



bifa-Text Nr. 72

Potenziale einer Wasserstoffgewinnung durch Vergasung von Gewerbeabfall

Dr. Wolfram Dietz, Birgit Reinelt, Dr. Nina Thiel, Michael Schönemann,
Matthias Seitz, Prof. Dr. Wolfgang Rommel

Gefördert durch:



Impressum

Alle Rechte (insbesondere das Recht der Vervielfältigung und Verbreitung sowie der Übersetzung) sind vorbehalten. Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Kein Teil der bifa-Texte darf in irgendeiner Form ohne Genehmigung der Herausgeber reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme gespeichert, verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Herausgeber

bifa Umweltinstitut GmbH
Am Mittleren Moos 46
86167 Augsburg

Verfasser

Dr. Wolfram Dietz, Birgit Reinelt, Dr. Nina Thiel, Michael Schönemann,
Matthias Seitz, Prof. Dr. Wolfgang Rommel (bifa Umweltinstitut GmbH)

Gefördert durch das Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV)

In Kooperation mit dem KUMAS – Kompetenzzentrum Umwelt e. V.

Druck

bis500

1. Auflage 2022

© bifa Umweltinstitut GmbH

bifa-Text Nr. 72

Potenziale einer Wasserstoffgewinnung durch Vergasung von Gewerbeabfall

**Dr. Wolfram Dietz, Birgit Reinelt, Dr. Nina Thiel, Michael Schönemann,
Matthias Seitz, Prof. Dr. Wolfgang Rommel**

INHALTSVERZEICHNIS

1	Zusammenfassung	1
2	Ausgangssituation und Zielsetzung	3
3	Verfügbarkeit von Gewerbeabfällen in Bayern und Abfalleigenschaften	4
3.1	Begriffe und Abfallarten	4
3.2	Auswahl von Abfallströmen	5
3.3	Mengenströme in Bayern	5
3.4	Eigenschaften der fokussierten Abfallströme	6
3.5	Abfallarten	8
4	Grundlagen der Vergasung	9
4.1	Vergasungsprozess	9
4.2	Verfahrensschritte	10
4.3	Nebenprodukte und Einbindung am Standort	16
4.4	Stoff- und Energiebilanz	17
5	Vergasung zur Wasserstoffgewinnung aus Gewerbeabfällen	19
5.1	Eignung der Vergasertypen für verschiedene Abfallströme	19
5.2	Vorbehandlung der Abfallströme	19
5.3	Wasserstoffausbeute	19
6	Vergasungsanlagen	21
6.1	Frühere, nicht mehr verfügbare Abfallvergasungsanlagen	21
6.2	Aktuell realisierte Anlagen für Abfall	24
6.3	Vergasungsanlagen für Biomasse und Klärschlamm ohne direkte Verbrennung des Produktgases	34
6.4	Anlagen und Projekte in Entwicklung	40
6.5	Zusammenfassende Bewertung der realisierten Verfahren	41
7	Wirtschaftlichkeit und Treibhausgasemissionen	43
7.1	Wirtschaftliche Bewertung	43
7.2	Ökobilanzielle Bewertung – CO ₂ -Fußabdruck	44

8	Potenziale, Herausforderungen und Kriterien der Vergasung von Gewerbeabfällen zu Wasserstoff	51
8.1	Herausforderungen	51
8.2	Potenziale und Leitlinien	52
8.3	Eignung der Vergasungsverfahren für die ausgewählten Abfallarten	51
9	Passung in die Wirtschaftsstrukturen und Potenzial in Bayern	54
9.1	Passung in die bayerischen Wirtschaftsstrukturen	54
9.2	Mengenpotenziale in Bayern	55
10	Maßnahmen für eine anwendungsspezifische Realisierung	57
10.1	Schritt 1: Wissen	57
10.2	Schritt 2: Diskurs und Lösungssuche	57
10.3	Schritt 3: Förderung von Forschung und Entwicklung	57
10.4	Schritt 4: Unterstützende rechtliche Rahmenbedingungen	58
10.5	Schritt 5: Anstoß unternehmerischer Investitionen	58
	Literatur	59
	Abbildungsverzeichnis	63
	Tabellenverzeichnis	64

1 Zusammenfassung

Gewerbeabfälle, soweit sie nicht einem Recycling zugeführt werden, werden aktuell an Abfallverbrennungsanlagen für Siedlungsabfälle im Rahmen von verbleibenden Verbrennungskapazitäten thermisch behandelt. Möglichkeiten werden gesucht, um diese Gewerbeabfälle auch anderweitig sinnvoll verwerten zu können. Parallel dazu stellt sich eine Herausforderung, die mit der Lösung der Entsorgungsfrage zukunftsorientiert verknüpft werden kann: Auf dem Weg zur Klimaneutralität ist nicht-fossil erzeugter Wasserstoff ein essentieller Energieträger und chemischer Rohstoff. Sein Bedarf in Bayern wird mit 0,5 Mio. t im Jahr 2030 prognostiziert. Erneuerbarer Strom zur Herstellung von Wasserstoff mittels Elektrolyse ist allerdings begrenzt verfügbar. Die thermochemische Herstellung von Wasserstoff eröffnet einen alternativen, zusätzlichen Herstellungspfad. Die vorliegende Studie stellt sich der Aufgabe, diesen Pfad zu prüfen: Sie analysiert die Machbarkeit und das Potenzial einer Erzeugung von Wasserstoff durch Vergasung von Gewerbeabfällen.

Vergasung ist ein thermochemischer Prozess, bei dem ein kohlenstoffhaltiger Einsatzstoff bei Temperaturen zwischen 500 °C und 1200 °C in ein Produktgas übergeführt wird. Die Anfänge der Vergasung liegen in Deutschland im 19. Jahrhundert. Nach dem Reaktordesign werden Festbett, zirkulierende und stationäre Wirbelschicht, Flugstrom wie auch Rost- und Drehrohrvergaser unterschieden. Auch kombinierte Verfahren kommen zum Einsatz. Neben dem zentralen Reaktor bedarf es der Einsatzstoffaufbereitung, einer Gasaufbereitung und der Wasserstoffabtrennung.

Je nach Anlagentechnik werden 40–60 % der im Einsatzstoff enthaltenen Energie in Wasserstoff umgesetzt. Für aufbereitete Abfälle kann von Wasserstoffausbeuten von in etwa 100 kg/t Einsatzstoff ausgegangen werden.

Realisierte Anlagenkonzepte stellen ausgehend von einem Reaktordesign proprietäre Entwicklungen mit individuellen Ausprägungen dar. Solche Realisierungen wurden recherchiert, charakterisiert und bewertet. Auch Neuentwicklungen wurden sondiert. Verfahren, die für Abfälle entwickelt wurden und belastbare industrielle Betriebserfahrung aufweisen, sind insbesondere Ebara Ube, Enerkem, InEnTec/Plagazi, Direct Melting System von Nippon Steel und Sierra Energy. Für Biomasse existieren Carbona BFB von Andritz, DFB, Nexterra, Bioliq vom KIT und Cortus Energy; diese Verfahren können gegebenenfalls auf Abfälle angepasst werden. Ebara Ube hat eine Wasserstoffherstellung zur Ammoniaksynthese großtechnisch realisiert; für andere Verfahren wird angenommen, dass eine Produktgasaufbereitung zu Wasserstoff ergänzt werden kann.

Eine Analyse verfügbarer ökonomischer Angaben zeigt: Eine kommerzielle Tragfähigkeit der Vergasung von Gewerbeabfällen zu Wasserstoff liegt im Bereich des Realistischen. Sie hängt jedoch von individuellen Randbedingungen ab. Starken Einfluss nehmen dabei der Abfall-Annahmeerlös und der Wasserstoff-erlös, aber auch Investitionskosten und die Anlagenverfügbarkeit im Dauerbetrieb.

Der CO₂-Fußabdruck einer Vergasung, die Wasserstoff herstellt, wurde im Vergleich zu einer Abfallverbrennung mit nachgeschalteter Elektrolyse untersucht. Wesentlichen Einfluss auf die Gesamtemissionen nehmen jeweils die Emissionen aus dem C-Gehalt des Abfalls. Aus diesem Grund prägt die Wasserstoffausbeute den Vergleich. Sie ist bei der Vergasung weitaus höher. Wenn Abfälle mit relevanten fossilen C-Anteilen eingesetzt werden, weist Vergasungswasserstoff einen deutlich niedrigeren CO₂-Fußabdruck auf als Wasserstoff aus einer Verbrennung der Abfälle mit nachgeschalteter Elektrolyse.

Wesentliche Herausforderung für eine Umsetzung der Technologie in Bayern ist die noch nicht belegte wirtschaftliche Machbarkeit unter örtlichen Randbedingungen. Auch Rechtsfragen sind zu klären. Geeignet erscheinende Abfallströme sind insbesondere kunststoffreiche Fraktionen und holzreiche Fraktionen. Wichtige Chancen liegen im Klimaschutzpotenzial, insbesondere bei fossilstämmigen Abfällen. Die mittelfristig notwendige Erneuerung bestehender Müllverbrennungsanlagen kann den Neuentwicklungen Raum geben. Insgesamt fehlt dabei noch ein übergreifendes Zukunftsbild, welches technologieoffen für

verschiedene Abfallarten die Rolle der Vergasung in Relation setzt zu Vermeidung, Wiederverwendung, Recycling, chemischem Recycling und etablierter thermischer Abfallbehandlung.

Eine Verknüpfung von Abfallwirtschaft, Vergasungsentwicklern und Unternehmen, die Wasserstoff benötigen, existiert bislang kaum. Kooperationen dieser Akteure können die Realisierung einer Abfallvergasung anstoßen. Aktiv oder unterstützend sind zudem Vergasungsanlagenbauer, potenzielle Anlagenbetreiber sowie Akteure im Bereich Wasserstofftransport gefordert.

Um die Potenziale der Technologie auszuschöpfen und gezielte Realisierungen anzustoßen, wird vorgeschlagen, Vergasungswissen zu fördern und das oben genannte Bild zur Rolle der Abfallvergasung insgesamt wie auch Anwendungsmöglichkeiten im Einzelfall weitergehend zu klären. Forschung und Entwicklung sollten insbesondere im bereits fortgeschrittenen Entwicklungsstand von Demonstrationsanlagen gefördert werden. Eine erfolgreiche Demonstrationsanlage als Referenz wäre eine wertvolle Wegmarke. Wichtig sind zudem ein technologieoffener, klarer Rechtsrahmen, und nicht zuletzt unternehmerische Investitionen in Vergasungsanlagen.

2 Ausgangssituation und Zielsetzung

Die Schließung von Stoffkreisläufen wurde in den letzten Jahren intensiv vorangebracht, das Recycling gefordert und gefördert. Dennoch fallen weiterhin erhebliche Mengen an Abfall an, die aufgrund ihrer Zusammensetzung oder mangels wirtschaftlich abbildbarer Recyclingpfade nicht stofflich, sondern nur energetisch verwertet werden. In Bayern existieren hierfür etablierte Entsorgungssysteme. Es gibt derzeit 14 Anlagen zur thermischen Behandlung von Siedlungsabfällen, die in kommunaler Hand sind. Eine Herausforderung stellen jedoch gemischte Gewerbeabfälle dar: Die kommunalen Verbrennungsanlagen haben in erster Linie die Aufgabe, Siedlungsabfälle zu entsorgen. Gewerbeabfälle werden im Rahmen der verbleibenden Kapazitäten angenommen. Allerdings sind diese verbleibenden Verbrennungskapazitäten nicht abgesichert. Die bayerische Entsorgungswirtschaft sucht Möglichkeiten, um Gewerbeabfälle auch anderweitig verwerten zu können.

Parallel dazu stellt sich eine weitere Herausforderung, die mit der Lösung der Entsorgungsfrage zukunftsorientiert verknüpft werden kann: Deutschland und Bayern befinden sich aktuell in einer wichtigen Phase der Energiewende. Die Klimaziele erfordern die Reduzierung der CO₂-Emissionen bis zum Jahr 2045 auf null. Voraussetzungen sind umgehend zu schaffen, um die Mobilität zu defossilisieren, regenerative Wärmequellen und Abwärme zu nutzen sowie erneuerbare Brennstoffe und Plattformchemikalien für die Industrie bereitzustellen. Die nationale Wasserstoffstrategie (BMWi 2020) ebenso wie die bayerische Wasserstoffstrategie (Bayerische Staatsregierung 2020) stellen hierfür Wasserstoff als unverzichtbaren Energieträger, Energiespeicher und chemischen Rohstoff heraus.

In Studien und Strategiepapieren wird in der Regel davon ausgegangen, dass Wasserstoff mit Strom aus regenerativen Quellen durch Elektrolyse gewonnen wird. Gleichzeitig belegen die Studien, dass Photovoltaik und Windenergie zwar ausgebaut werden müssen, dennoch aber zukünftig ein Stromengpass auftreten wird.

Vor diesem Hintergrund könnte Bayern ergänzend einen weiteren, innovativen Weg verfolgen: Eine zweite potenzielle Erzeugungsrouten für Wasserstoff, der im Augenblick wenig Bedeutung zugemessen wird, ist die thermochemische Umwandlung von natürlichen und synthetischen organischen Materialien. Hierbei wird Wasserstoff freigesetzt. Als Einsatzstoffe für solche Verfahren sind an erster Stelle Neben- und Abfallprodukte ohne oder mit negativem Marktwert in Betracht zu ziehen, die mengenmäßig relevant sind und auch in näherer Zukunft nicht recycelt werden können – so etwa bestimmte Gewerbeabfälle.

Vergasungstechnologien wurden maßgeblich in Deutschland entwickelt. Nachdem bereits in der Mitte des 19. Jahrhunderts verbreitet Kohle vergast wurde, um Stadtgas u.a. für die Beleuchtung zu erzeugen, wurde Ende des 19. Jahrhunderts versucht, auch Abfälle zu vergasen. Ascheprobleme, mangelnde Wirtschaftlichkeit und Explosionen führten zur Einstellung dieser Versuche. Seit den 1970er Jahren wurden erneut thermochemische Verfahren zur Abfallbehandlung entwickelt.

Die Potenziale der thermochemischen Wasserstoffgewinnung aus Abfällen nach heutigem Stand des Wissens und der Technik im konkreten wirtschaftlichen Umfeld Bayerns werden in dieser Studie analysiert. Ziel ist die Beantwortung folgender Fragen:

- > Welche Handlungsoptionen gibt es?
- > Welches technische, wirtschaftliche und realisierbare Potenzial besteht für diese Optionen?
- > Welche Randbedingungen sind für die Realisierung des Potenzials zu schaffen?

3 Verfügbarkeit von Gewerbeabfällen in Bayern und Abfalleigenschaften

3.1 Begriffe und Abfallarten

Gewerbliche Siedlungsabfälle – kurz Gewerbeabfälle genannt – sind Siedlungsabfälle, die aus anderen Herkunftsbereichen als privaten Haushalte entstammen, die jedoch in Zusammensetzung und Beschaffenheit den Abfällen aus privaten Haushalten ähneln und wie diese entsorgt werden können. Dazu gehören gewerbliche und industrielle Abfälle, die in Kapitel 20 der Anlage der Abfallverzeichnisverordnung (AVV) genannt sind, aber auch solche, die dort nicht genannt sind, die aber nach Art, Schadstoff- und Reaktionsverhalten Abfällen aus privaten Haushalten ähneln. Dazu gehören z. B. Kunststoffabfälle und Produktionsabfälle verschiedener Herkunft.

Werden gewerbliche Siedlungsabfälle nicht getrennt gesammelt, sondern als Gemisch, müssen sie einer Vorbehandlungsanlage zugeführt werden. Entfallen kann die Vorbehandlungspflicht aus Gründen der technischen Unmöglichkeit, der wirtschaftlichen Unzumutbarkeit oder bei Erreichung einer Getrennsammelquote von mindestens 90 Massenprozent (§ 4 Abs. 3 GewAbfV). Zudem existiert eine Kleinmengenregelung (§ 5 GewAbfV).

Die Abfallströme und ihre aktuellen Verwertungs- oder Beseitigungspfade sind in Abbildung 1 dargestellt. In Tabelle 1 sind sie kategorisiert und mengenmäßig aufsummiert.

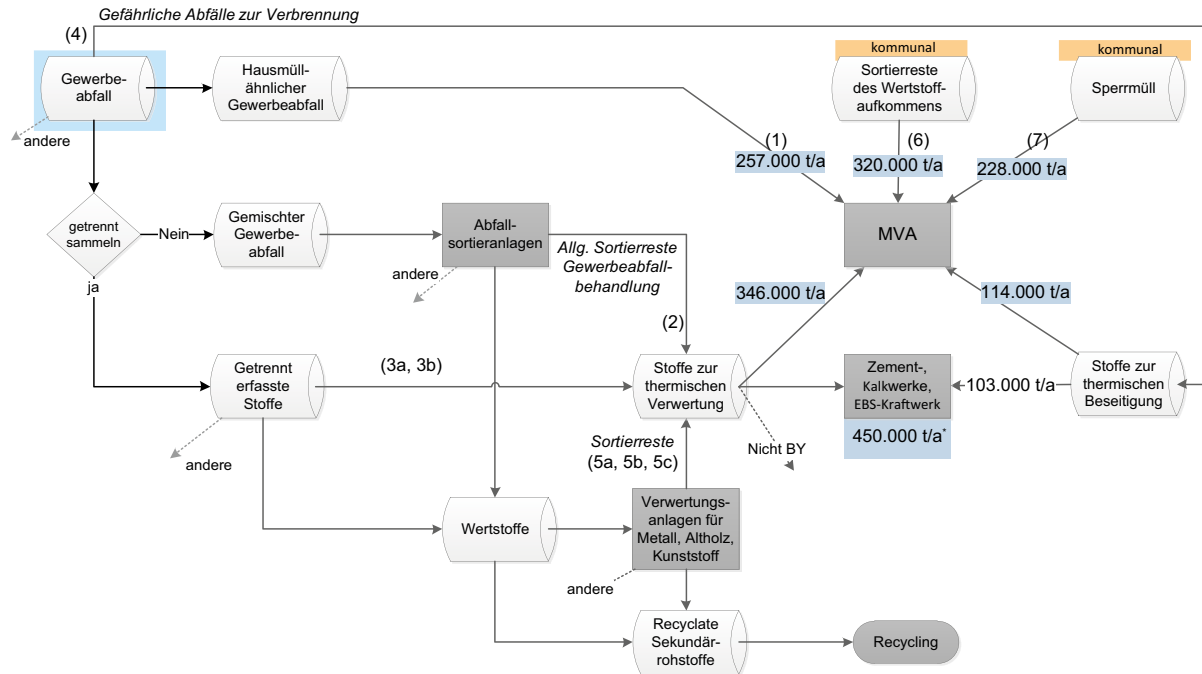


Abbildung 1: Abfallströme für die Vergasung und Behandlungspfade im Jahr 2018. Nummerierung s. Kapitel 3.2. Datenquellen LfU (2018), *bifa (2020)

3.2 Auswahl von Abfallströmen

Für diese Studie werden Neben- und Abfallprodukte ohne oder mit negativem Marktwert in Betracht gezogen, die mengenmäßig relevant sind und von denen erwartet wird, dass sie in näherer Zukunft nicht recycelt werden können. Außerdem werden nur brennbare und feste Abfälle berücksichtigt, die für die Vergasung grundsätzlich geeignet sein können. Anhand dieser Kriterien wurden folgende Abfallströme aus dem gewerblichen Anfall identifiziert, die für eine Vergasung grundsätzlich in Frage kommen (Nummerierung vgl. Abbildung 1):

- 1 Hausmüllähnlicher Gewerbeabfall
- 2 Allgemeine Sortierreste der Gewerbeabfallbehandlung
- 3 In Gewerbetrieben getrennt erfasste Stoffe
 - 3a Vorsortierte Ersatzbrennstoffe (wie Produktionsreste, Altholzreste)
 - 3b Vorbehandlungsfreie Abfälle
- 4 Gefährliche Abfälle zur Verbrennung in thermischen Abfallbehandlungsanlagen
 - 4a Gefährliche Abfälle zu MVA
 - 4b Gefährliche Abfälle zu Zement- und Kalkwerken
- 5 Sortierreste von Verwertungsanlagen für Kunststoffe, Altholz und Metall
 - 5a Sortierreste der Kunststoffsortierung aus dem gewerblichen Wertstoffaufkommen
 - 5b Sortierreste der Holzsortierung aus dem gewerblichen Wertstoffaufkommen
 - 5c Reste aus der Aufbereitung metallhaltiger Abfälle = Schredderleichtfraktion

Ergänzend und vergleichend sollen in der Studie zudem folgend Abfallarten aus dem kommunalen Aufkommen betrachtet werden:

- 6 Sortierreste aus dem kommunalen Wertstoffaufkommen
- 7 Sperrmüll

3.3 Mengenströme in Bayern

Für die Auswertung ist eine geschlossene Zahlenbasis für das Jahr 2018 verfügbar. Daraus ergeben sich die Mengenzusammenstellungen der Tabelle 1. Die Zahlenwerte stammen überwiegend aus der Abfallbilanz für Bayern 2018 (LfU 2019) und der Sonderabfallstatistik für 2018 in Bayern (LfU 2019a). Die Hochrechnung zum Gewerbeabfalleinsatz in Zement- und Kalkwerken und am EBS-Kraftwerksstandort Gersthofen von 450.000 t/a stammt von bifa (2020) und basiert ebenfalls auf Zahlen aus dem Jahr 2018.

In Summe aller Abfallströme 1 bis 7 (s. voriges Kapitel) fallen rund 1.715.000 t/a an. Hiervon werden 1.265.000 t/a in den 14 bayerischen Müllverbrennungsanlagen behandelt.

1.167.000 t/a stammen hierbei aus den gewerblichen Abfallströmen 1, 2, 3, 4 und 5. Die verbleibende Menge verteilt sich auf die anfallenden Sortierreste aus dem kommunalen Wertstoffaufkommen (6: 320.000 t/a) und den Sperrmüll (7: 228.000 t/a). Nicht in der Mengenbilanz erfasst werden können außerhalb Bayerns verbrachte Gewerbeabfallmengen.

Es zeigt sich damit: Die Mengen in jedem Einzelstrom sind ausreichend groß, um sie unter dem Gesichtspunkt der Mengenverfügbarkeit für eine Vergasung in Betracht zu ziehen.

Tabelle 1: Abfallmengen für Stoffgemische mit Vergasungseignung (gerundete Werte für 2018).

Abfallstrom (2018)	Abfallstrom-Nr. nach 3.2	Behandlung	Menge 2018 in t	Datenquelle
Hausmüllähnlicher Gewerbeabfall	1	MVA	257.000	LfU (2019)
Stoffe zur thermischen Verwertung (Anlieferungsmenge)	Teilstrom von: 2, 3, 5	MVA	346.000	LfU (2019)
Stoffe zur thermischen Beseitigung (inkl. gefährliche Abfälle)	4a	MVA	114.000	LfU (2019)
Sortierreste aus dem Wertstoffaufkommen (kommunal)	6	MVA	320.000	LfU (2019)
Sperrmüll (kommunal)	7	MVA	228.000	LfU (2019)
Summe in Müllverbrennungsanlagen			1.265.000	
Stoffe in Zement- und Kalkwerken sowie im EBS-Kraftwerk Gersthofen	4b + Teilstrom von: 2, 3, 5	Zement- und Kalkwerke, EBS-Kraftw.	Hochrechnung 450.000	bifa (2020)
Gesamtmenge	1–7		1.715.000	

3.4 Eigenschaften der fokussierten Abfallströme

Je nach Abfallart unterscheiden sich Abfälle von anderen Brennstoffen insbesondere durch einen hohen Inertanteil (Asche, Wasser, Glas, Metalle...), hohe Gehalte an Schadstoffen wie Schwefel-, Chlor- und Fluorverbindungen, geringe Anteile an flüchtigen Substanzen, eine heterogene Zusammensetzung und damit schwankende Heizwerte, stark variierende Korngrößen sowie gegebenenfalls toxische oder ökotoxische Inhaltsstoffe (Scholz 2001).

3.4.1 Elementgehalte

Für die Vergasung sind nur Abfallströme mit einem hohen Kohlenstoffgehalt geeignet. Daneben gibt es noch eine Reihe anderer Bestandteile, die einen Einfluss auf die Emissionen, das Ascheerweichungsverhalten und auftretende Korrosion haben können. Stark schwermetallbelastete Einsatzstoffe führen zu belasteten Rückständen, die die Ascheverwertung bzw. -entsorgung erschweren. Tabelle 2 zeigt wichtige Elementgehalte des Einsatzstoffes und die jeweiligen Auswirkungen.

3.4.2 Brennstofftechnische Eigenschaften

Neben den Elementgehalten sind die brennstofftechnischen Eigenschaften von großer Bedeutung für die technische Auslegung von Vergasungsanlagen. Dazu gehören der Wassergehalt, der Heizwert, der Aschegehalt und das Ascheerweichungsverhalten.

Der Wassergehalt beeinflusst direkt den Heizwert des Einsatzstoffes und reduziert die thermische Effizienz, da ein Teil der freiwerdenden Energie zur Verdampfung des Wassers benötigt wird und damit den Reduktionsreaktionen nicht zur Verfügung steht. Der Wassergehalt hat darüber hinaus Auswirkungen auf die Zusammensetzung des Produktgases, da bei höheren Wasserdampfpartialdrücken im Gas die heterogene und homogene Wassergasreaktion an Bedeutung gewinnen (Umweltbundesamt 2017).

Der Aschegehalt beeinflusst die Schadstoffemissionen. Höhere Aschegehalte führen oft zu höheren Staubfrachten oder technischem Aufwand zur Entstaubung. Darüber hinaus erhöhen sich die Aufwendungen für Verwertung bzw. Entsorgung der Rückstände. Die Zusammensetzung der Asche variiert je nach Einsatzstoff.

Das Ascheerweichungsverhalten beschreibt physikalische Veränderungen der Asche in Abhängigkeit von der Temperatur. Es hängt in erster Linie von der Zusammensetzung des Einsatzstoffes ab. Wichtige Kennwerte sind die Erweichungstemperatur, die Halbkugeltemperatur und die Fließtemperatur. Einsatzstoffe mit niedrigen Ascheerweichungstemperaturen haben ein hohes Risiko von Anbackungen und Ablagerungen, die zu Störungen und Betriebsunterbrechungen führen können. Außerdem wird Hochtemperaturkorrosion begünstigt. Tabelle 3 zeigt eine Übersicht über die brennstofftechnischen Eigenschaften und ihre Auswirkungen.

Tabelle 2: Wichtige Elementgehalte als Qualitätsmerkmal des Inputmaterials und ihre jeweiligen Auswirkungen beim Vergasungsprozess (Kaltschmitt 2009)

Element	Auswirkungen
Kohlenstoff	Heizwert, Brennwert, Partikelemissionen, Gaszusammensetzung
Wasserstoff	Heizwert, Brennwert
Sauerstoff	Heizwert, Brennwert
Stickstoff	NO _x - und N ₂ O-Emissionen
Aluminium	Ascheerweichungsverhalten
Kalium	Ascheerweichungsverhalten, Hochtemperaturkorrosion, Partikelemissionen
Magnesium	Ascheerweichungsverhalten, Ascheeinbindung von Schadstoffen, Ascheverwertung, Partikelemissionen
Kalzium	Ascheerweichungsverhalten, Ascheeinbindung von Schadstoffen, Ascheverwertung, Partikelemissionen
Schwefel	SO _x -Emissionen, Hochtemperaturkorrosion, Partikelemissionen
Silizium	Ascheerweichungsverhalten
Chlor	Emissionen von HCl und halogenorganischen Verbindungen, Hochtemperaturkorrosion, Partikelemissionen
Schwermetalle	Ascheverwertung, Schwermetallemissionen, z. T. katalytische Wirkung, Partikelemissionen

Tabelle 3: Brennstofftechnische Eigenschaften und jeweilige Auswirkungen (Kaltschmitt 2009)

Eigenschaft	Auswirkungen
Wassergehalt	Heizwert, Lagerfähigkeit, Gewicht, Temperatur
Heizwert	Energiegehalt, Anlagenauslegung
Aschegehalt	Partikelemission, Rückstandsbildung und -verwertung
Ascheerweichungsverhalten	Schlackebildung und -ablagerung, Betriebssicherheit und kontinuierlichkeit, Wartungsbedarf

3.4.3 Physikalische Eigenschaften

Wichtige physikalische Materialeigenschaften und ihre Auswirkungen zeigt Tabelle 4. Diese Eigenschaften können zum Teil durch die Aufbereitungstechnik beeinflusst werden.

Tabelle 4: Physikalische Eigenschaften und jeweilige Auswirkungen (Kaltschmitt 2009)

Eigenschaft	Auswirkungen
Abmessungen, Geometrie	Wahl von Anlagenaggregaten, Aufbereitungsbedarf, Zündfähigkeit, Trocknungsvermögen
Größenverteilung, Feinanteil	Störungen in Förderelementen, Rieselfähigkeit, Brückenbildungsneigung, Staubentwicklung
Brückenbildungsneigung	Fließfähigkeit, Störung bei Umschlagprozessen und Lagerentnahme
Schütt- bzw. Lagerdichte	Lager- und Transportaufwendung, Leistung der Fördererlemente, Vorratsbehältergröße usw.
Rohdichte (Teilchendichte)	Schütt- und Lagerdichte, pneumatische Fördereigenschaften, Vergasungseigenschaften (spezifische Wärmeleitfähigkeit usw.)
Abriebsfestigkeit	Feinanteil (Staubentwicklung, Entmischung)

3.5 Abfallarten

Die Abfallströme nach Kapitel 3.2 können gemäß ihren Eigenschaften und ihrem erwarteten Verhalten bei der Vergasung fünf Abfallarten zugeteilt werden, s. Abbildung 2.

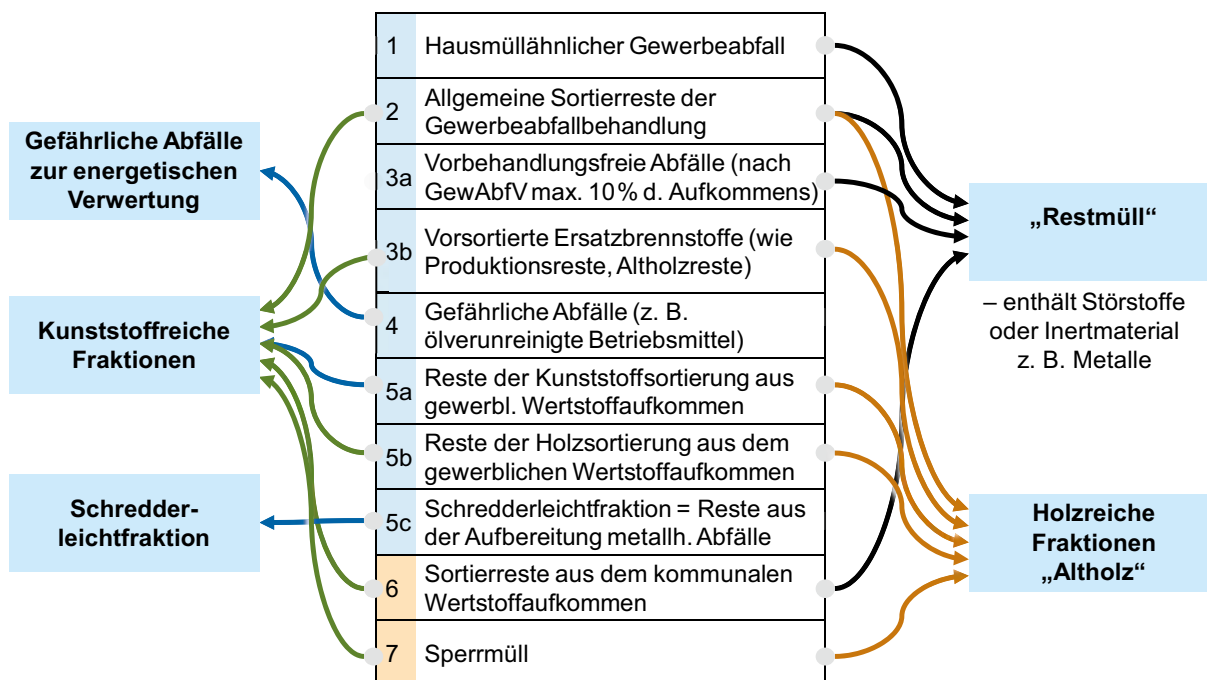


Abbildung 2: Zuordnung der Abfallströme zu Abfallarten nach ihren Eigenschaften

4 Grundlagen der Vergasung

4.1 Vergasungsprozess

Vergasung ist ein thermochemischer Prozess, bei dem ein kohlenstoffhaltiger Einsatzstoff bei Temperaturen zwischen 500 °C und 1200 °C in Anwesenheit eines Vergasungsmittels in ein Produktgas übergeführt wird, wobei eine geringere Sauerstoffmenge zugeführt wird, als für eine vollständige Oxidation stöchiometrisch nötig wäre.

Die Anfänge der Vergasung liegen in Deutschland im 19. Jahrhundert; damals wurden grundlegende Vergasungstechnologien entwickelt. Die Vergasung ist ein Schlüsselprozess für die chemische Verwertung von kohlenstoffhaltigen Ressourcen, insbesondere Kohle, um Chemikalien und Brennstoffe herzustellen. Die Kohlevergasung wird heute noch in kohlereichen Ländern wie in China und Südafrika industriell genutzt.

Hauptunterschiede zwischen den Vergasungstechnologien betreffen die Zuführung von Wärme (allotherm oder autotherm), das Reaktordesign (Festbettvergaser, Wirbelschichtvergaser, Flugstromvergaser, Drehrohrvergaser) und die eingesetzten Vergasungsmittel (Sauerstoff, Wasserdampf).

Bei der autothermen Vergasung wird der Einsatzstoff mit einem oxidierenden Vergasungsmittel teiloxydiert, um die Energie für die Vergasung der restlichen Bestandteile zur Verfügung zu stellen. Durch Sauerstoff-Unterschuss im Reaktor erfolgt nur eine geringe Freisetzung von Furanen und Dioxinen, die sonst bei der Verbrennung von Abfällen auftreten und eliminiert werden müssen. Darüber hinaus werden Wärmeverluste reduziert und die Effizienz der Energierückgewinnung erhöht.

Nach der Vergasung muss das Produktgas – in der Regel Synthesegas genannt – gereinigt und aufgewertet werden. Die grundsätzlichen Verfahrensschritte sind in Abbildung 3 dargestellt und werden im Folgenden beschrieben.

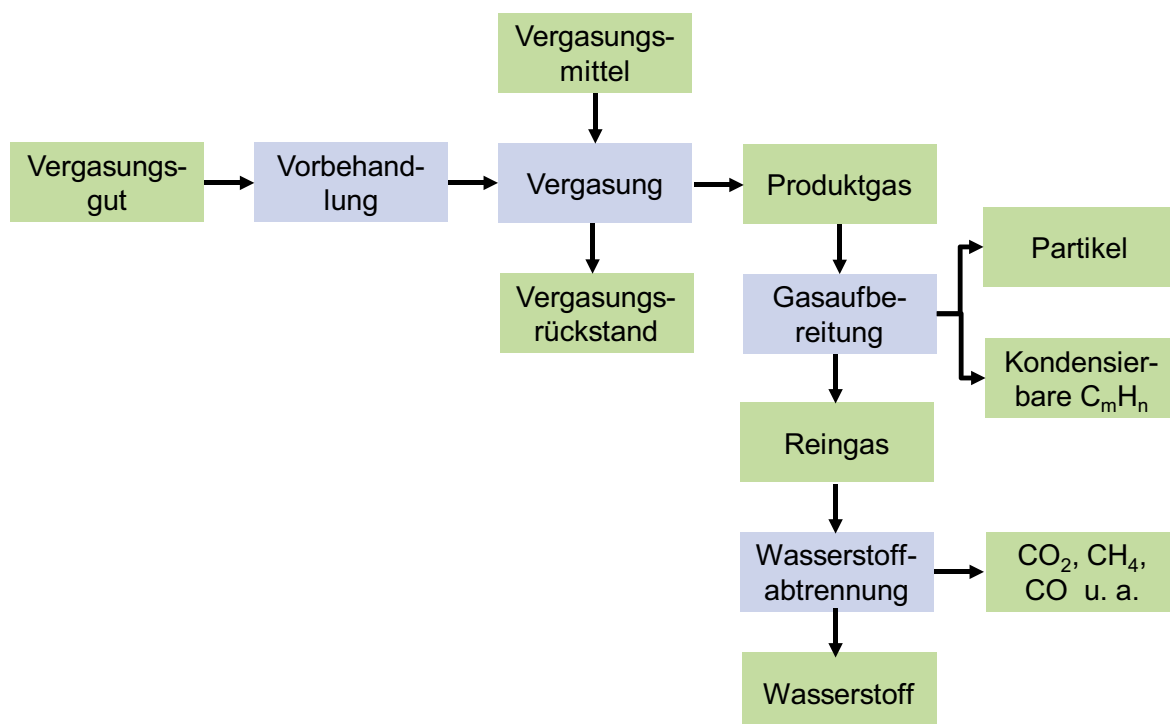


Abbildung 3: Allgemeiner Prozessablauf für die Produktion von Wasserstoff durch Vergasung

Sich überlagernde Hauptreaktionen der Vergasung sind – vereinfacht ausgehend von Kohlenstoff (C) formuliert –

- > (Teil-)Oxidationen von C, CO und H₂,
- > die Wassergasreaktion $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$,
- > die Wassergas-Shift-Reaktion $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$ und
- > die heterogene Methanbildungsreaktion $C + 2H_2 \rightarrow CH_4$ (Kaltschmitt 2009).

Das Produktgas besteht im Wesentlichen aus

- > brennbaren Gasen wie Wasserstoff, Kohlenstoffmonoxid CO, Methan CH₄ und gegebenenfalls kurzkettige Kohlenwasserstoffe,
- > nicht brennbaren Gasen wie Wasserdampf, Kohlenstoffdioxid CO₂ und Stickstoff sowie
- > Verunreinigungen, insbesondere Grob und Feinpartikel, Alkalien, langkettige Kohlenwasserstoffe, Stickstoffverbindungen, Schwefelverbindungen, Kohlenstoff-Sauerstoff-Schwefel-Verbindungen und Halogenverbindungen. (Kaltschmitt 2009)

Die Zusammensetzung des Produktgases hängt dabei von vielen Faktoren ab, so die Art und Menge des Vergasungsmittels, die Art der Wärmebereitstellung, die Bauart des Reaktors (Mischungsintensität, Verweilzeiten), die Vergasungstemperatur, die Druckverhältnisse im Reaktor, die Art und Form des Einsatzstoffs (z. B. Größe, spezifische Oberfläche, Feuchtigkeit, Zusammensetzung) und die Anwesenheit eines Katalysators. (Kaltschmitt 2009)

4.2 Verfahrensschritte

4.2.1 Vorbehandlung

Die Vorbehandlung des Einsatzstoffes kann aus einem oder mehreren Verfahrensschritten bestehen und soll insbesondere die chemisch-physikalischen Eigenschaften homogenisieren, die Schadstoffemissionen verringern, die Reststoffqualität verbessern und die Abgasreinigung vereinfachen (Scholz 2001). Aufwand und Art der Vorbehandlung ist abhängig von Zusammensetzung und Eigenschaften des zu behandelnden Einsatzstoffes und der eingesetzten Anlagentechnik. Für den Einsatz in einem Wirbelschichtreaktor etwa muss zur Homogenisierung und für eine einheitliche Korngrößenverteilung ein wesentlich höherer Aufwand betrieben werden als für ein Drehrohrsystem.

Mögliche Aufbereitungsschritte sind Sortierung, Zerkleinerung, Homogenisierung und Mischung, Klassierung, Agglomeration, Trocknung, Torrefizierung und andere chemische Vorbehandlungen.

4.2.2 Vergasertypen

4.2.2.1 Festbettvergaser

Bei Festbettvergasern wird der Einsatzstoff in einer Schüttschicht dem Vergasungsmittel ausgesetzt. Das Vergasungsmittel kann den Einsatzstoff dabei von unten nach oben (Gegenstrom) oder von oben nach unten (Gleichstrom) durchströmen, s. Abbildung 4. Infolge der Schwerkraft und der Zersetzung sinkt das Materialbett nach unten ab. Die verschiedenen Teilprozesse der Vergasung laufen dabei räumlich weitgehend getrennt ab. Beim Gegenstromvergaser durchströmt das warme Produktgas den Einsatzstoff, wodurch dieser getrocknet und das Produktgas abgekühlt wird. Daneben gibt es auch Doppelfeuervergaser und mehrstufige Vergaser, bei denen versucht wird, die Vorteile des Gleichstrom- und des Gegenstromvergasers zu vereinen (Kaltschmitt 2009). Die Reaktionstemperatur wird entweder unterhalb des Ascheschmelzpunktes eingeregelt, um eine trockene Entaschung zu erzielen, oder für die flüssige Entschlackung oberhalb des Ascheschmelzpunktes (LEE 2021).

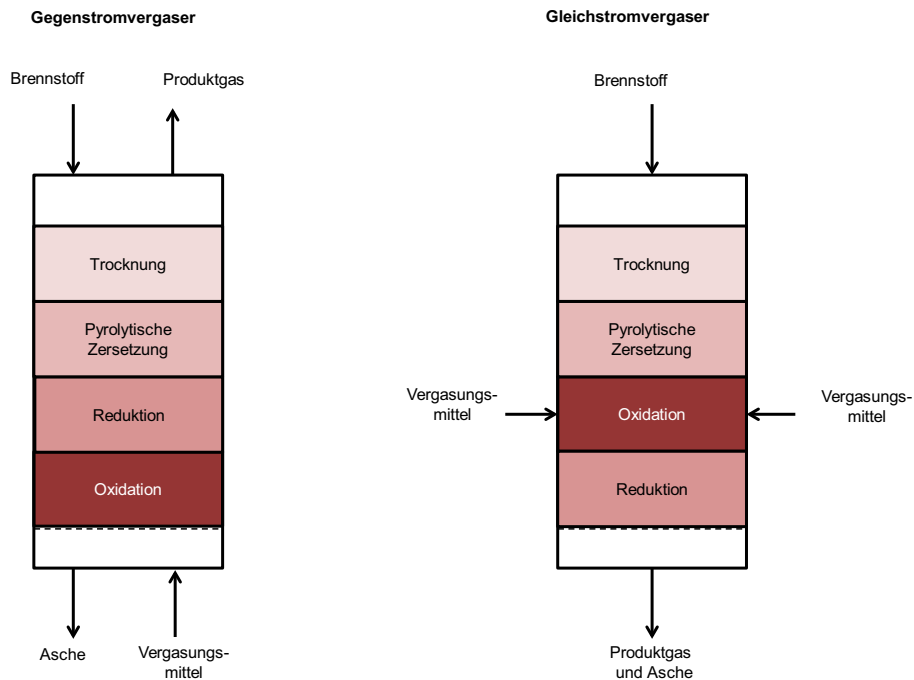


Abbildung 4: Festbettvergaserarten (eigene Darstellung nach Kaltschmitt 2009)

4.2.2.2 Wirbelschichtvergaser

Im Wirbelschichtvergaser durchströmt das Vergasungsmittel ein Gemisch aus Einsatzstoff und Bettmaterial von unten. Dadurch wird das Material fluidisiert und durchmischt. Der Einsatzstoff muss relativ feinkörnig vorliegen. Da sich keine ausgeprägten Temperatur- und Reaktionszonen bilden, finden die Teilreaktionen parallel im gesamten Reaktor statt. Dies führt im Vergleich zu Festbettvergasern zu gleichmäßigeren Temperaturen. Der Wärme- und Stofftransport im Wirbelbett ermöglicht eine hohe Reaktionsgeschwindigkeit und damit eine geringe Verweilzeit des Einsatzstoffs im Reaktor. Wie beim Gleichstromvergaser verlässt das Produktgas den Reaktor mit einer hohen Temperatur, weshalb in der Regel eine Wärmerückgewinnung nachgeschaltet wird. Darüber hinaus weist das Produktgas meist einen hohen Partikelgehalt auf, was die Anforderungen an die Partikelabscheidung erhöht. Als Bettmaterial wird in der Regel Quarzsand eingesetzt. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, dem Bettmaterial Katalysatoren beizumischen, um bestimmte Reaktionen zu begünstigen.

Wirbelschichtvergaser lassen sich weiter unterteilen in stationäre Wirbelschichtvergaser und zirkulierende Wirbelschichtvergaser. Bei den stationären Wirbelschichtvergasern ist die Geschwindigkeit des Vergasungsmittels so niedrig, dass sich zwar eine Wirbelschicht bildet, aber der Austrag von Partikeln mit dem Produktgas gering ist. Bei der zirkulierenden Wirbelschicht ist die Durchströmungsgeschwindigkeit dagegen so hoch, dass eine erhebliche Feststoffmenge mit dem Produktgas ausgetragen wird. Über einen oder mehrere Zyklone werden die Partikel anschließend aus dem Gas abgetrennt und dem Reaktor wieder zugeführt. (Kaltschmitt 2009)

4.2.2.3 Flugstromvergaser

Beim Flugstromvergaser wird der fein gemahlene oder pastöse Einsatzstoff zusammen mit dem Vergasungsmittel in den Reaktionsraum eingeblasen. Der feine Einsatzstoff kann dafür mit Wasser zu einer pastösen Masse vermischt werden. Die Reaktion findet bei hohen Temperaturen statt. Dies zusammen mit dem der großen spezifischen Oberfläche der Materialpartikel führt zu hohen Reaktionsgeschwindigkeiten und damit zu hohen Durchsatzmengen. (Kaltschmitt 2009)

4.2.2.4 Drehrohrvergaser

Drehrohröfen werden häufig in Abfallverbrennungsanlagen und Zementwerken eingesetzt. Durch die Drehbewegung des Reaktors werden die eingesetzten Einsatzstoffe durch die Reaktionszone transportiert und zugleich durchmischt. Der Reaktor besteht in der Regel aus einem zylindrischen Stahlkörper, der in Richtung Ascheaustrag leicht geneigt ist. Die Bewegungsgeschwindigkeit des Einsatzstoffs und damit die Verweilzeit werden durch die Rotationsgeschwindigkeit des Rohrs vorgegeben.

4.2.2.5 Vorschubrostvergaser

Ein Vorschubrost führt den Einsatzstoff kontinuierlich dem Vergaser zu und trägt die Rückstände aus dem Reaktor aus. Es findet dabei eine nur geringfügige Vermischung des Einsatzstoffs statt.

4.2.2.6 Plasmavergaser

Bei der Plasmavergasung können unbehandelte Abfälle in den Reaktor gegeben werden, wo sie mit einem elektrisch erzeugten Plasma in Kontakt kommen. In der Regel findet der Prozess bei Atmosphärendruck und Temperaturen zwischen 1500 °C und 5000 °C statt. Es entsteht ein hochwertiges Produktgas und verglaste Schlacke. Für den Betrieb des Plasmas wird eine bedeutende Menge Strom benötigt. Typische Verbräuche liegen bei 1,2–2,5 MJ/kg Abfall, entsprechend 5–10 % des Brennwertes des Einsatzstoffs. (Arena 2012)

Neben dem Produktgas entsteht je nach Zusammensetzung des Einsatzstoffs aus dem anorganischen Material eine Schlacke. Diese ist in der Regel ungefährlich und kann z.B. im Straßenbau eingesetzt werden. Die Vermarktungsmöglichkeiten hängen von der Reinheit und der Menge ab. Metalle können ebenfalls wiedergewonnen und in Gießereien eingesetzt werden.

Die Vergasung von Abfall wird häufig mit einer anschließenden Plasmabehandlung kombiniert. Dies ermöglicht eine Wärmebereitstellung für die Vergasung, eine Verbesserung der Synthesegasqualität und eine Verglasung der Asche. (Themelis 2010)

4.2.2.7 Hydrothermale Vergasung

Als hydrothermale Vergasung bezeichnet man die Vergasung in überkritischem Wasser ($T > 374$ °C, $p > 221$ bar; Boukis 2004). Der Prozess ist nicht mit der hydrothermalen Karbonisierung zu verwechseln. Da Wasser als Reaktionsmedium verwendet wird, können auch sehr feuchte Einsatzstoffe eingesetzt werden. Das Gleichgewicht der stattfindenden Wassergas-Shift-Reaktion liegt aufgrund der großen Menge Wasser deutlich auf der Wasserstoffseite. Die Reaktion benötigt jedoch einen Katalysator, basierend z. B. auf Alkalimetallen.

Das Verfahren kann für Biomasse, aber auch für Kunststoffe angewendet werden. Die Reaktionszeiten sind deutlich höher als bei der trockenen Biomassevergasung, und der Rohstoff muss sehr fein aufbereitet werden. Obwohl die hydrothermale Vergasung Gegenstand vieler Forschungsprojekte ist und das Potenzial für die Wasserstoffproduktion vor allem aus Biomasse hoch ist, ist der Entwicklungsstand aktuell weitaus niedriger als bei der trockenen Vergasung. Das Verfahren wird in dieser Studie deshalb nicht weiter betrachtet.

4.2.2.8 Mikrowellenunterstützte Vergasung

Die durch Mikrowellen unterstützte Vergasung befindet sich noch in der Laborentwicklung. Die Rolle der Mikrowellenstrahlung bei der Vergasung ist bislang nicht vollständig wissenschaftlich geklärt. Obwohl das Verfahren Potenzial für die Vergasung von Biomasse und Abfällen zeigt, wird es in der aktuellen Studie aufgrund des niedrigen Entwicklungsstandes nicht weiter berücksichtigt.

4.2.3 Vor- und Nachteile der Vergasertypen

Nachfolgend sind die Vor- und Nachteile benannt. Vorteile sind mit ⊕, Nachteile mit ⊖ gekennzeichnet.

Festbett-Gegenstromvergaser

- ⊕ Hoher Wirkungsgrad und geringe Alkalimetallgehalte im Produktgas aufgrund der niedrigen Austrittstemperatur des Produktgases
- ⊕ Geringer Partikelgehalt im Produktgas
- ⊕ Universelles Einsatzstoffspektrum (Korngröße, Wassergehalt, Anorganikanteil)
- ⊕ Einfacher Prozess, geringe Kosten
- ⊕ Etablierte Technologie
- ⊖ Hoher Teergehalt im Produktgas

Festbett-Gleichstromvergaser

- ⊕ Geringer Teergehalt im Produktgas
- ⊕ Einfacher Prozess, geringe Kosten
- ⊕ Etablierte Technologie
- ⊖ Enges Einsatzstoffspektrum (Wassergehalt < 25 %, Korngröße limitiert)
- ⊖ Wärmerückgewinnungssystem notwendig, sonst aufgrund der hohen Austrittstemperatur des Produktgases geringer Wirkungsgrad
- ⊖ Verschlackungsrisiko

Wirbelschichtvergaser (stationär)

- ⊕ Leichtes Up-Scaling
- ⊕ Temperaturkonstanz im Reaktionsraum
- ⊕ Temperatur gut regelbar
- ⊕ Konstante Produktgaszusammensetzung
- ⊖ Nicht umgesetzter Einsatzstoff und Asche werden nicht separiert, damit Aufwand zur Aschenachbehandlung
- ⊖ Wärmerückgewinnungssystem notwendig, sonst aufgrund der hohen Austrittstemperatur des Produktgases geringer Wirkungsgrad

Wirbelschichtvergaser (zirkulierend)

- ⊕ Leichtes Up-Scaling
- ⊕ Geringere Querschnittsflächen bei gleicher Leistung
- ⊕ Temperaturkonstanz im Reaktionsraum
- ⊕ Temperatur gut regelbar
- ⊕ Konstante Produktgaszusammensetzung
- ⊖ Wärmerückgewinnungssystem notwendig, sonst aufgrund der hohen Austrittstemperatur des Produktgases geringer Wirkungsgrad
- ⊖ Umfangreiche Prozesssteuerung
- ⊖ Aufwändige Anlagentechnik

Flugstromvergaser

- ⊕ Geringer Teergehalt und geringer Methangehalt im Produktgas durch hohe Temperaturen
- ⊕ Schlacke ist weitgehend frei von Kohlenstoff
- ⊖ Wärmerückgewinnungssystem notwendig, sonst aufgrund der hohen Austrittstemperatur des Produktgases geringer Wirkungsgrad
- ⊖ Nur geringe Partikelgrößen möglich. Einsatzstoff muss in der Regel vorher aufbereitet werden
- ⊖ Hoher technischer Aufwand aufgrund der hohen Temperaturen

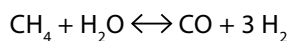
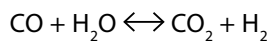
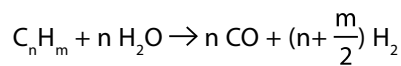
Damit kommen für die Vergasung von Abfällen verschiedene Technologien mit unterschiedlichen Vorzügen und Nachteilen in Betracht. Welches Verfahren in einem konkreten Fall am effektivsten ist, kann nicht für alle Abfallarten und nicht allein auf Basis der Technologie entschieden werden. Sämtliche genannten Verfahren sind prinzipiell zur Erzeugung von Wasserstoff aus Abfällen geeignet.

4.2.4 Gasaufbereitung

Für das Zielprodukt Wasserstoff ist nach der Vergasung eine Gasaufbereitung notwendig. Zum einen enthält das Produktgas größere Mengen Kohlenstoffmonoxid und Kohlenstoffdioxid, die abgetrennt werden müssen. Zum anderen kann das Gas je nach Einsatzstoff und Verfahren auch Stickstoff sowie Spuren von Schwefelwasserstoff, Ammoniak, Salzsäure und Teer enthalten, die ebenfalls abgetrennt werden müssen. Andere Stoffe wie Benzol oder Toluol werden in der Regel bei der Wasserstoffabtrennung entfernt.

4.2.4.1 Dampfreformierung

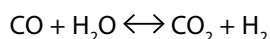
Bei hohen Methangehalten im Produktgas kann in einem weiteren Schritt das Methan in Wasserstoff umgewandelt und damit die Wasserstoffausbeute erhöht werden. Die Konzentration von Methan hängt dabei von vielen Faktoren ab, wie Vergasertyp, Vergasungsmittel, Einsatzstoff, Druck, Temperatur und Verweilzeit. In erster Linie kommt die Dampfreformierung zum Einsatz, die sich durch einen hohen Gesamtwirkungsgrad und eine hohe Wasserstoffausbeute bei geringen Kosten auszeichnet. Längerkettige Kohlenwasserstoffe werden in Wasserstoff und Kohlenmonoxid gespalten. Eine zusätzliche Teerentfernung ist dann nicht mehr notwendig. Hauptreaktionen am Katalysator sind (GTI 2015):



In der Regel ist eine Zugabe von Wasserdampf nicht erforderlich, da das Rohgas davon ausreichend enthält. Die Reaktion findet in Anwesenheit eines Katalysators (meist Nickel) bei Temperaturen zwischen 500 °C und 900 °C statt. Schwefelverbindungen können schon bei niedrigen Konzentrationen zu einer Deaktivierung des Katalysators führen. Eine vorherige Entschwefelung ist aufgrund der unterschiedlichen optimalen Temperaturen der Verfahren thermodynamisch unvorteilhaft. Neben Schwefel können auch Staub, Salzsäure und Alkalien die Standzeit des Katalysators verringern.

4.2.4.2 Wassergas-Shift-Reaktion

Zur Verbesserung der Wasserstoffausbeute und der Verringerung des Kohlenstoffmonoxidgehalts wird nach dem Vergasungsprozess eine Wassergas-Shift-Einheit geschaltet. Als Wassergas-Shift-Reaktion wird die exotherme Reaktion von Kohlenstoffmonoxid mit Wasser zu Wasserstoff und Kohlendioxid bezeichnet. Dabei entsteht pro Mol Kohlenstoffmonoxid ein Mol Wasserstoff:



Die Gleichgewichtskonstante dieser Reaktion sinkt mit der Temperatur, d. h. man erreicht höhere Wasserstoffausbeuten bei niedrigen Temperaturen. Bei niedrigen Temperaturen sinkt allerdings die Reaktionsrate. In industriellen Prozessen läuft das Verfahren meist in mehreren Stufen ab.

> Stufe 1 – High-Temperature-Shift-(HTS-)Katalyse:

Reduktion der CO-Konzentration von 10–13 % auf 23 % auf einem chromdotierten Magnetit-Katalysator bei einer Temperatur zwischen 350–550 °C und einem Druck von über 20 bar. (Platon 2009)

> Stufe 2 – Low-Temperature-Shift-(LTS-)Katalyse:

Reduktion der CO-Konzentration auf 0,2–0,4 % an einem Cu/ZnO- oder CoMo-Katalysator bei einer Temperatur von 200–250 °C und einem Druck zwischen 10 und 30 bar. (Platon 2009)

Für eine Reduzierung des Kohlenstoffmonoxidgehalts und die Anpassung des CO/H₂-Verhältnisses reicht eine HTS-Stufe aus.

4.2.4.3 Teerentfernung

Bei der pyrolytischen Zersetzung entstehen ungewünschte organische Kohlenwasserstoffverbindungen als Nebenprodukte. In nachgeschalteten kühleren Anlagenteilen können diese kondensieren und führen zu Ablagerungen. Die Teerbildung sollte soweit wie möglich schon im Prozess vermieden werden. Je höher die Temperatur und die Verweilzeit der Partikel und der Gase in der heißen Zone, desto geringer ist die Menge an gebildetem Teer.

Für die Teerabtrennung stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung. Diese kann man einteilen in chemische Verfahren, bei denen die Teerverbindungen gespalten werden, und physikalische Verfahren, bei denen der Teer abgeschieden und anschließend entsorgt wird. Am weitesten entwickelt und verbreitet sind Wäscher auf Ölbasis.

4.2.4.4 Partikelentfernung

Für die Entfernung von Partikeln aus dem Rohgas stehen je nach Partikelgehalt und Partikelgröße unterschiedliche Verfahren zur Verfügung. Je nach Einsatzstoff und Verfahren beinhaltet die Partikelentfernung nicht nur die Abtrennung von Koks, Asche und mitgerissenem Bettmaterial, sondern auch von Alkaliverbindungen. Bei Temperaturen über 800 °C können diese verdampfen und sich anschließend auf kühleren Oberflächen in Downstream-Anlagenteilen absetzen, oder direkt zu feinen Partikeln < 5 µm kondensieren. Die Abtrennung der Partikel ist eng verknüpft mit der Abtrennung von kondensierbaren Kohlenwasserstoffen.

4.2.4.5 Abtrennung von Schwefelverbindungen

Bei der Vergasung wird Schwefel in erster Linie als Schwefelwasserstoff (H₂S) und Carbonylsulfid (COS) und nur in geringen Mengen in Form von anderen organischen Verbindungen (Thiole und Thiophen) freigesetzt. Haupteinflussgröße auf die Verhältnisse zwischen den Schwefelverbindungen ist die Prozesstemperatur. Thiole sind instabil bei hohen Temperaturen, können jedoch zu Problemen in Downstream-Prozessen, wie Emissionen und Katalysatordeaktivierung, führen. Die üblichen Prozesse zur Entfernung von H₂S und COS verringern die Konzentration von Thiolen und Thiophen oft nicht oder nur geringfügig. Das Reaktionsgleichgewicht zwischen H₂S und COS verschiebt sich bei Abkühlung des Gases zu H₂S. Bei Temperaturen unter 200 °C liegt kein COS mehr vor.

4.2.4.6 Weitere Gasreinigung

Je nach eingesetztem Abfallstrom und den Vergasungsparametern können weitere Gasreinigungsverfahren notwendig sein. Dazu gehören z. B. die Abtrennung von HCl, Dioxinen und Furanen sowie Stickstoffverbindungen.

4.2.5 Wasserstoffabtrennung

4.2.5.1 Druckwechseladsorption

Das Druckwechseladsorptionsverfahren (Pressure Swing Adsorption) entspricht dem aktuellen Stand der Technik für die Abscheidung von Wasserstoff aus Synthesegasen in der chemischen und petrochemischen Industrie. Es beruht auf der physikalischen Bindung von Gasmolekülen auf einem festen Adsorptionsmaterial (Aktivkohle, Zeolithe, Silicagel oder Aluminiumgel). Dabei können Gasgemische anhand ihrer unterschiedlichen Adsorptionseigenschaften getrennt werden. Einer der häufigsten Anwendungsfälle ist die Behandlung von Gas aus der Dampfreformierung. Dafür wird das Gas mittels einem Wassergas-Shift-Reaktor vorbehandelt, so dass es typischerweise folgende Zusammensetzung hat: 70–80 % H₂, 15–25 % CO₂, 36 % CH₄, 1–3 % CO und Spuren von N₂. Das Eingangsgas hat im Allgemeinen einen Druck von 4–30 bar und eine Temperatur von 21–38 °C. (Sircar 2009)

Die Anlagen werden mit mindestens zwei Reaktoren betrieben, so dass sich immer ein Reaktor in der Adsorption befindet, während der zweite regeneriert wird.

Die Adsorptionsstärke der Verbindungen ist:

> Aktivkohle: $\text{CO}_2 > \text{CH}_4 > \text{CO} > \text{H}_2$

> Zeolithe: $\text{CO}_2 > \text{CO} > \text{CH}_4 > \text{N}_2 > \text{H}_2$

Die Adsorption findet bei hohem Druck statt. Zur Desorption wird der Druck anschließend abgesenkt, sodass der Adsorber wieder verwendet werden kann. Das Verfahren ermöglicht die Gewinnung eines trockenen hochreinen Gases (98–99,999 mol%). Die grundsätzlichen Verfahrensschritte sind Adsorption unter Druck, Desorption bei niedrigem Druck, Spülen und Druckausgleich mit einem anderen Behälter. Neben der Gewinnung von hochreinem Wasserstoff kann die Druckwechseladsorption so erweitert werden, dass die Abscheidung und Speicherung von Kohlendioxid ermöglicht wird.

4.2.5.2 Membranverfahren

Ein weiteres Verfahren zur Abtrennung von Wasserstoff aus einem Gasgemisch sind Membranverfahren. Im Gegensatz zur zyklisch ablaufenden Druckwechseladsorption ist das Membranverfahren ein kontinuierlicher Prozess. Welches Verfahren besser geeignet ist, ist stark von der Menge an aufzubereitendem Gas abhängig. Bei großen Anlagen ist das Druckwechseladsorptionsverfahren meist wirtschaftlicher. Bei etwa gleichbleibender Gaszusammensetzung ist die Steuerung von Membranverfahren in der Regel sehr einfach und besteht aus der Kontrolle von Membrantemperatur, Gaseingangsdruck und Permeatdruck.

4.3 Nebenprodukte und Einbindung am Standort

4.3.1 Nebenprodukte

Das bei der Gasaufbereitung anfallende Abwasser wird in der Regel so weit möglich im Kreis gefahren. Aufgrund der hohen Schadstoffbelastung muss zu entsorgendes Abwasser in der Regel einer Behandlungsanlage zugeführt werden.

Kommt zur Teerabscheidung ein Wäscher auf Ölbasis zum Einsatz, wird das Öl ebenfalls soweit möglich im Kreis gefahren. Zu entsorgendes verunreinigtes Öl kann in der Regel dem Vergaser oder bei allothermen Vergasern der Brennkammer zugeführt und damit prozessintern verwertet und entsorgt werden.

Eine Verwertung der im Abgas enthaltenen Nebenprodukte wie z. B. Kohlenstoffdioxid, Schwefelwasserstoff und Stickoxide ist nicht üblich. Eine Umwandlung des erzeugten Schwefelwasserstoffes zu elementarem Schwefel mit anschließender Vermarktung ist prinzipiell denkbar. Je nach Reinheit des erzeugten Kohlenstoffdioxids wäre eine Vermarktung als Trockeneis oder eine Speicherung möglich.

Werden stark chlorhaltige Einsatzstoffe verwendet, kann bei der Abtrennung des Chlors eine vermarktbarere Salzsäure erzeugt werden.

Eine Vermarktung und Verwertung von Feststoffen aus der Gasaufbereitung, wie z. B. Filterkuchen, Asche und Staub, ist nicht üblich. Nicht inerte Feststoffe werden meist thermisch aufbereitet, z. B. in einem Hochtemperatur-Verbrennungsprozess. Die Entsorgung von inerten Feststoffen richtet sich nach dem Schadstoffgehalt. Sind Schwermetalle enthalten, müssen sie einem Verwerter zum Recycling oder zur Entsorgung zugeführt. Schwermetallfreie Feststoffe können je nach Zusammensetzung in der Regel deponiert werden. Studien und Forschungsprojekte zur Verwertung der festen Reststoffe beziehen sich in der Regel auf einen spezifischen Prozess und spezifischen Einsatzstoff und sind nicht allgemein übertragbar.

4.3.2 Rückstände und deren Entsorgung

In der Abfallaufbereitung können je nach Abfall und bereits stattgefundenen Vorbereitungsschritten Metalle, Glas und Wasser abgetrennt werden. Metalle und Glas können den entsprechenden Recyclinganlagen zugeführt werden. Das Wasser kann in der Regel eingeleitet werden.

Bei der Vergasung fallen feste Rückstände in Form von Schlacke an. Die Entsorgung der Schlacke ist abhängig von ihren Eigenschaften und Schadstoffgehalten. Findet die Vergasung bei hohen Temperaturen statt, kann es zu einer Verglasung der Schlacke kommen. Dabei kommt es zu einem Einschluss von Schadstoffen in der verglasten Matrix der Rostasche, wodurch die Verwertbarkeit der Schlacke z. B. im Straßenbau verbessert werden kann. Je nach Vergasungstechnologie und Einsatzstoff können Metalle nach der Vergasung aus der Schlacke abgetrennt und einer Verwertung zugeführt werden.

4.3.3 Synergieoptionen

Vergasungsanlagen nutzen in der Regel keine externen Wärmequellen, da im Prozess genug Abwärme anfällt, um den eigenen Bedarf zu decken. Die Möglichkeit der Wärmeabgabe an Dritte hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab. Dazu gehören z. B. der Einsatzstoff, das Vergasungsmittel, das Vergasungsverfahren, die Gasaufbereitung und der eigener Wärmebedarf. Bleibt Wärme auf einem ausreichend hohen Temperaturniveau übrig, kann diese nahegelegenen Betrieben oder Siedlungen in Form von Prozess- oder Fernwärme zur Verfügung gestellt werden.

4.4 Stoff- und Energiebilanz

Im Folgenden sind die Energiebilanz und die Wasserstoffbilanz für einen allothermen Vergaser dargestellt. Als Vergasungsmittel wird Wasserdampf verwendet. Die Energiebilanz ist abhängig von der eingesetzten Anlagentechnik, den Prozessparametern, der Anlagengröße, dem verwendeten Vergasungsmittel und dem Einsatzstoff und ist daher als beispielhaft anzusehen. Abbildung 6 zeigt die Energiebilanz, Abbildung 7 die vereinfachte Stoffbilanz. Die Bilanzen sind auf 1 t Wasserstoff normiert.

Im hier dargestellten Beispiel wird Biomasse mit Wasserdampf in einem Wirbelschichtvergaser umgesetzt. Neben dem Vergaser und einer Brennkammer, die die Energie für die Vergasungsreaktionen zur Verfügung stellt, besteht die Anlage aus einem Wassergasshift-Reaktor, einem Gaswäscher, Gasreinigungseinheiten (CO₂-Entfernung und Druckwechseladsorption) und einem Dampfreformer. Die für die Stoff- und Energiebilanz verwendeten Daten beruhen auf einer Mischung von experimentell gewonnenen Daten und Prozesssimulation. Der Anlagenaufbau ist in Abbildung 5 dargestellt.

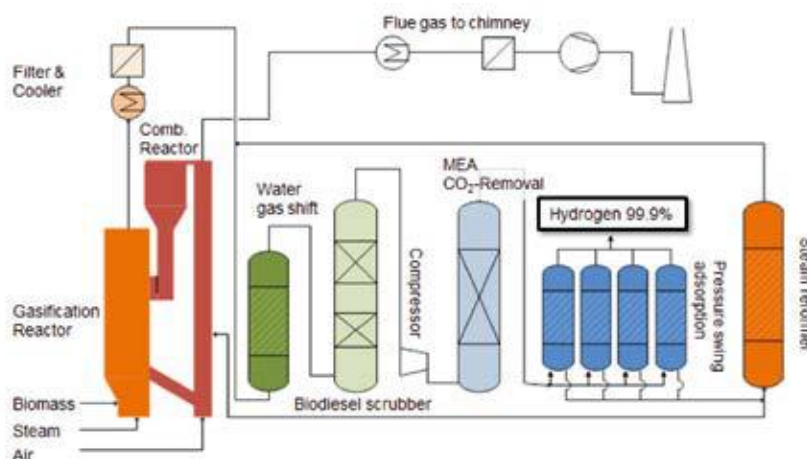


Abbildung 5: Prozessschema der beschriebenen 10 MW-DFB-Vergaseranlage (Loipersböck 2018)

Im dargestellten Beispiel können 54,6 % der im Einsatzstoff enthaltenen Energie (Brennwert) in Wasserstoff umgesetzt werden. Dies liegt im Bereich von Literaturwerten, die je nach Einsatzstoff und Prozesskonfiguration Energieeffizienzen von 40–60 % nennen (Weber 2006). Darüber hinaus werden im Beispiel 1,1 % der im Einsatzstoff enthaltenen Energie als Fernwärme abgegeben.

Pro eingesetztem kg Einsatzstoff, hier Biomasse, können im vorliegenden Beispiel 71 g Wasserstoff produziert werden. Die Stoffbilanz stellt nur die Hauptkomponenten Biomasse, Wasser, Wasserstoff, CO₂ und C_xH_y dar. Literaturwerte für Wasserstoffausbeuten bei Biomassevergasern liegen bei 50 kg/t Einsatzstoff (Dowaki 2007, Mohammed 2011). Andere Einsatzstoffe, etwa Kunststoffe, erzielen höhere Wasserstoffausbeuten. Für aufbereitete Abfälle kann von einer Wasserstoffausbeute von rund 100 kg/t Abfall ausgegangen werden.

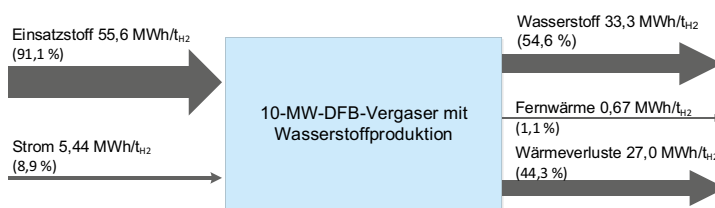


Abbildung 6: Vereinfachte Energiebilanz für die Herstellung von Wasserstoff in einer allothermen 10 MW-Vergaseranlage. Sensible und latente Wärme sowie Elektrizität. Eigene Darstellung nach Loipersböck (2018)

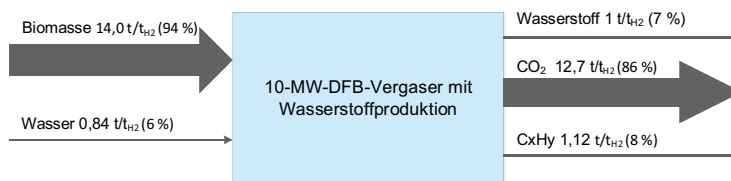


Abbildung 7: Vereinfachte Stoffbilanz für die Herstellung von Wasserstoff in einer allothermen 10 MW-Vergaseranlage. Eigene Darstellung nach Loipersböck (2018)

5 Vergasung zur Wasserstoffgewinnung aus Gewerbeabfällen

5.1 Eignung der Vergasertypen für verschiedene Abfallströme

Zur Biomassevergasung werden vielfach kleine Festbettvergaser mit Temperaturen unter 1000 °C verwendet. Für inhomogene Abfällen sind sie eher ungeeignet. Besser geeignet für wenig oder nicht aufbereitete Abfälle sind Hochtemperatur-Festbettvergaser mit Temperaturen über 1000 °C.

Wirbelschichtvergaser sind in erster Linie für Biomasse und EBS geeignet. Die Einsatzstoffe müssen Anforderungen an Korngröße, Zusammensetzung und Wassergehalt erfüllen. Für EBS ist eine stationäre Wirbelschicht generell besser geeignet als eine zirkulierende Wirbelschicht, die vor allem für Biomasse eingesetzt wird.

Flugstromvergaser erfordern einen hohen Aufbereitungsgrad der Einsatzstoffe beispielsweise in Form einer vorgeschalteten Pyrolyse oder Verkohlung.

Insgesamt sind für heterogene Abfälle zweistufige Verfahren besser geeignet, die z.B. eine Vorpyrolyse oder Vorverkohlung enthalten, oder aber Hochtemperaturverfahren. Für homogene, gut aufbereitete Abfälle wie Kunststoff-Pellets oder Altholz kommt auch eine einstufige Wirbelschicht in Betracht.

Eine genauere Bewertung der Eignung von Vergasungsverfahren für die in Kapitel 3.5 benannten Abfallarten folgt in Kapitel 8.3.

5.2 Vorbehandlung der Abfallströme

Die in Kapitel 3.5 identifizierten Abfallströme „gefährliche Abfälle zur Verbrennung“, kunststoffreiche Fraktionen, Schredderleichtfraktion, holzreiche Fraktionen und gemischte Gewerbeabfälle sind prinzipiell für die Vergasung als Einsatzstoff geeignet. Sie bestehen aus brennbaren und nicht-brennbaren Bestandteilen in unterschiedlichen Mengen, wie Papier, Kunststoffe, Holz, Textilien Karton, aber auch Metalle und Glas. Für viele Vergasungstechnologien ist jedoch eine Aufbereitung der Abfälle nötig, u.a. zur Entfernung von nicht-brennbaren Bestandteilen, zur Reduzierung des Wassergehalts und zur Zerkleinerung und Homogenisierung. Der Grad der notwendigen Aufbereitung ist abhängig vom Abfallstrom, dem Vergasertyp und anderen Anlagenparametern (Gasaufbereitung, Brennstoffeintrag).

5.3 Wasserstoffausbeute

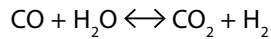
5.3.1 Vergasungsmittel

Die Wasserstoffausbeute des Vergasungsprozesses ist limitiert durch das chemische Gleichgewicht der Reaktionen. Für eine hohe Ausbeute ist Wasserdampf das geeignetste Vergasungsmittel. Wird ausschließlich Wasserdampf als Vergasungsmittel eingesetzt, benötigt der Prozess jedoch eine externe Wärmequelle. Meist wird zusätzlich zum Wasserdampf Sauerstoff oder Luft in den Vergasern eingebracht. Die exothermen Reaktionen mit dem Sauerstoff setzen die erforderliche Energie für die Vergasungsreaktionen frei. Zur Bereitstellung des Sauerstoffs ist in der Regel eine Luftzerlegungseinheit notwendig.

Die Wasserstoffausbeute sinkt mit steigender Menge an zugeführtem Sauerstoff, da Wasserstoff mit dem Sauerstoff zu Wasser reagiert. Die optimale Menge an Sauerstoff ist daher so hoch, dass genügend Energie für den Prozess geliefert wird, aber so niedrig, dass die Wasserstoffausbeute nicht signifikant gesenkt wird. Luft ohne den Einsatz von zusätzlichem Wasserdampf ist zwar das billigste Vergasungsmittel, eignet sich aufgrund des hohen Stickstoffgehalts jedoch nicht zur Wasserstofferzeugung.

5.3.2 Temperatur und Druck

Mit steigenden Temperaturen nimmt in der Regel der Wasserstoffgehalt im Produktgas zu und der Gehalt an Kohlenmonoxid und leichten Kohlenwasserstoffen ab. Optimale Temperaturen für die Wasserstoffausbeute liegen bei 800–850 °C. Bei Temperaturen darüber kommt es wieder zu einer leichten Abnahme des Wasserstoffgehalts im Produktgas – das chemische Gleichgewicht der Wassergas-Shift-Reaktion verschiebt sich mit steigenden Temperaturen von den Reaktionsprodukten zu den Reaktionsedukten. (Mahishi 2007)



Temperaturen über 2.000 °C erlauben ein breites Brennstoffspektrum, da Störstoffe bei diesen Temperaturen in der Regel schmelzen. Darüber hinaus eignen sich diese Prozesse auch für gefährliche Abfälle, da die Schlacke verglast.

Für die Wasserstoffausbeute ist die Vergasung bei Atmosphärendruck optimal; bei höheren Drücken sinkt sie. Niedrigere Drücke hingegen erhöhen die Ausbeute nur gering, so dass der technische Aufwand einer Vergasung bei Unterdruck nicht gerechtfertigt ist (Mahishi 2007). Eine spezielle Konstellation zeigt sich am Beispiel des Bioliq-Verfahrens (Kap. 6.3.1). Es ist für die Synthese von künstlichen Treibstoffen und nicht für Wasserstoff ausgelegt. Da für die Synthese hohe Drücke erforderlich sind, findet auch die Vergasung schon bei hohem Druck statt, so dass eine Gaskompression vor der Synthese entfällt.

5.3.3 Weitere Einflüsse

Auch das Verhältnis von Wasserdampf zu Einsatzstoff nimmt einen Einfluss auf die Wasserstoffausbeute: Je höher das Verhältnis, desto höher ist die Ausbeute. Ab einem Verhältnis von 1,5 (bei 1000 K, 1 bar) erhöht sie sich nur noch geringfügig. Angesichts des hohen Energiebedarfs für die Erzeugung des Wasserdampfs wird daher ein Verhältnis < 3 vorgeschlagen. (Mahishi 2007)

Mit Hilfe der Sorption Enhanced Gasification (SEG) kann die Ausbeute weiter erhöht werden. Dabei wird Kohlendioxid in situ im Vergasungsreaktor durch ein Adsorptionsmittel gebunden. Dadurch verschiebt sich das Reaktionsgleichgewicht weiter in Richtung Wasserstoff. Als Adsorptionsmittel sind billige natürliche Materialien wie Kalkstein geeignet. Es muss anschließend regeneriert werden (Parvez 2021). Dafür eignen sich vor allem allotherme Vergaser mit einer Brennkammer, wie etwa der DFB-Vergaser (Kapitel 6.3.3).

6 Vergasungsanlagen

In diesem Abschnitt werden Verfahrensentwicklungen zur Vergasung von Abfall vorgestellt und in Steckbriefen charakterisiert. Die Anlagenkonzepte beruhen auf den zuvor dargestellten Vergasertypen (Kap. 4.2.2) und sind proprietäre Lösungen mit individuellen Kombinationen von Verfahrensschritten und spezifischen Ausprägungen, die sich je deutlich von den Konzepten anderer Hersteller unterscheiden.

Drei relevante Verfahren, zu denen Anlagen nicht mehr in Betrieb sind, werden eingangs vorgestellt. Die weitere Darstellung ist untergliedert nach realisierten Anlagen für den Einsatzstoff Abfall, realisierten Anlagen für die Einsatzstoffe Biomasse und Klärschlamm, bei denen das Produktgas nicht unmittelbar energetisch genutzt wird, sowie Anlagenkonzepte in Entwicklung.

Die öffentliche Verfügbarkeit von Informationen zu den Technologien und deren Qualität ist uneinheitlich. Durch Fragebögen und Interviews wurden nach Möglichkeit ergänzende Informationen bei den Anlagenherstellern eingeholt. Die Zusammenstellung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Markenschutzzeichen sind nicht angegeben.

Viele der Verfahren sind ursprünglich nicht für eine Wasserstoffproduktion entwickelt, und die vorliegenden Realisierungen dienen in den meisten Fällen nicht primär der Wasserstoffproduktion. Über eine Anpassung der Verfahrensparameter kann die Wasserstoffausbeute gesteigert werden (s. Kapitel 5.3). Darüber hinaus kann selbst bei einer geringen Ausbeute im Vergaser diese über nachgeschaltete Aggregate gesteigert werden, indem das Produktgas mittels Dampfreformierung und Wassergas-Shift-Reaktion nachbehandelt wird. Inwiefern eine solche Optimierung zielführend ist, hängt allerdings von der Einbindung des Vergasers in die Gesamtanlage ab.

Die Verfahren werden auf ihre grundlegende Eignung zur Wasserstoffgewinnung durch Abfallvergasung nach verschiedenen Kriterien bewertet. Hierbei steht das Symbol ⊕ für Stärken und ⊖ für Schwächen. Der TRL (technology readiness level, nach EC 2014) schätzt den technischen Entwicklungsstand des vollständigen Prozesses für die Gewinnung von Wasserstoff aus Abfällen ab. Die Einschätzung fußt auf den recherchierten Informationen und ist als orientierend anzusehen. Berücksichtigt wurden die Entwicklungsstufe (Labor, Prototyp, Demonstration, kommerziell), die Nähe zur Einsatzumgebung (Einbindung in eine typische Peripherie, u.a. durch Energie- und Stoffströme, aber auch: Abfall als Input, Wasserstoff als Output) sowie die Dauer eines erfolgreichen Betriebs. Die Verfahren haben für die Einsatzstoffe und Produkte, für die sie ursprünglich entwickelt wurden, oft einen höheren TRL als für die Wasserstoffherstellung. Wenn sie zwar im Industriemaßstab umgesetzt sind, aber bislang keinen Wasserstoff produzieren, wird nachfolgend ein TRL von maximal 6 angesetzt („Technologie in Einsatzumgebung demonstriert“).

In den Steckbrief-Bewertungen steht ⊕ für grundsätzlich geeignet, ⊙ für gegebenenfalls geeignet und ⊖ für ungeeignet. In Kapitel 6.5 folgt eine Zusammenfassung dieser Bewertungen.

6.1 Frühere, nicht mehr verfügbare Abfallvergasungsanlagen

6.1.1 SVZ Schwarze Pumpe GmbH, Deutschland

Im Industriepark Schwarze Pumpe wurde zunächst Braunkohle in Festbettdruckvergäsern (Schachtvergäsern mit Drehrost) umgesetzt, um Stadtgas zu erhalten (Umweltbundesamt 2017). Im Gaskombinat wurde von 1955 bis 1990 Rohbraunkohle zu Briketts, Strom, Koks und Gas verarbeitet. Später wurden in diesen Reaktoren unterschiedliche Abfälle, u.a. EBS-Pellets aus Hausmüll, unter Zumischung von Kohle eingesetzt. Seit 2007 sind die Anlagen stillgelegt und wurden zurückgebaut. Nebenanlagen zur Teerabscheidung, Entphenolung, Extraktion und Destillation emittierten Schadstoffe in den Boden. Die Sanierungsarbeiten dauern bis heute an. (LMBV 2018)

Für die Vergasung von Abfällen waren drei Vergasertypen genehmigt: Festbettdruckvergaser, Flugstromvergaser für flüssige und pastöse Abfälle und Vergaser von British Gas/Lurgi (BGL). BGL-Vergaser nutzen

Wasserdampf und Sauerstoff bei 25 bar. Die Asche wird aufgeschmolzen (Schlackebad) und anschließend durch Wasser gekühlt und erstarrt (Higman 2008). Der eingesetzte Restabfall wurde mehrstufig mittels Vorzerkleinerung, Siebtrommel, Eisen- und Nichteisen-Abscheider, Nachzerkleinerer, Granulator, Trockner, Siebung, Siehter und Pelletierung aufbereitet. Teilweise wurde aus dem Synthesegas nach einer Konvertierungsanlage Methanol hergestellt. Letztendlich konnte keine dauerhafte Verfügbarkeit der Anlage erreicht werden. Da der Betrieb nicht wirtschaftlich war, wurde die Abfallvergasung 2007 eingestellt. (Umweltbundesamt 2017)

6.1.2 Advance Plasma Power Ltd

Die britische Firma Advance Plasma Power plante, 2016 eine Plasmavergasungsanlage für Ersatzbrennstoffe in Swindon, Wiltshire, England zu errichten. Dafür gründete sie zusammen mit der Firma Progressive Energy die Firma Go Green Fuels. Nach Beginn der Arbeiten stiegen die Kosten jedoch an, so dass Go Green Fuels Insolvenz anmeldete (Let's Recycle 2019). Nach Presseinformation soll am Standort statt einer Vergasungsanlage eine Müllverbrennungsanlage errichtet werden (Let's Recycle 2020). Die Website von Advanced Plasma Power ist offline.

6.1.3 Thermostelect

Das Thermostelect-Verfahren besteht aus einer Pyrolyse bei 600 °C und einem nachgeschalteten Hochtemperatur-Schmelz- und Vergasungsprozess mit 2000 °C (Abbildung 8). Konzipiert wurde das Verfahren für die kombinierte Behandlung von Siedlungsabfällen wie Hausmüll, hausmüllähnlichen Gewerbeabfälle, Sperrmüll sowie entwässertem oder getrocknetem Klärschlamm. Als Vergasungsmittel wird Sauerstoff eingesetzt. Um die hohen Temperaturen zu erreichen, wird Erdgas oder Propan eingesetzt. Das erzeugte Synthesegas besteht aus ca. 32 % CO, 32 % H₂, 27 % CO₂ sowie Wasser und Stickstoff (Alternative Resources Inc. 2007).

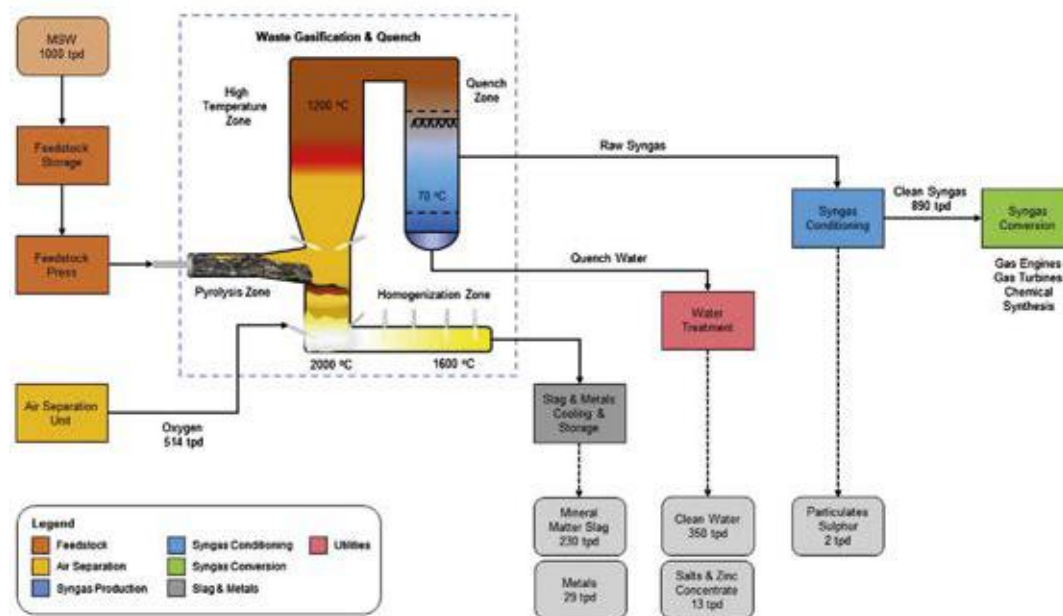


Abbildung 8: Schematische Darstellung des Thermostelect-Verfahrens (Perkins 2020)

Nach einer mehrstufigen Gasreinigung wird das Synthesegas zur Gewinnung von Strom eingesetzt. Das Prozesswasser wird aufbereitet und wiederverwendet. Eine in Karlsruhe gebaute Anlage wurde aufgrund von technischen Problemen stillgelegt. Bauarbeiten einer Anlage in Ansbach wurden 2002 eingestellt. Weitere Projektplanungen in Deutschland wurden verworfen. Es gibt derzeit sechs Thermoselect-Anlagen in Japan mit Kapazitäten zwischen 120 und 550 t/d. Der Inhaber der Lizenzen in Japan JFE gab bekannt, dass die Anlagen aufgrund der hohen Kosten nicht mehr angeboten werden (Perkins 2020). Der amerikanische Lizenzinhaber Interstate Waste Technologies führt die Anlagen noch auf seiner Webseite (Interstate Waste Technologies 2021).

Obgleich das Verfahren nicht mehr angeboten wird, sind angesichts seiner Bekanntheit in Tabelle 5 wesentliche Informationen zusammengestellt.

Tabelle 5: Technologiesteckbrief Thermoselect

Sitz des Herstellers	Italien, USA (Lizenzträger)
Anlagen	1 stillgelegt, 1 geplant, aber nicht gebaut, 6 in Betrieb
Vergasertyp	Gegenstrom-Festbettvergaser
Einsatzstoffe	Siedlungsabfälle wie Hausmüll, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle, Sperrmüll sowie entwässerten oder getrockneten Klärschlamm
Output	Verglaste Schlacke, Strom
Temperatur	2.000 °C
Vergasungsmittel	Sauerstoff
Durchsatz pro Linie	120–550 t/d
Entwicklungsstand	TRL 6 (bisher keine Produktion von Wasserstoff)

Stärken und Schwächen

Industrielle Erfahrung	<ul style="list-style-type: none"> ⊕ Mehrere großtechnische Anlagen ⊖ Schlechte Erfahrungen in Deutschland ⊖ In Japan aufgrund der hohen Kosten nicht mehr angeboten
Produktgasqualität, H ₂	<ul style="list-style-type: none"> ⊕ Hohe Produktgasqualität durch den Einsatz von Sauerstoff ⊖ Bisher keine Produktion von Wasserstoff
Einsatzstoffe	⊕ Breites Spektrum
Reststoffe	⊕ Verglaste Schlacke
Bewertung	⊖ Das Verfahren erscheint zur Wasserstoffherstellung aus Abfällen nicht geeignet und wird nicht mehr vermarktet.

6.2 Aktuell realisierte Anlagen für Abfall

6.2.1 Ebara Ube Process

Ebara ist eine japanische Firma, die Wirbelschichtvergasungsanlagen anbietet. Das Verfahren wurde Pressurized twin internally circulating fluidized-bed gasification system (Twin Rec) genannt (Ciuta 2018) und wird in Kooperation mit UBE Industries Ltd. als Ebara Ube Process (EUP) weiterentwickelt (Ebara 2021b). Dabei wird erst in einem Wirbelschichtvergaser bei ca. 600 °C ein Synthesegas erzeugt, das anschließend in einer Brennkammer bei ca. 1400 °C teiloxidiert wird. Es gibt derzeit 12 Anlagen, in denen Siedlungsabfälle und industrielle Abfälle umgesetzt werden. Die jährliche Kapazität liegt zwischen 14.400 und 126.000 t. Drei Anlagen stehen in Korea, der Rest in Japan (Ciuta 2018). Der Chemikalienhersteller Showa Denko nahm 2003 eine großtechnische Ebara-Anlage zur Produktion von Wasserstoff aus Kunststoffabfällen in Betrieb. Die Kunststoffabfälle erfordern dabei eine aufwändige Aufbereitung zu Briketts.

Die Vergasung läuft in zwei Schritten ab. Beim ersten Schritt werden die Briketts konstant von oben der Wirbelschicht zugeführt und bei einer Temperatur zwischen 600 °C und 800 °C vergast. Als Vergasungsmittel wird eine Mischung aus Sauerstoff und Wasserdampf verwendet. Es entsteht ein Gemisch aus Wasserstoff, Kohlenstoffmonoxid, Kohlenwasserstoffe, Kohle und Partikel. Das Produktgas wird dem zweiten Vergaser zugeführt. Asche, Metalle und andere anorganische Stoffe werden ausgetragen. Vorgeheizter Sauerstoff und Wasserdampf werden von oben und der Seite zugeführt. Durch die Teiloxidation des Gases werden Temperaturen von 1300–1500 °C erreicht. Dadurch wird die Asche geschmolzen, und die entstehende Schlacke nach unten geführt. Am Boden des Reaktors werden das Gas und die Schlacke mit zuge düstem Wasser abgekühlt, bevor sie in ein Wasserbad geführt werden. Die Schlacke sammelt sich am Boden des Wasserbads und kann dort abgeführt werden. (Ebara 2021a, vgl. Abbildung 9)

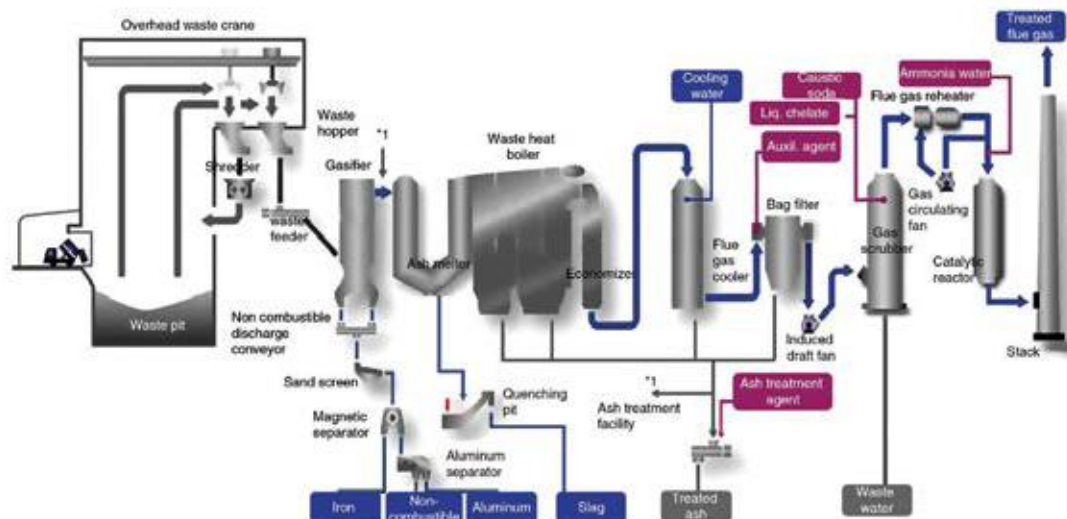


Abbildung 9: Schematische Darstellung des Ebara TwinRec-Verfahrens

Das Synthesegas wird anschließend einem alkalischen Wäscher zugeführt. Dabei werden Salzsäure und andere Halogenverbindungen entfernt. Durch eine Wassergas-Shift-Reaktion wird die Wasserstoffausbeute erhöht. Anschließend werden Schwefelverbindungen abgetrennt. Das Gas wird gekühlt und verdichtet, um das CO₂ zu verflüssigen und abzutrennen. Das CO₂ wird als Trockeneis vermarktet. Der Wasserstoff wird zusammen mit fossilem Wasserstoff (ca. 33 %) zur Produktion von Ammoniak eingesetzt. (Quicker 2019, Ebara 2021b)

Tabelle 6: Technologiesteckbrief Ebara Ube (Ciuta 2018; Umweltbundesamt 2017)

Sitz des Herstellers	Japan
Anlagen	12
Vergasertyp	Wirbelschichtvergaser
Einsatzstoffe	Kunststoffabfälle, Schredderrückstände, EBS, Klärschlamm, Altreifen, Altöl (Ebara 2021b). Korngröße < 150 mm
Output	Strom, Wärme, Wasserstoff zur Produktion von Ammoniak
Temperatur	Erste Stufe 600 °C, zweite Stufe 1400 °C
Vergasungsmittel	Sauerstoff und Wasserdampf
Durchsatz pro Linie	42–150 t/d
Entwicklungsstand	TRL 8–9 (eine Anlage zur Wasserstoffproduktion mit langjähriger Betriebserfahrung)

Stärken und Schwächen

Industrielle Erfahrung	<ul style="list-style-type: none"> ⊕ Hoher Entwicklungsstand, Erfahrungswerte durch kommerzielle Anlagen ⊕ Bereits Erfahrung in der Produktgasaufbereitung zu Wasserstoff ⊖ Anlagen in Asien bei dortigen wirtschaftlichen und rechtlichen Bedingungen
Produktgasqualität, Wasserstoffherstellung	<ul style="list-style-type: none"> ⊕ Hohe Produktgasqualität durch den Einsatz von Sauerstoff und Wasserdampf ⊕ Erfahrung in der Produktgasaufbereitung zu Wasserstoff
Einsatzstoffe	<ul style="list-style-type: none"> ⊖ Hoher Aufbereitungsgrad des Einsatzstoffes bei der Anlage zur Wasserstoffherstellung notwendig ⊖ Wasserstoffproduktion bisher nur aus Kunststoffabfällen, Eignung von anderen Abfällen muss abgeklärt werden
Bewertung	<ul style="list-style-type: none"> ⊕ Das Verfahren erscheint zur Wasserstoffherstellung aus Abfällen grundsätzlich geeignet.

6.2.2 InEnTec / Plagazi

Die amerikanische Firma InEnTec bietet ein Plasmavergasungsverfahren für Abfälle an. In einem Gleichstromfestbettvergaser wird mit Sauerstoff und Wasserdampf bei 800–1200 °C ein wasserstoffreiches Synthesegas produziert. Die festen Rückstände Kohle und Asche werden anschließend in einem plasmagestützten Schmelzprozess bei ca. 1400 °C weiter umgesetzt. Das in den beiden Prozessen erzeugte Synthesegas kann bei 1400 °C weiterreagieren (InEnTec 2021). Teere werden hierbei zerstört. Als feste Rückstände entstehen Metalle und verglaste Schlacke. InEnTec hat nach eigenen Angaben zwei Anlagen in den USA, zwei in Japan und je eine in Taiwan und in Malaysia in Betrieb. Außerdem entwickelt InEnTec in einem aktuellen Horizon-2020-Projekt an einer Anlage zur Produktion von 30.000 t/a Flugzeugtreibstoff mit. Dafür wird das im Vergaser gebildete Synthesegas in einem bakteriellen Fermenter in Ethanol umgewandelt (Lanzatech 2021). InEnTec hat mit Plagazi ein Kooperationsabkommen für Europa unterzeichnet. Plagazi plant derzeit in Premnitz eine Anlage zur Produktion von Wasserstoff aus Abfällen (Plagazi 2021).

Tabelle 7: Technologiesteckbrief InEnTec / Plagazi

Sitz des Herstellers	USA
Anlagen	6
Vergasertyp	Zweistufig: Festbettvergaser und Plasmavergaser
Einsatzstoffe	Nicht-recyclebare Abfälle, wie nicht-recyclebare Kunststoffe, Schredderrückstände, medizinische und gefährliche Abfälle (Plagazi 2021b)
Output	Verglaste Schlacke, Synthesegas
Temperatur	800–1200 °C im ersten Schritt, 1400 °C im zweiten Schritt
Vergasungsmittel	Sauerstoff und Wasserdampf
Entwicklungsstand	TRL 7 (eine Demonstrationsanlage, die aktuell Synthesegas produziert und in Zukunft Wasserstoff produzieren soll)

Stärken und Schwächen

Industrielle Erfahrung	<ul style="list-style-type: none"> ⊕ Hoher Entwicklungsstand, Erfahrungswerte durch kommerzielle Anlagen ⊕ Bereits Anlagen in Europa in Planung
Produktgasqualität, H ₂	<ul style="list-style-type: none"> ⊕ Hohe Produktgasqualität durch Einsatz von Sauerstoff und Wasserdampf ⊕ Bereits Pläne zur Produktgasaufbereitung zu Wasserstoff ⊕ Keine praktische Erfahrung mit Produktgasaufbereitung zu Wasserstoff
Einsatzstoffe	keine Angabe zum Aufbereitungsgrad der Abfälle. Optional können Abfälle vorzerkleinert oder vorge-trocknet werden (je nach Korngröße und Wassergehalt) (WO2010066281A1)
Reststoffe	⊕ Verglaste Schlacke
Bewertung	⊕ Das Verfahren erscheint zur Wasserstoffherstellung aus Abfällen grundsätzlich geeignet.

6.2.3 Direct Melting System von Nippon Steel

Nippon Steel & Sumikin Engineering Co. Ltd. hat das Direct Melting System entwickelt. Nippon Steel ist der größte Hersteller von Vergasungsanlagen in Japan. Hauptsächlich werden Gegenstrom-Festbettvergaser eingesetzt. Als Vergasungsmittel wird sauerstoffangereicherte Luft eingesetzt, mit ca. 36 Vol-% Sauerstoff. Die Vergasung findet bei ca. 1800 °C statt. Koks in einer Menge von 5–10 % des Inputmaterials dient dazu, die hohen Temperaturen zu erreichen und die Rückstände zu verglasen. Zur Entschwefelung und als Flussmittel wird Kalkstein verwendet. Das Synthesegas wird anschließend mit Luftüberschuss in einer Brennkammer bei 1100 °C verbrannt. Produkte des Prozesses sind Elektrizität und Schlacke. Nippon hat derzeit mehr als 33 Anlagen in Betrieb; Standorte sind hauptsächlich in Japan und Korea. Sie haben Kapazitäten zwischen 30.000 und 200.000 t/a.

Tabelle 8: Technologiesteckbrief Direct Melting System (Nippon Steel)

Sitz des Herstellers	Japan
Anlagen	>33
Vergasertyp	Gegenstrom-Festbettvergaser
Einsatzstoffe	Siedlungsabfälle, EBS, Klärschlamm, Schredderleichtfraktion. Korngröße <800 mm
Output	Verglaste Schlacke, Strom, Wärme
Temperatur	1800 °C
Vergasungsmittel	Luft und Sauerstoff
Durchsatz pro Linie	48–264 t/h
Entwicklungsstand	TRL 6 (bisher keine Produktion von Wasserstoff)

Stärken und Schwächen

Industrielle Erfahrung	<ul style="list-style-type: none"> ⊕ Hoher Entwicklungsstand, Erfahrungswerte durch kommerzielle Anlagen ⊖ Anlagen bisher nur in Asien bei dortigen wirtschaftlichen und rechtlichen Rahmenbedingungen
Produktgasqualität, H ₂	<ul style="list-style-type: none"> ⊖ Durch den Einsatz von Luft geringe Produktgasqualität, somit aufwändige Aufbereitung ⊖ Bisher keine Produktion von Wasserstoff
Einsatzstoffe	<ul style="list-style-type: none"> ⊕ Breites Spektrum ⊖ Je nach Einsatzstoff zusätzlicher Einsatz von Kohle notwendig
Reststoffe	<ul style="list-style-type: none"> ⊕ Verglaste, dadurch inerte, in der Deponierung unkritische Schlacke
Bewertung	<ul style="list-style-type: none"> ⊖ Das Verfahren erscheint zur Wasserstoffherstellung aus Abfällen gegebenenfalls geeignet.

6.2.4 Enerkem

Enerkem ist eine kanadische Firma, die Wirbelschichtvergasungsanlagen für die Vergasung von Siedlungsabfällen zur Produktion von Methanol und Ethanol anbietet. Eine kommerzielle Anlage für Ersatzbrennstoffe wurde 2016 in Edmonton in Betrieb genommen und hat eine Kapazität von 100.000 t/a. Als Vergasungsmittel werden Wasserdampf und Sauerstoff eingesetzt. Die Vergasung findet bei einem Druck zwischen 1 und 5 bar und einer Temperatur von ca. 750 °C statt. Aufgrund der geringen Vergasungstemperatur enthält das Produktgas relevante Mengen an Teer, das in einem weiteren Prozessschritt mittels Wasserdampfreformierung umgesetzt werden kann. Nach einer Wärmerückgewinnung wird das Produktgas gequench, und Schwefelwasserstoff, Schwermetalle und CO₂ werden entfernt (Perkins 2020). Das entstandene Methan reagiert in Anwesenheit eines Katalysators mit dem Kohlenstoffmonoxid zu Methanol oder Ethanol (Patent US8080693B2).

Gemeinsam mit Shell plant Enerkem derzeit eine Abfallverwertungsanlage, um aus geringwertigen gemischten Rückständen aus dem Recycling Flugbenzin und sonstige Kraftstoffe und Rohstoffe für die Chemikalienproduktion herzustellen. Die Anlage soll bis zu 360.000 t/a verarbeiten und ca. 80.000 t/a Output produzieren. Eine finale Investitionsentscheidung soll Ende 2022 fallen. (EUWID 2021)

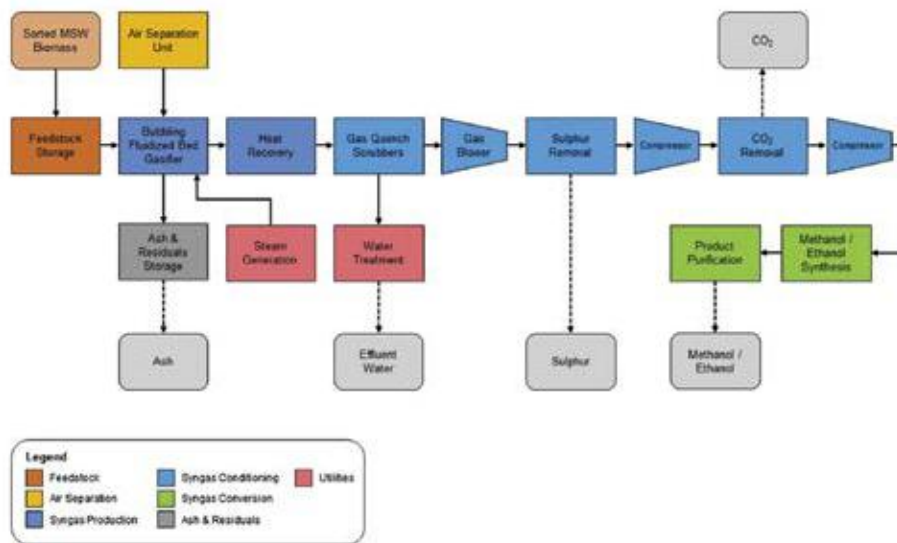


Abbildung 10: Schematische Darstellung des Enerkem-Verfahrens (Perkins 2020)

Tabelle 9: Technologiesteckbrief Enerkem

Sitz des Herstellers	Kanada
Anlagen	1
Vergasertyp	Wirbelschichtvergaser
Einsatzstoffe	Siedlungsabfälle, EBS. Korngröße 120–230 mm
Output	Asche, Methanol
Temperatur	750 °C
Vergasungsmittel	Sauerstoff und Wasserdampf
Durchsatz pro Linie	270 t/d
Entwicklungsstand	TRL 6 (bisher keine Produktion von Wasserstoff)

Stärken und Schwächen

Industrielle Erfahrung	⊖ Wenig kommerzielle Erfahrung
Produktgasqualität, H ₂	⊕ Hohe Gasqualität durch Einsatz von Sauerstoff und Wasserdampf ⊕ Bereits Erfahrung in der Produktgasaufbereitung ⊖ Bisher keine Produktion von Wasserstoff
Einsatzstoffe	⊕ Breites Spektrum
Bewertung	⊖ Das Verfahren erscheint zur Wasserstoffherstellung aus Abfällen gegebenenfalls geeignet.

6.2.5 Energoss

Die britische Firma ENER-G bietet unter dem Namen ENERGOS Vergasungsanlagen für Abfälle an. Dabei wird über eine Rostvergasung mit anschließender Verbrennung Strom und Wärme aus Abfällen erzeugt. Durch die Verbrennung des Produktgases entfällt eine aufwändige Gasaufbereitung. Der Vorteil gegenüber der reinen Verbrennung liegt in einem höheren Wirkungsgrad. Der Abfall wird dafür auf eine Korngröße < 150 mm zerkleinert. Von Energoss gibt es sieben großtechnische Vergasungsanlagen von Sied-

lungsabfällen mit jährlichen Kapazitäten zwischen 30.000 t/a und 78.000 t/a, davon fünf in Norwegen und jeweils eine in Großbritannien und Deutschland. Die deutsche Anlage steht in Minden und wurde 2001 in Betrieb genommen (Ciuta 2018). Energus wurde 2016 aufgrund von Liquiditätsproblemen unter Insolvenzverwaltung gestellt (Let's Recycle 2016).

Tabelle 10: Technologiesteckbrief Energus (Ciuta 2018)

Sitz des Herstellers	Vereinigtes Königreich
Anlagen	7
Vergasertyp	Vorschubrostvergaser
Einsatzstoffe	Siedlungsabfälle, Gewerbeabfälle, EBS. Korngröße < 150 mm
Output	Strom und Wärme
Temperatur	900 °C
Vergasungsmittel	Luft
Durchsatz pro Linie	120–144 t/d
Entwicklungsstand	TRL 6 (bisher keine Produktion von Wasserstoff)

Stärken und Schwächen

Industrielle Erfahrung	<ul style="list-style-type: none"> ⊕ Mehrere großtechnische Anlagen ⊕ Bereits Anlagen in Europa/Deutschland ⊖ Liquiditätsprobleme des Herstellers
Produktgasqualität, H ₂	<ul style="list-style-type: none"> ⊖ Geringe Produktgasqualität, d. h. aufwändige PG-Aufbereitung durch den Einsatz von Luft ⊖ Bisher keine Produktion von Wasserstoff ⊖ Aufgrund der direkten Verbrennung keine Erfahrung in der Produktgasaufbereitung ⊖ geringe Vergasungstemperatur kann zu Teer im Produktgas führen
Einsatzstoffe	<ul style="list-style-type: none"> ⊕ Breites Spektrum
Bewertung	<ul style="list-style-type: none"> ⊖ Das Verfahren erscheint zur Wasserstoffherstellung aus Abfällen nicht geeignet.

6.2.6 Kobelco

Kobelco Eco-Solutions Co., Ltd. ist eine japanische Firma, die Wirbelschichtvergasungsanlagen zur Erzeugung von Strom herstellt. Dabei dient die Vergasung als Vorstufe für den anschließenden Verbrennungs- und Ascheschmelzprozess. Im Vergasungsschritt werden Materialien wie Eisen und Aluminium wiedergewonnen. Im darauffolgenden Schmelzprozess werden das Produktgas, die Asche und kohlenstoffhaltige Partikel bei Temperaturen über 1200 °C und einem geringen Luftüberschuss verbrannt oder geschmolzen. Die Netto-Effizienz der Stromerzeugung ist abhängig von der notwendigen Energie für den Schmelzprozess und liegt bei 9–17 % (Materazzi 2017). Kobelco hat mindestens 12 kommerzielle Anlagen in Japan (Arena 2012).

Tabelle 11: Technologiesteckbrief Kobelco

Sitz des Herstellers	Japan
Anlagen	12
Vergasertyp	Wirbelschichtvergaser
Einsatzstoffe	Abfälle (nicht genauer spezifiziert)
Output	Schlacke, Strom
Temperatur	<900 °C
Vergasungsmittel	Luft
Durchsatz pro Linie	30–175 t/d
Entwicklungsstand	TRL 6 (bisher keine Produktion von Wasserstoff)

Stärken und Schwächen

Industrielle Erfahrung	<ul style="list-style-type: none"> ⊕ Mehrere großtechnische Anlagen ⊖ Anlagen bisher nur in Asien bei dortigen wirtschaftlichen und rechtlichen Rahmenbedingungen
Produktgasqualität, H₂	<ul style="list-style-type: none"> ⊖ Bisher keine Produktion von Wasserstoff ⊖ Vergasung und Verbrennung des Produktgases stark miteinander verflochten, d. h. Aufbereitung zu Wasserstoff würde große Anpassungen der Technologie erfordern ⊖ aufwändige Produktgasaufbereitung durch den Einsatz von Luft ⊖ geringe Vergasungstemperatur kann zu Teer im Produktgas führen
Bewertung	<ul style="list-style-type: none"> ⊖ Das Verfahren erscheint zur Wasserstoffherstellung aus Abfällen nicht geeignet.

6.2.7 Sierra Energy

Die amerikanische Firma Sierra Energy bietet das Fast-Ox-Vergasungsverfahren für nichtrecycelbare Abfälle an, einschließlich Siedlungsabfälle, Biomasse, Schredderleichtfraktion, Altreifen, medizinische Abfälle, gefährliche Abfälle und Gewerbeabfälle. Der wichtigste Parameter ist der Kohlenstoffgehalt, da durch ihn die notwendige Menge Vergasungsmittel (Sauerstoff und Wasserdampf) bestimmt wird. Andere Parameter wie Wassergehalt und Partikelgröße beeinflussen die Effizienz des Verfahrens, werden aber über die Vorbehandlung kontrolliert. Je nach Anlagengröße wird der Einsatzstoff vorher auf eine Korngröße von 2,5–7,5 cm bei einer Anlagenkapazität 10–25 t/d und kleiner 15 cm bei größeren Anlagen geschreddert. Um eine hohe Effizienz zu gewährleisten, sollte der Wassergehalt kleiner 20 % sein (Sierra Energy 2021a). Es gibt eine kommerzielle Anlage in Fort Hunter Liggett, die 2018 in Betrieb genommen wurde und im Februar 2019 die Demonstrationsphase abschloss. Die Anlage produziert Synthesegas aus Holzabfällen und soll zukünftig Elektrizität und flüssige Treibstoffe produzieren (SERDP 2021). Zwei Anlage mit einem Durchsatz von 100 t/d zur Herstellung von Wasserstoff sind derzeit in Planung. (Sierra Energy 2021b)

Tabelle 12: Technologiesteckbrief Sierra Energy

Sitz des Herstellers	USA
Anlagen	1
Vergasertyp	Gegenstrom-Festbettvergaser
Einsatzstoffe	Siedlungsabfälle, Biomasse, Schredderleichtfraktion, Altreifen, medizinische Abfälle, gefährliche Abfälle und Gewerbeabfälle. Korngröße <150 mm bei Anlagenkapazität >25 t/d
Output	Verglaste Schlacke, Strom, Kraftstoffe, Wasserstoff, Ammoniak
Temperatur	2.200 °C
Vergasungsmittel	Sauerstoff und Wasserdampf
Durchsatz pro Linie	50 t/d
Entwicklungsstand	TRL 6–7 (bisher keine Produktion von Wasserstoff, laut Hersteller jedoch mögliches Zielprodukt)

Stärken und Schwächen

Industrielle Erfahrung	⊖ Wenig kommerzielle Erfahrung ⊖ Anlage erst seit kurzem im Betrieb
Produktgasqualität, H ₂	⊕ Wasserstoffherstellung bereits in Planung ⊕ Hohe Produktgasqualität durch den Einsatz von Sauerstoff und Wasserdampf ⊖ Bisher keine praktische Erfahrung mit der Aufbereitung des Produktgases zu Wasserstoff
Einsatzstoffe	⊕ Breites Spektrum
Reststoffe	⊕ Verglaste Schlacke
Bewertung	⊕ Das Verfahren erscheint zur Wasserstoffherstellung aus Abfällen grundsätzlich geeignet.

6.2.8 Alter NRG / Westinghouse

Hauptanbieter von Plasmavergasern war Alter NRG. Die Firma betrieb von 1990 bis 2015 eine Demonstrationsanlage in den USA. Seit 2002 wurden zudem mehrere kommerzielle Anlagen in Japan, China und Indien in Betrieb genommen. Einsatzstoffe der Anlagen sind Siedlungsabfall, Altreifen, Klärschlamm, gefährliche Abfälle, Biomasse, medizinische Abfälle oder Flugasche. Die Anlagen haben Kapazitäten von 24 t/d bis 220 t/d. Wie viele der Anlagen aktuell noch in Betrieb sind, ist unklar. Die größte Anlage in Utashinai (Japan) mit einer Kapazität von 220 t/d wurde aufgrund von Rohstoffmangel stillgelegt, der durch die verzögerte Inbetriebnahme und den dadurch ausgelaufenen Lieferverträgen verursacht wurde. Eine Demonstrationsanlage in Yoshi (Japan) mit einer Kapazität von 151 t/d wurde 2004 am regulären Ende des Pilotprogramms ebenfalls stillgelegt. Eine 2009 in Pune (Indien) in Betrieb genommene Anlage produzierte aufgrund von technischen Schwierigkeiten nie Synthesegas oder Strom (Arcadis 2017). Zu der Anlage in Wuhan (China), die 2012 in Betrieb genommen wurde, konnten keine aktuellen Informationen gefunden werden. Alter NRG wurde 2015 von der chinesischen Firma Sunshine Kaidi aufgekauft (waste today 2015), für die 2018 finanzielle Probleme berichtet wurden (Caixin 2018). Zum aktuellen Status von Alter NRG waren keine Angaben recherchierbar.

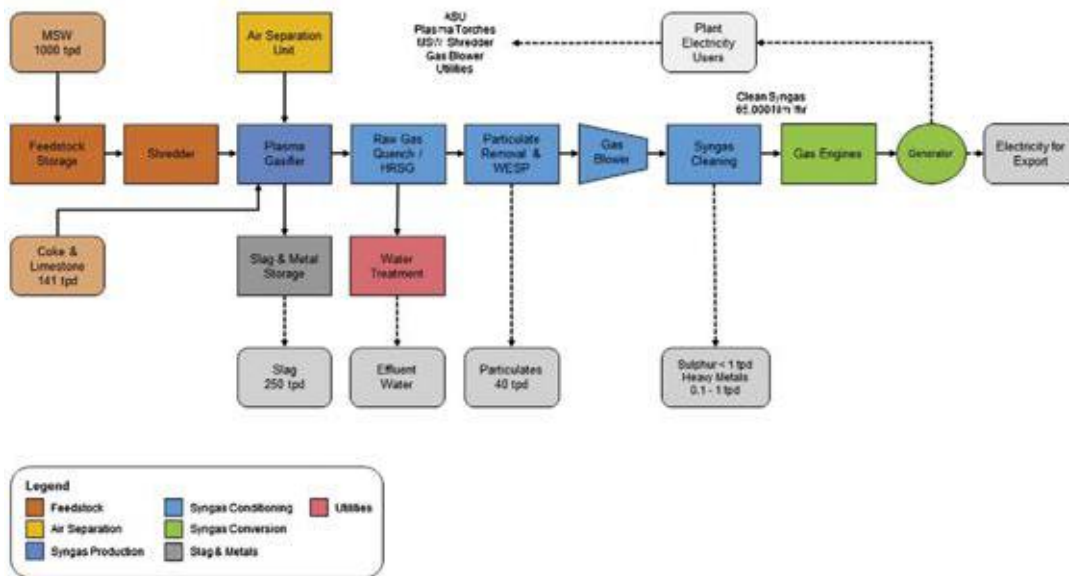


Abbildung 11: Schematische Darstellung des AlterNRG-Verfahrens (Perkins 2020)

Tabelle 13: Technologiesteckbrief Alter NRG

Sitz des Herstellers	China
Anlagen	unbekannt
Vergasertyp	Plasmavergaser
Einsatzstoffe	Siedlungsabfall, Altreifen, Klärschlamm, gefährliche Abfälle, Biomasse, medizinische Abfälle oder Flugasche
Output	Verglaste Schlacke, Strom,
Temperatur	
Vergasungsmittel	Sauerstoff, Wasserdampf
Durchsatz pro Linie	
Entwicklungsstand	TRL 6 (bisher keine Produktion von Wasserstoff)

Stärken und Schwächen

Industrielle Erfahrung	<ul style="list-style-type: none"> ⊖ Viele Anlagen stillgelegt ⊖ Status derzeit unbekannt ⊖ Bisher keine Anlagen in Europa
Produktgasqualität, H ₂	<ul style="list-style-type: none"> ⊕ Hohe Produktgasqualität durch den Einsatz von Sauerstoff und Wasserdampf ⊖ Bisher keine Aufbereitung des Produktgases zu Wasserstoff
Einsatzstoffe	⊕ Breites Brennstoffspektrum
Reststoffe	⊕ Verglaste Schlacke
Bewertung	⊕ Das Verfahren erscheint zur Wasserstoffherstellung aus Abfällen grundsätzlich geeignet. Der Firmenstatus ist jedoch unbekannt.

6.2.9 CHO Power / Europlasma

CHO-Power betrieb eine Plasmavergasungsanlage zur Gewinnung von Strom und Wärme in Morcenx (Frankreich) mit einer Kapazität von 200 t/d. Eingesetzte Abfälle waren in erster Linie Papier/Pappe/Karton, Kunststoffe aus Sortieranlagen sowie Altholz (CHO Power 2020). Laut einer Pressemitteilung soll die Anlage aufgrund notwendiger Reinvestitionen in Höhe von 30 Millionen Euro stillgelegt werden (Europlasma 2020).

Laut Hersteller sind zwei weitere Anlagen in Frankreich geplant, wobei zumindest die Pläne für die Anlage in Thouars derzeit aufgrund der schlechten Erfahrungen in Morcenx in Frage gestellt werden (la Nouvelle République 2021). Der aktuelle Planungsstand der Anlage in Locminé ist nicht näher bekannt.

Table 14: Technologiesteckbrief CHO Power

Sitz des Herstellers	Frankreich
Anlagen	1 (bereits stillgelegt)
Vergasertyp	Plasmavergaser
Einsatzstoffe	Papier/Pappe/Karton, Kunststoffe, Altholz
Output	Verglaste Schlacke, Strom,
Temperatur	850 °C
Vergasungsmittel	Luft, Wasserdampf
Durchsatz pro Linie	200 t/d
Entwicklungsstand	TRL 6 (bisher keine Produktion von Wasserstoff)

Stärken und Schwächen

Industrielle Erfahrung	⊖ Nur eine kommerzielle Anlage, die stillgelegt wurde
Produktgasqualität, H ₂	⊖ Geringe Produktgasqualität, d. h. aufwändige PG-Aufbereitung durch den Einsatz von Luft ⊖ Bisher keine Produktion von Wasserstoff ⊕ Erfahrung in Europa
Reststoffe	⊕ Verglaste Schlacke
Bewertung	⊖ Das Verfahren erscheint zur Wasserstoffherstellung aus Abfällen nicht geeignet.

6.3 Vergasungsanlagen für Biomasse und Klärschlamm ohne direkte Verbrennung des Produktgases

6.3.1 Bioliq vom KIT

Das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) hat den Bioliq-Prozess entwickelt. Ziel des Prozesses ist die Produktion von synthetischen Kraftstoffen und Chemikalien aus Biomasse. Die Technologie ist ein zwei-stufiger Prozess, bei dem zunächst dezentral eine Pyrolyse zur Produktion eines transportfähigen Schlammes aus Restbiomasse (z. B. Stroh) und anschließend eine zentralen Vergasung durchgeführt werden. Die Vergasungsstufe der Pilotanlage wurde in Kooperation mit AirLiquide E&C entwickelt und aufgebaut. Zum Einsatz kommt eine Flugstromvergasung bei einer Temperatur von 1.200 °C und einem Druck von 8 MPa. Als Vergasungsmittel werden Sauerstoff und Wasserdampf eingesetzt. Das erzeugte Synthesegas ist laut Projektseite teerfrei und methanarm (Karlsruher Institut für Technologie 2021).

Tabelle 15: Technologiesteckbrief Bioliq / KIT

Sitz des Herstellers	Deutschland
Anlagen	1
Vergasertyp	Vorbehandlung durch Pyrolyse, Flugstromvergaser
Einsatzstoffe	Restbiomasse bzw. Pyrolyseschlamm
Output	Synthetische Kraftstoffe/Chemikalien
Temperatur	1.200 °C
Vergasungsmittel	Sauerstoff und Wasserdampf
Entwicklungsstand	TRL 5 (bisher keine Produktion von Wasserstoff, Pilotanlage)

Stärken und Schwächen

Industrielle Erfahrung	⊖ Bisher keine kommerzielle Anlage
Produktgasqualität, H ₂	⊕ Hohe Produktgasqualität durch den Einsatz von Sauerstoff und Wasserdampf ⊖ Bisher keine Produktion von Wasserstoff
Einsatzstoffe	⊖ Hoher Aufbereitungsgrad des Einsatzstoffes (Pyrolyse) ⊖ Bisher nur Biomasse als Brennstoff
Bewertung	⊙ Das Verfahren erscheint zur Wasserstoffherstellung aus Abfällen gegebenenfalls geeignet.

6.3.2 SÜLZLE KOPF Syngas

SÜLZLE KOPF Syngas ist ein Entwickler und Hersteller von Wirbelschichtvergasern für Klärschlämme zur Produktion von Wärme oder zur Kraft-Wärme-Kopplung. Es gibt insgesamt drei kommerzielle Anlagen von Sülzle Kopf, in Balingen, Mannheim und Koblenz. In Balingen wurde 2002 eine Pilotanlage gebaut, die 2010 erweitert wurde. Getrockneter Klärschlamm wird bei ca. 800 °C vergast. Das aufbereitete Produktgas erzeugt in einem Blockheizkraftwerk Strom und Wärme. Die Anlage in Mannheim wurde 2011 in Betrieb genommen und ist mutmaßlich nicht mehr in Betrieb, da der Schlamm der Kläranlage laut Betreiber-Website in die Zementindustrie geht (Mannheim 2021). Die Inbetriebnahme der Anlage in Koblenz war nach Angaben des Herstellers 2017 geplant. Die endgültige Abnahmemessung in Koblenz wurde im Sommer 2020 durchgeführt. Seitdem war die Anlage bis zur ersten umfangreichen Revision ab November 2020 im Dauerbetrieb.

Tabelle 16: Technologiesteckbrief SÜLZLE KOPF Syngas

Sitz des Herstellers	Deutschland
Anlagen	3
Vergasertyp	Wirbelschichtvergaser
Einsatzstoffe	Klärschlamm
Output	Wärme bzw. Wärme und Strom
Temperatur	850–900 °C
Vergasungsmittel	Luft
Durchsatz pro Linie	2.000–5.000 t/a
Entwicklungsstand	TRL 6 (bisher keine Produktion von Wasserstoff)

Stärken und Schwächen

Industrielle Erfahrung	<ul style="list-style-type: none"> ⊕ Bereits kommerzielle Erfahrung in Deutschland ⊖ Erfahrungen mit den Anlagen nicht optimal
Produktgasqualität, H₂	<ul style="list-style-type: none"> ⊖ Geringe Produktgasqualität, d. h. aufwändige Aufbereitung durch den Einsatz von Luft ⊖ Bisher keine Produktion von Wasserstoff ⊖ geringe Vergasungstemperatur kann zu Teer im Produktgas führen
Einsatzstoffe	<ul style="list-style-type: none"> ⊖ Bisher nur Klärschlamm als Brennstoff
Bewertung	<ul style="list-style-type: none"> ⊖ Das Verfahren erscheint zur Wasserstoffherstellung aus Abfällen nicht geeignet.

6.3.3 Dual Fluidized Bed (DFB)

Das DFB Verfahren wurde erstmals in einer 100 kW_{th} Pilotanlage an der TU Wien umgesetzt. Der Prozess besteht aus zwei Reaktoren. In einem findet die allotherme Vergasung mit Wasserdampf statt, im anderen wird über einen Verbrennungsprozess die Wärme erzeugt. Die Wärmeübertragung zwischen den beiden Reaktoren erfolgt dabei über das Bettmaterial. Die Vergasungstemperatur beträgt zwischen 750 und 850 °C. Im weiterentwickelten Verfahren ist die Vergasung in zwei Teile geteilt. Dabei folgt auf den ersten Vergasungsschritt ein zweiter Schritt, bei dem bei Temperaturen zwischen 900 und 970 °C eine Reformierung und ein Cracking von Teer stattfinden (Mauerhofer 2019). Seit der Entwicklung des Prozesses wurde das Anlagenkonzept mehrmals von verschiedenen Lieferanten umgesetzt (Tabelle 17).

Repotec ist eine österreichische Firma, die das DFB-Verfahren umgesetzt hat. 2001 wurde in Güssing die erste Anlage zur Produktion von Strom und Wärme aus Hackschnitzeln in Betrieb genommen. Die Anlage hatte einen Umsatz von ca. 2.500 kg/h. Nach dem Auslaufen des Ökostromtarifes wurde die Anlage 2016 stillgelegt. (Güssing 2021)

Tabelle 17: DFB-Vergaser (IEA Bioenergy 2019)

Ort	Verwendung	Inbetriebnahme	Lieferant	Status
Güssing (AT)	Gasmotor	2002	AE&E, Repotec	stillgelegt
Oberwart (AT)	Gasmotor, H ₂	2008	Ortner Anlagenbau	stillgelegt
Senden (DE)	Gasmotor	2011	Repotec	stillgelegt*
Burgeis (IT)	Gasmotor	2012	Repotec/RevoGas	in Betrieb
Göteborg (S)	Biogas	2013	Repotec/Valmet	stillgelegt
Californien (USA)	F&E	2013	GREG	in Betrieb
Gaya (FR)	Biogas, F&E	2016	Repotec	im Bau
Nonbua (THA)	Gasmotor	2018	GRETHA	in Betrieb

* Wird mit neuer Vergasungstechnologie fortgeführt, siehe 6.4.6

Ein weiteres Werk wurde 2011 in Senden in Betrieb genommen. Nach einer Störung, bei der Thermoöl durch ein Leck in die Rohre mit dem Produktgas eingedrungen war, wurde die Anlage aufgrund zu hoher Reparaturkosten sowie einer fehlenden Teilgenehmigung 2019 stillgelegt (Südwest-Presse 2019). Die Anlage soll mit neuer Vergasungstechnologie wieder in Betrieb gehen (siehe Kapitel 6.4.6). Nach Verzögerungen bei zwei Großprojekten meldete Repotec 2016 Insolvenz an (meinbezirk.at 2016).

Das Verfahren der finnischen Firma Valmet baut ebenfalls auf dem DFB-Verfahren auf. Als Vergasungsmittel wird Luft und teilweise Wasserdampf eingesetzt. Haupteinsatzstoff ist Biomasse. Eine 2012 in Betrieb genommene Anlage in Lathi (Finnland) setzt jedoch Gewerbe- und Haushaltsabfälle ein. Nach der Vergasung wird das Produktgas verbrannt. Der elektrische Wirkungsgrad wird mit über 30 % angegeben. (Valmet 2021)

Das GoBiGas-Projekt (Gothenburg Biomass Gasification) lief von 2005 bis 2018 und war ein Projekt der Göteborg Energi AB. 2014 ging die Demonstrationsanlage in Betrieb. Der Prozess der Anlage bestand aus zwei Schritten. Als erster Schritt wurde Biomasse in einem DFB- (dual fluidized bed-)Vergasungsschritt in ein Produktgas umgesetzt. Im zweiten Schritt erfolgte die Umsetzung zu Methan. Die Vergasungsanlage wurde von Valmet errichtet. Die Anlage konnte mit Holzpellets oder getrockneten Hackschnitzeln betrieben werden, wobei sie hauptsächlich mit Pellets betrieben wurde. Im Februar 2018 erreichte die Anlage 1800 h kontinuierlichen Betrieb und 100 % der geplanten Kapazität. Nachdem die Ziele erreicht waren, entschied Göteborg Energi, dass der weitere Betrieb der Anlage nur gerechtfertigt wäre, wenn die Anlage kommerziell betrieben werden kann, die Anlage also von einer Demonstrationsanlage in eine kommerzielle Anlage weiterentwickelt werden könnte. Unter den 2018 gegebenen Bedingungen war dies jedoch nicht möglich. Die Anlage wurde stillgelegt – mit der Option einer Wiederinbetriebnahme, sollten sich die Marktbedingungen ändern.

Repotec ist darüber hinaus am französischen Gaya-Projekt beteiligt. Das Projekt hat das Ziel, die Machbarkeit der Herstellung von Biomethan durch Biomassevergasung zu demonstrieren. (Gaya 2014)

Tabelle 18: Technologiesteckbrief Dual Fluidized Bed (DFB) / GoBiGas

Sitz des Herstellers	Entwickelt in Österreich
Anlagen	8, davon 4 stillgelegt und eine im Bau
Vergasertyp	Wirbelschichtvergaser (allotherm)
Einsatzstoffe	Holzpellets, Hackschnitzel
Output	Methan
Temperatur	900 °C
Vergasungsmittel	Wasserdampf
Entwicklungsstand	TRL 7–8 (Wasserstoffproduktion wurde getestet)

Stärken und Schwächen

Industrielle Erfahrung	<ul style="list-style-type: none"> ⊕ Bereits Erfahrungen in Europa ⊖ Viele Anlagen bereits stillgelegt
Produktgasqualität, H₂	<ul style="list-style-type: none"> ⊕ Hohe Produktgasqualität durch den Einsatz von Wasserdampf ⊖ Bisher keine Produktion von Wasserstoff ⊖ Anlagen sind optimiert auf Methanproduktion ⊖ geringe Vergasungstemperatur kann zu Teer im Produktgas führen
Brennstoffe	<ul style="list-style-type: none"> ⊖ Bisher nur Erfahrung mit Biomasse
Bewertung	<ul style="list-style-type: none"> ⊕ Das Verfahren erscheint zur Wasserstoffherstellung aus Abfällen grundsätzlich geeignet.

6.3.4 Cortus Energy

Cortus Energy ist eine schwedische Firma, die die WoodRoll Technik entwickelt hat. Dabei wird ein Einsatzstoff zunächst getrocknet und pyrolysiert. Anschließend gehen die festen und gasförmigen Produkte der Pyrolyse in einen Vergaser und werden mit Dampf bei ca. 1.100 °C umgesetzt. In einer Pilotanlage in Köping wurden verschiedene Abfallströme getestet. Der Bau der ersten kommerziellen Anlage begann 2018 in Höganäs. Die Anlage ging 2019 in Betrieb. (Cortus Energy 2021) Die Anlage setzt Biokohle ein, die in der Anlage in Köping produziert wird. Ziel ist der Ersatz von Erdgas in einem Stahlwerk. (Bioenergy international 2020)

Tabelle 19: Technologiesteckbrief Cortus Energy

Sitz des Herstellers	Schweden
Anlagen	1
Vergasertyp	Flugstromvergaser
Einsatzstoffe	Biokohle aus Biomasse
Output	Produktgas
Temperatur	1.100 °C
Vergasungsmittel	Wasserdampf
Entwicklungsstand	TRL 6 (bisher keine Produktion von Wasserstoff, laut Hersteller geplant)

Stärken und Schwächen

Industrielle Erfahrung	⊕ Bereits Erfahrungen in Europa ⊖ Bisher wenig kommerzielle Erfahrung
Produktgasqualität, H ₂	⊕ Hohe Produktgasqualität durch den Einsatz von Wasserdampf ⊖ Bisher keine Aufbereitung des Produktgases zu Wasserstoff
Einsatzstoffe	⊖ Bisher nur Erfahrung mit Biomasse ⊖ Hoher Aufbereitungsgrad des Einsatzstoffes (Pyrolyse)
Bewertung	⊕ Das Verfahren erscheint zur Wasserstoffherstellung aus Abfällen grundsätzlich geeignet.

6.3.5 Carbona BFB von Andritz

Die Vergasungstechnologie Carbona Bubbling Fluidized Bed (Carbona BFB) von Andritz wurde ursprünglich für die Kohlevergasung vom Gas Technology Institute in den USA entwickelt. Andritz hat das Wirbelschichtverfahren zur Nutzung von Biomasse angepasst. Andritz verfügt über zwei Pilotanlagen, eine für die Vergasung mit Luft und eine für die Vergasung mit Sauerstoff. Eine erste kommerzielle Anlage für Hackschnitzel in Skive (Dänemark) ging 2008 in Betrieb. Als Vergasungsmittel kommt Luft mit Wasserdampf zum Einsatz. (Andritz 2021)

Tabelle 20: Technologiesteckbrief Andritz Carbona BFB

Sitz des Herstellers	Finnland
Anlagen	1
Vergasertyp	Wirbelschichtvergaser
Einsatzstoffe	Hackschnitzel
Output	Strom und Wärme
Vergasungsmittel	Luft oder Sauerstoff
Entwicklungsstand	TRL 6 (bisher keine Produktion von Wasserstoff)

Stärken und Schwächen

Industrielle Erfahrung	⊕ Bereits Erfahrungen in Europa ⊖ Bisher wenig kommerzielle Erfahrung
Produktgasqualität, H ₂	⊕ Bei Einsatz von Sauerstoff hohe Produktgasqualität ⊖ Bisher keine Aufbereitung des Produktgases zu Wasserstoff
Einsatzstoffe	⊖ Bisher nur Erfahrung mit Biomasse
Bewertung	⊖ Das Verfahren erscheint zur Wasserstoffherstellung aus Abfällen gegebenenfalls geeignet.

6.3.6 Nexterra

Nexterra baut aktuell Gegenstromvergasungsanlagen für Holz, Altholz, saubere Bauabfälle und Feststoffe aus Klärschlamm. Laut Hersteller wird an EBS, Geflügelstreu, Kompostmaterial, Rutenhirse und landwirtschaftliche Abfällen als Einsatzstoff gearbeitet.

Tabelle 21: Technologiesteckbrief Nexterra

Sitz des Herstellers	Kanada
Anlagen	9 (teilweise noch im Bau, unklar wieviele davon Demonstrations- und Pilotanlagen sind)
Vergasertyp	Festbettvergaser (Gegenstrom)
Einsatzstoffe	Holz, Bauabfälle, Feststoffe aus Klärschlamm
Output	Strom und Wärme, indem das Synthesegas verbrannt wird und die Wärme einem Dampfturbinenprozess zugeführt wird
Temperatur	815–980 °C
Vergasungsmittel	Wasserdampf und/oder Sauerstoff
Entwicklungsstand	TRL 6 (bisher keine Produktion von Wasserstoff)

Stärken und Schwächen

Industrielle Erfahrung	⊖ Bisher wenig kommerzielle Erfahrung
Produktgasqualität, H ₂	⊕ Hohe Produktgasqualität durch den Einsatz von Sauerstoff und Wasserdampf ⊖ geringe Vergasungstemperatur kann zu Teer im Produktgas führen ⊖ Bisher keine Aufbereitung des Produktgases zu Wasserstoff
Einsatzstoffe	⊖ Bisher nur Erfahrung mit Biomasse
Bewertung	⊕ Das Verfahren erscheint zur Wasserstoffherstellung aus Abfällen grundsätzlich geeignet.

6.4 Anlagen und Projekte in Entwicklung

6.4.1 Fulcrum Bioenergy / ThermoChem Recovery International, Inc (Trilnc)

Fulcrum Bioenergy baut aktuell in Nevada eine Anlage zur Produktion von synthetischem Rohöl aus Siedlungsabfällen. Dabei werden zwei Wirbelschichtvergasungsschritte hintereinander durchgeführt. Eine Demonstrationsanlage von Trilnc hat eine Betriebszeit von über 10.000 h und zeigt laut Trilnc die Machbarkeit des Prozesses.

6.4.2 RedRock Biofuels / TCG

Red Rock Biofuels baut aktuell eine Anlage in Lakeview (Oregon) zur Vergasung von Biomasse mit anschließender Fischer-Tropsch-Synthese zur Produktion von synthetischen Kraftstoffen. Zum Einsatz kommt der Vergaser von TCG. Die Anlage soll im Frühjahr 2021 fertiggestellt werden.

6.4.3 Bio Energy Netherlands/Zero Point CleanTech

Bio Energy Netherlands hat in Amsterdam eine Anlage zur Vergasung von Biomasse. Zum Einsatz kommt ein Gegenstromvergasen von ZeroPoint Clean Tech. Aktuell wird Strom und Wärme produziert. Geplant ist, über die Wassergas-Shift-Reaktion in Zukunft Wasserstoff und Kohlendioxid zu produzieren. (Bio Energy Netherlands 2021)

6.4.4 VärmlandsMetanol

Värmlandsmetanol AB plant eine Anlage zur Produktion von 375 m³/d Methanol aus 1.100 t/d Biomasse. Zum Einsatz kommen soll ein Vergaser von Thyssenkrupp.

6.4.5 Synova

Synova erwarb die Rechte an der von ECN (heute TNO) entwickelten Vergasungstechnologie. Das Verfahren basiert auf einem Wirbelschichtvergasen (MILENA) und dem Teerentfernungssystem OLGA. Das Standardmodul hat einen Input von ca. 6 MW und einen Output von ca. 1,5 MW_{el}. Das größte Modul soll 25 MW_{el} erreichen. Als Inputstrom sollen EBS aus Siedlungsabfällen eingesetzt werden.

6.4.6 Blue Energy Group

Blue Energy Group plant, den in Senden stillgelegten Vergaser zu ersetzen und dort aus Holz Wasserstoff zu produzieren.

6.4.7 Furec von RWE

Das Projekt Furec (Fuse Reuse Recycle) von RWE hat das Ziel, aus Abfall Wasserstoff zu produzieren. Die Vergasungsanlage soll im Industriepark Chemelot in Limburg entstehen. Eine Investitionsentscheidung soll 2023 fallen. (RWE 2020).

6.4.8 SGH₂ Energy

SGH₂ Energy plant derzeit eine Anlage zur Gewinnung von Wasserstoff aus Abfällen in Lancaster (Kalifornien). Die Anlage soll 11 t Wasserstoff am Tag erzeugen. Im Jahr sollen dabei 40.000 t Abfall eingesetzt werden. Die Anlage soll 2023 in Betrieb genommen werden. (SGH₂ 2021)

6.4.9 EQTEC

EQTEC ist eine Firma mit Sitz im Vereinigten Königreich. 2011 wurde eine Anlage zur Wirbelschichtvergasung von Pressrückständen von Oliven in Movialsa in Betrieb genommen. Als Vergasungsmittel kommt Luft oder Sauerstoff zum Einsatz. Nach eigenen Angaben erreichte die Anlage seitdem 110.000 Betriebsstunden. Derzeit ist eine Abfallvergasungsanlagen in Haverton Hill in Planung. Die Anlage soll 25 MW_{el} erzeugen und jährlich 200.000 t nicht recyclingfähigen Siedlungsabfall umsetzen. (EQTEC 2021)

6.4.10 BlueFLUX Energy

Blueflux Energy mit Sitz in Peißenberg entwickelt ein zweistufiges Verfahren, das Reststoffe aus Landwirtschaft, Kommune und Industrie wie Klärschlamm, Bioabfälle, Gülle und Kunststoffe in Wasserstoff

und als Nebenprodukt Bio-Kohle umwandelt. Die erste Stufe ist eine Verkohlung, die zweite ein Flugstromvergaser. Pilotanlagen wurden im Forschungsrahmen betrieben. (BlueFLUX 2022)

6.4.11 Green Hydrogen Technology

Green Hydrogen Technology GmbH ist eine Firma aus Augsburg, die eine Versuchsanlage in Leoben (Österreich) errichtet. Die Anlage soll Mitte 2022 in Betrieb gehen und Wasserstoff erzeugen. Das Verfahren besteht aus zwei Stufen: In der ersten Stufe wird Klärschlamm verbrannt. Mit dem dabei entstehenden Heißgas werden in einer zweiten Stufe Holz- oder Plastikabfälle zu Wasserstoff umgesetzt. (Green Hydrogen Technology GmbH 2022)

6.5 Zusammenfassende Bewertung der realisierten Verfahren

Abbildung 12 zeigt die in den Kapiteln 6.2 und 6.3 zur Wasserstoffherstellung aus Abfällen als gegebenenfalls geeignet oder geeignet eingestuftten Verfahren in Zuordnung zu den Vergasertypen. In Tabelle 22 sind die Bewertungen dieser Verfahren nach wesentlichen Kriterien zusammengefasst. Sie basieren auf dem anhand verfügbarer Informationen erfassten Entwicklungsstand und sollen eine Weiterentwicklung der Verfahren nicht ausschließen. Die Darstellung dient als Übersicht zum Stand der Entwicklung.

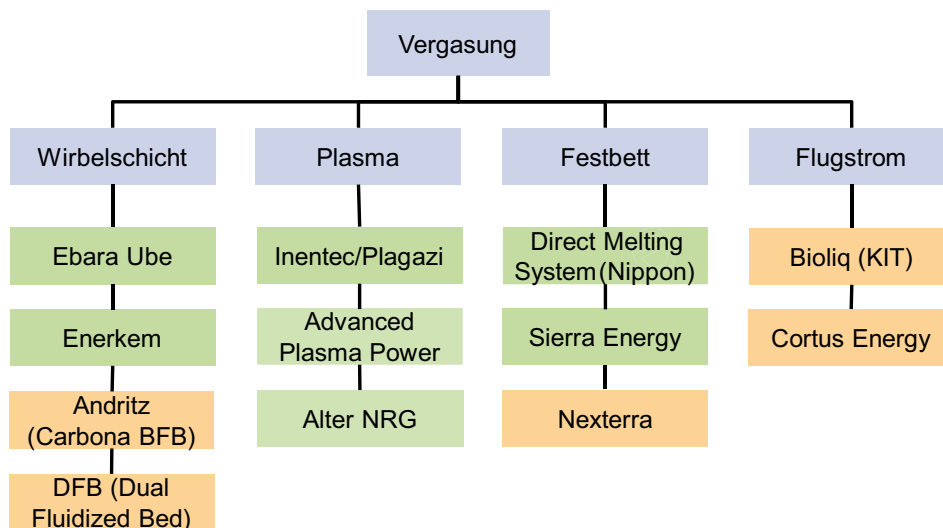


Abbildung 12: Zuordnung der am geeignetsten Verfahren zu den unterschiedlichen Technologien. Grün schattiert: Abfall als Einsatzstoff. Orange schattiert: Biomasse als Einsatzstoff. Graue Schrift: Anbieter nicht mehr am Markt oder Status unbekannt

Tabelle 22: Einschätzungen zu wesentlichen Kriterien und entsprechende Bewertung der Verfahren. Der TRL ist eine Abschätzung des aktuellen Entwicklungsgrads des Verfahrens zur Produktion von Wasserstoff aus Abfällen. Verfahren, die aktuell keinen Wasserstoff produzieren, werden maximal mit TRL 6 eingestuft

■ gute Eignung ■ mittlere Eignung ■ geringe Eignung

	Breite des Brennstoffspektrums	Notwendiger Aufbereitungsgrad	Notwendiger F&E-Aufwand Gasaufbereitung	TRL
Wirbelschichtvergaser				
EBARA UBE	mittel	mittel	niedrig	8–9
Enerkem	mittel	mittel	hoch	6
BFB (Andritz)	eng	mittel	hoch	6
DFB	mittel	mittel	mittel	7–8
Plasmavergaser				
InEnTec/Plagazi	breit	mittel	mittel	7
Festbettvergaser				
Direct Melting System (Nippon Steel)	breit	niedrig	hoch	6
Sierra Energy	breit	niedrig	mittel	6–7
Nexterra	mittel	mittel	hoch	6
Flugstromvergaser				
Bioliq (KIT)	eng	hoch	hoch	5
Cortus Energy	eng	hoch	mittel	6

7 Wirtschaftlichkeit und Treibhausgasemissionen

7.1 Wirtschaftliche Bewertung

Unabdingbar für eine zukünftige Realisierung der thermochemischen Technologien ist, dass die Akteure am Markt ökonomische Vorteile generieren können. Einflüsse auf die Wirtschaftlichkeit von Vergasungstechnologien wurden untersucht. Dabei sind zum einen die Aufwendungen für Investitionen in die Anlagentechnik oder in Änderungen bestehender Anlagen und Infrastrukturen zu betrachten. Zum anderen müssen die Kosten für den laufenden Betrieb einschließlich Instandhaltung berücksichtigt werden.

Die Datenlage stellt sich als divers dar, zumal eine Vielzahl unterschiedlicher Technologien und Verfahrensdetails sowie unterschiedliche Einsatzstoffe existieren. Angaben reichen von spezifischen Kostangaben pro kg Wasserstoff bis hin zu detaillierten Wirtschaftlichkeitsberechnungen. Am Beispiel von Kraussler (2018) kann für die ökonomische Betrachtung ein erster, nachvollziehbarer Einblick gewonnen werden.

Für eine 100-MW-Ausführung des DFB-Vergasers berechnete Kraussler (2018) mit Bezugsjahr 2017 ein Gesamtinvest von 77 Mio. €. Die jährlichen Kosten in Abbildung 13 ergeben sich aus der Bepreisung der in der Massenbilanz genannten Stoff- und Energieströme (vgl. Tabelle 25) sowie aus nachvollziehbaren Aufschlägen für Personal, Instandhaltung, Versicherung und Steuern und Produktionsgemeinkosten. Die Anlage wird auf 20 Jahre abgeschrieben, die Diskontrate beziehungsweise der Return on Invest mit 10 % angesetzt. Mittels Kapitalwertmethode ermittelte Kraussler (2018) für das DFB-Verfahren einer 100-MW-Anlage einen Wasserstoffpreis von 4,20 €/kg.

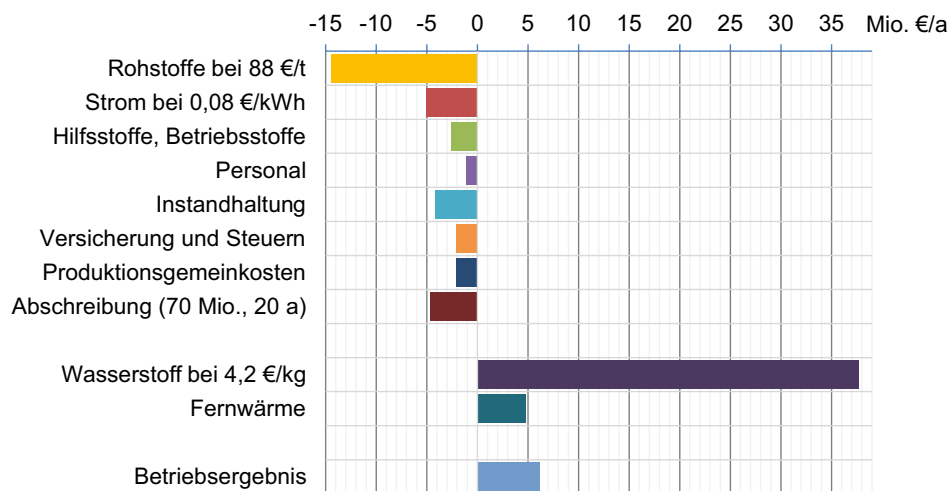


Abbildung 13: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung eines DFB-Vergasers mit 100 MW Leistung nach Kraussler (2018).
Input 164.000 t Hackschnitzel pro Jahr.

Der errechnete Wasserstoffpreis erscheint damit aktuell (2021) nur bedingt konkurrenzfähig gegenüber konventionellen fossilen Verfahren mit 1,5–5 €/kg Wasserstoff (ASUE 2021). Die Produktionskosten von grünem Wasserstoff aus Elektrolyse liegen heute zumeist bei 5–8 €/kg, mit denen der hier ermittelte Wert für die Vergasung konkurrenzfähig wäre.

Abbildung 13 zeigt den hohen Anteil und damit Einfluss der Rohstoffkosten für das beschriebene Verfahren auf: Der Bezug von Hackschnitzeln stellt über 40 % der operativen Gesamtkosten. Ließe sich das Verfahren für die Verwertung von Abfallstoffen adaptieren, ist dagegen mit niedrigeren Zukaufspreisen bis hin zu Zuzahlungen für die Annahme zu rechnen.

Weitere Publikationen mit wirtschaftlichen Angaben sind älteren Datums oder nicht ausreichend nachvollziehbar (DBFZ 2013, Ducharme 2010, Herstellerangaben).

Auf Basis öffentlich verfügbarer Daten kann erwartungsgemäß keine definitive Aussage zur Wirtschaftlichkeit von Vergasungsanlagen und zu deren ökonomischen Vorteilhaftigkeit gegenüber Verbrennungsanlagen getroffen werden. Seitens der Anlagenanbieter liegen zwar Aussagen für einen wirtschaftlichen Betrieb der Vergasungsanlagen mit einem konkurrenzfähigen Wasserstoffpreis vor. Die meisten Konzepte müssen sich jedoch in der Praxis noch unter realen Rahmenbedingungen unter Beweis stellen.

Zu berücksichtigen ist, dass es langjährige Realisierungen in anderen Ländern gibt, und dass die Randbedingungen und Marktpreise in der Energiewirtschaft sich stark wandeln. So ist der Preis von fossil hergestelltem Wasserstoff im Laufe des Jahres 2021 parallel zu den Energiepreisen und den Preisen für Emissionszertifikate stark gestiegen. In einer übergreifenden Perspektive kann gefolgert werden: Eine zukünftige kommerzielle Tragfähigkeit der Vergasung von Gewerbeabfällen zu Wasserstoff liegt im Bereich des Realistischen; sie ist jedoch von den Randbedingungen abhängig. Starken Einfluss nehmen dabei der Abfall-Annahmeerlös und der Wasserstofferlös, aber auch Investitionskosten und die Anlagenverfügbarkeit im Dauerbetrieb.

7.2 Ökobilanzielle Bewertung – CO₂-Fußabdruck

Auch die ökobilanzielle Analyse ist auf wenige vorliegende und für die Auswertung vervollständigte Angaben aus Publikationen gestützt, ergänzt durch Ergebnisse der vorigen Kapitel. Ermöglicht werden damit ein grundlegendes Bild und ein Verständnis der wesentlichen Einflüsse. Betrachtet wird die Wirkungskategorie Treibhauspotenzial.

7.2.1 Funktionelle Einheit und Systemgrenzen

Verglichen werden der Vergasungs- und der Verbrennungspfad zur Erzeugung von Wasserstoff aus Abfall. Effekte dadurch, dass die Abfallmengen gegebenenfalls in unterschiedlichem Ausmaß anderen Entsorgungswegen entzogen werden, werden nicht betrachtet.

CO₂, das aus der Oxidation der Abfallstoffe resultiert, wird bei einer Verbrennung gleichwie bei einer Vergasung emittiert. Diese Emissionen könnten aus der Betrachtung herausfallen, wenn 1 t Abfall als funktionelle Einheit gewählt würde. Mit Blick auf den Wasserstoffbedarf wird folgend jedoch 1 t Wasserstoff als funktionelle Einheit festgesetzt. Die direkten CO₂-Emissionen aus der Oxidation der Abfallstoffe müssen daher bilanziert werden. Sie werden insgesamt dargestellt, also auch der biogene Anteil. Eine ökobilanziell gebotene Beschränkung auf den fossilen Anteil wird nachfolgend diskutiert.

7.2.2 Datengrundlage

Tabelle 23 gibt einen Überblick über zwei verfügbare Studien zu den in Abschnitt 6 vorgestellten Verfahren zur Vergasung von Abfällen im kommerziellen Maßstab: Auch zum Verfahren von InEnTec/Plagazi wurden vom Hersteller Daten veröffentlicht, die jedoch als nicht belastbar einzustufen waren (DNV/Plagazi 2021). Als Referenzverfahren zur Herstellung von Wasserstoff aus Abfall wird zudem eine Abfallverbrennung mit anschließender Elektrolyse betrachtet.

Tabelle 23: Ausgewählte Verfahren mit publizierten Daten für die ökobilanzielle Betrachtung

Verfahren	Datenquelle	Beschriebener Entwicklungsstand	Abfallinput in Vergaser	Datenbasis für ökobilanzielle Betrachtung
Advanced Plasma Power: Dampf-Sauerstoff-Wirbelschichtvergasung und Plasma (Kapitel 6.1.2)	Materazzi (2019)	Hochrechnungen basierend auf einer Pilotanlage	EBS aus Siedlungsabfall	publizierte Ergebnisse
DFB: Zweibett-Wirbelschicht-Vergaser (Kapitel 6.3.3)	Kraussler (2018)	Industrielle Anlagen. Referenzanlage mit Wasserstoffherstellung abgeleitet	Hack-schnitzel	Sachbilanzdaten, eigene weitere Berechnung
Referenz: Abfallverbrennung mit anschließender Elektrolyse	Ecoinvent 3.6	Typische Anlage im kommerziellen Betrieb	gemischte Kunststoffabfälle	publizierte Ergebnisse

7.2.3 Verfahrensdaten und Einzelergebnisse zum CO₂-Fußabdruck

Im Folgenden werden die in Tabelle 23 aufgeführten Studien vorgestellt. In der Darstellungsform werden zum einen die absolut ermittelten Carbon-Footprint-Ergebnisse ausgewiesen, zum anderen aber auch die für den angestrebten Technologievergleich relevanten Teilprozesse herausgestellt, um eine gleichwertige Setzung der Systemgrenzen zu erreichen. Die Verfahren und Berechnungen werden in den folgend einzeln erläutert und in Kapitel 7.2.4 vergleichend bewertet.

7.2.3.1 Advanced Plasma Power

Materazzi (2019) publizierte Daten zum Advanced-Plasma-Power-Verfahren (vgl. Kapitel 6.1.2). Es handelt sich um eine Designstudie des Herstellers basierend auf den Betriebsdaten einer Pilotanlage. Nur die Variante „ohne CCS“ der Publikation wird folgend ausgewertet. Folgende Rahmenbedingungen sind hinterlegt:

- > Typ: Dampf-Sauerstoff-Wirbelschichtvergasung mit Vergasung in einem Wirbelschichtreaktor und anschließende Plasmabehandlung
- > Input: EBS (oder ähnliche biomassereiche Rohstoffe), Ho (trocken) 22,1 MJ/kg (Materazzi 2018)
- > Strombedarf für Plasma, Kompressoren und Nebenaggregate 4,1 kWh/kg Wasserstoff.
- > Produziert werden 360 GWh/a Wasserstoff (entsprechend 10.800 t/a)

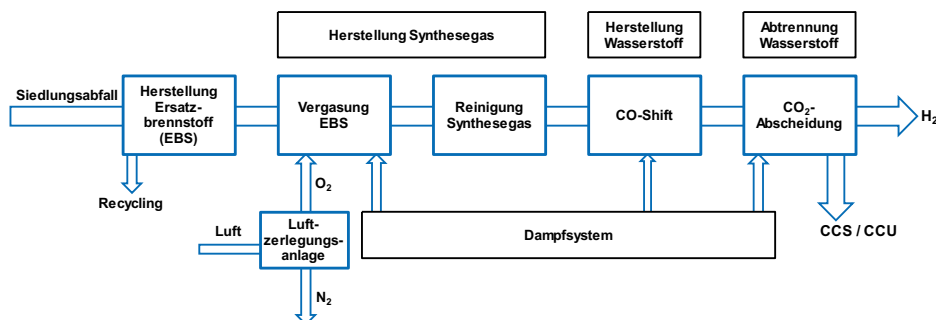


Abbildung 14: Prozessflussbild für eine Waste-to-Hydrogen-Standardanlage nach Materazzi (2019)

Indirekt lässt sich die verwendete Menge an Inputmaterial pro kg erzeugtem Wasserstoff zu 8,2 kg EBS/kg Wasserstoff berechnen. Nebenbemerkungen von Materazzi (2019) lassen auf einen teils höheren Wert von 10 kg EBS/kg Wasserstoff schließen.

Bei den Auswertungen ist zu beachten:

- > Es handelt es sich um eine theoretische Betrachtung innerhalb einer Designstudie. Eine industrielle Umsetzung dieses Verfahrens zur Gewinnung von Wasserstoff liegt nicht vor.
- > Der Emissionsfaktor des eingesetzten Stroms basiert auf Prognosedaten für das Vereinigte Königreich. Eine Umrechnung auf die Verhältnisse in Deutschland ist nur bedingt möglich. Für ihn wurde nach Materazzi (2019) ein Wert von 174 g CO₂-eq/kWh für das Bezugsjahr 2020 angesetzt. Im Vergleich zu dem Wert für den deutschen Strommix 2020 von 438 g/kWh (Umweltbundesamt 2022) ist dieser Wert niedrig.

7.2.3.2 DFB-Verfahren

Beim DFB-Verfahren handelt es sich um eine Zweibett-Wirbelschicht-Vergasung, siehe Kapitel 6.3.3. Einsatzstoff sind Holzhackschnitzel, Output ist Wasserstoff und Fernwärme. Die folgend verwendeten Angaben von Kraussler (2018) beruhen auf Daten und Messkampagnen an zwei kommerziell betriebenen Anlagen in Güssing und Oberwart (Österreich) mit je rund 8 MW Vergaserleistung, aus denen über Prozesssimulation eine 10 MW-Referenzanlage zur Herstellung von Wasserstoff abgeleitet wurde. Die Möglichkeiten einer Anlagenskalierung von 10 MW auf 50 MW oder 100 MW Brennstoffwärmeleistung werden als gegeben betrachtet, dabei werden die Angaben linear hochgerechnet.

Abbildung 15 zeigt ein Prozessschema, Tabelle 24 gibt die Sachbilanzangaben wieder. Für die im Weiteren eigenständig berechnete ökobilanzielle Betrachtung sind die Angaben auf 1 t H₂-Output normiert.

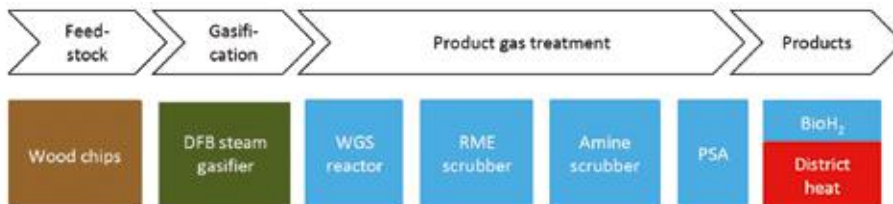


Abbildung 15: Prozessflussbild für die DFB-Vergasung von Holzabfällen (Kraussler 2018)

Tabelle 24: Stoff- und Energieströme des DFB-Verfahrens (Kraussler 2018)

	Wert	Wert pro 1 t Wasserstoff
Feuerungswärmeleistung	10 MW	89,8 MWh
Input		
Hackschnitzel (trocken)	2.050 kg/h	18.419 kg
Stromverbrauch	795 kW	7.143 kWh
Rapsmethylester	20 kg/h	180 kg
Calciumoxid	15 kg/h	135 kg
Olivin	20 kg/h	180 kg
Aufbereitetes Wasser	360 kg/h	3.235 kg

	Wert	Wert pro 1 t Wasserstoff
Output		
Asche	45 kg/h	404 kg
Wasserstoff	111 kg/h	1.000 kg
Fernwärme	1.200 kW	10.782 kW

Mithilfe von Ökobilanz-Daten u.a. aus Ecoinvent 3.6 und GaBi Professional Database 2021.1 wurden die Sachbilanzdaten aus Tabelle 24 in die Carbon-Footprint-Ergebnisse in Tabelle 25 überführt. Die Emissionsfaktoren sind in Tabelle 25 benannt.

Tabelle 25: Emissionsbeiträge des DFB-Verfahrens basierend auf der Sachbilanz in Tabelle 24 sowie angepassten Emissionsfaktoren

Ergebnisbeitrag	Emissionen in kg CO ₂ - eq/kg H ₂	Anmerkung, Quelle, Emissionsfaktor
Stromverbrauch	3,13	Strommix Deutschland 2020 mit Vorketten (Umweltbundesamt 2022); 438 g CO ₂ -eq/kWh
Rapsmethylester	0,50	Markt für Pflanzenöl-Methylester (Ecoinvent 3.6); 2,77 kg CO ₂ -eq/kg
Calciumoxid	0,16	Markt für Branntkalk, gemahlen, lose (Ecoinvent 3.6) 1,16 kg CO ₂ -eq/kg
Olivin	0,11	Markt für Schwermineralsandabbau (Ecoinvent 3.6) 637 g CO ₂ -eq/kg
Aufbereitetes Wasser	0,00	Markt für Wasser, deionisiert (Ecoinvent 3.6) 0,5 g CO ₂ -eq/kg
Asche	-0,01	Behandlung von Holzasche-Gemisch, rein, Deponie (Ecoinvent 3.6); 20 g CO ₂ -eq/kg
Fernwärme	-0,74	274 g CO ₂ -eq/kWh zur Verdrängung eines Mix aus 1/3 Ölheizung und 2/3 Gasheizung; Mix nach Fraunhofer IWES/IBP 2017, Faktoren nach Umweltbundesamt 2019
Direktemissionen aus dem C-Gehalt des Einsatzstoffs	27,1	Annahme C-Gehalt 40 %, vollständige Oxidation: 1,47 kg CO ₂ /kg Hackschnitzel. Wasserstoffausbeute 54 kg/t Hackschnitzel
Gesamt	30,3	

7.2.3.3 Abfallverbrennung mit anschließender Elektrolyse

Der Datensatz für eine typische thermische Abfallbehandlung wurde Ecoinvent 3.6 entnommen (Datensatz „Behandlung von Kunststoffabfällen, Gemisch, kommunale Verbrennungsanlage mit Flugascheabsaugung“).

Brennstoff sind gemischte Kunststoffe mit einem Heizwert von 30,8 MJ/kg. Die Anlage hat eine Rostfeuerung mit Elektrofilter für Flugasche, eine nasse Rauchgaswäsche und eine Entschwefelung. Aus dem erzeugten Strom Wasserstoff wird mittels Elektrolyse erzeugt. Zudem wird Fernwärme abgegeben. Der Netto-Stromwirkungsgrad wird mit 15,8 % angesetzt, der Netto-Wärmewirkungsgrad mit 28,5 %. Der Elektrolyseur hat einen Strombedarf von 50 kWh/kg Wasserstoff.

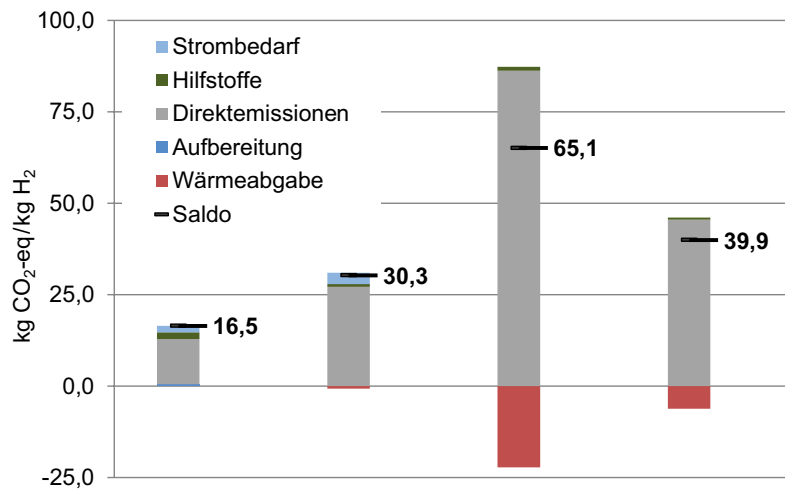
Mithilfe der Treibhausgas-Emissionsfaktoren gemäß Tabelle 25 ergeben sich Carbon-Footprint-Ergebnisse entsprechend Tabelle 26.

Tabelle 26: Carbon-Footprint-Ergebnisse einer Müllverbrennungsanlage mit Fernwärmeabgabe (Ecoinvent 3.6) und anschließender Elektrolyse zur Wasserstoffherzeugung

Ergebnisbeitrag	Emissionen in kg CO ₂ -eq/kg H ₂
Direkte Emissionen aus dem C-Gehalt des Brennstoffs	86,2
Herstellung und Bereitstellung von Hilfs- und Betriebsstoffen	1,1
Fernwärme	-22,2
Gesamt	65,1

7.2.4 Verfahrensvergleich

Abbildung 16 zeigt den CO₂-Fußabdruck für die vorgestellten Verfahren im Vergleich. Aufgrund des gewählten Bezugspunktes „Herstellung von 1 kg Wasserstoff“ werden auch die direkten Emissionen aus der Oxidation der C-Gehalte der Einsatzstoffe dargestellt (fossil und biogen). Ein relativer Vergleich mit Herausrechnen dieser Emissionen, wie in den Veröffentlichungen von Materazzi, InEnTec / Plagazi und Kraussler, ist aufgrund der unterschiedlichen Inputmengen und Abfalleigenschaften nicht sinnvoll. Bei unterschiedlichem Abfallinput pro kg erzeugtem Wasserstoff weichen die direkten Emissionen voneinander ab.



Name	Advanced Plasma	DFB	TAB	TAB Strom+	
Technik	Wirbelschicht + Plasma	Zweibett-Wirbelschicht	Verbrennung + Elektrolyse		
Abfallart	EBS (Restmüll)	Hackschnitzel	Kunststoff		
H ₂ -Ausbeute	121	54	27	51	kg H ₂ /t Input
Inputmenge	8,2	18,4	36,9	19,5	kg Input/kg H ₂
Strommix	438				g CO ₂ -eq/kWh
Wärmemix	247				g CO ₂ -eq/kWh
Aufbereitung	0,5	0,0	-	-	fossil+biogen
Direktemissionen	12,4	27,1	86,2	45,5	
Hilfstoffe	1,8	0,8	1,11	0,6	
Strombedarf	1,8	3,1	-	-	kg CO ₂ -eq/kg H ₂
Wärmeabgabe	-	-0,7	-22,2	-6,2	
Saldo	16,5	30,3	65,1	39,9	

Abbildung 16: Vergleichende ökobilanzielle Bewertung der vorgestellten Verfahren zur Herstellung von 1 kg Wasserstoff. TAB: thermische Abfallbehandlung. Inputmenge: Kehrwert der H₂-Ausbeute

Allen Varianten wurde ein Strommix mit 438 g CO₂-eq/kWh hinterlegt. Auch wärmeseitig liegt den Berechnungen der dargestellten Verfahrensoptionen mit 247 g CO₂-eq/kWh der jeweils gleiche Bezugswert zugrunde.

Trotz des angesichts unterschiedlicher Einsatzstofftypen (EBS aus Restabfall, Hackschnitzel und gemischte Kunststoffe) und -mengen nur abschätzenden Vergleichs lassen sich folgende Aussagen zur Herstellung von Wasserstoff aus Abfallstoffen festhalten:

- > Die Wasserstoffausbeute variiert zwischen 27 und 121 kg/t Einsatzstoff. Dieser Wert ist für den Vergleich bestimmend: Aufgrund einer höheren Ausbeute weisen die Vergasungstechnologien einen niedrigeren CO₂-Fußabdruck (fossil und biogen) auf als die Verbrennungsanlagen mit nachgeschalteter Elektrolyse.
- > Neben dem C-Gehalt des Brennstoffs geht die Wärmenutzung signifikant in das Ergebnis ein.

- > Wesentlichen Einfluss auf die Wasserstoffausbeute bei der thermischen Abfallbehandlung nimmt der elektrische Wirkungsgrad. Wird im Szenario „TAB Strom+“ angenommen, dieser lässt sich von 15,8 % auf 30 % steigern – gleichzeitig wird ein Absinken des thermischen Wirkungsgrads angenommen, hier von 28,5 % auf 15 % –, resultiert ein summarisch deutlich niedrigerer Emissionswert. Dennoch ist dieser höher als bei den Vergasungsverfahren.
- > Auf eine Differenzierung der CO₂-Emissionen aus dem biogenen und dem fossilen C-Anteil im Einsatzstoff wurde in der Darstellung verzichtet: Die stark differierenden biogenen Anteile in den verschiedenen Einsatzstoffen hätten den Verfahrensvergleich verzerrend überlagert. Nimmt man an, dass die Verfahren mit dem gleichen Abfallstoff betrieben werden können und hierbei die Sachbilanzen jeweils gleich bleiben, und bezieht dies etwa auf gemischte Kunststoffe (biogener C-Anteil annähernd 0 %), ändert sich das dargestellte Diagramm nicht. Für weitgehend biogene Abfallstoffe wie etwa Altholz entfallen ökobilanziell allerdings die Direktemissionen (graue Balken). Der Wärmegegewinn ist dann ergebnisbestimmend (braunrote Balken). Im Fazit verliert sich der Klimaschutz-Vorzug der Abfallvergasung zu Wasserstoff gegenüber einer Verbrennung mit nachgeschalteter Elektrolyse, wenn der Einsatzstoff weitgehend biogen ist (ohne Abbildung). Diese Aussage relativiert sich allerdings in einer Betrachtung des Gesamtsystems: Die fossilen C-Anteile der in Bayern insgesamt energetisch zu verwertenden Abfallmenge führen letztlich zu den gleichen CO₂-Emissionen, ob durch Verbrennung oder durch Vergasung. Maßgeblich sind letztlich Energieeffizienz und Ausbeute.
- > Ein Vergleich mit konventionellen Erzeugungsoptionen für Wasserstoff wie z. B. der Dampfreformierung aus Erdgas oder der Elektrolyse mittels Wind- oder PV-Strom erfolgt hier nicht. Er geht dahingehend fehl, dass diese Technologien keine Entsorgungsoption für Abfälle darstellen.

8 Potenziale, Herausforderungen und Kriterien der Vergasung von Gewerbeabfällen zu Wasserstoff

Als Schlussfolgerung aus den vorigen Darlegungen können Potenziale einer Realisierung von Vergasungsanlagen benannt werden. Die Einschätzung wird ergänzt durch Aussagen aus Experteninterviews sowie aus einem branchenübergreifenden Workshop im Rahmen der Studie.

8.1 Herausforderungen

Folgende Hürden und Herausforderungen sind zu benennen:

- > Die Machbarkeit der Technologie in der Anwendung „Gewerbeabfälle zu Wasserstoff“ ist kaum belegt. Es fehlen großtechnische Referenzanlagen vorzugsweise in Europa.
- > Die Akzeptanz der Abfallvergasung in der Bevölkerung ist wesentlich für Realisierungen an konkreten Standorten, zumal Genehmigungsverfahren in aller Regel Öffentlichkeitsbeteiligungen beinhalten.
- > Genehmigungsprozesse für große Vergasungsanlagen können sich aufwändig und langwierig gestalten.
- > Die rechtliche Einstufung von Wasserstoff aus Abfall ist zu klären. Wird Abfall als Rohstoff für grünen Wasserstoff eingestuft, oder wird eine separate Kategorie „oranger“ Wasserstoff definiert (vgl. Wencker 2021)? Wie wird grüner Wasserstoff dem Endnutzer angerechnet? Kann Vergasung zu Wasserstoff als Weg der stofflichen Nutzung eingestuft werden (vgl. § 3 Absatz 23a KrWG)?

8.2 Potenziale und Leitlinien

Die Erkenntnisse der vorigen Kapitel unterstreichen die Arbeitsthese der Studie: Die Vergasungstechnologie kann dazu beitragen, ausgewählte Gewerbeabfallströme sinnvoll zu verwerten und Wasserstoff zu erzeugen. Abfall kann als Stoff- und Energiequelle für Wasserstoff genutzt werden.

Der Klimaschutz erfordert, Prozesse zu substituieren, die aktuell fossile Rohstoffe einsetzen, um Treibhausgasemissionen zu reduzieren. Die gegenüber einer Abfallverbrennung mit nachgeschalteter Elektrolyse höhere Ausbeute der Abfallvergasung ermöglicht eine höhere Wasserstoffausbeute und einen zumeist geringeren CO₂-Fußabdruck des Wasserstoffs.

Chancen und Leitlinien der Umsetzung können dabei im Einzelnen sein:

- > Die Vergasung kann die bestehende Abfallentsorgung als alternativer Weg ergänzen.
- > Einstiegspunkte für Vergasungsanlagen, die spezifisch ausgewählte Gewerbeabfälle verwerten, liegen in der mittelfristigen, schrittweise notwendigen Erneuerung der bestehenden Müllverbrennungsanlagen.
- > Vergasungsanlagen haben Koppelprodukte und energien, die die Effizienz fördern können.
- > Das Effizienzniveau und die Wirtschaftlichkeit einer Abfallvergasung können erheblich höher liegen, wenn in der Folgeanwendung Synthesegas oder wenig aufgereinigter Wasserstoff anstelle eines Wasserstoff-Reingases ausreichen. Dies kann etwa bei einer Methanolsynthese oder bei Fischer-Tropsch-Synthesen zum Tragen kommen, die auch den Kohlenstoffanteil im Synthesegas benötigen, oder beim Stahl-Hochofenprozess.

- > Integriert sollten CCS und CCU betrachtet werden (CO₂-Abscheidung und -Speicherung, CO₂-Abscheidung und -Verwendung).
- > Eine stromnetzdienliche Integration durch Lastmanagement und Flexibilisierung, soweit die Anlagenkonzepte Strombedarf aufweisen, kann die ökologische und wirtschaftliche Effizienz verbessern.
- > Aufgrund der technischen Komplexität einer Vergasungsanlage ist eher von zentralen größeren Anlagen als von dezentralen Kleinanlagen auszugehen. Realisierte Anlagen arbeiten mit Einsatzmengen im Bereich 15.000 bis 200.000 t/a (s. Kapitel 6.2).
- > Große Wasserstoffabnehmer können Initiatoren der Umsetzung von Vergasungsanlagen sein.

8.3 Eignung der Vergasungsverfahren für die ausgewählten Abfallarten

Vergasungsverfahren bedürfen eines hohen Aufwands zur Vorsortierung und Aufbereitung von eingesetztem inhomogenen Abfall, oder aber nur eng definierte Abfallströme kommen zum Einsatz. Nur einzelne Teilströme des Gewerbeabfalls werden in Vergasungsanlagen eingesetzt werden können. Die Eignung eines Inputmaterial ergibt sich daraus, dass die Qualität zu schlecht oder problematisch für eine stoffliche Verwertung ist, aber höherwertig als für eine Verbrennung.

Die Eignung der in Kapitel 3.5 benannten Abfallarten für die verschiedenen Vergasungstechnologien wird folgend orientierend bewertet. Abweichungen im Anwendungs-Einzelfall sind nicht auszuschließen, da Vergasungstechnik, Anlageneinstellungen sowie die individuellen Eigenschaften von Abfallströmen gegebenenfalls andere Kombinationen ermöglichen. Verfahrensnennungen sind exemplarisch.

8.3.1 Fraktion „Restmüll“

Die Fraktion „Restmüll“ hat eine heterogene Zusammensetzung und Korngröße. Sie enthält Störstoffe und Inertstoffe. Der Wasseranteil liegt zumeist höher als bei anderen Fraktionen. Für eine Vergasung wird in der Regel eine Zerkleinerung notwendig sein. Der Aufwand hierfür hängt von der anschließenden Vergasungstechnologie ab. Typisch wäre eine Zerkleinerung auf eine Korngröße von 50 mm. Eine Vortrocknung auf einen Wassergehalt <20 % kann ebenfalls notwendig oder sinnvoll sein. Eine Abtrennung von Inertstoffen sorgt je nach Anlage für eine höhere Betriebsstabilität und/oder erhöht den Wirkungsgrad der Anlage. Von den in Kapitel 6.5 beschriebenen Anlagen erscheinen aktuell in erster Linie die Verfahren von Sierra Energy, InEnTec / Plagazi und Direct Melting System für diese Fraktion geeignet. Andere Verfahren bedürfen einer weitergehenden Aufbereitung entsprechend einem Ersatzbrennstoff.

8.3.2 Holzreiche Fraktionen

Die holzreichen Fraktionen erfordern in der Regel ebenfalls eine Zerkleinerung. Eine Trocknung ist in der Regel nicht notwendig. Nach der Zerkleinerung kann die Fraktion voraussichtlich in allen in Kapitel 6.5 beschriebenen Anlagen verwertet werden.

8.3.3 Kunststoffreiche Fraktion

Kunststoffe unterscheiden sich von klassischen Vergasungsrohstoffen wie Kohle und Biomasse durch einen geringeren Feuchtegehalt. Darüber hinaus ist die Feuchte nur anhaftend – das Material ist leicht zu trocknen, da es keine Diffusionsrestriktionen gibt.

Kunststoffe haben eine schlechte Wärmeleitfähigkeit und können bei der Vergasung zu Agglomeraten verkleben. Aufgrund der geringen Dichte ist für den Eintrag in den Vergasungsreaktor meist eine Pelletierung notwendig. Dies gilt vor allen Dingen bei Wirbelschichtvergäsern. Der hohe Anteil an flüchtigen Bestandteilen in Kunststoffen sorgt im Vergleich zu Biomasse für einen höheren Teerbildung. Daher eignet sich die Fraktion eher für zweistufige Verfahren (Ebara Ube) oder für Hochtemperaturverfahren und Plasmaprozeduren (Sierra Energy, InEnTec / Plagazi). Beim Einsatz in anderen Technologien ist auf eine nachgeschaltete Teerabtrennung zu achten. Die Kunststoffzusammensetzung beeinflusst die Zusammensetzung

des Produktgases. Daher sollten z. B. Polyamide aufgrund ihres Stickstoffgehalts nur begrenzt im Einsatzstoff enthalten sein. Halogengehalte wie z.B. Chlor in PVC können aufgrund der korrosiven Eigenschaften ebenfalls Probleme verursachen (Punkkinen 2017). Für einen möglichst störungsfreien Prozess und eine hohe Ausbeute sind die Verfahrensparameter dem Einsatzstoff anzupassen. Es kann wirtschaftlich sinnvoll sein, Qualitätsanforderungen an die Einsatzstoffe zu stellen, um z. B. zusätzliche Gasreinigungsschritte zu vermeiden.

8.3.4 Schredderleichtfraktion

Der Betrieb einer Vergasung mit Schredderleichtfraktion ist kritisch zu sehen. Eine Co-Vergasung mit anderen Einsatzstoffen erscheint eher durchführbar. Beeinträchtigungen resultieren vor allem aus dem hohen Asche- und Metallanteil. Wie bei Kunststoffen kann eine Pelletierung vor allem beim Eintrag in Wirbelschichtvergasern notwendig sein. Von den in Kapitel 6.5 beschriebenen Verfahren erscheinen in Form einer Co-Vergasung das Direct Melting Steel Verfahren geeignet und die Verfahren von Sierra Energy und InEnTec / Plagazi bedingt geeignet. Allerdings wurde das Direct Melting Steel Verfahren zur Produktion von Wasserstoff bislang nicht eingesetzt. Die anderen Verfahren erscheinen zum derzeitigen Zeitpunkt für den Einsatzstoff ungeeignet.

8.3.5 Gefährliche Abfälle

Gefährliche Abfälle können stark divergierende Bestandteile umfassen, die unterschiedliche Eigenschaften besitzen. Aufgrund der gefährlichen Eigenschaften sollte die Vorbehandlung in der Regel auf ein Minimum begrenzt werden. Eine Zerkleinerung auf < 50 mm (vgl. Fraktion „Restmüll“) dürfte sinnvoll sein. Ansonsten eignet sich die Fraktion am ehesten für eine Co-Vergasung in Hochtemperatur und Plasmavergasungsanlagen wie etwa Sierra Energy und InEnTec / Plagazi. Die eingesetzten Abfälle sollten genau geprüft werden.

9 Passung in die Wirtschaftsstrukturen und Potenzial in Bayern

9.1 Passung in die bayerischen Wirtschaftsstrukturen

Die Etablierung von Abfallvergasungsanlagen ist verbunden mit einer Änderung der Material- und Prozessketten im Wirtschaftsgefüge. Eine Verknüpfung von Abfallwirtschaft, Vergasungstechnologie und Unternehmen, die Wasserstoff benötigen, existiert bislang nicht. Sie zu etablieren, bedarf der Initiative und dem Zusammenwirken mehrerer Akteursgruppen.

Ausgangs- und Anknüpfungspunkt ist die existierende Abfallwirtschaft. Hinzu kommen Vergasungsanlagenbauer, Anlagenbetreiber, Akteure im Bereich Wasserstofftransport oder -lagerung sowie die Wasserstoffnutzer. Bereits ohne die Vergasungstechnologie wird für eine zukünftige bayerische Wasserstoffwirtschaft ein hoher Entwicklungsbedarf in den technologischen Handlungsfeldern Erzeugung, Logistik und Nutzung von Wasserstoff gesehen (WSBB 2020).

Entwicklungen sollten wissenschaftlich durch Universitäten, Hochschulen und Forschungsinstitute unterstützt und befördert werden. Hierzu kann auf bayerischen Forschungsaktivitäten aufgebaut werden.

9.1.1 Akteure der Abfallwirtschaft

Hauptakteure der Abfallwirtschaft entlang der Entsorgungskette sind der Abfallerzeuger, der Transporteur, Betreiber von Vorbehandlungsanlagen und der Verwerter oder Entsorger.

In Bayern gibt es über 3.000 genehmigte Anlagen zur Entsorgung von Abfällen. Dazu gehören 14 thermische Behandlungsanlagen für Siedlungsabfälle und 3 für Klärschlämme. Daneben gibt es weitere Abfallbehandlungsanlagen, u.a. Deponien, EBS-Kraftwerke, Sortieranlagen und chemisch-physikalische Behandlungsanlagen. In bayerischen Entsorgungsanlagen (ohne Bauschuttrecycling- und Asphaltmischanlagen) werden über 25 Millionen Tonnen Abfall jährlich verarbeitet (Bayerisches Landesamt für Statistik 2021).

Angesichts der hohen Einsatzstoffanforderungen von Vergasungsanlagen ist Abfallbehandlungsanlagen, insbesondere Sortieranlagen, eine wichtige Rolle am Anfang einer zukünftigen Vergasungswertschöpfungskette zuzuschreiben.

9.1.2 Anlagen- und Maschinenbau

Hersteller von Vergasungsanlagen wurden im Zusammenhang mit den von ihnen entwickelten Anlagenkonzepten in Abschnitt 6 vorgestellt. In Bayern gibt es mehrere Akteure, die Vergasungskonzepte entwickeln.

9.1.3 Anlagenbetreiber

Als zukünftige Betreiber von Gewerbeabfall-Vergasungsanlagen kommen einerseits Unternehmen der Abfallwirtschaft in Betracht – z.B. Entsorger und jetzige Betreiber von Müllverbrennungsanlagen, vielfach Kommunalunternehmen. Andererseits können die Anlagen an Standorten des Wasserstoffbedarfs platziert werden und von den entsprechenden Industrieunternehmen (s. Kapitel 9.1.5) betrieben werden.

9.1.4 Wasserstofflogistik

Die Wasserstofflogistik umfasst die Funktionen Speicherung, Transport per Lkw, Bahn oder Schiff sowie gegebenenfalls Transport per Pipeline und Vermarktung. Für die überregionale Logistik und große Umschlagmengen kommen insbesondere heutige Betreiber von Erdgasnetzen, Energieversorger sowie Gashandelsfirmen in Betracht.

9.1.5 Industrielle Wasserstoffnutzer

Chemiesparten haben einen wesentlichen Anteil am aktuellen Wasserstoffbedarf in Deutschland (H2.B 2020). Die Petrochemie hat in Deutschland einen Anteil am Wasserstoffverbrauch von 33 %. Genutzt wird der Wasserstoff in diesem Sektor vorwiegend in der Raffination, der Hydrierung und beim Hydrocracken.

Weiterhin wird Wasserstoff zur Synthese von Grundstoffen genutzt. 27 % des Verbrauchs entfallen auf die Ammoniaksynthese, 11 % auf die Methanolherstellung. Weitere Anwendungsbereiche sind Flachglasherstellung, Fetthärtung, Halbleiterproduktion und Stahlproduktion. All diese Branchen sind in Bayern vertreten.

Große Industrieunternehmen der genannten Branchen haben einen hohen Wasserstoffbedarf, verfügen in der Regel über Entwicklungskompetenzen und können eher Ressourcen in die Entwicklung und Realisierung von Vergasungsanlagen investieren als kleinere Wasserstoffnutzer.

In einer Übergangsphase könnte es zur vermehrten Einspeisung und Zumischung von Wasserstoff ins Erdgasnetz kommen. Auch eine Verstromung ist möglich; hierzu sollen neue Gaskraftwerke „H₂-ready“ gebaut werden. Dieser Anwendung sowie der Nutzung von Wasserstoff in der Gebäudebeheizung wird jedoch keine Relevanz in den nächsten Jahren zugesprochen (Bayerische Staatsregierung 2020).

9.1.6 Verkehrssektor

Für Wasserstofftankstellen kommen bereits mit Benzin und Diesel als Tankstellenbetreiber tätige Firmen oder auch neue Unternehmen in Betracht. Das Joint Venture H₂ MOBILITY Deutschland GmbH & Co.KG mit den Gesellschaftern Air Liquide, Daimler, Linde, OMV, Shell und TOTAL betreibt in Bayern aktuell 23 Tankstellen (H₂ Mobility 2022).

Nicht zuletzt sind Hersteller von Pkw, Lkw und Sonderfahrzeugen Interessenträger und potenzielle Mitgestalter der Wasserstoffwirtschaft. Ein Anregungsbeispiel ist die Anlage von Audi in Werlte zur Herstellung von regenerativem synthetischem Erdgas, das bilanziell eigene CNG-Fahrzeugkunden versorgt. Ähnliche Konzepte sind für Wasserstoff denkbar.

9.2 Mengenpotenziale in Bayern

Die Bundesregierung geht in der nationalen Wasserstoffstrategie für das Jahr 2030 von einem deutschlandweiten Wasserstoffbedarf von 3,0 Mio. t aus (100 TWh/a; BMWi 2020). Bei einem bayerischen Anteil am Wasserstoffbedarf von 18 % (Anteil Bayerns am Bruttoinlandsprodukt) ergibt sich damit für Bayern ein Wasserstoffbedarf für das Jahr 2030 von 0,54 Mio. t/a, entsprechend 18 TWh.

Für das Jahr 2050 beziffert die bayerische Wasserstoffstrategie den Wasserstoffbedarf für Bayern auf 2,4 Mio.t/a (80 TWh; Bayerische Staatsregierung 2020). In beiden Strategiepapieren wird davon ausgegangen, dass aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit erneuerbarer Energien ein großer Teil des in Deutschland benötigten Wasserstoffs importiert werden muss. Gemäß der nationalen Wasserstoffstrategie wird für die heimische Erzeugung ein Anteil von 14 % des Bedarfs angesetzt (BWi 2020).

Würden die gesamten in Kapitel 3.3 bestimmten 1,72 Mio. t/a Abfall zur Wasserstoffgewinnung durch Vergasung verwendet, könnten damit rund 0,12 Mio. t/a Wasserstoff erzeugt werden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass weder der gesamte thermisch verwertbare Abfall zur Verfügung steht, noch dass der Einsatz zur Vergasung technisch machbar ist. Eine Bestimmung der zur Vergasung einsetzbaren Anteile ist nicht valide möglich; insbesondere fehlen statistische Detaildaten zu den in Kapitel 3.5 identifizierten Abfallarten. Unter der – vermutlich hoch angesetzten – Annahme, dass ein Viertel des für die Vergasung geeigneten Gewerbeabfalls in Vergasungsanlagen umgesetzt würde, entspräche der erzeugte Wasserstoff rund 5 % des Bedarfs 2030 oder 1,2 % des Bedarfs 2050. In Abbildung 17 ist das Wasserstoff-Erzeugungspotenzial bei Einsatz von verschiedenen Mengen des verfügbaren Abfalls den für Bayern prognostizierten Erzeugungs- und Bedarfswerten gegenübergestellt.

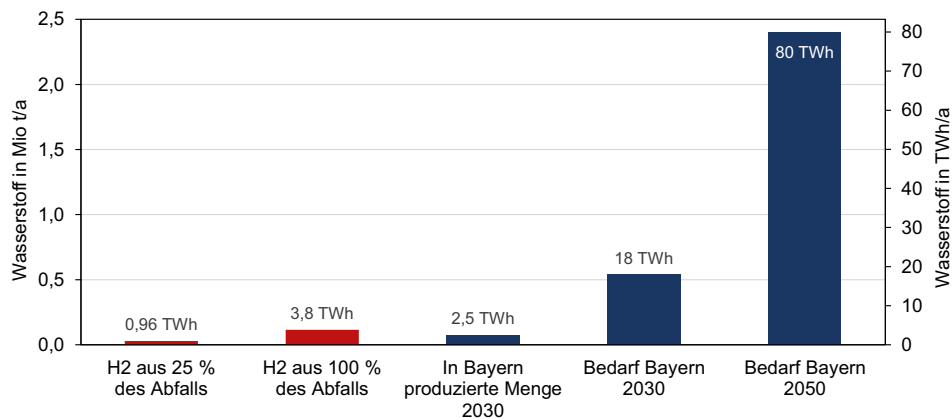


Abbildung 17: Erzeugungspotenzial aus Gewerbeabfall (rot) und prognostizierte Erzeugungs- und Bedarfswerte für Bayern (blau). 100 % Abfall entspricht 1,72 Mio. t Abfall (vgl. Kapitel 3.3).

Die Einflüsse laufender und zukünftiger Maßnahmen in Deutschland und Europa, um Abfallmengen zu reduzieren und die Abfallwirtschaft stärker an der Abfallhierarchie auszurichten, auf die in Zukunft zur Verfügung stehenden Abfallmengen sind nicht abschätzbar. Die Bestrebungen einer Zero-Waste-Economy werden allerdings nicht so bald realisiert werden, so dass weiterhin signifikante Abfallmengen potenziell für eine Vergasung zur Verfügung stehen.

10 Maßnahmen für eine anwendungsspezifische Realisierung

Mit den zuvor dargestellten Studienergebnissen wird deutlich: Die Vergasung von Gewerbeabfällen zur Gewinnung von Wasserstoff bietet wichtige Potenziale zur Abfallverwertung, der Energieeffizienz und des Klimaschutzes. Dabei ist derzeit nicht belastbar auszusagen, ob und welche Verfahrensrealisierungen in welchen Anwendungen reüssieren werden. Dennoch rechtfertigen die unter heutigen Randbedingungen (Wasserstoffbedarf, Klimaschutz) stärker hervortretenden Vorzüge, die Technologie der Vergasung als Möglichkeit mit Potenzialen intensiviert zu betrachten und weiterzuentwickeln. Hierzu werden folgende fünf Schritte vorgeschlagen, die parallel angegangen werden können.

10.1 Schritt 1: Wissen

Wissen zu den Möglichkeiten, Varianten und Eigenheiten der Vergasungstechnologie ist wenig verbreitet. Obwohl sie starke Wurzeln in Deutschland hat, haben Fehlschläge, insbesondere die Stilllegung der Thermoselect-Anlage in Karlsruhe, hierzulande die Einschätzung befördert, eine weitere Beschäftigung mit der Materie sei nicht lohnend.

Auch die vorliegende Studie soll unterstützen, die Technologie ins Bewusstsein zu rücken und als Lösungsansatz in ein methodisches Portfolio aufzunehmen. Die Technologie sollte bei technischen Entwicklungsvorhaben berücksichtigt werden, in industriellen Arbeitskreisen, bei Finanzinvestoren und in der Politik.

10.2 Schritt 2: Diskurs und Lösungssuche

Studien und Strategiepapiere zur nachhaltigen Zukunftsentwicklung des deutschen Wirtschaftssystems fokussieren auf die Gewinnung von regenerativem Wasserstoff mittels Elektrolyse (z. B. Umweltbundesamt 2019b, Prognos 2020, AGORA 2020, Bayerische Staatsregierung 2020, BMWi 2020). Dies greift zu kurz. Zwar ist die Wasserstoffgewinnung durch Vergasung von Abfallströmen bisher wenig industriell validiert und daher nicht sofort einsatzbar – doch das gilt auch für andere technologische Lösungen, die nicht ausgereift sind, aber als notwendig postuliert werden. (Ein Beispiel ist die CO₂-Abscheidung und -Speicherung CCS.)

Zu klären ist grundsätzlich: Auf welchen Wegen kann zukünftig und gegebenenfalls im marktlichen Wettbewerb Wasserstoff erzeugt werden? Welche Rolle können unvermeidbare, nicht rezyklierbare Abfallströme hierbei spielen? Es bedarf eines übergreifenden Bildes, das für verschiedene Abfallströme die Rolle der Vergasung zu Wasserstoff technologieoffen in Relation setzt zu Vermeidung, Wiederverwendung, Recycling, chemischem Recycling und energetischer Abfallnutzung. Die unterschiedlichen Entsorgungswege sollten anhand ihrer Ökoeffizienz bewertet werden, um Fehlentwicklungen zu vermeiden.

10.3 Schritt 3: Förderung von Forschung und Entwicklung

Um die Forschung und Entwicklung von Vergasungsanwendungen zu unterstützen, ist eine öffentliche Förderung wichtig. Der Entwicklungsstand der meisten Abfallvergasungsverfahren bedarf in erster Linie einer Unterstützung im Bereich von TRL 6 (technologischer Beleg in Einsatzumgebung) bis 8 (Funktionsfähigkeit im Einsatzbereich). Kritische Entwicklungsphasen sind dabei eine Umstellung des Einsatzstoffes und das Scale-Up. Bei der Betriebsoptimierung im großtechnischen Maßstab stehen dann die erforderliche technische Lernkurve und der wirtschaftliche Druck einer kommerziellen Markteinführung gegeneinander.

> Wünschenswert ist die Unterstützung einer Weiterentwicklung der Vergasungstechnologien. Dabei können die in dieser Studie erarbeiteten Bewertungen, insbesondere zur Eignung der Vergasertypen

für verschiedene Abfallströme (Kapitel 5.1) und zur Eignung der herstellereinspezifischen Vergasungsverfahren für die ausgewählten Abfallarten (Kapitel 8.3), Orientierung bei der Auswahl erfolgversprechender Förderinhalte geben.

- > Es bedarf zur Überzeugung von Technikern und Investoren Demonstrationsanlagen in örtlicher Nähe, die über einen längeren Zeitraum zeigen, dass die Technologie funktioniert, und die als Referenz dienen. Mindestens eine solche Anlage in Bayern wäre eine wichtige Wegmarke.

10.4 Schritt 4: Unterstützende rechtliche Rahmenbedingungen

Die Bedeutung von Abfällen in der Kreislaufwirtschaft und als zukünftige Energiequelle wird kontrovers diskutiert. Essentiell für die Investition in neue Entsorgungstechnologien ist die Klärung des Rechtsrahmens. Wird Abfall als Rohstoff für grünen Wasserstoff klassifiziert? Wie wird grüner Wasserstoff dem Endnutzer angerechnet? Kann Vergasung zu Wasserstoff als Weg der stofflichen Nutzung eingestuft werden? Wann und in welcher Form werden CO₂-Emissionen aus der Abfallverwertung einem Emissionshandelssystem unterliegen?

Des Weiteren existieren aktuell keine ausreichenden marktlichen Anreize für die nicht-fossile Herstellung von Wasserstoff. Zwar gibt es beachtliche Investitionsförderungen im Bereich Elektrolyse-Wasserstoff. Auf breiter Ebene werden Neuanlagen jedoch erst entstehen, wenn Wasserstofferlöse verlässlich höher sind als prognostizierte Betriebskosten. Rechtliche Rahmenbedingungen, die solche ökonomischen Vorteile bewirken, sind Voraussetzungen zur Umsetzung der Wasserstoffwirtschaft.

Auch Gesetze und Verordnungen zu Produktdesign und Materialentsorgung können unterstützen, z. B. zur Zusammensetzung von Produkten, zu Entsorgungsrichtlinien und zur Unterbindung des Exports in Drittländer. Relevante Normen sind hier insbesondere das Kreislaufwirtschaftsgesetz, die Gewerbeabfallverordnung und die Verpackungsverordnung.

10.5 Schritt 5: Anstoß unternehmerischer Investitionen

Unternehmerische Entscheidungen sind weitgehend durch Marktlagen bestimmt. Sind funktionstüchtige Vergasungstechnologien am Markt verfügbar, und erlauben die rechtlichen und marktlichen Randbedingungen einen Ausblick auf lohnende Investitionen, wird es keiner weiteren Anschubfinanzierung bedürfen.

- > Die bislang nicht vorhandene Verknüpfung von Abfallwirtschaft, Vergasungstechnologie und Unternehmen, die Wasserstoff benötigen, legt Maßnahmen nahe, die diese Branchen miteinander ins Gespräch bringen. Eine örtliche Nähe der Akteure kann dabei unterstützend wirken.
- > Akteure der Praxis, die bereits im Thema Wasserstoff aktiv sind (Petrochemie, Stahlindustrie, ÖPNV u.a.) haben einen Startvorteil. Diese Akteure können gegebenenfalls zuerst aktiviert werden.

Literatur

- AGORA (2020): Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut: Klimaneutrales Deutschland. Studie im Auftrag von Agora Energiewende, Agora Verkehrswende und Stiftung Klimaneutralität.
- Alternative Resources Inc. (2007): Los Angeles County Conversion Technology Evaluation Report – Phase II –Assessment https://pw.lacounty.gov/epd/socalconversion/pdfs/LACo_Conversion_PII_Report.pdf, abgerufen am 17.02.2022
- Andritz (2021): www.andritz.com/products-en/group/pulp-and-paper/power-generation/gasification/bfb-gasifiers, abgerufen am 04.02.2021
- Arcadis Germany GmbH (2017): Solid Waste Management for Nagpur – Feasibility Study
- Arena, Umberto (2012): Process and technological aspect of municipal solid waste gasification. A review, *Waste Management* 32, 625–639
- ASUE (2021): Grau, Blau oder Grün: Was kostet der Wasserstoff? Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. im Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. – Technisch-wissenschaftlicher Verein. https://asue.de/aktuelles_presse/kosten_von_wasserstoff_hydex, abgerufen am 15.12.2021
- Bayerisches Landesamt für Statistik (2021): Abfallwirtschaft in Bayern 2017, Statistische Berichte Q II 1 j 2017
- Bayerische Staatsregierung (2020): Bayerische Wasserstoffstrategie
- bifa (2020): Entsorgung gemischter Gewerbeabfälle in Bayern: Status und Handlungsoptionen. bifa-Text 69. bifa Umweltinstitut GmbH, Augsburg 2020.
- Bioenergy international (2020): <https://bioenergyinternational.com/biogas/cortus-energy-produces-first-biosyngas-in-hoganas>, abgerufen am 03.02.2021
- Bio Energy Netherlands (2021): <https://bioenergynetherlands.nl/de>, abgerufen am 03.02.2021
- BlueFLUX (2022): www.bluefluxenergy.com, abgerufen am 08.02.2022
- BMWi (2020): Nationale Wasserstoffstrategie
- Caixin (2018): Chinese Biofuel Producer's Debt Crisis Triggers Fears in Finland 15.06.2018 www.caixinglobal.com/2018-06-15/chinese-biofuel-producers-debt-crisis-triggers-fears-in-finland-101271901.html, abgerufen am 10.12.2020
- CHO Power (2020): www.cho-power.com/nos-references, abgerufen am 08.12.2020
- Ciuta, S; Tsiamis, D; Castaldi, M. (2018): Gasification of Waste Materials, Technologies for Generating Energy, Gas and Chemicals from Municipal Solid Waste, Biomass, Nonrecycled Plastics, Sludges and Wet Solid Wastes S. 65–91
- Cortus Energy (2021): <https://cortus.se/company>, abgerufen am 03.02.2021
- DBFZ (2013): Zech, K. et al.: Hy-NOW. Evaluierung der Verfahren und Technologien für die Bereitstellung von Wasserstoff auf Basis von Biomasse. Endbericht Deutsches Biomasseforschungszentrum
- DNV/Plagazi (2021): DNV CO₂ Footprint – Results Waste to H₂ from PLAGAZI; unveröffentlichte Herstellerinformationen in Form einer Folienpräsentation; 2021
- Dowaki, K.; Ohta, T.; Kasahara, Y.; Kameyama, M.; Sakawaki, K.; Mori, S. (2007): An economic and energy analysis on bio-hydrogen fuel using a gasification process, *Renewable Energy*, Volume 32, Issue 1, 2007, S. 80–94
- Ducharme, C. (2010): Technical and economic analysis of Plasma-assisted Waste-to-Energy processes, Master thesis, Columbia University
- Ebara (2021a): www.eep.ebara.com/en/products/gas.html, abgerufen am 18.02.2021
- Ebara (2021b): Persönliche Information Ebara Corporation

- EQTEC (2021): <https://eqtec.com/case-studies>, abgerufen am 16.02.2021
- Europlasma (2020): Communiqué de presse – Bordeaux, le 16 novembre 2020
www.europlasma.com/wp-content/uploads/2017/08/201116-CP-R%C3%A9orientation-branche-ENR.pdf, abgerufen am 09.12.2020
- EC (2014): Technology readiness levels (TRL). HORIZON 2020 – Work Programme 2014–2015 General Annexes G., https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2014_2015/annexes/h2020-wp1415-annex-g-trl_en.pdf, abgerufen am 04.08.21
- EUWID (2021): Geplante „Waste2chemicals“-Anlage im Hafen Rotterdam soll Flugbenzin produzieren, EUWID Recycling und Entsorgung 24.2021 S.23
- Fraunhofer IWES/IBP (2017): Wärmewende 2030. Schlüsseltechnologien zur Erreichung der mittel- und langfristigen Klimaschutzziele im Gebäudesektor. Studie im Auftrag von Agora Energiewende
- Gaya (2014): www.projetgaya.com/en, abgerufen am 22.01.2021
- Green Hydrogen Technology GmbH (2022): <https://www.green-ht.com>, abgerufen am 27.04.2022
- GTI (2015): Green Gasoline from Wood using Carbona Gasification and Topsoe TIGAS Process, Final Report (No. DE-EE0002874)
- Güssing (2021): Biomassekraftwerk Güssing, www.guessing.co.at/index.php/biomassekraftwerk-guessing, abgerufen am 21.01.2021
- H2.B (2020). Zentrum Wasserstoff.Bayern. Positionspapier des Wasserstoffbündnis Bayern zur Bayerischen Wasserstoffwirtschaft. Mai 2020
- H2 Mobility (2022): H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co.KG. Auswertung des Wasserstoff-Tankstellen-Atlas <https://h2.live>, abgerufen am 01.02.2022
- IEA Bioenergy (2019): IEA Bioenergy Task 33 special report- Status Report on thermal gasification of biomass and waste 2019
- InEnTec (2021): <https://inentec.com>, abgerufen am 05.02.2021
- Interstate Waste Technologies (2021): www.iwtonline.com/operating-thermoselect-facilities-1.html, abgerufen am 08.01.2021
- Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.; Hofbauer, H. (2009): Energie aus Biomasse, Springer Verlag, Heidelberg, korrigierter Nachdruck 2009
- Karlsruher Institut für Technologie (2021): www.bioliq.de/67.php, abgerufen am 20.01.2021
- Kraussler Michael (2018): Evaluation of dual fluidized bed biomass gasification plants generating electricity, valuable gases and district heat; <https://repositum.tuwien.at/bitstream/20.500.12708/3498/2/Kraussler%20Michael%20-%202018%20-%20Evaluation%20of%20dual%20fluidized%20bed%20biomass%20gasification...pdf>, abgerufen am 18.05.2021
- La Nouvelle République (2021): Thouars: sérieux coup de froid pour le projet industriel CHO-Tiper), vom 05.01.2021
- Let's Recycle (2016): Energos enters administration over „cash flow“. www.letsrecycle.com/news/latest-news/energос-enters-administration-over-cash-flow, abgerufen am 21.12.2020
- Let's Recycle (2020): Wiltshire EfW to move away from gasification. www.letsrecycle.com/news/wiltshire-efw-to-move-away-from-gasification, abgerufen am 10.02.2022
- Lanzatech (2021): www.lanzatech.com/2021/01/07/building-europes-first-of-its-kind-alcohol-to-jet-production-plant, abgerufen am 05.02.2021
- LfU (2019): Bayerisches Landesamt für Umwelt: Hausmüll in Bayern – Bilanzen 2018 – Informationen aus der Abfallwirtschaft. Augsburg 2019.
- LfU (2019a): Bayerisches Landesamt für Umwelt: Sonderabfallstatistik für 2018 in Bayern. Augsburg 2019.

- LfU (2020): www.lfu.bayern.de/abfall/ueberwachung_aba/siedl_klaer/index.htm, abgerufen am 05.11.2020
- Loipersböck, J.; Luisser, M.; Müller, S.; Hofbauer, H.; Rauch R. (2018): Experimental Demonstration and Validation of Hydrogen Production Based on Gasification of Lignocellulosic Feedstock. *ChemEngineering* 2, 61
- Mahishi, M.; Goswami, D. Y. (2007) Thermodynamic optimization of biomass gasifier for hydrogen production; *International Journal of Hydrogen Energy* 32; S. 3831–3840
- Mannheim (2021): www.mannheim.de/de/stadt-gestalten/verwaltung/aemter-fachbereiche-eigenbetriebe/stadtentwaesserung/klaerwerk, abgerufen am 08.09.2021
- Materazzi, M. (2017): Gasification of Waste Derived Fuels in Fluidized Beds: Fundamental Aspects and Industrial Challenges
- Materazzi, M. et al. (2018): Production of BioSNG from waste derived syngas: Pilot plant operation and preliminary assessment, *Waste Management*, 79, pp. 752–762. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.08.031>
- Materazzi, M. et al. (2019): Production of biohydrogen from gasification of waste fuels: Pilot plant results and deployment prospects, *Waste Management*, 94, pp. 95–106. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.05.038>.
- Mauerhofer A. M.; Schmid, J.C.; Benedikt, F.; Fuchs, J.; Müller, S.; Hofbauer, H. (2019): DUal fluidizes bed steam gasification: Change of product gas quality along the reactor height, *Energy* Vol. 173 p. 1256–1272
- Meinbezirk.at (2016): Güssinger Kraftwerksplanungsfirma Repotec insolvent, www.meinbezirk.at/guessing/c-wirtschaft/guessinger-kraftwerksplanungsfirma-repotec-insolvent_a1862588, abgerufen am 22.01.2021
- Mohammed, M.; Salmiaton, A.; Wan Azlina, W.; Mohammad Amran, M.; Fakhru'l-Razi, A. (2011): Air gasification of empty fruit bunch for hydrogen-rich gas production in a fluidized-bed reactor, *Energy Conversion and Management*, Vol. 52, Issue 2, S.1555–1561
- Parvez, A. M.; Hafner, S.; Hornberger, M.; Schmid, M.; Scheffknecht, G. (2021): Sorption enhanced gasification (SEG) of biomass for tailored syngas production with in-situ CO₂ capture: Current status, process scale-up experiences and outlook, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 141
- Perkins, G. (2020): Production of electricity and chemicals using gasification of municipal solid wastes. In: *Waste Biorefinery*, Bhaskar, T. et al.(eds.), 2020, pp. 3-39
- Plagazi (2021): www.plagazi.com/plagazi-ab-receives-german-order-worth-50-million-euros, abgerufen am 05.02.2021
- Plagazi (2021b): <https://en.plagazi.com>, abgerufen am 14.09.2021
- Platon, A.; Wang, Y. (2009): Water-Gas Shift Technologies in Hydrogen and Syngas Production and Purification Technologies S. 311–356
- Prognos (2020): *Energiewirtschaftliche Projektionen und Folgeabschätzungen 2030/2050*. Prognos AG, Fraunhofer ISI, GWS, Iinas
- Punkkinen, H.; Oasmaa, A.; Laatikainen-Luntama, J.; Nieminen, M.; Laine-Ylijok, J. (2017): Thermal conversion of plastic-containing waste: A review; Research Report No. D4.1–22. Clic Innovation Oy, Helsinki
- Quicker, Peter (2019): Evaluation of Recent Developments Regarding Alternative Thermal Waste Treatment with a Focus on Depolymerisation Processes, *Waste Management* Vol. 9 waste-to-energy, Thomé-Kozmiensky Verlag S. 361–370
- RWE (2020): www.group.rwe/en/press/rwe-generation/2020-11-19-furec-project-to-use-waste-

- stream-for-hydrogen-production, abgerufen am 08.02.2021
- Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F. (2001): Abfallbehandlung in thermischen Verfahren: Verbrennung, Vergasung, Pyrolyse, Verfahrens- und Anlagenkonzepte, Hrsg.: B.G. Teubner Verlag, Stuttgart/Leipzig/Wiesbaden
- SERDP, Strategic Environmental Research and Development Program (2021). www.serdp-estcp.org/Program-Areas/Installation-Energy-and-Water/Energy/Distributed-Generation/EW-201334, abgerufen am 22.02.2021
- SGH2 (2021): www.sgh2energy.com/projects/#proheader, abgerufen am 08.02.2021
- Sierra Energy (2021a): <https://sierraenergy.com>, abgerufen am 08.01.2021
- Sierra Energy (2021b): Persönliche Korrespondenz
- Sircar, S.; Golden, T.C. (2009): Pressure Swing Adsorption Technology for Hydrogen Production, in Hydrogen and Syngas Production and Purification Technologies, 414450
- Südwest-Presse (2019): Holzgas-Heizkraftwerk wird wohl stillgelegt, Senden: Holzgas-Heizkraftwerk wird wohl stillgelegt | Südwest-Presse Online (swp.de), abgerufen am 22.01.2021
- Umweltbundesamt (2017): Sachverstand zu den alternativen Verfahren für die thermische Entsorgung von Abfällen, Projektnummer 29217
- Umweltbundesamt (2019): Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger 2018. Text 37/2019
- Umweltbundesamt (2019b): RESCUE – Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität. www.umweltbundesamt.de/rescue, abgerufen am 17.02.2022
- Umweltbundesamt (2022): Spezifische Treibhausgas-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990–2021. Text 15/2022
- Valmet (2021): www.valmet.com/energyproduction/gasification, abgerufen am 11.02.2021
- Waste today (2015): Alter NRG agrees to be aquired for \$147 million, www.wastetodaymagazine.com/article/covanta-long-beach-contract-extension, 11.05.2015, abgerufen am 10.12.2020
- Weber, G.; Fu, Q.; Wu, H. (2006): Energy Efficiency of an Integrated Process Based on Gasification for Hydrogen Production from Biomass, Dev. Chem. Eng. Mineral Process 14, 39–49
- Wencker, T. (2021): Das Wie, Woher und Wohin von Wasserstoff. AKE Berlin, 7. September 2021, https://asue.de/sites/default/files/asue/themen/wasserstoff/2021/vortraege/ASUE_Wencker_2021_Das%20Wie%2C%20Woher%20und%20Wohin%20von%20Wasserstoff.pdf, abgerufen am 15.02.2022

WO2010066281A1: System for the production of hydrogen

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Abfallströme für die Vergasung und Behandlungspfade im Jahr 2018. Nummerierung s. Kapitel 3.2. Datenquellen LfU (2018), *bifa (2020)	4
Abbildung 2:	Zuordnung der Abfallströme zu Abfallarten nach ihren Eigenschaften.	8
Abbildung 3:	Allgemeiner Prozessablauf für die Produktion von Wasserstoff durch Vergasung.	9
Abbildung 4:	Festbettvergasertypen (eigene Darstellung nach Kaltschmitt 2009)	11
Abbildung 5:	Prozessschema der beschriebenen 10 MW-DFB-Vergaseranlage (Loipersböck 2018)	17
Abbildung 6:	Vereinfachte Energiebilanz für die Herstellung von Wasserstoff in einer allothermen 10 MW-Vergaseranlage. Sensible und latente Wärme sowie Elektrizität. Eigene Darstellung nach Loipersböck (2018)	18
Abbildung 7:	Vereinfachte Stoffbilanz für die Herstellung von Wasserstoff in einer allothermen 10 MW-Vergaseranlage. Eigene Darstellung nach Loipersböck (2018)	18
Abbildung 8:	Schematische Darstellung des Thermostelect-Verfahrens (Perkins 2020)	22
Abbildung 9:	Schematische Darstellung des Ebara TwinRec-Verfahrens (Grafik aus Perkins 2020)	24
Abbildung 10:	Schematische Darstellung des Enerkem-Verfahrens (Perkins 2020)	28
Abbildung 11:	Schematische Darstellung des AlterNRG-Verfahrens (Perkins 2020)	32
Abbildung 12:	Zuordnung der am geeignetsten Verfahren zu den unterschiedlichen Technologien. Grün schattiert: Abfall als Einsatzstoff. Orange schattiert: Biomasse als Einsatzstoff. Graue Schrift: Anbieter nicht mehr am Markt oder Status unbekannt	41
Abbildung 13:	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung eines DFB-Vergasers mit 100 MW Leistung nach Kraussler (2018). Input 164.000 t Hackschnitzel pro Jahr.	43
Abbildung 14:	Prozessfließbild für eine Waste-to-Hydrogen-Standardanlage nach Materazzi (2019)	45
Abbildung 15:	Prozessfließbild für die DFB-Vergasung von Holzabfällen (Kraussler 2018)	46
Abbildung 16:	Vergleichende ökobilanzielle Bewertung der vorgestellten Verfahren zur Herstellung von 1 kg Wasserstoff. TAB: thermische Abfallbehandlung. Inputmenge: Kehrwert der H ₂ -Ausbeute	49
Abbildung 17:	Erzeugungspotenzial aus Gewerbeabfall (rot) und prognostizierte Erzeugungs- und Bedarfswerte für Bayern (blau). 100 % Abfall entspricht 1,72 Mio. t Abfall (vgl. Kapitel 3.3).	56

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Abfallmengen für Stoffgemische mit Vergasungseignung (gerundete Werte für 2018).	6
Tabelle 2:	Wichtige Elementgehalte als Qualitätsmerkmal des Inputmaterials und seine jeweiligen Auswirkungen beim Vergasungsprozess (Kaltschmitt 2009)	7
Tabelle 3:	Brennstofftechnische Eigenschaften und jeweilige Auswirkungen (Kaltschmitt 2009)	7
Tabelle 4:	Physikalische Eigenschaften und jeweilige Auswirkungen (Kaltschmitt 2009)	8
Tabelle 5:	Technologiesteckbrief Thermoselect	23
Tabelle 6:	Technologiesteckbrief Ebara Ube (Ciuta 2018; Umweltbundesamt 2017)	25
Tabelle 7:	Technologiesteckbrief InEnTec / Plagazi	26
Tabelle 8:	Technologiesteckbrief Direct Melting System (Nippon Steel)	27
Tabelle 9:	Technologiesteckbrief Enerkem	28
Tabelle 10:	Technologiesteckbrief Energos (Ciuta 2018)	29
Tabelle 11:	Technologiesteckbrief Kobelco	30
Tabelle 12:	Technologiesteckbrief Sierra Energy	31
Tabelle 13:	Technologiesteckbrief Alter NRG	32
Tabelle 14:	Technologiesteckbrief CHO Power	33
Tabelle 15:	Technologiesteckbrief Bioliq / KIT	34
Tabelle 16:	Technologiesteckbrief SÜLZLE KOPF Syngas	35
Tabelle 17:	DFB-Vergaser (IEA Bioenergy 2019)	36
Tabelle 18:	Technologiesteckbrief Dual Fluidized Bed (DFB) / GoBiGas	37
Tabelle 19:	Technologiesteckbrief Cortus Energy	38
Tabelle 20:	Technologiesteckbrief Andritz Carbona BFB	38
Tabelle 21:	Technologiesteckbrief Nexterra	39
Tabelle 22:	Einschätzungen zu wesentlichen Kriterien und entsprechende Bewertung der Verfahren. Der TRL ist eine Abschätzung des aktuellen Entwicklungsgrads des Verfahrens zur Produktion von Wasserstoff aus Abfällen. Verfahren, die aktuell keinen Wasserstoff produzieren, werden maximal mit TRL 6 eingestuft	42
Tabelle 23:	Ausgewählte Verfahren mit publizierten Daten für die ökobilanzielle Betrachtung	45
Tabelle 24:	Stoff- und Energieströme des DFB-Verfahrens (Kraussler 2018)	46
Tabelle 25:	Emissionsbeiträge des DFB-Verfahrens basierend auf der Sachbilanz in Tabelle 7.2 sowie angepassten Emissionsfaktoren	47
Tabelle 26:	Carbon-Footprint-Ergebnisse einer Müllverbrennungsanlage mit Fernwärmeabgabe (Ecoinvent 3.6) und anschließender Elektrolyse zur Wasserstofferzeugung	48

bifa Umweltinstitut GmbH
Am Mittleren Moos 46
86167 Augsburg

Tel. +49 821 7000-0
Fax. +49 821 7000-100
E-Mail: marketing@bifa.de
www.bifa.de