BioGrace-II ¹¹, ifeu Daten), Referenzwert: 80 g CO₂-Äq/MJ Wärme; 66,8 g CO₂-Äq/MJ Strom (BioGrace-II ¹¹, ifeu Daten), Referenzwert: 183 g CO₂-Äq/MJ Strom, 26,7 g CO₂-Äq/MJ Energieträger (BioGrace-II ¹¹, ifeu Daten), Referenzwert: 94 g CO₂-Äq/MJ Kraftstoff Biogut: 29,7 g CO₂-Äq/MJ Wärme (BioGrace-II ¹¹, ifeu Daten), Referenzwert: 80 g CO₂-Äq/MJ Wärme, 66,8 g CO₂-Äq/MJ Strom (BioGrace-II ¹¹, ifeu Daten), Referenzwert: 183 g CO₂-Äq/MJ Strom, 26,7 g CO₂-Äq/MJ Energieträger (BioGrace-II ¹¹, ifeu Daten), Referenzwert: 94 g CO₂-Äq/MJ Kraftstoff Komplexität der Technologie (einfach, komplex): Biogasanlage: einfach, robust und sichere Betreibbarkeit, geringer Betriebsaufwand bei Wartung und Reparatur, Aufbereitungsanlage: komplexer und wartungsaufwändiger ³ Entwicklungsstand (Stand der Technik, Pilotanlage): Erprobte Technologie und seit einigen Jahren kommerziell verfügbar ³ Entwicklungsbedarf:

Biomethananlage 2 MW - Trockenvergärung (T16)

	Weitere Effizienzsteigerungen im Bereich der biochemischen Konversion und insbesondere der Verstromung (Brennstoffzelle) sind zu erwarten. Die Produktion des Energieträgers Biomethan bietet ein hohes Maß an Flexibilität sowohl der Rohstoffbasis als auch der Nutzungsoptionen. Biomethan bietet die Möglichkeit eines sehr flexiblen Einsatzes. Im KWK-Bereich sind je nach Anlagenkonzept gezielt die Wärmesenken zu erschließen und die Möglichkeiten eines netzdienlichen Betriebes zu nutzen. Die Wirtschaftlichkeit von Biomethan hängt mittelfristig von stabilen Rahmenbedingungen für Produktion von Biomethan im Zusammenhang mit den Absatzmöglichkeiten (KWK-Markt, Wärme- und Kraftstoffmarkt) ab. ³
Kosten und Erlöse	Behandlungskosten pro Menge: Die Betriebskosten liegen abhängig von den Randbedingungen, den Erlösen aus der Energie und der Reststoffbehandlung bei ca. 40 EUR/Mg bis hin zu 200 EUR/Mg. ^{3,4} Investitionskosten pro Anlage: Die Investitionskosten für den Biogasanlagenteil liegen in einer relativ breiten Spannweite von 200 EUR/Mg bei einfachen Anlagen bis hin zu ca. 700 EUR/Mg bei komplexen Abfallvergärungsanlagen bezogen auf den Eintrag. Die Investitionskosten für die gesamte Anlage liegen zw. 4 und 10 Mio Euro. ^{4 und 13} Gestehungskosten: ⁹ 2,5 Cent/MJ Wärme – Referenz: 2,8 Cent/MJ 5,6 Cent/MJ Strom – Referenz: 2,2 Cent/MJ 2,7 Cent/MJ Kraftstoff – Referenz: 1,7Cent/MJ
Verwendete Literatur	¹ LUBW (2011): Vergärung von Bio- und Grünabfällen ² Kern, M.; Raussen, T. (2014): Biogas-Atlas 2014/15 ³ Ponitka, Jens et al. (2016): Bioenergie-Technologien ⁴ Cord-Landwehr, K.; Kranert, M. (2010): Einführung in die Abfallwirtschaft, Vieweg+Teubner, 2010 ⁸ eigene Bewertung, siehe Kapitel 6 im Gesamtbericht ⁹ FNR; KTBL (2015): Faustzahlen Biogas, 3. Ausgabe Aus dem Internet: ¹⁰ FNR: https://biogas.fnr.de/daten-und-fakten/faustzahlen/ ⁶ http://www.biogaspartner.de/fileadmin/biogas/KWK/Leitfaden_Biomethan_BHKW.pdf ⁵ Gemis 4.95 http://iinas.org/gemis-download-121.html ¹¹ https://www.biograce.net/biograce2/

B.17 Ethanolanlage (Lignozellulose) (T17)

Ethanolanlage	
Konversion	Alkoholische Fermentation (T17)
Technologie	Ethanolherstellung
Produkt	Bioethanol

Ethanolanlage	
Eingesetzter Abfall- und Reststoff (ggf. Beschreibung)	Weizenstroh (Stärke 60%, Protein, 10-12%)
Beschreibung der Technik	Beschreibung: Fermentation von lignozellulosehaltigen Substraten zu Alkohol, Vorbehandlung und Hydrolyse der Zellulose mit Vergärung zu Bioethanol Prozesskette: mechanische und hydrothermale Vorbehandlung zur Aufspaltung der Lignozellulose, enzymatische Hydrolyse der Zellulose zu sechswertigem Zuckern, Vergärung der Hexosen zu Bioethanol, Destillation und Absolutierung ¹ Leistungsspektrum: 1.000 t/a - 60.000 t/a Input ¹
Chemisch / Physikalische Eingangsparameter	Geeignet für Wassergehalt von bis: < 15% ² geeignet für Heizwert/Brennwert von bis: 26,8 MJ/kg ⁶
Struktur des Inputmaterials ohne aufwändige Vorbehandlung	geeignet für Korngröße von bis: 1-12 mm ⁷ geeignet für Inputmatrix bezüglich holzig/krautig/in Lösung: in Lösung Risiko für Störstoffe (z.B. Quecksilber): Stroh kann Steine enthalten, z.T. auch metallische Störstoffe; das Risiko ist eher klein
Inputcharakteristik	Flexibilität bei zeitlich unterschiedlichem Anfall (Batchbetrieb, kontinuierlich): Batchbetrieb Flexibilität bei Mengenunterschieden im Input von bis (typische Anlagengrößen): wenig flexibel
Outputcharakteristik	Anwendungsbereich des erzeugten Energieprodukts (Strom, Wärme, Energieträger): Bioethanol zeitliche und räumliche Flexibilität bei der Abnahme des Energieprodukts: Flexibel
Technologiecharakteristik	Energieaufwand bei Behandlung von Eingangsstoffen ohne größere Vorbehandlung: Energieaufwendig Bewertung Gesamtwirkungsgrad bis Energieprodukt: mittlerer Erfüllungsgrad ¹⁰ typische Größenordnung der Emission von Treibhausgasen bei der Behandlung: 41 g CO₂Äq/MJ Kraftstoff (BioGrace II ¹¹, eigene Berechnung ifeu), Referenzwert: 94 g CO₂Äq/MJ Kraftstoff Komplexität der Technologie (einfach, komplex):

Ethanolanlage	
	aufwändig und bislang selten, dadurch teuer, Lagermöglichkeiten erforderlich Entwicklungsstand (Stand der Technik, Pilotanlage): keine kommerziellen Anlagen in Betrieb, in DE eine Demoanlage und mehrere Pilotanlagen, Funktionsfähigkeit wurde nachgewiesen ⁹ Entwicklungsbedarf: stetige Markteinführung bei entsprechender Wirtschaftlichkeit notwendig (derzeit sehr hohe Kosten). Upscaling von Rohstoffaufschluss; Pentosennutzung: Vergärung zu Ethanol oder anderweitige Verwendung; Ligninnutzung: Alternativen zur Verbrennung; Enzymentwicklung für Verzuckerung; durch Verarbeitung bzw. Umwandlung der Reststoffe der Ethanolherstellung aus Getreide und Zuckerstoffen zu Biogas in mittleren und großen Anlagen ließen sich große Einsparpotenziale realisieren ⁹
Kosten und Erlöse	Behandlungskosten pro Menge: - Investitionskosten pro Anlage: 100 EUR/Tonne Output, 226 Mio Euro ⁹ Gestehungskosten: 3 Cent/MJ Strom – Referenz: 1,7 Cent/MJ ¹²
Verwendete Literatur	¹ DBFZ (2015): Bioenergie-Technologien. Fokusheft. 2. Auflage ² Hirzel, Simon (Hrsg.) (2017): Energiekompendium. Fraunhoferverlag ⁶ FNR (2017): Basisdaten Bioenergie. ⁷ Kaltschmitt, M. ; Hartmann, H. ; Hofbauer, H. (2016): Energie aus Biomasse ⁸ FNR (2013): Bioethanol in Deutschland ⁹ Naumann, K. (2016): Monitoring Biokraftstoffsektor ¹⁰ eigene Bewertung, siehe Kapitel 6 im Gesamtbericht ¹² Repenning (2015): Klimaschutzszenario, Runde 1 Aus dem Internet: ³ http://www.wiso.boku.ac.at/fileadmin/data/H03000/H73000/H73300/pub/Biogas/2004_DA_Gangl.pdf, S. 28 ⁴ Gangl, C. (2004): http://www.wiso.boku.ac.at/fileadmin/data/H03000/H73000/H73300/pub/Biogas/2004_DA_Gangl.pdf ⁵ https://www.energetische-biomassenutzung.de/fileadmin/Steckbriefe/dokumente/03KB050A_Endbericht_Ligno_Biogas.pdf ¹¹ https://www.biograce.net/biograce2/

B.18 Ethanolanlage (Zucker) (T18)

Ethanolanlage (T18)	
Konversion	Alkoholische Fermentation
Technologie	Ethanolherstellung
Produkt	Bioethanol

Ethanolanlage (T18)	
Eingesetzter Abfall- und Reststoff (ggf. Beschreibung)	Abfall und Reststoffe (z. B. Melasse); sowie Abfall und Reststoffe (z. B. Reststoffe der Lebensmittelproduktion wie Schäl- und Putzreste)
Beschreibung der Technik	Beschreibung: Vergärung und Destillation von Reststoffen zu Ethanol ² Prozesskette: Zerkleinerung, Hydrolyse, enzymatische Verzuckerung, Vergärung mittels Hefen, Destillation, Raffination, Schlempeverwertung, Vergärung zu Biogas ⁶ Leistungsspektrum: ⁶ ca. 5.000 t/a - 500.000 t/a_{Output}
Chemisch / Physikalische Eingangsparameter	Geeignet für Wassergehalt von bis: 20-36% (bei Melasse) ¹ geeignet für Heizwert/Brennwert von bis: 22,5 GJ/t
Struktur des Inputmaterials ohne aufwändige Vorbehandlung	geeignet für Korngröße von bis: < 3 mm (Abfälle aus Getreideproduktion) ⁵ geeignet für Inputmatrix bezüglich holzig/krautig/in Lösung: in Lösung Risiko für Störstoffe (z.B. Quecksilber): Keine
Inputcharakteristik	Flexibilität bei zeitlich unterschiedlichem Anfall (Batchbetrieb, kontinuierlich): Kontinuierlich Flexibilität bei Mengenunterschieden im Input von bis (typische Anlagengrößen): Flexibel
Outputcharakteristik	Anwendungsbereich des erzeugten Energieprodukts (Strom, Wärme, Energieträger): Bioethanol zeitliche und räumliche Flexibilität bei der Abnahme des Energieprodukts: Flexibel
Technologiecharakteristik	Energieaufwand bei Behandlung von Eingangsstoffen ohne größere Vorbehandlung: Energieaufwendig Bewertung Gesamtwirkungsgrad bis Energieprodukt: mittlerer Erfüllungsgrad ⁹ typische Größenordnung der Emission von Treibhausgasen bei der Behandlung: 41 g CO₂-Äq./MJ (Weizen EtOH) ⁶ Referenzwert: 94 g CO₂-Äq./MJ Kraftstoff Komplexität der Technologie (einfach, komplex): einfach und ausgereift Entwicklungsstand (Stand der Technik, Pilotanlage):

Ethanolanlage (T18)	
	kommerzielle Anlagen in Betrieb (5 Stück in DE) ² Entwicklungsbedarf: Optimierung möglich bei Prozessintegration, Energiebilanz, Schlempeverwertung ²
Kosten und Erlöse	Behandlungskosten pro Menge: 28 Euro/GJ Weizenethanol ⁶ Investitionskosten pro Anlage: 235 Mio. Euro ⁶ (Annahme bezogen auf Anlagenkapazitäten zw. 40.000 – 480.000 t/a Ethanol) Gestehungskosten: 3,0 Cent/MJ ¹⁰
Verwendete Literatur	¹ Braune et al. (2016): Die Biokraftstoffproduktion in Deutschland ² DBFZ (2015): Bioenergie-Technologien. Fokusheft. 2. Auflage ³ FNR (2014): Biokraftstoffe ⁴ FNR (2017): Basisdaten Bioenergie. ⁵ Kaltschmitt, M. ; Hartmann, H. ; Hofbauer, H. (2016): Energie aus Biomasse ⁶ Naumann, K. (2016): Monitoring Biokraftstoffsektor ⁷ Hirzel, Simon (Hrsg.) (2017): Energiekompendium. Fraunhoferverlag ⁹ eigene Bewertung, siehe Kapitel 6 im Gesamtbericht ¹⁰ Repenning (2015): Klimaschutzszenario, Runde 1 Aus dem Internet: ⁸ Abbildung: http://www.cropenergies.com/de/Bioethanol/Produktionsverfahren/schema-de_1.pdf

B.19 Biodieselanlage

Biodieselanlage	
Konversion	Umesterung
Technologie	Dieselerstellung
Produkt	Biodiesel
Eingesetzter Abfall- und Reststoff (ggf. Beschreibung)	Speiseöle und Fette aus Haushalten und Industrie (öl- und fetthaltige Abfall- und Reststoffe (z. B. Ölsaaten wie Raps (RME), Soja (SME), Palmfrucht (PME) sowie Altspeiseöle und –fette (UCOME)); Methanol: ca. 120 kg / t Biodiesel (Raps), Tierfett
Beschreibung der Technik	Beschreibung: Umesterung von Pflanzenölen und Speisefetten zu Fettsäuremethylestern (FAME), durch Einsatz von Altspeiseölen und Fetten, die unterschiedliche Qualitäten inne haben, kommen diskontinuierliche Verfahren in Frage, auch Batchverfahren ¹ Prozesskette: zentrale Ölmühle mit Ölextraktion, Rohölraffination, Umesterung, Glycerinabscheidung und -aufbereitung, Methylesterwäsche, Methylestertrocknung, Feinfiltration, Biodiesel, Glycerin-aufbereitung ¹ Leistungsspektrum: ca. 500 t/a (Kleinanlage) bis zu 650.000 t/a (Industrieanlagen), bei diskontinuierlichen Verfahren bis 8.500 t/a ³
Chemisch / Physikalische Eingangparameter	Geeignet für Wassergehalt von bis: 0,1 - 0,18% (Wasserlöslichkeit des Biodiesel), 0,075 mg/kg (Wassergehalt (EN ISO 12937) ⁵ geeignet für Heizwert/Brennwert von bis: 32 GJ/t ²
Struktur des Inputmaterials ohne aufwändige Vorbehandlung	geeignet für Korngröße von bis: Fein geeignet für Inputmatrix bezüglich holzig/krautig/in Lösung: flüssig bis fest Risiko für Störstoffe (z.B. Quecksilber): Großtechnische Anlagen mit hohem Kontrollniveau für Emissionen:
Inputcharakteristik	Flexibilität bei zeitlich unterschiedlichem Anfall (Batchbetrieb, kontinuierlich): Kontinuierlich Flexibilität bei Mengenunterschieden im Input von bis (typische Anlagengrößen): Flexibel
Outputcharakteristik	Anwendungsbereich des erzeugten Energieprodukts (Strom, Wärme, Energieträger): Kraftstoff (Biodiesel) zeitliche und räumliche Flexibilität bei der Abnahme des Energieprodukts: Flexibel

Biodieselanlage	
Technologiecharakteristik	Energieaufwand bei Behandlung von Eingangsstoffen ohne größere Vorbehandlung: nicht notwendig Bewertung Gesamtwirkungsgrad bis Energieprodukt: hoher Erfüllungsgrad ⁷ typische Größenordnung der Emission von Treibhausgasen bei der Behandlung: Altöl/Fette: 9,5 g CO₂Äq/MJ Kraftstoff (BioGracell ⁸, eigene Berechnung ifeu), Referenzwert: 94 g CO₂Äq/MJ Kraftstoff Komplexität der Technologie (einfach, komplex): Einfach Entwicklungsstand (Stand der Technik, Pilotanlage): kommerzielle Produktion sowohl in zentralen als auch dezentralen Anlagen, Laboranlagen für nicht katalysierte überkritische Prozessführung ⁴ Entwicklungsbedarf: Entwicklung Multifeedstockanlagen, Optimierung Katalysatoreinsatz, Verbesserung der Trennverfahren von Produkt und Koppelprodukt ⁴
Kosten und Erlöse	Behandlungskosten pro Menge: k.A. Investitionskosten pro Anlage: ⁹ Beispielanlagen: Kapazität 12.000 t/a = 10 Mio. Euro (Anlage auf Basis tierischer Fette) Kapazität 45.000 t = 14,5 Mio Euro (Anlage auf Basis Öle, Fette) Kapazität 6.000 t 0 4,5 Mio. Euro (Anlage auf Basis Altspeiseöl und Altfette) Gestehungskosten: 2 Cent/MJ Strom – Referenz: 1,7 Cent/MJ
Verwendete Literatur	¹ DBFZ (2015): Bioenergie-Technologien. Fokusheft. 2. Auflage ² FNR (2017): Basisdaten Bioenergie. ³ Kaltschmitt, M. ; Hartmann, H. ; Hofbauer, H. (2016): Energie aus Biomasse ⁴ Naumann, K. (2016): Monitoring Biokraftstoffsektor ⁷ eigene Bewertung, siehe Kapitel 6 im Gesamtbericht ⁹ Prinz et al. (2016): Innovative Techniken: Beste verfügbare Techniken in ausgewählten Sektoren. Teilvorhaben 5: Ermittlung des Standes der Technik der Herstellung von Biokraftstoffen unter Berücksichtigung der verschiedenen Produktionstechniken und Umweltauswirkungen. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. FKZ 3712 43 314 5, veröffentlicht in UBA Texte 20/2016 Aus dem Internet: ⁵ DBU: https://www.dbu.de/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-26317.pdf https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-07841.pdf ⁶ Google: https://www.google.de/search?q=biodieselanlagen+schema&client=firefox-b&dcr=0&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwidyeHczrvXAhWCSBoKHc10B18Q_AUICigB&biw=2400&bih=1361#imgsrc=LCuyOUaS1xMOKM: ⁸ https://www.biograce.net/biograce2/

C Anhang: Einzelbewertung der Einsatzpfade

Die Bewertung der Einsatzpfade (ggf. weiter differenziert nach Energieprodukten), wie sie Abschnitt 6.2 kurz zusammengefasst ist, wird in diesem Anhang anhand der fünf Kriterien wird nacheinander transparent gemacht.

Die Kriterien „Energieeffizienz“, Treibhausbilanz“ und „Kostenbetrachtung“ werden anhand quantitativer Daten bewertet.

Die Kriterien zu sonstigen „Umweltrisiken“ und „Kompatibilität zur Transformation des Energiesystems“ werden anhand verbaler qualitativer Einschätzungen getroffen. Dabei wird je nach Richtung und Bedeutung des Aspekts folgende Einstufung vergeben:

- + positiv
- (+) mit Einschränkung positiv
- +/- indifferent oder sowohl positiv als auch negativ
- (-) mit Einschränkung negativ
- negativ

Die Gesamteinschätzung für einen Einsatzpfad in einem Kriterium erfolgt wiederum durch den Gesamteindruck der vergebenen einzelnen Einstufungen: nur bis überwiegend + führt zu Stufe 3 (hoher Erfüllungsgrad), umgekehrt führt nur bis überwiegend - führt zu Stufe 1 (geringer Erfüllungsgrad) und alles Dazwischenliegende zu Stufe 2 (mittlerer Erfüllungsgrad).

C.1 Einzelbewertungen

1. Holzpelletzentralheizung 15 kW (T1), Einsatz: Waldholz (R1)
2. Holzpelletzentralheizung 15 kW (T1), Einsatz: Industrieholz (R17), Feste industrielle Substrate (R20)⁷⁵

Energieprodukt(e)

Gebäudewärme (Einzelgebäude)

Energieeffizienz:

Wirkungsgrad:

0,95 als energetischer Wirkungsgrad fortschrittlicher Anlagen

0,72 Erhalt über die Kette (BioGrace II), Voraussetzung: Energieaufwand durch Biomasse selbst [dies wird hier wie auch anderer Stelle unterstellt, dass Prozessenergie durch

$0,95 \times 0,72 \rightarrow 0,68$

Temperatur: $<90^{\circ}\text{C} \rightarrow$ Carnot-Faktor: 0,2

Ergebnis: 0,14 = niedriger Erfüllungsgrad $\rightarrow$ **Stufe 1**

⁷⁵ Der Einsatz dieser Materialien wird mit hoher Wahrscheinlichkeit aufgrund der Anforderungen der 1. BImSchV für diesen Energiepfad auszuschließen sein (siehe auch Abschnitt 6.3)

Treibhausgasbilanz:

7,4 g CO₂Äq/MJ Wärme (nach BioGrace II), Referenzwert: 80 g CO₂Äq/MJ Wärme

Ergebnis: 90 % bzw. 94 % Nettoeinsparung → **Stufe 3**

Kostensituation:

Gestehungskosten: 3,56 Cent/MJ – Referenz: 2,8 Cent/MJ

→ 128 %

Ergebnis: mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**

Umweltrisiken:

► *Relevante Nicht-THG Emissionen Luft:*

Spezifische Feinstaub und NO_x-Emissionen vergleichsweise hoch;

es ist aufwändig, Feinstaub bei Einzelheizungen weiter zu reduzieren;

problematisch v.a. in Ballungszentren: -

► *Relevante Wasser- und/oder Bodenbelastung:* keine: +

► *Risiko durch Reststoff:* Ascheaufkommen gering und unkritisch, bedarf jedoch der Entsorgung: (+)

Ergebnis: mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**

Transformation Energiesystem:

► *Substitutionsrelevanz:* ersetzt fossile Wärme, wo Wärmenetze schwierig umzusetzen sind, konkurriert mit alternativen erneuerbaren Wärmesysteme: (+)

► *klimapolitische Systemdienlichkeit:* kann auch bei breiter Umsetzung auch den Ausbau von Wärmenetzen blockieren: (-)

► *Speicherfähigkeit:* als Einsatzstoff: +

► *Flexibilität:* zeitlich und räumlich gegeben: +

Ergebnis: hoher Erfüllungsgrad → **Stufe 3** (mit Einschränkung)

3. Holzhackschnitzelkessel 500 kW (T2), Einsatz: Waldholz (R1), Industrieholz (R17),

4. Holzhackschnitzelkessel 500 kW (T2), Einsatz: Landschaftspflege-Holz (R3), Grüngut, Holz (R10)

Energieprodukt(e)

e) Gebäudewärme (Leitung)

f) Prozesswärme (niedrige Temperatur, 150°C)

g) Prozesswärme (mittlere Temperatur, 300°C)

Energieeffizienz:

a) *Wirkungsgrad:* 90 %;

für (3): $x \cdot 0,93$ (über die Kette nach BioGrace II, Voraussetzung: Energieaufwand durch Biomasse selbst),

$0,9 \cdot 0,93 \rightarrow 0,84$

für (4): $x 0,85$ (zusätzliche Trocknung wegen höherer Feuchte erforderlich)

$0,9 \times 0,84 \rightarrow 0,77$

Temperatur $< 90^\circ\text{C} \rightarrow$ Carnot-Faktor: 0,2

Ergebnis: 0,17 bzw. 0,15 = mittlerer Erfüllungsgrad $\rightarrow$ **Stufe 2**

b) *Wirkungsgrad*: siehe a)

Temperatur $150^\circ\text{C} \rightarrow$ Carnot-Faktor: 0,3

Ergebnis: 0,25 bzw. 0,23 = mittlerer Erfüllungsgrad $\rightarrow$ **Stufe 2**

c) *Wirkungsgrad*: siehe a)

Temperatur $300^\circ\text{C} \rightarrow$ Carnot-Faktor: 0,5

Ergebnis: 0,42 bzw. 0,38 = hoher Erfüllungsgrad $\rightarrow$ **Stufe 3**

Treibhausgasbilanz:

Die 3 Produkte liegen in einer Bandbreite von: 6 – 7 g $\text{CO}_2\text{Äq}/\text{MJ}$ Wärme (nach BioGrace II);
angesetzt werden 6,5 g $\text{CO}_2\text{Äq}/\text{MJ}$ Wärme, Referenzwert: 80 g $\text{CO}_2\text{Äq}/\text{MJ}$ Wärme

Ergebnis: 92 % Nettoeinsparung = hoher Erfüllungsgrad $\rightarrow$ **Stufe 3**

Kostenbetrachtung:

Gestehungskosten: 1,8 Cent/MJ – Referenz: 2,8 Cent/MJ

$\rightarrow 64\%$

Ergebnis: hoher Erfüllungsgrad = hoher Erfüllungsgrad $\rightarrow$ **Stufe 3**

Umweltrisiken:

► *Relevante Nicht-THG Emissionen Luft:*

Durch Größe des Systems vernünftige Rückhaltetechnik für Feinstaub; andere Schadstoffemissionen irrelevant oder wg. Größe kontrollierbar: (+)

► *Relevante Wasser- und/oder Bodenbelastung:* keine: +

► *Risiko durch Reststoff:* keine: +

Ergebnis: mittlerer Erfüllungsgrad $\rightarrow$ **Stufe 3**

Transformation Energiesystem:

► *Substitutionsrelevanz:*

a) Einspeisung in Wärmenetze (Nah- und Fernwärme), konkurriert mit alternativen erneuerbaren Wärmesysteme: (+)

b, c) Für einzelne industrielle Anwendungen (v.a. in speziellen Nischen, z.B. Nahrungsmittel-, Papier-, Glasindustrie) geeignet: +

► *klimapolitische Systemdienlichkeit:* regenerative Wärmequellen für Wärmenetze und Industrie suchen Lösungsansätze: +

► *Speicherfähigkeit:* als Einsatzstoff: +

► *Flexibilität:* zeitlich und räumlich gegeben: +

Ergebnis: hoher Erfüllungsgrad $\rightarrow$ **Stufe 3**

5. Holzkraftwerk 5 MW_{el} (T3), Einsatz: Waldholz (R1), Landschaftspflege-Holz (R3), Grüngut, Holz (R10)

Altholz (11), Industrieholz (R17),

6. Holzkraftwerk 5 MW_{el} (T3), Einsatz: Stroh (4)

Energieprodukt(e)

- a) Prozesswärme (mittlere Temperatur, 300°C)
b) Strom (grundsätzlich plus KWK Wärme, hier aber Maximierung Strom betrachtet)

Energieeffizienz:

- a) *Wirkungsgrad*: 90 %
für (3): $\times 0,93$ (über die Kette nach BioGrace II, Voraussetzung: Energieaufwand durch Biomasse selbst),
 $0,9 \times 0,93 \rightarrow 0,84$
für (4): $\times 0,85$ (zusätzliche Trocknung wegen höherer Feuchte erforderlich)
 $0,9 \times 0,84 \rightarrow 0,77$
Temperatur $< 90^\circ\text{C} \rightarrow$ Carnot-Faktor: 0,5
Ergebnis: 0,25 bzw. 0,23 = hoher Erfüllungsgrad $\rightarrow$ **Stufe 3**
- b) *Wirkungsgrad*: 30 %; Strom
für (3): $\times 0,93$ (über die Kette nach BioGrace II, Voraussetzung: Energieaufwand durch Biomasse selbst),
 $0,3 \times 0,93 \rightarrow 0,28$
für (4): $\times 0,85$ (zusätzliche Trocknung wegen höherer Feuchte erforderlich)
 $0,3 \times 0,84 \rightarrow 0,26$
 $\rightarrow$ Carnot-Faktor: 1
Ergebnis: 0,28 bzw. 0,26 = hoher Erfüllungsgrad $\rightarrow$ **Stufe 3**

Treibhausgasbilanz:

- 5a) 5,3 g CO₂Äq/MJ Wärme (nach BioGrace II), Referenzwert: 80 g CO₂Äq/MJ Wärme
Ergebnis: 93 % Nettoeinsparung = hoher Erfüllungsgrad $\rightarrow$ **Stufe 3**
- 5b) 14,9 g CO₂Äq/MJ Strom (nach BioGrace II), Referenzwert: 183 g CO₂Äq/MJ Strom
Ergebnis: 92 % Nettoeinsparung = hoher Erfüllungsgrad $\rightarrow$ **Stufe 3**
- 6a) 11,7 g CO₂Äq/MJ Wärme (nach BioGrace II), Referenzwert: 80 g CO₂Äq/MJ Wärme
Ergebnis: 85 % Nettoeinsparung = hoher Erfüllungsgrad $\rightarrow$ **Stufe 3**
- 6b) 33 g CO₂Äq/MJ Strom (nach BioGrace II), Referenzwert: 183 g CO₂Äq/MJ Strom
Ergebnis: 82 % Nettoeinsparung = hoher Erfüllungsgrad $\rightarrow$ **Stufe 3**

Kostensituation:

- a) *Gestehungskosten*: 1,4 Cent/MJ Wärme – Referenz: 2,8 Cent/MJ
 $\rightarrow$ 190 %
Ergebnis: niedriger Erfüllungsgrad $\rightarrow$ **Stufe 1**
- b) *Gestehungskosten*: 4,3 Cent/MJ Strom – Referenz: 228 Cent/MJ
 $\rightarrow$ 50 %
Ergebnis: hoher Erfüllungsgrad $\rightarrow$ **Stufe 3**

Umweltrisiken:

- 5) Waldholz, Altholz u. ä.

- ▶ *Relevante Nicht-THG Emissionen Luft:*
durch Größe des Systems vernünftige Rückhaltetechnik für Feinstaub; andere Schadstoffemissionen irrelevant oder wg. Größe kontrollierbar: (+)
- ▶ *Relevante Wasser- und/oder Bodenbelastung:* keine: + (sofern bei Altholz Kl. 4 ausgeschlossen ist)⁷⁶
- ▶ *Risiko durch Reststoff:* keine: +

Ergebnis: hoher Erfüllungsgrad → **Stufe 3**

6) Stroh u.ä.

- ▶ *Relevante Nicht-THG Emissionen Luft:*
Staubbildung deutlich erhöht, höherer Aufwand für Abscheidetechnologie; andere Schadstoffemissionen irrelevant oder wg. Größe kontrollierbar: +/-
- ▶ *Relevante Wasser- und/oder Bodenbelastung:* keine: +
- ▶ *Risiko durch Reststoff:* keine: +

Ergebnis: mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**

Transformation Energiesystem:

a) Prozesswärme

- ▶ *Substitutionsrelevanz:* Für einzelne industrielle Anwendungen (v.a. in speziellen Nischen, z.B. Nahrungsmittel-, Papier-, Glasindustrie) geeignet: +
- ▶ *klimapolitische Systemdienlichkeit:* regenerative Wärmequellen für Industrie suchen Lösungsansätze: +
- ▶ *Speicherfähigkeit:* als Einsatzstoff: +
- ▶ *Flexibilität:* zeitlich und räumlich gegeben: +

Ergebnis: hoher Erfüllungsgrad → **Stufe 3**

b) Strom

- ▶ *Substitutionsrelevanz:* geringe Substitutionsrelevanz bei großem Angebot erneuerbarer Quellen im Strommarkt: -
- ▶ *klimapolitische Systemdienlichkeit:* Lock-in-Effekte begrenzt, da Potenzial begrenzt, Flexibilität maximal für Mittelast (Kesseltechnik): +/-
- ▶ *Speicherfähigkeit:* als Einsatzstoff: +
- ▶ *Flexibilität:* zeitlich begrenzt und räumlich gegeben: (+)

⁷⁶ Die schadstoffhaltige Klasse IV nimmt nach Kay und Baur (2014) 14 % Altholz ein. Die Einschränkung an dieser Stelle ist somit mehr auf den Einzelfall bezogen. Für die Gesamtbetrachtung zu Altholz insgesamt ist dies nicht maßgeblich.

Ergebnis: mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**

7. ORC HKW 250 kW_{el} (T4), Einsatz: Waldholz (R1), Landschaftspflege-Holz (R3), Grüngut, Holz (R10)

8. ORC HKW 250 kW_{el} (T4), Einsatz: Stroh (4)

Energieprodukt(e)

Strom (grundsätzlich KWK Wärme, hier aber Maximierung Strom betrachtet)

Energieeffizienz:

Wirkungsgrad 25 %;

x 0,93 (über die Kette nach BioGrace II, Voraussetzung: Energieaufwand durch Biomasse selbst),
0,25 x 0,93 → 0,25 Strom → Carnot-Faktor: 1

Ergebnis: 0,25 = mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**

Treibhausgasbilanz:

5: 17,9 g CO₂Äq/MJ Strom (nach BioGrace II), Referenzwert: 183 g CO₂Äq/MJ Strom

Ergebnis: 90 % Nettoeinsparung = hoher Erfüllungsgrad → **Stufe 3**

6: 39,7 g CO₂Äq/MJ Strom (nach BioGrace II), Referenzwert: 183 g CO₂Äq/MJ Strom

Ergebnis: 78 % Nettoeinsparung = hoher Erfüllungsgrad → **Stufe 3**

Kostensituation:

Gestehungskosten: 5 Cent/MJ Strom – Referenz: 2,2 Cent/MJ

→ 220 %

Ergebnis: niedriger Erfüllungsgrad → **Stufe 1**

Umweltrisiken:

7) Waldholz, Altholz u.ä.

► *Relevante Nicht-THG Emissionen Luft:*

durch Größe des Systems vernünftige Rückhaltetechnik für Feinstaub; andere Schadstoffemissionen irrelevant oder wg. Größe kontrollierbar: (+)

► *Relevante Wasser- und/oder Bodenbelastung:* keine: +

► *Risiko durch Reststoff:* keine: +

Ergebnis: hoher Erfüllungsgrad → **Stufe 3**

8) Stroh

► *Relevante Nicht-THG Emissionen Luft:* Staubbildung deutlich erhöht, höherer Aufwand für Abscheidetechnologie; andere Schadstoffemissionen irrelevant oder wg. Größe kontrollierbar: +/

► *Relevante Wasser- und/oder Bodenbelastung:* keine: +

► *Risiko durch Reststoff:* keine: +

Ergebnis: mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**

Transformation Energiesystem:

- ▶ *Substitutionsrelevanz*: geringe Substitutionsrelevanz bei großem Angebot erneuerbarer Quellen im Strommarkt: -
- ▶ *klimapolitische Systemdienlichkeit*: Lock-in-Effekte begrenzt, da Potenzial begrenzt, Flexibilität maximal für Mittelast (Kesseltechnik): +/-
- ▶ *Speicherfähigkeit*: als Einsatzstoff: +
- ▶ *Flexibilität*: zeitlich begrenzt und räumlich gegeben: (+)

Ergebnis: mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**

9. Klärschlammverbrennungsanlage 10 MW (T5), Einsatz: kommunaler (R12) und industrieller Klärschlamm (R18)
10. Klärschlammverbrennungsanlage 10 MW (T5), Einsatz: Biogut (R8)

Energieprodukt(e)

- a) Prozesswärme (mittlere Temperatur, 300°C)
- b) Strom (grundsätzlich plus KWK Wärme, hier aber Maximierung Strom betrachtet)

Energieeffizienz:

- a) Wirkungsgrad 60 % (ifeu Daten)⁷⁷; Temperatur 300°C → Carnot-Faktor: 0,5
Ergebnis: 0,24 → **Stufe 2**
- b) Wirkungsgrad 15 % (ifeu Daten)⁷⁷; Strom → Carnot-Faktor: 1
Ergebnis: 0,15 → **Stufe 1**

Treibhausgasbilanz:

- 9a) 106 g CO₂Äq/MJ Strom (ifeu Daten)⁷⁸, Referenzwert: 80 g CO₂Äq/MJ Wärme
Ergebnis: 30 % Netto Zusatzemissionen → **Stufe 1**
- 10a) 56 g CO₂Äq/MJ Strom (ifeu Daten), Referenzwert: 80 g CO₂Äq/MJ Wärme
Ergebnis: 30 % Nettoeinsparung → **Stufe 1**
- 9b) 709 g CO₂Äq/MJ Strom (ifeu Daten), Referenzwert: 183 g CO₂Äq/MJ Strom
Ergebnis: 30 % Netto Zusatzemissionen → **Stufe 1**
- 10b) 362 g CO₂Äq/MJ Strom (ifeu Daten), Referenzwert: 183 g CO₂Äq/MJ Strom
Ergebnis: 30 % Netto Zusatzemissionen → **Stufe 1**

Kostensituation:

(Siehe Abschnitt 6.2.3)

Ergebnis: mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**

Umweltrisiken:

⁷⁷ Als Quelle für die Einschätzung dienen von ifeu ausgewertete Unterlagen zu bestehenden und geplanten Klärschlammverbrennungsanlagen in Deutschland.

⁷⁸ Die hohen THG-Emissionen beruhen auf den für die übliche stationäre Wirbelschichtfeuerung typisch hohen N₂O-Emissionen (siehe auch Roskosch, Heidecke 2018)

- ▶ *Relevante Nicht-THG Emissionen Luft*: Potentielle Schwermetallbelastung, Feinstaub; Stickoxidemissionen, hoher Aufwand für Abscheidetechnologie aber wegen wg. Größe gut kontrollierbar: +/-
- ▶ *Relevante Wasser- und/oder Bodenbelastung*: keine: +
- ▶ *Risiko durch Reststoff*: Aschen müssen entsorgt werden problematisch: +/-
- ▶ *Sonstiges*: durch Monoverbrennung ist P-Recycling möglich: +

Ergebnis: mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**

Transformation Energiesystem:

a) Prozesswärme

- ▶ *Substitutionsrelevanz*: Für einzelne industrielle Anwendungen (v.a. in speziellen Nischen, z.B. Nahrungsmittel-, Papier-, Glasindustrie) geeignet: +
- ▶ *klimapolitische Systemdienlichkeit*: regenerative Wärmequellen für Industrie suchen Lösungsansätze: +
- ▶ *Speicherfähigkeit*: für Einsatzstoff nicht gegeben, aber kontinuierlicher Anfall: +/-
- ▶ *Flexibilität*: zeitlich und räumlich nicht gegeben: -

Ergebnis: mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**

b) Strom

- ▶ *Substitutionsrelevanz*: geringe Substitutionsrelevanz bei großem Angebot erneuerbarer Quellen im Strommarkt: -
- ▶ *klimapolitische Systemdienlichkeit*: keine Lock-in-Effekte, da Entsorgung verbindlich erfolgt, keine Flexibilität: Grundlast: -
- ▶ *Speicherfähigkeit*: für Einsatzstoff nicht gegeben, aber kontinuierlicher Anfall: +/-
- ▶ *Flexibilität*: zeitlich und räumlich nicht gegeben: -

Ergebnis: mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 1**

- 11. Mitverbrennung Kohlekraftwerk <100 MW (T6), Einsatz: Waldholz (R1),
Landschaftspfl.Holz (R3), Grüngut Holz (R10),
Altholz (R11), Industrieholz (R17),
Feste industrielle Substrate (R20)
- 12. Mitverbrennung Kohlekraftwerk <100 MW (T6), Einsatz: Tiermehl (R21)

Energieprodukt(e)

Strom (grundsätzlich plus KWK Wärme, hier aber Maximierung Strom betrachtet)

Energieeffizienz:

Wirkungsgrad 35 %; $\times 0,93$ (über die Kette nach BioGrace II, Voraussetzung: Energieaufwand durch Biomasse selbst)⁷⁹,

$0,35 \times 0,93 \rightarrow 0,33$ Strom $\rightarrow$ Carnot-Faktor: 1

Ergebnis: 0,33 = hoher Erfüllungsgrad $\rightarrow$ **Stufe 3**

Treibhausgasbilanz:

10 g CO₂Äq/MJ Strom (ifeu Daten), Referenzwert: 183 g CO₂Äq/MJ Strom

Ergebnis: 95 % Nettoeinsparung: hoher Erfüllungsgrad $\rightarrow$ **Stufe 3**

Kostensituation:

(Siehe Abschnitt 6.2.3)

Ergebnis: mittlerer Erfüllungsgrad $\rightarrow$ **Stufe 2**

Umweltrisiken:

- ▶ *Relevante Nicht-THG Emissionen Luft:* Potenziell geringere Rauchgasreinigung durch geringere gesetzliche Anforderungen bei Kohle-HKW; erlaubt die Emission von mehr Luftschadstoffen aus der Kohle durch „Verdünnungseffekt“: -
- ▶ *Relevante Wasser- und/oder Bodenbelastung:* keine: +
- ▶ *Risiko durch Reststoff:* Aschen müssen entsorgt werden problematisch: +/-

Ergebnis: geringer Erfüllungsgrad $\rightarrow$ **Stufe 1**

Transformation Energiesystem:

- ▶ *Substitutionsrelevanz:* geringe Substitutionsrelevanz bei großem Angebot erneuerbarer Quellen im Strommarkt: -
- ▶ *klimapolitische Systemdienlichkeit:* starker Lock-in-Effekt durch potenziellen Weiterbetrieb von Kohlekraftwerken durch Biomasse-Mitverbrennung, Flexibilität maximal für Mittellast (Kesseltechnik): -
- ▶ *Speicherfähigkeit:* für Einsatzstoff gegeben, aber Kraftwerksbetrieb unabhängig von Brennstoffart (ob Biomasse oder Kohle): (-)
- ▶ *Flexibilität:* s.o.: -

Ergebnis: geringer Erfüllungsgrad $\rightarrow$ **Stufe 1**

13. Abfallverbrennungsanlage 50 MW (T7), Einsatz: Waldholz (R1), Landschaftspflege-Holz (R3),

Stroh (R4), Grüngut Holz (R10), Altholz (R11),
biogene Abfälle im Restmüll (R14),
Schwarzlauge (R16), Industrieholz (R17),
Feste industrielle Substrate (R20), Tiermehl (R21),
Tierfett (R22)

Energieprodukt(e)

⁷⁹

Gilt im Grunde nur für Waldholz (R1), wird hier konservativ für alle Stoffe angesetzt-

- a) Prozesswärme (mittlere Temperatur)
- b) Strom (grundsätzlich plus KWK Wärme, hier aber Maximierung Strom betrachtet)

Energieeffizienz:

- a) *Wirkungsgrad* 70 %;
x 0,93 (über die Kette nach BioGrace II, Voraussetzung: Energieaufwand durch Biomasse selbst)⁸⁰,
 $0,7 \times 0,93 = 0,65$
Temperatur 300°C → Carnot-Faktor: 0,5
Ergebnis: 0,33 → **Stufe 3**
- b) *Wirkungsgrad* 25 % %;
x 0,93 (über die Kette nach BioGrace II, Voraussetzung: Energieaufwand durch Biomasse selbst); $0,25 \times 0,93 = 0,23$
Strom → Carnot-Faktor: 1
Ergebnis: 0,23 → **Stufe 2**

Treibhausgasbilanz:

- a) 5 g CO₂Äq/MJ Wärme (ifeu Daten), Referenzwert: 80 g CO₂Äq/MJ Dampf
Ergebnis: 94 % Nettoeinsparung → **Stufe 3**
- b) 14 g CO₂Äq/MJ Strom (ifeu Daten), Referenzwert: 183 g CO₂Äq/MJ Strom
Ergebnis: 92 % Nettoeinsparung → **Stufe 3**

Kostensituation:

(Siehe Abschnitt 6.2.3)

Ergebnis: mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**

Umweltrisiken:

- *Relevante Nicht-THG Emissionen Luft:* Hohe gesetzliche Anforderungen an Rauchgasreinigung, dafür hohes Abgasvolumen mit insgesamt hohen spezifischen Luftschadstoffgehalten (ungünstig zu werten für Einsatzstoffe zu werten, die geringe Schadstoffbelastung aufweisen): +/-
- *Relevante Wasser- und/oder Bodenbelastung:* keine: +
- *Risiko durch Reststoff:* Aschen müssen entsorgt werden, Volumen durch Einsatzstoffe mit geringen Schadstoffbelastungen unnötig erhöht: +/-

Ergebnis: mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**

Transformation Energiesystem:

- a) Prozesswärme
- *Substitutionsrelevanz:* Für einzelne industrielle Anwendungen (v.a. in speziellen Nischen, z.B. Nahrungsmittel-, Papier-, Glasindustrie) geeignet: +

⁸⁰

Gilt im Grunde nur für Waldholz (R1), wird hier konservativ für alle Stoffe angesetzt-

- ▶ *klimapolitische Systemdienlichkeit*: regenerative Wärmequellen für Industrie suchen Lösungsansätze: +
- ▶ *Speicherfähigkeit*: für Einsatzstoff nicht gegeben, aber kontinuierlicher Anfall: +/-
- ▶ *Flexibilität*: zeitlich und räumlich nicht gegeben: -

Ergebnis: mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**

b) Strom

- ▶ *Substitutionsrelevanz*: geringe Substitutionsrelevanz bei großem Angebot erneuerbarer Quellen im Strommarkt: -
- ▶ *klimapolitische Systemdienlichkeit*: keine Lock-in-Effekte, da Entsorgung verbindlich erfolgt, keine Flexibilität: Grundlast: -
- ▶ *Speicherfähigkeit*: für Einsatzstoff nicht gegeben, aber kontinuierlicher Anfall: +/-
- ▶ *Flexibilität*: zeitlich und räumlich nicht gegeben: -

Ergebnis: geringer Erfüllungsgrad → **Stufe 1**

14. Kleinvergaser 30 kW (T8), Einsatz: Waldholz (R1), Landschaftspflege-Holz (R3), Altholz (R11),
Industrieholz (R17)

Energieprodukt(e)

a) Gebäudewärme (Einzelgebäude)

b) Strom

Energieeffizienz:

- a) *Wirkungsgrad* 90 %;
x 0,93 (über die Kette nach BioGrace II, Voraussetzung: Energieaufwand durch Biomasse selbst)⁸¹,
 $0,9 \times 0,93 = 0,84$
Temperatur <90°C → Carnot-Faktor: 0,2
Ergebnis: 0,17 = mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**
- b) *Wirkungsgrad* 18 %;
x 0,93 (über die Kette nach BioGrace II, Voraussetzung: Energieaufwand durch Biomasse selbst)⁸²,
 $0,18 \times 0,93 = 0,17$ Strom → Carnot-Faktor: 1
Ergebnis: 0,17 → **Stufe 2**

Treibhausgasbilanz:

- a) 7,6 g CO₂Äq/MJ Wärme (GEMIS), Referenzwert: 80 g CO₂Äq/MJ Dampf
Ergebnis: 94 % Nettoeinsparung = hoher Erfüllungsgrad → **Stufe 3**

⁸¹ Gilt im Grunde nur für Waldholz (R1), wird hier konservativ für alle Stoffe angesetzt-

⁸² Gilt im Grunde nur für Waldholz (R1), wird hier konservativ für alle Stoffe angesetzt-

- b) 36,1 g CO₂Äq/MJ Strom (GEMIS), Referenzwert: 183 g CO₂Äq/MJ Strom
Ergebnis: 89 % Nettoeinsparung = hoher Erfüllungsgrad → **Stufe 3**

Kostensituation:

- a) *Gestehungskosten*: 2,4 Cent/MJ Wärme – Referenz: 2,8 Cent/MJ
→ 86 %
Ergebnis: hoher Erfüllungsgrad → **Stufe 3**
- b) *Gestehungskosten*: 6,1 Cent/MJ Strom – Referenz: 2,2 Cent/MJ
→ 280 %
Ergebnis: niedriger Erfüllungsgrad → **Stufe 3**

Umweltrisiken:

- ▶ *Relevante Nicht-THG Emissionen Luft*: Aufwändig, um Feinstaub bei Kleinanlagen weiter zu reduzieren: (-)
- ▶ *Relevante Wasser- und/oder Bodenbelastung*: keine: +
- ▶ *Risiko durch Reststoff*: keine (sofern bei Altholz (R11) Altholzklasse 4 ausgeschlossen ist): +

Ergebnis: mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**

Transformation Energiesystem:

- a) Prozesswärme
- ▶ *Substitutionsrelevanz*: Für einzelne industrielle Anwendungen (v.a. in speziellen Nischen, z.B. Nahrungsmittel-, Papier-, Glasindustrie) geeignet: +
 - ▶ *klimapolitische Systemdienlichkeit*: regenerative Wärmequellen für Industrie suchen Lösungsansätze: +
 - ▶ *Speicherfähigkeit*: gegeben: +
 - ▶ *Flexibilität*: zeitlich und räumlich gegeben: +

Ergebnis: hoher Erfüllungsgrad → **Stufe 3**

- b) Strom

- ▶ *Substitutionsrelevanz*: geringe Substitutionsrelevanz bei großem Angebot erneuerbarer Quellen im Strommarkt: -
- ▶ *klimapolitische Systemdienlichkeit*: Lock-in-Effekte begrenzt, da Potenzial begrenzt: +/-
- ▶ *Speicherfähigkeit*: gegeben: +
- ▶ *Flexibilität*: zeitlich und räumlich gegeben: +

Ergebnis: mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**

15. Holzvergaser 10 MW_{el} (T9), Einsatz: Waldholz (R1), Altholz (R11), Industrieholz (R17)

Energieprodukt(e)

Strom (grundsätzlich plus KWK Wärme, hier aber Maximierung Strom betrachtet)

Energieeffizienz:

Wirkungsgrad 27 %;

x 0,93 (über die Kette nach BioGrace II, Voraussetzung: Energieaufwand durch Biomasse selbst)⁸³,

$0,27 \times 0,93 = 0,25$

Strom → Carnot-Faktor: 1

Ergebnis: 0,25 = mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**

Treibhausgasbilanz:

14,8 g CO₂Äq/MJ Strom (ifeu Daten), Referenzwert: 183 g CO₂Äq/MJ Strom

Ergebnis: 92 % Nettoeinsparung → **Stufe 3**

Kostensituation:

Gestehungskosten: 5 Cent/MJ Strom – Referenz: 2,2 Cent/MJ

→ 230 %

Ergebnis: geringer Erfüllungsgrad → **Stufe 1**

Umweltrisiken:

- ▶ *Relevante Nicht-THG Emissionen Luft:* Luftemissionen inkl. Feinstaub durch Abscheidetechnologie bei großer Anlage gut kontrollierbar: +
- ▶ *Relevante Wasser- und/oder Bodenbelastung:* keine: +
- ▶ *Risiko durch Reststoff:* keine (sofern bei Altholz (R11) Altholzklasse 4 ausgeschlossen ist): +

Ergebnis: mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 3**

Transformation Energiesystem:

- ▶ *Substitutionsrelevanz:* geringe Substitutionsrelevanz bei großem Angebot erneuerbarer Quellen im Strommarkt: -
- ▶ *klimapolitische Systemdienlichkeit:* Lock-in-Effekte begrenzt, da Potenzial begrenzt: +/-
- ▶ *Speicherfähigkeit:* gegeben: +
- ▶ *Flexibilität:* zeitlich und räumlich gegeben: +

Ergebnis: mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**

16. Bio-SNG 25 MW (T10), Einsatz: Waldholz (R1), Altholz (R11), Industrieholz (R17)

Energieprodukt(e)

- a) Prozesswärme (niedrige Temperatur)
- b) Strom (grundsätzlich plus KWK Wärme, hier aber Maximierung Strom betrachtet)
- c) Kraftstoff, Straße

⁸³

Gilt im Grunde nur für Waldholz (R1), wird hier konservativ für alle Stoffe angesetzt-

d) Flug-/Schiffskraftstoff

Energieeffizienz:

- a) Wirkungsgrad 90 % (Kessel) x 0,75 (SNG-Vorkette),
 $0,9 \times 0,75 = 0,68$
 Temperatur 150°C → Carnot-Faktor: 0,3
 Ergebnis: 0,2 = mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**
- b) Wirkungsgrad 40 % (Dampfturbine) x 0,75 (SNG-Vorkette),
 $0,4 \times 0,75 = 0,3$
 Strom → Carnot-Faktor: 1
 Ergebnis: 0,3 = mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**
- c) Wirkungsgrad 50 % (Motor) x 0,95 (CNG) x 0,75 (SNG-Vorkette)
 $0,5 \times 0,95 \times 0,75 = 0,36$
 Mechanische Energie → Carnot-Faktor: 1
 Ergebnis: 0,36 = hoher Erfüllungsgrad → **Stufe 3**
- d) Wirkungsgrad 50 % (Motor) x 0,9 (LNG) x 0,75 (SNG-Vorkette)
 $0,5 \times 0,9 \times 0,75 = 0,34$
 Mechanische Energie → Carnot-Faktor: 1
 Ergebnis: 0,34 = hoher Erfüllungsgrad → **Stufe 3**

Treibhausgasbilanz:

- a) 0,9 g CO₂Äq/MJ Wärme (ifeu Daten), Referenzwert: 80 g CO₂Äq/MJ Wärme
 Ergebnis: 99 % Nettoeinsparung = hoher Erfüllungsgrad → **Stufe 3**
- b) 1,7 g CO₂Äq/MJ Strom (ifeu Daten), Referenzwert: 183 g CO₂Äq/MJ Strom
 Ergebnis: 99 % Nettoeinsparung = hoher Erfüllungsgrad → **Stufe 3**
- c) 0,7 g CO₂Äq/MJ Energieträger (ifeu Daten), Referenzwert: 80 g CO₂Äq/MJ Energieträger
 Ergebnis: 99 % Nettoeinsparung = hoher Erfüllungsgrad → **Stufe 3**
- d) 0,7 g CO₂Äq/MJ Energieträger (ifeu Daten), Referenzwert: 80 g CO₂Äq/MJ Energieträger
 Ergebnis: 99 % Nettoeinsparung = hoher Erfüllungsgrad → **Stufe 3**

Kostensituation:

- e) *Gestehungskosten*: 2,5 Cent/MJ Wärme – Referenz: 2,8 Cent/MJ → 89 %
 Ergebnis: hoher Erfüllungsgrad → **Stufe 3**
- f) *Gestehungskosten*: 6,3 Cent/MJ Strom – Referenz: 2,2 Cent/MJ → 290 %
 Ergebnis: niedriger Erfüllungsgrad → **Stufe 1**
- g) *Gestehungskosten*: 2,4 Cent/MJ Kraftstoff – Referenz: 1,7 Cent/MJ → 147 %
 Ergebnis: mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**
- h) *Gestehungskosten*: 2,7 Cent/MJ Kraftstoff – Referenz: 1,7 Cent/MJ → 160 %
 Ergebnis: mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**

Umweltrisiken:

Die Umweltrisiken sind bis zur Nutzung für alle Energieprodukte gleich zu bewerten, da es sich um die gleiche Konversionstechnologie handelt. Umweltrisiken der Nutzung werden differenziert beschrieben:

- Relevante Nicht-THG Emissionen Luft: gasförmiger Brennstoff bedeutet

- ▶ a, b.) Luftemissionen inkl. Feinstaub durch Abscheidetechnologie bei großer Anlage gut kontrollierbar: +
- c, d.) im Vergleich zu substituierten Kraft-/Treibstoffen eine Verbesserung der Emission (CNG Straße, LNG Schiff)
- ▶ *Relevante Wasser- und/oder Bodenbelastung:* keine: +
- ▶ *Risiko durch Reststoff:* keine (sofern bei Altholz (R11) Altholzklasse 4 ausgeschlossen ist): +

Ergebnis: mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 3**

Transformation Energiesystem:

- a) *Substitutionsrelevanz:* Für einzelne industrielle Anwendungen (v.a. in speziellen Nischen, z.B. Nahrungsmittel-, Papier-, Glasindustrie) geeignet: +
klimapolitische Systemdienlichkeit: regenerative Wärmequellen für Industrie suchen Lösungsansätze: +
Speicherfähigkeit: gegeben: +
Flexibilität: zeitlich und räumlich gegeben: +
Ergebnis: mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 3**
- b) *Substitutionsrelevanz:* geringe Substitutionsrelevanz bei großem Angebot erneuerbarer Quellen im Strommarkt: -
klimapolitische Systemdienlichkeit: Lock-in-Effekte begrenzt, da Potenzial begrenzt: +/-
Speicherfähigkeit: durch Einsatzstoff und Brennstoff gegeben: +
Flexibilität: zeitlich und räumlich gegeben: +
Ergebnis: mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**
- c) *Substitutionsrelevanz:* auch bei steigender Elektromobilität wird mit Gaseinsatz zu rechnen sein; allerdings wird Bio-SNG nur eine untergeordnete Rolle spielen und ein Alleinstellungsmerkmal bei der Substitution von der Verwendung bei Pkw ist nicht gegeben: (-)
klimapolitische Systemdienlichkeit: Lock-in-Effekte begrenzt, da Potenzial begrenzt: +/-
Speicherfähigkeit: durch Einsatzstoff und Kraftstoff gegeben: +
Flexibilität: zeitlich und räumlich gegeben: +
Ergebnis: mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**
- d) *Substitutionsrelevanz:* Bio-SNG besitzt ein Alleinstellungsmerkmal bei der Substitution von Treibstoffen bei Flugzeug und Schiff, da Alternativen nur bedingt zur Verfügung stehen: +
klimapolitische Systemdienlichkeit: Lock-in-Effekte begrenzt, da Potenzial begrenzt und (verhinderte) Alternativen kaum in Sicht: (+)
Speicherfähigkeit: durch Einsatzstoff und Kraftstoff gegeben: +
Flexibilität: zeitlich und räumlich gegeben: +
Ergebnis: hoher Erfüllungsgrad → **Stufe 3**

17. BtL 100 MW (T11), Einsatz: Waldholz (R1), Landschaftspflege-Holz (R3), Altholz (R11),
 Industrieholz (R17),

18. BtL 100 MW (T11), Einsatz: Stroh (R4)

Energieprodukt(e)

- a) Kraftstoff, Straße (Pkw)
- b) Flug-/Schiffskraftstoff

c) Kraftstoff, Straße (Lkw)

Energieeffizienz:

Für alle Produkte gilt:

Wirkungsgrad 50 % (Motor) x 0,6 (BtL-Prozess) x 0,93 (Materialvorkette, gilt für Waldholz, wird für alle Materialien konservativ unterstellt)

$$0,5 \times 0,6 \times 0,93 = 0,28$$

Mechanische Energie → Carnot-Faktor: 1

Ergebnis: 0,28 = mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**

Treibhausgasbilanz:

Für alle Produkte gilt:

4 g CO₂Äq/MJ Kraftstoff (ifeu Daten, Differenzierung nach unterschiedlichen Einsatzstoffen aufgrund Datenlage nicht möglich), Referenzwert: 94 g CO₂Äq/MJ Kraftstoff

Ergebnis: 96 % Nettoeinsparung → **Stufe 3**

Kostensituation:

a) *Gestehungskosten:* 2,6 Cent/MJ Kraftstoff – Referenz: 1,7 Cent/MJ → 153 %

Ergebnis: mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**

→ **Stufe 1**

Umweltrisiken:

Die Umweltrisiken sind bis zur Nutzung für alle Energieprodukte gleich zu bewerten, da es sich um die gleiche Konversionstechnologie handelt.

► *Relevante Nicht-THG Emissionen Luft:* flüssiger Brennstoff bedeutet im Vergleich zu substituierten Kraft-/Treibstoffen keine Veränderung (+)

► *Relevante Wasser- und/oder Bodenbelastung:* keine: +

► *Risiko durch Reststoff:* keine (sofern bei Altholz (R11) Altholzklasse 4 ausgeschlossen ist): +

Ergebnis: hoher Erfüllungsgrad → **Stufe 3** (mit Einschränkung)

Transformation Energiesystem:

a) *Substitutionsrelevanz:* auch bei steigender Elektromobilität wird mit Kraftstoffeinsatz zu rechnen sein; für BtL ist ein Alleinstellungsmerkmal bei der Substitution von der Verwendung bei Pkw nicht gegeben: (-)

klimapolitische Systemdienlichkeit: Potenzieller Lock-in-Effekt zugunsten Flüssigkraftstoffen: (-)

Speicherfähigkeit: durch Einsatzstoff und Kraftstoff gegeben: +

Flexibilität: zeitlich und räumlich gegeben: +

Ergebnis: mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**

b) *Substitutionsrelevanz:* BtL besitzt ein Alleinstellungsmerkmal bei der Substitution von Treibstoffen bei Flugzeug und Schiff, da Alternativen nur bedingt zur Verfügung stehen: +

klimapolitische Systemdienlichkeit: Lock-in-Effekte begrenzt, da Potenzial begrenzt und (verhinderte) Alternativen kaum in Sicht: (+)

Speicherfähigkeit: durch Einsatzstoff und Kraftstoff gegeben: +

Flexibilität: zeitlich und räumlich gegeben: +

Ergebnis: hoher Erfüllungsgrad → **Stufe 3**

- c) *Substitutionsrelevanz:* auch bei steigender Elektromobilität wird mit Kraftstoffeinsatz gerade auch im Lkw-Bereich zu rechnen sein; für BtL ist ein Alleinstellungsmerkmal bei der Substitution von der Verwendung bei Lkw dennoch nicht gegeben: +/-

klimapolitische Systemdienlichkeit: Potenzieller Lock-in-Effekt zugunsten Flüssigkraftstoffen: (-)

Speicherfähigkeit: durch Einsatzstoff und Kraftstoff gegeben: +

Flexibilität: zeitlich und räumlich gegeben: +

Ergebnis: mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**

19. Biogasanlage Nassvergärung 75 kW (T12), Einsatz: Landschaftspflege-Halm (R2), Gülle (R5), Festmist (R6), Grüngut krautig (R9), Küchen- und Kantinenabfälle (R24)

20. Biogasanlage Nassvergärung 75 kW (T12), Einsatz: Ernterückstände (R7)

Energieprodukt(e)

Strom (zusätzliche Wärmenutzung ohne Minderung des Stromwirkungsgrads möglich, wird in Effizienz berücksichtigt)

Energieeffizienz:

19. Landschaftspflege-Halm (R2), Gülle (R5), Festmist (R6), Grüngut krautig (R9)

Wirkungsgrad (Strom): $36 \% (\text{Motor}) \times 0,5 (\text{Gasbildung aus Substrat, Einschätzung für die Mischung auf Basis BioGrace II und BioEm}) \times 0,68 (\text{Materialvorkette})$

$= 0,12$

plus Wärme: $20 \% (\text{nutzbare Abwärme}) \times 0,5 (\text{Gasbildung aus Substrat, Einschätzung für die Mischung auf Basis BioGrace II und BioEm}) \times 0,68 (\text{Materialvorkette})$

$= 0,07$

Strom → Carnot-Faktor: 1, Wärme: Carnot-Faktor: 0,2

$0,12 \times 1 + 0,07 \times 0,2 = 0,13$

Ergebnis: 0,13 = geringer Erfüllungsgrad → **Stufe 1**

20. Ernterückstände (R7)

Wirkungsgrad (Strom): $36 \% (\text{Motor}) \times 0,62 (\text{Gasbildung aus Substrat, Einschätzung für die Mischung auf Basis BioGrace II und BioEm}) \times 0,62 (\text{Materialvorkette inkl. Aufbereitung})$

$= 0,14$

plus Wärme: $20 \% (\text{nutzbare Abwärme}) \times 0,62 (\text{Gasbildung aus Substrat, Einschätzung für die Mischung auf Basis BioGrace II und BioEm}) \times 0,62 (\text{Materialvorkette inkl. Aufbereitung})$

$= 0,08$

Strom → Carnot-Faktor: 1, Wärme: Carnot-Faktor: 0,2

$0,14 \times 1 + 0,08 \times 0,2 = 0,15$

Ergebnis: 0,15 = mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**

Treibhausgasbilanz:

19. 36,7 g CO₂Äq/MJ Strom (ifeu Daten)⁸⁴, Referenzwert: 183 g CO₂Äq/MJ Strom

Ergebnis: 79 % Nettoeinsparung = mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**

⁸⁴ Ein THG-Bonus für die Vergärung von Gülle anstelle deren direkten Aufbringung, ist bei dieser Berechnung nicht einbezogen. Eine höhere Punktzahl als 3 ist im Übrigen nicht erreichbar.

20. 39,7 g CO₂Äq/MJ Strom (ifeu Daten), Referenzwert: 183 g CO₂Äq/MJ Strom
 Ergebnis: 78 % Nettoeinsparung = mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**

Kostensituation:

Gestehungskosten: 8,3 Cent/MJ Strom – Referenz: 2,2 Cent/MJ → 375 %
Ergebnis: geringer Erfüllungsgrad → **Stufe 1**

Umweltrisiken:

- ▶ *Relevante Nicht-THG Emissionen Luft:* Bei kleinen Anlagen ggf. schwierigere Kontrolle von Geruch und anderen Emissionen (-)
- ▶ *Relevante Wasser- und/oder Bodenbelastung:* Nutzung der Gärreste (Problematik der Stickstoffkonzentration), ist aber bei Kleinanlagen eher kein größeres Problem: +/-
- ▶ *Risiko durch Reststoff:* siehe oben: +/-
- ▶ *Sonstiges:* bei sachgemäßer Nutzung der Gärreste positive Rückführung der Nährstoffe: +

Ergebnis: mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**

Transformation Energiesystem:

- ▶ *Substitutionsrelevanz:* geringe Substitutionsrelevanz bei großem Angebot erneuerbarer Quellen im Strommarkt: -
- ▶ *klimapolitische Systemdienlichkeit:* Potenzielle Lock-in-Effekte: (-)
- ▶ *Speicherfähigkeit:* von Einsatzstoff und Brennstoff begrenzt: (+)
- ▶ *Flexibilität:* zeitlich und räumlich gegeben: +

Ergebnis: mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**

21. Biogasanlage Nassvergärung 500 kW (T13), Einsatz: Gülle (R5), Festmist (R6), Grüngut krautig (R9),

Küchen- und Kantinenabfälle (R24)

22. Biogasanlage Nassvergärung 500 kW (T13), Einsatz: Ernterückstände (R7)

Energieprodukt(e)

Strom (zusätzliche Wärmenutzung ohne Minderung des Stromwirkungsgrads möglich, wird in Effizienz berücksichtigt)

Energieeffizienz:

21. Einsatz: Gülle (R5), Festmist (R6), Grüngut krautig (R9)

Wirkungsgrad (Strom): 36 % (Motor) x 0,5 (Gasbildung aus Substrat, Einschätzung für die Mischung auf Basis BioGrace II und BioEm) x 0,75 (Materialvorkette)
 = 0,13

plus Wärme: 20 % (nutzbare Abwärme) x 0,5 (Gasbildung aus Substrat, Einschätzung für die Mischung auf Basis BioGrace II und BioEm) x 0,75 (Materialvorkette)
 = 0,08

Strom → Carnot-Faktor: 1, Wärme: Carnot-Faktor: 0,2

$$0,13 \times 1 + 0,08 \times 0,2 = 0,145$$

Ergebnis: 0,13 = geringer Erfüllungsgrad → **Stufe 1**

22. Einsatz: Ernterückstände (R7)

Wirkungsgrad (Strom): 36 % (Motor) x 0,76 (Gasbildung aus Substrat, Einschätzung für die Mischung auf Basis BioGrace II und BioEm) x 0,62 (Materialvorkette inkl. Aufbereitung)

$$= 0,17$$

plus Wärme: 20 % (nutzbare Abwärme) x 0,76 (Gasbildung aus Substrat, Einschätzung für die Mischung auf Basis BioGrace II und BioEm) x 0,62 (Materialvorkette inkl. Aufbereitung)

$$= 0,11$$

Strom → Carnot-Faktor: 1, Wärme: Carnot-Faktor: 0,2

$$0,17 \times 1 + 0,11 \times 0,2 = 0,19$$

Ergebnis: 0,19 = mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**

Treibhausgasbilanz:

21. 33,3 g CO₂Äq/MJ Strom (ifeu Daten)⁸⁵, Referenzwert: 183 g CO₂Äq/MJ Strom

Ergebnis: 82 % Nettoeinsparung = hoher Erfüllungsgrad → **Stufe 3**

22. 36,1 g CO₂Äq/MJ Strom (ifeu Daten), Referenzwert: 183 g CO₂Äq/MJ Strom

Ergebnis: 80 % Nettoeinsparung = hoher Erfüllungsgrad → **Stufe 3**

Kostensituation:

Gestehungskosten: 4,7 Cent/MJ Strom – Referenz: 2,2 Cent/MJ → 210 %

Ergebnis: geringer Erfüllungsgrad → **Stufe 1**

Umweltrisiken:

- ▶ *Relevante Nicht-THG Emissionen Luft:* Bei größeren Anlagen keine schwierigere Kontrolle von Geruch und anderen Emissionen: +
- ▶ *Relevante Wasser- und/oder Bodenbelastung:* Nutzung der Gärreste (Problematik der Stickstoffkonzentration), ist bei Großanlagen aufgrund der räumlichen Konzentration eher ein Problem: -
- ▶ *Risiko durch Reststoff:* siehe oben: -
- ▶ *Sonstiges:* bei sachgemäßer Nutzung der Gärreste positive Rückführung der Nährstoffe: +

Ergebnis: mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**

Transformation Energiesystem:

- ▶ *Substitutionsrelevanz:* geringe Substitutionsrelevanz bei großem Angebot erneuerbarer Quellen im Strommarkt: -
- ▶ *klimapolitische Systemdienlichkeit:* da überwiegend dezentrale Kleinanlagen kein Konflikt bezüglich Lock-in-Effekte; Ausbau Wärmenutzung möglich : (+)
- ▶ *Speicherfähigkeit:* von Einsatzstoff und Brennstoff begrenzt: (+)

⁸⁵ Ein THG-Bonus für die Vergärung von Gülle anstelle deren direkten Aufbringung, ist bei dieser Berechnung nicht einbezogen. Eine höhere Punktzahl als 3 ist im Übrigen nicht erreichbar.

► *Flexibilität*: zeitlich und räumlich gegeben: +

Ergebnis: mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2** (Tendenz zu höher)

23. Biogasanlage Trockenvergärung 800 kW (T14), Einsatz: Landschaftspflege-Halm (R2), Gülle (R5),

Festmist (R6), Ernterückstände (R7),
Grüngut krautig (R9), Schwarzlauge (R16)

24. Biogasanlage Trockenvergärung 800 kW (T14), Einsatz: Stroh (R4)

25. Biogasanlage Trockenvergärung 800 kW (T14), Einsatz: Biogut (R8), Küchen- und Kantinenabfälle

(R24)

Energieprodukt(e)

Strom (zusätzliche Wärmenutzung ohne Minderung des Stromwirkungsgrads möglich)

Energieeffizienz:

23. Einsatz Landschaftspflege-Halm (R2), Gülle (R5), Festmist (R6), Ernterückstände (R7), Grüngut krautig (R9), Schwarzlauge (R16)

Wirkungsgrad (Strom): $36 \% (\text{Motor}) \times 0,4$ (Gasbildung aus Substrat, Einschätzung für die Mischung auf Basis BioGrace II und BioEm) $\times 0,75$ (Materialvorkette)
= 0,11

plus Wärme: $20 \% (\text{nutzbare Abwärme}) \times 0,4$ (Gasbildung aus Substrat, Einschätzung für die Mischung auf Basis BioGrace II und BioEm) $\times 0,75$ (Materialvorkette)
= 0,06

Strom → Carnot-Faktor: 1, Wärme: Carnot-Faktor: 0,2
 $0,11 \times 1 + 0,06 \times 0,2 = 0,13$

Ergebnis: 0,13 = geringer Erfüllungsgrad → **Stufe 1**

24. Einsatz: Stroh (R4)

Wirkungsgrad (Strom): $36 \% (\text{Motor}) \times 0,3$ (Gasbildung aus Substrat, Einschätzung auf Basis BioGrace II und BioEm) $\times 0,7$ (Materialvorkette)
= 0,08

plus Wärme: $20 \% (\text{nutzbare Abwärme}) \times 0,4$ (Gasbildung aus Substrat, Einschätzung auf Basis BioGrace II und BioEm) $\times 0,7$ (Materialvorkette)
= 0,04

Strom → Carnot-Faktor: 1, Wärme: Carnot-Faktor: 0,2
 $0,08 \times 1 + 0,04 \times 0,2 = 0,09$

Ergebnis: 0,09 = geringer Erfüllungsgrad → **Stufe 1**

25. Einsatz: Biogut (R8)

Wirkungsgrad (Strom): $36 \% (\text{Motor}) \times 0,62$ (Gasbildung aus Substrat, Einschätzung auf Basis BioGrace II und BioEm) $\times 0,9$ (Materialvorkette)
= 0,2

plus Wärme: $20 \% (\text{nutzbare Abwärme}) \times 0,62$ (Gasbildung aus Substrat, Einschätzung auf Basis BioGrace II und BioEm) $\times 0,9$ (Materialvorkette)
= 0,11

Strom → Carnot-Faktor: 1, Wärme: Carnot-Faktor: 0,2
 $0,2 \times 1 + 0,11 \times 0,2 = 0,09$

Ergebnis: 0,22 = geringer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**

Treibhausgasbilanz:

23.: 36,1 g CO₂Äq/MJ Strom (ifeu Daten), Referenzwert: 183 g CO₂Äq/MJ Strom
Ergebnis: 80 % Nettoeinsparung → **Stufe 3**

24.: 27,8 g CO₂Äq/MJ Strom (ifeu Daten), Referenzwert: 183 g CO₂Äq/MJ Strom
Ergebnis: 85 % Nettoeinsparung → **Stufe 3**

25.: 38,9 g CO₂Äq/MJ Strom (ifeu Daten), Referenzwert: 183 g CO₂Äq/MJ Strom
Ergebnis: 79 % Nettoeinsparung → **Stufe 3**

Kostensituation:

Gestehungskosten: 4,1 Cent/MJ Strom – Referenz: 2,2 Cent/MJ → 190 %

Ergebnis: geringer Erfüllungsgrad → **Stufe 1**

Umweltrisiken:

Im Detail können durch die Bereitstellung der verschiedenen Reststoffarten (Gülle, Landschaftspflegematerial, Stroh, Biogut) auch verschiedene Umweltwirkungen im Kontext der Bereitstellung der Stoffe verbunden sein. Eine Differenzierung hier würde jedoch das Maß an Detailgenauigkeit dieser Bewertung übersteigen. Sie werden daher einheitlich bewertet auf der Basis der potenziellen Auswirkungen durch Behandlung und Nutzung.

- ▶ *Relevante Nicht-THG Emissionen Luft:* Bei größeren Anlagen keine schwierigere Kontrolle von Geruch und anderen Emissionen: +
- ▶ *Relevante Wasser- und/oder Bodenbelastung:* Nutzung der Gärreste (Problematik der Stickstoffkonzentration), ist bei Großanlagen aufgrund der räumlichen Konzentration eher ein Problem: -
- ▶ *Risiko durch Reststoff:* siehe oben: -
- ▶ *Sonstiges:* bei sachgemäßer Nutzung der Gärreste positive Rückführung der Nährstoffe: +

Ergebnis: mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**

Transformation Energiesystem:

- ▶ *Substitutionsrelevanz:* geringe Substitutionsrelevanz bei großem Angebot erneuerbarer Quellen im Strommarkt: -
- ▶ *klimapolitische Systemdienlichkeit:* da überwiegend dezentrale Kleinanlagen kein Konflikt bezüglich Lock-in-Effekte; Ausbau Wärmenutzung möglich : (+)
- ▶ *Speicherfähigkeit:* von Einsatzstoff und Brennstoff begrenzt: (+)
- ▶ *Flexibilität:* zeitlich und räumlich gegeben: +

Ergebnis: mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2** (Tendenz zu höher für Br. 23)

26. Biomethananlage Nassvergärung (T15), Einsatz: Gülle (R5), Festmist (R6), Grüngut krautig (R9),

Küchen- und Kantinenabfälle (R24)

27. Biomethananlage Nassvergärung (T15), Einsatz: Ernterückstände (R7)

Energieprodukt(e)

- d) Gebäudewärme (über Gasleitung)
- e) Prozesswärme (niedrige Temperatur)
- f) Prozesswärme (mittlere Temperatur)
- g) Strom (grundsätzlich plus KWK Wärme, hier aber Maximierung Strom betrachtet)
- h) Kraftstoff, Straße, Pkw
- i) Flug-/Schiffskraftstoff
- j) Kraftstoff, Straße, Lkw

Energieeffizienz:

Für Pfad 26 (Gülle etc.):

- a) *Wirkungsgrad:* 90 % (Gastherme) x 0,55 (Gasbildung aus Substrat, Einschätzung für die Mischung auf Basis BioGrace II und BioEm) x 0,68 (Materialvorkette) x 0,97 (Methan-Upgrade)
= 0,33
Strom → Carnot-Faktor: 0,2
Ergebnis: 0,07 = geringer Erfüllungsgrad → Stufe 1
- b) *Wirkungsgrad:* 90 % (Gaskessel) x 0,55 (Gasbildung aus Substrat, Einschätzung für die Mischung auf Basis BioGrace II und BioEm) x 0,68 (Materialvorkette) x 0,97 (Methan-Upgrade)
= 0,33
Temperatur 150°C → Carnot-Faktor: 0,3
Ergebnis: 0,1 → **Stufe 1**
- c) *Wirkungsgrad:* 90 % (Gaskessel) x 0,55 (Gasbildung aus Substrat, Einschätzung für die Mischung auf Basis BioGrace II und BioEm) x 0,68 (Materialvorkette) x 0,97 (Methan-Upgrade)
= 0,33
Temperatur 300°C → Carnot-Faktor: 0,5
Ergebnis: 0,17 → **Stufe 1**
- d) *Wirkungsgrad:* (Strom): 40 % (Dampfkessel) x 0,55 (Gasbildung aus Substrat, Einschätzung für die Mischung auf Basis BioGrace II und BioEm) x 0,68 (Materialvorkette) x 0,97 (Methan-Upgrade)
= 0,14
Strom → Carnot-Faktor: 1
Ergebnis: 0,14 = geringer Erfüllungsgrad → **Stufe 1**
- e) *Wirkungsgrad:* (Strom): 50 % (Motor) x 0,55 (Gasbildung aus Substrat, Einschätzung für die Mischung auf Basis BioGrace II und BioEm) x 0,68 (Materialvorkette) x 0,97 (Methan-Upgrade) x 0,95 (Komprimierung)
= 0,17
Kraftstoff → Carnot-Faktor: 1
Ergebnis: 0,17 → **Stufe 2**

- f) *Wirkungsgrad*: (Strom): 50 % (Motor) x 0,55 (Gasbildung aus Substrat, Einschätzung für die Mischung auf Basis BioGrace II und BioEm) x 0,68 (Materialvorkette) x 0,97 (Methan-Up-grade) x 0,9 (Verflüssigung)
= 0,16
Kraftstoff → Carnot-Faktor: 1
Ergebnis: 0,16 → **Stufe 2**
- g) *Wirkungsgrad*: (Strom): 50 % (Motor) x 0,55 (Gasbildung aus Substrat, Einschätzung für die Mischung auf Basis BioGrace II und BioEm) x 0,68 (Materialvorkette) x 0,97 (Methan-Up-grade) x 0,95 (Komprimierung)
= 0,17
Kraftstoff → Carnot-Faktor: 1
Ergebnis: 0,17 → **Stufe 2**

Für Pfad 27 (Ernterückstände): Daten wie bei Pfad 26, Unterschied nur in Gasbildung (0,76 statt 0,55)

- a) Wirkungsgrad insgesamt: 45 %; Temperatur <100°C → Carnot-Faktor: 0,2
Ergebnis: 0,09 → **Stufe 1**
- b) Wirkungsgrad insgesamt: 45 %; Temperatur 150°C → Carnot-Faktor: 0,3
Ergebnis: 0,14 → **Stufe 1**
- c) Wirkungsgrad insgesamt: 45 %; Temperatur 300°C → Carnot-Faktor: 0,5
Ergebnis: 0,23 → **Stufe 2**
- d) Wirkungsgrad insgesamt: 20 %; Strom → Carnot-Faktor: 1
Ergebnis: 0,2 → **Stufe 2**
- e) Wirkungsgrad insgesamt: 27 %; Energieträger → Carnot-Faktor: 1
Ergebnis: 0,24 → **Stufe 2**
- f) Wirkungsgrad insgesamt: 27 %; Energieträger → Carnot-Faktor: 1
Ergebnis: 0,23 → **Stufe 2**
- g) Wirkungsgrad insgesamt: 27 %; Energieträger → Carnot-Faktor: 1
Ergebnis: 0,23 → **Stufe 2**

Treibhausgasbilanz:

Für Pfad 26 (Gülle etc.):

- a) 24 g CO₂Äq/MJ Wärme (ifeu Daten), Referenzwert: 80 g CO₂Äq/MJ Wärme
Ergebnis: 70 % Nettoeinsparung → **Stufe 2**
- b) 27 g CO₂Äq/MJ Wärme (ifeu Daten), Referenzwert: 80 g CO₂Äq/MJ Wärme
Ergebnis: 66 % Nettoeinsparung → **Stufe 2**
- c) 27 g CO₂Äq/MJ Wärme (ifeu Daten), Referenzwert: 80 g CO₂Äq/MJ Wärme
Ergebnis: 66 % Nettoeinsparung → **Stufe 2**
- d) 61 g CO₂Äq/MJ Strom (ifeu Daten), Referenzwert: 183 g CO₂Äq/MJ Strom
Ergebnis: 67 % Nettoeinsparung → **Stufe 2**
- e) 24 g CO₂Äq/MJ Energieträger (ifeu Daten), Referenzwert: 94 g CO₂Äq/MJ Kraftstoff
Ergebnis: 74% Nettoeinsparung → **Stufe 2**

- f) 25 g CO₂Äq/MJ Energieträger (ifeu Daten), Referenzwert: 94 g CO₂Äq/MJ Kraftstoff
Ergebnis: 73 % Nettoeinsparung → **Stufe 2**
- g) 24 g CO₂Äq/MJ Energieträger (ifeu Daten), Referenzwert: 94 g CO₂Äq/MJ Kraftstoff
Ergebnis: 74% Nettoeinsparung → **Stufe 2**

Für Pfad 27 (Ernterückstände):

- a) 15 g CO₂Äq/MJ Wärme (ifeu Daten), Referenzwert: 80 g CO₂Äq/MJ Wärme
Ergebnis: 81 % Nettoeinsparung → **Stufe 3**
- b) 17 g CO₂Äq/MJ Wärme (ifeu Daten), Referenzwert: 80 g CO₂Äq/MJ Wärme
Ergebnis: 79 % Nettoeinsparung → **Stufe 2**
- c) 17 g CO₂Äq/MJ Wärme (ifeu Daten), Referenzwert: 80 g CO₂Äq/MJ Wärme
Ergebnis: 79 % Nettoeinsparung → **Stufe 2**
- d) 38 g CO₂Äq/MJ Strom (ifeu Daten), Referenzwert: 183 g CO₂Äq/MJ Strom
Ergebnis: 80 % Nettoeinsparung → **Stufe 2**
- e) 15 g CO₂Äq/MJ Energieträger (ifeu Daten), Referenzwert: 94 g CO₂Äq/MJ Kraftstoff
Ergebnis: 84% Nettoeinsparung → **Stufe 3**
- f) 16 g CO₂Äq/MJ Energieträger (ifeu Daten), Referenzwert: 94 g CO₂Äq/MJ Kraftstoff
Ergebnis: 83 % Nettoeinsparung → **Stufe 3**
- g) 15 g CO₂Äq/MJ Energieträger (ifeu Daten), Referenzwert: 94 g CO₂Äq/MJ Kraftstoff
Ergebnis: 84% Nettoeinsparung → **Stufe 3**

Kostensituation:

- a) *Gestehungskosten:* 2,8 Cent/MJ Wärme – Referenz: 2,8 Cent/MJ → 100 %
Ergebnis: hoher Erfüllungsgrad → **Stufe 3**
- b) *Gestehungskosten:* 2,8 Cent/MJ Wärme – Referenz: 2,8 Cent/MJ → 100 %
Ergebnis: hoher Erfüllungsgrad → **Stufe 3**
- c) *Gestehungskosten:* 2,8 Cent/MJ Wärme – Referenz: 2,8 Cent/MJ → 100 %
Ergebnis: hoher Erfüllungsgrad → **Stufe 3**
- d) *Gestehungskosten:* 6,3 Cent/MJ Strom – Referenz: 2,2 Cent/MJ → 280 %
Ergebnis: geringer Erfüllungsgrad → **Stufe 1**
- e) *Gestehungskosten:* 3 Cent/MJ Strom – Referenz: 1,7 Cent/MJ → 180 %
Ergebnis: mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**
- f) *Gestehungskosten:* 3 Cent/MJ Strom – Referenz: 1,7 Cent/MJ → 180 %
Ergebnis: mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**
- g) *Gestehungskosten:* 3 Cent/MJ Strom – Referenz: 1,7 Cent/MJ → 180 %
Ergebnis: mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**

Umweltrisiken:

Im Detail können durch die Bereitstellung der verschiedenen Reststoffarten (Gülle, Landschaftspflegematerial, Stroh, Biogut) auch verschiedene Umweltwirkungen im Kontext der Bereitstellung der Stoffe verbunden sein. Eine Differenzierung hier würde jedoch das Maß an Detailgenauigkeit dieser Bewertung übersteigen. Sie werden daher einheitlich bewertet auf der Basis der potenziellen Auswirkungen durch Behandlung und Nutzung.

- ▶ *Relevante Nicht-THG Emissionen Luft:* Bei größeren Anlagen keine schwierigere Kontrolle von Geruch und anderen Emissionen, dafür große Transportstrecken, v.a. für Gülle (großes Volumen, geringer vergärbare Gehalt) kritisch: +/-
- ▶ *Relevante Wasser- und/oder Bodenbelastung:* Nutzung der Gärreste (Problematik der Stickstoffkonzentration), ist bei Großanlagen aufgrund der räumlichen Konzentration eher ein Problem: -
- ▶ *Risiko durch Reststoff:* siehe oben: -
- ▶ *Sonstiges:* bei sachgemäßer Nutzung der Gärreste positive Rückführung der Nährstoffe: +

Ergebnis: mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**

Transformation Energiesystem:

a) Gebäudewärme

- ▶ *Substitutionsrelevanz:* ersetzt fossile Wärme, wo Wärmenetze schwierig umzusetzen sind, konkurriert mit alternativen erneuerbaren Wärmesysteme: (+)
- ▶ *klimapolitische Systemdienlichkeit:* kann auch bei breiter Umsetzung auch den Ausbau von Wärmenetzen blockieren: (-)
- ▶ *Speicherfähigkeit: als Einsatzstoff:* +
- ▶ *Flexibilität:* zeitlich und räumlich gegeben: +

Ergebnis: hoher Erfüllungsgrad → **Stufe 3**

b) Prozesswärme

- ▶ *Substitutionsrelevanz:* Für einzelne industrielle Anwendungen (v.a. in speziellen Nischen, z.B. Nahrungsmittel-, Papier-, Glasindustrie) geeignet: +
- ▶ *klimapolitische Systemdienlichkeit:* regenerative Wärmequellen für Industrie suchen Lösungsansätze: +
- ▶ *Speicherfähigkeit: als Einsatzstoff:* +
- ▶ *Flexibilität:* zeitlich und räumlich gegeben: +

Ergebnis: hoher Erfüllungsgrad → **Stufe 3**

c) siehe b)

d) Strom

- ▶ *Substitutionsrelevanz:* geringe Substitutionsrelevanz bei großem Angebot erneuerbarer Quellen im Strommarkt: -
- ▶ *klimapolitische Systemdienlichkeit:* Potenzielle Lock-in-Effekte: (-)
- ▶ *Speicherfähigkeit:* von Einsatzstoff und Brennstoff begrenzt: (+)

- *Flexibilität*: zeitlich und räumlich gegeben: +

Ergebnis: mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**

e) Kraftstoff, Straße, Pkw

- *Substitutionsrelevanz*: auch bei steigender Elektromobilität wird mit Kraftstoffeinsatz zu rechnen sein; für C ist ein Alleinstellungsmerkmal bei der Substitution von der Verwendung bei Pkw nicht gegeben: (-)
- *klimapolitische Systemdienlichkeit*: Potenzieller Lock-in-Effekt zugunsten Flüssigkraftstoffen: (-)
- *Speicherfähigkeit*: durch Einsatzstoff und Kraftstoff gegeben: +
- *Flexibilität*: zeitlich und räumlich gegeben: +

Ergebnis: mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**

f) Flug-/Schiffskraftstoff

- *Substitutionsrelevanz*: Bio-LNG besitzt ein Alleinstellungsmerkmal bei der Substitution von Treibstoffen bei Flugzeug und Schiff, da Alternativen nur bedingt zur Verfügung stehen: +
- *klimapolitische Systemdienlichkeit*: Lock-in-Effekte begrenzt, da Potenzial begrenzt und (verhinderte) Alternativen kaum in Sicht: (+)
- *Speicherfähigkeit*: durch Einsatzstoff und Kraftstoff gegeben: +
- *Flexibilität*: zeitlich und räumlich gegeben: +

Ergebnis: hoher Erfüllungsgrad → **Stufe 3**

g) Kraftstoff, Straße, Lkw – siehe e)

28. Biomethananlage Trockenvergärung (T16), Einsatz: Landschaftspfl.gut Halm (R2); Festmist (R6),

Ernterückst. (R7), Grüngut krautig (R9),
Schwarzlauge (R16)

29. Biomethananlage Trockenvergärung (T16), Einsatz: Stroh (R4)

30. Biomethananlage Trockenvergärung (T16), Einsatz: Biogut (R8), Küchen- und Kantinenabfälle (R24)

Energieprodukt(e)

- a) Prozesswärme (niedrige Temperatur)
- b) Prozesswärme (mittlere Temperatur)
- c) Strom (grundsätzlich plus KWK Wärme, hier aber Maximierung Strom betrachtet)
- d) Kraftstoff Straße (Pkw)
- e) Flug-/Schiffskraftstoff
- f) Kraftstoff Straße (Lkw)

Energieeffizienz:

Für Pfad 28 (Gülle etc.):

- a) *Wirkungsgrad:* 90 % (Gastherme) x 0,5 (Gasbildung aus Substrat, Einschätzung für die Mischung auf Basis BioGrace II und BioEm) x 0,75 (Materialvorkette) x 0,97 (Methan-Upgrade)
= 0,33
Strom → Carnot-Faktor: 0,2
Ergebnis: 0,07 = geringer Erfüllungsgrad → **Stufe 1**
- b) *Wirkungsgrad:* 90 % (Gaskessel) x 0,5 (Gasbildung aus Substrat, Einschätzung für die Mischung auf Basis BioGrace II und BioEm) x 0,75 (Materialvorkette) x 0,97 (Methan-Upgrade)
= 0,33
Temperatur 150°C → Carnot-Faktor: 0,3
Ergebnis: 0,11 = geringer Erfüllungsgrad → **Stufe 1**
- c) *Wirkungsgrad:* 90 % (Gaskessel) x 0,5 (Gasbildung aus Substrat, Einschätzung für die Mischung auf Basis BioGrace II und BioEm) x 0,75 (Materialvorkette) x 0,97 (Methan-Upgrade)
= 0,33
Temperatur 300°C → Carnot-Faktor: 0,5
Ergebnis: 0,17 = geringer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**
- d) *Wirkungsgrad:* (Strom): 40 % (Dampfkessel) x 0,5 (Gasbildung aus Substrat, Einschätzung für die Mischung auf Basis BioGrace II und BioEm) x 0,75 (Materialvorkette) x 0,97 (Methan-Upgrade)
= 0,14
Strom → Carnot-Faktor: 1
Ergebnis: 0,14 = geringer Erfüllungsgrad → **Stufe 1**
- e) *Wirkungsgrad:* (Strom): 50 % (Motor) x 0,5 (Gasbildung aus Substrat, Einschätzung für die Mischung auf Basis BioGrace II und BioEm) x 0,75 (Materialvorkette) x 0,97 (Methan-Upgrade) x 0,95 (Komprimierung)
= 0,17
Kraftstoff → Carnot-Faktor: 1
Ergebnis: 0,17 = mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**
- f) *Wirkungsgrad:* (Strom): 50 % (Motor) x 0,5 (Gasbildung aus Substrat, Einschätzung für die Mischung auf Basis BioGrace II und BioEm) x 0,75 (Materialvorkette) x 0,97 (Methan-Upgrade) x 0,9 (Verflüssigung)
= 0,16
Kraftstoff → Carnot-Faktor: 1
Ergebnis: 0,16 = mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**
- g) siehe e)

Für Pfad 29 (Stroh):

- a) *Wirkungsgrad:* 90 % (Gastherme) x 0,35 (Gasbildung aus Substrat, Einschätzung für die Mischung auf Basis BioGrace II und BioEm) x 0,75 (Materialvorkette) x 0,97 (Methan-Upgrade)
= 0,21

Strom → Carnot-Faktor: 0,2

Ergebnis: 0,04 = geringer Erfüllungsgrad → **Stufe 1**

- b) *Wirkungsgrad*: 90 % (Gaskessel) x 0,35 (Gasbildung aus Substrat, Einschätzung für die Mischung auf Basis BioGrace II und BioEm) x 0,75 (Materialvorkette) x 0,97 (Methan-Upgrade)
= 0,21

Temperatur 150°C → Carnot-Faktor: 0,3

Ergebnis: 0,06 = geringer Erfüllungsgrad → **Stufe 1**

- c) *Wirkungsgrad*: 90 % (Gaskessel) x 0,35 (Gasbildung aus Substrat, Einschätzung für die Mischung auf Basis BioGrace II und BioEm) x 0,75 (Materialvorkette) x 0,97 (Methan-Upgrade)
= 0,21

Temperatur 300°C → Carnot-Faktor: 0,5

Ergebnis: 0,1 = geringer Erfüllungsgrad → **Stufe 1**

- d) *Wirkungsgrad*: (Strom): 40 % (Dampfkessel) x 0,35 (Gasbildung aus Substrat, Einschätzung für die Mischung auf Basis BioGrace II und BioEm) x 0,75 (Materialvorkette) x 0,97 (Methan-Upgrade)
= 0,09

Strom → Carnot-Faktor: 1

Ergebnis: 0,09 = geringer Erfüllungsgrad → **Stufe 1**

- e) *Wirkungsgrad*: (Kraftstoff): 50 % (Motor) x 0,35 (Gasbildung aus Substrat, Einschätzung für die Mischung auf Basis BioGrace II und BioEm) x 0,75 (Materialvorkette) x 0,97 (Methan-Upgrade) x 0,95 (Komprimierung)
= 0,11

Kraftstoff → Carnot-Faktor: 1

Ergebnis: 0,11 = geringer Erfüllungsgrad → **Stufe 1**

- f) *Wirkungsgrad*: (Kraftstoff): 50 % (Motor) x 0,35 (Gasbildung aus Substrat, Einschätzung für die Mischung auf Basis BioGrace II und BioEm) x 0,75 (Materialvorkette) x 0,97 (Methan-Upgrade) x 0,9 (Verflüssigung)
= 0,11

Kraftstoff → Carnot-Faktor: 1

Ergebnis: 0,11 = geringer Erfüllungsgrad → **Stufe 1**

- g) siehe e)

Für Pfad 30 (Biogut):

- a) *Wirkungsgrad*: 90 % (Gastherme) x 0,61 (Gasbildung aus Substrat, Einschätzung für die Mischung auf Basis BioGrace II und BioEm) x 0,9 (Materialvorkette) x 0,97 (Methan-Upgrade)
= 0,48

Strom → Carnot-Faktor: 0,2

Ergebnis: 0,1 = geringer Erfüllungsgrad → **Stufe 1**

- b) *Wirkungsgrad*: 90 % (Gaskessel) x 0,61 (Gasbildung aus Substrat, Einschätzung für die Mischung auf Basis BioGrace II und BioEm) x 0,9 (Materialvorkette) x 0,97 (Methan-Upgrade)
= 0,48

Temperatur 150°C → Carnot-Faktor: 0,3

Ergebnis: 0,14 = geringer Erfüllungsgrad → **Stufe 1**

- c) *Wirkungsgrad*: 90 % (Gaskessel) x 0,61 (Gasbildung aus Substrat, Einschätzung für die Mischung auf Basis BioGrace II und BioEm) x 0,9 (Materialvorkette) x 0,97 (Methan-Upgrade) = 0,48
Temperatur 300°C → Carnot-Faktor: 0,5
Ergebnis: 0,24 = mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**
- d) *Wirkungsgrad*: (Strom): 40 % (Dampfkessel) x 0,61 (Gasbildung aus Substrat, Einschätzung für die Mischung auf Basis BioGrace II und BioEm) x 0,9 (Materialvorkette) x 0,97 (Methan-Upgrade) = 0,21
Strom → Carnot-Faktor: 1
Ergebnis: 0,21 = mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**
- e) *Wirkungsgrad*: (Kraftstoff): 50 % (Motor) x 0,61 (Gasbildung aus Substrat, Einschätzung für die Mischung auf Basis BioGrace II und BioEm) x 0,9 (Materialvorkette) x 0,97 (Methan-Upgrade) x 0,95 (Komprimierung) = 0,25
Kraftstoff → Carnot-Faktor: 1
Ergebnis: 0,25 = mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**
- f) *Wirkungsgrad*: (Kraftstoff): 50 % (Motor) x 0,61 (Gasbildung aus Substrat, Einschätzung für die Mischung auf Basis BioGrace II und BioEm) x 0,9 (Materialvorkette) x 0,97 (Methan-Upgrade) x 0,9 (Verflüssigung) = 0,24
Kraftstoff → Carnot-Faktor: 1
Ergebnis: 0,24 = mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**
- g) siehe e)

Treibhausgasbilanz:

Für Pfad 28 (Gülle etc.):

- a) 29,7 g CO₂Äq/MJ Wärme (BioGraceII, ifeu Daten), Referenzwert: 80 g CO₂Äq/MJ Wärme
Ergebnis: 63 % Nettoeinsparung → **Stufe 2**
- b) 29,7 g CO₂Äq/MJ Wärme (BioGraceII, ifeu Daten), Referenzwert: 80 g CO₂Äq/MJ Wärme
Ergebnis: 63 % Nettoeinsparung → **Stufe 2**
- c) 66,8 g CO₂Äq/MJ Strom (BioGraceII, ifeu Daten), Referenzwert: 183 g CO₂Äq/MJ Strom
Ergebnis: 64 % Nettoeinsparung → **Stufe 2**
- d) 26,7 g CO₂Äq/MJ Energieträger (BioGraceII, ifeu Daten), Referenzwert: 94 g CO₂Äq/MJ Kraftstoff
Ergebnis: 72% Nettoeinsparung → **Stufe 3**
- e) 26,7 g CO₂Äq/MJ Energieträger (BioGraceII, ifeu Daten), Referenzwert: 94 g CO₂Äq/MJ Kraftstoff
Ergebnis: 72 % Nettoeinsparung → **Stufe 3**
- f) 26,7 g CO₂Äq/MJ Energieträger (BioGraceII, ifeu Daten), Referenzwert: 94 g CO₂Äq/MJ Kraftstoff
Ergebnis: 72% Nettoeinsparung → **Stufe 3**

Für Pfad 29 (Stroh):

- a) 16,7 g CO₂Äq/MJ Wärme (BioGraceII, ifeu Daten), Referenzwert: 80 g CO₂Äq/MJ Wärme
Ergebnis: 79 % Nettoeinsparung → **Stufe 3**
- b) 16,7 g CO₂Äq/MJ Wärme (BioGraceII, ifeu Daten), Referenzwert: 80 g CO₂Äq/MJ Wärme
Ergebnis: 79 % Nettoeinsparung → **Stufe 3**
- c) 37,5 g CO₂Äq/MJ Strom (BioGraceII, ifeu Daten), Referenzwert: 183 g CO₂Äq/MJ Strom
Ergebnis: 80 % Nettoeinsparung → **Stufe 3**
- d) 15 g CO₂Äq/MJ Energieträger (BioGraceII, ifeu Daten), Referenzwert: 94 g CO₂Äq/MJ Kraftstoff
Ergebnis: 84% Nettoeinsparung → **Stufe 3**
- e) 15 g CO₂Äq/MJ Energieträger (BioGraceII, ifeu Daten), Referenzwert: 94 g CO₂Äq/MJ Kraftstoff
Ergebnis: 84 % Nettoeinsparung → **Stufe 3**
- f) 15 g CO₂Äq/MJ Energieträger (BioGraceII, ifeu Daten), Referenzwert: 94 g CO₂Äq/MJ Kraftstoff
Ergebnis: 84% Nettoeinsparung → **Stufe 3**

Für Pfad 30 (Biogut):

- a) 29,7 g CO₂Äq/MJ Wärme (BioGraceII, ifeu Daten), Referenzwert: 80 g CO₂Äq/MJ Wärme
Ergebnis: 63 % Nettoeinsparung → **Stufe 2**
- b) 29,7 g CO₂Äq/MJ Wärme (BioGraceII, ifeu Daten), Referenzwert: 80 g CO₂Äq/MJ Wärme
Ergebnis: 63 % Nettoeinsparung → **Stufe 2**
- c) 66,8 g CO₂Äq/MJ Strom (BioGraceII, ifeu Daten), Referenzwert: 183 g CO₂Äq/MJ Strom
Ergebnis: 64 % Nettoeinsparung → **Stufe 2**
- d) 26,7 g CO₂Äq/MJ Energieträger (BioGraceII, ifeu Daten), Referenzwert: 94 g CO₂Äq/MJ Kraftstoff
Ergebnis: 72% Nettoeinsparung → **Stufe 3**
- e) 26,7 g CO₂Äq/MJ Energieträger (BioGraceII, ifeu Daten), Referenzwert: 94 g CO₂Äq/MJ Kraftstoff
Ergebnis: 72 % Nettoeinsparung → **Stufe 3**
- f) 26,7 g CO₂Äq/MJ Energieträger (BioGraceII, ifeu Daten), Referenzwert: 94 g CO₂Äq/MJ Kraftstoff
Ergebnis: 72% Nettoeinsparung → **Stufe 3**

Kostensituation:

- a) *Gestehungskosten:* 2,5 Cent/MJ Wärme – Referenz: 2,8 Cent/MJ → 89 %
Ergebnis: hoher Erfüllungsgrad → **Stufe 3**
- b) *Gestehungskosten:* 2,5 Cent/MJ Wärme – Referenz: 2,8 Cent/MJ → 89 %
Ergebnis: hoher Erfüllungsgrad → **Stufe 3**
- c) *Gestehungskosten:* 2,5 Cent/MJ Wärme – Referenz: 2,8 Cent/MJ → 89 %
Ergebnis: hoher Erfüllungsgrad → **Stufe 3**
- d) *Gestehungskosten:* 5,6 Cent/MJ Strom – Referenz: 2,2 Cent/MJ → 250 %
Ergebnis: geringer Erfüllungsgrad → **Stufe 1**

- e) *Gestehungskosten*: 2,7 Cent/MJ Strom – Referenz: 1,7 Cent/MJ → 160 %
Ergebnis: mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**
- f) *Gestehungskosten*: 2,7 Cent/MJ Strom – Referenz: 1,7 Cent/MJ → 160 %
Ergebnis: mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**
- g) *Gestehungskosten*: 2,7 Cent/MJ Strom – Referenz: 1,7 Cent/MJ → 160 %
Ergebnis: mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**

Umweltrisiken:

Im Detail können durch die Bereitstellung der verschiedenen Reststoffarten (Gülle, Landschaftspflegematerial, Stroh, Biogut) auch verschiedene Umweltwirkungen im Kontext der Bereitstellung der Stoffe verbunden sein. Eine Differenzierung hier würde jedoch das Maß an Detailgenauigkeit dieser Bewertung übersteigen. Sie werden daher einheitlich bewertet auf der Basis der potenziellen Auswirkungen durch Behandlung und Nutzung.

- *Relevante Nicht-THG Emissionen Luft*: Bei größeren Anlagen keine schwierigere Kontrolle von Geruch und anderen Emissionen, dafür große Transportstrecken, v.a. für Gülle (großes Volumen, geringer vergärbare Gehalt) kritisch: +/-
- *Relevante Wasser- und/oder Bodenbelastung*: Nutzung der Gärreste (Problematik der Stickstoffkonzentration), ist bei Großanlagen aufgrund der räumlichen Konzentration eher ein Problem: -
- *Risiko durch Reststoff*: siehe oben: -
- *Sonstiges*: bei sachgemäßer Nutzung der Gärreste positive Rückführung der Nährstoffe: +

Ergebnis: mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**

Transformation Energiesystem:

a) Gebäudewärme

- *Substitutionsrelevanz*: ersetzt fossile Wärme, wo Wärmenetze schwierig umzusetzen sind, konkurriert mit alternativen erneuerbaren Wärmesysteme: (+)
- *klimapolitische Systemdienlichkeit*: kann auch bei breiter Umsetzung auch den Ausbau von Wärmenetzen blockieren: (-)
- *Speicherfähigkeit: als Einsatzstoff*: +
- *Flexibilität*: zeitlich und räumlich gegeben: +

Ergebnis: hoher Erfüllungsgrad → **Stufe 3**

b) Prozesswärme

- *Substitutionsrelevanz*: Für einzelne industrielle Anwendungen (v.a. in speziellen Nischen, z.B. Nahrungsmittel-, Papier-, Glasindustrie) geeignet: +
- *klimapolitische Systemdienlichkeit*: regenerative Wärmequellen für Industrie suchen Lösungsansätze: +

► *Speicherfähigkeit*: als Einsatzstoff: +

► *Flexibilität*: zeitlich und räumlich gegeben: +

Ergebnis: hoher Erfüllungsgrad → **Stufe 3**

c) siehe b)

d) Strom

► *Substitutionsrelevanz*: geringe Substitutionsrelevanz bei großem Angebot erneuerbarer Quellen im Strommarkt: -

► *klimapolitische Systemdienlichkeit*: Potenzielle Lock-in-Effekte: (-)

► *Speicherfähigkeit*: von Einsatzstoff und Brennstoff begrenzt: (+)

► *Flexibilität*: zeitlich und räumlich gegeben: +

Ergebnis: mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**

e) Kraftstoff, Straße, Pkw

► *Substitutionsrelevanz*: auch bei steigender Elektromobilität wird mit Kraftstoffeinsatz zu rechnen sein; für C ist ein Alleinstellungsmerkmal bei der Substitution von der Verwendung bei Pkw nicht gegeben: (-)

► *klimapolitische Systemdienlichkeit*: Potenzieller Lock-in-Effekt zugunsten Flüssigkraftstoffen: (-)

► *Speicherfähigkeit*: durch Einsatzstoff und Kraftstoff gegeben: +

► *Flexibilität*: zeitlich und räumlich gegeben: +

Ergebnis: mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**

f) Flug-/Schiffskraftstoff

► *Substitutionsrelevanz*: Bio-LNG besitzt ein Alleinstellungsmerkmal bei der Substitution von Treibstoffen bei Flugzeug und Schiff, da Alternativen nur bedingt zur Verfügung stehen: +

► *klimapolitische Systemdienlichkeit*: Lock-in-Effekte begrenzt, da Potenzial begrenzt und (verhinderte) Alternativen kaum in Sicht: (+)

► *Speicherfähigkeit*: durch Einsatzstoff und Kraftstoff gegeben: +

► *Flexibilität*: zeitlich und räumlich gegeben: +

Ergebnis: hoher Erfüllungsgrad → **Stufe 3**

g) Kraftstoff, Straße, Lkw – siehe e)

31. Ethanolanlage Lignozellulose (T17), Einsatz: Stroh (R4)

Energieprodukt(e)

a) Kraftstoff Straße (Pkw)

b) Flug-/Schiffskraftstoff

Energieeffizienz:

Wirkungsgrad: 50 % (Motor) x 31 % (MJ Ethanol/MJ Stroh) x 0,9 (Bereitstellung) x 1,5 (Aufschlag für Nutzung Kuppelprodukte) = 21 %

Kraftstoff → Carnot-Faktor: 1

Ergebnis: 0,21 = mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**

Treibhausgasbilanz:

41 g CO₂Äq/MJ Kraftstoff (BioGraceII, ifeu Daten), Referenzwert: 94 g CO₂Äq/MJ Kraftstoff

Ergebnis: 56 % Nettoeinsparung → **Stufe 2**

Kostensituation:

Gestehungskosten: 3 Cent/MJ Strom – Referenz: 1,7 Cent/MJ → 180 %

Ergebnis: mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**

Umweltrisiken:

► *Relevante Nicht-THG Emissionen Luft:* Großtechnische Anlagen mit hohem Kontrollniveau für Emissionen: (+)

► *Relevante Wasser- und/oder Bodenbelastung:* keine: +

► *Risiko durch Reststoff:* keine: +-

Ergebnis: hoher Erfüllungsgrad → **Stufe 3**

Transformation Energiesystem:

a) Kraftstoff, Straße, Pkw

► *Substitutionsrelevanz:* auch bei steigender Elektromobilität wird mit Kraftstoffeinsatz zu rechnen sein; für C ist ein Alleinstellungsmerkmal bei der Substitution von der Verwendung bei Pkw nicht gegeben: (-)

► *klimapolitische Systemdienlichkeit:* Potenzieller Lock-in-Effekt zugunsten Flüssigkraftstoffen: (-)

► *Speicherfähigkeit:* durch Einsatzstoff und Kraftstoff gegeben: +

► *Flexibilität:* zeitlich und räumlich gegeben: +

Ergebnis: mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**

b) Flug-/Schiffskraftstoff

► *Substitutionsrelevanz:* Bio-LNG besitzt ein Alleinstellungsmerkmal bei der Substitution von Treibstoffen bei Flugzeug und Schiff, da Alternativen nur bedingt zur Verfügung stehen: +

► *klimapolitische Systemdienlichkeit:* Lock-in-Effekte begrenzt, da Potenzial begrenzt und (verhinderte) Alternativen kaum in Sicht: (+)

► *Speicherfähigkeit*: durch Einsatzstoff und Kraftstoff gegeben: +

► *Flexibilität*: zeitlich und räumlich gegeben: +

Ergebnis: hoher Erfüllungsgrad → **Stufe 3**

32. Biodieselanlage (T19), Einsatz: Altöle/Fette (R15) Tierfett (R22)

Energieprodukt(e)

a) Flug-/Schiffskraftstoff

b) Diesel-Kraftstoff (Pkw)

Energieeffizienz:

Wirkungsgrad: 50 % (Motor) x 90 % (MJ Biodiesel/MJ Öl) x 0,9 (Bereitstellung)
= 21 %

Kraftstoff → Carnot-Faktor: 1

Ergebnis: 0,41 = hoher Erfüllungsgrad → **Stufe 3**

Treibhausgasbilanz:

9,5 g CO₂-Äq/MJ Kraftstoff (BioGracell, ifeu Daten), Referenzwert: 94 g CO₂-Äq/MJ Kraftstoff

Ergebnis: 90 % Nettoeinsparung → **Stufe 3**

Kostensituation:

Gestehungskosten: 2 Cent/MJ Strom – Referenz: 1,7 Cent/MJ → 120 %

Ergebnis: mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**

Umweltrisiken:

► *Relevante Nicht-THG Emissionen Luft*: Großtechnische Anlagen mit hohem Kontrollniveau für Emissionen: (+)

► *Relevante Wasser- und/oder Bodenbelastung*: keine: +

► *Risiko durch Reststoff*: keine: +-

Ergebnis: hoher Erfüllungsgrad → **Stufe 3**

Transformation Energiesystem:

a) Flug-/Schiffskraftstoff

► *Substitutionsrelevanz*: Bio-LNG besitzt ein Alleinstellungsmerkmal bei der Substitution von Treibstoffen bei Flugzeug und Schiff, da Alternativen nur bedingt zur Verfügung stehen: +

► *klimapolitische Systemdienlichkeit*: Lock-in-Effekte begrenzt, da Potenzial begrenzt und (verhinderte) Alternativen kaum in Sicht: (+)

► *Speicherfähigkeit*: durch Einsatzstoff und Kraftstoff gegeben: +

► *Flexibilität*: zeitlich und räumlich gegeben: +

Ergebnis: hoher Erfüllungsgrad → **Stufe 3**

b) Kraftstoff, Straße, Lkw

- ▶ *Substitutionsrelevanz*: auch bei steigender Elektromobilität wird mit Kraftstoffeinsatz zu rechnen sein; für C ist ein Alleinstellungsmerkmal bei der Substitution von der Verwendung bei Pkw nicht gegeben: (-)
- ▶ *klimapolitische Systemdienlichkeit*: Potenzieller Lock-in-Effekt zugunsten Flüssigkraftstoffen: (-)
- ▶ *Speicherfähigkeit*: durch Einsatzstoff und Kraftstoff gegeben: +
- ▶ *Flexibilität*: zeitlich und räumlich gegeben: +

Ergebnis: mittlerer Erfüllungsgrad → **Stufe 2**

C.2 Zusammenfassungen nach Kriterien:

Kriterium: Energieeffizienz

Geplante Einsatzart	Gebäudewärme				Prozesswärme				Elektrizität				Kraftstoff			
	Einzelgeb.		Leitung		Niederdruck		Mittel- und Hochdruck		Strom		Straßen Pkw		Schiff/Flugg		Straßen Lkw	
	Wrkgd Qual.	B	Wrkgd Qual.	B	Wrkgd Qual.	B	Wrkgd Qual.	B	Wrkgd Qual.	B	Wrkgd Qual.	B	Wrkgd Qual.	B	Wrkgd Qual.	B
Indholz & Pelletierung/Pellhgz R1 + T1	0,68	0,2 1														
Indholz/IndSub & Pellhgz R17/R20 + T1	0,68	0,2 1														
Indholz/Indholz & Hackkessel R1/R17 + T2			0,84	0,2 2	0,84	0,3 2	0,84	0,5 3								
Lpf Holz/Gutholz & Trocknung/Hackkes R3/R10 + T2			0,77	0,2 2	0,77	0,3 2	0,77	0,5 3								
5 Holzreststoffe & HKW R1/R3/R10/R11/R17 + T3							0,84	0,5 3	0,28	1 2						
Stroh & HKW R4+T3							0,77	0,5 3	0,26	1 2						
3 Holzreststoffe & ORC R1/R3/R10 + T4									0,23	1 2						
Stroh & ORC R4+T4									0,23	1 2						
KS komm und ind & KVA R12/R18 + T5									0,23	1 2						
Biogut & KVA R8 + T5							0,6	0,5 2	0,15	1 1						
6 Holzreststoffe & Mitver R1/R3/R10/R11/R17/R20 + T6							0,7	0,5 3	0,2	1 2						
Tiermehl & Mitver R21 + T6									0,33	1 3						
R1/R3/R4/R10/R11/R14/R15/R16/R17/R20/R21/R22 + T7									0,35	1 3						
							0,65	0,5 3	0,23	1 2						
5 Holzreststoffe & Kleinverg R1/R3/R10/R11/R17 + T8	0,84	0,2 2							0,17	1 2						
3 Holzreststoffe & Holzverg R1/R11/R17 + T9									0,25	1 2						
3 Holzreststoffe & Bio-SNG R1/R11/R17 + T10					0,675	0,3 2			0,3	1 2	0,36	1 3	0,34	1 3		
4 Holzreststoffe & Btl R1/R3/R11/R17 + T11											0,29	1 2	0,27	1 2	0,29	1 2
Stroh & Btl R4 + T11											0,28	1 2	0,28	1 2	0,28	1 2
Lpf Halm/Grskraut/tierExkr & Biog75 R2/R5/R6/R9 + T12			0,07	0,2					0,12	1 1						
ErnteR & Substratvorb/Biog75 R7 + T12			0,08	0,2					0,14	1 2						
Gülle/Mist/Grskraut & BiogNass R5/R6/R9 + T13			0,07	0,2					0,13	1 1						
ErnteR & Substratvorb/BiogNass R7 + T13			0,11	0,2					0,17	1 2						
R2/R6/R7/R9/R16 + T14			0,06	0,2					0,11	1 1						
Stroh & Substratvorb/BiogTr R4 + T14			0,04	0,2					0,08	1 1						
Biogut & BiogTr R8 + T14			0,11	0,2					0,20	1 2						
Gülle/Mist/Grskraut & MethNass R5/R6/R9 + T15	0,33	0,2 1			0,33	0,3 1	0,33	0,5 2	0,14	1 1	0,17	1 2	0,16	1 2	0,17	1 2
ErnteR & Substratvorb/MethNass R7 + T15	0,45	0,2 1			0,45	0,3 1	0,45	0,5 2	0,20	1 2	0,24	1 2	0,23	1 2	0,24	1 2
R2/R6/R7/R9/R16 + T16	0,33	0,2 1			0,33	0,3 1	0,33	0,5 2	0,14	1 1	0,17	1 2	0,16	1 2	0,17	1 2
Stroh & Substratvorb/MethTr R4 + T16	0,21	0,2 1			0,21	0,3 1	0,21	0,5 1	0,09	1 1	0,11	1 1	0,11	1 1	0,11	1 1
Biogut & MethTr R8 + T16	0,48	0,2 1			0,48	0,3 1	0,48	0,5 2	0,21	1 2	0,25	1 2	0,24	1 2	0,25	1 2
Stroh & Fermlign R4+T17											0,21	1 2	0,21	1 2		
Fette und Öle & Biodiesel R15/R22 + T19													0,41	1 3	0,41	1 3

Kriterium: Kostenbetrachtung:

Gewählte Einzeltechnologie	Geeignete Einsatzart	Gebäudewärme			Prozesswärme			Elektrizität			Kraftstoff		
		Einzelgeb.	Leitung	Niederdruck	Mitteldruck	Strom	Otto Pkw	Schiff/Flgztg	Diesel Lkw				
		ges. Kost.	B	ges. Kost.	B	ges. Kost.	B	ges. Kost.	B	ges. Kost.	B	ges. Kost.	B
Holzpelletzentralheizung 15 kW	Wholz & Pelletierung/Pellhzg R1 + T1	mittel	2										
	Indholz/IndSub & Pellhzg R17/R20 + T1	mittel	2										
Holzhackschnitzelkessel 500 kW	Wholz/Indholz & Hackkessel R1/R17 + T2			niedrig	3	niedrig	3	niedrig	3				
	Lpf Holz/Grgutholz & Trocknung/Hackkes R3/R10 + T2			niedrig	3	niedrig	3	niedrig	3				
Heizkraftwerk 5 Mwel	5 Holzreststoffe & HKW R1/R3/R10/R11/R17 + T3			(x)				niedrig	3	mittel	2		
	Stroh & HKW R4+T3			(x)				niedrig	3	mittel	2		
ORC HKW 250 kWel	3 Holzreststoffe & ORC R1/R3/R10 + T4			(x)						hoch	1		
	Stroh & ORC R4+T4			(x)						hoch	1		
Klärschlammverbrennungsanlage 10 MW	KS komm und ind & KVA R12/R18 + T5			(x)				mittel	2	mittel	2		
	Biogut & KVA R8 + T5			(x)				mittel	2	mittel	2		
Mitverbrennung Kohle-HKW < 100 Mwel	6 Holzreststoffe & Mitver R1/R3/R10/R11/R17/R20 + T6			(x)						mittel	2		
	Tiermehl & Mitver R21 + T6			(x)						mittel	2		
Abfallverbrennungsanlage 50 MW	R1/R3/R4/R10/R11/R14/R15/R16/R17/R20/R21/R22 + T7			(x)				mittel	2	mittel	2		
Kleinvergaser 30 kW	5 Holzreststoffe & Kleinverg R1/R3/R10/R11/R17 + T8	niedrig	3							hoch	1		
	3 Holzreststoffe & Holzverg R1/R11/R17 + T9			(x)						hoch	1		
Bio-SNG 25 MW	3 Holzreststoffe & Bio-SNG R1/R11/R17 + T10			(x)		niedrig	3			hoch	1	mittel	2
	4 Holzreststoffe & Btl R1/R3/R11/R17 + T11											mittel	2
BtL 100 MW	Stroh & Btl R4 + T11											mittel	2
Biogasanlage Nassvergärung 75 kW	Lpf Halm/Grgkraut/tierExkr & Biog75 R2/R5/R6/R9 + T12									hoch	1		
	ErnteR & Substratvorb/Biog75 R7 + T12			(x)						hoch	1		
Biogasanlage Nassvergärung 500 kW	Gülle/Mist/Grgkraut & BiogNass R5/R6/R9 + T13			(x)						hoch	1		
	ErnteR & Substratvorb/BiogNass R7 + T13			(x)						hoch	1		
Biogasanlage Trockenvergärung 800 kW	R2/R6/R7/R9/R16 + T14			(x)						mittel	2		
	Stroh & Substratvorb/BiogTr R4 + T14			(x)						mittel	2		
Biomethananlage Nassvergärung	Biogut & BiogTr R8 + T14			(x)						mittel	2		
	Gülle/Mist/Grgkraut & MethNass R5/R6/R9 + T15	niedrig	3	(x)		niedrig	3	niedrig	3	hoch	1	mittel	2
Biomethananlage Trockenvergärung	ErnteR & Substratvorb/MethNass R7 + T15	niedrig	3	(x)		niedrig	3	niedrig	3	hoch	1	mittel	2
	R2/R6/R7/R9/R16 + T16	niedrig	3	(x)		niedrig	3	niedrig	3	hoch	1	mittel	2
Ethanolanlage Lignozellulose	Stroh & Substratvorb/MethTr R4 + T16	niedrig	3	(x)		niedrig	3	niedrig	3	hoch	1	mittel	2
	Biogut & MethTr R8 + T16	niedrig	3	(x)		niedrig	3	niedrig	3	hoch	1	mittel	2
Biodieselanlage	Stroh & Fermlign R4+T17											mittel	2
	Fette und Öle & Biodiesel R15/R22 + T19											mittel	2

Kriterium: sonstige Umweltrisiken

Gewählte Einzeltechnologie	Gezielte Einsatzart	Gebäudewärme		Prozesswärme		Elektrizität		Kraftstoff	
		Einzelgeb. ökol. Wirkung	Leitung ökol. Wirkung	Niederdruck ökol. Wirkung	Mitteldruck ökol. Wirkung	Strom ökol. Wirkung	Ölto Pkw ökol. Wirkung	Schiff/Flugg ökol. Wirkung	Diesel Lkw ökol. Wirkung
Holzpelletzentralheizung 15 kW	Wholz & Pelletierung/pellhzg R1 + T1	mittel	gering	gering	gering	mittel			
Holzpelletzentralheizung 15 kW	Indholz/IndSub & Pellhzg R1/R20 + T1	hoch	gering	gering	gering	mittel			
Holzpelletzentralheizung 15 kW	Wholz/Indholz & Hackkessel R1/R17 + T2		gering	gering	gering	mittel			
Holzpelletzentralheizung 15 kW	Lpf Holz/Grgholz & Trocknung/Hackkes R3/R10 + T2		gering	gering	gering	mittel			
Holzpelletzentralheizung 15 kW	5 Holzreststoffe & HKW R1/R3/R10/R11/R17 + T3		gering	gering	gering	mittel			
Holzpelletzentralheizung 15 kW	Stroh & HKW R4+T3		gering	gering	gering	mittel			
Holzpelletzentralheizung 15 kW	3 Holzreststoffe & ORC R1/R3/R10 + T4		gering	gering	gering	mittel			
Holzpelletzentralheizung 15 kW	Stroh & ORC R4+T4		gering	gering	gering	mittel			
Holzpelletzentralheizung 15 kW	KS komm und ind & KVA R12/R18 + T5		gering	gering	gering	mittel			
Holzpelletzentralheizung 15 kW	Biogut & KVA R8 + T5		gering	gering	gering	mittel			
Holzpelletzentralheizung 15 kW	6 Holzreststoffe & Mitver R1/R3/R10/R11/R17/R20 + T6		gering	gering	gering	mittel			
Holzpelletzentralheizung 15 kW	Tiermehl & Mitver R21 + T6		gering	gering	gering	mittel			
Holzpelletzentralheizung 15 kW	R1/R3/R4/R10/R11/R14/R15/R16/R17/R20/R21/R22 + T7		gering	gering	gering	mittel			
Kleinvergaser 30 kW	5 Holzreststoffe & Kleinverg R1/R3/R10/R11/R17 + T8	mittel	gering	gering	gering	mittel			
Holzvergaser 10 MW	3 Holzreststoffe & Holzverg R1/R11/R17 + T9		gering	gering	gering	mittel			
Bio-SNG 25 MW	3 Holzreststoffe & Bio-SNG R1/R11/R17 + T10		gering	gering	gering	mittel			
Btl 100 MW	4 Holzreststoffe & Btl R1/R3/R11/R17 + T11		gering	gering	gering	mittel			
Btl 100 MW	Stroh & Btl R4 + T11		gering	gering	gering	mittel			
Biogasanlage Nassvergärung 75 kW	Lpf Halm/Grgholz/hierExkr & Biog75 R2/R5/R6/R9 + T12		gering	gering	gering	mittel			
Biogasanlage Nassvergärung 500 kW	ErnteR & Substratvorb/Biog75 R7 + T12		gering	gering	gering	mittel			
Biogasanlage Nassvergärung 500 kW	Gülle/Mist/Grgholz & BiogNass R5/R6/R9 + T13		gering	gering	gering	mittel			
Biogasanlage Nassvergärung 500 kW	ErnteR & Substratvorb/BiogNass R7 + T13		gering	gering	gering	mittel			
Biogasanlage Nassvergärung 500 kW	R2/R6/R7/R9/R16 + T14		gering	gering	gering	mittel			
Biogasanlage Nassvergärung 500 kW	Stroh & Substratvorb/BiogTr R4 + T14		gering	gering	gering	mittel			
Biogasanlage Nassvergärung 500 kW	Biogut & BiogTr R8 + T14		gering	gering	gering	mittel			
Biogasanlage Nassvergärung 500 kW	Gülle/Mist/Grgholz & MethNass R5/R6/R9 + T15	mittel	gering	gering	gering	mittel			
Biogasanlage Nassvergärung 500 kW	ErnteR & Substratvorb/MethNass R7 + T15	mittel	gering	gering	gering	mittel			
Biogasanlage Nassvergärung 500 kW	R2/R6/R7/R9/R16 + T16	mittel	gering	gering	gering	mittel			
Biogasanlage Nassvergärung 500 kW	Stroh & Substratvorb/MethTr R4 + T16	mittel	gering	gering	gering	mittel			
Biogasanlage Nassvergärung 500 kW	Biogut & MethTr R8 + T16	mittel	gering	gering	gering	mittel			
Ethanolanlage Lignozellulose	Stroh & FermlLign R4+T17		gering	gering	gering	mittel			
Biodieselanlage	Fette und Öle & Biodiesel R15/R22 + T19		gering	gering	gering	mittel			

Kriterium: Kompatibilität mit Transformation des Energiesystems

Gewählte Einzeltechnologie	Geplante Einsatzart	Gebäudewärme			Prozesswärme			Elektrizität			Kraftstoff		
		Einzelgeb. klimapol. Wirk.	B vorteilhaft	Leitung klimapol. Wirk.	B vorteilhaft	Niederdruck klimapol. Wirk.	B vorteilhaft	Mitteldruck klimapol. Wirk.	B vorteilhaft	Strom klimapol. Wirk.	B vorteilhaft	Otto Pkw klimapol. Wirk.	Schiff/Flug klimapol. Wirk.
Holzpelletzentralheizung 15 kW	Wohlf & Pelletierung/Pellhag R1 + T1 Indholz/IndSub & Pellhag R17/R20 + T1												
Holzhackschnittkessel 500 kW	Wohlf/Indholz & Hackkessel R1/R17 + T2 Lpf Holz/Grutholz & Trocknung/Hackkes R3/R10 + T2												
Heizkraftwerk 5 Mwel	5 Holzreststoffe & HKW R1/R3/R10/R11/R17 + T3 Stroh & HKW R4+T3												
ORC HKW 250 kWel	3 Holzreststoffe & ORC R1/R3/R10 + T4 Stroh & ORC R4+T4												
Klärschlammverbrennungsanlage 10 MW	KS komm und ind & KVA R12/R18 + T5 Biogut & KVA R8 + T5												
Mitverbrennung Kohle-HKW < 100 Mwel	6 Holzreststoffe & Miwer R1/R3/R10/R11/R17/R20 + T6 Tiermehl & Miwer R21 + T6												
Abfallverbrennungsanlage 50 MW	R1/R3/R4/R10/R11/R14/R15/R16/R17/R20/R21/R22 + T7												
Kleinvergaser 30 kW	5 Holzreststoffe & Kleinverg R1/R3/R10/R11/R17 + T8												
Holzvergaser 10 Mwel	3 Holzreststoffe & Holzverg R1/R11/R17 + T9												
Bio-SNG 75 MW	3 Holzreststoffe & Bio-SNG R1/R11/R17 + T10												
Btl 100 MW	4 Holzreststoffe & Btl R1/R3/R11/R17 + T11 Stroh & Btl R4 + T11												
Biogasanlage Nassvergärung 75 kW	Lpf Halm/Grgrkraut/tierExkr & Biog75 R2/R5/R6/R9 + T12												
Biogasanlage Nassvergärung 500 kW	ErnteR & Substratvorb/Biog75 R7 + T12 Gülle/Mist/Grgrkraut & BiogNass R5/R6/R9 + T13												
Biogasanlage Trockenvergärung 800 kW	ErnteR & Substratvorb/BiogNass R7 + T13 R2/R6/R7/R9/R16 + T14 Stroh & Substratvorb/BiogTr R4 + T14												
Biomethananlage Nassvergärung	Biogut & BiogTr R8 + T14 Gülle/Mist/Grgrkraut & MethNass R5/R6/R9 + T15												
Biomethananlage Trockenvergärung	ErnteR & Substratvorb/MethNass R7 + T15 R2/R6/R7/R9/R16 + T16 Stroh & Substratvorb/MethTr R4 + T16												
	Biogut & MethTr R8 + T16												
Ethanolanlage Lignozellulose	Stroh & FernLign R4+T17												
Biodieselanlage	Fette und Öle & Biodiesel R15/R22 + T19												