



---

**Sachstand**

---

**Oranger Wasserstoff: Herstellung von Wasserstoff aus Abfall**

**Oranger Wasserstoff: Herstellung von Wasserstoff aus Abfall**

Aktenzeichen: WD 8 - 3000 - 075/21  
Abschluss der Arbeit: 15. September 2021  
Fachbereich: WD 8: Umwelt, Naturschutz, Reaktorsicherheit,  
Bildung und Forschung

---

Die Wissenschaftlichen Dienste des Deutschen Bundestages unterstützen die Mitglieder des Deutschen Bundestages bei ihrer mandatsbezogenen Tätigkeit. Ihre Arbeiten geben nicht die Auffassung des Deutschen Bundestages, eines seiner Organe oder der Bundestagsverwaltung wieder. Vielmehr liegen sie in der fachlichen Verantwortung der Verfasserinnen und Verfasser sowie der Fachbereichsleitung. Arbeiten der Wissenschaftlichen Dienste geben nur den zum Zeitpunkt der Erstellung des Textes aktuellen Stand wieder und stellen eine individuelle Auftragsarbeit für einen Abgeordneten des Bundestages dar. Die Arbeiten können der Geheimschutzordnung des Bundestages unterliegende, geschützte oder andere nicht zur Veröffentlichung geeignete Informationen enthalten. Eine beabsichtigte Weitergabe oder Veröffentlichung ist vorab dem jeweiligen Fachbereich anzuzeigen und nur mit Angabe der Quelle zulässig. Der Fachbereich berät über die dabei zu berücksichtigenden Fragen.

**Inhaltsverzeichnis**

<b>1.</b>	<b>Wasserstoff und der Erzeugung aus Abfall im politischen Kontext</b>	<b>4</b>
<b>2.</b>	<b>Dunkle Fermentation</b>	<b>5</b>
<b>3.</b>	<b>Plasmaverfahren</b>	<b>7</b>
3.1.	Plasmapyrolyse	7
3.2.	Plasmavergasung	8
<b>4.</b>	<b>Vergasung von Biomasse und anderen Abfällen</b>	<b>9</b>
<b>5.</b>	<b>Quellen- und Literaturverzeichnis</b>	<b>10</b>

## 1. Wasserstoff und der Erzeugung aus Abfall im politischen Kontext

Wasserstoff ist ein energiereiches Gas, das als Brennstoff zur Wärme- und Stromerzeugung, als Energieträger wie auch als Grundstoff für industrielle Prozesse verwendet werden kann. Wasserstoff lässt sich in Brennstoffzellen energetisch nutzen und kann auf diese Weise als Treibstoff von Fahrzeugen, Schiffen, Flugzeugen, Bau- und Landmaschinen dienen. Daneben kann er als Rohstoff zur Produktion synthetischer Kraftstoffe verwendet werden. Aufgrund dieser Einsatzmöglichkeiten kann die Wasserstofftechnologie zu einem nachhaltigeren Personen- und Güterverkehr beitragen. Soweit die Wasserstoffgewinnung mit keinem zusätzlichen Kohlendioxidausstoß über den Lebenszyklus verbunden ist, gilt sie auch als Schlüsselement der Energiewende und auf dem Weg zur Klimaneutralität Deutschlands bis 2045. Denn klimaneutral gewonnener Strom etwa aus Wind- und Sonnenenergie kann in Form von Wasserstoff klimaneutral gespeichert werden und damit perspektivisch zur Grundlastenergieversorgung beitragen, die gegenwärtig noch von Gas- und Kohlekraftwerken bestritten wird. Um die Produktion von klimafreundlichem Wasserstoff zu stärken, hat die Bundesregierung am 10. Juni 2020 eine Nationale Wasserstoffstrategie beschlossen (Bundesregierung 2020).

Wasserstoff wird derzeit großtechnisch überwiegend aus Erdgas gewonnen, wobei neben Wasserstoff Kohlendioxid freigesetzt wird. Daneben wird das Gas in kleinerem Umfang mittels Elektrolyse (strombasierte Erzeugung) von Wasser gewonnen. Hier ist die Klimaneutralität über die Erzeugung nur gegeben, wenn der verwendete Strom klimaneutral gewonnen wurde. Die aktuelle Produktionskapazität für Wasserstoff hierzulande liegt bei jährlich 19,3 Milliarden Kubikmeter, entsprechend einer Leistung von rund 60 Terrawattstunden Wasserstoff (Deutscher Industrie- und Handelskammertag 2020).

Es gibt grundsätzlich zahlreiche weitere Möglichkeiten, Wasserstoff herzustellen und das energiereiche Gas, teils auch im Gemisch mit anderen Gasen, zu gewinnen. Möglich ist auch eine Gewinnung aus verschiedenen Abfallströmen, im Konkreten aus Biomasse- und nicht biogenen Siedlungs- und Industrieabfällen.

Relevant ist diese Möglichkeit der Erzeugung von Wasserstoff im Hinblick auf das neue Gesetz zur Weiterentwicklung der Treibhausgasminderungs-Quote. Demnach wird die so genannte Treibhausgasminderungsquote auf 25 Prozent bei Otto- und Dieselmotoren angehoben. Demnach soll dabei künftig neben „grünem Wasserstoff“ so genannter „**oranger Wasserstoff**“ auf die Treibhausgasminderungsquote anrechenbar sein. Die Farbbezeichnung weist dabei auf die Produktionsweise hin – Wasserstoff selbst ist farblos: „Grüner Wasserstoff“ wird durch Elektrolyse von Wasser hergestellt, wobei ausschließlich Strom aus erneuerbaren Energien zum Einsatz kommt. Die Herstellung erfolgt CO<sub>2</sub>-frei (BMBF 2021). Oranger Wasserstoff wird aus Biomasse oder unter Verwendung von Strom aus Anlagen der Abfallwirtschaft etwa Müllverbrennungsanlagen oder Biogasanlagen erzeugt.

Die Verwendung erneuerbarer Energien im Verkehrssektor wird bereits seit 2015 durch die Treibhausgasminderungsquote gefördert. Sie verpflichtet Unternehmen, die Kraftstoff verkaufen, die Treibhausgasemissionen ihres Kraftstoffs um einen bestimmten Prozentsatz zu senken, indem sie unter anderem erneuerbare Energieerzeugnisse anbieten.

Die Berücksichtigung von orangenem Wasserstoff im Gesetz zur Weiterentwicklung der Treibhausgasminderungs-Quote war zunächst nicht vorgesehen. Einordnend hierzu sei der Werdegang

des Gesetzes skizziert: Der von der Bundesregierung Anfang März dieses Jahres vorgelegte Entwurf (Deutscher Bundestag, BT-Drs. 19/27435) sah zunächst vor, dass nur grüner Wasserstoff auf die Treibhausgasminderungspflicht angerechnet werden könne. Der Deutsche Bundestag ermöglichte mit seinem Beschluss vom 20. Mai 2021 jedoch auch einen Beitrag von orangenem Wasserstoff (Deutscher Bundestag, Plenarprotokoll 19/230 und Deutscher Bundestag BT-Drs. 19/27435) und folgt damit den Empfehlungen des Umweltausschusses (Deutscher Bundestag, BT-Drs. 19/29850). In einer Entschließung fordert der Deutsche Bundestag dazu auf, dass alle nachhaltigen Technologieoptionen zum Einsatz kommen können. Mithin muss nun geprüft werden, welche Erzeugungsarten als oranger Wasserstoff gewertet werden und, ob auch die Verwertung von gemischten Abfällen mit Kunststoffen zur orangenen Wasserstoffherzeugung gerechnet werden können. Auch solche Siedlungsabfälle können einen hohen biogenen Anteil aufweisen. Dies muss nunmehr in einer eigenen Verordnung konkretisiert werden.

Die Öffnung des Gesetzes zur Weiterentwicklung der Treibhausgasminderungsquote für Wasserstoff aus anderen technologischen Prozessen ist auch vor dem Hintergrund zu sehen, dass man sich dadurch insgesamt einen rascheren Ausbau der Wasserstoffversorgung (als „Markthochlauf“ bezeichnet) erhofft. Der Aufbau der Kapazitäten für mindestens 5 Gigawatt bis zum Jahr 2030 ist Teil der Nationalen Wasserstoffstrategie der Bundesregierung.

In die Debatte eingeflossen sind auch laufende Projekte etwa der Stadt Frankfurt am Main, wo der Strom einer Abfallverbrennungsanlage im Projekt MH2Regio zur Wasserstoffproduktion und dann als Kraftstoff der Fahrzeugflotte des Entsorgers genutzt werden soll.

Parallel zur politischen Debatte hat sich eine Reihe von unternehmerischen Akteuren positioniert, die sich mit der Wasserstoffproduktion aus Abfällen, Biomasse und Abwässern befassen. Diese sind im Folgenden nicht namentlich genannt. Vielmehr werden die verschiedenen Verfahren der **direkten Gewinnung von Wasserstoff aus Abfällen bzw. Abwasser** beschrieben. Es existieren zahlreiche weitere Verfahren, bei denen aus Abfällen zunächst ein anderes Produkt (etwa Methan) und aus diesem nachfolgend Wasserstoff erzeugt wird. Erforscht wird derzeit beispielsweise die so genannte Methanpyrolyse, bei der Methan zu Wasserstoff und festem Kohlenstoff umgesetzt wird und somit kein klimawirksames Kohlendioxid anfällt (Agora Energiewende 2021: 126 f). Solche Verfahren der indirekten Wasserstoffgewinnung werden hier – auch mit Blick auf die Fragestellung - bewusst ausgeklammert.

## 2. Dunkle Fermentation

Als dunkle Fermentation (auch: Dunkelfermentation) werden biotechnologische Verfahren bezeichnet, bei denen Mikroorganismen in geschlossenen Anlagen (Reaktoren) aus Biomasse, biogene Reststoffen oder Abwässern, die biogene Reststoffe enthalten, Wasserstoff erzeugen. Diese Prozesse laufen bei Temperaturen von 35 bis 80 Grad Celsius ab. Wasserstoff fällt bei den verschiedenen, in der Forschung befindlichen Verfahren der dunklen Fermentation nicht rein an, sondern im Gemisch mit anderen Gasen etwa Methan.

Beispielsweise erforscht das Projekt „HyTech – Biologische Wasserstoffherzeugung für eine nachhaltige Energiewirtschaft“, das seitens des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie geför-

dert wird, seit 2020 ein zweistufiges Verfahren, bei dem im ersten Schritt der Wasserstoff gewonnen und im zweiten Schritt eine gewöhnliche Biomassevergärung zu Biogas, sprich: Methan, angeschlossen wird. Mikroorganismen wandeln zunächst unter Ausschluss von Sauerstoff (anaerobe Bedingungen) einige komplexe organische Verbindungen aus in Wasser vorgelegter Biomasse oder Reststoffen oder Abwässern in Wasserstoff und Kohlendioxid um. Da hierbei nicht alle organischen Substanzen verstoffwechselt werden, wird eine Biomassevergärung zu Biogas angeschlossen, die ebenfalls unter Abwesenheit von Luftsauerstoff abläuft. Forschende sehen einen Vorteil des Verfahrens darin, dass mit dem zweistufigen Prozess auch Biomasse genutzt werden könnte, die bisher nicht für die Biogasproduktion herangezogen würde. Genannt werden Biomasseabfälle aus dem kommunalen Bereich und aus der Textilindustrie. In der Forschungsliteratur finden sich unter anderem Arbeiten zur Dunklen Fermentation aus Zuckerrübenfabrikabfällen (Detman et al. 2021), aus reinen Zuckern und aus Meeresalgen (Pereira et al. 2021)

Nahezu alle internationalen Forschungsarbeiten zur dunklen Fermentation kombinieren die Biowasserstoffproduktion mit einem zweiten Verfahrensschritt. Dies liegt daran, dass die eingesetzten Bakterien im ersten Schritt zwar schnell, aber nur geringe Mengen an Wasserstoff erzeugen und zahlreiche andere Stoffwechselprodukte erzeugen. Sodann bleibt eine kohlenstoff- und stickstoffhaltige Flüssigkeit zurück, die weiter verwertet werden muss, da sonst große Abwasservolumina anfallen würden. Neben einer nachfolgenden Vergärung werden hier verschiedene Prozesse erforscht (Ding et al. 2016).

Für eine Verwendung von Wasserstoff, der aus Dunkler Fermentation gewonnen wurde, in einem brennstoffzellenbasierten Fahrzeug wäre das entstehende Gasgemisch aus Wasserstoff, Kohlendioxid und Methan nach gegenwärtigem Stand der Technik etwa mittels Membranen voneinander zu trennen.

Üblicherweise werden verschiedene Ausgangsmaterialien im Zuge der biotechnologischen Forschung bei Prozessen wie der Dunklen Fermentation untersucht. Im kommerziellen Maßstab wird dann ein sehr definiertes Einsatzgut verwendet, auf das sowohl die Mikroorganismen wie auch die Prozessführung genau abgestimmt sind. So werden bei der Biomassevergärung heutzutage kommerziell in erster Linie Mais oder Gülle eingesetzt, wenngleich sich auch andere Materialien biogenen Ursprungs vergären lassen. Variable oder heterogene Stoffströme lassen sich jedoch in biotechnologischen Verfahren nicht beliebig flexibel einsetzen.

Die Erzeugung von Wasserstoff via dunkler Fermentation in vergleichsweise geringer Ausbeute (deutlich kleiner 50 Prozent) bei großem Volumenstrom der Ausgangssubstanz - ggf. Abfall - lässt erwarten, dass eine solche Anwendung dann in Frage kommt, wenn der Wasserstoff vor Ort verwendet oder gespeichert werden kann etwa als Treibstoff für landwirtschaftliche Nutzfahrzeuge. Neben der Technologienentwicklung bedürfte es der Entwicklung von entsprechenden Anwendungsszenarien (vgl. auch BMWi-Forschungsnetzwerk Bioenergie 2021).

### 3. Plasmaverfahren

Bei Temperaturen von mehreren tausend Grad<sup>1</sup> zerfallen Stoffe in geladene Teilchen (Ionen, Elektronen, auch Radikale). Dieser Zustand wird Plasma genannt und auch als vierter Aggregatzustand bezeichnet. Plasmen können dabei auf verschiedenen Wegen erzeugt werden, sowohl thermisch als auch elektrisch. Wird ein starkes elektrisches Feld mit mehreren Tausend Kilovolt Spannung angelegt, entsteht ein Plasma, das sich spontan mit sichtbaren Blitzen entlädt - das Plasma zündet.

Da chemische Bindungen bei derart intensiver Energiezufuhr brechen, lassen sich komplexe, hochmolekulare Substanzen mit einem Plasma in elementare Stoffe wie Wasserstoff, Sauerstoff und Stickstoff überführen. Da das Verfahren äußerst energieaufwändig ist, wurde es bisher vorwiegend zur Behandlung sehr gefährlicher Abfälle in kleinen Mengen angewandt.

Wird das Plasma über Primärenergie erzeugt, sind Plasmaverfahren mit sehr hohen Energieverbräuchen verbunden. Daher kombinieren Entwickler und Betreiber häufig ein thermisches Verfahren, das selbst mit Wärmeproduktion einhergeht, mit einer nachfolgenden Plasmabehandlung. Als vorgeschaltete thermische Verfahren kommen die Pyrolyse, das Erhitzen unter Luftabschluss, und die Vergasung, das Erhitzen unter gezielt eingestellter sauerstoffarmer Atmosphäre in Frage (Umweltbundesamt 2017: 22).

Kritisch ist bei allen Hochtemperaturverfahren die Lebensdauer und Betriebszeit von Anlagenteilen, die durch die hohe thermische Belastung, Materialermüdung und Korrosion eingeschränkt wird.

#### 3.1. Plasmapyrolyse

Die Kombination von Pyrolyse und Plasmabehandlung ist bei festen Abfällen bisher nicht im industriellen Einsatz. Dagegen findet sie bei flüssigen Abfällen, sprich: Abwässern, vereinzelt Anwendung (Umweltbundesamt 2017: 22). Dabei wird die Flüssigkeit unter Luftabschluss erhitzt und die anfallenden Gase schließlich in ein Plasma eingebracht.

Geforscht wird allenthalben derzeit hierzulande an einem Plasmabehandlungsverfahren für Abwässer aus Biogas-, Klär- oder Industrieanlagen. Dabei werden wasserstoffreiche Moleküle etwa Ammoniumsalze, Nitrate und andere Stickstoffverbindungen, die im Kläranlagenablauf unerwünscht sind, mittels Plasma gespalten. Als Vorteil wird angeführt, dass der Stickstoffeintrag in den Wasserhaushalt in Deutschland deutlich zu hoch liegt. Würde für die Erzeugung der Plasmas klimaneutral gewonnener Strom verwendet, wäre so hergestellter Wasserstoff gewissermaßen grün und orange, da er auch aus Abwasser/Abfall entsteht. Das Plasmaverfahren wird von einem unternehmerischen Akteur als „Plasmalyse“ bezeichnet, unterscheidet sich jedoch nicht grundsätzlich von vielen anderen Plasmabehandlungsverfahren für Abwässer. Der Energiebedarf für dieses Plasmaverfahren wird für die Erzeugung von Wasserstoff aus Ammoniak mit 20 kWh/kg Wasserstoff angegeben, die Angabe stammt von einem der unternehmerischen Akteure in diesem

---

1 Die Temperaturangaben schwanken in der Fachliteratur erheblich, sodass hier keine genaue Angabe gemacht wird.

jungen Forschungsfeld. Für die Erzeugung von Wasserstoff aus Wasser mittels Elektrolyse werden 45 bis 50 kWh/kg benötigt (Öhlschlägel 2021).

Der niedrigere Energiebedarf für die Erzeugung von Wasserstoff aus Ammoniumverbindungen resultiert daraus, dass die Stickstoff-Wasserstoffbindung „lockerer“, sprich: energieärmer, ist verglichen mit der Wasserstoff-Sauerstoffbindung in einem Wassermolekül und außerdem vier Wasserstoffatome je Ammoniumion zwei Wasserstoffatomen je Wassermolekül gegenüberstehen. Um diesen Unterschied prozesstechnisch zu nutzen, müsste die Wasserstoffherzeugung aber auf das Ammoniumreservoir im Abwasser begrenzt bleiben. Die Ammoniumgehalte von Abwässern sind branchenspezifisch in der Abwasserverordnung geregelt und mit Grenzwerten versehen.

Plasmaverfahren zur Behandlung von Abwässern werden und wurden von verschiedenen Institutionen erforscht (z. B. Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB 2014, Leibniz-Institut für Plasmaforschung und Technologie 2021). Sie werden auch als vierte Reinigungsstufe zur Abwasserbehandlung untersucht, da im Plasma naturgemäß auch Medikamentenrückstände und andere Spurenstoffe wie auch antibiotikaresistente Keime zerstört werden. Sowohl Spurenstoffe als auch antibiotikaresistente Keime bereiten bei der derzeit üblichen dreistufigen Abwasserbehandlung Probleme, da sie nicht vollständig entfernt werden (Fraunhofer Institut für Lasertechnik 2018). Hier muss das Verfahren in Relation zu bereits kommerziell im Einsatz befindlichen Verfahren – konkret: der Behandlung mit Ozon und der Reinigung mittels Aktivkohle – gesehen werden. Insbesondere der vergleichsweise deutlich höhere Energiebedarf der Plasmabehandlung ist in der Literatur beschrieben (Fraunhofer Institut für Lasertechnik 2018), wobei jedoch bei der Ozonierung und Aktivkohlebehandlung kein Wasserstoff als Energieträger gewonnen wird.

### 3.2. Plasmavergasung

In bestehenden Anlagen zur Plasmavergasung wird das Plasma üblicherweise elektrisch über hohe Spannungen erzeugt und als Lichtbogen sichtbar, wobei Temperaturen von 2000 Grad Celsius und mehr entstehen können. Aufgrund des im Vergleich zu anderen Verfahren der Abfallverwertung hohen Energieaufwands wurde das Verfahren bisher vor allem für kleine Abfallströme mit hohem Schadpotenzial, wie Krankenhausabfälle und asbesthaltige Materialien, genutzt (Umweltbundesamt 2017: 23).

Um den Energieverbrauch zu senken und das Verfahren möglicherweise auch für bestimmte Siedlungs- und Spezialabfälle nutzbar zu machen, arbeiten verschiedene Entwickler an einer zweistufigen Plasmavergasung. Dabei wird der Abfallstrom zunächst auf einige hundert Grad erhitzt und zwar in sauerstoffarmer Atmosphäre, dabei entstehen brennbare Gase (siehe auch folgendes Kapitel), die sodann in ein Plasma eingebracht werden. Neben anderen Produkten entsteht dabei Wasserstoff im Gemisch mit Kohlenmonoxid, was als so genanntes Synthesegas bezeichnet wird. Synthesegas ist Ausgangsstoff für einige chemische Prozesse, etwa die Methanolerzeugung.

Wenn mittels Plasmavergasung reiner Wasserstoff abgetrennt werden sollte, wäre dieser somit über Separationsverfahren nach dem Stand der Technik aus dem Gasstrom abzutrennen.



Nach Angaben eines unternehmerischen Akteurs könnten aus 44.000 Tonnen an ausrangierten Rotorblättern 7.500 Tonnen Wasserstoff gewonnen werden, wobei es sich vermutlich um eine kalkulatorische Prognose handelt, da keine Fachveröffentlichungen zur Plasmavergasung von Windkraftanlagenabfall vorliegen. Die Rotorblätter von still gelegten Windkraftanlagen stellen aktuell ein Entsorgungsproblem dar. Sofern sie Carbonfasern enthalten, können sie bisher nicht in bewährten technologischen Prozessen recycelt werden (siehe dazu Umweltbundesamt 2017).

Theoretisch lassen sich mit Plasmaverfahren alle erdenklichen flüssigen und festen Abfälle behandeln und auch Wasserstoff daraus erzeugen. Soweit der Stoffstrom jedoch Metalle enthält, stören diese den Prozess: Sie vermindern die Ausbeute an Synthesegas und damit Wasserstoff und bleiben als Schlacke zurück. Auch bei feuchten Rohmaterialien etwa Biomasse aus der braunen Tonne vermindert sich der Ertrag an Synthesegas und damit Wasserstoff. Solche Abfälle müssten folglich vor der Plasmavergasung getrocknet werden. Weiterhin sind Plasmaverfahren wie bereits erwähnt vergleichsweise energieintensiv und der Betrieb somit kostspielig, sodass sie am ehesten für Abfallströme relevant werden könnten, die anderweitig nicht zu verwerten sind und bei denen die Ausbeute an Wasserstoff rechnerisch ideale Anteile von 35 bis 45 Prozent am Gasstrom erreichen kann.

Als Vorteil von Plasmaverfahren wird angeführt, dass keine organischen Schadstoffe wie Dioxine und Furane entstehen, da diese bei den hohen Temperaturen zerstört würden. Was in der Theorie schlüssig ist, ist in der Realität eine Frage der Prozessführung: Sobald nicht alle Substanzen ausreichend lange Zeit in der hohen Temperaturzone des Plasmas verweilen, werden Schadstoffe weniger effizient zerstört. Das Schadminderungspotenzial sinkt. Zudem können sich Dioxine und Furane nachgelagert in den kälteren Zonen der Anlage bei der Abkühlung des Synthesegases nachweislich erneut bilden. Dies kann durch rasche Abkühlung unterdrückt werden. Dioxine und Furane und andere Schadstoffe im Abgasstrom müssten ggf. in einer nachfolgenden Abgasbehandlung weitgehend zerstört werden, wie sie auch in Müllverbrennungsanlagen üblich ist.

Aus den Erfahrungen mit bisherigen Plasmavergasungsverfahren wird in der Fachliteratur beschrieben, dass diese wartungsintensiv seien und es immer wieder zu Unterbrechungen des Prozesses kommen könne. Bisher soll es weltweit eine geschätzte Handvoll Anlagen geben, die Plasmavergasung zur Abfallbehandlung nutzen, vorwiegend in Japan, auch in China und Indien, wobei nur an einem Standort Energie gewonnen wird. Der Fokus liegt auf der Verminderung des Volumens und des Schadpotenzials bestimmter Abfälle. Die Nettoenergiebilanz kann negativ sein, sprich, dass mehr Energie erforderlich ist, als gewonnen werden kann. Plasmavergasungsprojekte zur Wasserstoffgewinnung befinden sich in der Erforschung (vgl. u. a. IEA Bioenergy 2020).

#### **4. Vergasung von Biomasse und anderen Abfällen**

Grundsätzlich kann Wasserstoff auch bei der Vergasung von Biomasse, beispielsweise von Siedlungsabfällen erzeugt werden – also ohne Plasma. Bei einer Vergasung (auch thermochemische Umwandlung, thermochemische Vergasung) wird das Einsatzgut zunächst auf einige hundert Grad Celsius erhitzt und in sauerstoffarmer Atmosphäre umgesetzt; es entsteht ein brennbares Gas. Dieses enthält neben Kohlenmonoxid, Kohlendioxid und Methan auch Wasserstoff. Der Anteil kann je nach Prozessführung und Einsatzgut bei bis zu 35 bis 45 Prozent im Produktgas liegen (IEA Bioenergy 2018: 24).

Bisher werden energiereiche feste Abfälle in Deutschland überwiegend in Müllverbrennungsanlagen thermisch verwertet und die anfallende Wärme zur Stromerzeugung genutzt. Der Wirkungsgrad soll hierbei bei rund 10 Prozent liegen. Würde man die Abfälle vergasen, den Wasserstoff abtrennen und beispielsweise das verbliebene Einsatzgut zur Stromgewinnung nutzen, kann der Wirkungsgrad höher liegen (Energieagentur NRW 2016).

In Forschungsarbeiten wurden verschiedene Stoffströme in Vergasungsverfahren untersucht, darunter Altholz, Restholz aus der verarbeitenden Industrie, Küchenabfälle wie auch Abfälle aus der Landwirtschaft, Klärschlamm und die kunststoffhaltige Schredderfraktion aus der Verschrottung von Altfahrzeugen, die infolge der zunehmenden Verbauung von Kunststoffen in Fahrzeugen zunimmt und als nicht recyclingfähig gilt. Es wurde gezeigt, dass die Verwendung von Katalysatoren etwa bestimmten Metallen die Ausbeute an Synthesegas und damit Wasserstoff erhöhen kann (vgl. auch Lee et al. 2019)

Die Gewinnung von Wasserstoff aus biogenen oder anderen Abfällen befindet sich derzeit in der Entwicklung. Vergasungsverfahren, die beispielsweise Wärme oder Strom erzeugen, sind aber bereits in verschiedenen Bereichen im Einsatz und nicht grundlegend neu. Bisherige Biomassevergasungsanlagen basieren auf der Vergasung von Forstholz und Restholz, die über Holzhackschnitzel zugeführt werden. Für die Vergasung muss die Biomasse entsprechend zerkleinert und getrocknet werden – sodass bezogen auf eine Anlage ein möglichst einheitlicher Stoffstrom verarbeitet wird. Jede einzelne Anwendung erfordert die prozesstechnische und anlagentechnische Optimierung. Die Ausbeute an Wasserstoff ist bei solchen Verfahren grundsätzlich höher als bei der Dunklen Fermentation (vgl. auch BMWI-Forschungsnetzwerk Bioenergie 2021). Auch ist das Einsatzgut bei thermischen Verfahren tendenziell variabler als bei biotechnologischen Verfahren, die auf einer Kultur von bestimmten Mikroorganismen beruhen und ein umschriebenes Nährmedium benötigen. Gleichwohl ist der Energieaufwand höher als bei biotechnologischen Prozessen. Besonders relevant ist weiterhin, dass bei der Vergasung von Abfallstoffen erhebliche Mengen fester und flüssiger Reststoffe (teerartige Verbindungen) zurückbleiben, die mit Schadstoffen befrachtet sein können, zum einen infolge der Belastung des Ausgangsmaterials und zum anderen, da bei Vergasungsverfahren in sauerstoffarmer Atmosphäre neue Schadstoffe anfallen können. Ihre weitere Verwendung ist nur eingeschränkt möglich, sodass ihre Entstehung im Betrieb minimiert wird. Weiterhin entstehen bei thermischen Vergasungsprozessen Aschen und schadstoffhaltige Gase etwa Dioxine und Furane, die gezielt mit Abgasreinigungsverfahren nach dem Stand der Technik vermindert werden müssen. Um eine möglichst hohe Qualität und gleichbleibende Zusammensetzung des erzeugten Gases zu erzielen, muss die Schwankungsbreite der eingesetzten Stoffströme begrenzt bleiben. Größere Anlagen können insbesondere aufgrund der Nachbehandlung von Abgasen, Abwässern etc. effizienter ausgelegt werden. Zugleich erfordern diese einen weiträumigen Transport von biogenen oder anderen Abfällen, der sich nachteilig auf die Ökobilanz auswirkt (vgl. Lexikon der Energie 2020).

## 5. Quellen- und Literaturverzeichnis

Agora Energiewende (2021). Klimaneutrales Deutschland. Juni 2021, Berlin, online abrufbar unter: [https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2020/2020\\_10\\_KNDE/A-EW\\_195\\_KNDE\\_WEB.pdf](https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2020/2020_10_KNDE/A-EW_195_KNDE_WEB.pdf) (Stand: 15.09.2021)

---

Bundesministerium für Bildung und Forschung (2021). Nationale Wasserstoffstrategie Wissenswertes zu Grünem Wasserstoff. online abrufbar unter: <https://www.bmbf.de/bmbf/shared-docs/kurzmeldungen/de/wissenswertes-zu-gruenem-wasserstoff.html> (Stand: 2.09.2021)

BMWi-Forschungsnetzwerk Bioenergie (2021). Biomasse und Bioenergie als Teil der Wasserstoffwirtschaft, Stellungnahme vom 4. Juni 2021, online abrufbar unter: [https://www.energetische-biomassenutzung.de/fileadmin/media/6\\_Publikationen/Stellungnahmen/Stellungnahme\\_FNBioE\\_H2-BM\\_final.pdf](https://www.energetische-biomassenutzung.de/fileadmin/media/6_Publikationen/Stellungnahmen/Stellungnahme_FNBioE_H2-BM_final.pdf) (Stand: 01.09.2021)

Detman, Ana et al. (2021). Dynamics and Complexity of Dark Fermentation Microbial Communities Producing Hydrogen From Sugar Beet Molasses in Continuously Operating Packed Bed Reactors. In: *Frontiers in Microbiology*, 08 Januar 2021, online abrufbar unter: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2020.612344/full> (Stand: 06.09.2021)

Deutscher Bundestag (2021). Gesetzentwurf der Bundesregierung Entwurf eines Gesetzes zur Weiterentwicklung der Treibhausgasminderungs-Quote, 9. März 2021, Bt-Drs. 19/27435, online abrufbar unter: <https://dserver.bundestag.de/btd/19/274/1927435.pdf> (Stand: 02.09.2021)

Deutscher Bundestag (2021). Beschlussempfehlung und Bericht des Ausschusses für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit zu dem Gesetzentwurf der Bundesregierung „Entwurf eines Gesetzes zur Weiterentwicklung der Treibhausgasminderungs-Quote“ zu dem Antrag der Abgeordneten Dr. Lukas Köhler, Frank Sitta, Grigorios Aggelidis, weiterer Abgeordneter und der Fraktion der FDP „Keine Bilanzfälschung beim Klimaschutz im Verkehr - Erneuerbare-Energien-Richtlinie RED II technologieutral umsetzen“, 19. Mai 2021, online abrufbar unter: <https://dserver.bundestag.de/btd/19/298/1929850.pdf> (Stand: 02.09.2021)

Deutscher Bundestag (2021). Plenarprotokoll 19/230, 20. Mai 2021, online abrufbar unter: <https://dserver.bundestag.de/btp/19/19230.pdf#P.29572> (Stand: 02.09.2021)

Bundesregierung (2020). Die Nationale Wasserstoffstrategie, Juni 2020, online abrufbar unter: [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=20](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=20) (Stand: 31.08.2021)

Deutscher Industrie- und Handelskammertag (2020). Wasserstoff. DIHK Faktenpapier, Juni 2020, Berlin/Brüssel, online abrufbar unter: <https://www.dihk.de/re-source/blob/24872/fd2c89df9484cf912199041a9587a3d6/dihk-faktenpapier-wasserstoff-data.pdf> (Stand: 09.09.2021).

Ding, Chang et al. (2016). 11 - Biological and fermentative production of hydrogen. In: *Handbook of Biofuels Production*. S. 303-333, online abrufbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081004555000114> (Stand: 06.09.2021)

Energieagentur NRW (2016). ReEnvision: Aus Müll wird Wasserstoff, 2016, online abrufbar unter: [https://www.energieagentur.nrw/klimaexpo/reenvision\\_aus\\_muell\\_wird\\_wasserstoff](https://www.energieagentur.nrw/klimaexpo/reenvision_aus_muell_wird_wasserstoff) (Stand: 1.09.2021)

---

Fraunhofer Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB (2014). Schadstoffe im Abwasser mit Plasma abbauen. 30. Juli 2014, online abrufbar unter: <https://www.igb.fraunhofer.de/de/presse-medien/presseinformationen/2014/schadstoffe-im-abwasser-mit-plasma-abbauen.html> (Stand: 31.08.2021)

Fraunhofer Institut für Lasertechnik (2018). Innovatives Plasmaverfahren zum Abbau von Schadstoffen im Abwasser, 2018, online abrufbar unter: [https://www.ilt.fraunhofer.de/content/dam/ilt/de/documents/Jahresberichte/JB18/TF3/HZ\\_JB18\\_TF3\\_S97\\_Innovatives\\_Plasma\\_verfahren\\_zum\\_Abbau\\_von\\_Schadstoffen\\_im\\_Abwasser.pdf](https://www.ilt.fraunhofer.de/content/dam/ilt/de/documents/Jahresberichte/JB18/TF3/HZ_JB18_TF3_S97_Innovatives_Plasma_verfahren_zum_Abbau_von_Schadstoffen_im_Abwasser.pdf) (Stand: 31.08.2021)

IEA Bioenergy (2018). Hydrogen from biomass gasification. Dezember 2018, online abrufbar unter: [https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2019/01/Wasserstoffstudie\\_IEA-final.pdf](https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2019/01/Wasserstoffstudie_IEA-final.pdf) (Stand: 01.09.2021)

IEA Bioenergy (2020). Emerging Gasification Technologies for Waste & Biomass, Dezember 2020, online abrufbar unter: [https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2021/02/Emerging-Gasification-Technologies\\_final.pdf](https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2021/02/Emerging-Gasification-Technologies_final.pdf) (Stand: 06.09.2021)

Lee, Sze Ying et al. (2019). Waste to bioenergy: a review on the recent conversion technologies. 16. Mai 2019, In: BMC Energy, Band 1, Nr. 4, online abrufbar unter: <https://bmcenergy.biomedcentral.com/articles/10.1186/s42500-019-0004-7> (Stand: 06.09.2021)

Leibniz-Institut für Plasmaforschung und Technologie (2021). Dekontamination, online abrufbar unter: <https://www.inp-greifswald.de/de/forschung/umwelt-und-gesundheit/dekontamination/> (Stand: 31.08.2021)

Lexikon der Energie (2020). Biomassevergasung, 2020, online abrufbar unter: <https://www.energie-lexikon.info/biomassevergasung.html> (Stand: 01.09.2021)

Öhlschlägel, Stefanie (2021). Die Schlüsseltechnologie stellt einen wichtigen Meilenstein auf dem Weg zur Klimaneutralität dar, 25. Mai 2021, online abrufbar unter: <https://siz-energie-plus.de/gruener-wasserstoff> (Stand: 09.09.2021)

Pereira, Alcina et al. (2021) Zeolite addition to improve biohydrogen production from dark fermentation of C5/C6-sugars and Sargassum sp. Biomass. In: Scientific Reports, 11, 16350, online abrufbar unter: <https://www.nature.com/articles/s41598-021-95615-1.pdf> (Stand: 07.09.2021)

Umweltbundesamt (2017). Sachstand zu den alternativen Verfahren für die thermische Entsorgung von Abfällen. März 2017, Dessau-Roßlau, online abrufbar unter: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-03-06\\_texte\\_17-2017\\_alternative-thermische-verfahren\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-03-06_texte_17-2017_alternative-thermische-verfahren_0.pdf) (Stand: 09.09.2021)

Umweltbundesamt (2019). Entwicklung eines Konzepts und Maßnahmen zum ressourcensicheren Rückbau von Windenergieanlagen. Juli 2019, Dessau-Roßlau, online abrufbar unter: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019\\_10\\_09\\_texte\\_117-2019\\_uba\\_weacycle\\_mit\\_summary\\_and\\_abstract\\_170719\\_final\\_v4\\_pdfua\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019_10_09_texte_117-2019_uba_weacycle_mit_summary_and_abstract_170719_final_v4_pdfua_0.pdf) (Stand: 09.09.2021)