

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



# - Leitfaden -

## Konditionierung von Bioabfall als Vorbereitung für die Vergärung

Ministerium: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)

Projektträger: Forschungszentrum Jülich GmbH (PTJ)

Fördermaßnahme: Anwendungsorientierte nichtnukleare FuE im  
6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung

Förderkennzeichen: 03ET1429A-C

Laufzeit des Vorhabens: 01.08.2016 bis 31.12.2019

Zuwendungsempfänger:

- 03ET1429A      **RWTH Aachen University**, Institut für Aufbereitung und Recycling  
(*nachfolgend I.A.R.*), Aachen, Projektkoordinator
- 03ET1429B      **Gesellschaft für Bioabfallwirtschaft in Landkreis und Stadt  
Aschaffenburg mbH** (*nachfolgend GBAB*), Aschaffenburg
- 03ET1429C      **pbo Ingenieurgesellschaft mbH** (*nachfolgend pbo*), Aachen

Autoren:

- I.A.R.**            Christoph Jansen M.Sc.  
                      Melanie Brune M.Sc.  
                      Prof. Dr.-Ing. Thomas Pretz
- GBAB**            Dipl.-Ing. Dieter Gerlach  
                      Dipl.-Ing Holger Ehmann
- pbo**                Dipl.-Ing. Klaus Jörg Onasch

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

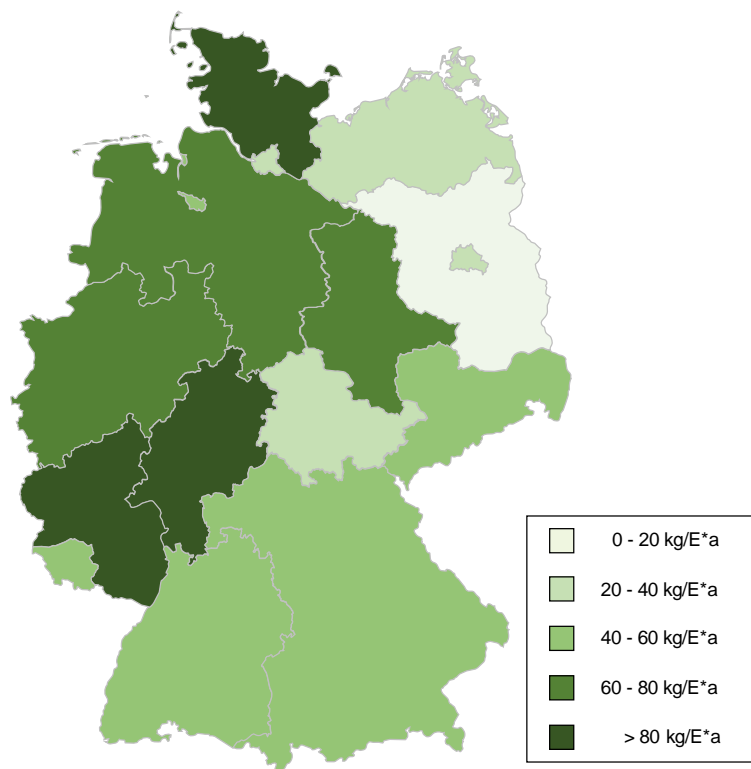
## Inhaltsverzeichnis

1	Veranlassung .....	1
2	Konditionierungsbedingungen und stoffliche Voraussetzungen .....	4
2.1	Bandbreite Biogut nach abfallwirtschaftlichen Randbedingungen.....	5
2.2	Sieblinien .....	10
2.3	Fremdstoffgehalte .....	11
2.4	Glühverluste und Gasbildungsraten .....	12
3	Konditionierungsmethoden und stoffliche Auswirkungen .....	14
3.1	Zerkleinerung .....	15
3.1.1	Gebindeöffnung und selektive Korngrößenreduktion .....	15
3.1.2	Vergrößerung der spezifischen Oberfläche .....	19
3.2	Klassierung .....	19
4	Handlungsempfehlungen.....	21
5	Literaturverzeichnis .....	24

## 1 Veranlassung

Die Kreislauf- und Abfallwirtschaft in der Bundesrepublik Deutschland misst dem Bioabfall gemäß §3 (7) Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) eine besondere Bedeutung zu. So wurde mit der Novelle des KrWG 2012 eine Verpflichtung zur getrennten Erfassung von biogenen Abfällen formuliert, die seit dem 01.01.2015 wirksam ist (vergl. § 11(1) KrWG).

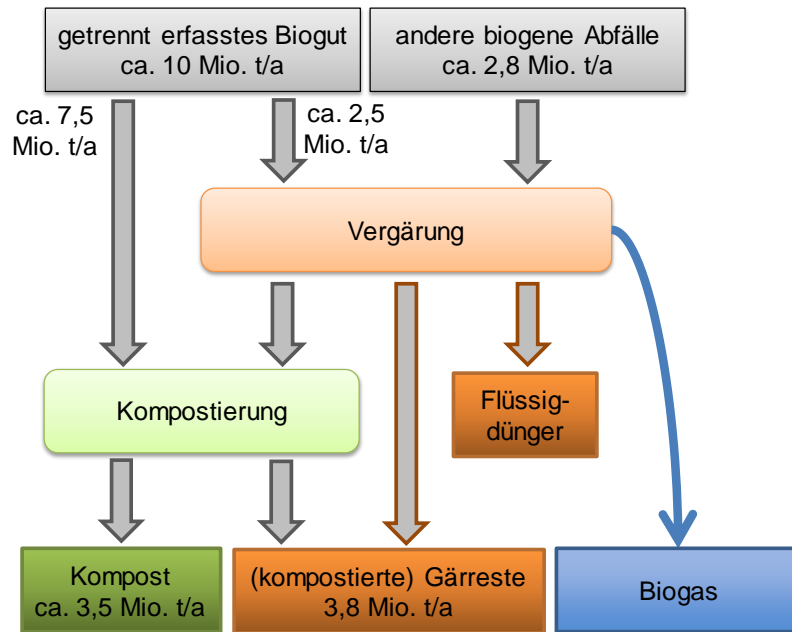
Die abfallwirtschaftlichen Bedingungen in Deutschland unterliegen einer breiten Streuung. Dies führt zu deutlichen Unterschieden bei den auf Landesebene durchschnittlich über die Biotonnensammlung getrennt erfassten spezifischen Biogutmengen (Abbildung 1). Die erfassten Mengen liegen zwischen 11 kg/E\*a in Brandenburg und 90 kg/E\*a in Schleswig-Holstein. Lokal können spezifische Sammelmengen von mehr als 200 kg/E\*a erreicht werden [Abfallbilanzen der Länder 2017/2018].



[Datenquelle: Abfallbilanzen der Länder 2017 (NW, ST, BB, HB, NI) & 2018 (alle anderen)]

**Abbildung 1: Einwohnerspezifische über die Biotonne getrennterfasste Biogutmenge nach Bundesland**

Derzeit werden in Deutschland insgesamt ca. 10 Mio. t Biogut durch getrennte Sammlung erfasst [Statistisches Bundesamt 2020]. Die Verwertung erfolgt zu organischem Dünger (Kompost) bzw. im Fall einer anaeroben Behandlung zusätzlich zu Flüssigdünger und Biogas (Abbildung 2).



[Datenquelle: BGK 2020, Statistisches Bundesamt 2020]

**Abbildung 2: Behandlung von getrennt erfasstem Biogut in Deutschland – Stand 2019**

Bei der anaeroben Biogutverwertung (Vergärung) kommen aufgrund spezifischer Regelungen des EEG überwiegend Verfahren der Trockenvergärung zum Einsatz. Die Nassvergärung wird dagegen hauptsächlich bei gewerblichen Biogutabfällen (z. B. Speiseabfällen) eingesetzt [Atlas 2014, S. 23]. Der Wassergehalt des Bioabfalls in der Trockenvergärung beträgt ca. 35 Ma.-% bis 70 Ma.-% [Bilitewski 2013, S. 447].

Die Trockenvergärung von Bioabfällen erfolgt entweder im Pfropfenstrom- oder im Perkolationsverfahren. Beide Verfahren kommen nahezu zu gleichen Anteilen zum Einsatz [Atlas 2014, S. 23]. Eine Gegenüberstellung der Prozessmerkmale zeigt Tabelle 1.

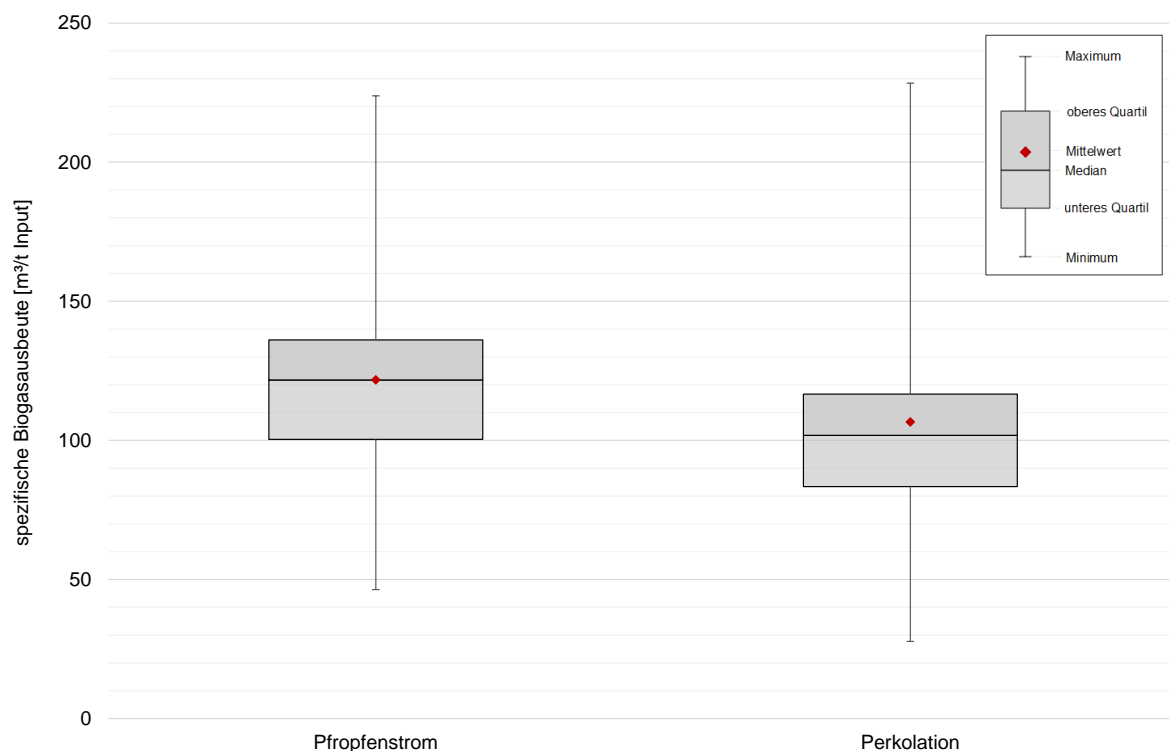
**Tabelle 1: Vergleich Verfahren Trockenvergärung**

	<i><b>Pfropfenstromverfahren</b></i>	<i><b>Perkolationsverfahren</b></i>
<i><b>Konditionierung</b></i>	zwingend	optional
<i><b>Prozessführung</b></i>	kontinuierlich	diskontinuierlich
<i><b>Temperaturbereich</b></i>	überwiegend thermophil (55°C - 65°C)	mesophil (30°C - 40°C) <b>oder</b> thermophil (50°C - 65°C)*
<i><b>Schwachgas</b></i>	nein	ja

Bioabfallvergärungsanlagen, die kontinuierliche Pflropfenstromprozesse einsetzen, müssen eine Vorkonditionierung des Stoffstromes vornehmen, die insbesondere auf die Fördertechnik im Ein- und Austrag sowie auf die Störstoffe, die zu Schwimm- bzw. Sinkschichten führen können, abgestimmt ist. Diskontinuierliche Verfahren werden mit Radladertechnik beschickt und entleert und reagieren unkritisch auf Störstoffe. Daher wird in vielen Fällen auf eine Konditionierung verzichtet.

Das Pflropfenstromverfahren ist ein kontinuierlicher Prozess, wodurch die in den diskontinuierlichen Verfahren vorhandenen An- und Auslaufphasen entfallen. Dies bedeutet, dass bei der Pflropfenstromvergärung kein Schwachgas entsteht, sodass hier in der Regel eine höhere Biogasausbeute zu erwarten ist. Bei den Perkulationsverfahren wird der zu behandelnde Bioabfall mit Perkolat beaufschlagt und anschließend vergoren. Dies erfolgt sowohl im mesophilen als auch im thermophilen Temperaturbereich. [Bilitewski 2013, S. 443].

Die spezifischen Gasausbeuten von 54 deutschen Vergärungsanlagen mit einer Behandlungskapazität > 10.000 t/a, in denen überwiegend Bioabfälle aus privaten Haushalten behandelt werden, sind in Abbildung 3 dargestellt.



**Abbildung 3: Spezifische Biogasausbeute nach Anlagentyp [nach Atlas 2014]**

Der Abbildung ist zu entnehmen, dass beide Anlagentypen erhebliche Schwankungen in der spezifischen Biogasausbeute aufweisen. Der Median der spezifischen Gasausbeute liegt bei der Pflropfenstromvergärung mit ca. 120 m³/t etwa 20 m³/t über dem der Perkulation. Dies ist unter anderem auf die mit dem Batchverfahren verknüpfte Schwachgasproduktion bei den

Anfahr- und Abfahrvorgängen zurückzuführen. Die großen Schwankungsbreiten in der Gasausbeute sind neben der eingesetzten Technologie maßgeblich von der Qualität des Bioabfalls abhängig.

Der vorliegende Leitfaden setzt sich mit den stofflichen Voraussetzungen der Bioabfallbehandlung in Vergärungsanlagen auseinander und zeigt die Bedeutung von mechanischen Vorkonditionierungsprozessen auf. Darüber hinaus werden Handlungsempfehlungen für Anwender und Anlagenbetreiber für eine optimierte Bioabfallvorkonditionierung gegeben. Der Leitfaden basiert auf den Erkenntnissen, die innerhalb des Forschungsvorhabens „Energieeffiziente Bioabfallbehandlung durch Konditionierung – EnKoBio“ (Förderkennzeichen 03ET1429A-C) gewonnen wurden. Das Forschungsvorhaben wurde aus Mitteln des 6. Energieforschungsprogrammes des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie gefördert.

## **2 Konditionierungsbedingungen und stoffliche Voraussetzungen**

Als zentrale Einflussgrößen auf die Biogutquantität und -qualität in Deutschland gelten, neben dem gebietsunabhängigen saisonalen Faktor, die Siedlungsstruktur, abfallwirtschaftliche Randbedingungen und sozioökonomische Faktoren [Kranert 2017, S. 71]. Die Bandbreite der Siedlungsstruktur reicht von ländlich bis großstädtisch, von Einfamilienhausbebauung mit Gartenfläche bis Großwohnanlage ohne eigene Gartennutzung. Über die siedlungsstrukturellen Gegebenheiten, insbesondere dem Anteil an privaten Grünflächen eines Gebietes, wird maßgeblich der erfassbare Gartenabfallanteil und somit die erzielbare Biogutmenge bestimmt. Bereits in einer Studie des Witzenhausen-Instituts von 2018 konnte festgestellt werden, dass städtische Mehrfamilienhausbebauung Biogut mit geringerer Sortenreinheit und höherem Küchenabfallanteil hervorbringt [Kern et. al. 2018]. Die Bandbreite der Biogutqualität und -quantität wird für diesen Leitfaden am Beispiel von vier Referenzgebieten bzw. Sammelrouten aufgezeigt (Tabelle 2). Sie stehen stellvertretend für eine Bandbreite an Sammelgebieten und sind Beispiele im Hinblick auf verschiedene stoffliche Voraussetzungen, mit der Betreiber von Biogutbehandlungsanlagen verfahren müssen. Die Referenzgebiete bilden sowohl städtische als auch ländlich geprägte Sammelgebiete ab. Mit steigenden Gartenflächen pro Einwohner bzw. steigenden Anteilen an Einfamilienhausbebauung steigt die ländliche Ausprägung der Gebietsstruktur.

**Tabelle 2: Gegenüberstellung der siedlungsstrukturellen Randbedingungen in Referenzgebieten**

	<b>Aachen</b> <b>Rothe Erde</b>	<b>Baesweiler</b>	<b>Eschweiler</b> <b>Kinzweiler</b>	<b>Aschaffenburg</b> <b>Schweinheim</b>
<b>Gesamtfläche</b>	0,13 km <sup>2</sup>	0,69 km <sup>2</sup>	0,78 km <sup>2</sup>	0,88 km <sup>2</sup>
<b>Einwohnerzahl</b>	2.256	3.725	2.626	2.598
<b>Siedlungsdichte*</b>	3.857 E/km <sup>2</sup>	2.730 E/km <sup>2</sup>	2.128 E/km <sup>2</sup>	1.733 E/km <sup>2</sup>
<b>Anteil EFH**</b>	0 %	52 %	88 %	69 %
<b>Anteil MFH***</b>	93 %	21 %	3 %	26 %
<b>Anteil Mischnutzung</b>	7 %	27 %	9 %	5 %
<b>Gartenfläche pro E</b>	13 m <sup>2</sup>	47 m <sup>2</sup>	113 m <sup>2</sup>	73 m <sup>2</sup>

\* bezogen auf Siedlungs- und Verkehrsflächen

\*\* Einfamilienhäuser

\*\*\* Mehrfamilienhäuser

## 2.1 Bandbreite Biogut nach abfallwirtschaftlichen Randbedingungen

Neben den verschiedenen siedlungsstrukturellen Merkmalen unterscheiden sich die Sammelgebiete auch in den abfallwirtschaftlichen Randbedingungen, die durch die Kommunen in Satzungen festgelegt werden. Sie werden folgend für eine bessere Einordnung der Gebiete näher beschrieben. Die abfallwirtschaftlichen Randbedingungen umfassen die Abfallgebühr, das Behältervolumen, den Abfuhrhythmus sowie additive Angebote zur Erfassung von Biogut.

### Aachen

In Aachen besteht die Pflicht zur getrennten Sammlung von kompostierbaren Abfällen über die Biotonne. Eine Befreiung dieser Anschlusspflicht ist nur möglich, sofern entweder die Eigenkompostierung auf dem eigenen Grundstück gewährleistet ist oder die Getrenntsammlung aufgrund gesundheitlicher Beeinträchtigungen nicht zumutbar ist. Ein Sonderfall bildet der Entzug des Bioabfallbehälters. Werden Behältnisse wiederholt fehlerhaft befüllt, kann der Aachener Stadtbetrieb den Bioabfallbehälter einziehen und den Ersatz des eingezogenen Volumens durch einen gebührenpflichtigen Restabfallbehälter anordnen. Für die Restabfallsammlung stehen Behälter in den Größen 60, 90, 120, 240, 770 und 1.100 Liter zur Wahl. Bei der Bioabfallsammlung kann zwischen den Behältergrößen 60, 90, 120 und 240 Liter gewählt werden. Die Sammlung des Bioabfalls erfolgt über Drehtrommelfahrzeuge. Gemäß Abfallwirtschaftssatzung der Stadt Aachen kann die Leerung der Restabfallbehälter zweiwöchentlich oder vierwöchentlich erfolgen. Der Leerungsrhythmus für die Bioabfallbehälter ist stets zweiwöchentlich. [Abfallwirtschaftssatzung Aachen 2019]



Die Abfallgebühren für die Restabfallsammlung in Aachen bestehen aus einer Jahresgrundgebühr und einer Leistungsgebühr. Die Höhe der Gebühr ist dabei sowohl von der gewählten Behältergröße als auch dem gewünschten Leerungsrhythmus abhängig. Hinzu kommt eine Leistungsgebühr für die Leerung der Biotonne, deren Höhe ebenfalls von der Behältergröße und dem Leerungsrhythmus abhängt. Die Abfallgebühr für einen Zweipersonenhaushalt beträgt im Regelfall 166 € pro Jahr. Berechnungsgrundlage ist ein 60 Liter Restabfallbehälter, der vierwöchentlich geleert wird (Grundgebühr: 68 € und Leistungsgebühr 52 €) sowie eine 60 Liter Biotonne (Leistungsgebühr: 46 €). Diese Kosten können durch den Zusammenschluss mehrerer Haushalte reduziert werden. [Abfallgebührensatzung Aachen 2018]

Grünabfälle, die nicht über die Biotonne entsorgt werden, können kostenlos zu Recyclinghöfen oder den im Stadtgebiet verteilten, betreuten Sammelcontainern gebracht werden. Das Angebot der Grüngutsammelcontainer ist weitgehend auf die Vegetationsperiode beschränkt. In der Ast- und Strauchschnittzeit von Oktober bis März erfolgt zusätzlich eine Strauchschnittabfuhr. [Abfallwirtschaftssatzung Aachen 2019].

### Baesweiler

Die Stadt Baesweiler verwendet bei der Restabfallsammlung ein elektronisches Identifikationssystem (Identsystem). Dieses Identsystem ermöglicht die Feststellung der genauen Leerungsanzahl pro Behälter. Die Gebühren für die Restabfallsammlung bestehen aus einer Jahresgrundgebühr und einer Leerungsgebühr. Je weniger Leerungen für einen Behälter in Anspruch genommen werden, desto geringer sind die Gesamtkosten. Damit sollen Haushalte, die umweltbewusst Abfall vermeiden und auf getrennte Sammlung achten, begünstigt werden. Private Haushalte erhalten einen Restabfallbehälter mit 80 Litern Fassungsvermögen; die Abfuhr erfolgt zweiwöchentlich. Die Bioabfallsammlung erfolgt auf freiwilliger Basis über eine 120 Liter Biotonne mit zweiwöchentlicher Leerung. Bei der Bioabfallsammlung kommt das Identsystem nicht zum Einsatz; die Abrechnung erfolgt über eine Jahresgebühr. Die Anschlussquote liegt gemäß Angaben des zuständigen Kommunalunternehmens bei 35 %. [Abfallsatzung RegioEntsorgung 2019]

Die Abfallgebühren für einen Zweipersonenhaushalt für die Rest- und Bioabfallsammlung setzen sich somit zusammen aus der Jahresgrundgebühr für den 80 Liter Restabfallbehälter in Höhe von 105,12 €, der Leerung des Restabfallbehälters in Höhe von 3,68 € pro Leerung und der jährlichen Entsorgungsgebühr für den Bioabfall in Höhe von 38,88 €. Davon ausgehend, dass eine vierwöchentliche Leerung des Restabfallbehälters in Anspruch genommen wird, belaufen sich die Abfallgebühren für einen Zweipersonenhaushalt inklusive Bioabfalltonne auf 188 €. Diese Kosten können durch den Zusammenschluss mehrerer

Haushalte reduziert werden. Die Sammlung des Bioabfalls erfolgt über Pressplattenfahrzeuge. [Abfallgebührensatzung Baesweiler 2019]

Fünfmal im Jahr, in den Frühjahr- und Herbstmonaten, wird in Baesweiler eine Grünschnittstraßensammlung angeboten. Darüber hinaus können Grünschnittsammelsäcke (Laubsäcke) von jedem anschlusspflichtigen Haushalt mit einer Restabfalltonne in den Monaten September bis Dezember an den Tagen der Bioabfallsammlung an den Straßenrand gestellt werden. Haushalte mit Bioabfallsammelbehälter können Grünschnittsammelsäcke ganzjährig neben ihre Biotonne an den Straßenrand stellen. [Abfallsatzung RegioEntsorgung 2019] Die Entsorgungsgebühr für zugelassene Laubsäcke beträgt 1 € pro Stück. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, Grünschnitt kostenlos zu den Wertstoffhöfen des Kommunalunternehmens zu bringen. Übersteigt die angediente Menge den haushaltsüblichen Umfang, definiert als Kofferraumladung, wird ein Entgelt in Höhe von 5 €/m<sup>3</sup> erhoben. [Abfallgebührensatzung Baesweiler 2019]

### Eschweiler

Für die Restabfallsammlung stehen in Eschweiler Behälter mit einem Fassungsvermögen von 60, 120, 240 und 1.100 Liter zur Wahl. Die Leerung dieser Behälter erfolgt im zweiwöchentlichen Rhythmus. Die Nutzung der Biotonne ist freiwillig. Auf Wunsch des Bürgers kann dieser zusätzlich zu seinem Restabfallsammelbehälter eine kostenpflichtige Bioabfalltonne mit einem Fassungsvermögen von 120 oder 240 Liter erhalten. Die jährliche Gebühr orientiert sich an der Anzahl und dem Fassungsvermögen des Restabfallbehälters. Die Leerung der Biotonne erfolgt analog zum Restabfallbehälter im zweiwöchentlichen Rhythmus. [Abfallsatzung Eschweiler 2012]

Die Abfallentsorgungsgebühren sind leistungsunabhängig und werden über die Anzahl und das Volumen der Abfallsammelbehälter berechnet. Die Jahresgebühr z. B. für einen Zweipersonenhaushalt mit einem 60 Liter Restabfallbehälter und einer 120 oder 240 Liter Biotonne beträgt 170 €. Der Aufpreis für einen Restabfallbehälter mit Biotonne gegenüber einem Restabfallbehälter ohne Biotonne beträgt 35 €. Jede zusätzliche Biotonne kostet pro Jahr knapp 75 €. Die jährlichen Gebühren können durch den Zusammenschluss mehrerer Haushalte reduziert werden. [Abfallgebührensatzung Eschweiler 2018]

Neben der Bioabfalltonne können die Haushalte kostenpflichtige Papiersäcke der Stadt für die Sammlung von Bio- und Grüngut nutzen. Die Säcke werden von der Stadt eingesammelt, sofern diese am Tag der Bioabfallsammlung an den Straßenrand gestellt werden. Die Möglichkeit der Nutzung von Papiersäcken zur Grün- und Biogutsammlung besteht für jeden Haushalt, unabhängig von der Nutzung einer Biotonne [Abfallsatzung Eschweiler 2012]. Pro Papiersack wird eine Benutzungsgebühr in Höhe von 3,20 € erhoben [Abfallgebührensatzung

Eschweiler 2018]. Zweimal im Jahr bietet die Stadt Eschweiler eine Straßensammlung für Ast- und Strauchschnitt sowie im Januar eine zusätzliche Weihnachtsbaumsammlung an. Darüber hinaus kann gegen ein Entgelt Grüngut bei Recyclinghöfen abgegeben werden [Abfallsatzung Eschweiler 2012]. Die Sammlung des Bioabfalls erfolgt über Pressplattenfahrzeuge.

### Aschaffenburg

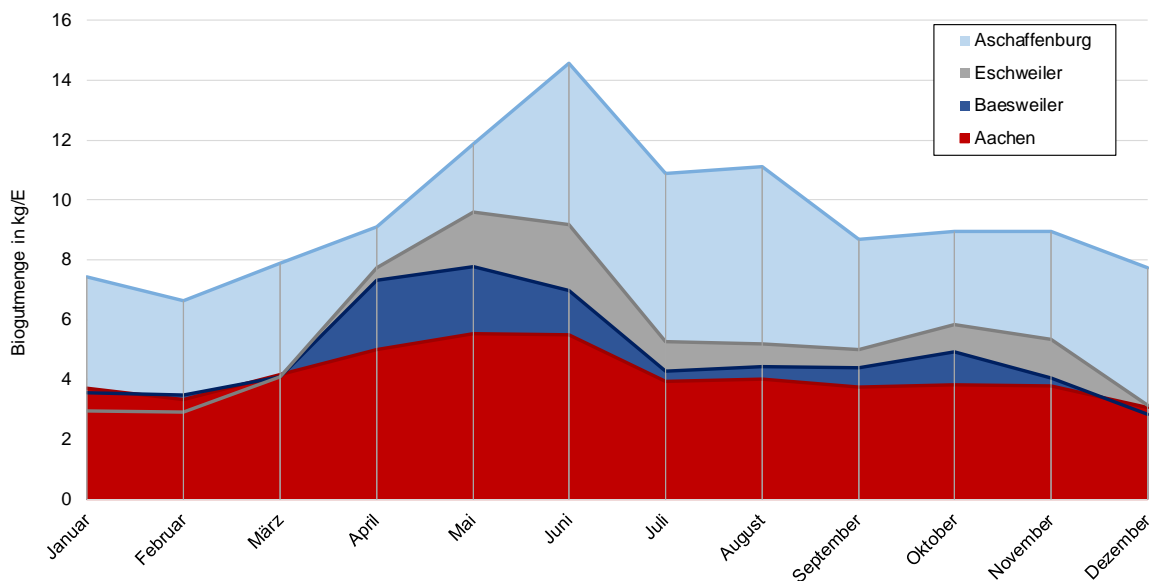
Für die Restabfallsammlung stehen in Aschaffenburg Behälter mit einem Fassungsvermögen von 80, 120, 240, 660 und 1.100 Liter zur Wahl. Die Leerung dieser Behälter erfolgt in der Regel im zweiwöchentlichen Rhythmus. Bei kleinen Haushalten (1-3 Personen) kann die Option 80 Liter Tonne mit einer vierwöchentlichen Leerung vereinbart werden. Ein Bioabfallbehälter wird jedem Haushalt entsprechend dem Volumen der Restabfalltonne kostenfrei zur Verfügung gestellt. Gegen Gebühr kann auch ein größeres Biotonnenvolumen genutzt werden. Die Entsorgung von Biogut erfolgt wahlweise über Behälter mit einem Fassungsvermögen von 60, 80 oder 120 Liter. Auf Antrag und gegen Gebühr kann der Bioabfallsammelbehälter mit einem im Deckel integrierten Biofilter ausgerüstet werden. Bioabfälle werden in der Regel im zweiwöchigen Abfuhrhythmus geleert, abweichend erfolgt vom 15. Mai bis zum 15. September eine wöchentliche Leerung. Die Bioabfallsammlung erfolgt im Stadtgebiet Aschaffenburg über Pressplattenfahrzeuge. [Abfallsatzung Aschaffenburg 2017]

Die Jahresgebühr für die Restabfallentsorgung eines Zweipersonenhaushaltes beträgt in der Stadt Aschaffenburg 96 €. Berechnungsgrundlage ist ein 80 Liter Restabfallbehälter mit vierwöchiger Leerung und eine Biotonne mit einem Fassungsvermögen von 60 Liter. Die Nutzung der Biotonne ist über die Restabfallgebühr abgegolten. Ist das gestellte Biotonnenvolumen nicht ausreichend, erhöht sich die Jahresgebühr um 10 € pro 10 Liter Gefäßvolumen. [Abfallgebührensatzung 2011]

Zusätzlich bietet die Stadt Aschaffenburg die Nutzung von Bioabfallsäcken mit einem Füllvolumen von 120 Liter an, diese können an den Tagen der Bioabfallsammlung an die Straße gestellt werden. Pro Bioabfallsack fällt eine Gebühr von 3,50 € an. Darüber hinaus kann pro Grundstück und Halbjahr 1 m<sup>3</sup> Baum- und Strauchschnitt gebührenfrei entweder den kommunalen Recyclinghöfen angedient oder der zweimal im Jahr stattfindenden Grünabfallsammlung übergeben werden.

Die über die Biotonne erfassten einwohnerspezifischen Biogutmengen unterscheiden sich in den Städten Aschaffenburg, Eschweiler, Baesweiler und Aachen signifikant. Während in Aschaffenburg in den vegetationsreichen Monaten mehr als 14 kg/E erfasst werden können, werden in Eschweiler, Baesweiler und Aachen lediglich bis zu 10, 8 bzw. 5 kg/E über die Biotonne erfasst (Abbildung 4). Diese Unterschiede korrelieren mit der Siedlungsdichte

bezogen auf die Siedlungs- und Verkehrsflächen (vgl. Tabelle 2). Das Aachener Gebiet weist mit 3.857 E/km<sup>2</sup> die höchste und das Gebiet in Aschaffenburg mit 1.733 E/km<sup>2</sup> die geringste Siedlungsdichte auf. In den Wintermonaten entfällt der Gartenabfallanteil, die erfasste Biogutmenge setzt sich dadurch primär aus küchenstämmigen Abfällen zusammen. Die erfassten Biogutmengen in Eschweiler, Baesweiler und Aachen liegen außerhalb der Vegetationsperiode daher auf demselben Niveau. Auch außerhalb der Vegetationsperiode wird in Aschaffenburg eine signifikant höhere einwohnerspezifische Biogutmenge erfasst. Die Mengenunterschiede zwischen Aschaffenburg und den anderen drei Städten sind damit nicht allein durch die Siedlungsdichte bzw. den Gartenanteil zu erklären, sondern sind auf den Einfluss der abfallwirtschaftlichen Randbedingungen zurückzuführen. In Aschaffenburg wird eine kostenlose Pflichttonne angeboten; der hohe Anschlussgrad sowie der finanzielle Vorteil gegenüber der Restabfalltonne begünstigen eine hohe Bioguterfassungsmenge. In Eschweiler und Baesweiler wird hingegen auf eine freiwillige Biotonne gesetzt. Durch Erhöhung des Anschlussgrades könnte die Erfassungsmenge auch in diesen Gebieten verbessert werden.



**Abbildung 4: Monatliche Biogutmenge der Referenzstädte pro Einwohner und Jahr**

Des Weiteren erhöht die Stadt Aschaffenburg während der Vegetationsperiode die Abfuhranzahl durch Wechsel von einem zweiwöchigen- zu einem einwöchigen Leerungsrhythmus. Dadurch steht den Bürgern einerseits monatlich ein größeres Sammelvolumen zur Verfügung, wodurch die infrastrukturelle Möglichkeit gegeben ist, mehr Biogut zu erfassen, andererseits bewirkt die wöchentliche Leerung während der warmen Sommermonate eine Reduktion der Geruchsentwicklung in der Biotonne, was wiederum die Akzeptanz bei den Bürgern erhöht. Auch die geringe Schwankungsbreite der erfassten einwohnerspezifischen Biogutmenge in Aachen ist nicht allein auf die Siedlungsstruktur bzw. den geringen Anteil an Gartenflächen zurückzuführen, sondern den zusätzlichen Angeboten

der Stadt zur zentralen Grüngutsammlung geschuldet. Die Randbedingungen in Aachen bieten den Vorteil, dass über die Anlieferung ein konstanter Massenstrom erzeugt wird, der vorrangig aus Küchenabfall besteht. Dieser ist aufgrund des hohen Energiegehaltes für die Vergärung besonders geeignet. Das separat gesammelte Grüngut kann wiederum statt der Vergärungsanlage einer kostengünstigeren, da weniger aufwendigen, Grüngutkompostierung zugeführt werden.

## 2.2 Sieblinien

Bereits die Varianz der aus der Siebung resultierenden Siebdurchgangskurven spiegelt die unterschiedlichen Anforderungen an den Abfallaufbereiter wider. Grundlage für die dargestellten Siebdurchgangskurven bilden Einzeldaten von durchgeführten Analysesiebungen. Sie sind Abbildung 5 zu entnehmen. Es wird deutlich, dass der Anteil < 20 mm in allen Sammelgebieten zwischen 23 und 51 % schwankt. Auch der Anteil der Grobfraction > 80 mm schwankt stark in einem Bereich von 6 - 40 %. Beim Verlauf der Siebdurchgangskurven lassen sich leichte Tendenzen in Abhängigkeit der verschiedenen Sammelgebiete erkennen. Das unzerkleinerte Biogut aus dem Sammelgebiet Baesweiler weist im Mittel den höchsten Grobkornanteil auf. Im Gegensatz dazu ist zu erkennen, dass das gesammelte Biogut aus dem Gebiet Aschaffenburg im Mittel den geringsten Anteil > 80 mm hervorbringt. Es sind insgesamt deutliche Schwankungen der Korngrößenverteilungen innerhalb der Sammelgebiete und zusätzlich zwischen den einzelnen Sammelgebieten zu erkennen – eine effiziente Vorkonditionierung kann demnach nur schwer für einen ‚allgemeinen Biogutstrom‘ ermittelt werden.

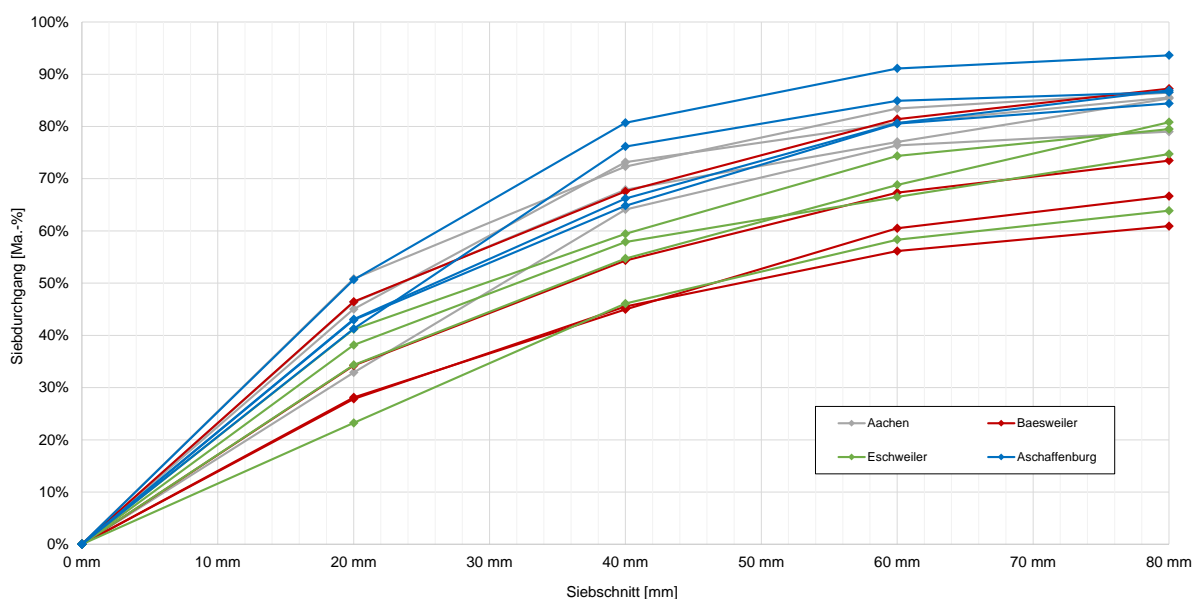
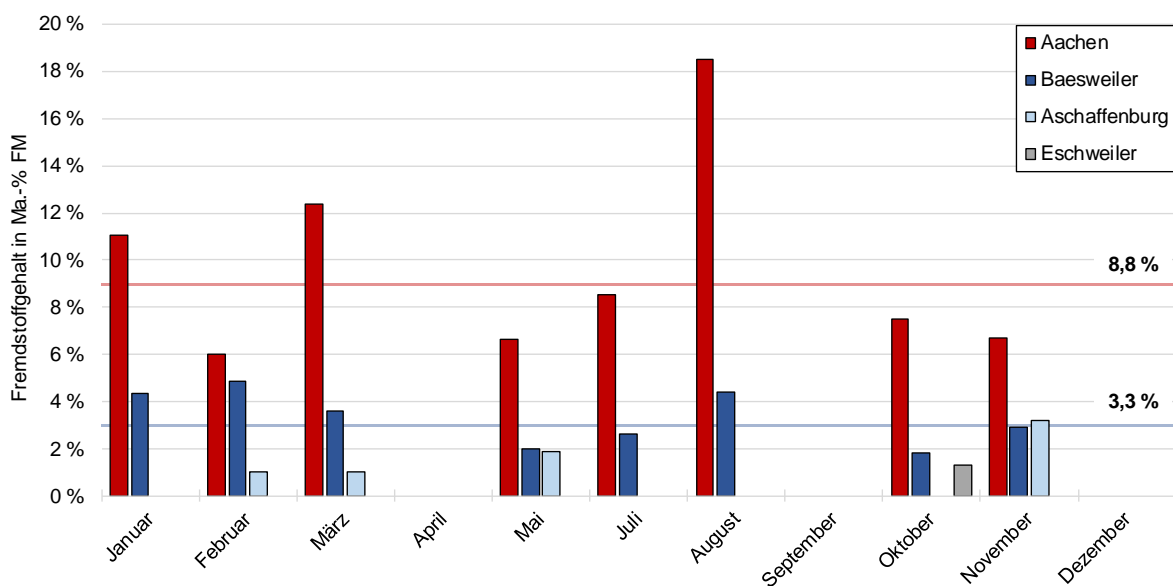


Abbildung 5: Siebdurchgangslinien des Biogutes aus den Referenzgebieten

## 2.3 Fremdstoffgehalte

Die Gesamtfremdstoffgehalte der Sammelgebiete sind Abbildung 6 zu entnehmen. Unter der Prämisse, dass Fremdstoffe vorrangig über den Küchenabfall und weniger über den Gartenabfall in das Biogut eingetragen werden, ist davon auszugehen, dass während der Vegetationsperiode durch den hohen Grünabfallanteil ein Verdünnungseffekt auftritt und der Fremdstoffgehalt sinkt. Das Biogut aus Baesweiler weist, in Bezug auf den Fremdstoffgehalt, diese prognostizierten Schwankungen auf. Die höchsten Fremdstoffgehalte wurden in den Februar-Proben bestimmt; im Mittel lag der Fremdstoffgehalt des Baesweiler Biogutes im Februar bei 4,9 Ma.-%.

In den Monaten mit überdurchschnittlich hohem Gartenabfallaufkommen (Mai und Oktober) ist der Fremdstoffgehalt am geringsten und liegt jeweils bei knapp 2 Ma.-%. Im August wurde mit 4,4 Ma.-% ein unerwartet hoher Fremdstoffgehalt ermittelt, der in etwa dem Fremdstoffgehalt der Wintermonate entspricht. Dieser unerwartete Anstieg kann mit einem klimabedingten Rückgang des Gartenabfallaufkommens begründet werden. Die durchschnittliche Temperatur betrug im Juli 2018 in der Städteregion Aachen 21,4°C und war somit 3°C höher als der Vorjahresdurchschnitt. Gleichzeitig betrug die Niederschlagsmenge im Juli lediglich 8,8 L/m<sup>2</sup>, das sind 88 % weniger Niederschlag als in den Vorjahren [Wetterkontor 2019]. Die hohen Temperaturen in Kombination mit den geringen Niederschlägen führten zu einem nahezu vollständigen Wachstumsstopp der heimischen Vegetation, wodurch im darauffolgenden Monat die angelieferte Biogutmenge reduziert war und somit der Verdünnungseffekt ausblieb. Durchschnittlich liegt der Fremdstoffgehalt im Biogut aus Baesweiler bei 3,3 Ma.-%.



**Abbildung 6: Fremdstoffgehalt des Biogutes aus den Referenzgebieten als Mittelwert der Einzelproben im Jahresverlauf**

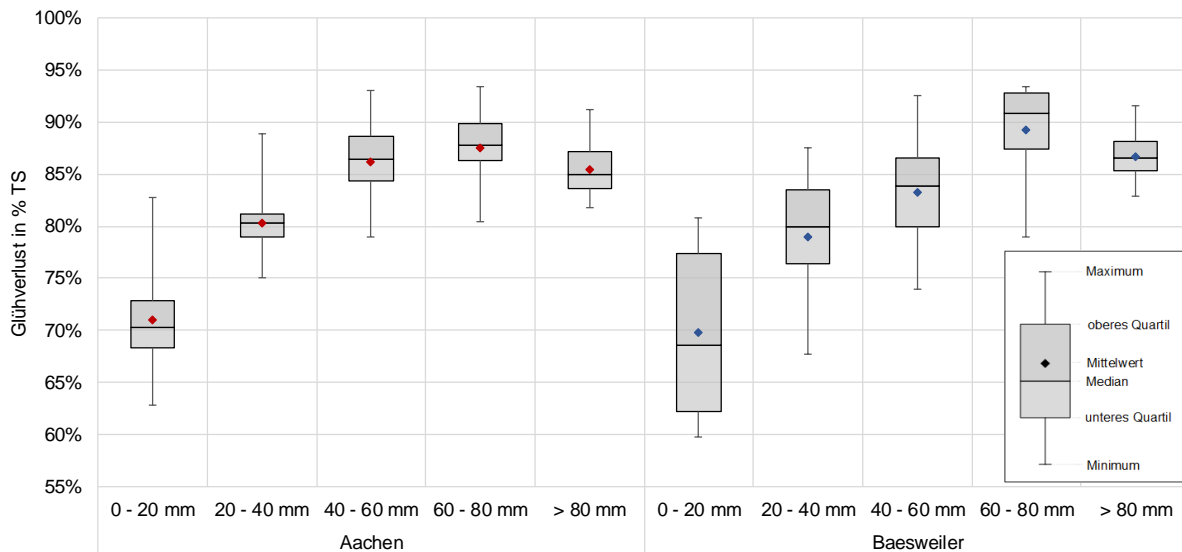
Der Fremdstoffgehalt des Aachener Biogutes liegt durchschnittlich bei 8,8 Ma.-% und ist damit deutlich höher als der durchschnittliche Fremdstoffgehalt des Baesweiler Biogutes. Das Aachener Biogut weist im Jahresverlauf ausgeprägte Qualitätsschwankungen auf, der minimale Fremdstoffgehalt liegt bei 6 Ma.-% (Februar) und der maximale Fremdstoffgehalt bei über 18 Ma.%. Diese ausgeprägten Qualitätsschwankungen sind nicht auf den Verdünnungseffekt durch eingetragenen Grünabfall zurückzuführen; sowohl die geringen Mengenschwankungen (vgl. Abbildung 4) als auch der vergleichsweise geringe Fremdstoffgehalt im vegetationsarmen Februar sprechen gegen den Verdünnungseffekt. Das Aachener Sammelgebiet ist siedlungsstrukturell durch Großwohnanlagen geprägt. In diesen Großwohnanlagen kommt es durch überfüllte Restabfallcontainer häufig zu einer Fehlentsorgung von Restabfall über die meist weniger vollen Biotonnen. Bereits vereinzelte Fehleinträge von Restabfall in die Biotonne in Verbindung mit dem in Aachen eingesetzten Drehtrommelfahrzeug führen zu einer drastischen Qualitätsminderung der gesamten Anlieferung. Die generellen Qualitätsunterschiede zwischen dem Aachener und dem Baesweiler Biogut sind somit mit großer Wahrscheinlichkeit auf die siedlungsstrukturellen Bedingungen zurückzuführen. Untermauert wird diese These durch die Art der eingetragenen Fremdstoffe. Während im Baesweiler Biogut vorrangig Abfallsammelbeutel, Hygieneprodukte und Nahrungsmittelverpackungen enthalten sind, deren Eintrag kontinuierlich durch fehlendes Wissen der Bürger oder Bequemlichkeit erfolgt, wurden im Aachener Biogut auch außergewöhnlichere Einträge wie Textilien, ein Bügeleisen und ein Duschschlauch gefunden.

Die Probenahmekampagnen in den Referenzgebieten Eschweiler und Aschaffenburg weisen durchschnittlich geringere Fremdstoffgehalte als im Baesweiler Biogut auf. Es ist davon auszugehen, dass die ländlichen Strukturen der Sammelgebiete die Qualität positiv beeinflussen und Fremdstoffgehalte < 2 % begünstigen.

## 2.4 Glühverluste und Gasbildungsraten

In der vegetationsreichen Zeit wird Mineralik über Gartenkehricht in das Biogut eingetragen, dies führt zu einem geringeren Glühverlust insbesondere in der Feinfraktion < 20 mm (Abbildung 7). Der Anteil des saisonbedingten Gartenkehrichts ist beim Baesweiler Biogut höher als beim Aachener Biogut, wodurch die höhere Schwankungsbreite des Glühverlustes von 60 - 80 % bezogen auf die Trockensubstanz in der Feinfraktion des Baesweiler Biogutes zu erklären ist. Bei Betrachtung der fraktionsspezifischen Glühverluste beider Referenzgebiete zeichnet sich ein ähnlicher Trend ab. Das Biogut beider Referenzgebiete weist den geringsten Glühverlust mit durchschnittlich 70 % TS (Baesweiler) bzw. 71 % TS (Aachen) in der Fraktion < 20 mm auf. Der Glühverlust steigt mit der Korngröße. Dieser Trend gilt bis zu einer Korngröße von 80 mm, wo der Glühverlust mit durchschnittlich 89 % TS (Baesweiler) bzw. 88 % TS (Aachen) maximal ist. Die Zusammensetzung der Fraktion > 80 mm (sandig-erdiges

Wurzelwerk, Holziges und PPK) führt hingegen im Mittel mit 87 % TS bzw. 85 % TS zu einem niedrigeren Glühverlust als in der Fraktion 60 - 80 mm.



**Abbildung 7: Schwankungsbreite des kornklassenspezifischen Glühverlusts bei 550°C für die Referenzgebiete Aachen und Baesweiler**

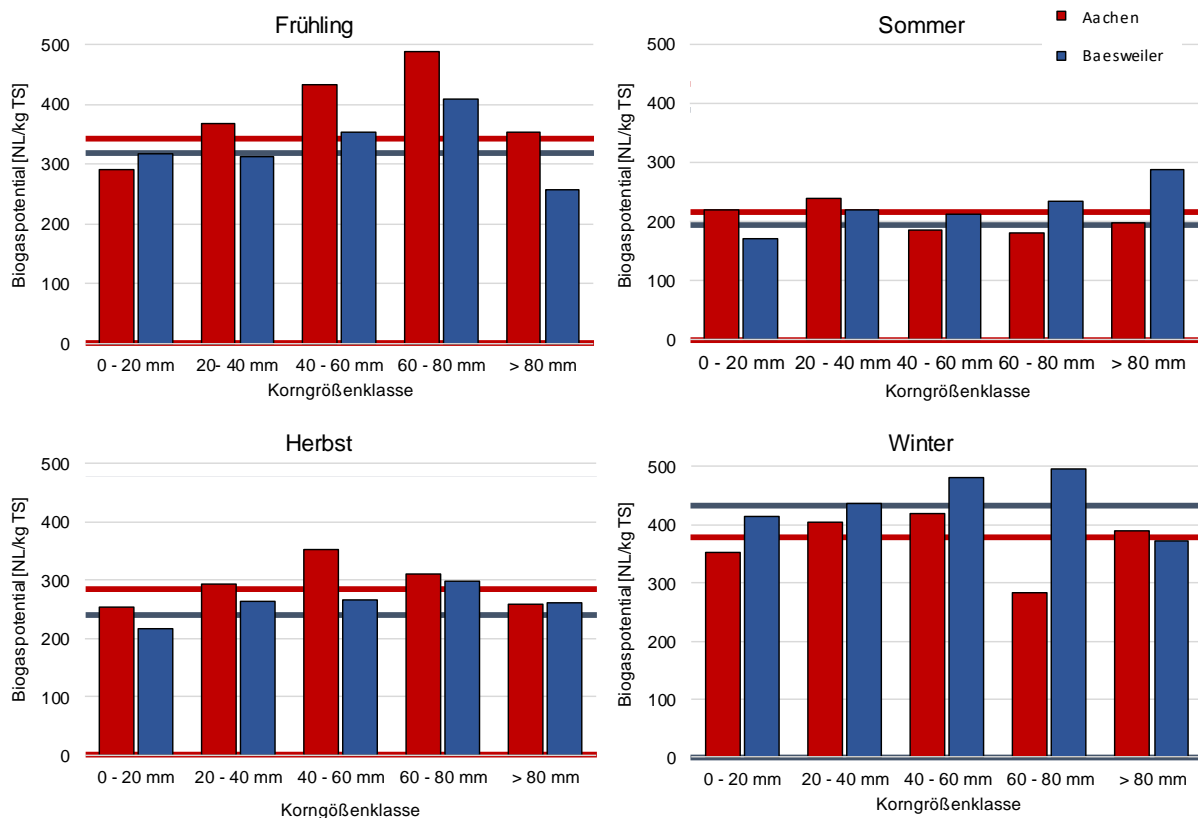
Die Bestimmung des Biogaspotentials erfolgte im Labormaßstab unter idealisierten Bedingungen nach Zerkleinerung der einzelnen Fraktionen auf 10 mm. Dies ermöglicht den Vergleich des Biogaspotentials aller Fraktionen und beider Sammelgebiete ohne Berücksichtigung der Zugänglichkeit durch Mikroorganismen und Abbaugeschwindigkeit der Biomasse bei originärer Korngröße. Die unter Laborbedingungen ermittelten Gasausbeuten spiegeln nur bedingt die im Realmaßstab erreichbaren Gasausbeuten wider, sie dienen dem qualitativen Vergleich des Biogaspotentials der einzelnen Fraktionen und der Identifikation der Schwankungsbreite des Biogaspotentials im Jahresverlauf.

Küchenabfälle haben ein deutlich höheres Biogaspotential als krautige und holzige Grüngutabfälle. Daher liegt das Biogaspotential des Biogutes aus Aachen während der Vegetationsperiode stets auf einem höheren Niveau als das Biogaspotential des Biogutes aus Baesweiler (Abbildung 8; Biogaspotential der Gesamtprobe repräsentiert durch Geraden im Hintergrund). Im Winter außerhalb der Vegetationsperiode werden in beiden Gebieten überwiegend küchenstämmige Abfälle über die Biotonne gesammelt. Im direkten Vergleich weist im Winter das Baesweiler Biogut ein höheres Biogaspotential auf. Insgesamt konnte bei der Beprobung im Winter für beide Gebiete das höchste Biogaspotential ermittelt werden. Im Frühjahr und Herbst ist das Biogaspotential für beide Gebiete, bedingt durch den Grünguteintrag, geringer als im Winter. Ausgehend von einer geringeren Grüngutmenge während der warmen und im Fall des Probenahmejahres trockenen Sommermonate, wurde ein gegenüber Frühjahr und Herbst erhöhtes Biogaspotential erwartet. Entgegen dieser Annahme wurde für diesen Zeitraum in den Sommermonaten jedoch das geringste



Biogaspotential ermittelt. Es ist davon auszugehen, dass die überdurchschnittlichen Temperaturen kurz vor der Probennahme im Sommer dazu führten, dass das Biogaspotential bereits während der 14-tägigen Sammlungsphase in der Biotonne Abbauprozessen unterlag, was wiederum eine Verringerung des resultierenden Biogaspotentials bewirkte.

Das fraktionsspezifische Biogaspotential ist im Durchschnitt in den Korngrößenklassen von 40 - 60 mm und 60 - 80 mm am höchsten und somit für Vergärungsanlagen besonders interessant. Nur im Sommer wurde für die genannten Fraktionen ein gegenüber den anderen Fraktionen vermindertes Biogaspotential festgestellt. Dies spricht dafür, dass in diesen Fraktionen leicht bioverfügbare Biomasse enthalten ist, die im Vergärungsprozess schnell umgesetzt wird, aber dadurch auch anfällig für Abbauprozesse im Abfallsammelbehälter ist. Ein Wechsel des Abfuhrhythmus von zweiwöchentlich zu wöchentlich während der Sommermonate kann dem gegebenenfalls entgegenwirken.



**Abbildung 8: Biogaspotential (GB<sub>21</sub>) nach Jahreszeit und Korngrößenklassenspezifisch für die Referenzgebiete Aachen und Baesweiler**

### 3 Konditionierungsmethoden und stoffliche Auswirkungen

Die mechanische Vorkonditionierung von biogenem Abfall verfolgt verschiedene technische Zielstellungen. Sie wird eingeteilt in die Prozessschritte Zerkleinerung, Klassierung sowie Sortierung. Die Anforderungen einer Vorkonditionierung sind dabei stark von den eingesetzten biologischen Rotte- bzw. Vergärungsverfahren abhängig.

### 3.1 Zerkleinerung

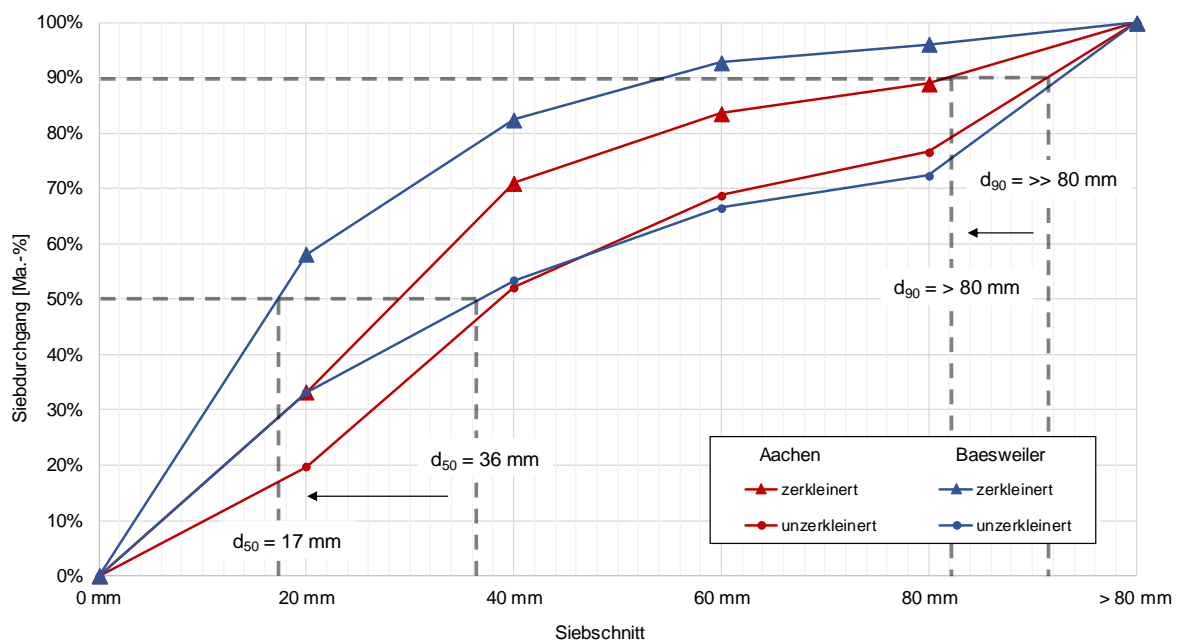
Die Zerkleinerung hat eine Vergrößerung der spezifischen Kornoberfläche zur Folge. Darüber hinaus lassen sich durch den Zerteilvorgang zudem Konglomerate und Verhakungen aufschließen [Bilitewski 2013, S. 486-487]. In Bezug auf den Stoffstrom Biogut soll durch eine Vorzerkleinerung vor allem die Biomasse aufgeschlossen werden, sodass diese dem anschließenden biologischen Prozess zugänglich gemacht wird. Die gleiche Zielstellung verfolgt die Öffnung von im Stoffstrom vorliegenden, verschlossenen Gebinden [Kranert 2017, S. 192]. Mit dem Aufschluss der Partikel geht eine Herabsetzung der oberen Korngröße des Stoffstromes einher. Bei der vorkonditionierenden Zerkleinerung sollte das Biogut schonend mechanisch beansprucht werden, d. h. die Zerkleinerung sollte mit geringer Rotordrehzahl erfolgen. Die schonende Zerkleinerungsbeanspruchung bewirkt eine selektive Zerkleinerung, bei der die obere Korngröße ( $d_{95}$ ) auf etwa 200 mm herabgesetzt wird, die Trennkorngröße  $d_{50}$  allerdings im besten Fall unverändert bleibt [Jansen et. al. 2018, S. 265]. Dadurch, dass der feinere Korngrößenbereich durch die schonende Zerkleinerung nur unwesentlich beeinflusst wird, wird eine Entwässerbarkeit des Gärsubstrates nach der anaeroben Behandlungsstufe gewährleistet, da strukturreiche Bestandteile erhalten bleiben. Zudem werden enthaltene Fremdstoffe ausschließlich freigelegt, nicht aber zerkleinert, sodass diese in späteren Prozessschritten leichter vom Biogut bzw. Kompostprodukt separiert werden können. Die schonende Vorzerkleinerung trägt somit maßgeblich zu einer effektiven Fremdstoffentfrachtung bei.

#### 3.1.1 Gebindeöffnung und selektive Korngrößenreduktion

Die mechanische Beanspruchung während des Sammelvorganges von Biogut kann die erste Vorkonditionierungsstufe der Aufbereitung darstellen. Grundlegend kommen für die Sammlung von haushaltsnah erfasstem Biogut Drehtrommel- und Pressplattenfahrzeuge zum Einsatz. Während die Struktur des Biogutes im Pressplattenfahrzeug weitgehend erhalten bleibt, kommt es im Drehtrommelfahrzeug zu einer erhöhten mechanischen Beanspruchung durch auftretende Scherkräfte. Das Transportgut wird zudem besser homogenisiert, da durch die rotierende Trommel zusammen mit einer von innen aufgeschweißten Bandschnecke eine ständige Umwälzung erzeugt wird [Bilitewski 2013, S. 161]. Analysen zeigen, dass die zusätzlichen mechanischen Beanspruchungen während der Sammlung per Drehtrommelfahrzeug die Öffnung der Sammelbeutel, die vornehmlich aus Kunststoff bzw. BAW bestehen, begünstigt. Während das Verhältnis von verschlossenen vorliegenden zu geöffneten Sammelbeuteln in den Analysen mit Pressplattenfahrzeug 1:1,3 beträgt, liegen bei den Analysen mit Drehtrommelfahrzeug pro verschlossenem Sammelbeutel 3,3 geöffnete Sammelbeutel vor. Insgesamt befinden sich bei der Sammlung per Drehtrommelfahrzeug im Mittel 55 verschlossene Sammelbeutel pro Tonne angeliefertem Biogut in den Proben. Bei der

Sammlung mit Hilfe des Pressfahrzeuges sind es im Mittel 130 verschlossene Beutel pro Tonne. Die Art der Biogutsammlung hat demnach Einfluss auf die Beschaffenheit der im Biogut enthaltenen Sammelbeutel. Durch eine erhöhte mechanische Beanspruchung während der Sammlung per Drehtrommelfahrzeug lässt sich ein Teil der verschlossenen Sammelbeutel öffnen, sodass das enthaltene Biogut der weiteren Aufbereitung und insbesondere dem biologischen Folgeprozess ohne zusätzlichen Einsatz von Technik zugänglich gemacht werden kann.

Zum Vergleich verschiedener Sammelproben können die Kenngrößen  $d_{50}$  und  $d_{90}$  herangezogen werden. Sie können in Siebdurchgangskurven abgelesen werden. Der  $d_{50}$  beschreibt die Korngröße, bei der 50 Ma.-% des Materials das Sieb passieren; analog beschreibt der  $d_{90}$  die Korngröße, bei der 90 Ma.-% des Materials das Sieb passieren.



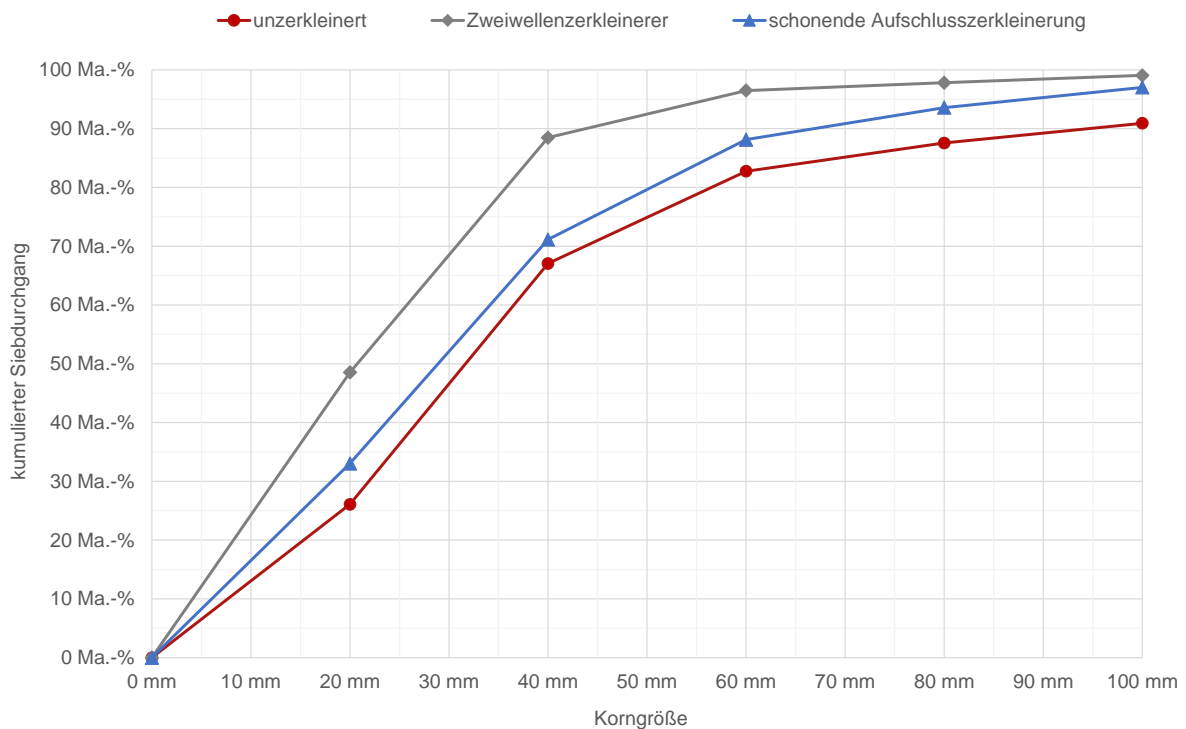
**Abbildung 9: Siebdurchgangslinien von Biogutproben aus Aachen und Baesweiler vor und nach der Aufschlusszerkleinerung**

Beim Vergleich von zerkleinerten und unzerkleinerten Biogutsiebdurchgangslinien dienen der  $d_{50}$  und der  $d_{90}$  als Kennzeichen für das gewünschte Herabsetzen der oberen Korngröße ( $d_{90}$ ) und die ungewünschte Erhöhung des Feingutanteils ( $d_{50}$ ). In Abbildung 9 sind für Aachen und Baesweiler jeweils zerkleinerte und unzerkleinerte Biogutproben gegenübergestellt und der  $d_{50}$  und der  $d_{90}$  beispielhaft eingezeichnet.

Durch die Zerkleinerung des Aachener Biogutes ist ein Herabsetzen des  $d_{90}$  erkennbar. Da der  $d_{90}$  in beiden Fällen allerdings jenseits des maximal untersuchten Siebschnitts in Höhe von 80 mm liegt, ist eine genaue Quantifizierung in diesen Fällen nicht möglich. Der  $d_{90}$  wird beim Baesweiler Biogut von > 80 mm auf 56 mm reduziert. Während vor der Zerkleinerung der  $d_{90}$  für beide Gebiete vergleichbar ist, ist die Korngrößenreduktion nach der Zerkleinerung beim

Baesweiler Biogut deutlich ausgeprägter. Dieses unterschiedliche Zerkleinerungsverhalten im oberen Korngrößenbereich spricht für eine unterschiedliche Zusammensetzung dieser Fraktion. Der  $d_{50}$  wird beim Aachener Biogut von 38 mm auf ca. 30 mm reduziert und beim Baesweiler Biogut von 36 mm auf 17 mm. In Bezug auf den  $d_{50}$  ist der Zerkleinerungseffekt somit auf das Baesweiler Biogut ausgeprägter.

Abbildung 10 zeigt in Aschaffenburg erzeugte kumulierte Siebdurchgangslinien. Es wird deutlich, dass durch eine Aufschlusszerkleinerung allgemein vor allem der Anteil  $> 100$  mm deutlich verringert werden kann. Insgesamt liegen vor der Konditionierung ca. 9 Ma.-% des untersuchten Biogutes in einer Korngröße  $> 100$  mm vor. Durch eine schonende Aufschlusszerkleinerung verringert sich der Anteil auf ca. 2 Ma.-%. Bei der Zerkleinerung durch einen Zweiwellenzerkleinerer ergibt sich ein ähnlicher Wert.



**Abbildung 10: Korngrößenverteilungen der Vorkonditionierungsmaßnahmen**

Diese Massenanteile sind hauptsächlich auf verschlossene Beutel zurückzuführen, die nach der Aufschlusszerkleinerung frei vorliegen. Die Beutelinhalte verteilen sich auf niedrigere Kornklassen. Aus den Siebdurchgangslinien wird zudem ein Unterschied im Zerkleinerungsergebnis der eingesetzten Zerkleinerer deutlich. Der eingesetzte Zweiwellenzerkleinerer produziert durch die mechanische Beanspruchung der Zerkleinerung deutlich mehr Feinkorn als die langsam laufende, schonende Aufschlusszerkleinerung. Während hier der Anteil  $< 20$  mm im Output weniger als 35 Ma.-% beträgt, sind es im Output des Zweiwellenzerkleinerers ca. 50 Ma.-%. Insgesamt sind im Zerkleinerungsoutput des

Zweiwellenzerkleinerers ca. 90 Ma.-% < 40 mm. Eine schonende Aufschlusszerkleinerung verändert demnach den Anteil an Feingut nur geringfügig gegenüber der unzerkleinerten Referenzsibddurchganglinie. Beide Zerkleinerungsvarianten reduzieren hingegen die obere Korngröße, was auf den Aufschluss von im Bioabfall geschlossen vorliegenden Beuteln zurückzuführen ist. Vor allem in Hinblick auf die enthaltenen Fremdstoffe ist eine langsam laufende, schonende Aufschlusszerkleinerung einer mechanisch stark beanspruchenden Zerkleinerung vorzuziehen, da gröbere Fremdstoffbestandteile leichter aus dem Produktstrom nach der biologischen Stufe zu separieren sind. Je feiner diese zerkleinert werden, desto anspruchsvoller ist die technische Aufgabenstellung der abschließenden Kompostfeinaufbereitung.

Abbildung 11 zeigt die Auswirkungen einer Zerkleinerung auf im Biogut enthaltene Folienfremdstoffe. Es ist ersichtlich, dass die mechanischen Beanspruchungen während der Aufschlusszerkleinerung eine Reduktion der Korngröße zur Folge haben. Der Anteil an Folienfremdstoffen > 80 mm sinkt im Mittel von 58 % auf 41 %. Zudem steigen die Anteile in den unteren Kornklassen (< 40 mm und 40 - 60 mm) an. Grobe Fremdstoffbestandteile werden somit durch die Aufschlusszerkleinerung in die unteren Kornklassen überführt. Es wird deutlich, dass die Aufschlusszerkleinerung immer ein Kompromiss aus einer ausreichenden Freilegung der biogenen Bestandteile und einer möglichst geringen Zerkleinerungswirkung auf die Fremdstoffbestandteile darstellen muss.

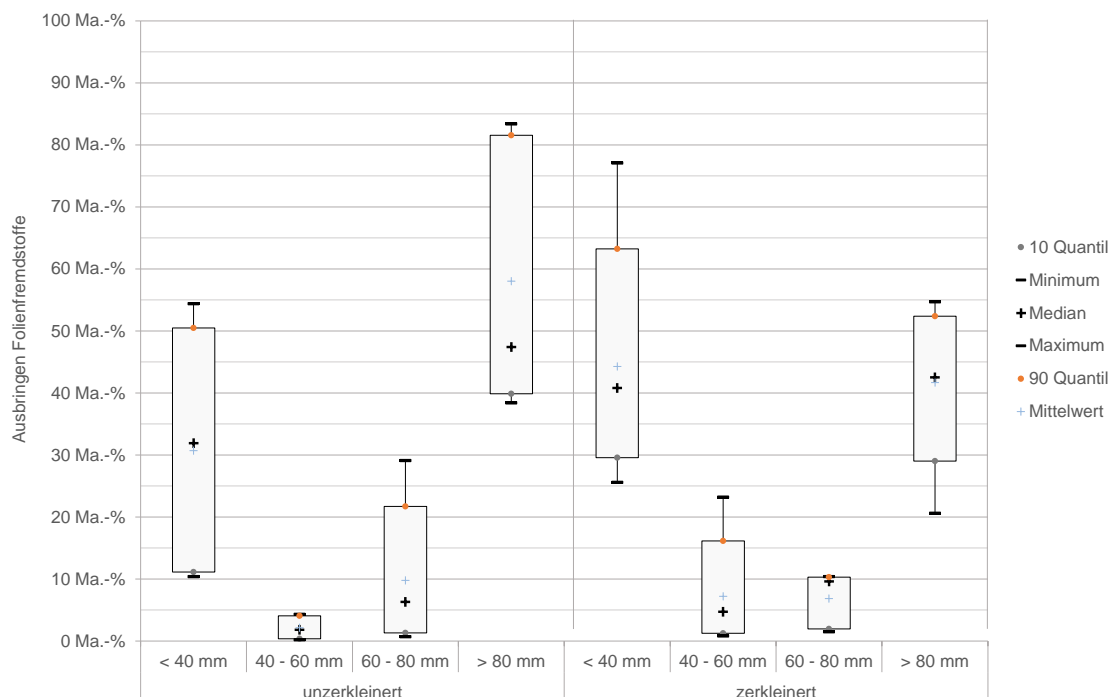


Abbildung 11: Ausbringen von Folienfremdstoffen vor und nach Zerkleinerung [Jansen et. al. 2018]

### 3.1.2 Vergrößerung der spezifischen Oberfläche

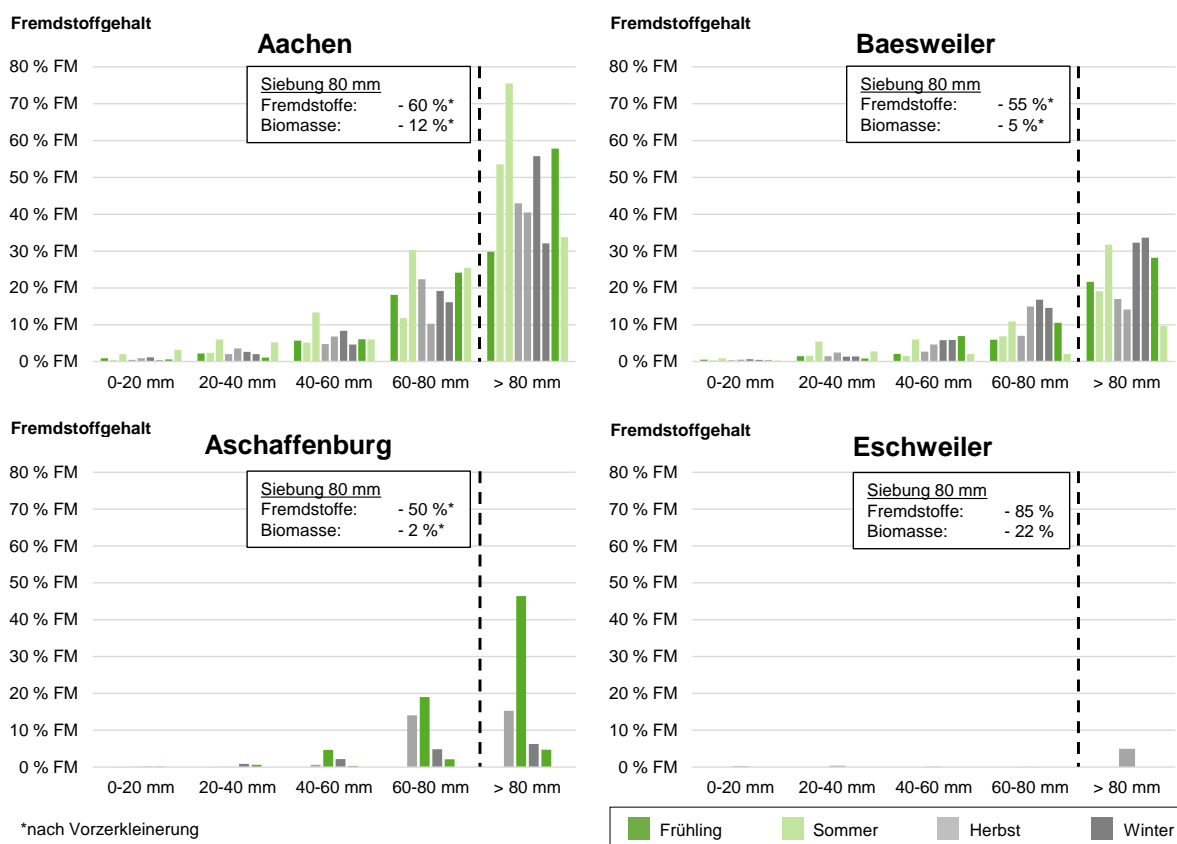
Mit einer Vorzerkleinerung geht die Vergrößerung der spezifischen Oberfläche des Biogutes einher. Die grundsätzliche Veränderung der spezifischen Oberfläche hat Auswirkungen auf die Gasbildungsdynamik des sich anschließenden Vergärungsprozesses. Prozessdynamisch wurde in den Großversuchen des Projektes eine Verschiebung der maximalen Biogasproduktionsrate in Richtung des Zeitpunktes des Materialeintrages durch Vorkonditionierungsmaßnahmen nachgewiesen. Zudem lässt sich durch die Reduzierung der Restgasproduktionsrate beim Abbruch des Vergärungsprozesses eine bessere Ausschöpfung des Biogaspotentials erreichen. Effizienzsteigerungen lassen sich durch spezifische Anpassungen der Verweilzeiten des Gärsubstrats im Fermenter erzielen, da aufgrund von gezielten Vorkonditionierungsmaßnahmen eine verbesserte Fermenterauslastung hergestellt werden kann.

In Bezug auf diskontinuierlich arbeitende Vergärungsanlagen ist der Zerkleinerung bzw. der Vergrößerung der spezifischen Oberfläche eine untere Grenze gesetzt. Diese untere Grenze der Korngröße des Eintragsmaterials wird durch die Sicherstellung der statischen Entwässerbarkeit des Gärsubstrates nach dem Vergärungsprozess definiert. Da für die sich anschließende Nachrotte das Gärsubstrat im Fermenter teilentwässert werden muss, muss ausreichend strukturreiches Material miteingefüllt werden. Das strukturreiche Material gewährleistet den statischen Abfluss des Perkolates im Fermenter und dient dazu, dass das Gärsubstrat nicht zu feucht aus dem Fermenter ausgetragen wird.

## 3.2 Klassierung

Die Klassierung verfolgt das Ziel, einen Stoffstrom in Klassen unterschiedlicher Korngröße aufzutrennen [Bilitewski 2013, S. 496]. In Bezug auf den Stoffstrom Biogut wird die Klassierung als Vorkonditionierungsmaßnahme zur Vorbereitung des Biogutes für die folgenden biologischen Prozessstufen genutzt. Die Abtrennung von groben Bestandteilen ist für eine Behandlung in kontinuierlichen Trockenvergärungsprozessen unumgänglich. Zudem können grobe, nicht verrottbare Bestandteile zur Qualitätssicherung eines am Ende des Gesamtprozesses entstehenden Kompostproduktes durch Klassiermaßnahmen entfernt werden. Gängige Siebschnitte liegen, abhängig vom betriebenen Vergärungssystem, bei 60 - 100 mm [Kranert 2017, S. 326]. Wie bereits im Kapitel 3.1 beschrieben, muss auch nach einem vorkonditionierenden Klassierschritt die mechanische Entwässerbarkeit des Gärsubstrates sichergestellt sein. Für eine weitergehende Konditionierung müssen die Gärreste nach einer ersten statischen Entwässerung im Falle von diskontinuierlich betriebenen Tunnelvergärungsanlagen auf Trockensubstanzgehalte von 30 - 40 % eingestellt werden [Kranert 2017, S. 377].

In Abbildung 12 sind die fraktionsspezifischen Fremdstoffgehalte aller Probenahmekampagnen nach Referenzgebiet und Jahreszeit geordnet dargestellt. In allen Probenahmekampagnen wurden gebietsunabhängig mit steigender Korngröße höhere Fremdstoffgehalte ermittelt. Beim Aachener Biogut liegt der Fremdstoffgehalt der Fraktion > 80 mm bei allen Probenahmen zwischen 30 Ma.-% und 75 Ma.-%, während der Fremdstoffgehalt der nächst kleineren Korngrößenklasse bei maximal 30 Ma.-% liegt. Auch das Biogut der anderen Referenzgebiete folgt diesem Trend, jedoch bewegen sich die fraktionsspezifischen Fremdstoffgehalte jeweils auf einem niedrigeren Niveau. Die Fraktion > 80 mm des Baesweiler Biogutes weist z. B. eine Schwankungsbreite des Fremdstoffgehaltes zwischen 10 Ma.-% und 33 Ma.-% auf.



**Abbildung 12: Fremdstoffgehalt nach Korngrößenklasse mit fiktiver Siebung bei 80 mm**

Durch den in Abbildung 12 eingezeichneten Siebschnitt wird eine Siebung bei 80 mm simuliert. Unter idealen Bedingungen könnten durch eine Siebung bei 80 mm des vorzerkleinerten Aachener Biogutes durchschnittlich 60 Ma.-% der insgesamt enthaltenen Fremdstoffe entfernt werden. Dies führt zu einer Reduzierung des Gesamtfremdstoffgehaltes von durchschnittlich 8,8 Ma.-% auf 3,8 Ma.-%. Bei gleicher Vorgehensweise können im Fall des Biogutes aus Baesweiler bzw. Aschaffenburg 55 Ma.-% bzw. 50 Ma.-% der enthaltenen Fremdstoffe entfrachtet werden. Der durchschnittliche Fremdstoffgehalt des Baesweiler Biogutes wird dadurch von 3,3 Ma.-% auf 2 Ma.-% reduziert. Beim Aschaffener Biogut kann durch die Siebung bei 80 mm sogar ein Fremdstoffgehalt < 1 Ma.-% erzielt werden. Neben den

Fremdstoffen wird über die Siebung ebenfalls im Vergärungsprozess erwünschte Biomasse ausgeschleust und somit der biologischen Behandlungsstufe entzogen, beim Aachener Biogut sogar durchschnittlich 12 Ma.-% der insgesamt enthaltenen Biomasse.

Die simulierte Siebung des Eschweiler Biogutes erfolgt anhand von Rohmaterial, das zuvor nicht aufschlusszerkleinert wurde. Ohne Vorzerkleinerung können im Fall des Eschweiler Biogutes 85 Ma.-% der Fremdstoffe durch eine Siebung bei 80 mm entfrachtet werden. Das Biogut der ruralen Eschweiler Sammeltour ist als qualitativ hochwertig zu bezeichnen, die eingetragenen Fremdstoffe sind überwiegend flächige, zum Teil sogar als biologisch abbaubar deklarierte, Abfallsammelbeutel. Während bei einer Siebung ohne vorheriger Vorzerkleinerung eine deutliche Reduzierung des Fremdstoffgehaltes erzielt werden kann, wird gleichzeitig eine bedeutende Biomassemenge, die unter anderem in geschlossenen Gebinden enthalten ist, ausgeschleust. Nach der Siebung des unzerkleinerten Eschweiler Biogutes verbleiben 22 Ma.-% der Biomasse im Siebüberlauf. Durch die Siebung bei 80 mm ohne vorherige Aufschlusszerkleinerung geht somit rund ein Viertel jeder Anlieferung für die biologische Behandlung verloren. Die Wahl eines Siebschnittes < 80 mm ist auf Basis der gewonnenen Ergebnisse nicht sinnvoll. Es muss zudem klargestellt werden, dass reale Siebungen nur mit einem Wirkungsgrad < 100 % durchgeführt werden können.

#### **4 Handlungsempfehlungen**

Ob eine mechanische Vorkonditionierung für Biogut im Vorfeld einer Vergärung durchgeführt wird, ist zunächst vom verwendeten Vergärungssystem abhängig. Beim Betrieb von Pfropfenstromfermentern ist eine Konditionierung des Biogutes unerlässlich, da grobe Störstoffe, insbesondere Folien, den Betrieb des Fermenters durch die Bildung von Schwimmschichten erheblich beeinträchtigen können. Die Absiebung des Materials bei 60 - 80 mm dient in diesen Fällen zur Abtrennung der groben Fremdstoffe – eine vorherige Aufschlusszerkleinerung ist Stand der Technik. Die Vergärung im diskontinuierlichen Tunnelsystem hingegen bietet den Vorteil, unabhängig vom Fremdstoffgehalt des eingetragenen Materials betrieben werden zu können. Eine Fremdstoffabscheidung ist nicht zwingend notwendig, kann aber für die spätere Qualitätssicherung des Kompostproduktes vorteilhaft sein. Handlungsempfehlungen für die Vorkonditionierung von Biogut können dementsprechend ausschließlich als Ergänzung zu den essentiellen Behandlungsmaßnahmen der jeweiligen Vergärungsanlage, die einen reibungslosen Anlagenbetrieb sicherstellen, ausgesprochen werden.

##### Konditionierungsmaßnahmen in Abhängigkeit der Abfallqualität

Des Weiteren sind konkrete Maßnahmen zur Vorkonditionierung von Biogut immer in Abhängigkeit der jeweiligen Abfallqualität zu treffen. Wie die Hinleitung in den ersten Kapiteln



zeigt, handelt es sich bei getrennt erfasstem Biogut um einen Stoffstrom, dessen Qualität, aufgrund einer Vielzahl von Parametern, stark schwankt. Es ergeben sich für Anlagenbetreiber stoffliche Voraussetzungen, die sich je nach Einzugsgebiet stark voneinander unterscheiden können. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass auch die Vorkonditionierung des Biogutes im besten Fall auf diese stofflichen Voraussetzungen angepasst wird.

#### Vorzerkleinerung von Biogut

Konkrete Handlungsempfehlungen lassen sich mit der Unterscheidung von Biogut aus städtisch bzw. ländlich geprägten Einzugsgebieten aussprechen. In Bezug auf Biogut aus städtisch geprägten Einzugsgebieten zeigen die Ergebnisse, dass eine Vorzerkleinerung aufgrund der zu erwartenden höheren Fremdstoffgehalte nicht zielführend ist. Um eine Fremdstoffentfrachtung vor oder nach der biologischen Behandlungsstufe zu begünstigen, sollten grobe Fremdstoffbestandteile möglichst nicht zerkleinert werden. Um biogene Bestandteile für die biologische Behandlung freizulegen, empfiehlt sich eine Gebindeöffnung, die die Sammelbeutel aufreißt und die Inhalte freilegt. In Sammelgebieten mit überwiegend ländlich geprägter Gebietsstruktur kann das gesammelte Biogut einer vorkonditionierenden Zerkleinerung unterzogen werden, da die vergleichsweise geringen Fremdstoffgehalte dies zulassen.

Generell sollte bei der Wahl der Zerkleinerung auf eine möglichst schonende Aufschlusszerkleinerung zurückgegriffen werden. Wie die Versuche gezeigt haben, kann sich eine massive Herabsetzung der oberen Korngröße nicht nur in Bezug auf die enthaltenen Fremdstoffe negativ auswirken, sondern es kann zudem zu einer Störung des betriebssicheren Ablaufes der diskontinuierlichen Vergärung kommen. Durch fehlende Strukturanteile im Gärsubstrat ist eine notwendige statische Entwässerbarkeit des Substrates nach dem Vergärungsprozess nicht mehr gewährleistet. Es ist somit essentiell, strukturreichere Bestandteile mit in den Fermentertunnel einzutragen.

In Bezug auf die Gasbildungsdynamik des Vergärungsprozesses lässt sich eine leichte Verschiebung der maximalen Biogasproduktionsrate in Richtung des Zeitpunktes des Materialeintrages durch Vorkonditionierungsmaßnahmen in Form einer Vorzerkleinerung umsetzen. Zudem lässt sich durch die Reduzierung der Restgasproduktionsrate beim Abbruch des Fermentationsprozesses eine bessere Ausschöpfung des Biogaspotentials erreichen. Durch eine spezifische Anpassung der Verweilzeiten des Gärsubstrats im Fermenter können gezielte Vorkonditionierungsmaßnahmen eine verbesserte Fermenterauslastung herstellen. Ist z. B. in anlieferungsarmen Zeiträumen eine ausreichend lange Verweilzeit des Gärsubstrates im Fermenter gewährleistet, so kann im Hinblick auf eine verbesserte Fremdstoffabtrennung in der Kompostfeinaufbereitung auf eine Vorkonditionierung vor der Fermentation verzichtet werden. Unterliegen die Fermenter hingegen in anlieferungsstarken

Zeiträumen einer hohen Auslastung, kann durch eine Vorkonditionierung in Form einer schonenden Vorzerkleinerung das Biogaspotential des Gärsubstrates in einer optimierten Zeitspanne ausgeschöpft werden. Für den Anlagenbetreiber ergibt sich durch die gezielte Anpassung der Vorkonditionierungsmaßnahmen an die betrieblichen Begebenheiten eine erhöhte Flexibilität.

#### Absiebung von Fremdstoffbestandteilen

Als Ergänzung zur vorkonditionierten Zerkleinerung hat sich die Siebung des Biogutstromes als potentielle Maßnahme gegen einen zu großen Fremdstoffanteil im Kompostprodukt herausgestellt, insbesondere für stark verunreinigtes Biogut aus städtisch geprägten Sammelgebieten. Ein Großteil der Fremdstoffe hat eine Korngröße  $> 80$  mm und kann demzufolge über einen Siebschnitt mit 80 mm Lochung abgetrennt werden. Gleichzeitig weist die Fraktion  $> 80$  mm in der Regel gegenüber der Fraktionen 40 - 60 mm und 60 - 80 mm ein niedrigeres Biogaspotential auf, somit würde dem Prozess durch Absiebung der Fraktion  $> 80$  mm lediglich Material mit einem geringeren Beitrag zur Biogasproduktion entzogen werden. Der Siebüberlauf muss kostenpflichtig einer alternativen Verwertung zugeführt werden. Sofern ökonomisch sinnvoll, kann durch eine aufwendige Nachreinigung des Siebüberlaufs der enthaltene Biomasseanteil gegebenenfalls erhöht und für die biologische Stufe wichtiges Strukturmaterial gewonnen werden. Eine Siebung des Rohmaterials zur Reduzierung des Fremdstoffgehaltes in der biologischen Stufe ist nur ratsam für stark verunreinigtes Biogut, wenn ohne diese Maßnahme die Qualitätsanforderungen an das Kompostprodukt nicht erreicht werden können oder gesetzliche Reglementierungen dieses Vorgehen bedingen.

## 5 Literaturverzeichnis

- Abfallgebührensatzung Aachen (2018):** Abfallgebührensatzung der Stadt Aachen vom 01.01.2009 – 4. Nachtrag zur Abfallgebührensatzung der Stadt Aachen vom 12.12.2018.
- Abfallgebührensatzung Baesweiler (2019):** Satzung der Stadt Baesweiler über die Abfallbeseitigungsgebühren vom 16.12.2009, zuletzt geändert durch Satzung vom 18.12.2019.
- Abfallgebührensatzung Eschweiler (2018):** Gebührensatzung zur Satzung über die Abfallentsorgung in der Stadt Eschweiler, Satzung vom 18.12.2018.
- Abfallsatzung Eschweiler (2012):** Satzung über die Abfallentsorgung in der Stadt Eschweiler, Satzung vom 04.10.2012; in Kraft getreten am 01.11.2012.
- Abfallsatzung RegioEntsorgung (2019):** Satzung über die Vermeidung, Verwertung sowie das Einsammeln und Befördern von Abfällen (Abfallsatzung) im Gebiet des Entsorgungszweckverbandes RegioEntsorgung vom 05.12.2005 in der Fassung der 14. Änderungssatzung vom 09.12.2019.
- Abfallwirtschaftssatzung Aachen (2019):** Satzung über die Vermeidung, Verwertung und Beseitigung von Abfällen im Gebiet der Stadt Aachen vom 10.12.2008, in der Fassung der 7. Änderungssatzung vom 11.12.2019.
- Arbeitsagentur - Bundesagentur für Arbeit (2020):** Statistik nach Regionen - Datensatz von 2018, <https://statistik.arbeitsagentur.de/Navigation/Statistik/Statistik-nach-Regionen/Politische-Gebietsstruktur-Nav.html>, Stand: 30.03.2020.
- Atlas (2014):** Kern, M., Raussen Th.; Biogas-Atlas 2014/15 – Anlagenhandbuch der Vergärung biogener Abfälle in Deutschland und in Europa; Druckhaus Göttingen, 2014, 1. Auflage.
- Bayerisches Landesamt für Statistik (2020):** Statistikatlas Bayern – Datensatz von 2018, [www.statistik.bayern.de/statistikatlas/atlas.html](http://www.statistik.bayern.de/statistikatlas/atlas.html), Stand: 30.03.2020.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) (2019):** Hausmüll in Bayern – Bilanzen 2018; <https://www.lfu.bayern.de/abfall/abfallbilanz/index.htm>, Stand: 17.03.2020.
- Behörde für Umwelt und Energie Hamburg (2019):** Abfallstatistik Siedlungsabfälle, <https://www.hamburg.de/recycling/4793242/statistik-siedlungsabfaelle/>, Stand: 17.03.2020.
- BGK (2020):** Verwertung von Bioabfällen 2019, H&K aktuell Q1 2020, S. 7 und 8.
- Bilitewski, B.; Härdtle, G. (2013):** *Abfallwirtschaft – Handbuch für Praxis und Lehre*; 4. Aktualisierte und erweiterte Auflage; Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (2019):** Abfallmengenbilanz des Landes Hessen für das Jahr 2018, <https://umwelt.hessen.de/umwelt-natur/kreislauf-abfallwirtschaft/abfallmengenbilanz>, Stand: 17.03.2020
- Jansen, C.; Brune, M.; Jansen, C.; Pretz, T. (2018):** Fremdstoffe im Biogut – zur Bedeutung von mechanischer Vorbehandlung in Bioabfall und stoffspezifische Verwertung; Hrsg.: Wiemer, K; Kern, M.; Raussen, T.; Witzenhausen-Institut.
- Kern, M.; Siepenkothen, H.-J.; Turk, T. (2018):** Erfassung von haushaltsstämmigen Bioabfällen und Qualität des Bioguts. Müll und Abfall 10/18 S. 526-531.

- Kranert, M. (Hrsg.) (2017):** Einführung in die Kreislaufwirtschaft, 5. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden.
- Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein (LLUR) (2019):** Abfallbilanz 2018 Siedlungsabfälle, <https://www.schleswig-holstein.de/DE/Fachinhalte/A/abfallwirtschaft/siedlungsabfallbilanz.html>, Stand: 17.03.2020.
- Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern (2020):** Daten zur Abfallwirtschaft 2018, [https://www.lung.mv-regierung.de/insite/cms/umwelt/abfall/info\\_abfall/dza\\_2002.htm](https://www.lung.mv-regierung.de/insite/cms/umwelt/abfall/info_abfall/dza_2002.htm), Stand: 17.03.2020.
- Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt (2018):** Abfallbilanz 2017 für das Land Sachsen-Anhalt, <https://mule.sachsen-anhalt.de/umwelt/abfall/bilanzen-plaene/#c82887>, Stand: 17.03.2020.
- Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft des Landes Brandenburg (MLUL) (2018):** Daten und Informationen zur Abfallwirtschaft 2018 mit Siedlungsabfallbilanz 2017 und Bilanz gefährliche Abfälle 2017, <https://mluk.brandenburg.de/mluk/de/ueber-uns/oeffentlichkeitsarbeit/veroeffentlichungen/detail/~01-11-2019-abfallbilanzen-der-oeffentlich-rechtlichen-entsorgungstraeger>, Stand: 17.03.2020.
- Ministerium für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten Rheinland-Pfalz (2020):** Landesabfallbilanz Rheinland-Pfalz 2018, Stand: <https://mueef.rlp.de/de/themen/klima-und-ressourcenschutz/kreislaufwirtschaft/abfallbilanzen/>, 17.03.2020.
- Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2019):** Abfallbilanz 2018 Ressourcen aus unserer kommunalen Kreislaufwirtschaft, <https://um.baden-wuerttemberg.de/de/service/publikationen/publikation/did/abfallbilanz-2018/>, Stand: 17.03.2020.
- Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (LANUV) (2018):** Abfallbilanz Nordrhein-Westfalen für Siedlungsabfälle 2017, <https://www.umwelt.nrw.de/umwelt/umwelt-und-ressourcenschutz/abfall-und-kreislaufwirtschaft/siedlungsabfaelle>, Stand: 17.03.2020.
- Ministerium für Umwelt und Naturschutz Saarland (2019):** Abfallbilanz 2017 - Siedlungsabfälle-, <https://www.saarland.de/6874.htm>, Stand: 17.03.2020.
- Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz (2019):** Abfallbilanz 2017, [https://www.umwelt.niedersachsen.de/themen/abfall/bilanzen\\_plaene/abfallbilanzen/niedersaechsische-abfallbilanzen-94725.html](https://www.umwelt.niedersachsen.de/themen/abfall/bilanzen_plaene/abfallbilanzen/niedersaechsische-abfallbilanzen-94725.html), Stand: 17.03.2020.
- Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) (2019):** Siedlungsabfallbilanz 2018, <https://www.wertstoffe.sachsen.de/aufkommen-von-siedlungsabfallen-9884.html>, Stand: 17.03.2020.
- Senator für Umwelt, Bau und Verkehr in Bremen (2018):** Abfallbilanz 2017 des öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgers der Stadtgemeinde Bremen, [https://www.bauumwelt.bremen.de/umwelt/abfall/abfallwirtschaftsplan\\_und\\_abfallbilanz\\_fuer\\_das\\_land\\_bremen\\_2017-59662](https://www.bauumwelt.bremen.de/umwelt/abfall/abfallwirtschaftsplan_und_abfallbilanz_fuer_das_land_bremen_2017-59662); Stand: 17.03.2020.
- Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Berlin (2018):** Abfallbilanz des Landes Berlin 2017, <https://www.berlin.de/senuvk/umwelt/abfall/bilanzen/>, Stand: 17.03.2020.

- Staatsministerium des Innern Freistaat Sachsen (2005):** Verwaltungsvorschrift des Sächsischen Staatsministeriums des Innern zur Führung des Liegenschaftskatasters (Liegenschaftskatastervorschrift – VwVLika).
- Statistisches Bundesamt - Destatis (2020):** Aufkommen an Haushaltsabfällen: Deutschland, Jahre, Abfallarten, Stand 29.06.2020.
- Statistisches Landesamt NRW (2020):** Statistikatlas Nordrhein-Westfalen – Datensatz von 2018, <https://www.statistikatlas.nrw.de/>, Stand: 30.03.2020.
- Stadt Aachen (2018):** Anzahl wohnberechtigter Bürger pro Straße, Auskunft auf Anfrage bei der Abteilung Statistik der Stadt Aachen am 09.05.2018 erhalten.
- Stadt Baesweiler (2018):** Anzahl wohnberechtigter Bürger pro Straße, Auskunft auf Anfrage bei der Abteilung Statistik der Stadt Baesweiler am 31.07.2018 erhalten.
- Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz (TLUBN) (2019):** Abfallbilanz 20018 Ressourcen aus unserer Kreislaufwirtschaft, [https://tlubn.thueringen.de/fileadmin/umweltschutz/Abfall/Landesabfallwirtschaftsplanung/Abfallbilanz\\_2018\\_01.pdf](https://tlubn.thueringen.de/fileadmin/umweltschutz/Abfall/Landesabfallwirtschaftsplanung/Abfallbilanz_2018_01.pdf), Stand: 17.03.2020.
- Wetterkontor (2019):** Wetter-Rückblick Wetterstation Aachen-Orsbach, <https://www.wetterkontor.de/wetter-rueckblick/>, Stand: 25.04.2019.
- Zensus (2011):** Gebäude und Wohnungen sowie Wohnverhältnisse der Haushalte – Ergebnisse des Zensus 2011, abgerufen für Aachen, Aschaffenburg, Baesweiler, Eschweiler, <https://ergebnisse.zensus2011.de/#StaticContent:00,,,>, Stand: 30.03.2020.