

BioVent

Verbundvorhaben „BioVent“

Lastmanagement und Systemdienstleistungsbereitstellung durch
Rottebelüftungsventilatoren Bioabfall behandelnder Anlagen
zum Ausgleich der fluktuierenden Erneuerbaren Energien

Abschlussbericht

Für: Projektträger Jülich
Forschungszentrum Jülich GmbH

FKZ: 03EI5402 A und B

Berichtszeitraum: 01.01.2020 - 30.04.2023

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

BioVent - Lastmanagement und Systemdienstleistungsbe- reitstellung durch Rottebelüftungsventilatoren Bioabfall behandelnder Anlagen zum Ausgleich der fluktuierenden Erneuerbaren Energien

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR ENERGIEWIRTSCHAFT UND ENERGIESYSTEMTECHNIK, IEE

Förderkennzeichen: 03EI5402A

Laufzeit: 01.01.2020 – 30.04.2023

Berichtszeitraum: 01.01.2020 – 30.04.2023

Verbundpartner: Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH

VORGELEGT VON:

**FRAUNHOFER INSTITUT FÜR WINDENERGIE UND
ENERGIESYSTEMTECHNIK (IEE)**

Uwe Hoffstede, Frank Schünemeyer,
Dr. Bernd Krautkremer
Joseph-Beuys-Straße 8
34117 Kassel



**WITZENHAUSEN-INSTITUT FÜR ABFALL, UMWELT
UND ENERGIE GMBH**

Thomas Raussen, Markus Blume
Werner-Eisenberg-Weg 1
37213 Witzenhausen



Inhalt

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | ZUSAMMENFASSUNG | 4 |
| 2 | HINTERGRUND | 6 |
| 3 | ZIELSETZUNG DES PROJEKTES..... | 7 |
| 4 | STATUS QUO DER ANLAGEN- UND BELÜFTUNGSTECHNIK BEI DER BIO- UND GRÜNGUTKOMPOSTIERUNG IN DEUTSCHLAND (AP 1) | 8 |
| 4.1 | KLASSIFIZIERUNG DER EINGESETZTEN ROTTEBELÜFTUNGSTECHNIK..... | 8 |
| 4.2 | ANALYSE TECHNISCHER UND RECHTLICHER RAHMENBEDINGUNGEN..... | 17 |
| 4.3 | UNTERSUCHUNG DER PRAKTISCHEN RELEVANZ VON EIGENSTROMNUTZUNGSKONZEPTEN | 21 |
| 4.4 | ANLAGENBESTAND DEUTSCHLAND | 25 |
| 4.5 | MODELLIERUNG REGELLEISTUNGSPOTENZIAL..... | 35 |
| 5 | TECHNISCHE ANFORDERUNGEN UND MARKTINTEGRATION VON ROTTEBELÜFTUNGSVENTILATOREN ALS FLEXIBLE LASTEN (AP 2)..... | 37 |
| 5.1 | REGULATORISCHE RAHMENBEDINGUNGEN..... | 37 |
| 5.2 | VORAUSSETZUNGEN ZUR EINGLIEDERUNG DER ROTTEBELÜFTUNGSANLAGEN IN EIN VIRTUELLES KRAFTWERK..... | 51 |
| 6 | EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG AN ZWEI ABFALLVERGÄRUNGSANLAGEN | 53 |
| 6.1 | MESSKONZEPT UND PROBENAHME..... | 54 |
| 6.2 | ERGEBNISSE | 55 |
| 7 | ERMITTLUNG DES MÖGLICHEN BEITRAGS DER ROTTEBELÜFTUNGSTECHNIK ZUR INTEGRATION DER FLUKTUIERENDEN EE (AP 4) | 69 |
| 7.1 | ÜBERBLICK ÜBER DIE METHODIK | 69 |
| 7.2 | ERGEBNISSE | 75 |
| 8 | ANALYSE DER HEMMNISSE..... | 78 |
| 9 | LITERATURVERZEICHNIS | 80 |

1 Zusammenfassung

Das hier beschriebene Projekt beleuchtet die Möglichkeit, die sehr stromintensive Belüftung von Bio- und Grüngutkompostierungsanlagen in einer Art und Weise zu betreiben, dass die Energiekosten und der CO₂-Ausstoß des Unternehmens gesenkt und ein positiver Einfluss auf das Energiesystem ausgeübt werden.

Hierzu wurde zunächst der Bestand dieser Anlagen erfasst, und die vorhandene Belüftungstechnik untersucht. Hierbei wurden nur die Technikanteile auf ihren durch ihren Betrieb verursachten Energiebedarf analysiert, die überhaupt ein Beeinflussungspotenzial besitzen. So wurden z.B. Belüftungen mit einer Relevanz für den Arbeitsschutz (Hallenlüftungen) von der Betrachtung ausgeschlossen. Für die betrachteten, beeinflussbaren Prozesse wurden mögliche Betriebsweisen des Rotteprozesses herausgearbeitet und der einzuhaltenden regulatorischen Rahmen dargestellt.

Mit diesen Kenntnissen wurde untersucht, mit welchen Maßnahmen der Beeinflussung der Lüftungsleistung welche Stromdienstleistungen erbracht werden können und welche Restriktionen des gesamten Anlagenbetriebs sich hierdurch ergeben. Dabei wurden auch die technischen und administrativen Voraussetzungen die für die Erbringung dieser Stromdienstleistungen erforderlich zusammengestellt.

Mittels einer Modellierung der Gesamtheit der Anlagen wurde weiterhin abgeschätzt, welchen Einfluss diese Maßnahmen auf den gesamten Strommarkt hinsichtlich Änderung des Kraftwerksparks, dessen Betrieb sowie den CO₂-Ausstoß haben. Hierbei wurden sowohl positive als auch negative Laständerungen betrachtet.

In einem experimentellen Teil wurden an zwei unterschiedlichen Anlagen die Rottebelüftungen in einer Art und Weise beeinflusst, wie sie bei einer aktiven Lieferung bestimmter Systemdienstleistungen vorgenommen werden müssten. Es wurde als Referenz dazu jeweils ein identisches Rotteverfahren im Normalbetrieb gefahren, um Unterschiede im Rotteprozess identifizieren zu können. Die Rotteergebnisse wurden sowohl vom Personal der Anlagen beurteilt als auch einer Laboranalyse unterzogen.

Ergebnisse:

Insgesamt lässt sich feststellen, dass der Einfluss dieser Maßnahmen auf das Energiesystem recht gering ist. Die Gesamtkosten des Stromsystems würden sich um 0,11% und der CO₂-Ausstoß um 0,13% verringern. Dies war zu erwarten, da ja der Anteil der Rottebelüftungen am Gesamtstromverbrauch Deutschlands nur einen sehr geringen Anteil ausmacht (flexible Rottebelüftung ca. ca. 25MW, installierte Kraftwerksleistung in De >200GW). Aus diesem Grund wurde die Simulation auch nur für den deutschen Strommarkt vorgenommen. Es zeigte sich auch, dass der Lastabwurf den deutlich größeren Einfluss auf das Stromsystem hat.

An einer einzelnen Anlage bzw. für die Anschlussnetzzone ergeben sich jedoch zahlreiche Möglichkeiten, mit dieser Methode die Energie- bzw. Infrastrukturkosten zu senken. Aufgrund der Vielzahl der möglichen Stromdienstleistungen, die auch standortspezifisch sind und der Volatilität der Strommärkte hinsichtlich Preisgefüge und sich ändernder Regulatorik kann keine einheitliche Empfehlung abgegeben werden. Es wurden aber die notwendigen Maßnahmen und Randbedingungen für typische Anwendungen so zusammengestellt, dass potentiell Interessenten hier schnell einen Einstieg finden können.

Bezüglich des Einflusses auf die Rotteergebnisse ergab sich kein völlig klares Bild durch die Praxisuntersuchungen. Die Beurteilung der Ergebnisse durch das Personal der Anlage fiel eher negativ aus (weniger Rotteumsatz, schlechtere Qualität) und auch die

Mengendaten zeigten dies. Die Laboruntersuchungen konnten dies jedoch nicht so eindeutig bestätigen, zeigten aber ebenfalls die Tendenz zu schlechteren Rotteergebnissen, wenn die Lüftung netzdienlich beeinflusst wird. Hier wäre aber auch eine detailliertere Betrachtung der Probenahme und des Analyseprozesses empfehlenswert. Eine fundiertere Aussage ließe sich nur durch deutlich umfangreichere Untersuchungen erzielen, bei denen sowohl Rottegut, Anlagentyp und Belüftungsstrategie variiert werden. Insgesamt ist aber festzuhalten, dass die Beeinflussung der Lüftung hinsichtlich der Probleme im Rotteergebnis nicht bedenkenlos angewendet werden kann.

Empfehlungen:

Standort und anlagenspezifisch ist die Beeinflussung der Rottebelüftung als Maßnahme zur Energiekostensenkung durchaus in Erwägung zu ziehen. Mit den dargestellten Anleitungen lässt sich schnell ein Überblick über Maßnahmen gewinnen, die für eine zu betrachtende Anlage (mit spezifischen Stromlieferverträgen) in Frage kommen könnten.

Da jedoch ein negativer Einfluss auf das Rotteergebnis bestehen kann, sollten unbedingt vorher einige Versuchsreihen an der Anlage durchgeführt, begutachtet und analysiert werden, um das Maß der möglichen Beeinflussung bestimmen zu können.

2 Hintergrund

Die Stromproduktion aus Erneuerbaren Energien in Deutschland nimmt kontinuierlich zu und soll gemäß politischer Zielsetzungen bis zum Jahr 2030 auf 80% gesteigert werden. Insbesondere den fluktuierenden erneuerbaren Energieträgern (fEE) Wind und Photovoltaik wird eine tragende Rolle im zukünftigen Energieversorgungssystem zugeordnet. Somit wird eine flexibel steuerbare Stromerzeugung (Erzeugungsmanagement), aber auch eine Orientierung des Strombedarfs am Dargebot nicht steuerbarer Energieträger immer wichtiger (Lastmanagement) um Nachfrage und Angebot zu jeder Zeit in Einklang zu bringen. Für die Realisierung einer weitestgehenden Vollversorgung mit EE-Strom sind weiterhin Maßnahmen zum Ausbau der Stromnetze und die Entwicklung und Nutzung von Speichertechnologien zu nennen.

Seit der Novellierung des Erneuerbare Energien Gesetz (EEG) im Jahr 2012 wird der Strom aus der Vergärung von Rest- und Abfallstoffen gesondert gefördert, während die Rahmenbedingungen zur energetischen Nutzung nachwachsender Rohstoffe (NawaRo) deutlich eingeschränkt wurden. Gleichzeitig soll die stofflich-energetische Verwertung organischer Abfälle ausgeweitet werden, sodass mit einer deutlichen Potentialsteigerung zu rechnen ist: Durch die 2012 in Kraft getretene Neuordnung des Kreislaufwirtschafts- und Abfallrechts sind Bioabfälle, die einer Überlassungspflicht unterliegen, spätestens ab dem 1. Januar 2015, getrennt zu sammeln. Die getrennte Erfassung von Bioabfällen aus privaten Haushalten (auch als „Biogut“ bezeichnet) wird nach Meinung von Experten und Verbänden kurz- bis mittelfristig deutlich steigen. Bisher wird weniger als die Hälfte des derzeit getrennt erfassten Bioguts kaskadenartig als Energie- (Biogas) und Ressourcenträger (Kompost) genutzt. In Abhängigkeit gesetzlich-regulatorischer Rahmenbedingungen geht mit der Ausweitung der Bioguterfassung ebenfalls ein Ausbau zusätzlicher Bioabfallvergärungskapazitäten einher.

Insgesamt besteht ein hohes Optimierungspotential diese Bioabfallvergärungs- und Kompostierungsanlagen (kurz: BiKo-Anlagen) in den Transformationsprozess der zukünftigen Energieversorgung zu integrieren und weiterzuentwickeln. BiKo-Anlagen sind als Abfallverwertungsanlagen Energieerzeuger und zugleich auch Energieverbraucher (insb. wegen der notwendigen Abfallaufbereitungsprozesse). Bei diesen Anlagen stehen bisher abfallwirtschaftliche Fragen im Vordergrund, weshalb energiewirtschaftliche Themen und die dazu erforderlichen technischen Maßnahmen und die Potentiale wenig bekannt sind und aufgrund dessen nicht genutzt werden. Derzeit werden Bioabfallvergärungs- und Kompostierungsanlagen i. d. R. sowohl hinsichtlich ihres Eigenbedarfs als auch im Hinblick auf die Stromeinspeisung unabhängig vom allgemeinen Strombedarf betrieben. Dies kann zu paradoxen energiewirtschaftlichen Situationen führen, wie z.B. den Betrieb der mit Abfall-Biogas versorgten Blockheizkraftwerken (BHKW), während die Strombörse einen Überschuss am Stromangebot mittels sehr niedrigen bzw. z.T. sogar negativen Preisen signalisiert. BiKo-Anlagen besitzen grundsätzlich die technischen Voraussetzungen als steuerbare und flexible Stromquelle und –senke einen Beitrag zum Ausgleich der fEE zu leisten, um solchen Situationen entgegenzuwirken.

3 Zielsetzung des Projektes

Das in diesem Bericht beschriebene Projekt ergab sich als Folgeprojekt des Vorhabens „BIKOFLEX, Untersuchung der Rolle eines flexibilisierten Strommanagements von Biogutvergärungs- und Kompostierungsanlagen zur Integration der fluktuierenden Erneuerbaren Energien“, Förderkennzeichen: 0325818A und 0325818B. Hier wurde im Wesentlichen untersucht, welches Erzeugungs-Potenzial Biogutvergärungs- und Kompostierungsanlagen durch die Nachrüstung von Vergärungsanlagen und den gezielten Einsatz der Biogas BHKW haben. Hier wurden bereits die Belüftungssysteme dieser Anlagen als dominierende Stromverbraucher und ihr mögliches Verbrauchs-Potenzial zum Strommanagement (Lastmanagement) identifiziert.

Ziel des Projektes BioVent ist es, zu untersuchen, welches Potenzial ein Lastmanagement von Rottebelüftungsanlagen zur Senkung der Stromkosten aber auch des CO₂-Ausstoßes all dieser Anlagen in Deutschland insgesamt aber auch für die einzelne Anlage besitzt. Es soll den Anlagenbetreibern Wege aufzeigen, dieses Potenzial zu nutzen.

Da zu erwarten war, dass ein netzdienliches Lastmanagement der Belüftungsanlagen sich auch auf den Rotteprozess auswirken wird, galt es weiterhin dies zu untersuchen und die Grenzen der Beeinflussungen festzustellen.

4 Status quo der Anlagen- und Belüftungstechnik bei der Bio- und Grüngutkompostierung in Deutschland (AP 1)

In AP 1 wird der Status quo der Anlagen- und Belüftungstechnik bei der Bio- und Grüngutkompostierung in Deutschland dargestellt. Betrachtet werden kommunale Bioabfallbehandlungsanlagen mit und ohne integrierter Vergärungsstufe. Der Teilbereich AP 1.1 soll zunächst die eingesetzte Rottebelüftungstechnik (Intensivrotte) des Bioabfallanlagenbestandes klassifizieren.

Auf Basis von umfangreichen Datenbanken des Witzenhausen-Instituts sollen Aussagen über den Anlagenbestand getroffen werden. Darauf aufbauend kann in einem ersten groben Modell das daraus resultierende Potenzial der voraussichtlich nutzbaren Regelleistung abgeschätzt werden.

4.1 Klassifizierung der eingesetzten Rottebelüftungstechnik

Bei der Analyse des Anlagenbestands liegt der Schwerpunkt zunächst bei der Klassifizierung und Beschreibung der vorhandenen Belüftungstechnik zur Intensivrotte. Die Belüftung übernimmt dabei folgenden Aufgaben:

- Sauerstoffeintrag,
- Wasseraustrag,
- Wärmeregulation und
- Austrag von Stoffwechselprodukten (z.B. CO₂)

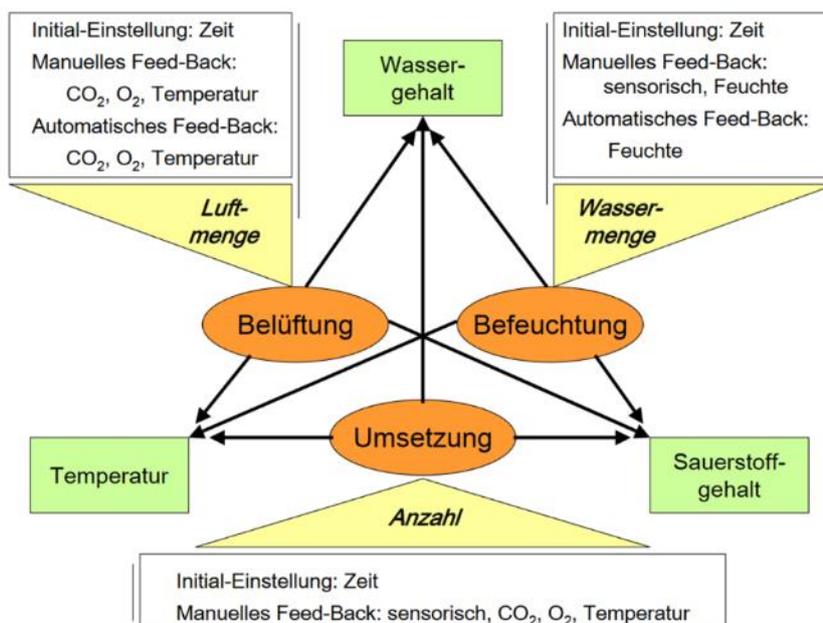


Abbildung 4-1: Steuerung der Kompostierung; Quelle: (Körner et al. 2009)

Grundsätzlich kann unterschieden werden in passive Belüftung, welche durch den Kamineffekt innerhalb der sich erheizenden Miete entsteht und aktiver Zwangsbelüftung

durch Gebläse. Die Steuerung bei Letzteren erfolgt durch Drehzahlregelung, Start-/Stopp-Betrieb oder durch das Öffnen und Schließen von Absperrarmaturen. Bei beiden Methoden können sich im Haufwerk Unterschiede im Wassergehalt und im Abbau ergeben, die durch Umsetzvorgänge wieder homogenisiert werden können.

Bei der aktiven Belüftung kann unterschieden werden nach

- Strömungsrichtung
 - Saugbelüftung
 - Druckbelüftung
- Art der Kapselung
 - Offene Kompostierung (überdacht oder frei)
 - unabgedeckt
 - Membranabdeckung der Miete
 - Hallenkompostierung
 - Tafelmiete mit automatischem Umsetzer
 - Zeilenkompostierung
 - Tunnelkompostierung
- Luftzufuhr
 - Belüftungsrinne/-rohr
 - Belüftungsboden

Des Weiteren gibt es noch weitere Möglichkeiten der Unterscheidung z.B. anhand von Lochformen und -größen im Belüftungssystem sowie exotische Kompostierungsverfahren, die mittlerweile an Relevanz verloren haben wie z.B. Rottetrommeln oder das Brikollareverfahren.

Im Folgenden werden die verbreitetsten Verfahren beschrieben.

4.1.1 Extensivverfahren

4.1.1.1 Dreiecksmietenkompostierung

Die Mietenform der Dreiecks- oder Walmenmiete hat ein relativ großes Oberflächen/Volumen-Verhältnis sowie geringe Diffusionswege von Zu- und Abluft zum Mietenrand. Bei ausreichend großem Luftporenvolumen ist daher eine Zwangsbelüftung nicht erforderlich. Der Sauerstoffeintrag wird durch Diffusion und mehrmaliges Umsetzen der Mieten mit Systemumsetzern gewährleistet.

Im Verlauf der intensiven Rottephase bilden sich Zonen unterschiedlicher Feuchtigkeit. Am oberen Mietenrand treten Kondensationen auf, während sich der Wassergehalt im Mietenkern zunehmend verringert. Gleichzeitig vernässt die Mietenbasis durch Stau- und Presswasser. Aus diesen unzureichenden Rottebedingungen resultieren Geruchsemissionen, eingeschränkte Abbauleistungen und verminderte Kompostqualitäten. Auf kleinen bis mittelgroßen Anlagen gilt das Mietenumsetzen - ohne zusätzliche Zwangsbelüftung - als wirkungsvolles Steuerungsinstrument, um den verschiedenen zuvor aufgeführten Rotteproblemen wirkungsvoll entgegenzutreten bzw. sie zu verhindern.

Zur Verringerung der Geruchsemissionen wurden für Dreiecksmietenverfahren speziell zugeschnittene Belüftungssysteme entwickelt. Die aktive Zuführung von Sauerstoff soll - primäre Emissionsminderungsmaßnahme - die Bildung anaerober Zonen im Mietenkörper unterbinden und den Abbauprozess fördern.

Über im Rotteboden parallel zur gesamten Mietenlänge mittig eingelassene oder aufgesetzte Belüftungsrohre/Kanäle wird das Rottegut kontinuierlich oder in Intervallen druck- bzw. saugbelüftet. Die Belüftungsmenge liegt zwischen 0,5 bis 3 m³ Luft pro Mg Rottegut und Stunde und fällt gegenüber Intensivrotteverfahren vergleichsweise gering aus.

Gegenüber unbelüfteten Systemen werden hohe Anforderungen an die Homogenität und die Durchströmbarkeit des Rottegutes gestellt.

Bei Saugverfahren wird Frischluft durch Belüftungsrohre über die Mietenoberfläche in den Mietenkörper eingetragen, das Rottegut somit mit Sauerstoff versorgt. Die geruchstoffbeladene Luft wird über die Belüftungskanäle, die gleichzeitig als Entwässerungskanäle fungieren, gefasst und einem Biofiltersystem zugeführt. Nachrottemieten sind ebenfalls als Biofilter nutzbar.

Bei Druckverfahren wird Frischluft durch Belüftungsrohre in das Rottegut eingetragen. Die Luft tritt an Bohrungen aus den Rohren aus, die mit zunehmender Rohrlänge einen kürzeren Abstand aufweisen, um eine gleichmäßige Luftverteilung über die Mietenlänge zu gewährleisten. Nach Durchströmung des Mietenkörpers tritt die zugeführte Luft an der Mietenoberfläche aus. Zum Emissionsminderungskonzept bei Druckbelüftungsverfahren in nichtgeschlossenen Anlagen gehört in der Regel die Abdeckung der Mieten mit Folien unterschiedlicher Ausführung (siehe Kap 4.1.1.2). Beim Einsatz von „dichten“ Folien wird die unter den Folien aufgestaute geruchsbeladene Abluft abgesaugt und der Abluftreinigung zugeführt. Deutlich geruchsmindernde Effekte sind auch durch Auflage semipermeabler Mietenabdeckmembrane zu erzielen (FRICKE et al. 1999). Hierbei handelt es sich um eine Verbundtextilie aus einer mikroporösen Funktionsschicht, die zur Stabilitätserhöhung beidseitig mit hochfestem Kunststoffgewebe laminiert ist. Der Einsatz luftdurchlässiger Membrane führt zu einer deutlichen Reduktion der Geruchsemissionen im Vergleich zu nicht abgedeckten Mieten. Auf die Erfassung der Abluft wird bei diesen Verfahren verzichtet.

4.1.1.2 Membranabdeckverfahren

In den 80er Jahren wurde die einfache Mietenkompostierung vor dem Hintergrund einer emissionstechnischen Optimierung durch verschiedene Membranabdeckverfahren weiterentwickelt.

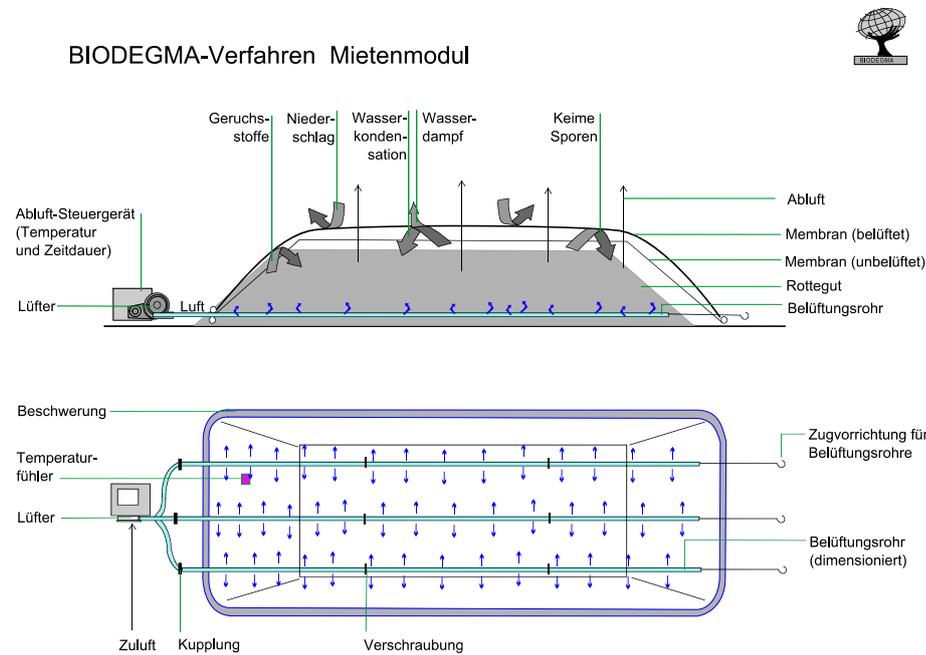


Abbildung 4-2: Schematische Darstellung des BIODEGMA-Rottesystems (BIODEGMA, 1998)

Die einfachste Form war die Abdeckung der Mieten mit einer Membran mit selektiver Gasdurchlässigkeit (wasserdicht und atmungsaktiv). Kombiniert mit einer Druckbelüftung der Mieten wurde durch diesen Aufbau die Miete optimal belüftet, aber die Abluft

durch die Membrane „gefiltert“. In vielen Praxisanlagen konnte mittlerweile die Wirksamkeit der Membranen als Barriere gegen Sporen und Keime sowie eine Geruchsreduzierung nachgewiesen werden.

In einer so belüfteten Miete schwebt die Membrane wie eine Traglufthalle dicht über dem Rottegut. Das bei der Verrottung entstehende CO₂ strömt entsprechend langsam durch die Poren aus. Die dadurch entstehende Isolationsschicht bewirkt eine gleichmäßige Temperaturverteilung im Mietenkörper und sorgt für ein hygienisch unbedenkliches Rotteergebnis.

Bei kritischen Standorten wurde zusätzlich der Zwischenraum zwischen Rottekörper und Membrane aktiv abgesaugt und die belastete Abluft gereinigt.

4.1.1.3 Geschlossene Mietenrotteverfahren

Grundsätzlich können auch reine Mietenrotteverfahren mit mobilen Umsetzaggregaten aus emissionstechnischen Gründen komplett eingehaust werden. Das große Hallenvolumen bedingt zwar eine große Luftmenge die abgesaugt und behandelt werden muss. Je nach Auflage im Hinblick auf die Reinigungsleistung der Biofilter und Ausgestaltung der Filter und Luftwechsel kann das Verfahren aber eine kostengünstige Lösung darstellen und ist zudem geeignet auch in bestehende Hallen installiert zu werden.





Abbildung 4-3: Geschlossene Mietenrottesysteme mit Abluftreinigung, Fa. Compost Systems GmbH, A

4.1.2 Intensivverfahren

4.1.2.1 Tafelmietenverfahren

Als klassisches intensives Kompostierungssystem ist das quasi-dynamische Tafelmietenverfahren zu bezeichnen.

Im Verlauf der intensiven Rottephase bilden sich Zonen unterschiedlicher Feuchtigkeit. Das Luftporenvolumen wird durch auflastbedingte Setzungen und durch Stauwässer vor allem an der Mietenbasis stark eingeschränkt. Die Zwangsbelüftung kann zur Austrocknung des Rottegutes führen. Besonders die Druckbelüftung, führt zur Kanalbildung, durch die die sauerstoffversorgende Luft entweicht, ohne das gesamte Rottegut gleichmäßig zu durchströmen. Um die Nachteile der statischen Tafelmiete zu kompensieren, wurden speziell für diese Mietenform Umsetzaggregate entwickelt.



Abbildung 4-4: Umsetzer Fa. Bühler (links), Fa. SCT (rechts)

Rottesteuerung und Emissionsschutz durch Be- und Entlüftung

Bei den Mietenhöhen und -formen ist das Verhältnis von Mietenoberfläche zum Mieten-
volumen so gering, dass der erforderliche Sauerstoffeintrag nicht mehr über die Diffusion
und über das Mietenumsetzen allein ausreichend ist, um den Rotteprozess in einem an-
gemessenen Zeitraum abschließen zu können. Über den Weg der Zwangsbelüftung muss
zusätzlich Sauerstoff in den Mietenkörper eingetragen werden. Eine gleichmäßige Luft-
verteilung ist nur bei einem Rottegut mit guter Luftwegigkeit und homogener Korngrö-
ßenverteilung gegeben, sodass entsprechend hohe Anforderungen an die Materialauf-
bereitung (Zerkleinerung und Homogenisierung) zu stellen sind.

Die Luft wird über segmentierte Belüftungsböden in den Mietenkörper eingeblasen oder
durch die Miete eingesaugt, die bei Tafelmietenverfahren sowohl in befahrbarer als auch
in nicht befahrbarer Form ausgeführt sein können. Beide Bodenformen sehen als oberste
Schicht eine Auflage mit groben organischen Komponenten vor, wie z.B. Holzhäcksels,
Wurzelhäcksels oder Rinde. Sie verbessert die Luftverteilung, fungiert als Sicker- und
Presswasserdrainage und schützt die Luftaustrittsöffnungen im Belüftungsboden vor Ver-
stopfung. Die einzelnen Segmente im Rotteboden sind getrennt ansteuerbar, um die
einzelnen Rottefelder bedarfsgerecht belüften zu können. Integriert in den Rotteboden
ist die Sickerwasser- und Kondensatabführung. Die gemeinsame Abführung von Abluft
und Abwasser erfordert ein Gefälle des Rottebodens bzw. der Wasserführungssysteme.
Für die Belüftung von Tafelmieten kommen vielfältige Lösungsansätze mit ihren jeweils
spezifischen Vor- und Nachteilen zum Einsatz:

- Druckbelüftung,
- Saugbelüftung,
- Kombination Druck-/Saugbelüftung.

Diese Belüftungskonzeptionen können mit und ohne Umluftnutzung betrieben werden. Die Wahl des Belüftungskonzeptes wird von vielen Kriterien beeinflusst und ist nicht ausschließlich vor dem Hintergrund der Rottesteuerung zu betrachten. Das Gesamtluftmanagement schließt die Entlüftung der Rottehalle, des Annahme- und Aufbereitungsbereichs mit ein. Weitere Einflussgrößen resultieren aus den Anforderungen zum Material-, Arbeits- und Emissionsschutz, wie z.B.

- Klimabedingungen, Arbeitsplatzgrenzwerte (u. a. CO₂, NH₃) und Keimbelastung in der Rottehalle;
- Unterdruck/Luftwechsel in der Rottehalle und anderen Anlagenteilen;
- Ablufttemperatur zum Biofilter.

Darüber hinaus muss beim Belüftungskonzept zwischen verschiedenen, sich zum Teil gegenseitig ausschließenden Zielen unterschieden werden:

- abwasseroptimierte Systeme;
- geruchsoptimierte Systeme;
- rottezeitoptimierte und damit rotteflächenoptimierte Systeme.

Bei **abwasseroptimierten Systemen** wird das während der Rotte freiwerdende dampfförmige Wasser mit der Luft entsorgt. Dadurch ergeben sich relativ hohe Luftmengen, die über das Abluftreinigungssystem geführt werden müssen. Wegen der großen Luftmengen ist die Temperatur der Abluft verhältnismäßig niedrig. Wärmetauscher für die Rückkühlung der Rotteabluft sind nicht erforderlich. Dieses Konzept kann mit einfachen Belüftungssystemen - in der Regel gesteuert über CO₂- oder O₂-Gehalt der Rotteabluft - ausgeführt werden, die mit Druckbelüftung arbeiten. Aus den hohen Abluftmengen resultieren vergleichsweise hohe Geruchsemissionsfrachten.

Bei Druckbelüftungsverfahren wird die gesamte Rottefläche im Druckbetrieb mit Frischluft oder anlageninterner Abluft, z.B. aus der Anlieferungs- und Aufbereitungshalle, belüftet. Dabei werden die ersten vier Mietenfelder jeweils mit separaten Ventilatoren belüftet, um den hier auftretenden unterschiedlichen Druckverlusten, bedingt durch die unterschiedliche Rotteprozessstadien und den damit zusammenhängenden unterschiedlichen Substratdichten, begegnen zu können. Bei den restlichen Feldern werden bis zu drei Felder von je einem Ventilator versorgt. Im Normalfall laufen die Ventilatoren im Dauerbetrieb mit den vorgegebenen spezifischen Belüftungsraten. Einzelne Verfahrensanbieter fahren auch mit intermittierender Belüftung.

Bedarfsorientiert werden zu Beginn der Rotte, bei hohem Sauerstoffbedarf mit ca. 8 bis 12 m³/Mg und h entsprechend hohe Luftmengen zugeführt. Zum Ende des Prozesses fällt der Bedarf deutlich niedriger aus. Hier liegen die Belüftungsmengen bei ca. 3 bis 5 m³/Mg und h. Im Winterbetrieb, bei Außentemperaturen unterhalb des Gefrierpunktes, wird mit vorgewärmter Luft aus anderen Anlagenteilen gearbeitet, um eine Vereisung der untersten Kompostschicht zu verhindern. Die gesamte Abwärme und die CO₂-angereicherte Luft werden in die Rottehalle eingetragen. Die Folge sind Kondensate an den Oberflächen der Maschinen- und Bauteile mit ihrer starken korrosiven Wirkung, Nebelbildung in der Halle sowie kritische Arbeitsplatzgrenzwerte (AGW).

Aus emissionstechnischen Gründen ist sicherzustellen, dass in der Rottehalle immer ein leichter Unterdruck herrscht. Weiterhin muss zur Einhaltung der AGW für CO₂ und NH₃ geeignete Luft der Hallenluft zudosiert werden. Luft wird aus anderen Anlagenbereichen u.a. über spezielle Frischluftklappen, die sich vorzugsweise in Bodennähe befinden und vorhandene Undichtigkeiten in der Halle, durch die Abluftventilatoren angesaugt. Diese Luft vermischt sich mit der Mietenabluft und wird dem Abluftreinigungssystem zugeführt.

Bei *geruchsoptimierten Systemen*, ebenfalls gesteuert über CO₂ oder O₂-Gehalt der Rotteabluft, wird die Abluft durch optimale Verwendung der Luft aus allen Anlagenteilen (Umluftführung/Mehrfachnutzung) reduziert. Hierzu kommen auch Saugbelüftungsverfahren zum Einsatz. Bei Saugbelüftungsverfahren wird die gesamte Rottefläche im Saugbetrieb belüftet. Dabei werden die ersten vier Rottebodensegmente, ebenso wie bei der Druckbelüftung, jeweils mit separaten Ventilatoren im Dauerbetrieb belüftet. Die gesamte Abwärme, CO₂ und ausgetriebenes Wasser fallen überwiegend im Abluftstrom der Rotte an. Sie gelangt lediglich zu einem geringen Teil in die Halle. Die Rottehalle selbst ist, wenn nicht umgesetzt wird, nebelfrei. Die CO₂-Konzentration in der Halle ist unkritisch, es herrscht Umgebungstemperatur (im Winter Zulufttemperatur). Wird umgeschichtet, kann je nach Frischluftkondition in der Halle Nebel entstehen, vor allem im Bereich der sich im Einsatz befindlichen Umsetzmaschinen. Der Abluftstrom der Mietenbelüftung dagegen weist hohe Konzentrationen an Geruchstoffen und CO₂ auf. Es herrscht ein hohes Temperaturniveau (teilweise bis 70°C) bei 100 % Sättigung mit Wasserdampf.

Bei kombinierter Druck-Saugbelüftung werden die ersten vier Rottefelder druckbelüftet, die restlichen Felder saugbelüftet. Dabei wird der Nachrottebereich bei verschiedenen Anlagenlieferanten durch einen aufrollbaren Schott vom Intensivrottebereich getrennt und saugbelüftet. Die Abluft des Nachrottebereiches wird mit Frischluft abgemischt und für die Druckbelüftung des Intensivrottebereiches verwendet. Als Frischluft sowohl für den Intensiv- als auch für den Nachrottebereich kann die Abluft aus anderen Anlagenteilen Verwendung finden. Nur in der Intensivrottezone herrscht das für Druckverfahren typische problematische Hallenklima. Maschinen befinden sich nur während des Umsetzvorganges in diesem Bereich. Mit der kombinierten Druck-Saugbelüftung ist es möglich, die der Rottehalle zugeführten Luftströme optimal zu nutzen und in ihrer Menge zu minimieren. Dagegen erfolgt bei Saug-/Druckbelüftungsverfahren in den ersten vier Rottefeldern eine Saugbelüftung und für die restlichen Felder eine Druckbelüftung. Die Abluft der saugbelüfteten Felder wird bei einigen Anlagen für die druckbelüfteten Felder genutzt. Der Abluftstrom ist bei allen geruchsoptimierten Verfahren stark mit Geruchstoffen aufkonzentriert. Die minimierte Abluft der Anlage hat ein verhältnismäßig hohes Temperaturniveau und muss vor der Einleitung in den Biofilter mit einem Wärmetauscher gekühlt werden. Durch die Rückkühlung der Abluft fällt Kondenswasser an, das zu einer größeren Abwassermenge führt als beim abwasseroptimierten System. An den Belüftungsböden werden bei Saugverfahren besondere Anforderungen gestellt, da hier erhöhte Sickerwässer und Kondensatmengen (korrosiv und feststoffbeladen) auftreten, die abgeführt werden müssen.

Rottezeitoptimierte Systeme haben zum Ziel, die Rottezeit zu verkürzen, um dadurch die Rottefläche und Rottehalle zu verkleinern. Eine wesentliche Beschleunigung des oTS_{bio}-Abbaus lässt sich durch den Einsatz eines temperaturgesteuerten Belüftungssystems erzielen. Bei Sicherstellung von Rottetemperaturen in einem Bereich von ca. 55 bis 58°C kann die Rottezeit zum Erreichen des Rottegrades IV bei der Bio- und Grünabfallkompostierung um bis zu 30%, und zum Erreichen des AT₄ von 5mg O₂/g TS bei der mechanisch-biologischen Restabfallbehandlung um bis zu 40% reduziert werden. Die Behandlungszeit zur Erzeugung eines Fertigmatens mit Rottegrad IV lässt sich nach KUGLER et al. (1995) bei temperaturoptimierter Prozessführung von 8 bis 10 Wochen auf ca. 6 Wochen reduzieren.

Ziel der Regelung ist es, durch die Belüftung die Temperatur des Substrates bis hin zur Solltemperatur (ca. 55°C bis 58 °C) zu führen und auf dieser zu halten. Regelgröße ist hier die Temperatur des Rottegutes bei gleichzeitiger Kontrolle des CO₂- oder O₂-Gehaltes, die mittels Infrarotthermometer berührungslos von der Hallendecke gemessen wird. Pro geregelter Rottefeld sind 3 bis 4 Thermometer installiert. Die Regulierung kann auch über die Messung der Ablufttemperatur erfolgen.

Belüftungssysteme mit dem Ziel der Rottebeschleunigung bedürfen zum Energieabtransport einer deutlich höheren Belüftungsrate als wie sie für die Sauerstoffversorgung notwendig ist. Die Wärme wird hierbei über das Wasser (Wasserdampf) ausgetragen. Um die Abluftmenge trotz der erforderlichen hohen Belüftungsraten möglichst gering zu halten, wird der Anteil der Umluft durch Einsatz von Wärmetauschern möglichst hochgehalten. Die im Wärmetauscher als Kondensat anfallenden Wassermengen müssen dem Rottegut – als Energietransportmedium und zum Aufrechterhalten optimaler Prozessbedingungen – zurückgeführt werden.

4.1.2.2 Zeilenkompostierung

Bei der Zeilenkompostierung handelt es sich um eine abgewandelte Form des Tafelmietensystems, wobei die Tafelmiete in Längsrichtung durch Betonwände zu so genannten Zeilen segmentiert ist, auf denen das Umsetzsystem geführt wird.



Abbildung 4-5: Zeilenumsetzer der Fa. Backhus (links) und Fa. Sutco (rechts)

Rotteboden und Belüftung sind ähnlich ausgeführt, wie beim Tafelmietenverfahren beschrieben. Die einzelnen Zeilen sind getrennt voneinander belüftbar. Wie auch beim Tafelmietenverfahren ist der Rotteboden in sich segmentiert, um das Rottegut bedarfsgerecht belüften zu können. Das Biofixverfahren ist als Saugbelüftungsverfahren ausgeführt mit einer über den gesamten Rottezeitraum gemittelten Belüftungsrate von ca. 3,5 bis 5 m³/Mg. Die Mietenabluft wird über Stich- und Sammelleitungen erfasst und dem Abluftreinigungssystem mit Hilfe von frequenzgeregelten Radialventilatoren zugeführt.

4.1.2.3 Tunnelkompostierung

Die Rotte erfolgt in einem geschlossenen (gekapselten) zwangsbelüfteten Raum, der in der Regel selbst oder aber dessen Be- und Entladungsöffnung aus Gründen des Emissionsschutzes in einer geschlossenen Halle (eingehaust) platziert ist. Tunnel- bzw. Boxensysteme verfügen über weitergehende Prozesssteuerungsmöglichkeiten.

Die Rotteboxen am Beispiel der Firma Herhof sind mit einem von unten belüftbaren Stahlbetonlochboden ausgestattet. Die Löcher sind nach unten konisch offen ausgeführt. Der Lochboden einer jeden Box ist in jeweils 2,5m lange Segmente unterteilt, die einzeln angesteuert und belüftet werden. Hieraus ergibt sich eine homogene Belüftung über die Gesamtlänge der Box.

Die einzelnen Rotteboxen werden mit einem Umluftsystem be- und entlüftet. Regelparameter sind bei diesem so genannten „Kleinen Umluftkreislauf“ CO_2 , Temperatur und Luftmenge. Die Belüftung über ein Umluftsystem bietet den Vorteil, dass bei geringen Abluftmengen gleichzeitig sehr hohe Belüftungsraten in allen Bereichen der Rottebox® mit konstantem Sauerstoffgehalt erzielt werden können. Gleichzeitig ist die notwendige und ausreichende Abfuhr der Rottenebenprodukte (Wärme, CO_2 , Wasser) gewährleistet. Die Frischluftversorgung stammt aus dem so genannten „Großen Umluftkreislauf“. Bestandteil des großen Umluftkreislaufes ist u. a. ein Wärmetauscher, der zum einen die Temperatur dieses Umluftkreislaufes regelt und zum anderen überschüssiges Wasser in der Umluft kondensiert. Dieser Wärmetauscher wird von einem Kühlturm versorgt, der sein Kühlwasser von der Kondensatreinigungsanlage erhält. Die Wärme des Kühlwassers wird in diesem offenen Verdunstungskühlturm an die Atmosphäre abgegeben. Daher fällt aus diesem Prozessschritt der Auskondensierung kein Abwasser an. Der große Umluftkreislauf bezieht seine Frischluft aus der Absaugung von Hallen und anderen Emissionspunkten. Die überschüssige, mit flüchtigen organischen Substanzen angereicherte Luft wird zum Abluftreinigungssystem abgeleitet (GRÜNEKLEE, 2001).

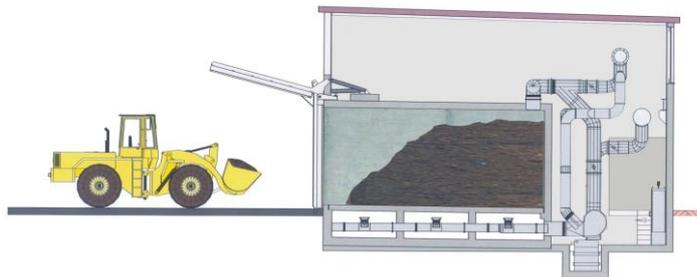


Abbildung 4-6: Schematische Darstellung eines Tunnelmietenverfahrens am Beispiel des Herhof Rottebox® mit Radladerbeschickung und -entleerung

4.2 Analyse technischer und rechtlicher Rahmenbedingungen

4.2.1 Technische Rahmenbedingungen

Als Zielgrößen hinsichtlich der Produktqualität gelten Rottegrad, Hygienisierung, oTS-Gehalt, Wassergehalt und Fremdstoffgehalt. Die einzelnen Werte hängen zusammen. Für die Hygienisierung muss der Kompost eine bestimmte Zeit eine bestimmte Temperatur überschreiten (näheres hierzu siehe Kap. 4.2.2). Die notwendige Wärme wird ganz oder zum größten Teil durch biologische Aktivität freigesetzt. Diese hat neben dem Sinken des oTS-Gehaltes, welcher sich direkt auf den Rottegrad (Selbsterhitzung) auswirkt auch einen Wasseraustrag zur Folge. Wenn der Wassergehalt im Kompost $\leq 40\%$ be-

trägt, kann von einer guten Siebfähigkeit ausgegangen werden, sodass der Fremdstoffgehalt minimiert werden kann. Darüber hinaus geltende Qualitätsmerkmale wie Pflanzenverträglichkeit und Schadstoffgehalte können über den Prozess der Kompostierung bzw. die anschließende Kompostkonfektionierung nicht beeinflusst werden.

Bei Biogasanlagen hat die Rotte ebenfalls die Aufgabe der Aerobisierung zu erfüllen. Das bedeutet, dass der Übergang von der anaeroben Vergärung zur aeroben Rotte durchgeführt wird und durch die sich ändernden Parameter, hier insbesondere der Sauerstoffgehalt, die methanbildenden Bakterien abgetötet werden. Es ist durch eine gute Belüftbarkeit (z.B. durch Zumischung von Strukturmaterial), Umsetzvorgänge und eine ausreichende Belüftung sicherzustellen, dass keine anaeroben Zonen bestehen bleiben und die Abluftqualität ggf. dadurch verschlechtert wird.

Wie in Kap. 4.1 und insbesondere Kap. 4.1.2.1 beschrieben, gibt es unterschiedliche Möglichkeiten und Techniken das Ziel eines Qualitätskompostes zu erreichen. Aber egal ob abwasser-, geruch- oder rottezeitoptimiert, eine gute Steuerung bzw. Regelung der Belüftungsanlage (und eine funktionierende Ent-/Bewässerung) ist wichtig. Dies gilt insbesondere für den Zeitraum der Hygienisierung. In diesem Fall könnte es durch einen Eingriff von außen auf die Belüftungssteuerung der Rotte zu einem ungewünschten Temperaturverlauf kommen und somit zu einer Nichterfüllung der Anforderungen der Hygienisierung. Dies ist unter allen Umständen zu verhindern. Daher muss während des Nachweises der Hygienisierung auf einen Eingriff während der praktischen Versuche verzichtet werden.

Des Weiteren ist aus Arbeitsschutzgründen die Hallenentlüftung immer sicherzustellen. Üblicherweise wird diese Luft in einer Kaskade genutzt und dem Rotteprozess zugeführt, um die Gesamtabluftmenge zu reduzieren. Wenn der Bedarf in der Rotte geringer ist als der notwendige Volumenstrom in der Halle, dann wird die Differenz im Bypass an der Rotte vorbeigeführt und gelangt direkt zur Abluftbehandlung. Somit werden der saure Wäscher und der Biofilter bei geringerer Last der Gebläse in der Rotte nicht zwangsläufig entlastet. Das Regelleistungspotenzial wie in Kapitel 4.5 modelliert, umfasst somit nur die Rottelüfter.

Um einen Einfluss von äußeren Faktoren wie z.B. das Wetter zu minimieren und gleichzeitig von der bereits verbauten Messtechnik zur Überwachung und Steuerung der Rotte zu profitieren wird empfohlen die Versuche zunächst auf Rottetunnel zu beschränken.

4.2.2 Rechtliche Rahmenbedingungen

In Deutschland unterliegen alle Anlagen zur Behandlung von Biogut und Grüngut sowie anderen Bioabfällen bzw. alle landwirtschaftlichen Betriebe, unabhängig von ihrer Bewirtschaftungsform bei der Herstellung bzw. bei dem Einsatz von Biogut- und Grüngutkomposten den gesetzlichen Regelungen nach Tabelle 4-1

Tabelle 4-1: Rechtliche Vorgaben für die Biogut- und Grüngutkompostierung bei einer Kompostverwertung

| Rechtsbereich | Verordnung/ Richtlinie | Inhalt |
|---------------|--------------------------------|---|
| Abfallrecht | Bioabfallverordnung (Bio-AbfV) | Zulässigkeit von Stoffen, Ausbringungsmengen, Schwermetallgrenzwerte, Analyse-, Nachweis- und Dokumentationspflichten |

| Rechtsbereich | Verordnung/ Richtlinie | Inhalt |
|-------------------------|--|--|
| Düngerecht | Düngeverordnung (DüV) | Anwendung nach guter fachlicher Praxis/Düngebedarf/Nährstoffvergleich |
| | Düngemittelverordnung (DüMV) | Typisierung als Düngemittel, Zweckbestimmung |
| Bodenschutzrecht | Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) | Anforderungen an Materialien, die auf den Boden auf- oder eingebracht werden dürfen, Vorsorgewerte für Böden |

Die biologisch-technische Behandlung von Bioabfällen - und damit die Herstellung von Biogut- und Grüngutkomposten - unterliegt im ersten Schritt den Regelungen des Abfallrechtes.

Seitens des Abfallrechts stellt die BioAbfV, die 2012 zunächst als Änderungsverordnung noch auf Basis des dann außer Kraft getretenen § 8 Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz erstellt wurde, das zentrale Regelwerk für den Bereich der behandelten/nichtbehandelten Bioabfälle respektive der „Biogut- und Grüngutkomposte“ dar. Denn sie definiert erstens das „Was und Wie“ der Kompostherstellung durch eine biologisch-technische aerobe, anaerobe oder kombinierte anaerobe/aerobe Behandlung und legt zweitens wesentliche Rahmenbedingungen bei landwirtschaftlicher, forstwirtschaftlicher und gartenbaulicher Verwertung der behandelten Bioabfälle, d.h. der hergestellten Biogut- und Grüngutkomposte, fest.

Besonders wichtig ist dabei – in Hinblick auf die Belüftung der Intensivrotte und damit auf die Kompostqualität- der Bezug auf:

- die Vorgaben zur hygienisierenden und biologisch stabilisierenden Behandlung,
- die Vermeidung bzw. Begrenzung schädlicher Einflüsse (Schadstoffe, Hygiene, Fremdstoffe)
- die Vorgaben zur Gütesicherung (Vorgehensweise, Prüfparameter, Grenzwerte).

Bei der Hygienisierung wird zwischen aerob und anaerob hygienisierender Behandlung unterschieden.

Bei thermophilen Vergärungsanlagen kann die Hygienisierung bereits im Fermenter stattfinden. Solange keine unhygienisierten Materialien (z.B. externes Strukturmaterial) in der folgenden Rotte zugemischt werden, gibt es keine weiteren Anforderungen diesbezüglich an die Rotte.

In Kompostanlagen oder bei nur teilweise hygienisiertem Material als Einsatzstoff in die Rotte, müssen die Anforderungen aus der BioAbfV Anhang 2 Nr. 2.2.2.1 eingehalten werden, d.h. *„im Verlauf der aeroben hygienisierenden Behandlung muss eine Temperatur von mindestens 55 °C über einen möglichst zusammenhängenden Zeitraum von 2 Wochen, von 60 °C über 6 Tage oder von 65 °C über 3 Tage auf das gesamte Rottematerial einwirken.“*

Hinsichtlich der Kompostqualität wird auf die Hinweise zur Düngemittelverordnung (s.u.) verwiesen. Diese gehen z.T. über die Anforderungen der BioAbfV hinaus. Gleiches gilt für die Anforderungen der Bundesgütegemeinschaft Kompost oder von Biolandbau-Verbänden.

Weitere wichtige Regelwerke, die auch die „Bioabfallbehandlung“ respektive die Produktion von Biogut- und Grüngutkomposten einbeziehen, sind das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) und dessen nachgelagerte Bundes-Immissionsschutzverordnungen (BImSchV) sowie die technische Anleitung Luft (TA Luft). Hierdurch werden Standards vorgegeben, die die bauliche und technische Ausführung von Anlagen zur Bioabfallbehandlung, die Vorgehensweise bei der Behandlung, die Maßnahmen zur Begrenzung von Emissionen etc. wesentlich mitbestimmen.

Die baulichen und betrieblichen Anforderungen in der TA Luft werden durch die vorgesehenen Eingriffe in die Belüftung allerdings nicht tangiert. Die Grenzwerte hinsichtlich Staub und Ammoniak werden unabhängig von der Fahrweise der Rotte durch die Abluftbehandlung eingehalten.

In der Rotte könnte es durch unzureichende Belüftung allerdings zu Problemen führen (siehe Kap. 4.2.1) die sich auf die Emissionssituation auswirken können. Dies betrifft die in der TA Luft geforderten Geruchsemissionen und ggf. den VOC Gehalt in der Abluft. Der Einfluss auf die Abluftqualität ist jedoch nicht Bestandteil dieser Studie und wird nicht überprüft.

Um den Arbeitsschutz durch mangelhafte Luftwechselraten in den Hallen nicht zu gefährden, wird in den geplanten Versuchen von einer Regelung der Hallenlüftung abgesehen.

Seitens des Düngerechts legt die Düngemittelverordnung (DüMV, 2012, zuletzt geändert 2015, aktuelle Änderung in Vorbereitung) generell die Rahmenbedingungen bzgl. jeder Inverkehrbringung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln fest.

Den entsprechenden Regelungen unterliegen damit auch alle „behandelten Bioabfälle zur Verwertung als Düngemittel“ Darüber hinaus werden Produkte aus diesen Ausgangsstoffen als „Bodenhilfsstoffe“ nach § 4 DüMV geregelt, sofern sie bestimmte Eigenschaften aufweisen.

Diese Regelungen betreffen im Einzelnen v.a.:

- den Düngemitteltyp, die Definition und die Zweckbestimmung des Produktes zum pflanzenbaulichen Einsatz,
- den Ausschluss schädigender Wirkungen auf die Fruchtbarkeit der Böden sowie die Gesundheit von Menschen, Tieren und Nutzpflanzen bei sachgerechter Anwendung,
- die Festlegung eines Nutzwertes bei der Anwendung und einzuhaltender Produkteigenschaften (v.a. Gehalte an oTM und Pflanzennährstoffen, Toleranzen bei der entsprechenden Analytik),
- die z.T. über die Regelungen der BioAbfV hinausgehenden Parameterkataloge und Festlegungen bzgl. Deklarations- und Grenzwerten sowohl für Schadstoffe als auch für Fremdstoffe in Biogut- und Grüngutkomposten,

- die Spezifizierung von hygienischen Anforderungen für alle Dünge- und Bodenverbesserungsmittel (in Bezug auf Biogut- und Grüngutkomposte im Grundsatz wie Regelungen der BioAbfV).

Auf die Zusammensetzung des Kompostes hinsichtlich der Nährstoffe / Schadstoffe und der Düngewirkung hat die geänderte Belüftung jedoch keinen bzw. einen zu vernachlässigen Einfluss. Einzig für die Fremdstoffentfrachtung muss je nach Technik ein bestimmter TS-Gehalt eingestellt werden. Dieser sollte bei mindestens 60% liegen und wird von dem Wasserabtransport durch die Belüftung beeinflusst.

Ein weiteres Regelwerk, das den Einsatz von Biogut- und Grüngutkomposten tangiert, ist die Bundes Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV, 1999, zuletzt geändert 2015). Da nach langjährigen Erfahrungen davon ausgegangen werden kann, dass gütegesicherte Biogut- und Grüngutkomposte i.d.R. zu keinen Problemen im Sinne des Bodenschutzrechtes führen, sind die entsprechenden Regelungen für die weiteren relevanten Betrachtungen des vorliegenden Projektfalls zunächst jedoch sekundär. Sie werden demgemäß hier nicht weiterverfolgt. Gleiches gilt für die speziellen Regelungen zum Wasserschutz, was die Anwendung von Biogut- und Grüngutkomposten teilweise ebenfalls tangiert.

4.3 Untersuchung der praktischen Relevanz von Eigenstromnutzungskonzepten

Da Bioabfallbehandlungsanlagen (aufgrund der eingesetzten Belüftungstechnik) einen verhältnismäßig hohen Eigenstrombedarf haben, wird nachfolgend die Rolle von Eigenstromnutzungskonzepten (Überschusseinspeisung) untersucht. Diese sind nur bei Bioabfallvergärungsanlagen mit BHKW relevant. Bei reinen Kompostierungsanlagen oder Bioabfallvergärungen mit Biomethaneinspeisung in das Erdgasnetz spielen Eigenstromkonzepte allenfalls im Zusammenhang mit PV-Anlagen eine Rolle. Diese Thematik liegt aber außerhalb dieses Forschungsvorhabens.

Ein hoher Eigenstromanteil basierend auf den BHKW von Bioabfallvergärungsanlagen kann einer energiewirtschaftlichen Optimierung entgegenstehen, da sich dann der Strombedarf am Anlagenstandort nicht oder nur bedingt nach der fluktuierenden Einspeisung durch Wind- und Photovoltaikanlagen richtet.

Für die Betreiber von Bioabfallvergärungsanlagen ist es aus wirtschaftlicher Sicht bei Einspeiservergütungen nach dem EEG in Größenordnungen von deutlich unter 15 Cent/kWh (netto) und Strombezugskosten, die auch im gewerblichen Bereich eher oberhalb von 20 Cent/kWh liegen, die Eigenstromnutzung in der Regel attraktiv.

Im Zusammenhang mit dem EEG (2021) stellen sich dabei zwei Fragen:

1. Ist die Eigenstromnutzung zulässig?
2. Wenn ja, muss auf diesen Eigenstrom ein 40%iger Anteil der EEG-Umlage gezahlt werden?

4.3.1 Zulässigkeit der Nutzung von Strom aus der Vergärung von Biomasse nach dem EEG 2021

Zunächst sind für das Thema einige relevante **Definitionen im EEG 2021 zu beachten.**

Der Anlagenbegriff

Im EEG 2021 sind im § 3 zwei verschiedene Anlagenbegriffe definiert:
gemäß § 3 (1):

„**Anlage**“ jede Einrichtung zur Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien oder aus Grubengas, wobei im Fall von Solaranlagen jedes Modul eine eigenständige Anlage ist; als Anlage gelten auch Einrichtungen, die zwischengespeicherte Energie, die ausschließlich aus erneuerbaren Energien oder Grubengas stammt, aufnehmen und in elektrische Energie umwandeln,

Mit dem Urteil des BGH vom 23.10.2013 gilt für Biogasanlagen der „weite“ Anlagenbegriff, wonach die gesamte Biogasanlage (Beschickung, Fermenter, Nachgärer) einschl. der BHKW und Generatoren unter dem Begriff „Anlage“ zu verstehen ist. Kurz: Unter den Anlagenbegriff fällt alles, was zur Erzeugung und Verstromung des Biogases erforderlich ist.

Der Begriff „Stromerzeugungsanlage“ ist im EEG 2017 ebenfalls definiert § 3 (43b):

„**Stromerzeugungsanlage**“ jede technische Einrichtung, die unabhängig vom eingesetzten Energieträger direkt Strom erzeugt, wobei im Fall von Solaranlagen jedes Modul eine eigenständige Stromerzeugungsanlage ist,

Die Stromerzeugungsanlage bezieht sich demnach bei Biogasanlagen auf den Generator.

Für die hier relevanten Fragestellungen gilt:

1. § 27 a (zur Zulässigkeit der Eigenstromversorgung) verwendet den Begriff „**Anlage**“, der im Sinne des BGH-Urteils als der „weite Anlagenbegriff“ zu verstehen ist.
2. § 61 a (zum möglichen Entfall der EEG-Umlage; siehe Kapitel 4.3.2) verwendet den Begriff „**Stromerzeugungsanlage**“ **einschließlich** der Neben- und Hilfsanlagen zur Erzeugung von Strom im technischen Sinne (Kraftwerkseigenverbrauch).

„**Eigenversorgung**“ der Verbrauch von Strom, den eine natürliche oder **juristische Person** im **unmittelbaren räumlichen Zusammenhang mit der Stromerzeugungsanlage** selbst verbraucht, wenn der Strom nicht durch ein Netz durchgeleitet wird und diese Person die Stromerzeugungsanlage **selbst betreibt**,

Auch die Eigenversorgung mit Strom ist im §3 (19) definiert:

Wesentlich für die Betrachtung ist der § 27a des EEG 2017:

Die Betreiber von **Anlagen, deren anzulegender Wert durch Ausschreibungen** ermittelt worden ist, dürfen in dem gesamten Zeitraum, in dem sie Zahlungen nach diesem Gesetz in Anspruch nehmen, den in ihrer Anlage erzeugten Strom **nicht zur Eigenversorgung** nutzen. **Ausgenommen** ist der Strom, der verbraucht wird

1. **durch die Anlage** oder andere Anlagen, die über denselben Verknüpfungspunkt mit dem Netz verbunden sind,
2. in den **Neben- und Hilfsanlagen der Anlage** oder anderer Anlagen, die über denselben Verknüpfungspunkt mit dem Netz verbunden sind,

Das bedeutet:

Für die Vergütung des Biogasstroms aus den BHKW müssen sich die Betreiber von Bioabfallvergärungsanlagen seit 2017 am Ausschreibungsverfahren der Bundesnetzagentur beteiligen. Sie dürfen dann den erzeugten Strom selbst nur in „energierlevanten“ Teilen der Bioabfallbehandlungsanlage (wichtig: hier kann vom weiten Anlagenbegriff ausgegangen werden) nutzen.

Es ist nicht davon auszugehen, dass Eigenstrom bei Bioabfallvergärungsanlagen, die nach 2017 über die Ausschreibung der Bundesnetzagentur eine EEG Vergütung erhalten haben, für den abfallwirtschaftlichen Teil, also insbesondere die Rotteboxen, Eigenstrom der BHKW verwenden dürfen.

4.3.2 Regelungen zur EEG-Umlage bei der Nutzung von Strom aus der Vergärung von Biomasse nach dem EEG 2021

§ 61 EEG regelt, dass grundsätzlich eine EEG-Umlage zu zahlen ist.

§ 61 EEG-Umlage für Letztverbraucher und Eigenversorger

- (1) Die Netzbetreiber sind berechtigt und verpflichtet, die EEG-Umlage von Letztverbrauchern zu verlangen für
1. die Eigenversorgung und
 2. sonstigen Verbrauch von Strom, der nicht von einem Elektrizitätsversorgungsunternehmen geliefert wird.
- (2) Der Anspruch nach Absatz 1 entfällt oder verringert sich nach den §§ 61a bis 61e und § 61k. Die §§ 61g und 63 sowie § 8d des Kraft-Wärme-Kopplungsgesetzes bleiben unberührt.

Allerdings entfällt die Zahlungspflicht für die EEG-Umlage nach § 61a für den „Kraftwerkseigenverbrauch“.

§ 61a Entfallen der EEG-Umlage

Der Anspruch nach § 61 Absatz 1 entfällt bei Eigenversorgungen,

1. soweit der Strom in der Stromerzeugungsanlage oder in deren Neben- und Hilfsanlagen zur Erzeugung von Strom im technischen Sinn verbraucht wird (Kraftwerkseigenverbrauch),

Wichtig ist, dass hier nicht der weite Anlagenbegriff zum Tragen kommt, sondern von der Stromerzeugungsanlage mit ihren Hilfs- und Nebenaggregaten gesprochen wird.

Dazu hat die Bundesnetzagentur 2016 einen Leitfaden herausgegeben, der sich zwar auf das EEG 2014 bezieht; allerdings sind die Regelungen im § 61 in den EEG 2014, 2017 und 2021 identisch.

Darin wird dargestellt: (S. 52)

Die Neben- und Hilfsanlagen müssen zu der Stromerzeugungsanlage hinzugehören und zum Zweck ihrer Stromerzeugung im technischen Sinn eingesetzt werden. Anschauliche Beispiele für Neben- und Hilfsanlagen werden in der Gesetzesbegründung aufgeführt und umfassen Anlagen

„für die Wasseraufbereitung, Dampferzeugerwasserspeisung, Frischluftzufuhr, Brennstoffversorgung, kraftwerksinterne Brennstoffvorbereitung, Abgasreinigung oder Rauchgasreinigung.“

Bei dieser Aufzählung hat sich der Gesetzgeber an den Regelungen des Stromsteuerrechts orientiert. Nach § 9 Abs. 1 Nr. 2 Stromsteuergesetz (StromStG) wird Strom, der zur Stromerzeugung entnommen wird, von der Stromsteuer befreit. Die Stromsteuer-Durchführungsverordnung (StromStV) führt dazu in § 12 Abs. 1 Nr. 1 aus, dass solcher Strom zur Stromerzeugung entnommen wird,



Die Begründung des EEG 2017 (Bundestags Drucksache 18 – 1304) kommt zu einer vergleichbaren Einschätzung (S. 155):

Zu Absatz 4

Absatz 4 definiert den **Kraftwerkseigenverbrauch**. **Neben- und Hilfsanlagen einer Stromerzeugungsanlage** sind z. B. solche für die Wasseraufbereitung, Dampferzeugerwasserspeisung, Frischluftzufuhr, **Brennstoffversorgung, kraftwerksinterne Brennstoffvorbereitung, Abgasreinigung oder Rauchgasreinigung**. Der Kraftwerkseigenverbrauch erfasst **nicht den Betriebsverbrauch**, also den Verbrauch in betriebseigenen Einrichtungen wie Verwaltungsgebäuden, Werkstätten, Schalt- und Umspannanlagen, für Beleuchtungs- und Heizungsanlagen, elektrische Antriebe und Kühlaggregate. Auch der Stillstandseigenverbrauch und der Stromverbrauch zur Brennstoffgewinnung sind nicht erfasst.

Die angeführten Beispiele für den Bereich, der vom Kraftwerkseigenverbrauch erfasst wird, sind aus dem Bereich der thermischen Biomassenutzung. Überträgt man diese auf die Vergärung von Bioabfällen, so würde die Erfassung der Abfälle der „Brennstoffgewinnung“ entsprechen, die umlagepflichtig ist. Der „Brennstoffvorbereitung“ entspricht die Aufbereitung des Bioguts zu einer für den Fermentationsprozess geeigneten Substanz als Energieträger und erfordert keine EEG-Umlage.

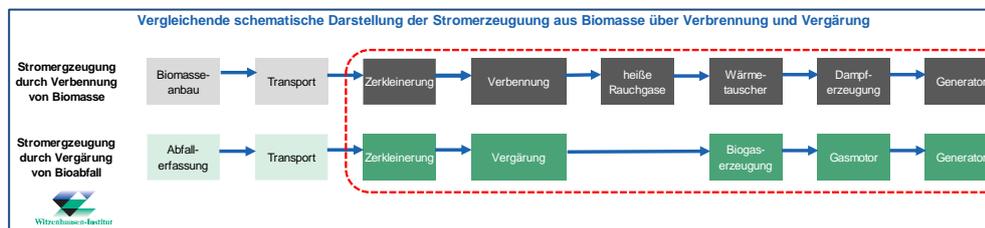


Abbildung 4-7: Analog zu verstehende Bereiche im Kraftwerks- und Biogasbereich

Somit wären neben der Stromerzeugungsanlage auch die Neben- und Hilfsanlagen alle Anlagen von der Biogutaufbereitung über Förderaggregate, Fermenter, Nachgärer und Gasnutzung zu rechnen.

Zu beachten ist, dass Erzeugung erneuerbaren Stroms und Kraftwerkseigenverbrauch gleichzeitig

($\frac{1}{4}$ -Stunden-Takt) erfolgen (S. 54 des Leitfadens der Bundesnetzagentur) müssen:

Die Formulierung „soweit“ erfordert eine anteilige Verbrauchsbetrachtung. Stromverbräuche in Neben- und Hilfsanlagen der Stromerzeugungsanlage **sind nur in der Höhe als Kraftwerkseigenverbrauch von der EEG-Umlage befreit, in der dem Stromverbrauch in der gleichen Viertelstunde eine eigene Stromerzeugung in mindestens gleicher Höhe gegenüber steht**. Soweit die Stromerzeugungsanlage den in den Neben- und Hilfsanlagen verbrauchten Strom hingegen **nicht zeitgleich** erzeugt, handelt es sich nicht um Kraftwerkseigenverbrauch, auch wenn der Stromverbrauch der Erzeugung von Strom zu einem anderen Zeitpunkt dient. „**Stillstandseigenverbrauch**“ ist von der Privilegierung nicht erfasst.¹¹⁰

Allerdings wird andererseits zu diesem Thema ein Beschluss des Bundesfinanzhofs (BFH) vom 09.09.2011 (VII R 75/20) angeführt, der unter Bezug auf § 9 Abs. 1 Nr. 2 des Stromsteuergesetzes die Befreiung einer NawaRo-Biogasanlage von der Stromsteuer versagte, weil die Biogasanlage nicht der Herstellung eines Brennstoffs diene und deswegen keine Neben- oder Hilfsanlage i.S. der § 12 Abs. 1 Nr. e der Stromsteuer-Durchführungsverordnung sei.

§ 12 Strom zur Stromerzeugung

§ 12 hat 1 frühere Fassung und wird in 6 Vorschriften zitiert

(1) Zur Stromerzeugung entnommen im Sinne des § 9 Absatz 1 Nummer 2 des Gesetzes wird Strom,

1. der in den Neben- und Hilfsanlagen einer Stromerzeugungseinheit insbesondere zur Wasseraufbereitung, Dampferzeugerwasserspeisung, Frischluftversorgung, Brennstoffversorgung oder Rauchgasreinigung oder
 2. der in Pumpspeicherkraftwerken von den Pumpen zum Fördern der Speichermedien
- zur Erzeugung von Strom im technischen Sinne verbraucht wird.

Aus Sicht der Autoren ist die Argumentation nicht sachgerecht, da wie Abbildung 4-7 zeigt, auch die Biomasse in einem Heizkraftwerk nicht die Turbine antreibt, sondern erst der über eine Reihe von Verfahrensschritten erzeugte Dampf.

Nach Kenntnis der Autoren wird die hier skizzierte Befreiung von der EEG-Umlage für den Eigenstromverbrauch in energierelevanten Teile einer Bioabfallvergärungsanlage regelmäßig von den Netzbetreibern nicht gewährt.

Unabhängig von dieser Entscheidung ist klar, dass Eigenstrom aus Biomassevergärungsanlagen, die über eine Ausschreibung (seit 2017) ihre Ansprüche für die EEG Vergütung erhalten haben, im Rottebereich weder Eigenstrom nutzen und demzufolge auch dort das Thema EEG-Umlage keine Rolle spielt.

Für die dem „Kraftwerkseigenverbrauch zuzuordnenden Bereich werden bei Eigen-

§ 61b Verringerung der EEG-Umlage bei Anlagen

(1) Der Anspruch nach § 61 Absatz 1 verringert sich in einem Kalenderjahr auf 40 Prozent der EEG-Umlage für Strom, der zur Eigenversorgung genutzt wird, wenn in dem Kalenderjahr in der Anlage ausschließlich erneuerbare Energien oder Grubengas eingesetzt worden sind.

stromnutzung gemäß § 61 b des EEG (2021) 40 % der EEG-Umlage fällig.

2021 beträgt die EEG-Umlage 6,5 Cent/kWh. Somit sind für die Eigennutzung von Strom 2,56 Cent/kWh EEG-Umlage zu zahlen.

4.4 Anlagenbestand Deutschland

Im Folgenden wird der Bioabfallanlagenbestand in Deutschland quantifiziert und in Abhängigkeit der Durchsatzkapazität aufgeschlüsselt. Da reine Grüngutbehandlungsanlagen in der Regel nicht aktiv belüftet werden, wurden diese nicht mit einbezogen. Ebenfalls nicht enthalten sind Mechanisch-Biologische-Anlagen, die aus kommunalem Hausmüll (schwarze Tonne) eine Biomassefraktion extrahieren und aufbereiten. Reine Speiseabfallanlagen sind auch nicht aufgenommen worden, da es sich im Allgemeinen um Nassvergärungsanlagen ohne Rottetechnik handelt.

Es wird zudem unterschieden in Anlagen mit belüfteter Hauptrotte und ohne bzw. Anlagen, bei denen diese Information nicht vorhanden ist.

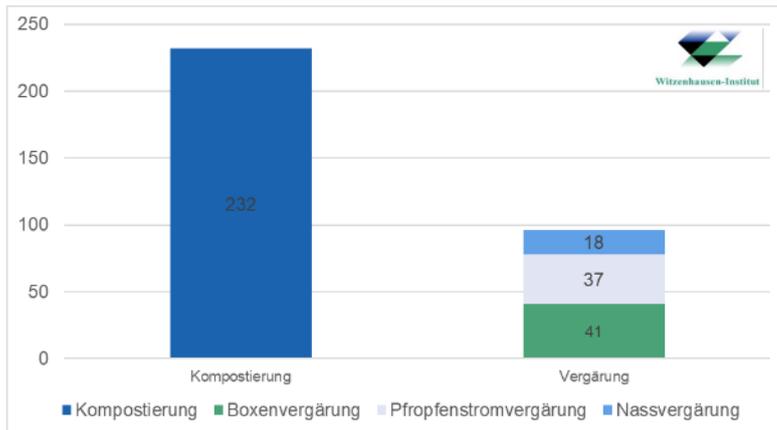


Abbildung 4-8: Anlagenanzahl

Insgesamt sind 232 Kompostierungsanlagen und 96 Vergärungsanlagen in Betrieb. Die Vergärungsanlagen teilen sich auf in 41 Boxenvergärungsanlagen, 37 Pfpfenstromanlagen und 18 Nassvergärungen.

Die durchschnittliche Größe der Anlagen variiert:

- Kompostierung: ca. 18.500 Mg/a
- Boxenvergärung: ca. 36.500 Mg/a
- Pfpfenstromvergärung: ca. 48.000 Mg/a
- Nassvergärung: ca. 33.000 Mg/a

Somit gleichen sich die Gesamtkapazität von Kompostierungs- und Vergärungsanlagen mit 53% (ca. 4,3 Mio. Mg/a) zu 47% (ca. 3,9 Mio. Mg/a) an.

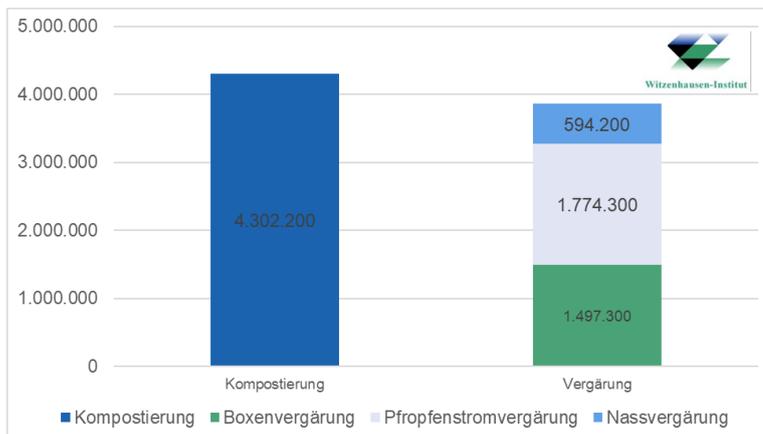


Abbildung 4-9: Anlagenkapazität

4.4.1 Kompostierung

In Deutschland sind Stand September 2019 232 Kompostierungsanlagen mit einer Gesamtkapazität von 4.302.200 Mg/a für die Behandlung von Biogut in Betrieb.

Tabelle 4-2: Kompostierungsanlagen – Bestand und Größenklassen mit Informationen zur Hauptrotte

| Witzenhausen-Institut | | Durchsatz-Kapazität [Mg/a] | | | | | | Summe |
|--|--|----------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------|------------------|
| | | <10.000 | 10.000 - 20.000 | 20.000 - 30.000 | 30.000 - 40.000 | 40.000 - 50.000 | > 50.000 | |
| Kompostierung Biogut | Anzahl Anlagen | 103 | 49 | 34 | 24 | 7 | 15 | 232 |
| | <i>Anteil</i> | 44% | 21% | 15% | 10% | 3% | 6% | 100% |
| | Summe Kapazität | 575.900 | 641.300 | 831.600 | 791.800 | 301.500 | 1.160.100 | 4.302.200 |
| | <i>Anteil</i> | 13% | 15% | 19% | 18% | 7% | 27% | 100% |
| | <i>Anzahl ohne belüftete Hauptrotte</i> | 44 | 21 | 6 | 8 | 1 | 2 | 82 |
| | <i>Kapazität ohne belüftete Hauptrotte</i> | 299.130 | 260.680 | 144.500 | 253.450 | 45.000 | 172.500 | 1.175.260 |
| | <i>Anteil bzgl. auf Gesamtkapazität Größenklasse</i> | 52% | 41% | 17% | 32% | 15% | 15% | 27% |
| | <i>Anzahl mit belüftete Hauptrotte</i> | 10 | 17 | 20 | 9 | 6 | 8 | 70 |
| | <i>Kapazität mit belüftete Hauptrotte</i> | 69.150 | 239.950 | 493.250 | 300.400 | 256.500 | 626.600 | 1.985.850 |
| | <i>Anteil bzgl. auf Gesamtkapazität Größenklasse</i> | 12% | 37% | 59% | 38% | 85% | 54% | 46% |
| | <i>Anzahl ohne Aussage zu Hauptrotte</i> | 49 | 11 | 8 | 7 | 0 | 5 | 80 |
| | <i>Kapazität ohne Aussage zu Hauptrotte</i> | 207.620 | 140.670 | 193.850 | 237.950 | 0 | 361.000 | 1.141.090 |
| <i>Anteil bzgl. auf Gesamtkapazität Größenklasse</i> | 36% | 22% | 23% | 30% | 0% | 31% | 27% | |

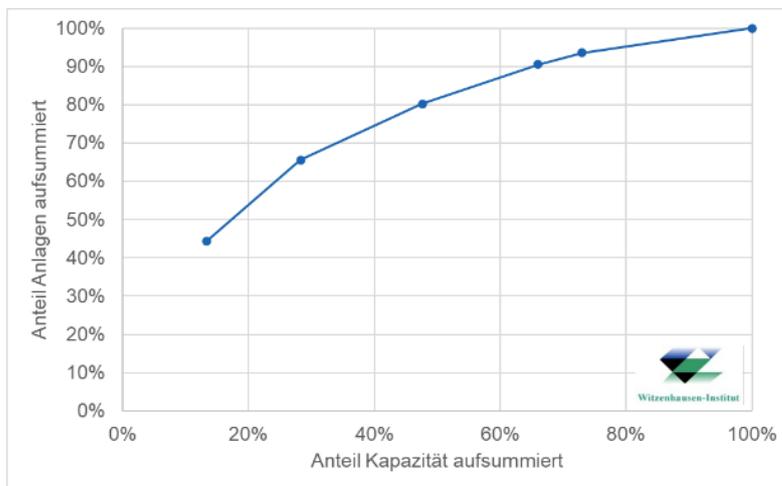


Abbildung 4-10: Kompostierungsanlagen - Aufsummierter Anlagenzahl bezogen auf die aufsummierte Kapazität

Bei den meisten Anlagen handelt es sich um kleinere und mittlere Anlagen. 44% der Anlagen haben eine Durchsatzkapazität kleiner 10.000 Mg/a und sind für 13% des Gesamtdurchsatzes verantwortlich. 80% der Anlagen sind kleiner 30.000 Mg/a und leisten 48% bezogen auf alle Anlagen.

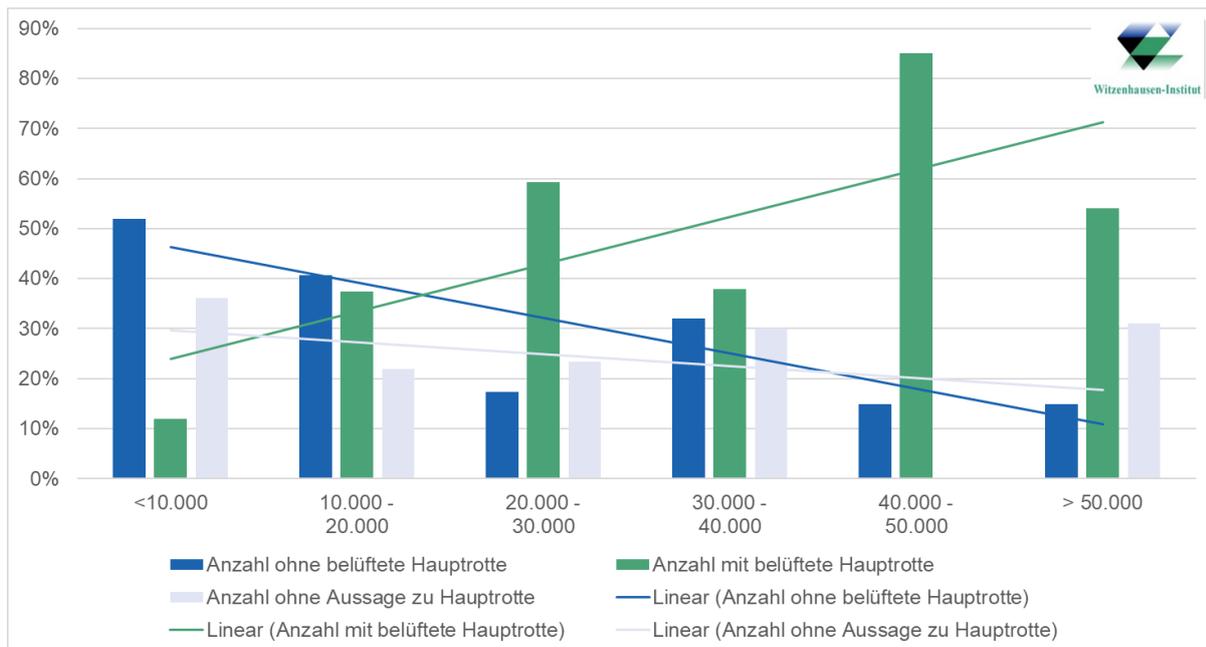


Abbildung 4-11: Kompostierungsanlagen - Informationen zur Belüftung der Hauptrotte mit Trend über die Größenklassen

Knapp die Hälfte der Kompostierungsanlagen verfügen über eine belüftete Hauptrotte. Bei 27% erfolgt keine Belüftung und bei den restlichen Anlagen liegen keine Angaben vor.

Grundsätzlich lässt sich beobachten, dass der Anteil an der Belüftung mit der Durchsatzkapazität steigt. Der Anteil der Anlagen ohne nähere Informationen bleibt relativ konstant.

4.4.2 Vergärung

Insgesamt wurden 96 Vergärungsanlagen mit einer Gesamtkapazität von 3.865.800 Mg/a erfasst. In den folgenden Kapiteln werden die Zahlen weiter aufgeschlüsselt in Bogen-, Pfropfenstrom- und Nassvergärungsanlagen.

Tabelle 4-3: Vergärungsanlagen – Bestand und Größenklassen mit Informationen zur Hauptrotte

| | Durchsatz-Kapazität [Mg/a] | | | | | | Summe |
|---|----------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------|------------------|
| | <10.000 | 10.000 - 20.000 | 20.000 - 30.000 | 30.000 - 40.000 | 40.000 - 50.000 | > 50.000 | |
| Anzahl Anlagen | 3 | 23 | 15 | 17 | 11 | 27 | 96 |
| <i>Anteil</i> | 3% | 24% | 16% | 18% | 11% | 28% | 100% |
| Summe Kapazität | 19.000 | 362.300 | 363.300 | 571.700 | 469.500 | 2.080.000 | 3.865.800 |
| <i>Anteil</i> | 0% | 9% | 9% | 15% | 12% | 54% | 100% |
| <i>Anzahl ohne belüftete Hauptrotte</i> | 0 | 2 | 3 | 2 | 1 | 2 | 10 |
| <i>Kapazität ohne belüftete Hauptrotte</i> | 0 | 26.900 | 74.500 | 61.000 | 42.000 | 137.500 | 341.900 |
| <i>Anteil bzg. auf Gesamtkapazität Größenklasse</i> | 0% | 7% | 21% | 11% | 9% | 7% | 9% |
| <i>Anzahl mit belüftete Hauptrotte</i> | 0 | 9 | 3 | 7 | 4 | 10 | 33 |
| <i>Kapazität mit belüftete Hauptrotte</i> | 0 | 132.500 | 80.750 | 235.500 | 168.000 | 791.140 | 1.407.890 |
| <i>Anteil bzg. auf Gesamtkapazität Größenklasse</i> | 0% | 37% | 22% | 41% | 36% | 38% | 36% |
| <i>Anzahl ohne Aussage zu Hauptrotte</i> | 3 | 12 | 9 | 8 | 6 | 15 | 53 |
| <i>Kapazität ohne Aussage zu Hauptrotte</i> | 19.000 | 202.900 | 208.050 | 275.200 | 259.500 | 1.151.360 | 2.116.010 |
| <i>Anteil bzg. auf Gesamtkapazität Größenklasse</i> | 100% | 56% | 57% | 48% | 55% | 55% | 55% |

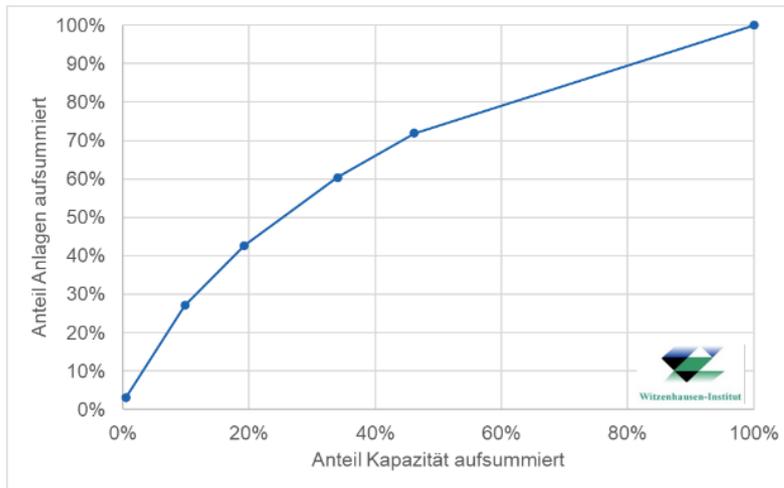


Abbildung 4-12: Vergärungsanlagen - Aufsummierter Anlagenzahl bezogen auf die aufsummierte Kapazität

Im Vergleich zu den Kompostierungsanlagen ist auffällig, dass es kaum Anlagen mit Durchsätzen < 10.000 Mg/a gibt. Durch die aufwendigere Anlagentechnik ist eine wirtschaftliche Betriebsweise meistens erst bei höheren Durchsätzen gegeben. 43% der Anlagen sind kleiner als 30.000 Mg/a und verarbeiten ca. 19% der Menge. 72% der Anlagen sind kleiner als 50.000 Mg/a und verarbeiten 46% der insgesamt angelieferten Biomasse.

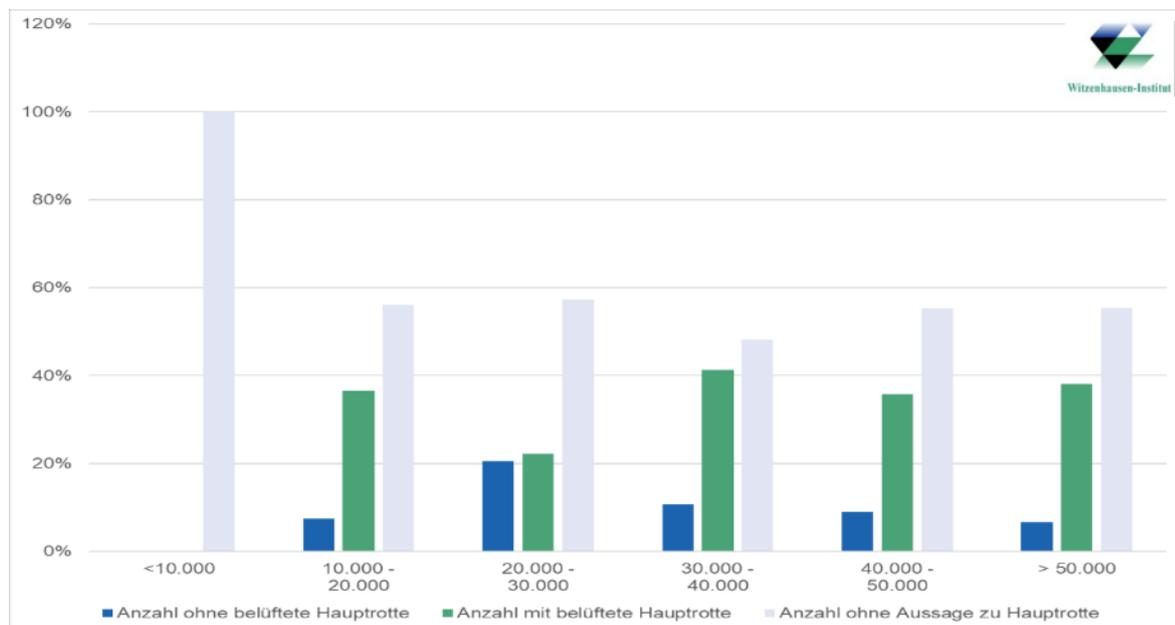


Abbildung 4-13: Vergärungsanlagen - Informationen zur Belüftung der Hauptrotte mit Trend über die Größenklassen

Der Anteil der Anlagen ohne Aussage zur Hauptrotte liegt mit Ausnahme der kleinen Anlagen < 10.000 Mg/a relativ konstant bei 50 % - 60 %. Bei den Vergärungsanlagen mit vorliegenden Informationen dominieren die Anlagen mit Belüftung. Eine klare Tendenz zu höherem Anteil der Belüftung bei steigender Durchsatzkapazität ist aus den Daten nicht ersichtlich.

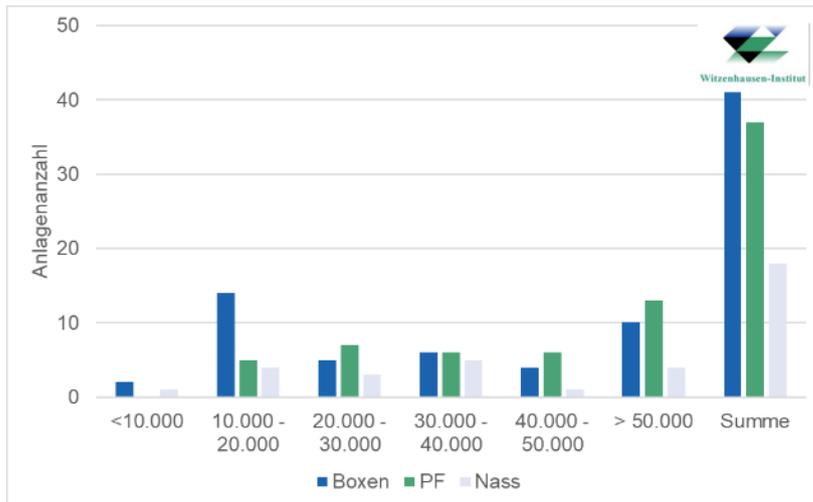


Abbildung 4-14: Vergleich Anlagenanzahl nach Größenkategorie

Auffällig ist die größere Beliebtheit der Boxenvergärung bei kleineren Anlagen, da die Kosten mit dem Durchsatz besser skalieren. In mittleren Größenordnungen gibt es kaum Unterschiede. Bei den großen Anlagen > 50.000 Mg/a liegen die Pflropfenströmer etwas vorne, da der Logistikaufwand bei den Boxenverfahren bei sehr großen Durchsätzen sub-optimal ist. Nassvergärungsanlagen sind im Allgemeinen weniger gut für Bioabfall geeignet, was sich auch in der Zahl der Anlagen niederschlägt.

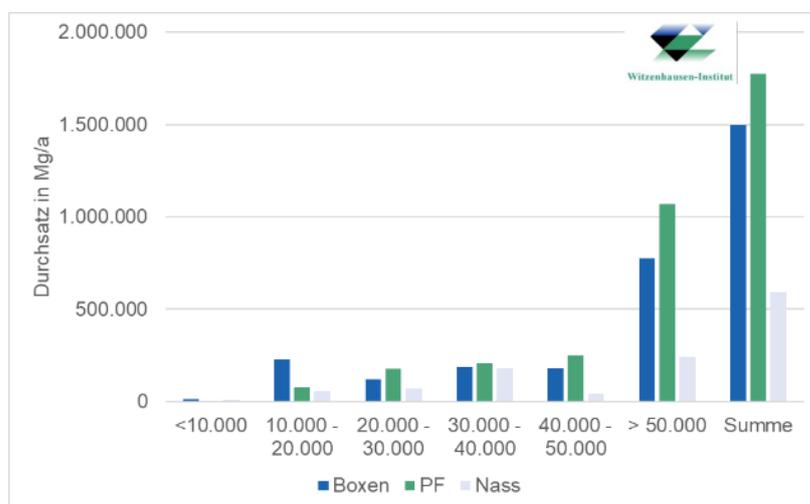


Abbildung 4-15: Vergleich Durchsatz nach Größenkategorie

Der Trend zu eher größeren Pflropfenstromanlagen im Vergleich zu den beiden anderen Verfahren zeigt sich auch in Abbildung 4-15: Vergleich Durchsatz nach Größenkategorie.

4.4.2.1 Boxenvergärung

Mit 41 Boxenvergärungen bzw. 43% bezogen auf die Gesamtheit der Vergärungsanlagen liegt diese Art der Fermentation noch vor den anderen beiden Anlagentypen. Insgesamt werden 1.497.300 Mg/a umgesetzt, was gemessen am Anteil des Durchsatzes mit 39% leicht unterproportional ist.

Tabelle 4-4: Boxenvergärung – Bestand und Größenklassen mit Informationen zur Hauptrotte

| Witzenhausen-Institut | | Durchsatz-Kapazität [Mg/a] | | | | | | Summe |
|----------------------------|--|----------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------|-----------|
| | | <10.000 | 10.000 - 20.000 | 20.000 - 30.000 | 30.000 - 40.000 | 40.000 - 50.000 | > 50.000 | |
| Vergärung Biogut, Boxen | Anzahl Anlagen | 2 | 14 | 5 | 6 | 4 | 10 | 41 |
| | Anteil | 5% | 34% | 12% | 15% | 10% | 24% | 100% |
| | Summe Kapazität | 12.500 | 228.800 | 118.000 | 185.000 | 179.500 | 773.500 | 1.497.300 |
| | Anteil | 1% | 15% | 8% | 12% | 12% | 52% | 100% |
| | Anzahl ohne belüftete Hauptrotte | 0 | 2 | 3 | 1 | 1 | 1 | 8 |
| | Kapazität ohne belüftete Hauptrotte | 0 | 26.900 | 74.500 | 31.000 | 42.000 | 80.000 | 254.400 |
| | Anteil bzg. auf Gesamtkapazität Größenklasse | 0% | 12% | 63% | 17% | 23% | 10% | 17% |
| | Anzahl mit belüftete Hauptrotte | 0 | 4 | 0 | 3 | 0 | 5 | 12 |
| | Kapazität mit belüftete Hauptrotte | 0 | 63.500 | 0 | 92.000 | 0 | 413.500 | 569.000 |
| | Anteil bzg. auf Gesamtkapazität Größenklasse | 0% | 28% | 0% | 50% | 0% | 53% | 38% |
| | Anzahl ohne Aussage zu Hauptrotte | 2 | 8 | 2 | 2 | 3 | 4 | 21 |
| | Kapazität ohne Aussage zu Hauptrotte | 12.500 | 138.400 | 43.500 | 62.000 | 137.500 | 280.000 | 673.900 |
| | Anteil bzg. auf Gesamtkapazität Größenklasse | 100% | 60% | 37% | 34% | 77% | 36% | 45% |

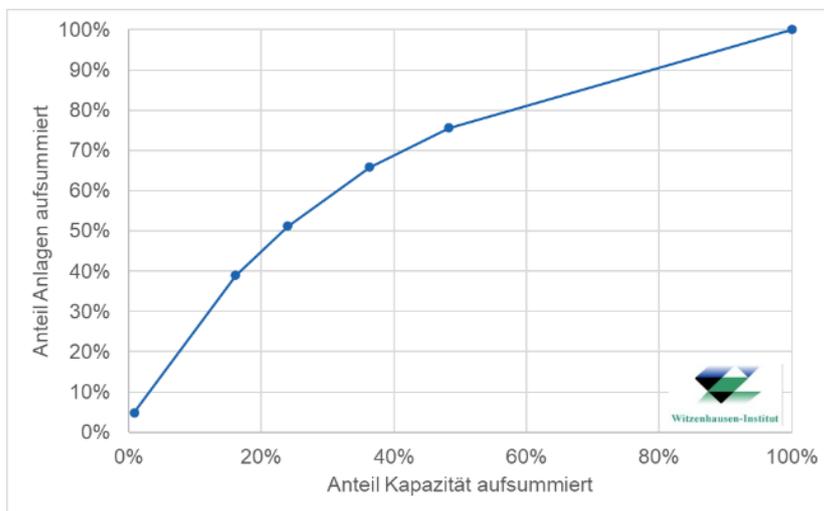


Abbildung 4-16: Boxenvergärung - Aufsummierter Anlagenzahl bezogen auf die aufsummierte Kapazität

51% der Anlagen setzen 24% des Gesamtdurchsatzes um und sind kleiner 30.000 Mg/a. 76% der Anlagen sind kleiner 50.000 Mg/a und werden mit 48% der Gesamtmenge betrieben.

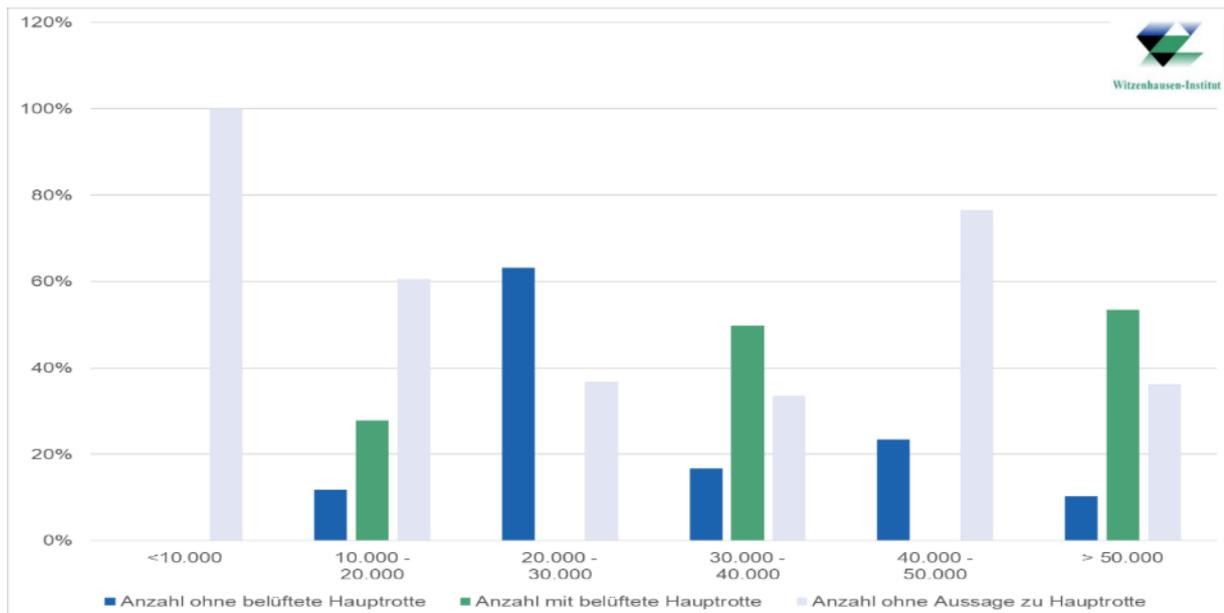


Abbildung 4-17: Boxenvergärung - Informationen zur Belüftung der Hauptrotte mit Trend über die Größenklassen

Klare Trends hinsichtlich der Belüftung in Abhängigkeit der Anlagengröße sind nicht erkennbar.

4.4.2.2 Pfdrofenstromvergärung

Es gibt 37 Pfdrofenstromanlagen, was 39% der Vergärungsanlagen ausmache. Die Gesamtkapazität liegt bei 1.774.300 Mg/a bzw. 46%.

Tabelle 4-5: Pfdrofenstromvergärung – Bestand und Größenklassen mit Informationen zur Hauptrotte

| | Durchsatz-Kapazität [Mg/a] | | | | | | Summe |
|---|----------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------|-----------|
| | <10.000 | 10.000 - 20.000 | 20.000 - 30.000 | 30.000 - 40.000 | 40.000 - 50.000 | > 50.000 | |
| Anzahl Anlagen | 0 | 5 | 7 | 6 | 6 | 13 | 37 |
| <i>Anteil</i> | 0% | 14% | 19% | 16% | 16% | 35% | 100% |
| Summe Kapazität | 0 | 77.000 | 175.800 | 204.500 | 250.000 | 1.067.000 | 1.774.300 |
| <i>Anteil</i> | 0% | 4% | 10% | 12% | 14% | 60% | 100% |
| <i>Anzahl ohne belüftete Hauptrotte</i> | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| <i>Kapazität ohne belüftete Hauptrotte</i> | 0 | 0 | 0 | 30.000 | 0 | 0 | 30.000 |
| <i>Anteil bzg. auf Gesamtkapazität Größenklasse</i> | 0% | 0% | 0% | 15% | 0% | 0% | 2% |
| <i>Anzahl mit belüftete Hauptrotte</i> | 0 | 3 | 3 | 3 | 4 | 5 | 18 |
| <i>Kapazität mit belüftete Hauptrotte</i> | 0 | 41.000 | 80.750 | 104.500 | 168.000 | 377.640 | 771.890 |
| <i>Anteil bzg. auf Gesamtkapazität Größenklasse</i> | 0% | 53% | 46% | 51% | 67% | 35% | 44% |
| <i>Anzahl ohne Aussage zu Hauptrotte</i> | 0 | 2 | 4 | 2 | 2 | 8 | 18 |
| <i>Kapazität ohne Aussage zu Hauptrotte</i> | 0 | 36.000 | 95.050 | 70.000 | 82.000 | 689.360 | 972.410 |
| <i>Anteil bzg. auf Gesamtkapazität Größenklasse</i> | 0% | 47% | 54% | 34% | 33% | 65% | 55% |

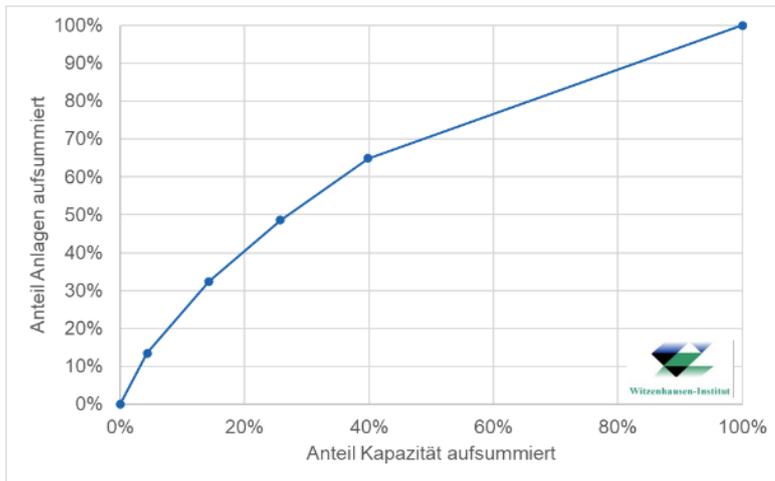


Abbildung 4-18: Pfropfenstromvergärung - Aufsummierter Anlagenzahl bezogen auf die aufsummierte Kapazität

49% der Anlagen sind kleiner als 40.000 Mg/a und werden mit 26% der Biomasse, die in Vergärungsanlagen fermentiert wird, betrieben. 65% der Anlagen sind kleiner 50.000 Mg/a und haben einen Durchsatz von 40%.

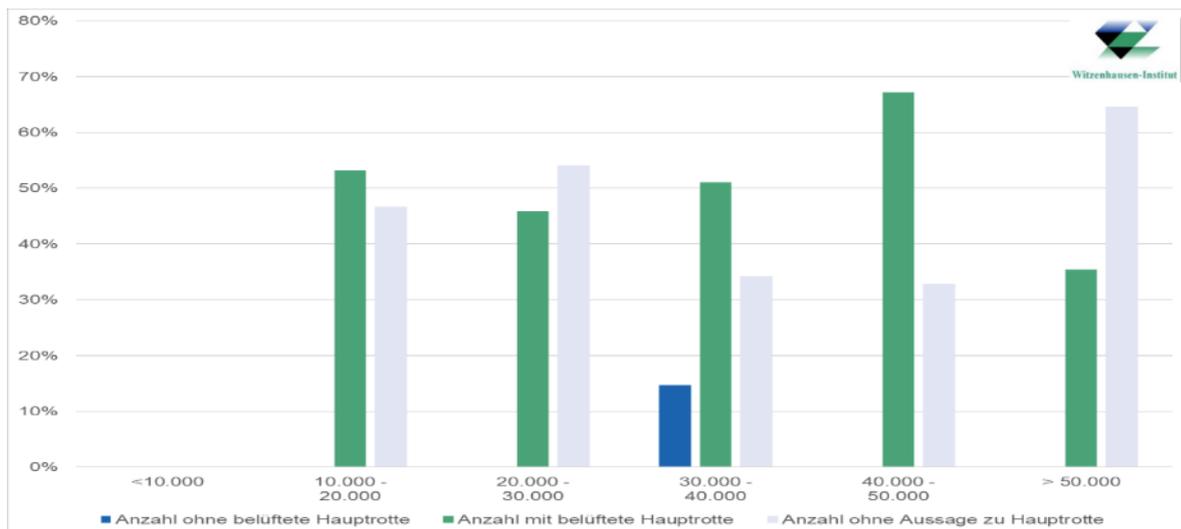


Abbildung 4-19: Pfropfenstromvergärung - Informationen zur Belüftung der Hauptrotte mit Trend über die Größenklassen

Auch hier sind keine klaren Trends hinsichtlich Anlagengröße und Belüftung zu erkennen. Der Anteil des Durchsatzes ohne weitere Informationen zur Belüftung ist mit 55% relativ hoch.

4.4.2.3 Nassvergärung

Die Nassvergärung ist mit 18 Anlagen (19%) am geringsten vertreten. Der Durchsatz liegt bei 594.200 Mg/a bzw. 15%.

Tabelle 4-6: Nassvergärung – Bestand und Größenklassen mit Informationen zur Hauptrotte

| Witzenhausen-Institut | | Durchsatz-Kapazität [Mg/a] | | | | | | Summe |
|---------------------------|--|----------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------|---------|
| | | <10.000 | 10.000 - 20.000 | 20.000 - 30.000 | 30.000 - 40.000 | 40.000 - 50.000 | > 50.000 | |
| Vergärung Biogut, nass | Anzahl Anlagen | 1 | 4 | 3 | 5 | 1 | 4 | 18 |
| | Anteil | 6% | 22% | 17% | 28% | 6% | 22% | 100% |
| | Summe Kapazität | 6.500 | 56.500 | 69.500 | 182.200 | 40.000 | 239.500 | 594.200 |
| | Anteil | 1% | 10% | 12% | 31% | 7% | 40% | 100% |
| | Anzahl ohne belüftete Hauptrotte | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| | Kapazität ohne belüftete Hauptrotte | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 57.500 | 57.500 |
| | Anteil bzg. auf Gesamtkapazität Größenklasse | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 24% | 10% |
| | Anzahl mit belüftete Hauptrotte | 0 | 2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 3 |
| | Kapazität mit belüftete Hauptrotte | 0 | 28.000 | 0 | 39.000 | 0 | 0 | 67.000 |
| | Anteil bzg. auf Gesamtkapazität Größenklasse | 0% | 50% | 0% | 21% | 0% | 0% | 11% |
| | Anzahl ohne Aussage zu Hauptrotte | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 3 | 14 |
| | Kapazität ohne Aussage zu Hauptrotte | 6.500 | 28.500 | 69.500 | 143.200 | 40.000 | 182.000 | 469.700 |
| | Anteil bzg. auf Gesamtkapazität Größenklasse | 100% | 50% | 100% | 79% | 100% | 76% | 79% |

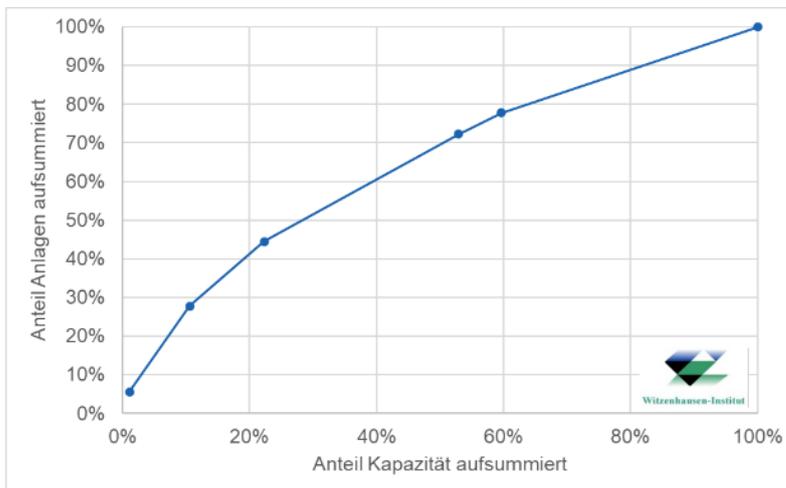


Abbildung 4-20: Nassvergärung - Aufsummierter Anlagenzahl bezogen auf die aufsummierte Kapazität

44% der Anlagen setzen 22% des Durchsatzes um und sind kleiner als 30.000 Mg/a. 72% der Anlagen werden mit 53% des Bioguts betrieben und sind kleiner als 40.000 Mg/a.

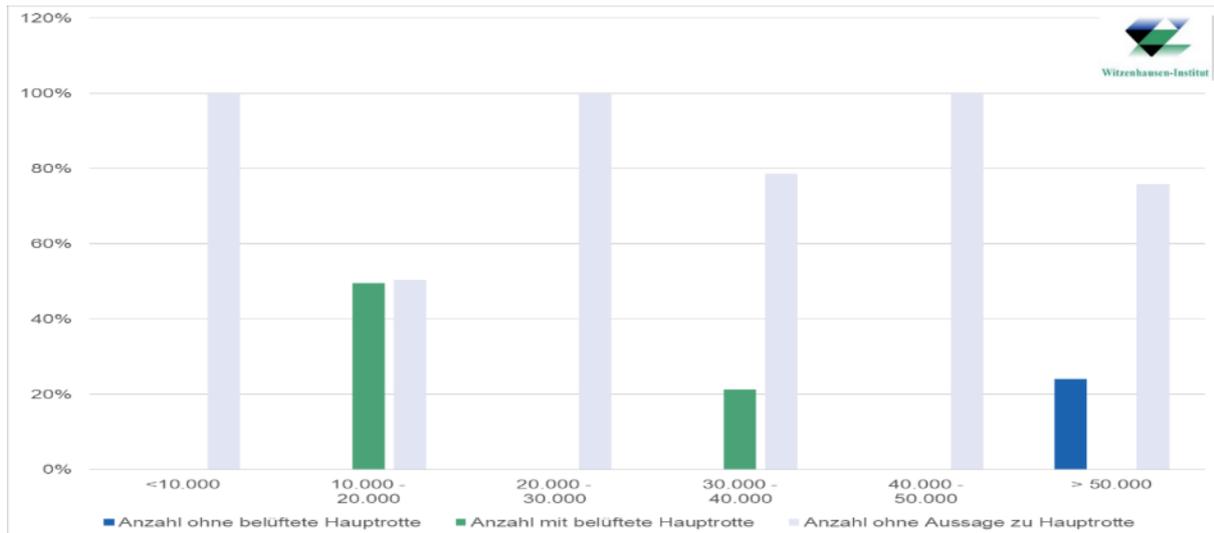


Abbildung 4-21: Nassvergärung - Informationen zur Belüftung der Hauptrotte mit Trend über die Größenklassen

Bei der Nassvergärung liegen bei 79% der Anlagen keine Informationen vor.

4.5 Modellierung Regelleistungspotenzial

Real existierende Anlagen unterscheiden sich in zahlreichen Details. Eine Angabe des tatsächlichen Potenzials lässt sich somit nur grob abschätzen, aber nicht exakt ermitteln ohne aufwändige Besichtigungen der Einzelanlagen und Befragung aller Betreiber. Für die Einordnung des Nutzens des Vorhabens ist dies jedoch auch nicht notwendig. In einem ersten Schritt wurde ein vereinfachtes Modell entwickelt.

4.5.1 Annahmen

Folgende Annahmen wurden für das Modell angenommen:

- Alle Vergärungsanlagen werden im Vollstrom betrieben, d.h. die gesamte Biomasse wird vergoren.
- Nassvergärungsanlagen haben keine Rotte und werden nicht betrachtet.
- Pfropfenstromanlagen haben eine Entwässerungsstufe und der Stoffstrom wird ca. 1:1 in fest:flüssig aufgeteilt.
- Luft aus der Hallenlüftung wird im Normalfall durch die Rotte geleitet. Wenn die Rottebelüftung ausgeschaltet wird, dann wird weiterhin die Hallenlüftung im Bypass der Abluftbehandlung zugeführt. Somit werden nur die Rotteflüfter berücksichtigt.
- Weitere Annahmen werden direkt in die Berechnung eingegeben und werden hier nicht separat aufgeführt.

4.5.2 Modell

Zunächst wird eine vereinfachte Massenbilanz bis zum Rotteinput aufgestellt. Dabei wird so viel Strukturmaterial zum Gärrest gemischt bis eine rechnerische Dichte von $0,65 \text{ Mg/m}^3$ eingestellt ist. Bei der Kompostierung ist eine Zumischung in der Regel

nicht notwendig, da die Dichte von frischem Bioabfall mit 0,58 Mg/m³ angenommen wird.

Die Flächenbelastung wird bei allen Rotteprozessen (Kompostierung, Rotte nach PF oder Boxenvergärung) gleich angenommen, so dass sich die mittlere Füllhöhe ändert. Die angenommenen Werte und die dazu gehörigen installierten Leistungen der Rotteventilatoren wurden parallel bei verschiedenen Anbietern von Rottetunneln erfragt und konnten verifiziert werden.

Die Verweilzeit wurde zunächst mit 4 Wochen bei der Kompostierung und jeweils 2 Wochen bei den Vergärungsanlagen angesetzt. Letztere benötigen eine geringere Rottezeit für einen vergleichbaren Rottegrad, da bereits leicht abbaubare Bestandteile in der anaeroben Behandlung abgebaut wurden.

In einem zweiten Schritt wurden stichprobenartig jeweils 4 Betreiber zu den Durchsätzen und der installierten Leistung in der Rotte befragt. Nach Vergleich von Erwartungswerten nach dem vorläufigen Modell und den realen Angaben, wurde eine PF Anlage mit deutlich unterdurchschnittlicher Leistung herausgenommen.

Um die Durchschnittswerte der installierten Leistung mit dem Modell in Einklang zu bringen, wurden die Verweilzeiten im Modell angepasst. Die Boxenvergärung wurde auf 1,4 Wochen reduziert und bei den PF-Anlagen wurde die Verweilzeit auf 2,6 Wochen erhöht.

Aus diesen Werten wird jeweils die theoretisch benötigte Anzahl an Tunneln berechnet, sowie die voraussichtlich installierte spezifische Gesamtleistung.

Da die Ventilatoren in der Regel mit 30% der maximalen Leistung gefahren werden, kann theoretisch von dort bis auf 0% runter bzw. von 30% auf 100% hochgeregelt werden.

Durch Multiplikation mit dem Durchsatz der jeweiligen Anlagenart, kann die Gesamtleistung abgeschätzt werden.

Tabelle 4-7: Berechnungsmodell

| | | Kompostierung | | Vergärung Box | | Vergärung PF | |
|-----------------|--|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|--|
| Input | Bioabfall | 1,0 Mg/a | | 1,0 Mg/a | | 1,0 Mg/a | |
| | Wasser | | | | | 0,02 Mg/a | |
| Output | Siebüberlauf vorne | 0,0 Mg/a | | 0,0 Mg/a | | 0,1 Mg/a | |
| | Biogas | 0,0 Mg/a | | 0,09 Mg/a | | 0,13 Mg/a | |
| | flüssiger Gärrest --> Rottematerial netto | 1,00 Mg/a | 0,58 Mg/m ³ | 0,91 Mg/a | 0,80 Mg/m ³ | 0,38 Mg/a | 48% 0,80 Mg/m ³ |
| Zumischung | Strukturmaterial | 0,00 Mg/a | | 0,34 Mg/a | | 0,25 Mg/a | |
| | --> Rottematerial brutto | 1,00 Mg/a | 0,58 Mg/m ³ | 1,25 Mg/a | 0,65 Mg/m ³ | 0,56 Mg/a | 0,25 Mg/m ³ 0,65 Mg/m ³ |
| Tunnelkapazität | Fläche | 200 m ² | | 200 m ² | | 200 m ² | |
| | Füllhöhe | 2,8 m | | 2,5 m | | 2,5 m | |
| | Dichte | 0,58 Mg/m ³ | | 0,65 Mg/m ³ | | 0,65 Mg/m ³ | |
| | Füllmenge | 325 Mg | | 325 Mg | | 325 Mg | |
| | Verweilzeit | 4,0 Wo | | 1,4 Wo | | 2,6 Wo | |
| | Anzahl | 0,00024 | | 0,00010 | | 0,00009 | |
| Leistung | installiert pro Tunnel | 40 kW | | 40 kW | | 40 kW | |
| | installiert gesamt Tunnel | 9,5 W | | 4,1 W | | 3,5 W | |
| | Aufnahme, durchschnittlich | 30% | | 30% | | 30% | |
| | regelbar, runter | 2,8 W | | 1,2 W | | 1,0 W | |
| | regelbar, hoch | 6,6 W | | 2,9 W | | 2,4 W | |

Der Unterschied zwischen Boxen- und Pflöfenstromvergärung beruht im Wesentlichen auf 3 Punkten:

1. Beim Pflöfenstromverfahren wird in der Regel eine aufwändigere Voraufbereitung durchgeführt und größere Mengen abgesiebt und als Siebüberlauf entsorgt.

2. Der höhere Gasertrag resultiert aus einem höheren Umsatz der Biomasse.
3. Durch die Entwässerung werden ca. 50% der Masse abgetrennt und werden nicht belüftet.

Der Unterschied wird jedoch durch die anhand der Stichprobe angepassten Verweilzeiten zum Großteil kompensiert.

4.5.3 Verknüpfung Modell und Datenbank

Verknüpft man die spezifischen Daten aus dem Modell mit der Gesamtkapazität der einzelnen Verfahren, so erhält man folgende Werte für die regelbare Leistung. Anlagen ohne belüftete Hauptrotte wurden hierbei nicht berücksichtigt. Alle Anlagen ohne Aussage zur Hauptrotte wurden für die erste grobe Abschätzung als belüftet gewertet.

Tabelle 4-8: Absolute Regelleistung in Abhängigkeit des biologischen Verfahrens

| | Kompostierung | Boxenvergärung | Pfropfenstromvergärung | Nassvergärung |
|--------------------|---------------|----------------|------------------------|---------------|
| Neg. Regelleistung | 9,0 MW | 1,6 MW | 1,4 MW | 0 MW |
| Pos. Regelleistung | 21,0 MW | 3,7 MW | 3,4 MW | 0 MW |

5 Technische Anforderungen und Marktintegration von Rottebelüftungsventilatoren als flexible Lasten (AP 2)

5.1 Regulatorische Rahmenbedingungen

Dieser Abschnitt befasst sich mit der Analyse der regulatorischen Rahmenbedingungen zur Integration von flexiblen Lasten und dem daraus resultierenden Potential des Lastmanagements und der Systemdienstleistungsbereitstellung durch Rottebelüftungsventilatoren. Zu diesem Zweck werden die Themenfelder Stromlieferung, Möglichkeiten des Energiehandels (Fokus: Spot- und Regelleistungsmarkt), Netzentgelte, EEG-Umlage und Stromsteuer beleuchtet. Auf die Auswirkungen der optimierten Betriebsweise der Rottebelüftungsventilatoren soll dann im zweiten Schritt genauer eingegangen werden. Das Potential im Bereich der Stromkosten hängt vornehmlich vom Stromverbrauch der Anlage und dessen Flexibilisierungsmöglichkeiten ab. Kompostierungsanlagen verfügen mit der vorhandenen Belüftungstechnik zur Intensivrotte generell über die technischen Voraussetzungen, um den Strombedarf an das aktuelle Angebot durch fluktuierende Erneuerbare Energien anzupassen und Systemdienstleistungen bereitzustellen. Bei ca. 50 % der BiKo-Bestandsanlagen kommen Rottebelüftungsventilatoren bei der Intensivrotte zum Einsatz, welche wiederum für mehr als die Hälfte des Strombedarfs der gesamten Anlage (Größenordnung 500 MWh/a) verantwortlich sein können. Die Entwicklung der durchschnittlichen Strompreise für industrielle Großverbraucher bis 20 GWh/a wird jährlich vom BDEW veröffentlicht und ist in Abbildung 5-1 dargestellt.

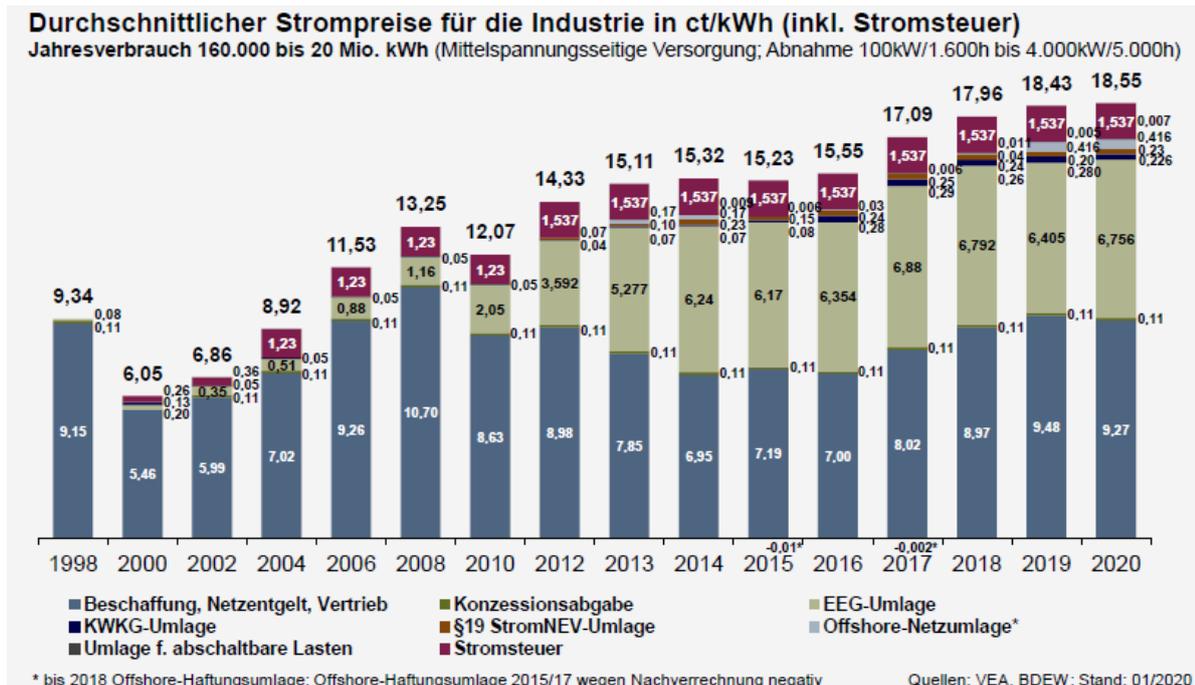


Abbildung 5-1: Strompreis für die Industrie (inkl. Stromsteuer) 1998-2020, Quelle: (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW) 2020)

Der Strompreis für die Industrie wird dominiert durch die Kostenpunkte¹

- Beschaffung, Netzentgelte, Vertrieb
- EEG-Umlage
- Stromsteuer

5.1.1 Strombeschaffung

Grundsätzlich gibt es für industrielle Stromverbraucher folgenden Möglichkeiten der Strombeschaffung:

- Stromlieferung durch Energieversorgungsunternehmen (EVU)
- Börsenhandel oder außerbörslicher-Handel (Over-the-counter, OTC) jeweils mit:
 - Terminmarkt
 - Spotmarkt

Weitere interessante Themenfelder im Strombereich:

- Regelleistungsmarkt
 - Primärregelleistung (PRL)
 - Sekundärregelleistung (SRL)
 - Minutenregelleistung (MRL)

¹ Weitere Komponenten (alle >2 %) sind KWKG-Umlage, Umlage für abschaltbare Lasten, Konzessionsabgabe, §19 Strom-NEV-Umlage und Offshore-Haftungsumlage

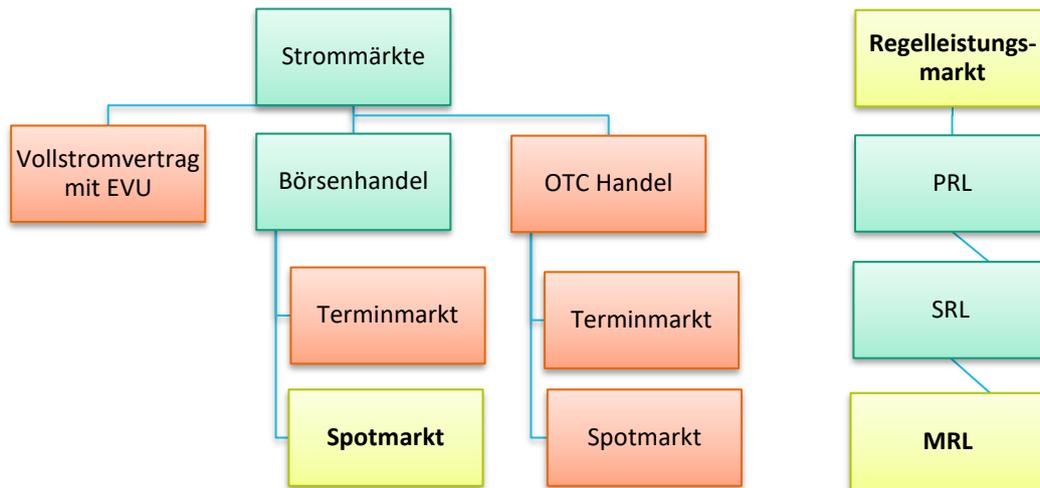


Abbildung 5-2: Überblick der Themenfelder im Bereich Lastmanagement, Quelle: Eigene Darstellung

Die Unternehmen können im Bereich der Strommärkte eigenständig tätig werden oder den Handel über einen Dienstleister abwickeln lassen. Die einzelnen Themenfelder werden in den folgenden Abschnitten genauer beleuchtet.

5.1.2 Stromlieferung durch EVU

Ein Energieversorgungsunternehmen kann sowohl selbst Stromproduzent sein als auch Strom einkaufen und damit eigenständig einen Bilanzkreis betreiben. Die vertragliche Grundlage für die Lieferung vom EVU zum Kunden sind entweder ein konkret festgelegter Vollstromvertrag oder offenere Stromlieferverträge. Letztere beinhalten verschiedene Tarifvariationen wie bspw. Hoch- und Niedertarife.

Das EVU liefert nicht nur den Strom zum Kunden, sondern erstellt zuvor Prognosen für deren Lastprofile und übernimmt die Verantwortung im Falle einer Abweichung. Diese Risikoübernahme wird zusätzlich auf den Strompreis aufgeschlagen und im Falle eines fixen Vertrages erreichen mögliche Änderungen der Strommarktpreise nicht den Endkunden, weshalb die Bereitstellung von Flexibilität hier nicht begünstigt wird. Der Vorteil hierbei liegt stattdessen im sehr überschaubaren Aufwand für den Kunden für die Strombeschaffung.

Interessanter für eine optimierte Betriebsweise der Anlage sind dagegen variable Stromtarife. Je größer der Anpassungsspielraum der stromverbrauchenden Anlagenkomponenten ist, desto eher kann mit dem passenden variablen Stromtarif der Energieverbrauch kostensparend in Zeitabschnitte günstiger Strompreise verlagert werden. Die Variabilität der Preise kann sich dabei beispielsweise auf das zeitlich variierende Energieangebot verschiedener Energiequellen, den Unterschied zwischen Werktagen und dem Wochenende sowie Tages- oder Jahreszeiten beziehen. Je mehr sich die Anzahl der Optimierungen den viertelstündlichen Strompreisänderungen der Strombörse des gesamten Tages annähert, desto höher wird die potenzielle Kostenersparnis, die jedoch mit erhöhtem Anpassungsaufwand und Risiko ins Verhältnis gesetzt werden muss. Auf die Anpassungen an Preisschwankungen der Strombörse wird im nächsten [Kapitel](#) genauer eingegangen.

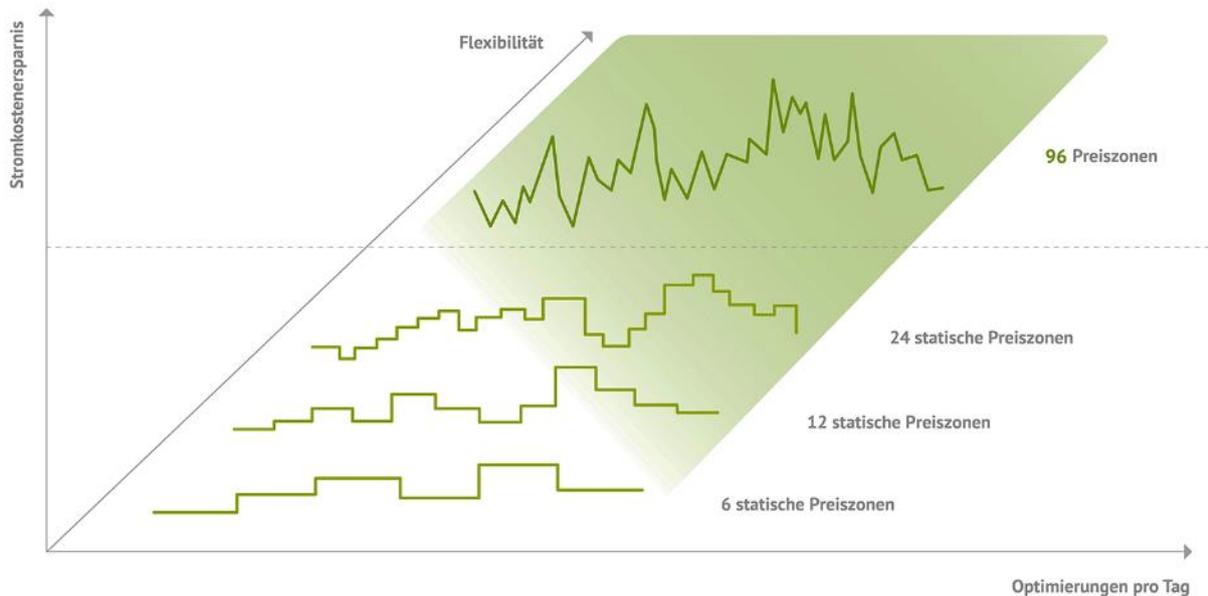


Abbildung 5-3: Optimierungspotenzial von offenen EVU-Verträgen, Quelle: (Next Kraftwerke GmbH 2020)

5.1.2.1 Funktionsweise

- Fixer Vollstromvertrag (ähnlich einer Stromversorgung im privaten Sektor)
- Variable Tarife, z.B.:
 - Hoch- und Niedertarif (HT/NT)
 - abweichender Preise für Nicht-Werkstage

5.1.2.2 Teilnahmebedingungen

- Anschluss an das öffentliche Netz
- Bilateraler Vertrag zur Stromlieferung zwischen Anbieter und Kunde
- Ausreichende Flexibilität der Anlagenkomponenten für variable Tarifmodelle

5.1.2.3 Umsetzbarkeit bei Rottebelüftungsventilatoren

Aufgrund der fehlenden Weitergabe schwankender Strommarktpreise ist die Einbindung von Flexibilität bei fixen Stromtarifverträgen von geringer Bedeutung. Eine größere Rolle spielen jedoch variable Tarifverträge, aus denen sich mit Hilfe anpassungsfähiger stromverbrauchender Anlagenkomponenten ein Kostensparpotential ergibt. Technisch sind Rottebelüfter geeignet, sehr rasch ihre Leistungsaufnahme zu ändern (Hoffstede et al. 2018). Wenn entsprechende Fahrpläne existieren oder Preissignale verarbeitet werden, können sie durch eine variable Fahrweise Stromkosten für das Unternehmen reduzieren. Zusätzlich können Einsparungen bei den Leistungspreisen erzielt werden indem peak-load-shaving (Reduktion der maximalen elektrischen Leistungsaufnahme im Unternehmen) betrieben wird.

5.1.3 Energiehandel über den Spot- und Terminmarkt

Als Alternative zur Stromversorgung durch einen Vollstromvertrag über ein EVU stehen dem Unternehmen die Selbstversorgung mit Strom aus eigener Erzeugung oder die Teilnahme am Energiehandel zur Verfügung. Wie bei einem fixen Stromversorgungsvertrag besteht auch für die Beschaffung über die Börse die Option der Beauftragung

eines EVU. Das Unternehmen kann jedoch auch eigenständig in der Rolle eines EVU am Energiehandel teilnehmen. Fällt die Wahl auf einen Dienstleister, trägt dieser die Verantwortung für die Strombeschaffung des Unternehmens. Sowohl bezüglich der aktuellen Abläufe im Betrieb einerseits als auch bezüglich der Marktpreise andererseits werden kontinuierlich Informationen zwischen dem Anlagenbetreiber und dem Dienstleister ausgetauscht. Auf diese Weise kann gezielt auf günstige Preisänderungen mit Lastmanagement reagiert werden, um die für den Verbrauch besten Zeitabschnitt ausnutzen zu können. Dies geschieht je nach Richtung der Preisschwankung durch zusätzliche Stromerzeugung bei hohen Preisen und durch gedrosselte Erzeugung bei niedrigen Preisen. Auf diesem Weg lässt sich mit Hilfe von Demand-Side-Management die Flexibilität der Anlage gewinnbringend einsetzen.

Diese Form der Strombeschaffung ist mit einem geringen Aufwand verbunden, bietet jedoch die Möglichkeit der Einbringung von Flexibilität zum eigenen wirtschaftlichen Vorteil. Als Motivation für diese Entscheidung spielen vor allem die mögliche Beschaffungsoptimierung, Arbitrage und der Handlungsspielraum für Spekulationen eine große Rolle (Zimmermann und Breuer 2019).

5.1.3.1 Funktionsweise

Handelsplätze bestehen vor allem in Börsen, welche sich durch folgende Eigenschaften auszeichnen:

- Elektronischer Handel von standardisierten Produkten
- Verlässlichkeit
 - staatliche Aufsicht
 - zentrale Vertragspartner
 - Transaktionsabrechnung via Clearinghaus (inkl. Absicherung von Ausfallrisiken)
- Anonymer und transparenter Handel

Die EPEX SPOT (Spotmarkt) und die EEX (Terminmarkt) sind in Deutschland die wichtigsten Börsen für Stromprodukte. Der Handlungsumfang an den Börsen EPEX SPOT und EEX betrug im Jahr 2019:

- 506,3 TWh (+2,5 % zum Vorjahr) im Day-Ahead Markt (EPEX SPOT)
- 91,6 TWh (+11 % zum Vorjahr) im Intraday Markt (EPEX SPOT)
- 5.829,7 TWh (+33 % zum Vorjahr) im Terminmarkt (EEX)

(Quelle: (European Energy Exchange (EEX) 15.01.2020))

5.1.3.2 Teilnahmebedingungen

Präqualifikationen (techn. Anforderungen)

- mindestens an Mittelspannungsebene angeschlossen
- flexible Lasten über externes Signal fernsteuerbar

Voraussetzung für den Börsenhandel (formelle Anforderungen)

- eine Akkreditierung für die Teilnahme
- die Hinterlegung von Sicherheiten.

Aus diesem Grund bedienen sich Stromverbraucher vorzugsweise akkreditierter Händler.

5.1.4 Terminmarkt

Im Terminmarkt werden vorausschauend Verträge ausgehandelt, um den zukünftigen Bedarf an elektrischer Energie abzusichern. Die Zeitspanne zwischen Vertragsabschluss und dessen Erfüllung liegt innerhalb dieses zukunftsorientierten Börsenmarktes zwischen 2 Tagen und 6 Jahren. Der Strommarkt beinhaltet dabei sogenannte Baseload-, Peakload- oder Offpeak-Kontrakte.

5.1.4.1 Funktionsweise

Es gibt sowohl Tages-, Wochenend-, Wochen-, Monats-, Quartals- als auch Jahres-Futures.

Die kleinste handelbare Einheit ist also ein Tagesprodukt. Der Markt für zeitlich geringere Vertragsinhalte wie einzelne Stunde oder Stundenblöcke findet sich auf dem Spotmarkt. Die Lastabdeckung setzt sich also einerseits aus langfristig geplanten Blöcken über den Termin- und andererseits kurzfristiger eingesetzten Ausgleichsmengen über den Spotmarkt oder offene EVU-Verträge zusammen. Diese Zusammensetzung ist in Abbildung 5-4 dargestellt.

Sowohl auf dem Terminmarkt zugekaufter Strom als auch der selbstproduzierte Strom muss vom EVU in dessen Bilanzkreis eingegliedert werden. Der Verbraucher erhält auch für nichtgenutzten Strom eine Vergütung, wenn der tatsächliche Lastgang niedriger ist als die zugekaufte Strommenge.

Mit Hilfe des Terminmarktes lassen sich Stromkosten also langfristig für die Zukunft planen.

5.1.4.2 Teilnahmebedingungen

Präqualifikationen (techn. Anforderungen)

- Technische Handelssystemanbindung

Voraussetzung für den Börsenhandel (formelle Anforderungen)

- Händlerzulassung (EEX Börsenhändlerprüfung)
- Händleranerkennung durch European Commodity Clearing AG (ECC)
- Zuverlässigkeit und berufliche Eignung der Geschäftsführung
- Haftendes Eigenkapital von min. 50.000 €

(Quelle: (European Energy Exchange (EEX) 2020))

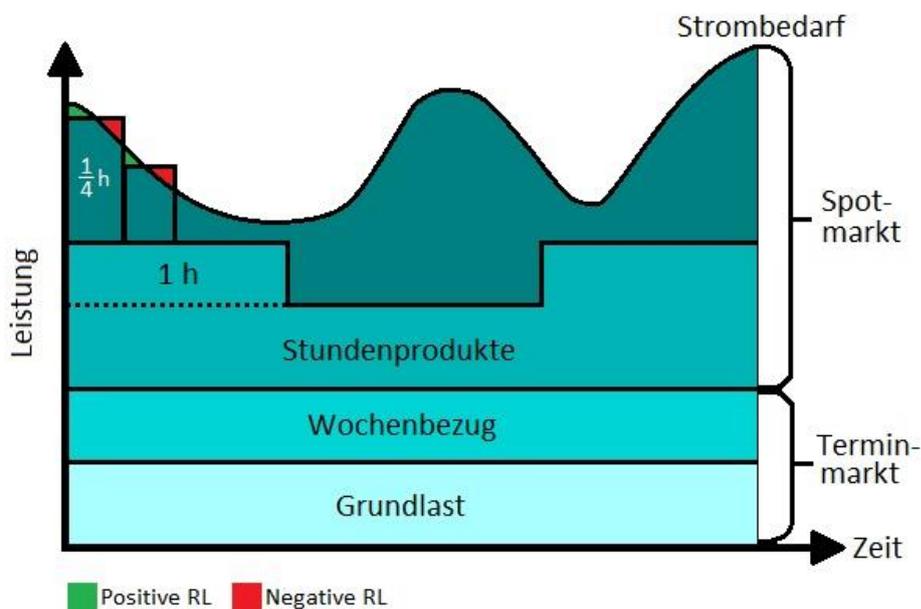


Abbildung 5-4: Stromhandel durch Termin- und Spotmarkt, Eigene Darstellung in Anlehnung an Quelle: (Kalbfuß 2015)

5.1.4.3 Umsetzbarkeit bei Rottebelüftungsventilatoren

Für die Teilnahme am Terminmarkt ist die Fernsteuerbarkeit und der Austausch von Preis- und Leistungsdaten essenziell. Dies lässt sich mit geringem Aufwand in Abfallvergärungs- und Kompostierungsanlagen realisieren (Hoffstede 2016). Technisch sind Rottebelüfter geeignet, sehr rasch ihre Leistungsaufnahme zu ändern (Hoffstede et al. 2018). Wenn entsprechende Preissignale verarbeitet werden, können sie durch eine variable Fahrweise Stromkosten für das Unternehmen reduzieren und das elektrische Netz stabilisieren. Da Rottebelüfter dynamisch betrieben werden, sind sie eher für Produkte am Spotmarkt als jene am Terminmarkt interessant.

5.1.5 Spotmarkt

Wie bereits im vorangegangenen Abschnitt thematisiert, handelt es sich beim Spotmarkt im Vergleich zum Terminmarkt um den Handel mit kurzfristigeren Verträgen. Zudem ist hier die Preisspanne innerhalb der Zeitfenster deutlich variabler, welche in Abbildung 5-5 dargestellt ist.

5.1.5.1 Funktionsweise

Die Zeitspanne zwischen Vertragsabschluss und dessen Erfüllung liegt innerhalb dieses ausgleichsorientierten Börsenmarktes zwischen 15 Minuten und 36 Stunden. Auch hier werden sowohl Einzel- als auch Blockverträge gehandelt, deren Umfang jedoch deutlich geringer ist als im Terminmarkt. Mögliche Blöcke sind dabei beispielsweise Base-load (Grundlast), „Rush-Hour“ (16:00-20:00 Uhr) oder „Off-Peak“ (20:00-08:00 Uhr) (Velvendick 2006). Im Gegensatz zum Terminmarkt lässt sich über den Spotmarkt das komplette Lastprofil des Strommarktes auf die Viertelstunde genau modellieren. Eine

Übersicht der Grundlastpreise (Day-Ahead) auf dem Spotmarkt zwischen 2018 und 2019 ist in Abbildung 5-5 dargestellt.

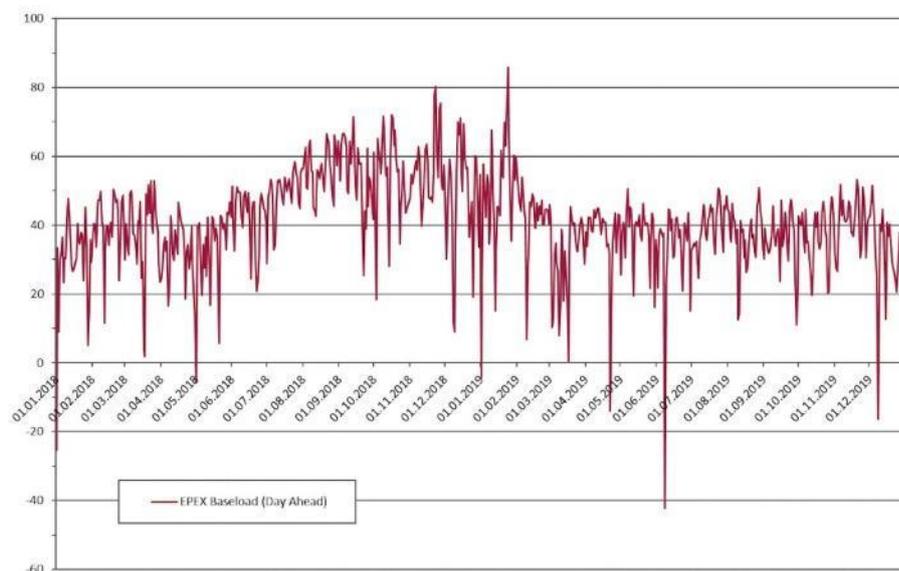


Abbildung 5-5: Spotmarktpreise 2018-2019, Quelle: (ISPEX 2020)

Genau wie sich die Bedarfsdeckung des Strommarktes an der Börse wie in Abbildung 5-4 abgebildet auf Termin- und Spotmarkt aufteilen lässt, ist auch der Spotmarkt in sich erneut aufgeteilt. Die Auktionen finden dabei einerseits im Day-Ahead (DA)- und andererseits im Intraday (ID)-Handel statt. Darunter fallen die drei Sparten DA-Auktion, kontinuierlicher ID-Handel und ID-Auktion mit den folgenden Produkten unterteilt:

- DA-Auktion:
 - Stundengenaue Auktion: Um 12h des Vortags der Realisierung findet eine Auktion für 24 Einzelstunden des Folgetags statt.
- ID-Auktion:
 - 15 Minuten-Auktion: Um 15 Uhr des Vortags findet eine Auktion zu den 96 Viertelstunden des Folgetags statt.
- Kontinuierlicher ID-Handel:
 - Kontinuierlicher Stundenhandel: Um 15 Uhr des Vortags beginnt der kontinuierliche stündliche Handel für den Folgetag.
 - Kontinuierlicher Viertelstundenhandel: Um 16 Uhr des Vortags beginnt der kontinuierliche viertelstündliche Handel für den Folgetag.

Innerhalb dieser Auktionen existieren verschiedene Preisbildungsmechanismen. Dabei finden vor allem das „Pay-as-bid“ und das „Uniform-Pricing“ („Pay-as-cleared“) Verfahren Anwendung. Die EEX setzt dabei für Ihre Auktionen ausschließlich auf letzteres Verfahren, welches den sogenannten „Merit-Order Effekt“ (Nach den Grenzkosten aufsteigende Zuschaltung der Kraftwerke) auslöst, der die Einsatzreihenfolge der Kraftwerke am deutschen Strommarkt bestimmt.

5.1.5.2 Teilnahmebedingungen

Voraussetzung für den Börsenhandel (formelle Anforderungen)

- Bilanzkreisverantwortung im Übertragungsnetz eines ÜNB der EPEX SPOT SE
- Agreement mit Partner-Clearinghaus der EPEX SPOT
- Prüfung der Handelsmitarbeitenden des Unternehmens durch die EPEX SPOT
- Transaktionsabrechnung via Clearinghaus (inkl. Absicherung von Ausfallrisiken)

5.1.5.3 Umsetzbarkeit bei Rottebelüftungsventilatoren

Für die Teilnahme am Termin- und Spotmarkt ist die Fernsteuerbarkeit und der Austausch von Preis- und Leistungsdaten essenziell. Dies lässt sich mit geringem Aufwand in Abfallvergärungs- und Kompostierungsanlagen realisieren (Hoffstede 2016). Technisch sind Rottebelüfter geeignet, sehr rasch ihre Leistungsaufnahme zu ändern (Hoffstede et al. 2018). Wenn entsprechende Preissignale über den Stromhandel verarbeitet werden, können sie durch eine angepasste Fahrweise Stromkosten für das Unternehmen reduzieren und das elektrische Netz stabilisieren. Die technischen Eigenschaften der Rottebelüfter lassen eine Beteiligung an den Produkten des Spotmarktes zu.

Theoretisch besteht zudem die Wahl zwischen Börsenhandel und OTC-Handel. Aufgrund der uneinheitlichen Bedingungen, der Höhe der zu hinterlegenden Sicherheiten sowie der Intransparenz im Bereich des OTC-Handels beschränkt sich die Analyse dieser Studie jedoch auf den Börsenhandel.

5.1.6 Regelleistungsmarkt

Das europäische Stromnetz benötigt zur Aufrechterhaltung der Versorgungssicherheit eine Frequenz von 50 Hz mit einer möglichen Schwankungsbreite von +/- 0,2 Hz. Regelleistung stellt dabei eine notwendige Systemdienstleistung dar, die Leistungs- und Spannungsschwankungen aufgrund eines Ungleichgewichts zwischen Stromerzeugung und -verbrauch ausgleichen kann.

5.1.6.1 Funktionsweise

Die Behebung von Frequenzabweichungen über Ausschreibungen kann dabei in zwei Richtungen erfolgen. Auf der einen Seite können Stromerzeuger die Leistung ihrer Kraftwerke abhängig von Bedarf und Möglichkeiten in gewissen Grenzen variieren und auf der anderen Seite können Stromverbraucher mit angepasstem Lastmanagement den Bedarf steigern oder senken. Abhängig von der vorliegenden Frequenzstörung wird dabei zwischen positiver und negativer RL unterschieden. Positive Regelleistung gleicht dabei einen Verbrauchs- und negative RL einen Erzeugungsüberschuss im Stromnetz aus.

Dieser Ausgleich ist in Deutschland in 4 Leistungsebenen aufgeteilt:

- Momentanreserve
- Primärregelleistung (PRL)
- Sekundärregelleistung (SRL)
- Minutenreserveleistung (MRL)

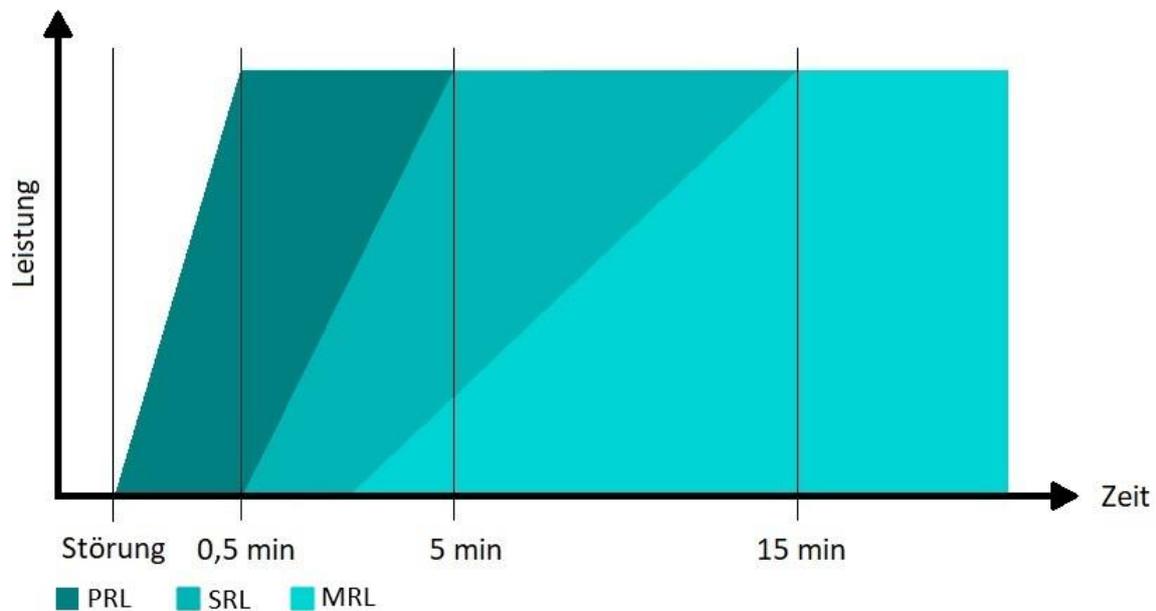


Abbildung 5-6: Die Arten und der Einsatz von RL in Deutschland, Eigene Darstellung in Anlehnung an Quelle: (Energy Brainpool 2019)

Bei Momentanreserve handelt es sich nicht direkt um eine gesteuerte Systemdienstleistung, sondern um die Energie, die nach dem Abschalten rotierender Masse durch dessen Nachlaufen entsteht. Aus diesem Grund wird in diesem Abschnitt nicht weiter auf Momentanreserve eingegangen. Der Einsatz der RL erfolgt dabei in einer festgelegten Reihenfolge, die in Abbildung 5-6 verdeutlicht wird. An erster Stelle (nach max. 30 Sek.) steht bei einer Störung der Frequenz die PRL, die am schnellsten automatisch per Frequenzregelung reagieren kann. Die Primärregelung sieht dabei einen Leistungspreis vor. Um die Primärregelung für weitere Abweichungen wieder freizugeben, wird im nächsten Schritt (nach max. 5 min.), ebenfalls automatisch, bei einer Störung der Strombilanz SRL eingesetzt. Die Sekundärregelung sieht dabei im Gegensatz zur PRL einen Arbeits- und einen Leistungspreis vor. An dritter Stelle (nach max. 15 min.) übernimmt anschließend die MRL wiederum für die SRL, die im Vergleich zu den vorangegangenen Systemdienstleistungen jedoch manuell abgerufen wird. Auch hier gibt es sowohl einen Arbeits- als auch einen Leistungspreis und alle drei Leistungen werden kalendertäglich ausgeschrieben.

Diese Einsatzstruktur wird dabei von der Bundesnetzagentur (BNetzA) bestimmt, die Regelung des Einsatzes selbst obliegt allerdings den betroffenen Regelzonen-/ Übertragungsnetzbetreibern (ÜNB).

Die Vergabe von Regelleistung erfolgt entsprechend den angebotenen Leistungspreisen nach dem Merit-Order-Prinzip (wie beim DA-Spotmarkt der EPEX). Für Sekundärregelung und Minutenreserve beinhaltet ein Angebot neben den Leistungspreisen zudem den Arbeitspreis. Diese werden herangezogen, um darüber zu entscheiden, ob tatsächlich ein Abruf stattfindet. Die Teilnehmer des Regelleistungsmarktes generieren ihre Erlöse einerseits über das Angebot von Leistung, welche sie vorhalten müssen. Hierfür werden sie entsprechend der angebotenen Leistungspreise entlohnt. Wird die angebotene Leistung aktiviert, wird also die entsprechende Energie tatsächlich abgerufen, entstehen zusätzliche Erlöse, die über den Arbeitspreis berechnet werden. Wie viel Leistung wie lange innerhalb der angebotenen Blöcke tatsächlich abgerufen wird, entscheiden die ÜNB nach Bedarf.

Auch im Bereich der Regelenergie hat der gestärkte Fokus auf erneuerbare Energien für deutliche Änderungen sowohl der Zusammensetzung der einzelnen Erzeuger als auch der Vernetzung der Anlagen gesorgt. Für die Einbringung erneuerbarer Energieanlagen in Form von virtuellen Kraftwerken wurden kleinere Zeitschreiben als die der wöchentlichen Ausschreibungen erforderlich. Optimierungsregelungen werden zudem nicht nur in der zeitlichen, sondern auch in der räumlichen Dimension angestrebt. Hier plädiert die Europäische Kommission für länderübergreifende Standards, die Ausschreibungen auch international und kostengünstiger möglich machen soll (Energy Brainpool 2019).

Tabelle 5-1: Merkmale der Regelleistungsprodukte. Eigene Darstellung in Anlehnung an (50Hertz Transmission GmbH et al. 2020).

| | Primär- Regelleistung (PRL) | Sekundär- Regelleistung (SRL) | Minuten- Reserveleistung (MRL) |
|------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| Aktivierungsgeschwindigkeit | < 30 s | < 5 min | < 15 min |
| Ausschreibungszeitraum | kalendertäglich | kalendertäglich | Kalendertäglich |
| Produktzeitscheiben | 6 x 4 Stundenblöcke | 6 x 4 Stundenblöcke | 6 x 4 Stundenblöcke |
| Produktdifferenzierung | positive/negative PRL | positive/negative SRL | positive/negative MRL |
| Mindest Angebotsgröße | 1 MW | 5 MW | 5 MW |
| Vergütung | Leistungspreis | Leistungs- und Arbeitspreis | Leistungs- und Arbeitspreis |

5.1.6.2 Teilnahmebedingungen

Um eine Einheit für die Bereitstellung von Regelleistung verwenden zu können, muss diese jeweils für die gewünschte Art der Regelleistung präqualifiziert werden. Das heißt, sie muss den technischen Anforderungen der ÜNB hinsichtlich der Regelbarkeit und weiterer Kennwerte genügen. Das Verfahren beinhaltet neben Technischen Einheiten auch Reserveeinheiten, Reservegruppen und Pools sowie die Unterzeichnung eines Regelreserve-spezifischen Vertrages mit dem jeweiligen Anschluss-ÜNB. Es wird durch die ÜNB über das Präqualifikationsportal unter www.pq-portal.energy durchgeführt.

Weiterhin müssen für die Abgabe von Geboten bestimmte Vorgaben erfüllt werden. Seit der Anpassung der Modalitäten 2020 für mehr Flexibilität wird auch PRL wie SRL und MRL kalender- statt wochentäglich angeboten, in 6 x 4 Stundenblöcken (0-4h, 4-8h, 8-12h, 12-16h, 16-20h, 20-24h) statt für die gesamte Woche und als positive/negative PRL statt als symmetrisches Produkt. Die Merkmale für Aktivierungsgeschwindigkeit, Mindestangebotsgröße und Vergütungsmodell wurden nicht verändert und beinhaltet weiterhin bspw. 1 MW als Mindestangebot für PRL und 5 MW für SRL und MRL.

In Abbildung 5-7 ist anhand der Doppelhöckerkurve die notwendige Intervallschaltung der Anlagenleistung beispielhaft für das Angebot von MRL dargestellt. Die Anlage muss in diesem Fall innerhalb der vorausgesetzten 15 Minuten Aktivierungsgeschwindigkeit sowohl runter- als auch wieder hochfahren können.

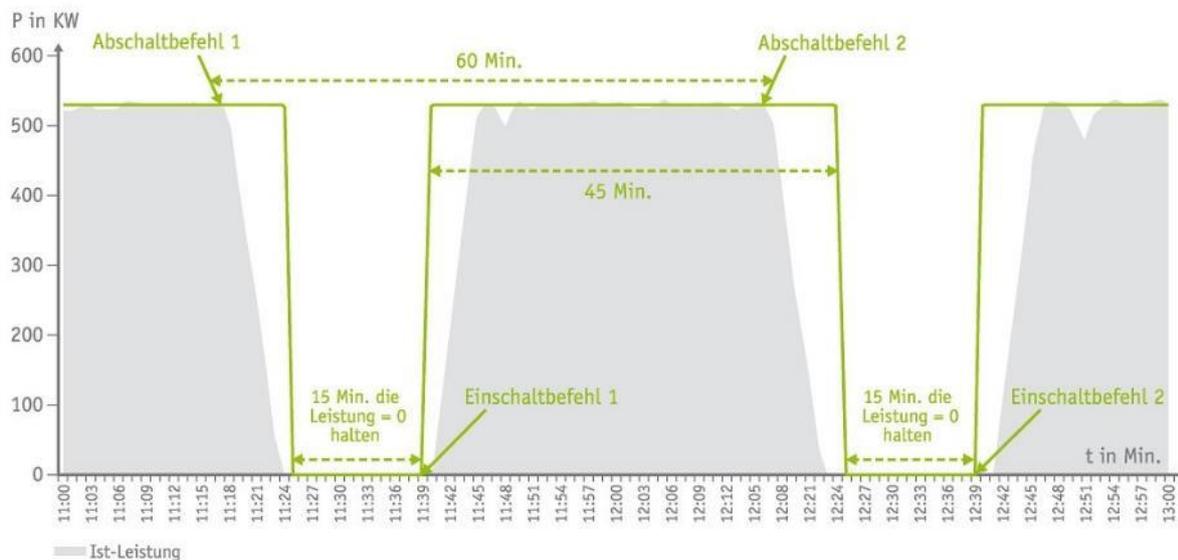


Abbildung 5-7: Doppelhöckerkurve für MRL, Quelle: (Next Kraftwerke GmbH)

5.1.6.3 Umsetzbarkeit bei Rottebelüftungsventilatoren

Für die Teilnahme am Regelleistungsmarkt ist die Fernsteuerbarkeit und der Austausch von Preis- und Leistungsinformationen essenziell. Dies lässt sich mit geringem Aufwand in Abfallvergärungs- und Kompostierungsanlagen realisieren (Hoffstede 2016). Technisch sind Rottebelüfter geeignet, sehr rasch ihre Leistungsaufnahme zu ändern und Produkte des Regelleistungsmarktes zu bedienen (Hoffstede et al. 2018); sogar die Erbringung von Primärregelleistung stellt kein Problem dar. Wenn entsprechende Preissignale über den Stromhandel verarbeitet werden, können sie durch eine angepasste Fahrweise Zusatzerlöse für das Unternehmen generieren und zusätzlich das elektrische Netz stabilisieren. Wegen der notwendigen Mindestangebotsgröße bietet sich für die Unternehmen das Poolen über zugelassene Stromhändler an.

5.1.7 Netzentgelte

Netz(nutzungs)entgelte (NNE) sind die Betriebskosten, die vom Netzbetreiber auf die Nutzer übertragen werden. Sie variieren sowohl in Abhängigkeit von der genutzten Netzebene der Stromentnahme als auch von dem zuständigen (Verteil-)Netzbetreiber (VNB) und sind bei ebendiesem abrufbar. Ist eine Arbeitspreismessung über einen Zählerstand an einem Niederspannungsnetz möglich, handelt es sich ausschließlich um einen Arbeitspreis. Ist diese Situation nicht gegeben, fällt zusätzlich ein Leistungspreis in Höhe der max. entnehmbaren Leistung des jeweiligen Jahres an.

Die im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen NNE lassen sich jedoch ggf. reduzieren. Dies ist einerseits durch eine gewisse Netznutzungsmenge oder -zeit innerhalb eines Jahres und andererseits durch gezieltes Lastmanagement zur Netzentlastung möglich (Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz 25.07.2005).

Reduktion aufgrund von atypischer Netznutzung (StromNEV § 19 Abs.2 S.1):

- Lastreduktion während Hochlastzeiten (durch Netzbetreiber vorgegeben)

- Nominell: Lastreduktion min. 100 kW und min. 500 € Reduktion der Netzentgelte/Jahr
- Bedingung der Abnahmestelle: Stromabnahme von min. 7.000 Benutzungsstunden/Jahr und Stromverbrauch über 10 GWh/Jahr Max. 80 % Reduktion des veröffentlichten Netzentgeltes

Reduktion aufgrund von Menge und Zeit der Netzentnahme (StromNEV § 19 Abs.2 S.3):

- Begünstigung einer stetigen Entnahme ab 10 GWh/a Verbrauch und 7000 h/a Netznutzung
 - bei 7000 h/a bis zu 80 % Reduktion
 - bei 7500 h/a bis zu 85 % Reduktion
 - bei 8000 h/a bis zu 90 % Reduktion

Außerdem sollte die Reduktion den Letztverbraucherbeitrag zur Kostensenkung oder -stabilisierung repräsentieren (Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz 25.07.2005).

5.1.8 Umsetzbarkeit bei Rottebelüftungsventilatoren

Insbesondere die Lastreduktion während Hochlastzeiten ist für Abfallvergärungs- und Kompostanlagenbetreiber mit Rottebelüftern geeignet, durch vermiedene Netznutzung Zusatzerlöse zu generieren.

5.1.9 EEG-Umlage

Die EEG-Umlage wurde am 01.07.2022 vollständig abgeschafft. Zum Zeitpunkt der Antragstellung für dieses Projekt hatte sie jedoch noch bestand. Daher soll hier kurz darauf eingegangen werden.

Die sogenannte EEG-Umlage wurde zur Finanzierung der EEG-Vergütung genutzt. Endkunden zahlen die EEG-Umlage an ihr jeweiliges EVU und dieses dann an den ÜNB. Diese geben die eingenommenen Zahlungen wiederum an die jeweiligen Netzbetreiber, die sie im letzten Schritt an EEG-Anlageneigentümer weitergeben.

Die Höhe der EEG-Umlage lag seit 2014 bei über 6 ct/kWh und war daher ebenfalls eine wichtige Komponente der Stromkosten. Die Entwicklung von 2010 bis 2020 ist in Abbildung 5-8 dargestellt. Sie hat aufgrund ihrer statischen Regulierung jedoch dazu geführt, dass Preisschwankungen an der Börse den Endkunden nur unmerklich erreicht haben, was keinen Anreiz zur Einbringung von Flexibilität birgt. Daher wurden auch dynamische EEG-Umlagen diskutiert, die sich jedoch nicht durchsetzen konnten.

Auch bei der EEG-Umlage bestand unter bestimmten Voraussetzungen (§64) die Möglichkeit, die Zahlungen zu reduzieren. Diese Bedingungen wurden in § 64 EEG genauer definiert und das Unternehmen musste einer Branche aus Anlage 4 des EEG zugeordnet werden können (Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz).

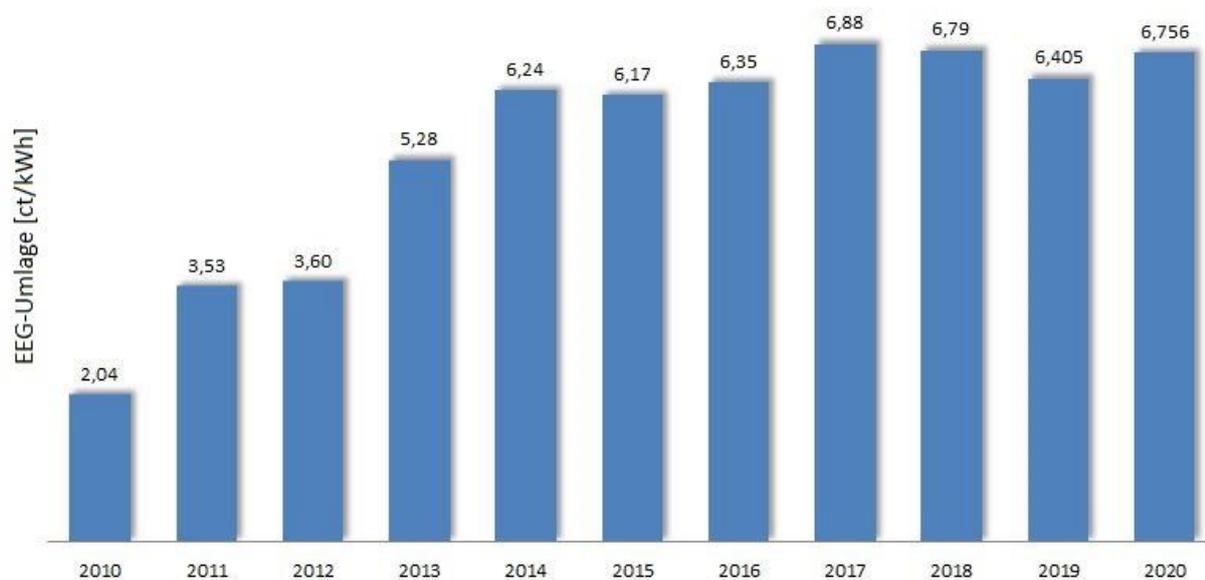


Abbildung 5-8: Entwicklung der EEG-Umlage, Quelle: (Bundesnetzagentur (BNetzA) 2020)

5.1.10 Weitere Steuern und Umlagen

Von den restlichen, kleineren Bestandteilen der Stromkosten für industrielle Großverbraucher aus Abbildung 5-1 spielt die Stromsteuer die größte Rolle. Laut dem Stromsteuergesetz (StromStG) beträgt diese 2,05 ct/kWh. In einigen Fällen besteht nach §9 jedoch die Möglichkeit der Steuerbefreiung oder -ermäßigung, wenn es sich um einen darin enthaltenen Spezialfall handelt (Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz 24.03.1999).

Mögliche Steuerbefreiungen/-ermäßigungen bestehen u. a. für:

- Strom aus Anlagen mit elektrischer Nennleistung > 2 MW aus erneuerbaren Energien für den Selbstverbrauch vor Ort
- Strom aus Anlagen mit elektrischer Nennleistung ≤ 2 MW aus erneuerbaren Energien/ hocheffizienten KWK-Anlagen, der im räumlichen Zusammenhang zur Anlage
 - durch den Betreiber entnommen wird
 - durch den Betreiber an Letztverbraucher geleistet wurde
- Strom, der zur Stromerzeugung entnommen wird
- Strom aus Anlagen, die im Störfall als Notstromanlagen dienen

(Quelle: (Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz 24.03.1999))

5.2 Voraussetzungen zur Eingliederung der Rottebelüftungsanlagen in ein virtuelles Kraftwerk

Für die Einbindung von flexiblen Lasten in ein zentrales virtuelles Kraftwerk gibt es im Detail eine Vielzahl an Optionen. Im Prinzip sind es aktuell zwei übergeordnete Varianten, mit der Anlage vor Ort zu kommunizieren (vgl. Abbildung 5-9). Die erste Möglichkeit ist die direkte Anbindung über ein Protokoll wie IEC 61850 oder VHPready. Im zweiten Fall wird auf eine vorkonfigurierte Kommunikationsbox zurückgegriffen, welche direkt am Anlagenstandort installiert wird. Zusätzlich ist dann vor Ort eine Verknüpfung mit der Anlagentechnik nötig (i.d.R. an eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS)). Falls diese SPS nicht die gleiche Sprache wie die Kommunikationsbox spricht, ist die Nutzung eines zwischengeschalteten Gateways nötig (bspw. für die Wandlung zwischen dem Profibus und dem Modbus-Protokoll). Darüber hinaus besteht die Option vor Ort bereits vorhandene Prozessleittechnik (PLT) oder ein Energiemanagementsystem (EnMS) anzusprechen. Hierüber können dann Ist- und Sollwerte der untergelagerten flexiblen Lasten weitergeleitet bzw. verarbeitet werden. Beispielsweise ist dann eine weitere Validierung von Sollwerten auf dieser Ebene möglich, bevor die einzelnen Anlagen, ggf. lokal optimiert, angesteuert werden (Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena); Stübs et al. 2019).

Damit insgesamt die Fernauslesung bzw. -steuerung der flexiblen Last gesichert vonstattengeht, wird u.a. zu der Kommunikationsbox ein Virtual Private Network-Tunnel aufgebaut. Für die entsprechende Datenübertragung stehen dann prinzipiell verschiedene Kommunikationstechnologien zur Verknüpfung. Im besten Fall wird eine vorhandene Kabelverbindung (Kupfer / Glasfaser) genutzt. Alternativ ist eine Mobilfunkanbindung umsetzbar, die jedoch von der Netzabdeckung vor Ort abhängt. Letzteres ist zudem eine marktübliche Lösung für die Einbindung von technischen Einheiten (TEen) in der Regelreserve im Fall einer geschlossenen Benutzergruppe¹ (falls die einzelne TE 25 kW übersteigt oder die Option der Kleinstanlagenbündelung bei TEen ≤ 25 kW nicht in Anspruch genommen wird (50Hertz Transmission GmbH et al.), ansonsten findet auf der höheren Aggregationsebene der Reserveeinheit/-gruppe eine gesicherte Anbindung statt) (Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena); Stübs et al. 2019).

Als Alternative für die Zukunft kann an dieser Stelle auf den am 24.02.2020 gestarteten Rollout der intelligenten Messsysteme / Smart Meter mit ihren Smart Meter Gateways (SMGWs) verwiesen werden (Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik 2020a). Bis ca. 2030 soll die Mehrheit an Niederspannungs- und Mittelspannungskunden über das SMGW erreichbar sein. Dies gilt für den lesenden als auch den optionalen schreibenden Zugriff u.a. per „controllable local systems“-Proxy-Kanal. In der ersten Stufe des Rollouts liegt der Fokus auf Letztverbrauchern in der Niederspannung ohne registrierende Leistungsmessung (RLM), die mehr als 6.000 kWh im Jahr verbrauchen und somit als Pflichteinbaufälle gelten. Die im Projekt betrachteten Rottebelüftungsventilatoren fallen daher i.d.R. nicht hierunter, da eine RLM vorliegt, für die bisher keine passenden Smart Meter mit dem zugehörigen SMGW im Markt vorhanden sind (Stand der Marktanalyse vom Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik vom 03.02.2020) (Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik 2020b). Gleichzeitig sind die Anforderungen an das SMGW bisher nicht für die Regelreserve geeignet. Dieser Punkt soll innerhalb des weiteren Standardisierungsprozesses vom SMGW gelöst werden (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 2020).

¹ Ein vom Internet getrennt betriebenes Kommunikationsnetzwerk, welches je Regelreserveanbieter gesondert betrieben wird.

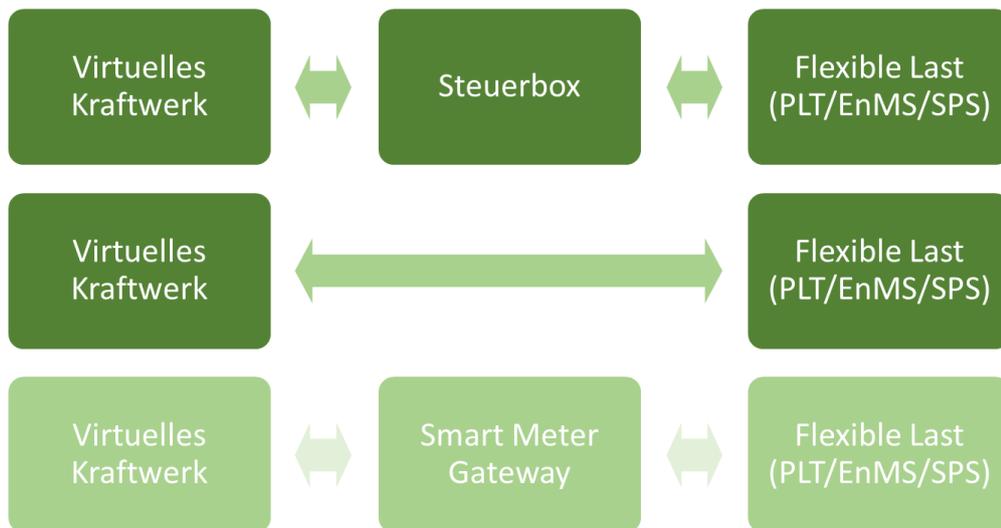


Abbildung 5-9: Übersicht über aktuelle typische Anbindungsvarianten von flexiblen Lasten mit oder ohne Steuerbox sowie zukünftig per SMGW an ein virtuelles Kraftwerk

6 Experimentelle Untersuchung an zwei Abfallvergärungsanlagen

Es wurden zwei Praxisanlagen hinsichtlich einer flexiblen Fahrweise der Rottebelüftungsaggregate untersucht, um analytische Ergebnisse und praktische Erfahrungen miteinander zu verbinden. Dies soll die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf den Anlagenbestand und auf zukünftige Anlagen sicherstellen. Im Fokus stehen zwei Biogutvergärungs- und Kompostierungsanlagen mit unterschiedlicher Vergärungstechnik (Boxen- und Pflropfenstromvergärung). Eine reine Kompostierungsanlage war zunächst im Rahmen des Projektes vorgesehen, konnte aber aus verschiedenen Gründen nicht untersucht werden.

In Anlage A wird das diskontinuierliche Boxen-Vergärungsverfahren genutzt (auch als Batch- oder Garagenverfahren bezeichnet). Die Bioabfallvergärungs- und Kompostierungsanlage ist mit einer genehmigten Durchsatzkapazität von 50.000 Jahrestonnen Bioabfall in Betrieb. Die technische Durchsatzkapazität ist auf 44.000 Mg/a ausgelegt. Die gesamten angelieferten Biogutmengen (und geringe Anteile Grüngut mit max. 10 %) werden dabei unaufbereitet der Vergärung zugeführt (Vollstromvergärung). Das produzierte Biogas wird in zwei BHKW-Aggregaten mit einer Gesamtleistung von ca. 1.050 kW_{el} verstromt (Direktvermarktung, bedarfsorientierte Stromerzeugung). Anschließend an die Vergärung wird der Gärrest mit Kompost angemischt und in einem der sechs vorhandenen Intensivrottetunnel für 8 – 10 Tage belüftet und damit die Kompostierung eingeleitet. Die Zuluftventilatoren der Rotteboxen dienen der ausreichenden Aerobisierung des aus der Vergärung zugeführten Materials. Jede der sechs Rotteboxen, mit einer Gesamt-Nennleistung von 132 kW_{el}, ist dazu mit einem Ventilator ausgestattet, welcher temperaturabhängig so lange belüftet, bis sich ein Soll-Temperatur-Wert einstellt. Anschließend erfolgt ein Intervallbetrieb, bei dem der Zuluftvolumenstrom zwischen 50-100 % durch die eingesetzte Regelungstechnik variiert wird. Der Rotteprozess wird seitens des Anlagenbetreibers als sehr empfindlich eingestuft. Übergeordnetes Ziel ist die Sicherstellung der Kompostqualität unter Einhaltung eines festgelegten Rottegrades (3 bis 4) nach dem Rotteprozess in den Boxen, während ebenfalls ausreichend Flüssigkeit als Wasserdampf ausgetrieben werden muss. Im Anschluss erfolgt über einen Zeitraum von ca. 3,5 bis 4 Wochen die Nachrotte per Trapezmieten auf einer unbelüfteten, überdachten Fläche. Nach einer Kompostkonfektionierung mit 2 mobilen Trommelsieben, wird die 12 bis 80 mm Fraktion für weitere 2 bis 2,5 Wochen aufgesetzt und danach erneute mit 12 mm abgesiebt.

Anlage B behandelt und verwertet ca. 22.000 Mg/a Biogut und ca. 8.000 Mg/a Grüngut. Nach einer Aufbereitung mittels Zerkleinerer, Überbandmagnet und Sternsieb, wird das Unterkorn der thermophilen Vergärung in einem Pflropfenstromfermenter zugeführt. Das Biogas wird, wie in Anlage A in zwei BHKWs verstromt. Derzeit ist eine installierte elektrische Leistung von ca. 1.150 kW_{el} am Standort in Betrieb (Direktvermarktung, bedarfsorientierte Stromerzeugung). Nach der Fermentation wird der Gärrest mit Schneckenpressen entwässert und nach einer kurzen Aerobisierungsphase in entsprechenden Boxen, für 2 bis 3 Wochen in der offenen, überdachten Mietenkompostierung unter Zugabe von 25% hygienisiertem Grüngut nachgerottet. Die Kompostkonfektionierung besteht aus einem Trommelsieb. Nach der ersten Siebung mit 15 mm wird das Material weitere 1 bis 2 Wochen gerottet und dann nachgesiebt. Ein Teil des Frischkompostes wird nach ca. 8 Wochen Nachreife auf 12 mm gesiebt und als Fertigkompost vermarktet.

Die eigentlichen Rottetunnel werden nur noch für Übermengen genutzt, die nicht vergoren werden können. Die acht Zuluftventilatoren haben eine Gesamt-Nennleistung von 120 kW_{el}. Sowohl die Be- als auch die Entlüftungsaggregate laufen im 24-Stunden-Betrieb. Veränderungen der Leistungsaufnahme dieser Aggregate ergeben sich durch

unterschiedliche Zuluftmengen, die in Zeitfahrplänen festgelegt sind. Im Kompostierungsprozess werden unterschiedliche Phasen durchlaufen, in denen vorgegebene Temperaturen über eine festgelegte Zeit erreicht werden müssen. Abweichungen von den vorgegebenen Fahrplänen ergeben sich dadurch, dass Temperaturen noch nicht (ausreichend lang) erreicht wurden und die Belüftungsphase verlängert wird.

6.1 Messkonzept und Probenahme

6.1.1 Anlage A

Das Rotteinputmaterial pro Tunnel in Phase 1 bestand aus ca. 100 Mg Gärrest aus der Tunnel-Fermentation und ca. 85 Mg Rotteoutput, welches zurückgeführt wurde. Beide Stoffströme wurden auf der Nachrottefläche mit einem mobilen Mietenumsetzer gemischt. Danach wurde das Material mit dem Radlader gleichmäßig in die Tunnel eingetragen. Tunnel 5 ist der Tunnel, bei dem in der Steuerung ein Eingriff stattfand. Tunnel 6 wurde wie üblich gesteuert. Die Füllhöhe betrug wie üblich ca. 2 m. Wärme wurde ebenfalls wie im sonstigen Betrieb nur zum Start eingekoppelt.



Abbildung 6-1: Befüllung Tunnel 5 (links) und Tunnel 6 (rechts); 1. Durchlauf

Nach 1 Woche wurde das Gemisch per Radlader aus den Tunneln entnommen und im überdachten Nachrottebereich zu einer Miete aufgesetzt. Ein Teil des Materials wurde nach der Beprobung mit Gärrest gemischt und wieder in die Tunnel eingetragen. Somit gab es auf Grund der unterschiedlichen Qualitäten aus der 1. Phase eine unterschiedliche Ausgangsbasis für die 2. Phase. Das restliche Material wurde neu aufgesetzt und nachgerottet.

Die Proben wurden aus der frisch aufgesetzten Miete genommen. Es wurden jeweils an 3 Stellen auf mittlerer Höhe auf der Innen- und Außenseite Material entnommen und eine Mischprobe gebildet. Zwei Proben pro Tunneloutputmaterial wurden zur weiteren Analyse an das Labor übergeben.

6.1.2 Anlage B

Der Versuch wurde mit einer Mischung aus 75% aufbereitetem Biogut und 25% Grün-
gut durchgeführt. Beide Fraktionen wurden mit einem Doppstatt Ceron zerkleinert, per
Überbandmagnet von Eisenmetallen entfrachtet und über ein Sternsieb geleitet. Die
Fraktion 0-80 mm gelangt zum Fermenter und wurde für die Versuche eingesetzt.
Beide Tunnel sollten abwechselnd beschickt werden bis zu einer geplanten Füllhöhe
von ca. 1,5 m Höhe. Die Füllhöhe wurde etwas niedriger gewählt als sonst üblich, da
wenig Material vorhanden war. Real war die Füllhöhe in der Mitte zum Teil bis ca. 1,8
m und zu den Seiten abfallend.
Aus terminlichen Gründen wurde nur 1 Durchlauf durchgeführt.

Es wurde jeweils eine Schaufel Material aus dem vorderen, mittleren sowie hinteren Be-
reich des Tunnels entnommen. Die Gesamtprobe wurde zunächst mit dem Radlader
gemischt, zu einem Haufwerk aufgesetzt und dann geviertelt. Zwei gegenüberliegende
Viertel wurden verworfen und die anderen Beiden wieder erneut gemischt und aufge-
schüttet. Der Vorgang wurde mehrere Male wiederholt und dann manuell mit einer
Schaufel fortgeführt bis 2 Proben á 20 l genommen werden konnten.



Abbildung 6-2: Befüllung Tunnel 5 (rechts) und Tunnel 6 (links)

6.2 Ergebnisse

6.2.1 Variation der Rottelüfter

6.2.1.1 Anlage A

Gemäß dem Versuchskonzept wurden zwei Rottetunnel in die Untersuchung mit einbe-
zogen. Hierbei wurde Rottetunnel 5 im Fahrplanbetrieb und der Rottetunnel 6 im Nor-
malbetrieb belüftet. Von der Anlagen SPS wurden die Einstellung der Frequenzumrich-
ters, also die Leistungsstufe in Prozent, der Betriebsvolumenstrom in m^3/h , die Tempe-
ratur im Rottetunnel, sowie der Druck vor und nach dem Rottetunnel als Datensatz
übergeben.

In Abbildung 6-3 sind die Rottetunnel abgebildet, die Abbildung entstammt der Anlagen SPS. Die Rottetunnel 5 und 6 (RO) sind ganz links dargestellt, mit dem zu diesem Zeitpunkt aktuellen Messwerten.

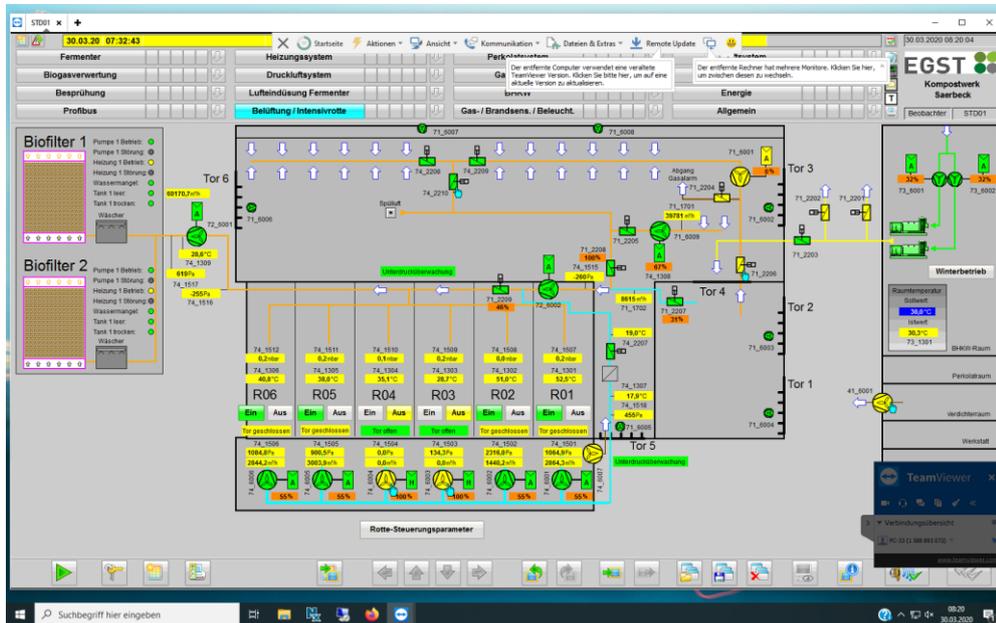


Abbildung 6-3: Visualisierung der Belüftung der Rottetunnel

Ausgewertet wurden die Parameter Temperatur und Betriebsvolumenstrom, da sich das Ein- bzw. Ausschalten der Belüftung auf diese Parameter auswirkt. Als Vergleich werden auch immer die Daten des sich im Normalbetrieb befindlichen Rottetunnels dargestellt. Bei der Anlage A sind zwei Phasen durchgeführt worden.

Ergebnisse der Phase 1

Die Abbildung 6-4 zeigt den Volumenstrom (Belüftung) des Rottetunnels 5 dargestellt über den Versuchszeitraum der Phase 1. Der Rottetunnel 5 wurde im Fahrplanbetrieb gefahren.

Das heißt im Intervallbetrieb, hierbei wird die Belüftung komplett ausgeschaltet und nach einer gewissen Zeit wieder eingeschaltet. Aber auch in Volllast und Teillast betrieben.

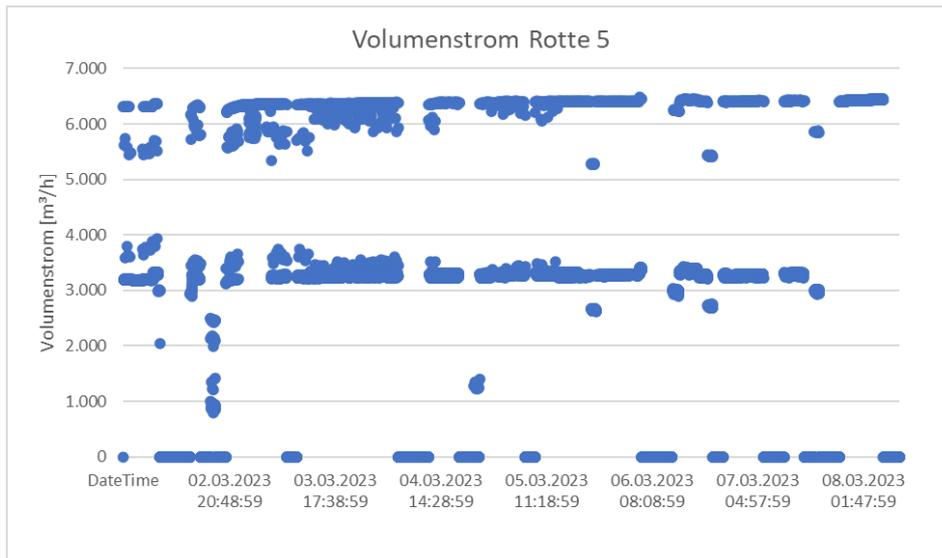


Abbildung 6-4: Volumenstrom des Rottetunnels 5 - Fahrplanbetrieb

Wie in Abbildung 6-4: Volumenstrom des Rottetunnels 5 - Fahrplanbetrieb zu sehen ist, wurde eine Luftmenge von ca. 6000 m^3/h im Volllastbetrieb und im Teillastbetrieb von gut 3000 m^3/h in den Rottetunnel 5 gefördert. Weiterhin sind die „Stoppzeiten“ zu erkennen, das sind die Punkte auf der Nulllinie. Die schwankende Werte sind entweder auf Messfehler oder auch auf einen höheren Druckverlust im Rottetunnel zurückzuführen. Dies ist für die Auswertung nicht relevant.

Im Vergleich dazu stellt die Abbildung 6-5: Volumenstrom des Rottetunnels 6 - Normalbetrieb den „Normalbetrieb“ anhand des Rottetunnels 6 dar. Hier ist der Volllast und Teillastbetrieb wiederum gut zu erkennen, es fehlen aber die regelmäßigen „Stoppzeiten“ wie beim Rottetunnel 5. Die zwei Stoppzeiten, die zu sehen sind, stellen das Ende der Befüllung bzw. den Beginn der Entleerung dar.

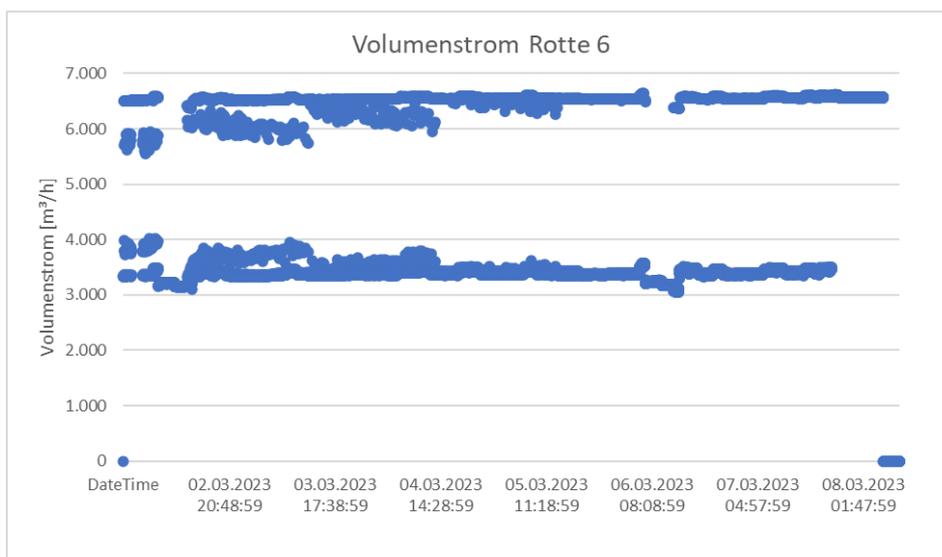


Abbildung 6-5: Volumenstrom des Rottetunnels 6 - Normalbetrieb

Die Abbildung 6-6 zeigt den Temperaturverlauf des Rottetunnels 5, der nach Fahrplan betrieben wurde. Hierbei zeigt die X-Achse Datum und Zeit und die Y-Achse die Temperatur. Nach Versuchsbeginn beträgt die Temperatur über 50 °C, gefolgt von einigen Temperaturschwankungen bis über 60 °C, bevor die Temperatur schnell auf gut 40 °C fällt und dann langsam sinkt bis auf ca. 35 °C, bevor der Versuch endet.

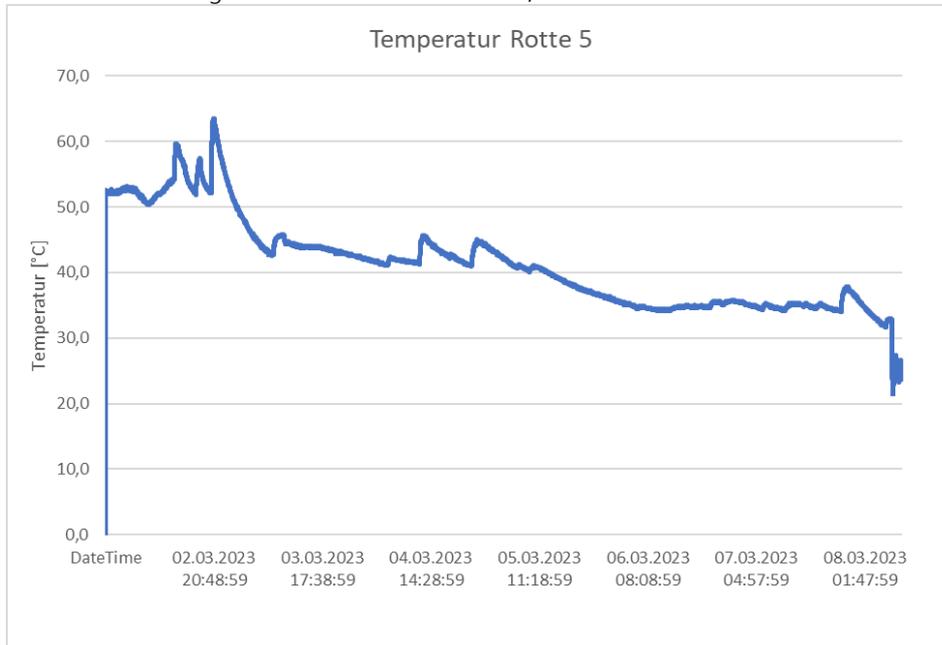


Abbildung 6-6: Temperaturverlauf des Rottetunnel 5 -Fahrplanbetrieb

Die Abbildung 6-7 zeigt den Temperaturverlauf des Rottetunnels 6, der im Normalbetrieb gefahren wurde. Nach Versuchsbeginn beträgt die Temperatur über 50 °C, gefolgt von einem Abfall auf 50 °C und einen Anstieg auf ca. 55 °C, bevor die Temperatur bis auf 30 °C langsam sinkt, bis der Versuch endet.

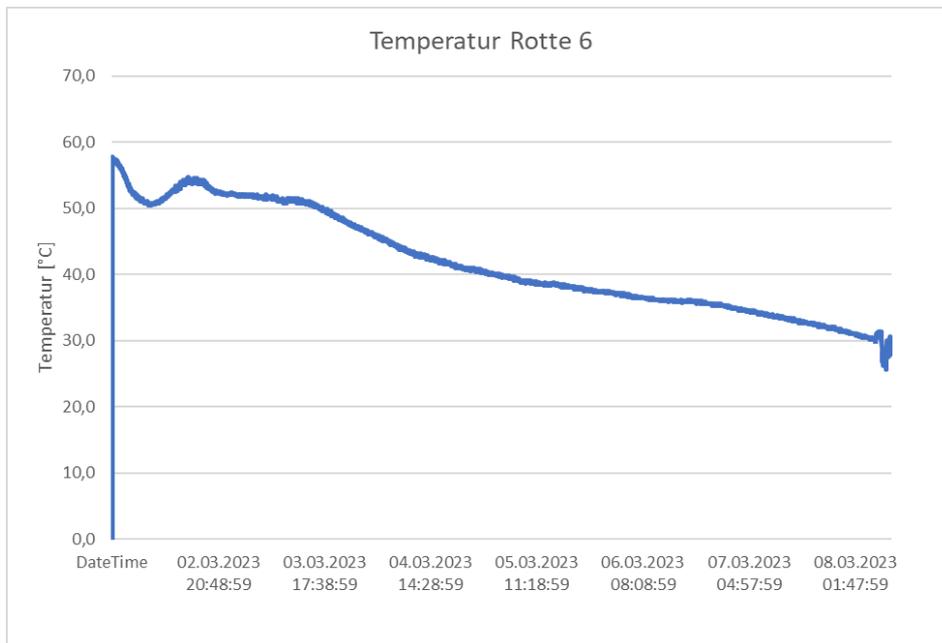


Abbildung 6-7: Temperaturverlauf des Rottetunnel 6 -Normalbetrieb-

Beim Vergleich der beiden Temperaturverläufe fällt auf, dass der Temperaturverlauf des Rottetunnels 5 deutlich ungleichmäßiger ist als der des Rottetunnels 6, dies ist eindeutig auf den Fahrplanbetrieb rückführbar.

Der Vergleich der Steigung beider Kurven ergibt nur einen geringen Unterschied, so dass aufgrund der Steigung keine eindeutige Aussage getroffen werden kann.

Phase 2

Die Versuche in Phase 2 sind genauso durchgeführt worden, wie die der Phase 1. Auch hier wurde der Rottetunnel 5 nach Fahrplan betrieben. Wie in Abbildung 6-8 zu sehen ist, wurde die Belüftung des Rottetunnel 5 neben Volllast und Teillast, immer wieder ausgeschaltet. Bei Volllast/h betrieb betrug der Volumenstrom gut 6000 m³/h und bei Teillast ca. 3000 m³/h.

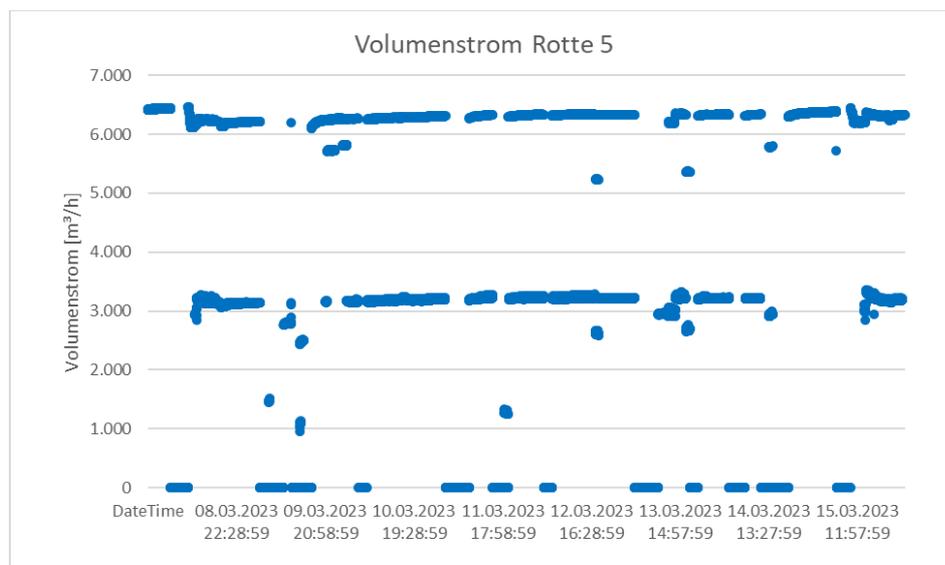


Abbildung 6-8: Volumenstrom des Rottetunnels 6 - Fahrplanbetrieb

Der Referenz Rottetunnel 6 wurde, wie auch in Phase 1, im Normalbetrieb gefahren. Dessen Volumenstromverlauf ist in Abbildung 6-9: Volumenstrom des Rottetunnels 6 - Normalbetrieb-abgebildet. Außer am Anfang und am Ende des Versuchsdurchlaufes, wurde dieser Tunnel nur in Teil- und Volllast betrieben.

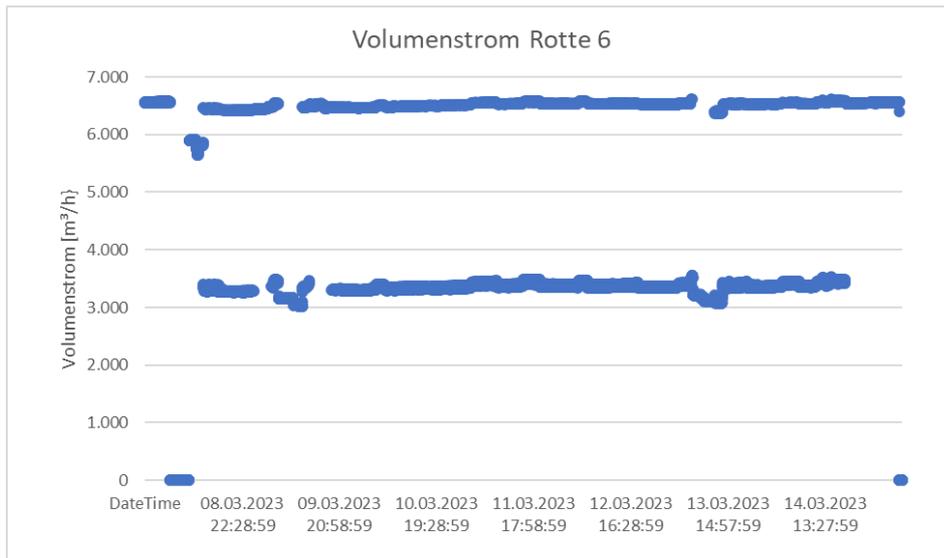


Abbildung 6-9: Volumenstrom des Rottetunnels 6 - Normalbetrieb-

Die Abbildung 6-10 zeigt den Temperaturverlauf des Rottetunnels 5 der Phase 2, der nach einem Fahrplan betrieben wurde. Nach Versuchsbeginn fällt die Temperatur bis auf gut 20 °C, bevor diese auf über 50 °C ansteigt, mit folgenden Ausschlägen der Temperatur nach oben, bevor diese, wie auch bei dem Versuch der Phase 1 wieder absinkt, bis zum Versuchsende. Die Temperatur zum Versuchsende liegt bei 40 – 45 °C.

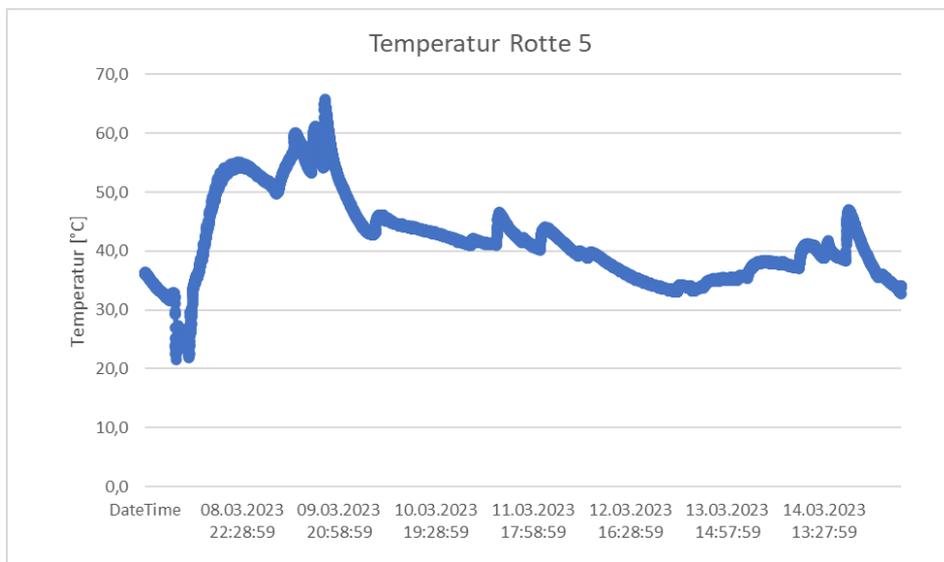


Abbildung 6-10: Temperaturverlauf des Rottetunnel 6 -Fahrplanbetrieb

In Abbildung 6-11 ist der Temperaturverlauf des Rottetunnels 6, der Referenz-tunnel, dargestellt. Auch hier ist nach Versuchsbeginn ein steiler Anstieg zu erkennen, bis auf ca. 60 °C, gefolgt von einem Temperaturabfall um knapp 10 °C und einen Anstieg auf knapp 60 °C bevor die Temperatur dann langsam bis zum Versuchsende auf ca. 30 °C abfällt.

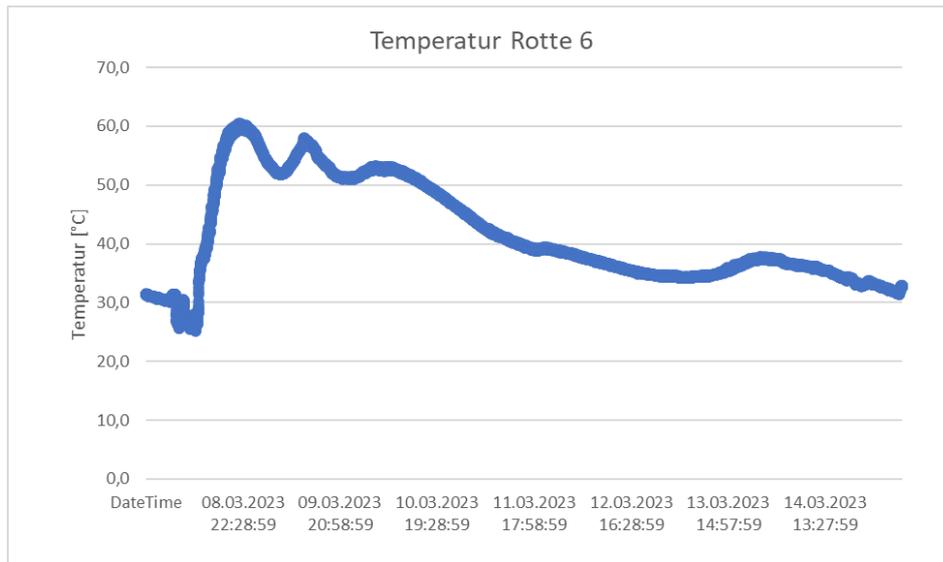


Abbildung 6-11: Temperaturverlauf des Rottetunnel 6 -Normalbetrieb

Wenig überraschend, zeigt auch der Vergleich der Temperaturverläufe der Rotte 5 und der Rotte 6 den gleichen Verlauf wie in den Versuchen der Phase 1. Der Temperaturverlauf der Rotte 5 (Fahrplanbetrieb) ist deutlich von größeren Ausschlägen gekennzeichnet, wohin gehend der Rottetunnel 6 (Normalbetrieb) einen gleichmäßigeren Verlauf der Temperatur aufweist. Auch hier ist die Steigung des Rottetunnels leicht kleiner als die des Referenz隧nells, der Unterschied ist aber sehr gering, so dass dies ein Hinweis auf einen gestörten Biomasseabbau sein kann, aber dadurch nicht belegbar ist.

6.2.1.2 Anlage B

Bei der Anlage B wurde eine Versuchsreihe durchgeführt. Hierbei wurde der Rottetunnel 5 im Fahrplanbetrieb und der Rottetunnel 6 im Normalbetrieb betrieben.

Gemäß dem Versuchskonzept wurden auch hier zwei Rottetunnel in die Untersuchung mit einbezogen. Hierbei wurde wiederum Rottetunnel 5 im Fahrplanbetrieb und der Rottetunnel 6 im Normalbetrieb belüftet. Hierbei wurden von der Anlagen SPS, die Einstellung der Frequenzumrichter, also die Leistungsstufe in Prozent, der Betriebsvolumenstrom in m^3/h , die Temperatur im Rottetunnel, sowie der Druck vor und nach den Rottetunneln erfasst.

In Abbildung 6-12: Schematische Darstellung der Rottetunnel der Anlage B sind alle Rottetunnel schematisch dargestellt, die Rottetunnel 5 und 6 sind nahezu mittig dargestellt.

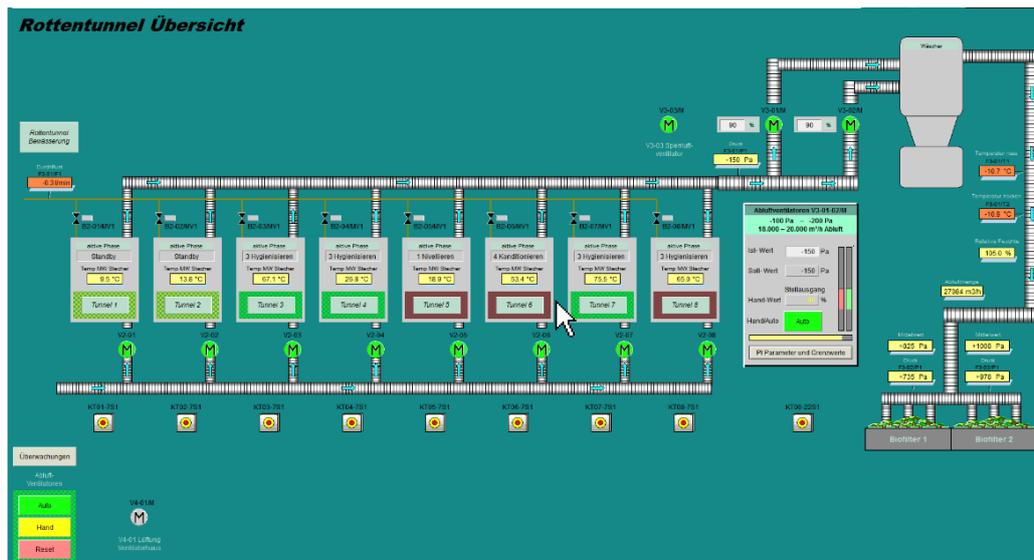


Abbildung 6-12: Schematische Darstellung der Rottentunnel der Anlage B

Bei der Darstellung der Ergebnisse haben wir uns bei der Anlage B dazu entschieden, die prozentuale Einstellung des Frequenzumrichters darzustellen. Diese Werte stellen ein Maß für die Leistungsaufnahme des Lüfters dar. Der Volumenstrom der Lüfter wurde aufgezeichnet, jedoch sind diese durch große Schwankungen gekennzeichnet, so dass die Darstellung dessen Verlaufs keinen Erkenntnisgewinn ergibt.

Nachfolgend ist die Einstellung des Frequenzumrichters für den Lüfter des Rottentunnels 5 dargestellt, welcher im Fahrplanbetrieb belüftet wurde. In Abbildung 6-13 ist zu erkennen, dass der Lüfter im Betrieb im Teillastbetrieb bei 30 % und zu Beginn bei 20 % der Maximalleistung betrieben wurde. Einige Punkte weisen auf eine kurzzeitige Vollast bzw. nahezu Vollast hin. Die Belüftungszeiten werden, wie geplant, von Abschaltphasen unterbrochen.

Bei der Auswertung der Daten, sind Werte, die größer als 100 % waren, herausgefiltert worden, da dies Messfehler bzw. falsche Zuordnungen sind.

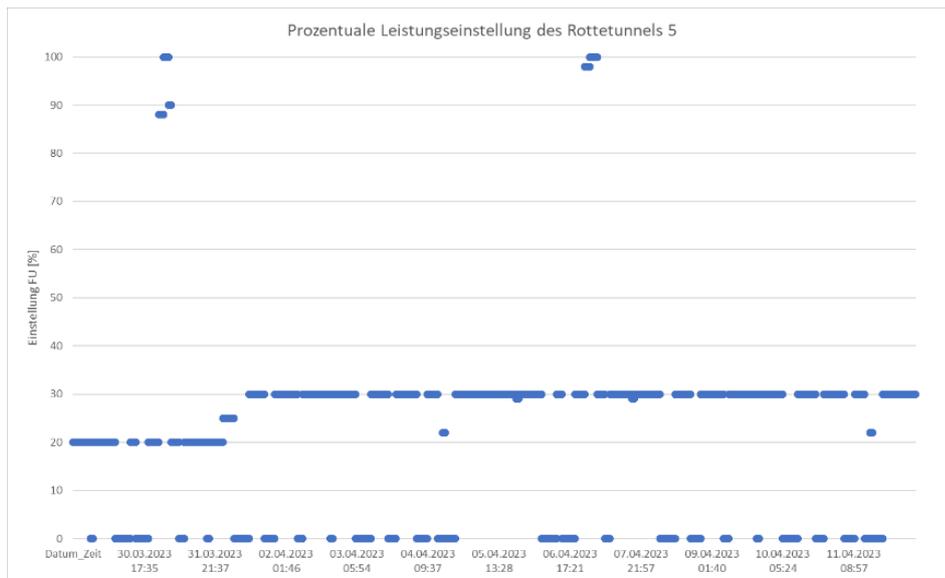


Abbildung 6-13: Einstellungswerte des Frequenzumrichters für den Lüfter des Rottetunnels 5 – Fahrplanbetrieb-

Die Abbildung 6-14 zeigt die Frequenzumrichtereinstellung des Rottetunnels 6, welcher im Normalbetrieb fuhr, wiederum in Prozent. Hierbei ist zu erkennen, dass der Lüfter bis zu gut der Hälfte des Versuchszeitraumes im Leistungsbereich von 20 und 30 % betrieben wurde, erst zum Ende des Versuches steigt die Leistung des Lüfters auf 90 %. Es sind keine Stoppzeiten vorhanden, wie auch vorgesehen. Daten, die über 100% lagen, sind herausgefiltert worden.

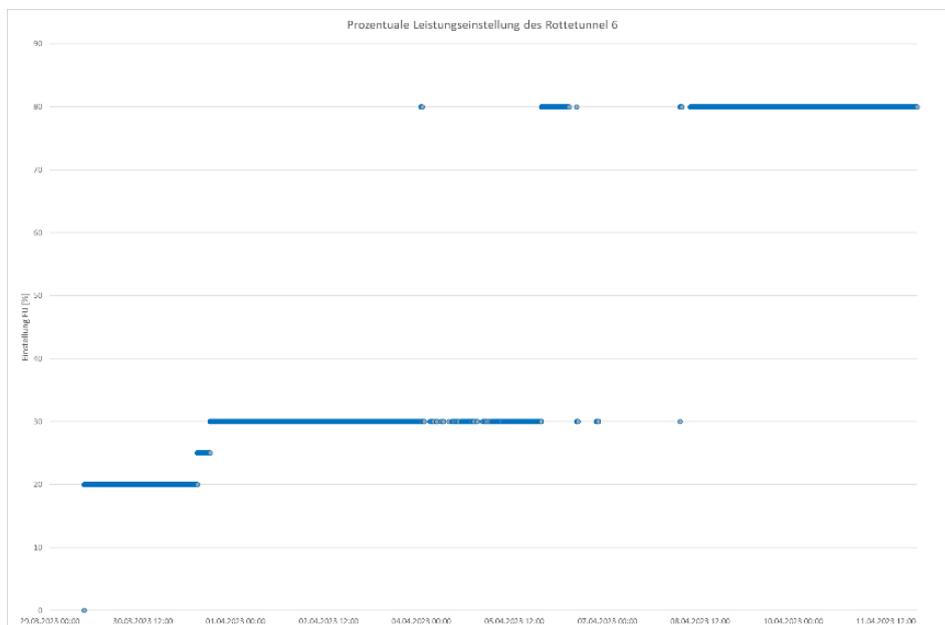


Abbildung 6-14: Einstellungswerte des Frequenzumrichters für den Lüfter des Rottetunnels 6 -Normalbetrieb-

Beim Vergleich ist zu erkennen, dass abgesehen von den Stoppzeiten des Rottetunnels 5 auch Unterschiede in der Lüfterleistung zu erkennen sind, den Anstieg in der Lüfterleistung des Rottetunnels 6 ist so nicht beim Rottetunnel 5 zu erkennen Diese ist darin

begründet, dass der Rottetunnel 6 in der Konditionierung war, während der Tunnel 5 noch in der Hygienisierung war.

Ebenso wie bei der Anlage A wurde auch bei der Anlage B der Temperaturverlauf des Rottetunnels 5, der im Fahrplanbetrieb belüftet wurde und der des Rottetunnels 6 der im Normalbetrieb belüftet wurde, aufgezeichnet.

Hierbei ist zu beachten, dass augenscheinliche Fehlwerte, die unter 20 °C lagen, nicht berücksichtigt wurden.

Die Abbildung 6-15: Temperaturverlauf des Rottetunnel 5 -Fahrplanbetrieb **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt den Temperaturverlauf des Rottetunnels 5. Hierbei ist zu erkennen, dass nach Versuchsbeginn die Temperatur auf 50 °C ansteigt, dann kurz abfällt, um dann wieder zu steigen und dann, bis auf einen Abfall nach der Hälfte der Versuchszeit bei knapp 60 °C zu liegen, erst kurz vor Versuchsende ist ein leichter Abfall der Temperatur zu erkennen.

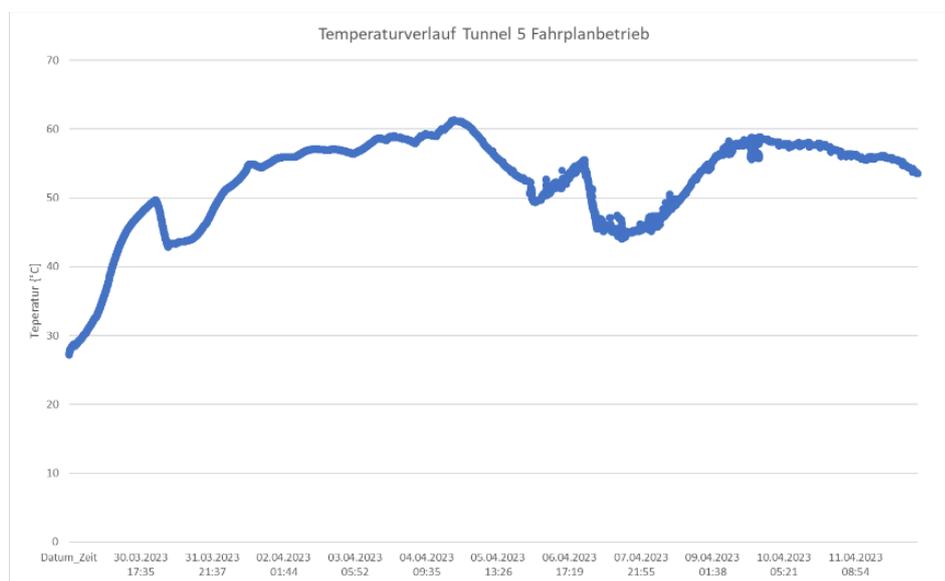


Abbildung 6-15: Temperaturverlauf des Rottetunnel 5 -Fahrplanbetrieb

Die Abbildung 6-16: Temperaturverlauf des Rottetunnel 6 -Normalbetrieb **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt den Temperaturverlauf des Rottetunnels 6, welcher im Normalbetrieb belüftet wurde. Hier steigt die Temperatur nach Versuchsbeginn auf 50 °C sehr schnell, bevor die Steigung geringer wird aber weiter bis auf 65 °C ansteigt, es ist kein Abfallen der Temperatur zum Versuchsende zu erkennen.

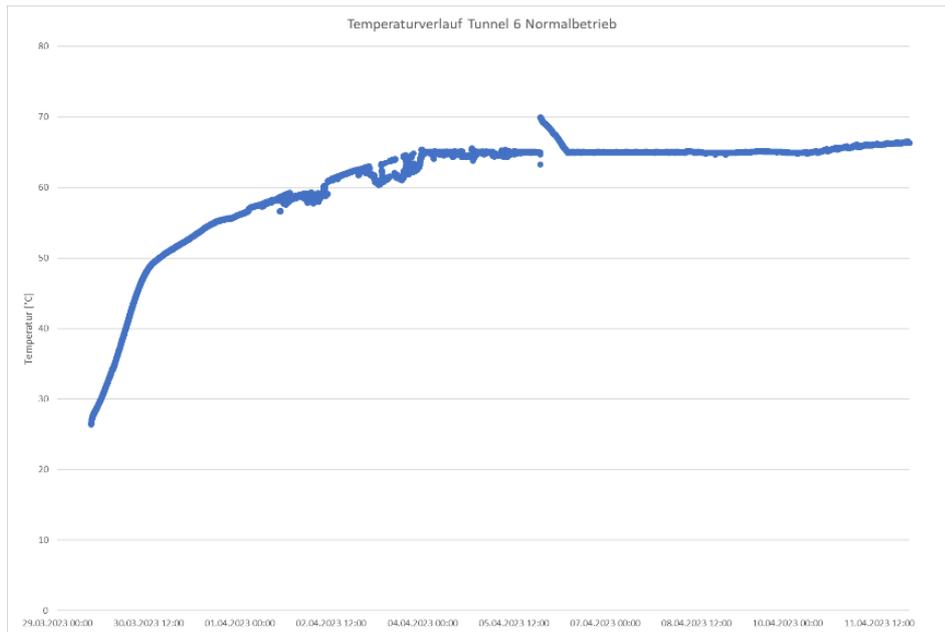


Abbildung 6-16: Temperaturverlauf des Rottetunnel 6 -Normalbetrieb

Beim Vergleich der beiden Verläufe fällt auf, dass die Maximaltemperatur des Rottetunnels 6 im Schnitt 5 °C größer ist und der Temperaturverlauf auch sehr viel gleichmäßiger ist. Diese beiden Tatsachen weisen auf einen negativen Einfluss des Fahrplanbetriebes hin, damit auf einen gestörten Biomasseabbau.

6.2.2 Auswirkungen auf die Kompostqualität

6.2.2.1 Anlage A

In Tunnel 5, in dessen Belüftungssystem eingegriffen wurde, befand sich beim Austrag relativ feuchtes, dunkles Material. Nach einer ersten Einschätzung des Personals war der Output von mittlerer bis schlechter Qualität. Das Gewicht des Tunnelinputs hatte sich in 1 Rotteweche um 40 Mg auf 145 Mg reduziert. In Tunnel 6 war das Material nach der Rotte augenscheinlich trockener, heller und verpilzt. (die Verpilzung ist wichtig und als positiv zu bewerten, da hier der gewünschte aerobe Abbau erfolgt). Der Output entsprach laut Personal der gewohnten, guten Qualität. Das Gewicht hatte sich um 75 Mg auf 112 Mg reduziert. Der höhere Abbaugrad spricht ebenfalls dafür, dass durch das Eingreifen in die Steuerung der Prozess gestört wurde.

Die eingetragenen Mengen in Phase 2 lagen wieder bei ca. 185 Mg und auch der Austrag nach 1 Woche war mengenmäßig vergleichbar zu Phase 1. Optisch wurden beide Tunnel ebenfalls wieder ähnlich beurteilt, d.h. feuchtes, klebriges, dunkles Material aus Tunnel 5 und trockenes, helles, verpilztes Material aus Tunnel 6. Auffällig war, dass sich trotz der unterschiedlichen Inputqualitäten auf Grund der Rückmischung von Rotteoutput aus Phase 1, Tunnel 5 zwar schlechtes Material geliefert hat, aber besseres Material als erwartet.

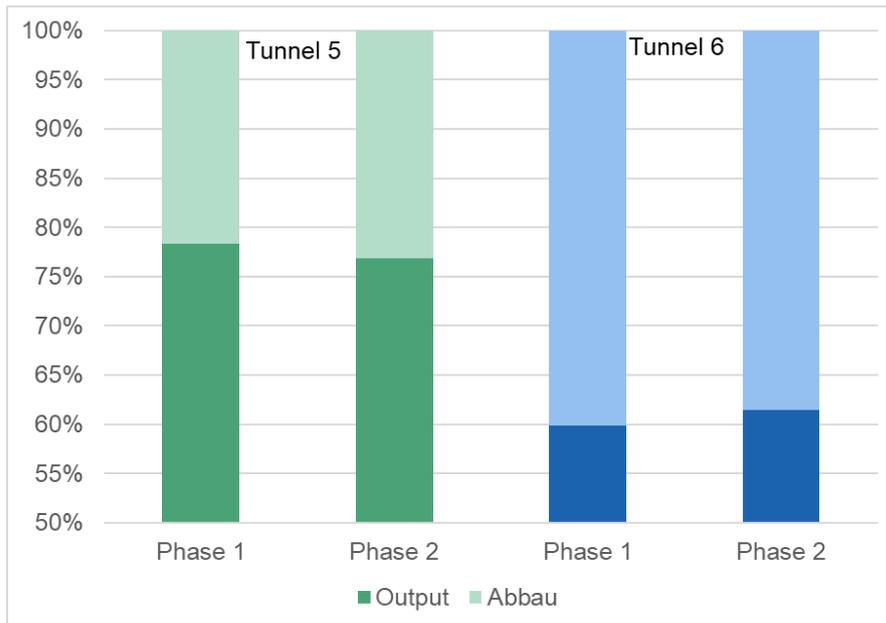


Abbildung 6-17: Abbau in Rottetunneln

Deutlich zu sehen ist der unterschiedliche Abbau in den Tunneln, mit deutlich vermindertem Abbau in Tunnel 5, bei dem in das Belüftungssystem eingegriffen wurde. Der prozentuale Unterschied zwischen den beiden Phasen ist vernachlässigbar. Ohne Eingriffe in der Steuerung der Lüfter, wird mehr Material abgebaut.

Die durch das Labor ermittelten Werte für den Anteil der Trockensubstanz, der organischen Trockensubstanz und der Atmungsaktivität (AT_4) der Proben spiegeln den Abbau und die Einschätzung des Betriebspersonals nur in sehr begrenztem Umfang wider.

Tabelle 6-1: Analysedaten Anlage A

| | | Phase 1 | | | | Phase 2 | | | |
|-----|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | Tunnel 5 | Tunnel 5 | Tunnel 6 | Tunnel 6 | Tunnel 5 | Tunnel 5 | Tunnel 6 | Tunnel 6 |
| TS | % FM | 53,90% | 62,30% | 59,60% | 63,80% | 55,20% | 58,60% | 64,40% | 64,60% |
| oTS | % TM | 49,90% | 53,10% | 55,40% | 52,80% | 54,50% | 49,80% | 56,90% | 58,60% |
| | % FM | 26,90% | 33,08% | 33,02% | 33,69% | 30,08% | 29,18% | 36,64% | 37,86% |
| AT4 | mg O2/g TM | 33,6 | 29,5 | 36,1 | 35,5 | 28 | 30,7 | 35,8 | 34,2 |

Auch wenn der TS-Gehalt in die gleiche Richtung tendiert wie der Erwartungswert, weisen oTS und AT_4 in die entgegengesetzte Richtung. Hier kann es möglich sein, dass trotz Durchmischung der Inputmaterialien die eingesetzten Materialien unterschiedlicher waren als angenommen. Des Weiteren handelt es sich bei Abfall um einen sehr heterogenen Stoff, so dass eine größere Anzahl von Proben für ggf. durchzuführende Nachfolgeversuche empfohlen werden. Der Probenumfang sollte zudem auch auf die Inputströme erweitert werden.

6.2.2.2 Anlage B

Nach 10 Tagen meldete die Steuerung der Rotte, dass Tunnel 6, bei dem nicht in das Belüftungsprogramm eingegriffen wurde, fertig sei. Zu diesem Zeitpunkt befand sich Tunnel 5 noch in der vorletzten Stufe der Hygienisierung. Der negative Einfluss des Eingriffs in die Rottetechnik auf den Prozess ist demnach auch hier zu beobachten.

Das Material aus Tunnel 5 sah tendenziell etwas feuchter und weniger verpilzt aus (siehe [Abbildung 6-18: Öffnung der Tunnel nach dem Versuchsdurchlauf \(Tunnel 5 rechts, Tunnel 6](#)

links) und **Abbildung 6-19: Entnommenes Material aus Tunnel 5 zur Probenvorbereitung**) Ein deutlicher Unterschied konnte nicht ausgemacht werden. Da der Radlader nicht mit einer Wiegezeile ausgerüstet war, konnte das Gewicht vor und nach dem Rottevorgang nicht bestimmt werden. Ein relevanter Unterschied im Volumen konnte nicht ausgemacht werden.



Abbildung 6-18: Öffnung der Tunnel nach dem Versuchsdurchlauf (Tunnel 5 rechts, Tunnel 6 links)



Abbildung 6-19: Entnommenes Material aus Tunnel 5 zur Probenvorbereitung



Abbildung 6-20: Entnommenes Material aus Tunnel 6 zur Probenvorbereitung

Die Analysewerte entsprechen auch hier nicht der Beurteilung durch das Personal bzw. den Erwartungswerten, wenn die Informationen aus der Steuerung berücksichtigt werden. Die Werte der zwei Teilproben aus dem jeweils gleichen Tunnel differieren zum Teil deutlich. Die Anzahl der Proben sollte bei weiteren Versuchen vergrößert werden und ebenfalls das Inputmaterial mit einbeziehen.

Tabelle 6-2: Analysedaten Anlage B

| | | Phase 1 | | | |
|-----|-------------------------|----------|----------|----------|----------|
| | | Tunnel 5 | Tunnel 5 | Tunnel 6 | Tunnel 6 |
| TS | % FM | 38,80% | 38,30% | 37,40% | 38,00% |
| oTS | % TM | 64,40% | 60,10% | 66,30% | 60,60% |
| | % FM | 24,99% | 23,02% | 24,80% | 23,03% |
| AT4 | mg O ₂ /g TM | 67,8 | 72,2 | 84,7 | 62 |

6.2.3 Fazit

Die Temperaturverläufe der Versuche lassen erkennen, dass die Eingriffe in die Belüftungssteuerung einen Einfluss auf den Biomasseabbau haben. Gut erkennbar an der geringeren Temperatur und an den ungleichmäßigeren Verlauf der Temperatur.

Die Parameter, die sich auf das gesamte Haufwerk beziehen wie der Masseabbau in Anlage B oder die kontinuierlich als Basis für die Rottesteuerung in Anlage A genutzt werden, zeigen klar, dass es einen negativen Einfluss auf das Ergebnis gibt, wenn die Belüftung manipuliert wird.

Es wird empfohlen, in weiteren Versuchen die Eingriffe weiter zu variieren, um Unterschiede bei zu hohen oder zu niedrigen Volumenströmen der Rottezuluft bezogen auf unterschiedliche Phasen der Rotte besser beurteilen zu können. Gegebenenfalls gibt es unempfindlichere Phasen, in denen ein Eingriff von außen tolerierbar ist. Bei dem aktuellen Versuch wurde zum Beispiel keine Rücksicht auf Hygienisierungsphasen oder den Rottestart genommen.

Es hat sich gezeigt, dass die geringe Anzahl an Proben zu eher widersprüchlichen Ergebnissen geführt hat. Hier sollte für zukünftige Versuche geprüft werden, ob andere Messungen oder eine Erhöhung der Probenanzahl möglich sind. Eventuell sind auch zu nächst standardisierte Laborversuche notwendig.

Aufgrund der geringen Anzahl der Versuche wurde auf eine Auswertung der Energiekosten verzichtet. Hierzu wäre es notwendig auch hinsichtlich des Rotteergebnisses gesicherte Profile zu kennen, deren Marktwert dann beurteilt werden könnte.

7 Ermittlung des möglichen Beitrags der Rottebelüftungstechnik zur Integration der fluktuierenden EE (AP 4)

In technischer bzw. energiewirtschaftlicher Hinsicht führt die Flexibilisierung und Steuerung von Lasten (hier: Rottebelüftung) zu einer verbesserten Netzauslastung, sodass vermehrt EE integriert werden können. Das wiederum reduziert aus ökonomischer Sicht volkswirtschaftliche Kosten bzw. mindert die CO₂-Vermeidungskosten (z. B. durch die vermiedene Abregelung von fEE). Zur Einschätzung des marktbedingten Einflusses flexibler Lasten auf das Energiesystem steht am Fraunhofer IEE das Werkzeug einer Kraftwerkseinsatzplanung zur Verfügung, welches für diese Aufgabe genutzt werden kann. Ziel dabei ist es, die technischen, ökonomischen und ökologischen Auswirkungen der Flexibilisierung von (industriellen) Lasten im Energiesystem am Beispiel der Rottebelüftungstechnik sichtbar zu machen. Hierzu müssen bestehende Simulationsmodelle angepasst bzw. erweitert werden, um die mögliche Flexibilität der Rottebelüftungsanlagen geeignet im Modell zu integrieren. Relevant ist dabei vor allem die Leistung, die flexibel gesteuert werden kann, sowie die Randbedingungen innerhalb derer die Flexibilitätsnutzung möglich ist. Voraussichtlich kann hierzu ein bestehendes Modul für die Abbildung von Demand- Side-Management-Prozessen verwendet werden. Hinsichtlich der ökologischen Bewertung können ebenfalls die möglichen Treibhausgasreduzierungs-potentiale im Rahmen der Darstellung der volkswirtschaftlichen Effekte der Bioenergiebereitstellung dargestellt werden.

Weitere Änderungen hinsichtlich des Ausstoßes der Treibhausgase und Humuseffekte können sich durch die ggf. veränderte Qualität des Gärrests nach der Intensivrotte und bei anschließender Kompostierung ergeben, welche auf Basis der Versuchsergebnisse in AP 3 abgeschätzt werden sollen.

Die Analyse der technischen, ökonomischen und ökologischen Auswirkungen einer flexiblen Betriebsweise von Rottelüftern im Energiesystem wurde mithilfe des Kraftwerkseinsatzmodells „SCOPE Electricity Market“ (SCOPE-EM) quantifiziert. Im Folgenden wird zunächst ein Überblick über die angewandte Methodik (Modellbeschreibung und Erläuterung der getroffenen Annahmen) gegeben, bevor detailliert auf die Ergebnisse eingegangen wird.

7.1 Überblick über die Methodik

Um die Auswirkungen der Flexibilität der Rottelüfter im Energiesystem zu bestimmen, wird eine Analyse für das zukünftige Jahr 2025 durchgeführt. In Abschnitt 7.1.1 wird zunächst das eingesetzte Modell beschrieben sowie im Abschnitt 7.1.2 näher auf die erwarteten Rahmenbedingungen des Energiesystems im Jahr 2025 eingegangen. Anschließend werden im Abschnitt 7.1.3 die Annahmen für die Flexibilität der Rottelüfter erläutert.

7.1.1 Modellbeschreibung Strommarktmodell SCOPE-EM

Das Modell SCOPE-EM ist ein modular aufgebautes Kraftwerkseinsatzmodell zur Erstellung und Analyse von länder- und sektorübergreifenden Energieszenarien, welches den

grenzkostenminimalen Einsatz aller darin abgebildeten Energieanlagen bei gleichzeitiger Deckung von Nachfrageprofilen aus den Sektoren Strom, Wärme und Verkehr bestimmen kann.

SCOPE-EM setzt den Kraftwerkspark als gegeben voraus, ein Zubau weiterer Anlagen ist nicht vorgesehen. Ziel des Modells ist es, die variablen Erzeugungs- und Verbrauchskosten aller Technologien zu minimieren. Berücksichtigt werden hierbei sowohl Anfahrkosten der Kraftwerke als auch Brennstoffkosten oder Kosten für eventuell anfallende CO₂-Emissionen, ebenso wie Wartungs- und Betriebskosten. Eine Übersicht über Input- und Output-Daten sowie die im Modell abgebildeten Märkte und Technologien kann Abbildung 7-1: Das Modell SCOPE-EM (Quelle: Eigene Darstellung) **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** entnommen werden.

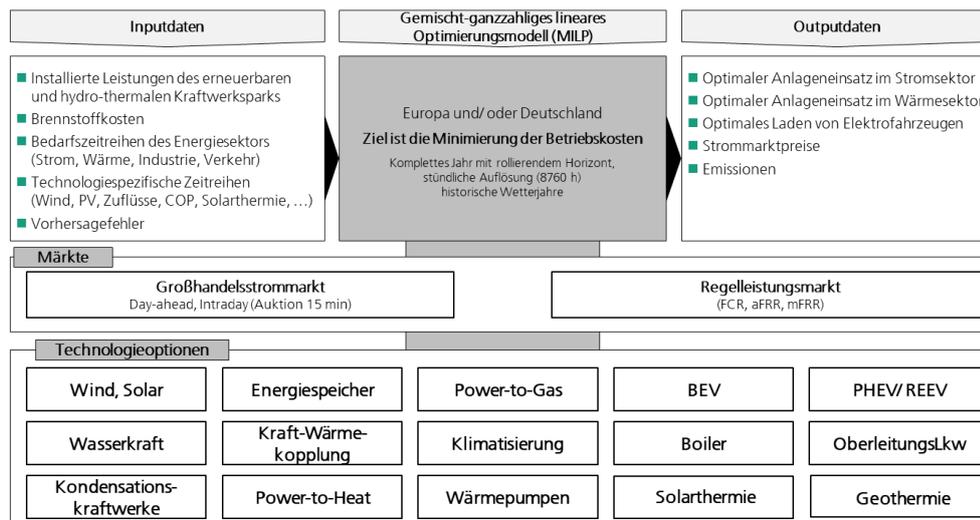


Abbildung 7-1: Das Modell SCOPE-EM (Quelle: Eigene Darstellung)

In SCOPE-EM wird der Stromimport bzw. -export über Grenzkuppelstellen zwischen verschiedenen Ländern abgebildet, wobei jeweils Net Transfer Capacities modelliert werden, jedoch kein Flow Based Market Coupling. Die in dieser Studie verwendeten Kapazitäten der einzelnen Kuppelstellen basieren auf eigenen Recherchen des Fraunhofer IEE.

Im Modell werden zeitlich und räumlich hochaufgelöste Zeitreihen für Wärmebedarfe (unterteilt nach Raumwärme und Trinkwarmwasser) und Kühlbedarfe für Europa eingesetzt. Dabei wird zwischen Anwendungen in Haushalten, im Gewerbe/Handel/Dienstleistungssektor sowie im Industriebereich differenziert. Als Grundlage für die Aufteilung der Bedarfe in den einzelnen Sektoren in Europa dient die Odyssee-Datenbank (Enerdata 2022).

Zur Bestimmung des zeitlichen Verlaufs des Strombedarfs für E-Mobilität sind Ladeprofile von E-Pkw notwendig, die in aggregierter Form repräsentativ für ganz Deutschland sind. Um ein repräsentatives Gesamtbild für den nationalen (oder bundeslandspezifischen) Verkehr zu erhalten, wird zwischen Mobilitätsgruppen differenziert. Kriterium für die Differenzierung sind der Raumtyp (städtisch, vorstädtisch, ländlich), das Haushaltseinkommen und der Haushaltstyp. Für jede Mobilitätsgruppe werden Daten stochastisch ausgewertet und somit Fahr- und Ladeprofile in zeitlicher Auflösung von einer Stunde erzeugt, die angeben, wieviel Strom im Jahresverlauf von einem Fahrzeug verbraucht wird. Die einzelnen Fahrprofile werden dann in dem für Deutschland repräsentativen Verhältnis zwischen den Mobilitätsgruppen aggregiert und skaliert. Als Datengrundlage dienen der Ergebnisbericht „Mobilität in Deutschland 2017“ (infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH 2019) zur Erstellung 15-minütiger Fahrprofile für den Personenverkehr aus den stichtagsbezogenen Umfragen sowie die automatische Zählstellen auf Autobahnen und Bundesstraßen aus dem Jahr 2017 (Bundesanstalt für Straßenwesen 2017).

SCOPE-EM verwendet eine gemischt-ganzzahlige lineare Formulierung. Dies bedeutet zunächst, dass beispielsweise die Wirkleistung und der Brennstoffverbrauch der einzelnen Kraftwerke zunächst durch lineare Funktionen modelliert werden müssen, wodurch sie kontinuierliche Werte zwischen ihren vorgegebenen Unter- und Obergrenzen annehmen können (Jentsch 2014). Eine Erweiterung hin zu einem gemischt-ganzzahligen Optimierungsproblem entsteht dann durch die Implementierung binärer Variablen. Das heißt, dass z. B. die An-Aus-Zustandsvariablen von konventionellen Kraftwerken nur die Werte 0 oder 1 annehmen können (Oehsen 2012).

Jegliche Eingangszeitreihen haben eine zeitliche Auflösung von einer Stunde, wodurch automatisch auch alle technischen Eigenschaften in Schritten von einer Stunde abgebildet werden. Der gesamte Betrachtungszeitraum erstreckt sich in der Regel über ein Jahr, also zumeist über 8.760 Stunden. SCOPE-EM macht sich das Prinzip der rollierenden Planung zu Nutze. Der Einsatz der Technologien wird also fortlaufend neu berechnet und ermöglicht so die Berücksichtigung von Unsicherheiten durch schrittweise aktualisierte Prognosedaten.

Während Kraftwerkseinsatzmodelle grundsätzlich mit einem kurzen Optimierungshorizont von wenigen Tagen arbeiten, wird der Einsatz von großen Speicherwasserkraftwerken zumeist über einen längeren Horizont von einem Jahr gerechnet. Um also Schranken für den Einsatz der Wasserkraftanlagen in der eigentlichen Rechnung ableiten zu können, muss bei der Berücksichtigung von Wasserkraftwerken in SCOPE-EM zunächst eine vorgelagerte, vereinfachte Optimierung des Kraftwerkseinsatzes über ein ganzes Jahr durchgeführt werden.

Eine ausführliche Darstellung der Gleichungen und Restriktionen im Modell findet sich in (Böttger et al. 2019). Ein Vergleich von SCOPE-EM mit anderen numerischen Modellen des Energiesektors unter Anwendung angepasster Eingangsparameter kann in (Ruhnau et al. 2022), (Bucksteeg et al. 2022) und (Pöstges et al. 2022) nachgelesen werden. Die Umsetzung des Modells erfolgt in der matrixbasierten Anwendung „MATLAB“ der Firma MathWorks®. Das Lösen der Optimierungsaufgabe erfolgt mittels des Solvers „Gurobi“¹®.

7.1.2 Getroffene Annahmen für die Analyse mit Fokus auf das Energiesystem

Die Kapazitäten der Erneuerbaren Energien in dieser Studie basieren auf dem „Trend-Szenario“ der Mittelfristprognose 2022-2026 (Netztransparenz.de 2021). Sie wurden gewählt, um sowohl den geltenden politischen Zielen als auch planerischen Unwägbarkeiten Rechnung zu tragen. Sie belaufen sich daher auf 54.877 MW Photovoltaik auf Dachflächen und 34.267 MW Photovoltaik auf Freiflächen. Bei Windenergie onshore werden 61.844 MW und bei Windenergie offshore werden 10.891 MW angenommen (s. Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.).

Tabelle 7-1: Installierte Leistungen der erneuerbaren Energien in MW (Quelle: (Netztransparenz.de 2021; Umweltbundesamt und Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien 2022)

| Technologie/Jahr | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2025 |
|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------|
| Photovoltaik | 40.679 | 42.293 | 45.158 | 49.047 | 53.721 | 58.278 | 89.144 |
| Windenergie onshore | 45.283 | 50.174 | 52.328 | 53.193 | 54.414 | 56.091 | 61.884 |
| Windenergie offshore | 4.152 | 5.406 | 6.393 | 7.528 | 7.774 | 7.774 | 10.891 |

¹ www.gurobi.com

| | | | | | | | |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------|
| Windenergie | 49.435 | 55.580 | 58.721 | 60.721 | 62.188 | 63.865 | 72.775 |
| gesamt | | | | | | | |

Die stündliche Einspeisung von Windenergie und Photovoltaik wird mit detaillierten physikalischen Modellen abgebildet, die neben der Windgeschwindigkeit bzw. solaren Einstrahlung z. B. auch Abschattungseffekte oder die Außentemperatur berücksichtigen. Detailliertere Informationen zur Berechnung der Einspeisezeitreihen von Windenergie und Photovoltaik finden sich in (Böttger et al. 2019).

Die konventionellen Kraftwerkskapazitäten in Deutschland im Szenariojahr 2025 basieren in erster Linie auf der Kraftwerksliste der Bundesnetzagentur (Bundesnetzagentur 2021b). Hierbei wurden zunächst Bestandskraftwerke berücksichtigt und zudem geplante Zubau-Anlagen mit in die Modellierung einbezogen. Anlagen, die gemäß (Wikipedia 2022) und interner Recherchen des Bundesverbandes der Energie- und Wasserwirtschaft bis zum Jahr 2025 stillgelegt sein werden, wurden aus der Modellierung herausgenommen. Zudem wurde darauf geachtet, dass die Ausstiegspfade von Braunkohle und Steinkohle (basierend auf (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft 2021)) bis 2025 eingehalten werden. In Summe ergeben sich insgesamt 14,7 GW Braunkohle-, 7,7 GW Steinkohle-, 27,9 GW Erdgas- und 0,6 GW Heizölkapazitäten, in Summe also 50,9 GW in Deutschland.

Der für das Jahr 2025 von der Bundesnetzagentur prognostizierte Bedarf an Netzreserveanlagen mit einer Leistung von ca. 8 GW in Deutschland (Bundesnetzagentur 2021a) bleibt in der Marktanalyse mit dem Modell SCOPE-EM unberücksichtigt, da diese Anlagen nicht am Strommarkt teilnehmen. Gleiches gilt für die 1,2 GW Netzstabilitätsanlagen (Hasler und Djordjevic 2020).

Die konventionellen Kraftwerkskapazitäten im europäischen Ausland werden gemäß dem ERAA 2021 der ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators 2021) angepasst. Die Kernenergiekapazitäten im europäischen Ausland hingegen basieren auf der PLATTS-Kraftwerksliste (PLATTS 2022) in Kombination mit eigenen Annahmen zu den Lebensdauern der Kraftwerke sowie auf eigenen Recherchen zu den politischen Beschlüssen zu Kraftwerksstilllegung und Neubau in Europa.

Die Stromnachfrage der herkömmlichen Stromverbraucher basiert auf historischen Zeitreihen des Strombedarfs, der durch die ENTSO-E veröffentlicht wird (European Network of Transmission System Operators 2022). Diese Zeitreihen werden dann auf den herkömmlichen Stromverbrauch des entsprechenden Szenariojahres linear skaliert. Für das Szenariojahr 2025 wird ein herkömmlicher Stromverbrauch von 512,6 TWh gemäß der „Mittelfristprognose 2022-2026“ (Netztransparenz.de 2021) abzüglich 19,4 TWh für den endogen abgebildeten Stromverbrauch der Elektromobilität angenommen. Zusätzlich wird von Netzverlusten in Höhe von 23,8 TWh (Agora Energiewende 2021) ausgegangen.

Die Bedarfe der endogen modellierten weiteren Stromverbraucher aus Sektorkopplungsanwendungen kommen mit ihren eigenen Zeitreihen noch dazu. Diese umfassen einerseits den Stromverbrauch aus dem Wärme-/Kältesektor (Elektrokessel, Wärmepumpen, Klimatisierung) und andererseits den Stromverbrauch von Elektrofahrzeugen. Im Rahmen dieser Studie wird der Stromverbrauch der endogen abgebildeten Elektromobilität auf insgesamt 19,4 TWh gemäß den Angaben aus dem Bericht „Klimaneutrales Deutschland 2045“ der Agora Energiewende (Agora Energiewende 2021) festgelegt (dies entspricht den dort genannten 31,1 TWh für „Verkehr“ abzüglich 11,7 TWh für Bahnstrom, welcher hier im herkömmlichen Stromverbrauch mit abgedeckt ist).

Gemäß Annahmen aus dem „Projektionsbericht 2021 für Deutschland“ (Repenning et al. 2021) werden 2,6 TWh Kokereigas, 6,3 TWh Gichtgas, 0,8 TWh Raffineriegas, 1,6 TWh sonstige Gase sowie 42,4 TWh Biomasse, 5,8 TWh Abfall und 0,3 TWh Geothermie als festgesetzte Nettostromerzeugung noch vor der Lösung des Optimierungsproblems von dem zu deckenden Strombedarf abgezogen. Das selbe Vorgehen wird zudem einerseits für eine Energiemenge von 8,4 TWh aus Blockheizkraftwerken mit weniger als 1 MW Leistung, welche als historischer Wert aus dem Bericht „Evaluierung der Kraft-Wärme-Kopplung“ (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

2019) entnommen sind, und andererseits für eine Energiemenge von 6,25 TWh aus Kraftwerken, die in der Kraftwerksliste der Bundesnetzagentur (Bundesnetzagentur 2021b) keine BNetzA-Nr. aufweisen, angewendet.

Gemäß dem Bericht „Net Zero by 2050“ der International Energy Agency (International Energy Agency 2021) wird ein CO₂-Preis von 67 EUR/t gewählt. Bei den Brennstoffpreisen werden 7,80 EUR/MWh Steinkohle gemäß der Studie „Klimaneutrales Deutschland 2045“ der Agora Energiewende (Agora Energiewende 2021) angesetzt. Braunkohle hat in dieser Studie Kosten von 1,50 EUR/MWh, Erdgas von 47,30 EUR/MWh und Heizöl von 59,00 EUR/MWh (leicht) bzw. 37,00 EUR/MWh (schwer).

7.1.3 Getroffene Annahmen für die Analyse mit Fokus auf die Flexibilität der Rottelüfter

Die Untersuchung der Flexibilität der Rottelüfter erfolgt nur für den Einsatz am Spotmarkt (Day-ahead), wobei das Modell mit einer stündlichen Auflösung rechnet. Der potentielle Einsatz am Regelreservemarkt und/oder Intraday-Markt wird nicht quantifiziert. Aus dem vorhandenen Anlagenbestand in Höhe von 137 MW (berechnet aus (Kern und Raussen 2021)) wurde abgeschätzt, dass etwa 20 % auf die Rottelüfter entfallen, was 27,4 MW entspricht. Diese Zahl enthält auch schon den Stromverbrauch des Biofilters. Unter der Annahme, dass der Biofilter etwa 25 % der Leistung in den vorliegenden Messdaten (hier 45 von 177 kW) ausmacht, so fallen auf die Rottelüfter $0,75 \cdot 27,4 \text{ MW} = 20,55 \text{ MW}$. Damit wird in der folgenden Analyse davon ausgegangen, dass 20,55 MW Rottelüfter potenziell steuerbar sind.

Im Folgenden werden die Auswirkungen der Flexibilität der Rottelüfter ermittelt, indem der Fall ohne Reaktion auf Strommarktsignale (Szenario „Referenz“) dem Fall mit einer Orientierung an Strommarktsignalen (Szenario „Flexibilität“) gegenübergestellt wird. Um die Auswirkungen der Flexibilität im Stromsystem gut isolieren zu können, wird im Szenario „Flexibilität“ der gleiche Stromaußenhandel wie im Szenario „Referenz“ unterstellt und nur noch der Kraftwerkseinsatz in Deutschland optimiert. Auf diese Weise können die Auswirkungen der Flexibilität unabhängig von eventuellen Veränderungen des Stromaußenhandels ausgewertet und besser erklärt werden. Da es sich in dieser Analyse um eine absolut gesehen eher sehr kleine Flexibilität handelt, erscheint dieses Vorgehen geeignet, da ohnehin nur minimale Auswirkungen auf den Außenhandel zu erwarten sind.

Im Szenario „Referenz“ wird angenommen, dass die Anlagen entsprechend der lokalen Anlagensteuerung entsprechend des historischen Einsatzes mit ca. 50 %-iger Auslastung im Jahresmittel betrieben werden. Als Grundlage für diese Fahrweise wurden gemessene Daten einer konkreten Anlage beginnend am 3.7.2016 0 Uhr bis zum 1.7.2017 24 Uhr verwendet. In Abbildung 7-2: Messdaten des Stromverbrauchs von Anlage AAbbildung 7-2 ist der gemessene Stromverbrauch von Biofilter sowie Rottelüftern in Summe dargestellt.

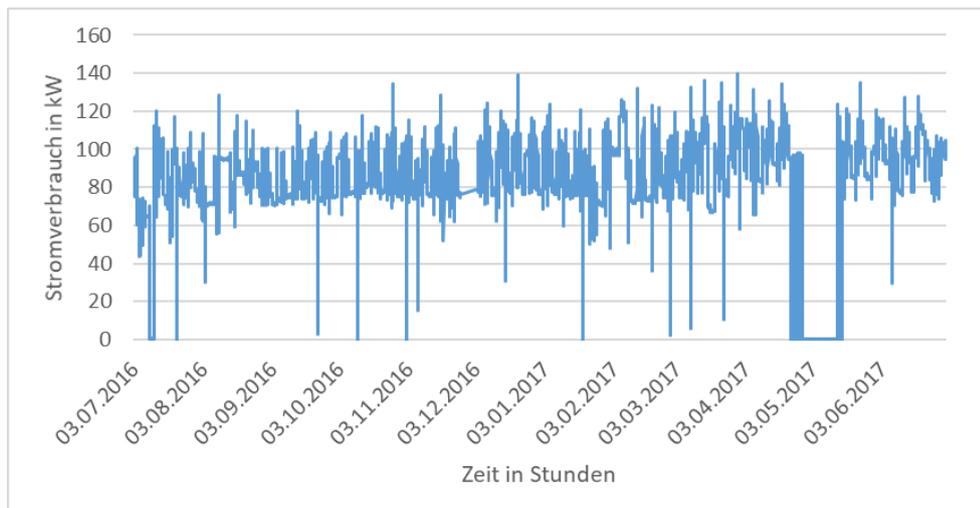


Abbildung 7-2: Messdaten des Stromverbrauchs von Anlage A

Da die quantitative Analyse mit dem Modell SCOPE-EM auf Zeitreihen des historischen Wetterjahres 2012 basiert, musste die Zeitreihe des Stromverbrauchs der Rottelüfter entsprechend angepasst werden. Konkret wurden jeweils die mittleren Stromverbräuche je Stunde, Wochentag und Monat ermittelt und dann für das Wetterjahr 2012 neu ausgerollt. Da in den gemessenen Daten im Mai 2017 eine längere Betriebsunterbrechung enthalten ist, wurden für die modellgestützte Analyse statt der Maiwerte als Näherung die Werte vom April herangezogen. In Abbildung 7-3: Modellierter Stromverbrauchs- sowie Flexibilitätszeitreihe für das Kalenderjahr 2012 (Quelle: Eigene Berechnungen) Abbildung 7-3 ist die Näherung für den Stromverbrauch in blau dargestellt. Man erkennt darin Unterschiede zwischen den Monaten aber auch zwischen den Wochentagen.

Zur Untersuchung der Flexibilität der Rottelüfter wurden Annahmen getroffen, was das Potential für eine Lastabschaltung als auch für eine Lasterhöhung betrifft.

Die maximale Lasterhöhung wurde anhand der Differenz zwischen der installierten Leistung (25,19 MW) und des Stromverbrauchs aus dem Szenario „Referenz“ ermittelt (s. orange Linie in Abbildung 7-3: Modellierter Stromverbrauchs- sowie Flexibilitätszeitreihe für das Kalenderjahr 2012 (Quelle: Eigene Berechnungen) Abbildung 7-3). Dabei wird angenommen, dass die potenzielle Lasterhöhung in einer Stunde keine Auswirkung auf den Betrieb in anderen Stunden hat. Ziel der Lasterhöhung ist dabei, zusätzliche Stromnachfrage zu generieren, wenn Strom aus erneuerbaren Energien ansonsten (marktseitig) abgeregelt werden müsste.

Die potenzielle Lastreduktion ist natürlicherweise durch den Stromverbrauch im Referenzfall limitiert. Weiterhin wird angenommen, dass eine Lastreduktion täglich in bis zu sechs Stunden erfolgen kann (entweder am Stück oder auch gestückelt) und nicht nachgeholt werden muss. Dabei kann die Lastreduktion zwischen 0 und dem Stromverbrauch im Referenzfall variieren und unterliegt damit auch geringen tages- und jahreszeitlichen Schwankungen.

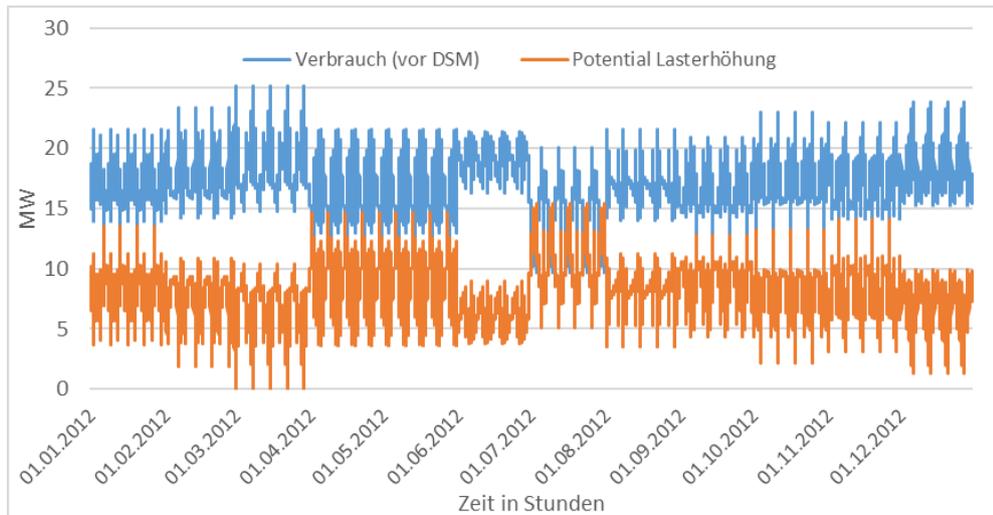


Abbildung 7-3: Modellierter Stromverbrauchs- sowie Flexibilitätszeitreihe für das Kalenderjahr 2012 (Quelle: Eigene Berechnungen)

7.2 Ergebnisse

Um die Auswirkung der Flexibilität der Rottelüfter im Energiesystem bewerten zu können, werden in Abschnitt 7.2.1 zunächst zentrale Kenngrößen für das Szenario „Referenz“ erläutert, bevor in Abschnitt 7.2.2 auf die techno-ökonomischen und ökologischen Auswirkungen im Szenario „Flexibilität“ eingegangen wird.

7.2.1 Überblick über das modellierte Energiesystem im Szenario „Referenz“

Abbildung 7-4: Strombilanz für das Jahr 2025 in Deutschland für das Szenario „Referenz“ (Quelle: Eigene Berechnungen) Abbildung 7-4 zeigt die Strombilanz für das Szenariojahr 2025 für das Referenzszenario. Der Stromverbrauch (517 TWh herkömmlicher Stromverbrauch zzgl. 29 TWh Sektorkopplungsanwendungen) wird annahmegemäß zu etwa 59 % von erneuerbaren Energien gedeckt. Mit knapp 169 TWh hat die Windenergie hierbei den größten Anteil. Konventionelle Kraftwerke decken 35 % ab und die verbleibenden 6 % werden aus dem europäischen Ausland importiert. In diesem Szenario gibt es keine marktbedingte Abregelung von erneuerbaren Energien. Als Stromspeicher zum Ausgleich der fluktuierenden Erzeugung von erneuerbaren Energien werden Batteriespeicher und Pumpspeicher eingesetzt.

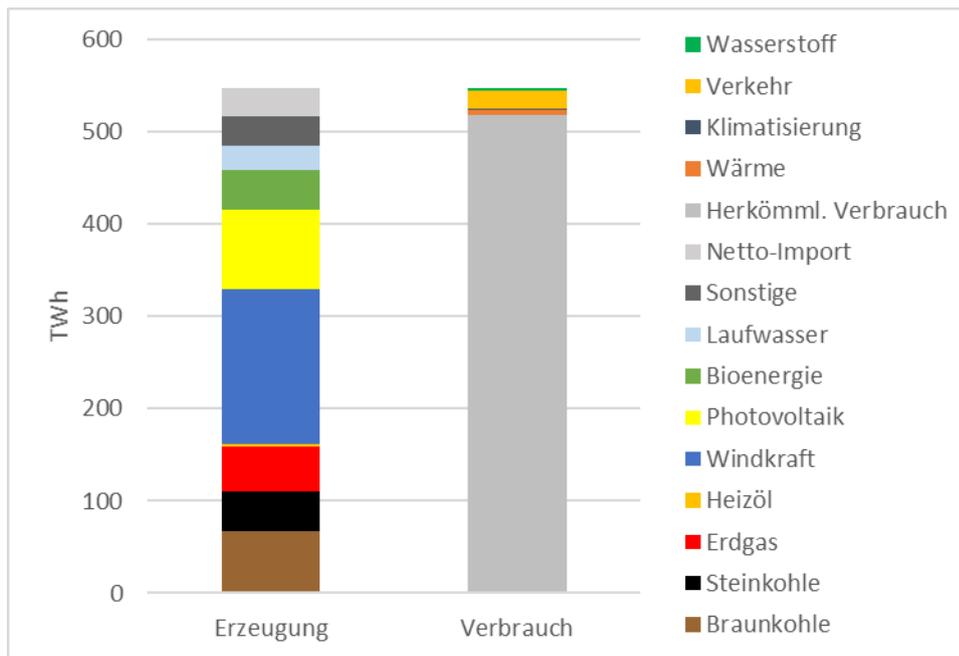


Abbildung 7-4: Strombilanz für das Jahr 2025 in Deutschland für das Szenario „Referenz“ (Quelle: Eigene Berechnungen)

Die Gesamtkosten der Stromerzeugung in Deutschland liegen in diesem Szenario bei 27,43 Mrd. Euro für das gesamte Jahr. Bei der Stromerzeugung entstehen 261,74 Mio. t an CO₂-Emissionen.

Der mittlere Großhandelsstrompreis liegt in diesem Szenario bei 91 EUR/MWh und schwankt zwischen 14,1 und 199,89 EUR/MWh.

7.2.2 Techno-ökonomische und ökologische Auswirkungen im Szenario „Flexibilität“ im Vergleich zum Szenario „Referenz“

Durch den Einsatz der Flexibilität in der Größenordnung von ca. 25 MW sind durch die Größe des deutschen Stromsystems keine extremen Effekte zu erwarten. Trotzdem zeigt die potenzielle Flexibilität der Rottelüfter kleine Auswirkungen im Stromsystem. Abbildung 7-5: Veränderungen in der Strombilanz im Szenario „Flexibilität“ im Vergleich zum Szenario „Referenz“ (Quelle: Eigene Berechnungen) Abbildung 7-5 zeigt die Veränderungen in der Strombilanz zwischen den Szenarien „Referenz“ und „Flexibilität“.

Die Flexibilität der Rottelüfter wirkt sich am stärksten auf die Stromerzeugung von Braunkohlekraftwerken aus. Deren Stromerzeugung sinkt um knapp 316 GWh (das entspricht 0,47 %). Die Erzeugung in Erdgaskraftwerken sinkt ebenfalls, jedoch weniger stark (um 119,4 GWh bzw. 0,25 %). Im Gegenzug steigt die Stromerzeugung von Steinkohle- und Heizölkraftwerken um 177 GWh (0,42 %) bzw. 69 GWh (2,38 %) an. Da durch den Einsatz der Flexibilität der Rottelüfter die Batterie- und Pumpspeicher in geringerem Umfang eingesetzt werden müssen und damit auch deren absolute Speicherverluste abnehmen, muss in Summe weniger Strom erzeugt werden. Außerdem wirkt der Lastabwurf der Rottelüfter ebenfalls senkend auf die notwendige Stromerzeugung. Vom ursprünglichem Stromverbrauch von knapp 150 GWh wird etwa ein Viertel (32,9 GWh bzw. 22,1 %) der Last abgeworfen. Dies entspricht auch annähernd dem vorgegebenen Maximum (es wurde angenommen, dass maximal in 6 Stunden am Tag die Last komplett abgeworfen werden kann).

Die Gesamtkosten der Stromerzeugung in Deutschland liegen in diesem Szenario bei 27,4 Mrd. Euro für das gesamte Jahr. Das sind knapp 29 Mio. Euro bzw. 0,11 % weniger als im Referenzszenario.

Mit 261,39 Mio. t CO₂-Emissionen entstehen 345.500 t bzw. 0,13 % weniger an Treibhausgasen durch die Flexibilität der Rottelüfter.

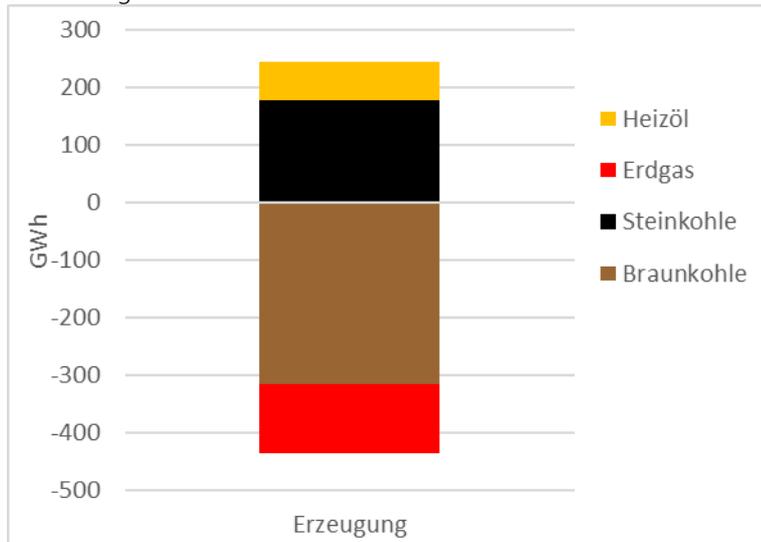


Abbildung 7-5: Veränderungen in der Strombilanz im Szenario „Flexibilität“ im Vergleich zum Szenario „Referenz“ (Quelle: Eigene Berechnungen)

Die Flexibilität der Rottelüfter wirkt sich ebenfalls auf die berechneten Großhandelsstrompreise aus. Diese sinken im Szenario „Flexibilität“ im Jahresmittel um 0,43 EUR/MWh auf 90,57 EUR/MWh (-0,48 %). Die Änderung betrifft vor allem Zeiten mit hohen Strompreisen, wie in Abbildung 7-6: Vergleich der Großhandelsstrompreise zwischen den Szenarien (Quelle: Eigene Berechnungen) Abbildung 7-6 dargestellt ist (zur besseren Sichtbarkeit sind die teuersten 1.000 Stunden noch mal vergrößert gezeigt). In den teuersten 100 Stunden liegen im Szenario „Flexibilität“ die Preise zwar etwas höher, jedoch sinken sie im Bereich der teuersten 550 bis 850 Stunden ab, so dass sich über das ganze Jahr gesehen eine Senkung der Strompreise ergibt.

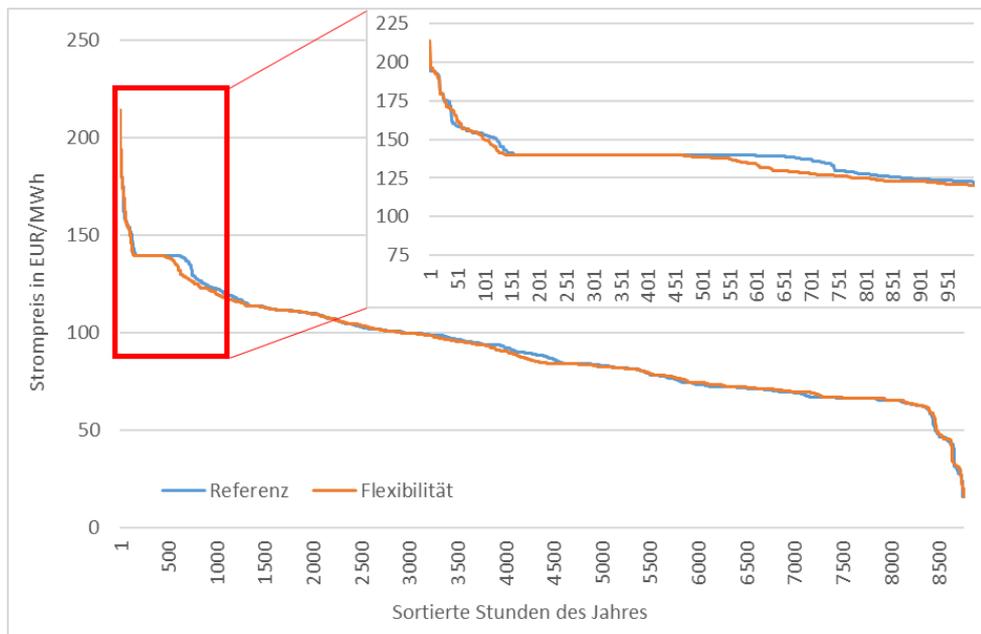


Abbildung 7-6: Vergleich der Großhandelsstrompreise zwischen den Szenarien (Quelle: Eigene Berechnungen)

Der Einsatz der Flexibilität der Rottelüfter wird in Abbildung 7-7: Einsatz der Flexibilität je Wochenstunde (Quelle: Eigene Berechnungen) dargestellt. Es ist darin deutlich erkennbar, dass der Lastabwurf in den Morgen- sowie insbesondere in den Abendstunden am höchsten ist. Das liegt daran, dass dies aufgrund des Verlaufs des herkömmlichen Stromverbrauchs in Deutschland die Zeiten mit der höchsten Stromnachfrage sind. Aus diesem Grund besteht hier das höchste Einsparpotential, wenn flexible Lasten abgeworfen werden können.

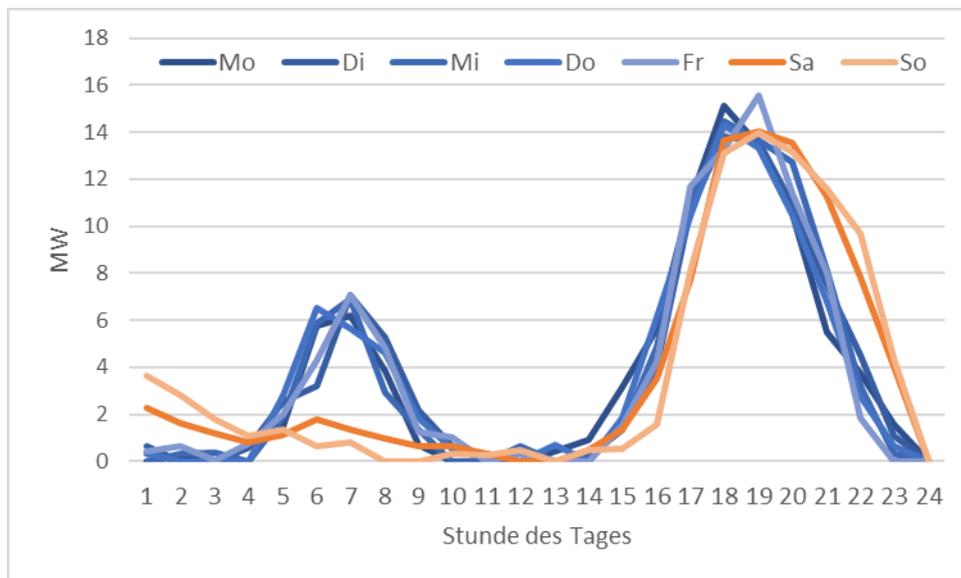


Abbildung 7-7: Einsatz der Flexibilität je Wochenstunde (Quelle: Eigene Berechnungen)

Die Möglichkeit, die Last zusätzlich zu erhöhen, wird in diesem Szenario für den Einsatz am Day-ahead Strommarkt kaum genutzt. Die Last wird lediglich in 5 Stunden des Jahres um maximal 10,2 MW erhöht. Über das ganze Jahr gesehen sind das 51 MWh.

7.2.3 Fazit

Die quantitative Analyse der Auswirkungen der Flexibilität der Rottelüfter auf das Energiesystem hat gezeigt, dass insbesondere der Lastabwurf in Zeiten hoher Stromnachfrage einen positiven Effekt hat. Die Gesamtkosten, die Strompreise und die CO₂-Emissionen sinken leicht ab. Im untersuchten Szenario hatte die Lasterhöhung nur eine geringe Relevanz. Diese kann aber unter Betrachtung lokaler Gegebenheiten am Anlagenstandort z. B. für die Optimierung des Verteilnetzes eine größere Rolle spielen.

8 Analyse der Hemmnisse

Auf der rechtlichen regulatorischen Ebene werden geringe bis keine grundsätzlichen Hemmnisse gesehen. Wichtig ist bei allen Überlegungen, dass insbesondere die Anforderungen der BioAbfV hinsichtlich der Hygienisierung des Kompostmaterials eingehalten werden. Je nach Betrieb der Anlage kann eine Hygienisierung auch schon im Rahmen der vorgeschalteten Vergärung stattfinden und solange kein unhygienisiertes Material zugemischt wird, gäbe es keine zusätzlichen Anforderungen mehr an die Rotte. Dieses Hemmnis trifft somit nicht auf alle Anlagen zu. Ansonsten äußern die Anlagenbetreiber eindeutig, dass sie einen Eingriff in die Belüftungstechnik bis zum Abschluss der Hygienisierung ablehnen.

Weitere wesentliche Funktionen der Rotte sind neben der Hygienisierung der Organikabbau/Mineralisierung und die Wasserverdampfung. Hier muss ebenfalls sichergestellt

werden, dass die Aufgaben in einer gewissen Zeit erfüllt werden, um den Anlagen-durchsatz nicht zu senken. Die Praxisversuche haben gezeigt, dass es hier unter den aufgeführten Rahmenbedingungen zu geringerem Abbau kommt bzw. die Rottezeit sich verlängert.

Ohne Beseitigung der Risiken bzw. Nachteile, die sich in den Praxisversuchen zeigten, ist der Eingriff in die Rottesteuerung nicht empfehlenswert. Für Entscheidungsträger der Abfallwirtschaft ist die Entsorgungssicherheit in der Regel das übergeordnete Ziel, welches durch Eingriffe nicht gefährdet werden darf.

Werden diese Herausforderungen gelöst, ist die Motivation für den Umbau das grundlegende Hemmnis. Auch hier ist davon auszugehen, dass die abfallwirtschaftlichen Ziele deutlich im Vordergrund stehen. Eingriffe in die Lüftungstechnik dürften nur bei erheblichen wirtschaftlichen Anreizen von den Anlagenbetreibern in Betracht gezogen werden.

Auf energiewirtschaftlicher Seite befassen sich die Anlagenbetreiber nach Einschätzung der Autoren derzeit vor allem mit der Stromeigenversorgung aus Photovoltaik und ggf. aus der Verstromung von Biogas.

Ein großes Hemmnis ist auch die geringe Vergütung für die Primärregelleistung und die wenigen Zeiten, in denen diese abgerufen wird. Ebenso die schlechte Qualität des Rohkompostes.

9 Literaturverzeichnis

- 50Hertz Transmission GmbH; Amprion GmbH; TenneT; Transnet BW (Hg.) (2020): Modalitäten für Regelreserveanbieter.
- 50Hertz Transmission GmbH; Amprion GmbH; TenneT TSO GmbH; Transnet BW GmbH (Hg.): IT-Anforderungen. Online verfügbar unter <https://www.regelleistung.net/ext/static/srl/it>, zuletzt geprüft am 10.08.2020.
- Agora Energiewende (2021): Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann. Online verfügbar unter <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/klimaneutrales-deutschland-2045/>.
- Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (Hg.) (2014): BHKW-Kenndaten 2014/2015. Online verfügbar unter www.bhkw-Infozentrum.de, zuletzt geprüft am 03.01.2018.
- Böttger, Diana; Dreher, Alexander; Ganal, Irina; Gauglitz, Philip; Geiger, David; Gerlach, Ann-Kathrin et al. (2019): Systemkontext. Modellbildung für nationale Energieversorgungsstrukturen im europäischen Kontext unter besonderer Berücksichtigung der Zulässigkeit von Vereinfachungen und Aggregationen.
- Bucksteeg, Michael; Wiedmann, Michael; Pöstges, Arne; Haller, Markus; Böttger, Diana; Ruhnau, Oliver; Schmitz, Richard (2022): The transformation of integrated electricity and heat systems - Assessing mid-term policies using a model comparison approach. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112270.
- Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (2020a): Allgemeinverfügung zur Feststellung der technischen Möglichkeit zum Einbau intelligenter Messsysteme. Bonn.
- Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (Hg.) (2020b): Marktanalyse zur Feststellung der technischen Möglichkeit zum Einbau intelligenter Messsysteme nach § 30 MsbG. Version 1.1.1. Bonn. Online verfügbar unter https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/SmartMeter/Marktanalysen/Marktanalyse_nach_Para_30_MsbG_v1_1_1.pdf?__blob=publicationFile&v=11.
- Bundesanstalt für Straßenwesen (2017): Automatische Zählstellen auf Autobahnen und Bundesstraßen. Online verfügbar unter https://www.bast.de/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-verkehrszaehlung/zaehl_node.html.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hg.) (2017): Monitoring der Direktvermarktung von Strom aus Erneuerbaren Energien (Quartalsbericht 06/2017): Vorbereitung und Begleitung bei der Erstellung eines Erfahrungsberichts gemäß § 97 Erneuerbare-Energien-Gesetz., zuletzt geprüft am 02.01.2018.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2019): Evaluierung der Kraft-Wärme-Kopplung. Analysen zur Entwicklung der Kraft-Wärme-Kopplung in einem Energiesystem mit hohem Anteil erneuerbarer Energien. Online verfügbar unter <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/evaluierung-der-kraft-waerme-kopplung.html>.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hg.) (2020): Fahrplan für die weitere Digitalisierung der Energiewende. Online verfügbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/F/fahrplan-fuer-die-weitere-digitalisierung-der-energiewende.pdf?__blob=publicationFile&v=10.

- Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz: Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz). EEG 2017, vom 20.11.2019.
- Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz (24.03.1999): Stromsteuergesetz. StromStG, vom 22.06.2019.
- Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz (25.07.2005): Verordnung über die Entgelte für den Zugang zu Elektrizitätsversorgungsnetzen (Stromnetzentgeltverordnung). StromNEV, vom 23.12.2019.
- Bundesnetzagentur (Hg.) (2017): Veröffentlichung der im Anlagenregister registrierten Daten (07/2017). Abruf am 01.06.2017. Online verfügbar unter www.bundesnetzagentur.de, zuletzt geprüft am 13.09.2017.
- Bundesnetzagentur (13.06.2017): Festlegung von Ausschreibungsbedingungen und Veröffentlichungspflichten für Sekundärregelung. Beschluss BK6-15-158. Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Service-Funktionen/Beschlusskammern/1BK-Geschaeftszeichen-Datenbank/BK6-GZ/2015/2015_0001bis0999/BK6-15-158/BK6-15-158_download_Beschluss_vom_13_06_2017.pdf?__blob=publicationFile&v=3, zuletzt geprüft am 16.05.2018.
- Bundesnetzagentur (Hg.) (2018): Zeitliche Verfügbarkeit von Regelleistung. Online verfügbar unter <https://www.smard.de/blueprint/servlet/page/home/wiki-article/446/384>, zuletzt geprüft am 02.01.2018.
- Bundesnetzagentur (2021a): Feststellung des Bedarfs an Netzreserve für den Winter 2021/2022 sowie das Jahr 2023/2024. Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/Netzreserve/Feststellung_Reservekraftwerksbedarf_2021.pdf?__blob=publicationFile&v=3.
- Bundesnetzagentur (2021b): Kraftwerksliste. Online verfügbar unter <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Versorgungssicherheit/Erzeugungskapazitaeten/Kraftwerksliste/start.html>.
- Bundesnetzagentur (BNetzA) (2020): Was ist die EEG-Umlage und wie funktioniert sie? Online verfügbar unter <https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/FAQs/DE/Sachgebiete/Energie/Verbraucher/Energielexikon/EEGUmlage.html>.
- Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (2021): Folien zum Kohleausstieg.
- Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V. (Hg.) (2012): Regelungen und Übergangsfristen für bestimmte Anforderungen in Ergänzung zur technischen Richtlinie: Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz -Richtlinie für Anschluss und Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz, zuletzt geprüft am 03.01.2018.
- Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V. (BDEW) (Hg.) (2008): Technische Richtlinie: Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz. Richtlinie für Anschluss und Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz. Berlin, zuletzt geprüft am 31.12.2017.
- Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW) (Hg.) (2020): BDEW Strompreisanalyse Januar 2020. Haushalte und Industrie.
- Consentec GmbH (2014): Beschreibung von Regelleistungskonzepten und Regelleistungsmarkt. Studie im Auftrag der deutschen Übertragungsnetzbetreiber. Auftraggeber: 50Hertz Transmission GmbH. Aachen, zuletzt geprüft am 16.05.2018.
- Degenhart, H., Schneider, M., Wachter, D. (2015): Direktvermarktung von Biogasstrom. Hinweise und Empfehlungen für Anlagenbetreiber und Kreditgeber. Hg. v. Leuphana Universität Lüneburg, zuletzt geprüft am 09.10.2015.

- Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (Hg.): Projekt „Demand Side Management in Baden-Württemberg“. Online verfügbar unter <http://www.dsm-bw.de/>, zuletzt geprüft am 10.08.2020.
- Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (Hg.) (2014): dena-Studie Systemdienstleistungen 2030. Sicherheit und Zuverlässigkeit einer Stromversorgung mit hohem Anteil erneuerbarer Energien. Endbericht. Berlin, zuletzt geprüft am 31.12.2017.
- Effenberger, M.; Tappen, S. J.; Aschmann, V. (2016): Energetische Effizienz und Emissionen der Biogasverwertung. Abschlussbericht (FKZ BE/14/14). Hg. v. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), zuletzt geprüft am 03.01.2018.
- Enerdata (2022): ODYSSEE Database. Online verfügbar unter <https://www.indicators.odyssee-mure.eu/energy-efficiency-database.html>.
- Energy Brainpool (2019): Regelenenergiemarkt im Umbruch. Grundprinzipien des Marktes und Preisspitzen. Online verfügbar unter <https://blog.energybrainpool.com/regelenenergiemarkt-im-umbruch-i-grundprinzipien-des-marktes-und-preisspitzen/>.
- EPEX SPOT SE. Online verfügbar unter <https://www.epexspot.com/>, zuletzt geprüft am 05.06.2019.
- European Energy Exchange (EEX) (2020): Zulassung zum Handel und Clearing. Online verfügbar unter <https://www.eex.com/de/zugang/zulassung>.
- European Energy Exchange (EEX) (15.01.2020): EEX Group 2019 Trading Volumes. Major increases across portfolio and timezones confirm position as a Global Commodity Exchange.
- European Network of Transmission System Operators (2021): European Resource Adequacy Assessment. 2021 Edition. Online verfügbar unter <https://www.entsoe.eu/outlooks/eraa/>.
- European Network of Transmission System Operators (2022): Country Data Packages. Online verfügbar unter <https://docstore.entsoe.eu/data/data-portal/country-packages/Pages/default.aspx>.
- EEG 2017, vom 21.07.2014: Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2017). Online verfügbar unter http://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/EEG_2017.pdf, zuletzt geprüft am 20.11.2017.
- EEG 2014: Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2014) Nicht-amtliche Lesefassung des EEG in der ab 1. August 2014 geltenden Fassung., zuletzt geprüft am 21.12.2017.
- EEG 2012, vom 30.06.2011: Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG 2012). Online verfügbar unter <https://www.erneuerbare-energien.de>, zuletzt geprüft am 20.11.2017.
- Hartmut Schmeil (2018): Energieautomation: Spitzenlastbegrenzung und Demand Side Management. In: *building & automation* (51), zuletzt geprüft am 16.05.2018.
- Hasler, Clemens; Djordjevic, Marinela (2020): Netzstabilitätsanlagen in Deutschland. Online verfügbar unter https://www.snenergie.ch/fileadmin/user_upload/Thbl.5_Netzstabilitaetsanlagen.pdf.
- Hoffstede, U.; Stelzer, M.; Holzhammer, U.; Raussen, T.; Lootsma-Hallerberg, Auke (2018): BiKoFlex. Untersuchung der Rolle eines flexibilisierten Strommanagements von Biogutvergärungs- und Kompostierungsanlagen zur Integration der fluktuierenden Erneuerbaren Energien. Schlussbericht. Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik (IEE). Kassel.

- Hoffstede, U. et al. (2016): FlexHKW - Flexibilisierung des Betriebes von Heizkraftwerken. Abschlussbericht (Projektnummer 03KB092A). Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik (IEE); Bioenergie Wächtersbach GmbH; Next Kraftwerke GmbH; Seeger Engineering GmbH, zuletzt geprüft am 03.08.2017.
- Hölder, D. (2017): Werden wir mit Biogas langfristig am Strommarkt Geld verdienen? Biogas Convention Nürnberg, 13.11.2017, zuletzt geprüft am 02.02.2018.
- Holzhammer, U. et al. (2014): Optimale Konzepte für eine steuerbare und bedarfsorientierte Stromerzeugung aus Biogas und Biomethan - OptiKoBi². FKZ 0325326. Hg. v. Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES). Kassel, zuletzt geprüft am 03.01.2018.
- Holzhammer, U. et al. (2017): SymbioSE - Beiträge zur Systemtransformation durch Erbringung von Systemdienstleistungen von biogen betriebenen Stromerzeugungsanlagen. Endbericht, zuletzt geprüft am 03.02.2018.
- infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH (2019): Mobilität in Deutschland 2017. Ergebnisbericht. Online verfügbar unter <http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/publikationen2017.html>.
- International Energy Agency (2021): Net Zero by 2050. A Roadmap for the Global Energy Sector. Online verfügbar unter <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>.
- ISPEX (2020): Abwärtstrend bei Börsenpreisen für Strom und Erdgas. Jetzt die Beschaffungsstrategie wechseln? Online verfügbar unter <https://www.ispex.de/abwaertstrend-bei-boersenpreisen-fuer-strom-und-erdgas-jetzt-die-beschaffungsstrategie-wechseln/>.
- Jentsch, Mareike (2014): Potenziale von Power-to-Gas-Energiespeichern: Modellbasierte Analyse des markt- und netzseitigen Einsatzes im zukünftigen Stromversorgungssystem. Dissertation. Universität Kassel.
- Kalbfuß, Christian (2015): Regelenergiebereitstellung durch Windkraftanlagen im Poolverbund mit Biogas-BHKWs. Online verfügbar unter http://www.100pro-erneuerbare.com/netze/publikationen/2015-10-Kalbfuss/Kalbfuss-Regelenergie_mit_Wind_und_BHKW-MA2015.htm.
- Kehres, B. (2014a): Reform des EEG. In: *H&K aktuell* (08-09/2014), S. 1–3, zuletzt geprüft am 20.11.2017.
- Kehres, B. (2014b): Verpflichtende Bioabfallsammlung - Stichtag: 1. Januar 2015. In: *H&K aktuell* (12/2014), zuletzt geprüft am 20.11.2017.
- Kern, M.; Raussen, T. (2014): Biogas-Atlas 2014/15 - Anlagenhandbuch der Vergärung biogener Abfälle in Deutschland und Europa. 1. Aufl. Witzenhausen: Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH.
- Kern, Michael; Raussen, Thomas (Hg.) (2021): Biogas compendium 2021/22. Manual of European waste-to-biogas plants in Germany and Europe. 1. edition. Witzenhausen: Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH.
- Klobasa, M. et al. (2017): Monitoring der Direktvermarktung von Strom aus Erneuerbaren Energien (Quartalsbericht 09/2017). Vorbereitung und Begleitung bei der Erstellung eines Erfahrungsberichts gemäß § 97 Erneuerbare-Energien-Gesetz. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi).
- Körner, Ina; Stegmann, Rainer; Otterpohl, Ralf (2009): Stickstoffhaushalt bei der Kompostierung. Bilanzen, Gehalte, Umsetzungs- und Austragsprozesse. Habilitation. Technische Universität Hamburg-Harburg.

- Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) (Hg.) (2013): Direktvermarktung von Biogasstrom. Darmstadt (KTBL-Heft 101).
- Moosmayer, V. (2016): Leitlinie des Umweltgutachterausschusses zu den Aufgaben der Umweltgutachter im Bereich der Gesetze für den Vorrang der Erneuerbaren Energien (EEG 2009 und 2012) für Wasserkraft, Biomasse und Geothermie (Aufgabenleitlinie EEG). Hg. v. Umweltgutachterausschuss, zuletzt geprüft am 30.12.2017.
- Netztransparenz.de (2021): Mittelfristprognose 2022-2026. Online verfügbar unter <https://www.netztransparenz.de/EEG/Mittelfristprognosen/Mittelfristprognose-2022-2026>.
- Next Kraftwerke GmbH (Hg.): Doppelhöckerkurve. Online verfügbar unter <https://www.next-kraftwerke.de/energie-blog/praequalifikation-regelenergiemarkt>, zuletzt geprüft am 17.08.2020.
- Next Kraftwerke GmbH (Hg.) (2018): Grafiken. Online verfügbar unter <https://www.next-kraftwerke.de/unternehmen/presse/grafiken>, zuletzt geprüft am 02.02.2018.
- Next Kraftwerke GmbH (2020): Variable Stromtarife für Industrie & Gewerbe. Online verfügbar unter <https://www.next-kraftwerke.de/virtuelles-kraftwerk/stromverbraucher/variabler-stromtarif>.
- Oehsen, Amany von (2012): Entwicklung und Anwendung einer Kraftwerks- und Speichereinsatzoptimierung für die Untersuchung von Energieversorgungsszenarien mit hohem Anteil erneuerbarer Energien in Deutschland. Dissertation. Universität Kassel.
- Öko Institut (2015): Die Entwicklung der EEG-Kosten bis 2035. Studie im Auftrag von Agora Energiewende. Online verfügbar unter www.agora-energiewende.de, zuletzt geprüft am 02.01.2018.
- PLATTS (2022): Kraftwerksliste. Online verfügbar unter <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en>.
- Pöstges, Arne; Bucksteeg, Michael; Ruhnau, Oliver; Böttger, Diana; Haller, Markus; Künle, Eglantine et al. (2022): Phasing out coal - An impact analysis comparing five large-scale electricity market models. In: *Applied Energy*. DOI: 10.1016/j.apenergy.2022.119215.
- Rausen, T., Wagner, J. (2016): EEG 2017 in der abfallwirtschaftlichen Praxis - Chancen für Bio- und Grüngutverwertungsanlagen. In Bio- und Sekundärrohstoffverwertung XII. Hg. v. Wiemer, K., Kern, M., Rausen, T.
- Repenning, Julia; Harthan, Ralph; Blanck, Ruth; Böttcher, Hannes; Braungardt, Sibylle; Bürger, Veit et al. (2021): Projektionsbericht 2021 für Deutschland. Online verfügbar unter <https://www.bmuv.de/download/projektionsbericht-der-bundesregierung-2021>.
- Richard, P. et al. (2012): Ausbau- und Innovationsbedarf der Stromverteilnetze in Deutschland bis 2030 (kurz: dena-Verteilnetzstudie) - Endbericht. Hg. v. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). Berlin, zuletzt geprüft am 15.12.2017.
- Ruhnau, O.; Bucksteeg, M.; Ritter, D.; Schmitz, R.; Böttger, D.; Koch, M. et al. (2022): Why electricity market models yield different results: Carbon pricing in a model-comparison experiment. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111701.
- Stelzer, M., Holzhammer, U. (2014): Marktanalyse: Techniken zur flexiblen Stromspeisung aus Biogasanlagen. Im Auftrag des Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL). Unveröffentlicht., zuletzt geprüft am 26.01.2018.

- Stübs, Marius; Blochberger, Maximilian; Federrath, Hannes; Pein, Raoul Pascal; Kirsch, Edith; Tschapat, Roman (2019): Modellierung von Sicherheitsschichten und -Zonen für eine Sichere IKT-Infrastruktur in Energie-Effizienz-Verbänden. Verteilte Steuerungen im intelligenten Stromnetz sicher und resilient gestalten. Online verfügbar unter https://svs.informatik.uni-hamburg.de/publications/2019/2019-08-19-Modellierung_von_Sicherheitsschichten_und_-Zonen_fuer_eine_Sichere_IKT-Infrastruktur_in_Energie-Effizienz-Verbuenden.pdf.
- Töpfer et al. (2017): Hintergrundpapier: Direktvermarktung von erneuerbaren Energien an der Strombörse. Ein deutsch-französischer Erfahrungsbericht zur Marktintegration von erneuerbaren Energien. Hg. v. Deutsch-französisches Büro für die Energiewende (DFBEW), zuletzt geprüft am 29.12.2017.
- Umweltbundesamt; Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien (2022): Renewable Energies in Germany. Data on the development in 2021. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/uba_hg_erneuerbareenergien_engl.pdf.
- Velvendick, André (2006): Risikosteuerung im Energieversorgungsunternehmen und in der Industrie mit Hilfe von Derivaten und deren Berücksichtigung in der Vertragspraxis.
- Verband der Netzbetreiber - VDN – e.V. beim VDEW (Hg.): Transmission Code 2007 - Netz- und Systemregeln der deutschen Übertragungsnetzbetreiber. Version 1.1, August 2007., zuletzt geprüft am 21.12.2017.
- Verband der Netzbetreiber - VDN – e.V. beim VDEW (Hg.) (2007): DistributionCode 2007. Regeln für den Zugang zu Verteilungsnetzen. Berlin, zuletzt geprüft am 31.12.2017.
- (22.08.2016): Verordnung zu abschaltbaren Lasten (AbLaV). In: *Bundesgesetzblatt Teil I Nr. 41* (41). Online verfügbar unter https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/media/B79A51A1D1AFB070596D997C21299597/bgbl116s1984_10887.pdf, zuletzt geprüft am 09.05.2018.
- Wikipedia (2022): Ausstieg aus der Kohleverstromung in Deutschland. Online verfügbar unter https://de.wikipedia.org/wiki/Ausstieg_aus_der_Kohleverstromung_in_Deutschland.
- Zimmermann, Britta; Breuer, Benedikt (2019): ELGEVOS. Studie zur Elektroenergieversorgung von Gewächshäusern aus einem volatilen Stromnetz mit hohem Anteil erneuerbarer Energien. Hg. v. Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik (IEE). Kassel.