

STELLUNGNAHME

BMW-Forschungsnetzwerk Bioenergie

»Biomasse und Bioenergie
als Teil der Wasserstoffwirtschaft«



Stellungnahme

BMW-Forschungsnetzwerk Bioenergie

Biomasse und Bioenergie als Teil der Wasserstoffwirtschaft



Inhalt

Inhalt	1
Präambel	3
Kurzzusammenfassung der Kernempfehlungen.....	4
I. Einleitung und Rahmen.....	7
II. Übergeordnete Aspekte im Themenbereich Wasserstoff aus und mit Biomasse und Bioenergie	8
.1. „Farbenlehre“ Wasserstoff	8
.2. Biomassepotenziale	9
.3. Technologieoffenheit und Klimaschutzbeitrag.....	10
.4. Kontinuierliche wissenschaftliche Begleitung.....	10
.5. Markteinführung, Kosten und Optimierungspotenziale.....	11
.6. Rechtliche Rahmenbedingungen	12
.7. Zu geringe CO ₂ -Preise.....	12
III. Technologiecluster	14
3.1. Technologien zur Produktion von Wasserstoff aus Biomasse und Bioenergieträgern	14
A) Biotechnologische Verfahren zur Wasserstoffproduktion aus Rest- und Abfallstoffen ...	14
B) Thermo-chemische Technologien zur Wasserstoffproduktion aus Rest- und Abfallstoffen und Bioenergieträgern	16
3.2. Technologien für die Nutzung von grünem Wasserstoff mit Biomasse (Hybridverfahren)	18
3.3. Systemdienliche Kombination von Wasserstoff und Bioenergie	20
ANHANG TECHNOLOGIESTECKBRIEFE	22
3.1. Technologien zur Produktion von Wasserstoff aus Biomasse und Bioenergieträgern	22
A) Biotechnologische Verfahren zur Wasserstoffproduktion aus Rest- und Abfallstoffen ...	22
B) Thermo-chemische Technologien zur Wasserstoffproduktion aus Rest- und Abfallstoffen und Bioenergieträgern	30
3.2. Technologien für die Nutzung von grünem Wasserstoff mit Biomasse und Bioenergieträgern (Hybridverfahren).....	36
A) Biologische Methanisierung	36

B) Thermo-chemische/Katalytische Verfahren zur Bereitstellung von Energieträgern und Chemikalien	38
3.3. Systemdienliche Kombination von Wasserstoff und Bioenergie	44
Autor*innen	48
Kerngruppe	48
Weiterer Kommentierungskreis.....	49
Redaktion (Begleitforschung am DBFZ).....	49
Kontakt.....	50
Abkürzungsverzeichnis.....	51

PRÄAMBEL

Die Stellungnahme wurde im Rahmen eines Konsultationsprozesses vom 5.3. bis 21.05.2021 im BMWi-Forschungsnetzwerk Bioenergie erstellt. Etwa 50 Personen aus dem Netzwerk waren in der Kerngruppe zur Erstellung der Stellungnahme beteiligt. Der Grundstein wurde auf einem ersten online-Sondierungstreffen am 5.3.2021 gelegt. Daraufhin folgten 2 Kommentierungsrunden mit der Kerngruppe und eine abschließende Konsultationsrunde mit weiteren Interessierten (ca. 30).

Ziel der Stellungnahme ist es, ein Meinungsbild der Expert*innen des Forschungsnetzwerkes Bioenergie

- zum möglichen **Beitrag von Biomasse und Bioenergie für die Nationale und Europäische Wasserstoffstrategie** und zum Erreichen der festgelegten Klimaschutzziele aufzuzeigen,
- zu aussichtsreichen **Technologie- und Anwendungsklustern** der Bioenergie im Kontext Wasserstoff sowie den damit verbundenen Herausforderungen zu gewinnen, um die Diskussion um derzeit unzureichend betrachtete Möglichkeiten der Erzeugung und Verwertung von Wasserstoff im Bereich Biomasse/Bioenergie zu erweitern,
- zu **Forschungsempfehlungen** für die nächsten Skizzenrunden im 7. Energieforschungsprogramm (EFP) zu geben und
- zu Schlussfolgerungen für den dafür erforderlichen **Forschungs- und Entscheidungsbedarf für die künftige Praxiseinführung** vor allem auch nach 2030 zu ziehen.

Die Stellungnahme fokussiert vor allem auf:

- **politische und ökonomische Rahmenbedingungen einschließlich verfügbarer Biomassepotenziale,**
- **Technologien zur Produktion von Wasserstoff aus Biomasse und Bioenergieträgern,**
- **Technologien zur Nutzung von grünem Wasserstoff mit Biomasse und Bioenergieträgern:** (Weiter-)Entwicklung von integrierten Konversions- und Aufbereitungstechnologien mit besonderem Fokus auf sektorübergreifende Technologien und Anlagenkonzepte unter Kopplung von Wasserstoff zu Folgeprodukten (wie z. B. synthetische Kraftstoffe, Plattformchemikalien),
- **Bioenergietechnologien zur systemdienlichen Ergänzung von grünem Wasserstoff:** Systemintegration von grünem Wasserstoff mit Biomasse bzw. Bioenergie, vor allem in Bezug auf Systemdienstleistungen (inkl. Prozesswärme) und flexibler Produktion, der Nutzung von Speichern, Produktqualitäten (Normen und Qualitätsanforderungen), sowie der Weiterentwicklung der Einsatzfelder von grünem Wasserstoff und insbesondere dessen Folgeprodukte

Daraus schlussfolgernd werden zusammengefasst Forschungsbedarfe und Handlungsbedarfe abgeleitet.

Es werden im Kontext H₂-Biomasse zwei ganz unterschiedliche Wege der Kombination adressiert

- a) Wasserstoff **aus** Biomasse, also die Biomasse als weitere Quelle für Wasserstoff und
- b) Wasserstoff **mit** Biomasse, also die Verwendung von Wasserstoff, der aus Elektrolyse etc. stammt, mit Biomasse bzw. Biomasse-basierenden Verfahren, Energieträgern etc.

Daher wird das auch in den Kapiteln getrennt behandelt.

KURZZUSAMMENFASSUNG DER KERNEMPFEHLUNGEN

Übergeordnete Aspekte

- Es gibt unterschiedliche Definitionen von „grünem“ und „nachhaltigen“ Wasserstoff. So lange es noch keine **gültige Legaldefinition** gibt, werden unterschiedliche Verfahren zur Herstellung von Wasserstoff kontrovers diskutiert. An dieser Stelle ist die Politik gefordert zügig eine Klarstellung anzustreben, die Technologieoffenheit, der Förderung der Forschung und Entwicklung und die Nutzung gleichermaßen vereint.
- Wasserstoff soll in vielfältiger Weise in den unterschiedlichsten Anwendungen genutzt werden. Dazu ist es notwendig auf die jeweiligen Nutzungen, Mengen und Anforderungen abgestimmte Technologien zur Verfügung zu haben. Daher plädiert das Forschungsnetzwerk Bioenergie unbedingt für **Offenheit zu vielfältigen technologischen Möglichkeiten**. Nur auf diese Weise kann unter Beachtung von Nachhaltigkeitskriterien ein **Beitrag zum Klimaschutz** gewährleistet werden.
- Der eingeläutete Wechsel von der energetischen Nutzung von Kohlenwasserstoffen hin zu Wasserstoff als einem Pfeiler der Energiewende bringt momentan noch kaum abschätzbare Veränderungen mit sich. Um diesen Prozess erfolgreich zu meistern ist eine **kontinuierliche wissenschaftliche Begleitung** in Form von Monitoring, Analysen, Entwicklung von Bewertungsmethodik und -kriterien unablässig.
- Ein so umfassender Umbau des Energiesystems bringt Verschiebungen auf dem Markt, bei den Marktakteuren, bei Infrastruktur und im Verhalten der Bevölkerung mit sich. Daher sind zur Gewährleistung eines sicheren Übergangs Förderinstrumente und Anreize zur **Markteinführung** sinnvoll. Die Ausgestaltung solcher Mechanismen sollte sich dabei an Kriterien der ökonomischen und ökologischen Nachhaltigkeit bemessen, sowie die Verfügbarkeit relevanter Technologien einbeziehen.
- Flankierend zur Markteinführung sind die **rechtlichen Rahmenbedingungen** auf die Erfordernisse des Transformationsprozess, aber auch mit Zielfokussierung zu wählen. Hierzu gehört neben einer verbindlichen Definition von grünem Wasserstoff, ebenso die Berücksichtigung bei der Anrechnung auf Treibhausgasquoten und auch die Entwicklung von Ausbaukorridoren mit der gegebenen Technologieoffenheit.
- Der grenzüberschreitende Handel erfordert Mechanismen um im Ausland erzeugten Wasserstoff und/oder Folgeprodukte hierzulande erzeugten Produkten gleichzustellen. Hierzu kann ein Instrument ein **CO₂-Zertifikatspreis** sein, der Erzeugung, Transport und Anrechenbarkeit entlang der gesamten Wertschöpfungskette berücksichtigt und dadurch eine ortsunabhängige Einordnung der Effekte ermöglicht.

Produktion von Wasserstoff aus Biomasse bzw. Bioenergieträgern (Technologiebreite)

- Die Auswahl bzw. Förderung von Technologien zur Wasserstoffproduktion sollte auf Basis der **THG Bilanz der einzelnen Technologien** sowie der **Kosten der Wasserstoffbereitstellung** basieren und auch Biomasse-basierte Technologien berücksichtigen, wo dies einen Mehrwert im Energiesystem erwarten lässt. Dabei sollten die THG-Minderungspotentiale nicht notwendigerweise nur ausschließlich die einzelne Konversionstechnologie, sondern auch das Gesamtsystem betrachten. Weitere Umwelt- und Sozialaspekte können, analog zur EU Taxonomy, weiterhin nach dem „do no significant harm“-Prinzip¹ betrachtet werden. Dies sollte dann aber aufgrund der Vereinbarkeit und klimarelevanten Einordnung für alle Energieerzeugungstechnologien gelten.
- **Dezentral anfallende biologische Rest- und Abfallstoffe** bieten eine Möglichkeit zur lokalen Erzeugung von Wasserstoff. Sie können somit zur Schließung von regionalen

¹ https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/Monatsbericht/Monatsbericht-Themen/2020-09-sustainable-finance-taxonomie.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (Stand: 08.05.2021)

Stoffkreisläufen und gleichzeitig räumlichen Versorgungslücken beitragen, etwa dort, wo sich der Einsatz dezentraler Elektrolyseure nicht anbietet bzw. begrenzte Elektrolysekapazitäten mangels Skaleneffekten nicht wirtschaftlich darstellbar sind.

- Auch wenn für die anwendungsnahe Forschung noch Grenzen gesehen werden, ist es notwendig, die **Bandbreite der Möglichkeiten zur Wasserstoffherzeugung zu erweitern**. Auch biotechnologische Ansätze können hier mittelfristig eine wichtige Rolle spielen. Aktuell fehlt noch eine **Gesamtschau der technischen Optionen zur Wasserstoffherzeugung**. In der Stellungnahme wird ein vorläufiger Überblick an Technologien zur Erzeugung von Wasserstoff aus Biomasse vorgestellt, welcher jedoch keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt.
- Wasserstoff mag als Energieträger für vielfältige Anwendungen technisch gut geeignet sein. Im Bereich der Kohlenwasserstoffchemie kann Wasserstoff jedoch nicht direkt den steigenden Bedarf nach „grünen“ Kohlenwasserstoffen im Sinne einer Bioökonomie bedienen. Insofern sind Pfade zur Bereitstellung von Wasserstoff immer im Zusammenhang mit der Bioökonomie zu betrachten und zu bewerten.

Nutzung von grünem Wasserstoff mit Biomasse und Bioenergieträgern

- **Hybridverfahren:** In vielen Konversionsprozessen der Bioenergieerzeugung und -nutzung fällt vergleichsweise hochkonzentriertes, biogenes CO₂ als Nebenprodukt an, z. B. bei der Bioethanol oder Biomethanproduktion. Diese biogene Kohlenstoffquelle bietet zusammen mit Wasserstoff die Möglichkeit zur Produktion von Kohlenwasserstoffen, wie sie als Plattformchemikalien oder in spezifischen Transportbereichen weiterhin mittelfristig benötigt werden.
- **Substitution:** Einige Verfahren zur Herstellung von Bioenergieträgern erlauben auch die direkte Einbindung von Wasserstoff in den Produktionsprozess. Dies betrifft insbesondere Verfahren zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe, z. B. über die Vergasung von Restbiomasse wie Stroh und Waldrestholz. Durch den Einsatz von Wasserstoff können die Produktausbeute, die Kohlenstoffnutzungseffizienz und der Umwandlungswirkungsgrad der späteren Synthese deutlich verbessert werden. Darüber hinaus bietet sich auch die Substitution fossilen Wasserstoffs beim Hydrotreatment flüssiger Intermediate aus der Biomasseverarbeitung zur THG-Minderung des Gesamtprozesses an (z. B. HEFA-Kraftstoffe (engl. Hydrotreated Esters and Fatty Acids, auch als HVO bekannt)).

Systemdienliche Kombination von grünem Wasserstoff mit Bioenergie

- **Abwärmenutzung aus der Elektrolyse:** Im Falle von elektrolytisch bereitgestelltem Wasserstoff bieten sich Chancen zur Nutzung der Abwärme der Elektrolyseure als Prozessenergie in der Bioenergieträgerproduktion als auch die Möglichkeit das Stromnetz zu entlasten (negative Flexibilität).
- **Nach- und Umrüstung:** Die vorhandene dezentrale Infrastruktur von Biogasanlagen in ländlichen Gebieten mit einer hohen Dichte an Windkraftanlagen eignet sich durch vergleichsweise geringe Umrüstkosten hin zu einer biologischen Methanisierung aus Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid. Durch den Einsatz von Elektrolysewasserstoff können die Raum-Zeit-Ausbeuten hinsichtlich Methan, sowie die Erhöhung der Kohlenstoffeffizienz an Bestandsanlagen, zügig verbessert werden.
- Insbesondere die Kombination von Elektrolyse und Methanisierung mit Biogasaufbereitungsanlagen bietet durch die bessere Nutzung vorhandener Gas-Einspeisepunkte hohe Synergiepotenziale.
- Stromnetzdienlicher Betrieb von Elektrolyseuren im Rahmen der Wasserstoffnutzung mit Biomasse (z. B. Hybridverfahren)

- Für Vergasungsprozesse benötigter Sauerstoff kann als Nebenprodukt aus der Elektrolyse verwendet werden. In den nachfolgenden Reaktionsschritten entfällt dabei die Stickstofflast und reduziert den Aufwand bei der stofflichen Trennung.
- Im Fall von Biogasanlagen in Kläranlagen (Faultürme) kann der anfallende Sauerstoff aus der Elektrolyse für die aeroben Stufen der Abwasserbehandlung genutzt werden.

I. EINLEITUNG UND RAHMEN

Wasserstoff gewinnt zunehmend an Bedeutung für die Transformation hin zu einer klimaneutralen Wirtschaft. Die Aufmerksamkeit für diesen Energieträger hat einen großen Schub erfahren, nachdem ihm im Klimaschutzprogramm 2030 eine zentrale Rolle beim sektorenübergreifenden Klimaschutz zugeschrieben und in der Folge eine deutsche Wasserstoffstrategie mit zahlreichen Maßnahmen verabschiedet wurde. Auch auf europäischer Ebene und in vielen weiteren Staaten erfolgte die Entwicklung entsprechender Strategien (z. B. Niederlande, Australien, Japan, UK, USA), ebenso wie verschiedene Bundesländer eigene Wasserstoffstrategien erarbeiteten.

Während in der Nationalen Wasserstoffstrategie (kurz NWS) vor allem Maßnahmen bis 2030 adressiert werden und auch in der öffentlichen Diskussion die Erzeugung von Wasserstoff auf Basis von Elektrolyse im Vordergrund steht, finden Möglichkeiten zur Erzeugung und Nutzung von Wasserstoff in Kombination mit Biomasse bislang wenig Beachtung. Allgemein kommt Biomasse im Energiesystem u. a. die Aufgabe zu, die fluktuierende Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen flexibel zu ergänzen, die Sektorenkopplung zu unterstützen und eine nachhaltige Kohlenstoff-Kreislaufwirtschaft zu ermöglichen (s. FVEE Positionspapier zur Bioenergie 08/2020). Mithilfe dieser Systemleistungen lassen sich die Kosten der Energiewende nach heutigem Kenntnisstand substantiell reduzieren. Da erneuerbarer Strom begrenzt ist und die Wasserstoffproduktion auf Basis von Elektrolyse vor zahlreichen Herausforderungen steht, kann Biomasse auch hier eine unterstützende Funktion einnehmen. Unter Berücksichtigung der ebenfalls vorhandenen Grenzen nachhaltig verfügbarer Biomasse, ist die Sicherung des Markthochlaufs der Wasserstoffproduktion in der Fläche (Dezentralität) und die Gewährleistung von zeitlicher Kontinuität in der Produktion (Flexibilität) sinnvoll. Daneben bietet die gemeinsame Nutzung von Biomasse und Wasserstoff Potenziale für Synergien. Bioenergie und Bioökonomie können von der Verfügbarkeit an erneuerbar erzeugtem Wasserstoff profitieren und durch geeignete Hybridtechnologien hochwertige erneuerbare Kohlenwasserstoffe zur stofflichen und energetischen Nutzung bereitstellen und damit aktiv Treibhausgasemissionen senken, sowie eine Kreislaufführung des Kohlenstoffs unterstützen. Zudem lassen sich in Abhängigkeit der verwendeten Prozesse neben Kohlenstoffkreisläufen in fermentativen Prozessen auch regionale Stickstoff- und Phosphatkreisläufe schließen, während Wasserstoff als Nebenprodukt entsteht.

Ziel der Stellungnahme ist vor diesem Hintergrund, mögliche Beiträge von Biomasse zu den Zielen der Nationalen und Europäischen Wasserstoffstrategie darzustellen und insbesondere bestehenden Forschungs- und Entwicklungsbedarf sowie Handlungsbedarf für die (Förder-) Politik aufzuzeigen.

II. ÜBERGEORDNETE ASPEKTE IM THEMENBEREICH WASSERSTOFF AUS UND MIT BIOMASSE UND BIOENERGIE

Im Folgenden sind die wichtigsten übergeordneten, technologieübergreifenden Aspekte, auf die sich die Beteiligten der Stellungnahme geeinigt haben, festgehalten.

.1. „FARBENLEHRE“ WASSERSTOFF

Die aktuellen politischen Definitionen von Wasserstoff („Farbenlehre“) stellen eine Genese aus Diskussionen in Wissenschaft und Politik dar und werden kontrovers diskutiert. Die deutsche und die Europäische Wasserstoffstrategie unterscheiden sich dabei nicht zuletzt im Hinblick auf die Rolle von Wasserstoff aus Biomasse.

Der Energieträger Wasserstoff wird derzeit in Deutschland in den Farben grau, blau, türkis und grün kategorisiert. Diese Einordnung ist nachvollziehbar, da sie die verschiedenen Wasserstoffherstellungsverfahren aufzeigt. Dabei trägt die Nationale Wasserstoffstrategie der Vielfalt und den Vorteilen der möglichen Produktionsverfahren und den damit verbundenen THG-Minderungspotenzialen allerdings nicht ausreichend Rechnung, da sie als „grün“ nur Wasserstoff bezeichnet, der aus Elektrolyse unter Verwendung von erneuerbarem Strom hergestellt wurde. Außen vor bleibt dabei der aus Biomasse oder auch direkt aus Solarenergie erzeugte Wasserstoff.²

Dadurch werden auch nachhaltig erschließbare Wasserstoff-Potentiale von einer Anerkennung als grüner Wasserstoff ausgeschlossen.

Die EU-Wasserstoffstrategie macht hingegen deutlich, dass auch Wasserstoff aus Umwandlung von Biomasse zu erneuerbarem Wasserstoff zu zählen ist.

Die Förderung von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben mit Bezug zu Wasserstoff soll die Bandbreite an Technologien zur Herstellung und Nutzung anreizen. Perspektivisch sollen die Verfahren wirtschaftliche Machbarkeit unter Beweis stellen und einen Beitrag zur Versorgung mit grünem Wasserstoff leisten. Deshalb werden meist Verfahren und Technologien mit einem bestimmten, mindestens zu erreichenden TRL gefördert. Wird nun jedoch der mittels eines bestimmten Verfahrens hergestellte Wasserstoff aus einem Anreizsystem ausgeschlossen, wie zum Beispiel biogener Wasserstoff bei der Anrechenbarkeit auf die THG-Minderungsquote im Verkehr, so wird dadurch in absehbarer Zeit kein wirtschaftlich sinnvoller Einsatz dieses Wasserstoffs und seiner Folgeprodukte möglich sein.

Die Nationale Wasserstoffstrategie mit ihrer Farbenlehre und der daraus resultierenden alleinigen Anrechenbarkeit von grünem elektrolytisch hergestelltem Wasserstoff hemmt daher die weitere Erforschung von Technologien zur Herstellung von Wasserstoff aus Biomasse bzw. biomassebasierter Folgeprodukte.

Empfehlung:

[Option A: sofortige Technologieneutralität]

Geeigneter scheint es daher den Fokus statt auf die Farbenlehre auf die Treibhausgasvermeidung und Integration in das Energiesystem/(regionale) Stoffströme als primäres Ziel zu legen. Da kurz- und mittelfristig auch Wasserstoff aus anderen Quellen und Verfahren („blau“ oder „türkis“) zur Minderung der Emissionen von Treibhausgasen (THG) dienen kann, sollte anstelle der „Farben“ eine **wissenschaftlich belastbare, technologieneutrale Kategorisierung der Herstellungspfade für Wasserstoff durch das jeweilige THG-Minderungspotenzial** europaweit entwickelt werden. Weitere Umwelt- und Sozialaspekte können, analog zur EU Taxonomy, nach dem „do no significant harm“-Prinzip betrachtet werden. Dies wäre

² Das Glossar der deutschen Wasserstoffstrategie definiert grünen Wasserstoff als elektrolytisch unter Einsatz von erneuerbarem Strom produziert, während die europäische Strategie auch Wasserstoff aus Biomasse und Solarenergie umfasst

durch **ökobilanzielle Methoden** zu unterlegen und über eine mindestens europäische Zertifizierung abzusichern.

[Option B: Ergänzung der Farbenlehre]

Die Farbenlehre der Nationalen Wasserstoffstrategie kann als Kompromiss zwischen Technologiespezifität und Technologieneutralität verstanden werden: auf der einen Seite die Technologiespezifität im Sinne der Notwendigkeit, knappe Fördermittel auf besonders klimafreundliche Erzeugungspfade zu konzentrieren, und auf der anderen Seite die Technologieneutralität, der angesichts noch nicht absehbarer langfristiger Treibhausgasvermeidungskosten der unterschiedlichen Technologieoptionen ein hoher Stellenwert beizumessen ist. Der Ausschluss von Biomasse-basierten Erzeugungspfaden aus der Definition grünen Wasserstoffs stellt in diesem Sinne einen starken Eingriff in den Grundsatz der Technologieneutralität dar. Gleichzeitig steht diesem Eingriff kein erkennbarer Mehrwert im Sinne einer Begrenzung von Fördermitteln auf klimaschonende Erzeugungsverfahren gegenüber, da Wasserstoff aus Biomasse tendenziell klimaneutral oder sogar mit positiven Auswirkungen auf das Klima erzeugt werden kann. Durch die Nutzung biogener Reststoffe und Vermeidung von freien Methanemissionen sowie durch die gekoppelte Abscheidung und Speicherung von CO₂ (HyBECCS) kann dieser positive Effekt weiter multipliziert werden. Aus diesem Grund wird empfohlen die Definition grünen Wasserstoffs um Erzeugungsverfahren auf Basis nachhaltiger Biomasse zu ergänzen. Das hätte gegenüber Option A den Vorteil, klarer in der Außenwirkung zu sein und das positive Image des Begriffes „grün“ für die Biomasse zu nutzen. Langfristig sollte ein gänzlich technologieneutraler Ansatz gewählt werden, der auf THG-Vermeidungskosten beruht. Weitere Umwelt- und Sozialaspekte können, analog zur EU Taxonomy, nach dem „do no significant harm“-Prinzip (dt. ‚Richte keinen Schaden an‘) betrachtet werden.

.2. BIOMASSEPOTENZIALE

Der künftige Einsatz von Biomasse wird in der Zukunft verstärkt als erneuerbarer Kohlenstoffträger für die Bioökonomie gesehen. Der Mehrwert wird daher vor allem in der Wasserstoffnutzung mit Biomasse und Bioenergie gesehen. Nichtsdestotrotz existieren verschiedene, aussichtsreiche Optionen zur Erzeugung von Wasserstoff aus Biomasse. Der Fokus der Erzeugung von Bioenergie liegt im BMWi-Forschungsnetzwerk Bioenergie aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit nachwachsender Rohstoffe und der zunehmenden Nutzungskonkurrenzen insbesondere auf biogenen Rest- und Abfallstoffen. Daher bezieht sich auch die vorliegende Stellungnahme auf diese Ressourcenbasis. Berücksichtigt werden sollen jedoch auch Biomassen, deren Anbau Nachhaltigkeitsaspekten gerecht wird, wie z. B. der Anbau von Biomasse auf Flächen zum Arten- und Insektenschutz.

Wichtige Aspekte bei der Betrachtung der Biomassepotenziale für die Erzeugung und Nutzung von Wasserstoff aus und mit Biomasse sind:

- die einzigartige Rolle der Biomasse als erneuerbare Kohlenstoffquelle,
- der Fokus auf Maßnahmen zur Absicherung eines hohen Biomasseanteils aus heimischen Quellen mit hoher interner Wertschöpfung und Beachtung kreislaufwirtschaftlicher Prinzipien,
- die Berücksichtigung zunehmender Nutzungskonkurrenzen von Biomasse,
- die primäre Nutzung von Reststoffen entlang des Kaskadenprinzips,
- die Verteilung der begrenzten Ressourcenpotenziale - ob stofflich, für Strom/Wärme, Biomethan (Verkehr) oder Wasserstoff – hängt vom Bedarf und dem jeweiligen Preis ab.

.3. TECHNOLOGIEOFFENHEIT UND KLIMASCHUTZBEITRAG

Aufgrund der Unsicherheit in Bezug auf die langfristige Entwicklung der Erzeugungskosten von Wasserstoff sowie seiner optimalen Anwendungen kommt dem Grundsatz der Technologieoffenheit eine hohe Bedeutung zu. Zur Gewährleistung dieses Grundsatzes sollte sich die künftige F&E-Förderung und der weitere regulatorische Rahmen mit Relevanz für Wasserstoff an den Beiträgen der Erzeugungsverfahren bzw. Anwendungsoptionen zum energiepolitischen Zieldreieck und nicht zuletzt den Treibhausgasvermeidungskosten orientieren.

Folgende Aspekte sollten bei der Gewährleistung von Technologieoffenheit berücksichtigt werden:

- Für einen fairen Wettbewerb der Wasserstoff-Erzeugungstechnologien sollten Fördermaßnahmen auch biobasierten Wasserstoff und dessen Folgeprodukte berücksichtigen und langfristig am Klimaschutzbeitrag (THG-Vermeidungskosten) ausgerichtet sein. Neben einer Aufnahme in die „Farbenlehre“ der NWS (s. Abschnitt .1) sollte biobasierter Wasserstoff daher auch in weiteren Klimaschutzmaßnahmen Berücksichtigung finden, anstelle explizit ausgeschlossen zu werden, wie es etwa im Rahmen der THG-Minderungsquote angekündigt wurde.
- Für eine Förderung nach Maßgabe des Klimaschutzbeitrags ist die Entwicklung einer wissenschaftlich belastbaren, technologieneutralen Kategorisierung der Herstellungspfade für Wasserstoff entlang des jeweiligen THG-Minderungspotenzials auf Basis ökobilanzieller Methoden erforderlich. Diese Methodik und damit verbundene Zertifizierungsverfahren sollten einheitlich auf Europäischer Ebene Anwendung finden.
- Zusätzlich zum fairen Wettbewerb zwischen Biomasse und anderen erneuerbaren Energien muss auch zwischen den verschiedenen Biomassenutzungen eine effiziente Allokation sichergestellt werden (vgl. die FVEE-Stellungnahme „Bioenergie für eine konsistente Klimaschutz- und Energiepolitik“ vom August 2020). Beispielsweise darf weder die aktuelle Nutzung von Biomasse für Strom zementiert werden, noch ist pauschal eine vollständige Ablösung von Biomethan durch biobasierten Wasserstoff anzustreben. Insgesamt sollten Biomasse-basierter Strom, Biomethan inkl. Bio-LNG, biomassebasierte Chemikalien unter Berücksichtigung der Bedeutung von Biomasse als erneuerbare Kohlenstoffquelle und biobasierter Wasserstoff nicht ausschließlich als Konkurrenzoptionen gesehen werden, sondern vielmehr als komplementäre Produkte, die sich in Abhängigkeit vom jeweiligen Kontext ergänzen können.

.4. KONTINUIERLICHE WISSENSCHAFTLICHE BEGLEITUNG

Jegliche Forschungsförderung kann nur substanzielle Beiträge leisten, wenn deren Wirkung und Mechanismen kontinuierlich evaluiert und weiterentwickelt werden. Daher empfehlen wir für alle Formen der Förderung von Technologien zur Erzeugung und Anwendung von Wasserstoff ein **Monitoring einzuführen**. Dabei sollte zunächst ein Diskurs etabliert werden, welcher ein Indikatorenset zur umfassenden ökonomischen, ökologischen und sozialen Bewertung der Nachhaltigkeit von Wasserstoff jeglicher Herkunft entwickelt. Darauf basierend können dann Anrechenbarkeit in verschiedenen Produkten und Monitoring der Anwendung aufgebaut werden. Der frühzeitige Aufbau einer entsprechenden Begleitung stellt eine zielgerichtete Förderung der Forschung sicher und kann helfen, die aufkommenden aber notwendigen Forschungsthemen in den Fokus zu rücken.

.5. MARKTEINFÜHRUNG, KOSTEN UND OPTIMIERUNGSPOTENZIALE

Während der Erarbeitung dieser Stellungnahme konnten die beteiligten Experten vielfach kaum Schätzungen zur Markteinführung, den Kosten sowie Optimierungspotenzialen machen. Dies offenbart eine wesentliche Lücke in der Erforschung der Technologien und Anwendungen. Zahlreiche Technologien sind dem Blickwinkel der Grundlagenforschung entwachsen, jedoch noch nicht in der angewandten Forschung eingebettet. Um eine zielgerichtete Bewertung vornehmen zu können, sind auch erste ökonomische Betrachtungen (wenn auch nur für den Labormaßstab) unbedingt notwendig. Hierdurch soll ein Anreiz geschaffen werden das gesamte Spektrum von Labormaßstab, über weitere anwendungsorientierte Forschung und Demonstrationsprojekte hin zu Pilotprojekten und Markteinführungen betrachten zu können. Einfache ökonomische Bewertungen sind ein Schlüsselement zur Abschätzung des Markt-, aber auch Optimierungspotentials, daher wird empfohlen bei Technologieentwicklungen begleitende ökonomische Analysen einzufordern. Dies betrifft vor allem die biotechnologischen Verfahren aus der Grundlagenforschung, die ein großes Potenzial versprechen, jedoch bisher wenig ökonomisch belastbare Daten bereitstellen.

Spezialfall Erneuerbare Gase auf Basis von Wasserstoff

Der wirtschaftlich erfolgreichen Vermarktung von erneuerbaren Gasen auf Basis von Wasserstoff (z. B. Methan über Power-to-Gas Verfahren) stehen heute noch zwei wesentliche Barrieren entgegen.

Kosten: Mit der heute verfügbaren Technologie können erneuerbare Gase selbst mit kostenlosem Strom nicht zu Kosten produziert werden, die eine Konkurrenz mit herkömmlichem Biomethan ermöglichen. Erschwerend kommt die steuerliche Gleichbehandlung mit dem fossilen Konkurrenzprodukt Erdgas bspw. im Hinblick auf die Energiesteuer hinzu.

Geringe Bekanntheit und Vorbehalte im Markt: Verbraucher*innen haben sehr wenig Wissen zu erneuerbaren Gasen, das gilt auch für heute schon im Markt vorhandene Biomethanprodukte. Auch Unternehmen ziehen diese Gase bei der Energieerzeugung kaum in Betracht, die wenigsten haben sich bislang mit Biomethan als Energieträger befasst.

Geschäftsmodelle zur wettbewerblich erfolgreichen Markteinführung von erneuerbaren Gasen auf Basis grünen Wasserstoffs sind noch kaum sichtbar. Angesichts des oben beschriebenen erheblichen Kostennachteils dieser Gase müssen Geschäftsmodelle entwickelt und erprobt werden, die verschiedene Einnahmequellen erschließen und in ihrer Kombination den Kostennachteil zumindest zum Teil kompensieren können.

Folgende Aspekte sind u. a. bei der Ermittlung der Kosten zu bedenken:

- Verkaufserlöse für das erneuerbare Gas mit einer Preisprämie gegenüber Erdgas, um umweltbezogene positive Eigenschaften zu honorieren
- Verkaufserlöse für Sauerstoff
- Verkaufserlöse für Abwärme aus der Elektrolyse
- Erlöse für die Verwendung von CO₂
- Erlöse für die Bereitstellung von positiver als auch negativer Regelenergie im Strommarkt
- Erlöse für die Bereitstellung von Regelenergie im Gasmarkt

Von Expert*innen werden zurzeit folgende **rechtlich politische Barrieren bei der Umsetzung** derartiger Geschäftsmodelle wahrgenommen:

- Starker Fokus der politischen Agenda auf elektrolytisch hergestellten Wasserstoff. Biogener Wasserstoff, synthetisches Methan bzw. Biomethan (bspw. als Übergangslösung) gerät hierdurch in den Hintergrund
- Bei Weitem zu geringe CO₂-Preise im Europäischen und nationalen Emissionshandel
- Rechtlicher Status Erneuerbarer Gase auf Basis grünen Wasserstoffs nicht identisch mit Biomethan
- Wettbewerbsfähigere technische Optionen zur Erfüllung des Gebäudeenergiegesetz und der THG-Minderungsquote im Verkehr sowie der (geplante) Ausschluss von biogenem Wasserstoff aus der Quote
- Unklare Perspektiven für den Weiterbetrieb von Biogasanlagen (z. B. als zukünftige Wasserstoff Abnehmer oder Produzenten von Wasserstoff) aufgrund des Auslaufens der EEG-Förderung für viele Anlagen und dadurch induzierte Investitionshemmungen
- Relativ geringer Anteil gasbasierter Mobilitäts Optionen (z. B. Langstreckentransport sowie Betankungsinfrastruktur)
- Keine Zertifikate für CO₂-Nutzung generierbar
- Wasserstoff tangiert Fragen der Importabhängigkeit bzw. Energiesicherheit; internationale Technologieführerschaft Deutschland in Bereich Bioenergie/Wasserstoff; Technologietransfer/Zusammenarbeit mit dem globalen Süden.
- Die Biomasse-basierte Wasserstoffproduktion bietet Chancen für eine dezentrale Bereitstellung und Nutzung bzw. Verarbeitung (einschl. regionaler Wertschöpfung) von Wasserstoff
- Eine Kopplung der stofflichen und energetischen Nutzung zur Stärkung regionaler Wertschöpfung aus biogenen Reststoffen ist möglich

.6. RECHTLICHE RAHMENBEDINGUNGEN

Obgleich der Begriff des „grünen Wasserstoffes“ mit der Energiewende und dem Aspekt der Nachhaltigkeit in Zusammenhang gebracht wird, und folglich positiv konnotiert ist, steht bis heute eine Legaldefinition aus. Es stehen mit der Deutschen Nationalen Wasserstoffstrategie und der Europäischen Wasserstoffstrategie zwei unterschiedliche Betrachtungsweisen im Raum. Eine solche Legaldefinition ist daher unumgänglich, um rechtlich Wasserstoff in die Klimaziele einzubetten. Erst mit der Begriffsbestimmung wird eine Rechtssicherheit herbeigeführt, die es Akteuren erlaubt entschlossen zu handeln. Eine gesetzliche Festlegung ist beispielsweise für begünstigende Umstände hinsichtlich der Vollbefreiung von der EEG Umlage, wie sie in § 69b EEG 2021 normiert ist, nach Abs. 2 Nr. 1 des Paragraphen erforderlich, ähnliche Festlegungen gilt es in Bezug auf die Anrechenbarkeit von biogenem Wasserstoff auf die THG-Minderungsquote im Verkehr zu treffen. Es kann eine Privilegierung bei der Herstellung von grünem Wasserstoff nur dann eintreten, wenn der Gesetzgeber die Definition schafft. Eine wirtschaftliche und technische Erreichung der Umweltziele kann nur mit umfangreicher und klarer rechtlicher Ausgestaltung erfolgen.

.7. ZU GERINGE CO₂-PREISE

Die Vorteile einer Kombination von Biomasse und Wasserstoff kommen insbesondere bei höheren CO₂-Zertifikatspreisen zum Tragen, die bisher außerhalb der für Kraftstoffe geltenden THG-Minderungsquote noch nicht erreicht sind. Der Einsatz von Biomasse ist gerade im Bereich der industriellen Niedrig- und Mitteltemperaturprozesswärme auch konkurrierend zu anderen technisch machbaren erneuerbaren Wärmeoptionen günstig und häufig leicht umsetzbar. Dies

zeigt sich durch CO₂-Preise im mittleren zweistelligen Bereich zwischen 20 und 75 €/tCO₂-äqu (BDI 2018: Klimapfade für Deutschland).

III. TECHNOLOGIECLUSTER

Im Folgenden werden ausgewählte und aussichtsreiche Technologiecluster zur Erzeugung und Nutzung von Wasserstoff aus und mit Biomasse bzw. Bioenergie im Überblick dargestellt. Einzelne Technologiesteckbriefe befinden sich im Anhang. Die Darstellung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

3.1. TECHNOLOGIEN ZUR PRODUKTION VON WASSERSTOFF AUS BIOMASSE UND BIOENERGIETRÄGERN

A) BIOTECHNOLOGISCHE VERFAHREN ZUR WASSERSTOFFPRODUKTION AUS REST- UND ABFALLSTOFFEN

Biotechnologische Systeme, insbesondere mikrobielle Systeme, haben ein großes Potential, Wasserstoff effizient und unter geringem Energieverbrauch zu produzieren, weil die dabei ablaufenden Reaktionen unter Umgebungsbedingungen und ohne zusätzliche anorganische Katalysatoren ablaufen. Darüber hinaus ermöglicht die Vielfalt verschiedener nutzbarer Mikroorganismen die Verwertung einer breiten Palette verschiedener biogener Rest- und Abfallstoffe (Rückstände, Nebenprodukte und Abfälle) sowie nachhaltig produzierter Anbaubiomasse. Ein weiter Vorteil besteht außerdem in der Möglichkeit den biogenen Wasserstoff kontinuierlich bereitzustellen und dezentral zu nutzen, z. B. zur Bereitstellung von Chemikalien oder Energieträgern. Hier ist u. a. die Kopplung von biotechnologischen Bereitstellungsverfahren mit Technologien zur Nutzung von Wasserstoff interessant, die sich hinsichtlich Wasserstoffproduktionsrate und Wasserstoffverbrauchsrate ähneln. Ein Beispiel wäre die Dunkelfermentation zur Erzeugung von Wasserstoff aus Biomasse, die anschließende Herstellung von Biogas aus den dabei anfallenden Reststoffen. Des Weiteren können in biotechnologischen Wasserstoff-Produktionsverfahren gleichzeitig hochwertige Produkte (z. B. für die Lebensmittel- und Pharmaindustrie) sowie Plattformchemikalien (z.B. organische Säuren) erzeugt werden.

Motivation und allgemeine Erfolgsfaktoren

- Kopplung stofflicher und energetischer Nutzung, teilweise erhebliches Potential zur Steigerung der Wertschöpfung möglich
- Relativ breites Substratspektrum, mit Einschränkungen sind alle Substrate nutzbar, die auch für die anaerobe Vergärung zu Biogas eingesetzt werden können (siehe auch Forschungsbedarf)
- Einsatz von Misch- und Reinkulturen in Abhängigkeit der Substratzusammensetzung möglich

Übergeordnete Herausforderungen

- Vor- und Nachteile von etablierten Bioenergieträgern gegenüber Wasserstoff, z. B. Biomethan vs. biotechnologisch erzeugter Wasserstoff
- Begrenzte Biomassepotentiale mit stark schwankender Zusammensetzung
- Lagerfähigkeit der Substrate ist teilweise begrenzt
- Substratkonkurrenz mit etablierten Verfahren wie z. B. der Biogas- und Biomethanproduktion
- Geringe Kommunikation mit verschiedenen Industriezweigen („Sprung aus dem Labor“ ist in der Diskussion mit Industriepartnern teilweise schwer darstellbar)
- Vergleichsweise wenig Förderaktivitäten in den letzten Jahren

- Große Verbundvorhaben werden im EU-Forschungsumfeld gefördert. Hier haben andere Länder auf lokaler Ebene oftmals bessere Netzwerkinfrastrukturen zwischen sämtlichen Akteuren.

Allgemeiner Forschungs- und Entwicklungsbedarf

- Erweiterung des bisher eingesetzten Substratspektrums, z.B. Optimierung der Hydrolyse von festen Einsatzstoffen und Einsatz von Abwässern mit kritischen Bestandteilen (z.B. aus thermochemischen Prozessen wie z. B. Hydrothermale Karbonisierung). Des Weiteren können Koppelprozesse neben Kohlenstoffkreisläufen auch andere Kreisläufe wie Stickstoff- und Phosphat bedienen.
- Steigerung der Prozessrobustheit: In Prozessen mit hoher selektiver Ausbeute dürfen Schwankungen in der Substratzusammensetzung nicht zu einem stark veränderten Produktspektrum führen.
- Stoffliche Aufbereitung von Neben- und Hauptprodukten, z. B. im Hinblick auf mögliche Schadstoffe für nachgelagerte Prozesse
- Ermittlung von belastbaren bioverfahrenstechnischen Kennzahlen (z. B. Erträge, Kinetiken, Produktreinheiten) zur Entwicklung von biotechnologischen Konzepten und Auslegung von Reaktoren.
- Weitere Untersuchung von Strategien der biologischen Anpassung von Organismen, auch bei definierten Misch- und Anreicherungskulturen.
- Entwicklung von geeigneten Nutzungskonzepten für meist dezentral bereitgestellten Wasserstoff kombiniert mit Downsizing etablierter Technologien für dezentrale Anwendungen
- Entwicklung ökonomisch sinnvoller Reinigungs- und Abscheidetechnologien
- Pilotanlagen für die gesamte Prozesskette von Einsatzstoff zu Wasserstoff
- Erstellung einer Datenbasis über die systemische Einbindung der vorhandenen Infrastruktur (z. B. Biogasanlagen) in neue Verwertungskonzepte

Steckbriefe zu folgenden ausgewählten biotechnologischen Verfahren zur Wasserstoffproduktion aus Rest- und Abfallstoffen sowie ein kurzer Diskurs zum Thema Reinkultur vs. Mischkultur befinden sich im Anhang:

- Dunkelfermentation
- Biophotolyse
- „Dunkelphotosynthese“ mittels Purpurbakterien

B) THERMO-CHEMISCHE TECHNOLOGIEN ZUR WASSERSTOFFPRODUKTION AUS REST- UND ABFALLSTOFFEN UND BIOENERGIETRÄGERN

Thermo-chemische Prozesse (insbesondere Vergasung, Reformierung, Methanpyrolyse, hydrothermale Umwandlung) eignen sich grundsätzlich auch für die Produktion von Wasserstoff. Besonders hervorzuheben sind dabei die Vergasung, die hydrothermale Umwandlung von speziell nassen biogenen Rest- und Abfallstoffen sowie die Reformierung von Intermediaten wie Biogas/Biomethan oder Alkoholen und die Methanpyrolyse. Eine entscheidende Rolle spielen dabei die vor-/nachgelagerten Prozesse, vor allem Gasreinigung und -konditionierung. Weitere Forschung und Entwicklung dieser Verfahren dienen gleichermaßen als wichtige Bausteine für eine primär auf die Kohlenstoffwiederverwendung ausgerichtete Synthesegasnutzung in einer zukünftigen Bioökonomie als Teil der Kreislaufwirtschaft.

Motivation und allgemeine Erfolgsfaktoren

- Hoher Wirkungsgrad für die Wasserstoffherzeugung,
- Verschiedene biogene Rest- und Abfallstoffe und Intermediate wie Biogas und Biomethan sowie ggf. Methanol und Ethanol,
- Höhere Raum-Zeit-Ausbeuten als bei biotechnologischen Verfahren,
- Beitrag zur synergetischen Kopplung stofflicher und energetischer Nutzung,
- Erschließung von Einsatzstoffen, die nicht für eine biologische Umwandlung ideal geeignet sind wie Holz- und halmgutartige Biomasse, zudem nasse Einsatzstoffe über hydrothermale Verfahren,
- Erschließung ökonomisch vorteilhafter Nutzungswege für diese Einsatzstoffe,
- Synergien mit regenerativ erzeugter Elektroenergie über Elektrolyse, spezielle Vergaser oder die Methanpyrolyse,
- Möglichkeiten der In-situ Kohlenstoff oder CO₂-Abscheidung für CCS und damit negative THG-Emissionen oder für CCU,
- grüner Wasserstoff für Produktsynthesen und Produktaufbereitung,
- Gestaltung integrierter Systeme, z. B. aus Vergasung und Elektrolyse zur anwendungsspezifischen Synthesegasbereitstellung oder aus Wasserstoffproduktion und Produktaufbereitung z. B. über Hydrotreating,
- Lösungen ermöglichen (vergleichbar der Elektroenergie- und Biomethaneinspeisung) der lokalen Ressource Biomasse eine Wirkung für das Gesamtsystem
- Einige Technologien wie z. B. die Biogasreformierung sind relativ schnell großtechnisch einsetzbar.
- Ein wesentlicher Erfolgsfaktor ist ein technisch abgestimmtes Konzept und die entsprechende Umsetzung determiniert durch die Eigenschaften der Vergasung, den Anforderungen der Wasserstoffanwendung und einer Gasaufbereitung, die die Erfordernisse von Erzeugung und Anwendung effektiv in Einklang bringt.

Übergeordnete Herausforderungen

- bestimmungsgemäß höhere Anforderungen an Betriebsbedingungen und komplexere (und ggf. wartungsintensivere) Verfahrenstechnik im Vergleich zu biotechnologischen Ansätzen
- große Bandbreite der Eigenschaften der Einsatzstoffe in Abhängigkeit von deren Herkunft (z. B. landwirtschaftlicher Reststoff, belasteter biogener Abfall)
- damit verbundene hohe Belastung an Schadstoffen und Katalysatorgiften,
- verschiedene, teilweise problematische Nebenprodukte, z. B. Teere aus der Vergasung

Allgemeiner Forschungs- und Entwicklungsbedarf

- Weiterentwicklung thermo-chemischer Verfahren inklusive vor-/nachgelagerter Verfahren als Bausteine für Synthesegasplattformen
- Weiterentwicklung der z. T. bereits in anderen Industriezweigen etablierten und marktverfügbaren Verfahrenstechnologien hinsichtlich der Rohstoffaufbereitung (auch im Hinblick auf eine Multi-Feedstock-Anlage)
- Anpassung der Einsatzstoffaufbereitung an die Eigenschaften und die jeweilige Schadstofffracht der Einsatzstoffe,
- Weiterentwicklung der Umwandlungstechnologie in Abhängigkeit vom gewählten Einsatzstoff,
- Optimierung der Gasreinigung für die jeweilige, verfahrensspezifische Rohgasqualität und die verschiedenen Anforderungen an die Wasserstoffqualität,
- Erarbeitung von Daten und Kennzahlen zum Scale-up, d. h. zur Übertragung aus dem Pilotmaßstab (TRL 6/5 MW) in den Demo-Maßstab (TRL 8/50 MW),
- Weiterentwicklung der Prozessintegration/ Kombinationsmöglichkeiten der Verfahren,
- Entwicklung von Möglichkeiten der stofflichen (z. B. Sauerstoff aus der Elektrolyse in die Vergasung) und energetischen Kopplung (z. B. erneuerbare Elektroenergie nutzen in Vergasung oder Methanpyrolyse),
- Nichtkatalytische Verfahren oder katalysatorgiftarme Edukte (z. B. durch Aufbereitung) oder vergiftungsresistente Katalysatoren,
- Multikriterielle Technologie- und Nachhaltigkeitsbewertung.

Steckbriefe zu folgenden ausgewählten thermo-chemischen Technologien zur Wasserstoffproduktion aus Rest- und Abfallstoffen und Bioenergeträgern befinden sich im Anhang.

- Thermo-chemische Vergasung
- Methanpyrolyse
- (Dampf-)Reformierung von Biogas respektive Biomethan
- Reformierung von Alkoholen, insbes. Methanol, Ethanol

3.2. TECHNOLOGIEN FÜR DIE NUTZUNG VON GRÜNEM WASSERSTOFF MIT BIOMASSE (HYBRIDVERFAHREN)

Die gemeinsame Nutzung von Biomasse, biogenem CO₂ und grünem Wasserstoff bietet Potenziale für Synergien (kurz: SynBioPtX). Die Bioenergie und die Bioökonomie können von der Verfügbarkeit grünen Wasserstoffs profitieren und durch geeignete Hybridtechnologien in einem erweiterten Umfang hochwertige erneuerbare Kohlenwasserstoffe zur stofflichen und energetischen Nutzung bereitstellen und damit aktiv Treibhausgasemissionen senken. Einige Sektoren werden auch weiterhin in erheblichem Umfang auf Kohlenwasserstoffe angewiesen sein (z. B. Flug- und Schiffverkehr, chemische Industrie). Bei der Herstellung von Kohlenwasserstoffen ist Wasserstoff ein wesentlicher Reaktionspartner zur Einstellung von Produkteigenschaften und zur Verbesserung der Produktausbeuten.

Technologien für die Nutzung von grünem Wasserstoff mit Biomasse sind z. B. biologische und thermo-chemisch/katalytische Verfahren, die elektrolytisch bereitgestellten grünen Wasserstoff für die Umwandlung von biogenen Kohlenstoffressourcen einsetzen können. Hierzu zählen die biologische Methanisierung oder die biotechnologische Herstellung weiterer Produkte durch mikrobielle Prozesse, die Wasserstoff (oder Synthesegas) als Elektronendonator nutzen können. Die Produkte können hier organische Säuren, Alkohole oder Proteine sein (meist niedriger TRL). Des Weiteren existieren vielfältige thermo-katalytische Syntheseverfahren (z. B. katalytische Methanisierung, Fischer-Tropsch-Synthese, Methanolsynthese) und das Hydrotreatment biogener Öle, Ester und Fettsäuren (HVO/HEFA).

Motivation und allgemeine Erfolgsfaktoren

- Gemeinsame Weiterentwicklung von biomasse- und strombasierten Verfahren zur Erzeugung von Synthesegas und deren Verarbeitung in Produktsynthesen
- Erschließung von Biomasse und biogenem CO₂ als erneuerbare Kohlenstoffquellen und damit als Schlüsselressourcen für eine nachhaltige Gesellschaft
- Gesamteffizienz, die höher ist als die Summe der Teilprozesse, bei einem anlagentechnischen Aufwand, der geringer ist als für die Summe der Teilprozesse
- Hohe Abhängigkeit vom Ausbau der Produktionskapazitäten von grünem Wasserstoff inkl. adäquatem Ausbau von erneuerbarem Strom
- Gemeinsame Nutzung der vorhandenen Infrastruktur insbesondere im Kontext Methanisierung (Gasnetzeinspeisepunkte)
- Synergien im Bereich der Klärgasproduktion können sich aus der Nutzung des anfallenden Sauerstoffs in den Belebungsbecken
- Eröffnung von Zukunftsperspektiven für bestehende Biogasanlagen zum Post-EEG-Betrieb

Übergeordnete Herausforderungen

- Komplexes Anlagendesign mit der Erfordernis einer Gesamtoptimierung unter Berücksichtigung aller Teilprozesse und ihrer Einflussgrößen,
- Schlechte Löslichkeit von Wasserstoff in wässriger Phase, vor allem bei biotechnologischen Verfahren.

Allgemeiner Forschungs- und Entwicklungsbedarf

- Weiterentwicklung von Verfahren für Synthesegasplattformen und deren Verarbeitung in Produktsynthesen einschließlich der Produktaufbereitung, deren erfolgreiche Pilotierung und Demonstration
- Weiterentwicklung von erforderlichen Verfahren und Methoden zur Synthese auf Basis CO₂ wie z.B. CO₂-Aufbereitung, Reverse Water-Gas-Shift

- Aspekte von Demand-Side Management (Lastmanagement) für insbes. synthesebasierte Raffinerien in Bezug auf flexible Betriebsweise
- Simulation, Optimierung und Steuerung der erforderlichen komplexen verfahrenstechnischen Prozesse
- Mixotrophe Fermentationsprozesse zur Konversion von Biomasse und Wasserstoff/CO₂ bzw. Syngas zu Plattformchemikalien

Steckbriefe zu folgenden ausgewählten Technologieclustern für die Nutzung von grünem Wasserstoff mit Biomasse und Bioenergieträgern (Hybridverfahren) befinden sich im Anhang.

- Biologische Methanisierung
- Katalytische Methanisierung
- Fischer-Tropsch-Synthese
- Methanol-Synthese und Folgeverfahren
- Hydrotreatment biogener Öle, Ester und Fettsäuren (HVO/HEFA)

3.3. SYSTEMDIENLICHE KOMBINATION VON WASSERSTOFF UND BIOENERGIE

Disclaimer:

In Abgrenzung zum Kapitel 3.2 und den Hybridverfahren bezieht sich dieses Kapitel konkret auf Beispiele für systemdienliche Kombinationen von Wasserstoff und Biomasse/Bioenergie und nicht die Darstellung spezifischer Technologien. Überschneidungen mit den Kapiteln 3.1 und 3.2 sind daher nicht zu vermeiden bzw. bewusst gewählt, um die Systemdienlichkeit von Wasserstoff mit Biomasse über die Bandbreite der aufgeführten Technologieoptionen aufzuzeigen und herauszustellen.

Wasserstoff soll zukünftig einen zentralen Pfeiler bei der Weiterentwicklung und Vollendung der Energiewende darstellen. Dies erfordert eine vollständige neue Betrachtungsweise des Energiesystems, da sich dadurch erhebliche Verschiebungen, aber auch Synergien zwischen Sektoren ergeben. Ein besonderes Augenmerk liegt auf der **systemdienlichen Kombination von Wasserstoff und Biomasse/Bioenergie**. Aktuell wird eine große Hoffnung zum Gelingen der Energiewende und dem Erreichen der Klimaziele in einer breiten Anwendung von Wasserstoff gesehen. Die systemdienliche Kombination von Wasserstoff und Bioenergie für beispielsweise Prozesswärme ist besonders dann vorteilhaft, wenn Biomasse vor allem direkt vor Ort genutzt werden kann und nur gering transportwürdig ist.

Prozesswärme aus Biomasse ist bei Umstellung auf Wasserstoff dann als Übergangslösung eine Option, wenn das Wasserstoffangebot (noch) nicht gesichert ist und Synergien im Hinblick auf den Biomasseeinsatz genutzt werden können. Weitere Möglichkeiten stellen der stromnetzdienliche Betrieb von Elektrolyseuren in Kombination mit Technologien zur Verwendung von Wasserstoff mit Biomasse (Hybridverfahren), die Produktion von Wasserstoff aus Biomasse mit gekoppelter CO₂-Abscheidung und -Speicherung (HyBECCS) sowie der Einsatz von Biomasse und Wasserstoff im Rahmen der Primärstahlgewinnung dar. Generell sollten die Anwendung von Wasserstoff und Bioenergie nicht in Konkurrenz zu einander stehen, sondern sich ergänzen.

Motivation und allgemeine Erfolgsfaktoren

Folgende Aspekte sind bei der Systembewertung von Wasserstoff aus und mit Biomasse und Bioenergie relevant:

- Bei der regionalen biomassebasierten Wasserstoffproduktion werden bei Einsatz von Gülle und Mist auch THG-Emissionen in der Landwirtschaft gesenkt, Stoffkreisläufe geschlossen und gleichzeitig das Grundwasser geschützt, da anaerob behandelte Wirtschaftsdünger eine bessere Düngewirkung haben und somit gezielter eingesetzt werden können und gleichzeitig kann Ammonium im Boden immobilisiert und nicht so leicht ausgewaschen werden wie Nitrat, welches beim aeroben Abbau von Biomasse gebildet wird.

Übergeordnete Herausforderungen

- Bisher wenige Daten zur Systemintegration unter Berücksichtigung der Nutzung der Produkte
- Standardisierung in Bewertung, Prozessüberwachung und Verfahrensweisen sind oftmals noch nicht mit verfahrenstechnischen Ansätzen vergleichbar
- Vergleichbarkeit mit anderen Verfahren teilweise schwer, wenn Systemgrenzen der Betrachtung lediglich den isolierten Prozess erfassen, aber nicht die Einbindung in Kreisläufe

Allgemeiner Forschungs- und Entwicklungsbedarf:

- Bereitstellung einer wachsenden Datenbasis und verbesserter Methoden zur Bewertung des Systembeitrags von Wasserstoff, um systemische Aus- und Wechselwirkungen dezidiert analysieren, betrachten, bewerten und auch steuern zu können
- Entwicklung von Bewertungskriterien, Monitoring und ökonomischen Analysen, so dass letztendlich eine praxisnahe Modellierung des Energiesystems mit Wasserstoff als tragender Säule möglich ist (siehe hierzu auch Absatz .4 und .5).
- Entwicklung und Analyse von (dezentralen) Technologiekonzepten zur Wasserstoff-Produktion aus Biomasse sowie zur (integrierten) Weiterverarbeitung des Wasserstoffs und dabei abfallenden Reststoffen und der möglichen Auswirkungen auf die Umwelt.
- Analyse der prozesstechnischen Synergien zwischen Wasserstoff und Bioenergie und entsprechende Abstimmung der politischen Instrumente.
- Datenbasis zur Systembewertung von Wasserstoff und Bewertungsmethoden, die Diskussion um Wasserstoff und konkurrierende Systeme faktenbasiert unterstützen

Im Anhang werden folgende ausgewählte Beispiele für die systemdienliche Kombination von Wasserstoff und Bioenergie aufgeführt.

- BHKW - Energie mit Wasserstoff/Biogas-Verbrennung
- Primärstahlgewinnung mittels Wasserstoff und Biomasse
- Kombination von flexibler Biomasse-KWK + wärmegeführter Elektrolyse für negative Flexibilität
- Kombination von thermochemischer Biomassevergasung und Elektrolyse
- Produktion von Wasserstoff aus Biomasse mit gekoppelter CO₂-Abscheidung und -Speicherung (HyBECCS)

ANHANG TECHNOLOGIESTECKBRIEFE

3.1. TECHNOLOGIEN ZUR PRODUKTION VON WASSERSTOFF AUS BIOMASSE UND BIOENERGIETRÄGERN

A) BIOTECHNOLOGISCHE VERFAHREN ZUR WASSERSTOFFPRODUKTION AUS REST- UND ABFALLSTOFFEN

Dunkelfermentation

Kurze Beschreibung der Technologie:

Bei der Dunkelfermentation bilden Mikroorganismen, z. B. *Clostridia* oder *Bacteroidetes* unter Sauerstoff-Ausschluss aus Biomasse Wasserstoff und biogenes CO₂. Durch Verhinderung der Methanogenese werden einige Sensitivitäten wie gegenüber hohen Stickstofffrachten weitestgehend umgangen. Die Robustheit gegenüber schwankenden Substratzusammensetzungen ist vergleichsweise hoch, was eine Einbindung in regionale (Rest-)Stoffströme erleichtert. Gleichzeitig kann das Verfahren auch genutzt werden, komplexere, biologisch schwer abbaubare Matrices zu nutzen, da die genannten und weitere hydrolytische und acidogene Bakterien Mangelversorgung überstehen und Überschussversorgung und die damit verbundene Produktion von kurzkettigen Carboxylsäuren sogar erwünscht ist. Besondere Ausprägungen sind Prozessführungen, in denen neben der üblichen undefinierten Mischkultur bestimmte Organismen gezielt angereichert werden, um, abgestimmt auf das Substratspektrum, die Prozesssyntheseleistung zu erhöhen.

Motivation und Erfolgsfaktoren:

Dunkelfermentation bietet die Möglichkeit der Kopplung stofflicher und energetischer Biomassenutzung. Es lassen sich simultan z. B. mittelkettige Fettsäuren herstellen die vielfältig in der Futter- und Lebensmittel- sowie der Chemieindustrie eingesetzt werden können.

Verwertbare Substrate (inkl. Substrat-Potential hinsichtlich der Wasserstoff-Ausbeute):

In der Reihenfolge gut geeignet/erforscht bis Eignung noch Gegenstand von Forschung:

- Biogene Reststoffe aus der Lebens- und Futtermittelproduktion
- Nachwachsende Rohstoffe (Ganzpflanzensilagen/Grassilagen)
- Gülle
- Festmist
- Trockenkot
- Landschaftspflegematerial (teilweise mit hohem Zellulosegehalt)

Koppelprodukte:

- kurzkettige Carboxylsäuren und daraus erzielbare Verwertungsprodukte (nachgewiesen für langkettige (ungesättigte) Fettsäuren, Biopolymere u. a.)
- Stickstoff- und/oder Phosphatreiche Mikroorganismen u. a. als Dünger
- Anreicherung von Bodenverbessernden Mikroorganismen in Kulturbrühe möglich

Entwicklungsstand und Kennzahlen:

Einen guten Überblick bietet der Übersichtsartikel von Rittmann und Herwig (2012), der mehr als 2.000 Beispiele miteinander quantitativ vergleicht. Neuere Arbeiten heben angepasste und optimierte Bioreaktorkonzepte hervor, verbesserte gekoppelte Vorbehandlung des Substrats, die Einbindung in regionale Kreisläufe sowie die Nutzung der säurehaltigen Flüssigphase in Anschlussprozessen und damit verbunden eine Betrachtung möglicher Separationsverfahren sowie erste ökonomische und Nachhaltigkeitsbewertungen. Es kann ein Gasgemisch mit

einem Wasserstoffgehalt von ~50 % erzielt werden. Bei der Erzeugung von Koppelprodukten, z. B. organischen Säuren, reduziert sich die Wasserstoffausbeute jedoch. Die Zusammensetzung der Säuren variiert je nach eingesetztem Substrat, Verweilzeit und Prozessführung und in Abhängigkeit der Mikroorganismenzusammensetzung um die 400 bis 500 mg/g COD. Einen guten Überblick über den aktuellen Stand der Forschung und der sich daraus ableitbaren Perspektiven bietet Bastidas-Oyanedel et al. (2019). Mit den bisherigen integrativen Ansätzen beschäftigt sich ein weiterer Übersichtsartikel, der auch verschiedene Prozessfahrweisen berücksichtigt (Sekoai et al. 2018). Der Prozess ist insbesondere in zweistufigen Biogasanlagen im Industriemaßstab appliziert, teilweise als Hydrolysestufe, allerdings bleibt die Prozess-technische Ausstattung (Einbauten zur Überwachung und Regelung, zusätzlicher gesteuerter Substratvorbehandlung sowie alternative Reaktorkonzepte) ungenügend.

TRL-Bereich: 4–5

Herausforderungen:

- Das Fehlen systemischer Lösungen (dezentrale Wasserstoffnutzung und Nutzungskonzepte der Koppelprodukte) verhindert eine maximale Wertschöpfung
- Das Prozesspotential, insbesondere bei schwer vergärbaren Substraten, wird durch den fehlenden Praxiseinsatz von Überwachungs- und Regelungskonzepten nicht genutzt
- Eine systemische Bewertung der Verfahren ist aufgrund mangelnder Daten, auch und insbesondere aus dem Pilot- und Praxismaßstab schwierig
- Betreiber bisheriger, rein auf Biogas ausgelegter Verfahrenskonzepte müssen für erweiterte Verfahren (zweistufiger Betrieb) sensibilisiert werden, ohne dass auf eine breite Datenbasis aus der Praxis zurückgegriffen werden kann.

Forschungs- und Entwicklungsbedarf:

- Es müssen sowohl auf technologischer als auch auf systemischer Ebene Standardverfahren zur Prozessbewertung und Abschätzung der Ausbeuten geschaffen werden, ähnlich zum Biogasprozess.
- Es müssen effektive Methoden zur langfristigen Verhinderung der Methanogenese entwickelt/implementiert werden.
- Prozesse müssen einen höheren technischen Komplexitätsgrad aufweisen, um das komplette Potential auszuschöpfen und dennoch einfach/dezentral betreibbar sein.
- Die Möglichkeiten einer zielgerichteten Anreicherung bestimmter Mikroorganismen zur Steigerung der Produktselektivität und damit Rentabilität muss untersucht werden.
- Die Integration in vorhandene Infrastruktur und Verwertungsketten muss technologisch, ökonomisch und ökologisch intensiver betrachtet werden.
- Es bedarf an schnellen, Labor-basierten Nachweismethoden zur Bestimmung von Ausbeuten bei Verwendung unterschiedlicher Substratmatrizes und Prozessvarianten zur Vorhersage der Prozesseigenschaften im Praxismaßstab.
- Es müssen Scale-down Systeme etabliert werden, die einen schnelleren Erkenntnistransfer zwischen Labor- und Praxismaßstab zulassen. Dies umfasst auch den Einsatz von Mess- und Steuerungskonzepten und die Erfassung von Daten für eine systemische Bewertung.
- Demonstrationsvorhaben, die den Nachweis der Integrierbarkeit in regionale Stoffströme erbringen. Dies umfasst neben Kohlenstoff- auch Stickstoff- und Phosphatströme.
- Über Maßstäbe hinweg müssen Untersuchungen stattfinden, wie durch gezielte Bioaugmentation, gekoppelt mit Prozessüberwachung und angepasstem Reaktordesign und trotz teilweise hohem mikrobiellen Fremdeintrag über das Substrat

Konzepte umgesetzt werden können, die zu selektiveren Substratwandlungen und Koppelprodukten führen.

- Es sollten systemische Betrachtungen und technologische Demonstrationen von Prozessketten erfolgen, die die Nutzung von Koppelprodukten darstellen und ökonomisch und ökologisch bewertbar machen

Zitierte Literatur:

1. Rittmann, S.; Herwig, C. (2012): A comprehensive and quantitative review of dark fermentative biohydrogen production. *Microbial Cell Factories*, 11, 115. DOI: 10.1186/1475-2859-11-115
2. Bastidas-Oyanedel, J.-R.; Bonk, F.; Thomsen, M. H.; Schmidt, J. E. (2019): The Future Perspectives of Dark Fermentation: Moving from Only Biohydrogen to Biochemicals. In: Bastidas-Oyanedel, J.-R.; Schmidt J. (eds) *Biorefinery*, 375-412.
3. Sekoai, P. T.; Yoro, K. O.; Bodunrin, M. O.; Ayeni, A. O.; Daramola, M. O. (2018): Integrated system approach to dark fermentative biohydrogen production for enhanced yield, energy efficiency and substrate recovery. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 17, 501-529.

Biophotolyse

Kurze Beschreibung der Technologie:

Unter Biophotolyse werden sämtliche biologische Verfahren zur Erzeugung von Wasserstoff mittels Photosynthese zusammengefasst. Prinzipiell können alle photosynthetischen Mikroorganismen Wasserstoff erzeugen (McKinley & Harwood 2010). Der Wasserstoff dient hier oftmals als "Ventil", um überschüssige Redoxäquivalente, die bei hoher Photosyntheseleistung erzeugt werden, aus der Zelle auszuschleusen. Bei der sogenannten "direkten Biophotolyse" geschieht die Übertragung der überschüssigen Elektronen auf Protonen während der Lichteinstrahlung. Bei der sogenannten "indirekten Biophotolyse" werden die Elektronen zunächst für die Biosynthese von Kohlenwasserstoffen (Stärke, Glykogen) verwendet und erst in einem anschließenden Dunkelfermentationsprozess (siehe oben) zu Wasserstoff umgesetzt.

Motivation und Erfolgsfaktoren:

Ob der Prozess erfolgreich im industriellen Maßstab umgesetzt werden kann, hängt davon ab, ob eine effektive Beleuchtung gewährleistet werden kann, ohne dass der Anlagenbau so kompliziert wird, dass er sich nicht mehr wirtschaftlich lohnt.

Verwertbare Substrate (inkl. Substrat-Potential hinsichtlich der Wasserstoff-Ausbeute):

- Grünalgen und Cyanobakterien betreiben eine oxidative Photosynthese, bei der CO₂ aus der Luft fixiert wird, und Elektronen aus der Spaltung von Wasser unter Sauerstofffreisetzung gewonnen werden. Das Substrat CO₂ könnte z. B. aus Biogasanlagen gewonnen werden.
- Photosynthetische Purpurbakterien betreiben eine anoxygene Photosynthese, d. h. es wird kein Sauerstoff aus der Wasserspaltung freigesetzt. Als Substrate und Elektronendonatoren dienen organische Säuren (Acetat, Butyrat etc.) und Zucker (Glukose, Fruktose etc.), die aus Rest- und Abfallstoffen gewonnen werden können.

Koppelprodukte:

In Grünalgen können sehr effektiv Lipide in größerer Menge produziert werden. Dies könnte z. B. Anwendung in der Omega-3-Fettsäure-Produktion finden. Auch Carotinoide (Lutein, beta-Carotin) sind in größeren Mengen vorhanden.

Purpurbakterien sind ebenfalls sehr gut geeignet, um Carotinoide und andere, fettlösliche Terpenoide herzustellen. Auch das produzierte Bacteriochlorophyll und seine Vorstufen können Anwendung in der pharmazeutischen und chemischen Industrie finden.

Entwicklungsstand und Kennzahlen:

Die Wasserstoffproduktion über Biophotolyse befindet sich derzeit immer noch auf dem Stand der Grundlagenforschung. Höhere Wasserstoffausbeuten wurden im Labormaßstab mit 10 bis 20 ml-Kulturen erreicht, die optimal ausgeleuchtet waren. Wenn man die Ausbeuten einfach auf den 100 l Maßstab hochrechnet, würde die "Turbo-Alge" *Chlamydomonas reinhardtii* Stm6Glc4 eine Ausbeute von 3,24 mol Wasserstoff/100 l Kultur erzielen (Doebbe et al. 2007), das Cyanobakterium *Cyanothece* sp. ATCC 51142 eine Ausbeute von 3,66 mol Wasserstoff/100 l Kultur (Bandyopadhyay et al. 2010), und die Mutante pRKhydA des Purpurbakteriums *Rhodospirillum rubrum* eine Ausbeute von 20,0 mol Wasserstoff/100 l Kultur (Kim et al. 2008) (Kultivierungsdauer: jeweils 5 bis 10 Tage). Problematisch ist hier insbesondere die Realisierung einer effektiven Beleuchtung.

TRL-Bereich: 3–4

Herausforderungen:

Photobioreaktoren müssen über eine möglichst große Beleuchtungsfläche verfügen, damit eine optimale Lichtdurchdringung der Kultur gewährleistet ist. Dies ist nur mit dünnen Kulturschichtdicken zwischen Glasscheiben oder in langen, dünnen Röhrensystemen zu

bewerkstelligen. Hier ergibt sich allerdings das Problem, dass diese (Glas-)Anlagen Wasserstoff-dicht sein müssen und der Explosionsschutz sich als Herausforderung erweist.

Forschungs- und Entwicklungsbedarf:

- Hoher Forschungsbedarf besteht in der Überführung der Verfahren/Technologien vom Labormaßstab in den großtechnischen Maßstab – Es muss nicht nur eine ausreichende, effektive Beleuchtung gewährleistet sein, sondern die Anlage muss auch den speziellen Sicherheitsanforderungen zur Wasserstoffproduktion genügen.
- Der Betrieb von Photobioreaktoren zur Wasserstoffproduktion kann durch die gleichzeitige Produktion von z. B. hochwertigen Nahrungsmittelergänzungstoffen oder Einsatzstoffen für die Pharmaindustrie effizienter gestaltet werden. Diese Kopplung verschiedener Wertschöpfungsketten muss in Zukunft in die Analyse der Wirtschaftlichkeit derartiger Verfahren einbezogen werden.

Zitierte Literatur:

4. McKinlay, J.B.; Harwood, C.S. (2010): Photobiological production of hydrogen gas as a biofuel. *Curr. Opin. Biotech.*, 21, 244–251.
5. Doebbe, A.; Rupprecht, J.; Beckmann, J.; Mussgnug, J.H.; Hallmann, A.; Hankamer, B.; Kruse, O. (2007): Functional integration of the HUP1 hexose symporter gene into the genome of *C. reinhardtii*: Impacts on biological H₂ production. *J. Biotechnol.*, 131, 27-33.
6. Bandyopadhyay, A.; Stöckel, J.; Min, H.; Sherman, L. A.; Pakrasi, H. (2010): High rates of photobiological H₂ production by a cyanobacterium under aerobic conditions. *Nature Commun.*, 1, 139.
7. Kim, E.-J.; Lee, M.-K.; Kim, M.-S.; and Lee, J.K. (2008): Molecular hydrogen production by nitrogenase of *Rhodobacter sphaeroides* and by Fe-only hydrogenase of *Rhodospirillum rubrum*. *Int. J. Hyd. En.*, 33, 1516-1521.

„Dunkelphotosynthese“ mittels Purpurbakterien

Kurze Beschreibung der Technologie:

Bei der sogenannten „Dunkelphotosynthese“ werden alle Vorteile eines photosynthetischen Organismus genutzt, aber der große Nachteil - die Notwendigkeit von Licht - fällt weg.

Die zur photosynthetischen Wasserstoffproduktion benötigte Energie, die physiologischen Signale und die Redoxäquivalente kommen bei der Dunkelphotosynthese nicht aus Licht, sondern aus einem Nährsubstrat (z. B. Fruktose). Die Dunkelphotosynthese hat also große Ähnlichkeit mit herkömmlichen Dunkelfermentationsprozessen, geht allerdings darüber hinaus, da alle üblicherweise nur mit Lichteinfluss eingeschalteten Prozesse nun auch im Dunkeln ablaufen können (Ghosh et al. 1994). So findet z. B. im Dunkeln die „photosynthetische“ Überproduktion von Membranen, Membranproteinen und Cofaktoren statt, die für die Elektronentransferprozesse bei der Wasserstoffproduktion wichtig sind. Dadurch können photosynthetische Mikroorganismen in herkömmlichen Bioreaktoren gezüchtet werden und unter Verwendung spezieller Fed-Batch-Verfahren sehr hohe Zelldichten erreichen (Zeiger und Grammel 2010).

Motivation und Erfolgsfaktoren:

Die „Dunkelphotosynthese“ vereint die Vorteile der Dunkelfermentation mit denen der Biophotolyse: wie in der Dunkelfermentation können nahezu beliebig große Kulturvolumen gezüchtet werden. Die Kopplung stofflicher und energetischer Biomassenutzung ist hier ebenfalls ein wichtiger Erfolgsfaktor, insbesondere da photosynthetische Organismen ein hohes Potential haben, eine Vielfalt hochwertiger Koppelprodukte herzustellen.

Verwertbare Substrate (inkl. Substrat-Potential hinsichtlich der Wasserstoff-Ausbeute):

Der „Dunkelphotosynthese“-Effekt konnte bislang nur mit dem Purpurbakterium *R. rubrum* in einem Nährmedium, das als Haupt-Kohlenstoffquelle Fruktose enthält, nachgewiesen werden. Fruktose kann aus biogenen Rest- und Abfallstoffen gewonnen werden. Weitere Nährsubstrate für *R. rubrum* sind organische Säuren (z. B. Succinat, Lactat, Acetat, etc.), die aus Molkerei- oder Brauerei-Abfällen gewonnen werden können.

Koppelprodukte:

Mit Purpurbakterien können Carotinoide und andere, fettlösliche Terpenoide, sowie Bacteriochlorophyll und dessen Vorstufen hergestellt werden.

Entwicklungsstand und Kennzahlen:

Die Wasserstoffproduktion mittels Dunkelphotosynthese ist Thema aktueller Projekte des BMWi (z. B. RhoTech, FKZ-Nr. 03EI5407).

TRL-Bereich: TRL 3–4

Herausforderungen:

Der „Dunkelphotosynthese“-Prozess ist ein semi-aerober Prozess. Dies bedeutet, dass einerseits höhere Wachstumsraten als bei der Dunkelfermentation erreicht werden können. Andererseits ist vor dem Hintergrund der Arbeitssicherheit die gleichzeitige Anwesenheit von Sauerstoff und Wasserstoff herausfordernd.

Forschungs- und Entwicklungsbedarf:

- Bislang konnte nur in *R. rubrum* Dunkelphotosynthese gezeigt werden. Selbst das verwandte Purpurbakterium *Rhodobacter sphaeroides* zeigte im Dunkeln keine photosynthetische Produktionsleistung in dem Fruktose-haltigen „Dunkelphotosynthese“-Nährmedium. Allerdings ist es durchaus möglich, dass eine modifizierte Nährstoffkomposition in *R. sphaeroides* und auch in Grünalgen und Cyanobakterien einen „Dunkelphotosynthese“-Effekt hervorrufen könnte.
- Ein Transfer der Technologie in den industriellen Maßstab steht noch aus, ist aber bereits Bestandteil aktueller Forschungstätigkeiten.

- Vernetzung mit anderen bestehenden Technologien, insbesondere Dunkelfermentation und Biogasbereich
- Grundsätzlich kann der für die Dunkelfermentation erläuterte Handlungsbedarf auf die „Dunkelphotosynthese“ übertragen werden.

Zitierte Literatur:

8. Ghosh, R.; Hardmeyer, A.; Thoenen, I.; Bachofen, R. (1994): Optimization of Siström medium for the semi-aerobic growth of *Rhodospirillum rubrum* with the maximal yield of photosynthetic membranes. *Appl. Environ. Microbiol.*, 60, 1698-1700.
9. Zeiger and Grammel (2010): Model-based high cell density cultivation of *Rhodospirillum rubrum* under respiratory dark conditions. *Biotechnol. Bioeng.*, 105, 729.

Exkurs - Die Vor- und Nachteile von Rein- und Mischkulturen in biotechnologischen Verfahren zur Wasserstoffherzeugung

Stoffströme von Rest- und Abfallstoffen können sehr rein (z. B. Schlempe, Kartoffelschalen) oder sehr inhomogen sein (z. B. organische Haushaltsabfälle). Je nach Substratart und biologischem Umwandlungspfad können daher Rein-, Anreicherungs- und Mischkulturen eingesetzt werden.

Bei biotechnologischen Verfahren wird häufig mit **Reinkulturen** und konkreten Substraten (z. B. Glucose) gearbeitet. Für Verfahren wie z. B. Dunkelfermentation ist diese Vorgehensweise einerseits nicht zielführend und andererseits in der praktischen Umsetzung zur Herstellung von Wasserstoff im Vergleich zu z. B. pharmazeutischen Produkten relativ günstigem Produkt, nicht wirtschaftlich umsetzbar. Jedoch kann schon heute durch Anreicherungskulturen ein Kompromiss aus Robustheit und Einfachheit undefinierter Mischkulturen und dem Vorteil gesteigerter Prozesseffizienz durch an Substrate angepasste Reinkulturen und der Synthese bestimmter Koppelprodukte erzielt werden.

Solange die Forschung noch im Labor- und Pilotmaßstab stattfindet und der industrielle Maßstab noch nicht wirklich umgesetzt ist, sollten allerdings auch Reinkulturen bzw. optimierte Next-Generation-Designer-Organismen (Reinkulturen und konstruierte Mischkulturen) nicht ausgeschlossen werden. Die Herausforderung bei Next-Generation-Designer-Organismen besteht in der Eindämmung der Prozesse, die insbesondere bei relativ günstigen Produkten wie Wasserstoff nur schwer wirtschaftlich darstellbar ist.

Im Falle von **Mischkulturen** gilt es Verfahren zu identifizieren bzw. bereits bestehende Verfahren anzupassen, die in der Lage sind, mit möglichst flexiblem Einsatz von Rest- und Abfallstoffen Wasserstoff kostengünstig bereitzustellen. Eine Alternative beim Einsatz heterogener Substrate ist die Vorbehandlung mit Mischkulturen mit anschließender Abtrennung von Produkten, welche dann mit einer Reinkultur weiterverarbeitet werden. Bioaugmentation bzw. die gezielte Anreicherung von Mikroorganismen im Prozess sind ebenfalls denkbar.

B) THERMO-CHEMISCHE TECHNOLOGIEN ZUR WASSERSTOFFPRODUKTION AUS REST- UND ABFALLSTOFFEN UND BIOENERGIETRÄGERN

Thermo-chemische Vergasung (z. B. Wirbelschicht, Festbett, Flugstrom, O₂-Dampf-Vergasung, elektrisch beheizte allotherme Vergasung)

Kurze Beschreibung der Technologie:

Bei der thermo-chemischen Vergasung werden feste Einsatzstoffe, die hauptsächlich aus Kohlenstoff, Wasserstoff und insbesondere im Fall von Biomasse auch Sauerstoff zusammengesetzt sind, bei Temperaturen um 1.000 °C mit Hilfe eines sauerstoffhaltigen Vergasungsmittels (Luft, Sauerstoff, Wasserdampf, Kohlendioxid) in einen gasförmigen Energieträger umgewandelt. Das Gas besteht aus den Hauptkomponenten Kohlendioxid, Kohlenmonoxid, Wasserstoff und Wasserdampf, von denen nur Kohlenmonoxid und Wasserstoff einen Beitrag zum chemischen Energiegehalt leisten (Schulzke 2019). Daneben entstehen auch kurzkettenige Kohlenwasserstoffe wie Methan und Ethan und sogenannter Teer, eine Mischung aus schweren, meistens aromatischen Kohlenwasserstoffen. Die genaue Zusammensetzung ist abhängig vom Vergasungsverfahren und dem Reaktortypen.

Vor der weiteren Umwandlung des Produktgases müssen in einer Gasreinigung gebildete Partikel (Flugstaub, Asche und Koks) sowie die unerwünschten Gasbestandteile entfernt werden. Danach wird in der Wassergas-Shift-Reaktion durch Reaktion von Wasserdampf mit Kohlenmonoxid weiterer Wasserstoff erzeugt

Die physikalischen und chemischen Vorgänge bei der eigentlichen thermo-chemischen Vergasung – die Aufheizung der Einsatzstoffe und des Vergasungsmittels auf Reaktionstemperatur, Trocknung des Einsatzstoffes sowie die Umwandlung in gasförmige Komponenten – sind endotherm, d. h. sie laufen unter Verbrauch von Wärme ab. Die verschiedenen Verfahren können nach der Art, wie die erforderliche Wärme zugeführt wird, klassifiziert werden (autotherm, allotherm). Eine weitere Einteilung der Verfahren kann anhand des verwendeten Reaktortyps vorgenommen werden. Es werden sogenannte Festbettreaktoren, stationäre und zirkulierende Wirbelschichten sowie Flugstromreaktoren eingesetzt.

Verwertbare Substrate hinsichtlich der Wasserstoff-Ausbeute:

Verschiedene wasserarme feste Biomassen und Pyrolyseöl; für die Hydrothermale Vergasung oder mit hydrothermalen Verfahren als Teil der Vorbehandlung nasser Biomassen.

Motivation und Erfolgsfaktoren:

- hoher Wirkungsgrad für die Wasserstoff-Erzeugung,
- Beitrag zur synergetischen Kopplung stofflicher und energetischer Nutzung,
- Erschließung von Einsatzstoffen, die nicht für eine biologische Umwandlung ideal geeignet sind wie holz- und halmgutartige Biomasse, zudem nasse Einsatzstoffe über hydrothermale Verfahren,
- Erschließung ökonomisch vorteilhafter Nutzungswege für diese Einsatzstoffe,
- Ideale Synergien mit regenerativ erzeugter Elektroenergie über Elektrolyse oder spezielle Vergaser (electricity enhanced gasification),
- bei sorptionsunterstützter Vergasung: In-situ CO₂-Abscheidung für CCS (Carbon Capture & Storage) und damit negative THG-Emissionen oder für CCU (Carbon Capture & Usage),
- grüner Wasserstoff für Produktsynthesen und Produktaufbereitung,
- Gestaltung integrierter Systeme, z. B. aus Vergasung und Elektrolyse zur anwendungsspezifischen Synthesegasbereitstellung oder aus Wasserstoffbereitstellung und Produktaufbereitungsverfahren, z. B. Hydrotreating,

- Ein wesentlicher Erfolgsfaktor ist ein technisch abgestimmtes Konzept und die Umsetzung aus Vergasung, den Anforderungen der Wasserstoffanwendung und einem Gasaufbereitungskonzept, das die Erfordernisse von Erzeugung und Anwendung effektiv in Einklang bringt.

Koppelprodukte:

- Primäres Koppelprodukt ist abhängig von der Prozessführung CO_2 oder CO , die als erneuerbarer Kohlenstoffträger für Syntheseprozesse zusammen mit dem Wasserstoff dienen können. Bei anderen Wegen der Wasserstoffnutzung wird der gesamte im Einsatzstoff enthaltenen Kohlenstoff als CO_2 wieder zurück in die Atmosphäre entlassen, welcher in der Wachstumsphase der Biomasse entnommen wurde.
- Asche bzw. Schlacke potenziell als Dünger

Entwicklungsstand und Kennzahlen (Beispiele):

- **TRL-Bereich:** Forschung zu Pyrolyse und Vergasung von den Grundlagen TRL1–2 bis in den Pilotmaßstab TRL 6–7
- **Beispiel 1:** Biomass-to-Liquid (BtL)-Verfahren mit Wasserstoff aus biogenen lignozellulosehaltigen Reststoffen, wie Stroh über dezentrale Pyrolyse mit gut transportierbaren und energiereichen Zwischenprodukt Biosyncrude und zentrale Hochdruck-Flugstromvergasung. Nutzung einer modifizierten Form des MtG-Verfahrens, bei dem über Methanol und Dimethylether als Zwischenstufe die Herstellung von Ottokraftstoffen erzeugt wird. Dies ist vorteilhaft, da das Synthesegas aus Biomasse ein Wasserstoff/ Kohlenmonoxid (CO)-Verhältnis nahe eins aufweist, dass für die DME-Synthese günstig ist. (z. B. bioliq® -Verfahren am KIT)
Produktion: 500 m^3/h Wasserstoff i.N. bei einer Druckstufe 40 bar aus 1 t/h biogenem Edukt bei einer Brennstoffleistung von 5 MW
TRL-Bereich: TRL 6–7, Anlagenverbund im Dauerbetrieb 24/7 (Kampagnen)

Herausforderungen:

- Erhöhung der Kohlenstoffumwandlungseffizienz bei der Herstellung von synthetischen Biokraftstoffen angesichts begrenzter Biomasseressourcen
- Kosten der Wasserstoffbereitstellung: Erste systemanalytische Arbeiten haben gezeigt, dass neben technischer Optimierung vor allem die Zugabe von Wasserstoff die Kohlenstoffausnutzung und damit die Produktausbeute je kg Biomasse deutlich verbessern kann. Die Wirtschaftlichkeit dieser Prozessvariante gegenüber einer Variante ohne Wasserstoff-Einspeisung hängt dabei maßgeblich von den Kosten der Wasserstoffbereitstellung ab.
- Ein wesentlicher Treiber bei den Kosten für Wasserstoff aus der Vergasung ist die Gasaufbereitung.

Forschungs- und Entwicklungsbedarf:

Die wesentlichen Verfahrenskomponenten sind, wenn auch im Kontext anderer chemischer Verfahren, kommerziell in industriellem Maßstab verfügbar. Der wesentliche Forschungsbedarf besteht in:

- Weiterentwicklung der Vergasungstechnologie und Gasreinigung: Der Vergaser muss in Abhängigkeit vom gewählten Einsatzstoff weiterentwickelt werden.
- Anpassung der Einsatzstoffaufbereitung an die jeweilige Schadstofffracht der Einsatzstoffe
- Optimierung der Gasreinigung für die jeweilige, vergaserspezifische Rohgasqualität und die verschiedenen Anforderungen an die Wasserstoffqualität,

- Erarbeitung von Daten und Kennzahlen zum Scale-up, d. h. zur Übertragung aus dem Pilotmaßstab (TRL 6/5 MW) in den Demonstrations-Maßstab (TRL 8/50 MW)
- Klärung von wesentlichen Fragen zum Brennerdesign, zum Brennstoffumsatz und zum Schlackeverhalten für den Einsatz eines breiten Edukt-Spektrums auf Basis von Reststoffen
- Erforschung der Verwertung der Asche bzw. Schlacke als Dünger (Phosphor-Recycling)
- Weiterentwicklung der Teilprozesse und Prozessintegration/Kombinationsmöglichkeiten der Verfahren
- Multikriterielle Technologie- und Nachhaltigkeitsbewertung

Handlungsbedarf – Forschung/Entwicklung:

- Technische Optimierung der Gesamtkette von der Biomasse (und gegebenenfalls gekoppelten Energieträgern) bis zur Wasserstoffnutzung
- Wesentliches Hemmnis Wirtschaftlichkeit: Im Vergleich zu Wasserstoff aus der großindustriellen Dampfreformierung von Erdgas sind die Gestehungskosten für Wasserstoff aus Biomasse über thermo-chemische Prozesse mehr als doppelt so hoch und damit ohne finanzielle Förderung zumindest kurzfristig ökonomisch nicht realisierbar
- Ermittlung und Kommunikation der relativen Vorteilhaftigkeit von biogenen Wasserstoff gegenüber derzeitigen und zukünftigen Alternativen

Zitierte Literatur:

10. Schulzke, T. (2019): Biomass gasification: conversion of forest residues into heat, electricity and base chemicals. *Chemical Papers* 73 1833-1852; doi: 10.1007/s11696-019-00801-1
11. Eberhard, M.; Santo, U.; Michelfelder, B.; Günther, A.; Weigand, P.; Matthes, J.; Waibel, P.; Hagenmeyer, V.; Kolb, T. (2020): The bioliq Entrained-Flow Gasifier – A Model for the German Energiewende. *ChemBioEng Reviews*, DOI: 10.1002/cben.202000006
12. Hennig, M.; Haase, M. (2021): Techno-economic analysis of hydrogen enhanced methanol to gasoline process from biomass-derived synthesis gas. *Fuel processing technology*, 216, Ar.-Nr. 106776. doi:10.1016/j.fuproc.2021.106776

Methanpyrolyse

Kurze Beschreibung der Technologie:

Die Methanpyrolyse beschreibt ein Hochtemperatur-Verfahren zur Umwandlung von Methan zu Wasserstoff und festem Kohlenstoff. Hierfür kann biobasiertes Methan aus dem Aufbereitungsschritt der anaeroben Vergärung genutzt werden. Es handelt sich um einen endothermen Prozess – die für die Spaltung der Atombindungen notwendigen hohen Temperaturen von ca. 1000 °C können beispielsweise über ein elektrisch erzeugtes Plasma (Kvæner-Prozess) oder ein Flüssigmetallbad (z. B. flüssiges Zinn) eingebracht werden. Anders als bei der Biogas-Reformierung bietet die Methanpyrolyse die Möglichkeit, den gebundenen Kohlenstoff nicht als CO₂, sondern als festen Kohlenstoff abzuspalten.

Verwertbare Substrate hinsichtlich der Wasserstoff-Ausbeute: Für die Methanpyrolyse auf Basis von Biomethan lassen sich grundsätzlich jedes erneuerbar erzeugte Methan bzw. sämtliche Biomassen einsetzen, welche für die Erzeugung von Biogas geeignet sind. Dem produzierten Biogas sind die CO₂- und Spurengasanteile zu entfernen, um es der Methanpyrolyse zugänglich zu machen. Die häufigsten Einsatzstoffe auf Biogasanlagen in Deutschland sind tierischen Exkremente und nachwachsende Rohstoffe, wie z. B. Mais. Aber auch Biomethan aus Bioabfallbehandlungsanlagen kann der Methanpyrolyse zugeführt werden.

Koppelprodukte:

- fester Kohlenstoff (Graphit)

Entwicklungsstand und Kennzahlen:

Die Technologie der Methanpyrolyse wurde ursprünglich für die Gewinnung von Industrieruß aus Erdgas entwickelt und skaliert. So fanden und finden sich in diesem Anwendungsfeld Anlagen mit einem TRL von 6–8.

Die Erzeugung von Wasserstoff als Hauptprodukt der Methanpyrolyse hingegen ist noch Gegenstand der Wissenschaft und das TRL bei 3–4 eingeordnet (Schneider et al. 2020).

Motivation und Erfolgsfaktoren

- Kurz vor der Marktreife, 60–70 % Wirkungsgrad
- Negativ-THG-Emissionen durch CO₂-Abscheidung
- Geringes Investitionspotential, da hier bestehende Biogasanlagen umgerüstet werden können
- Viele Biogasanlagen müssen ohnehin in näherer Zukunft umrüsten, um weiter wirtschaftlich zu sein. Somit liegt das Potenzial in einer weiteren Nutzung mit ggf. Nachrüstung von Gasaufbereitungsanlagen (hier Skalierung beachten).

Herausforderungen:

- Reinheit Biomethan
- Methanschlupf
- Hohe Temperaturen und hohe Sicherheitsanforderungen
- Gasförmige / flüssige Nebenprodukte z. B. Ethin

Forschungs- und Entwicklungsbedarf:

- Alternative Hochtemperaturoptionen (Ersatz von Plasma und Flüssigmetall)
- Nutzung der Kohlenstofffraktion (erste Forschungsergebnisse im Rahmen von Me²H₂ erwartet)
- Nebenproduktgewinnung (z. B. Ethin)/Wasserstoffreinigung

Zitierte Literatur:

13. Schneider, Stefan; Bajohr, Siegfried; Graf, Frank; Kolb, Thomas (2020):
Verfahrensübersicht zur Erzeugung von Wasserstoff durch Erdgas-Pyrolyse. *Chemie Ingenieur Technik* 92 (8), S. 1023–1032. DOI: 10.1002/cite.202000021.

Reformierung von Biogas und Biomethan

Kurze Beschreibung der Technologie:

Die Dampfreformierung von Biogas ist ein Verfahren zur Erzeugung von Wasserstoff, basierend auf der Anwendung von aus der Erdgasreformierung bekannten Technologien. Dabei wird Methan mit Wasser zu Wasserstoff und Kohlenstoffmonoxid umgesetzt. In Kombination mit einer nachgeschalteten Wassergas-Shift-Reaktion kann der produzierte Kohlenstoffmonoxid mit Wasser zu Kohlenstoffdioxid und weiterem Wasserstoff umgewandelt werden.

Der eigentliche Schritt der Reformierung findet i.d.R. bei Temperaturen oberhalb von 800 °C und über einen Nickel-Katalysator statt. Diese Katalysatoren erfordern ein schwefelfreies Gas, weshalb vorherige Aufbereitungsschritte zur Grob- und Tiefenentschwefelung notwendig sind. Anschließend wird der CO-Gehalt im Reformat durch eine Wassergas-Shift-Stufe verringert und der Wasserstoff in Verfahren wie der Druckwechseladsorption oder Membranabscheidern abgetrennt. (Jess & Wasserscheid 2020)

Verwertbare Substrate (inkl. Substrat-Potential hinsichtlich der Wasserstoff-Ausbeute):

- Gut geeignet: entschwefeltes Biogas
- Forschungsgegenstand: Biogas oder andere biogene Gase mit erhöhtem Schwefelgehalt

Koppelprodukte:

- Abwärme (für Nahwärmenetze, die bei Biogasanlagen im Idealfall bereits vorliegen)
- CO₂ für z. B. Lebensmittelindustrie

Entwicklungsstand und Kennzahlen:

Die Dampfreformierung ist Stand der Technik für die Wasserstoffproduktion mit Erdgas als Ausgangsstoff. Sie wird z. B. großtechnisch als Ausgangspunkt einer großflächigen Wasserstoffversorgung eingesetzt (z. B.: <https://www.hypos-eastgermany.de>).

Die Autotherme Reformierung (Dampfreformierung und partielle Oxidation zusammen in einem Reaktor) wurde u. a. im EU-Projekt „BioRobur“ bzgl. der Wasserstoffausbeute aus Biogas charakterisiert. Es wurden Kaltgaswirkungsgrade zw. 75 % und 95 % erreicht. Die Untersuchungen wurden an einer Pilotanlage durchgeführt. (Rau et al. 2019)

TRL-Bereich: TRL 6-7

Motivation und Erfolgsfaktoren

- Dampfreformierung ist Stand der Technik für die Wasserstoffproduktion
- hoher Wirkungsgrad
- Geringer Investitionsbedarf, da bestehende Biogasanlagen umgerüstet werden können

Herausforderungen:

- Wirtschaftliche Biogasaufbereitung (Tiefenentschwefelung) (insbesondere im kleinen Maßstab)
- Hohe Anlageneffizienz im kleinen Maßstab trotz erhöhtem CO₂-Gehalt
- Abweichende Reaktorgeometrien und Wärmetauscher aufgrund des erhöhten CO₂-Gehaltes

Forschungs- und Entwicklungsbedarf:

- Katalysatormaterial bzw. Verfahrensstrategie, die günstig sind (unedle Metalle) und lange Standzeiten bei Biogaseinsatz erlauben

- Einsatz von Deponie- und Klärgasen durch zusätzliche Verunreinigungen wie Siloxane/Halogene
- Umsetzung von Pilot- und Demonstrationsprojekten im Realmaßstab

Zitierte Literatur:

14. Jess, A.; Wasserscheid, P.: *Chemical Technology: From Principles to Products*, 2nd Ed., Wiley-VCH, 2020
15. Hydrogen Power Storage & Solutions East Germany e.V. (Stand 31.03.2021)
16. Rau, F.; Herrmann, A.; Krause, H.; Fino, D.; Trimis, D. (2019): Efficiency of a pilot-plant for the autothermal reforming of biogas. *Int. Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 44, 35, pp. 19135–d19140, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.04.014>.

3.2. TECHNOLOGIEN FÜR DIE NUTZUNG VON GRÜNEM WASSERSTOFF MIT BIOMASSE UND BIOENERGIETRÄGERN (HYBRIDVERFAHREN)

A) BIOLOGISCHE METHANISIERUNG

Kurze Beschreibung der Technologie:

In der biologischen Methanisierung (BM) wird Wasserstoff und CO₂ mit Hilfe von Archaeen zu Methan umgesetzt. Dieser Prozess läuft bei milden Betriebsbedingungen ($T < 70\text{ °C}$, $p < 10\text{ bar}$) ab, weshalb durch die niedrige Temperatur keine Umsatzlimitierung auf Grund des chemischen Gleichgewichts vorliegt (Götz et al. 2016). Wie in einer Pilotanlage (TRL 6) gezeigt, ist die Produktion von Methan in ex situ Reaktoren mit einer Reinheit von größer 99 % in einer Reaktorstufe möglich (Mörs et al. 2020). Ein weiterer Vorteil ist die hohe Toleranz gegenüber Hemmstoffen wie z. B. Schwefelwasserstoff. Damit bietet sich eine direkte Verschaltung mit bestehenden Biogasanlagen an. Das Biogas kann ohne Vorreinigung direkt in Methanisierungsreaktoren geleitet werden. Das Methan kann nach einer Feinreinigung direkt in das Erdgasnetz eingespeist werden. Ein Nachteil der ex situ Methanisierung ist, dass die bei der Reaktion freigesetzte Wärme bei einer niedrigeren Temperatur anfällt ($T < 70\text{ °C}$), diese kann aber z. B. zur Beheizung der Biogasfermenter genutzt werden. Neben der ex situ Methanisierung in speziellen Reaktoren kann durch Wasserstoffzugabe in Biogasanlagen ein Großteil des Kohlendioxids zu Methan umgewandelt werden, sog. in situ Methanisierung.

Motivation und Erfolgsfaktoren

- Steigerung der Kohlenstoffausbeute bei der Biomassenutzung.
- Wirtschaftliche Nachnutzung der aus dem EEG fallenden Anlagen
- Umsetzung des CO₂ im Biogas und Einspeisung von Methan ins Erdgasnetz
- Alternative zum EEG und der Vorortverstromung durch die Gewinnung von grünen Gasen für den Treibstoff- und Industriebereich

- weitere Flexibilisierung des bestehenden Biogasanlagenparks durch Erhöhung des Methangehalts und somit der gespeicherten Energiemenge
- Erzeugung eines gasförmigen Sekundärenergieträgers,
- Gas mit hoher Energiedichte, guter Verflüssigbarkeit und geringer Diffusionsneigung, dadurch sehr gut handhabbar, transportierbar und speicherbar,

Entwicklungsstand und Kennzahlen:

Im Bereich der ex-situ Methanisierung existieren mehrere Demonstrationsanlagen die in der Regel immer auf der thermophilen Methanisierung ($> 50\text{ °C}$) unter Verwendung von Anreicherungskulturen (z. B. *Methanothermobacter thermautotrophicus*) beruhen. Der Prozess zeigt eine hohe Stabilität als auch Flexibilität und eignet sich daher auch grundlegend für den Einsatz im Rahmen einer fluktuierenden Wasserstoffnutzung. Es werden Methangehalte von $> 95\%$ erzielt. Gerade in Kombination mit Biogasanlagen existieren verschiedene Synergien bezüglich der systemdienlichen Stromerzeugung und -nutzung als auch der internen Wärmenutzung.

Die in situ Methanisierung direkt im Biogasprozess ist technisch weniger fortgeschritten, was insbesondere mit dem niedrigeren Methangehalt ($\sim 85\%$) und dem direkten Eingriff in syntrophe Wechselwirkungen im Rahmen des Biogasprozesses (Prozessstabilität) begründet werden kann. Nichtsdestotrotz bietet die in situ Methanisierung die Möglichkeit auf technisch einfachem Niveau den Kohlenstoffausnutzungsgrad in Biogasanlagen durch direkte Zugabe von Wasserstoff zu erhöhen. Dieses methanreiche Biogas kann nach einfacher Gasreinigung und evtl. in Kombination mit Wasserstoff ins Erdgasnetz eingespeist werden.

TRL-Bereich: (5³) 6–7

Herausforderungen

- Schlechte Löslichkeit von Wasserstoff in wässriger Phase bei Umgebungsbedingungen
- Bei in situ Methanisierung: Eingriff in den Prozess der Methanogenese, Erhöhung des Wasserstoffpartialdrucks und somit Hemmung vorgelagerter metabolischer Prozesse (syntrophe Wechselwirkungen im Rahmender Acetogenese)
- Wärmeanfall auf niedrigem Temperaturniveau bei thermophiler Methanogenese (< 70 °C)

Forschungs- und Entwicklungsbedarf

- Optimierung von biologischen Methanisierungsreaktoren um eine höhere volumetrische Methanbildungsrate zu erhalten (z. B. Verbesserung des Wasserstofftransports vom Gas in die Flüssigphase).
- Nutzungskonzepte für die Niedertemperaturwärme, um den energetischen Ausnutzungsgrad der Biomasse zu erhöhen.
- Technische Optimierung der in-situ Methanisierung,
- Erstellung von Konzepten für eine wirtschaftliche Kombination von biologischer Methanisierung und Biogasanlagen (Nachnutzung der aus der EEG fallenden Biogasanlagen), z. B. Parallelbetrieb von bedarfsgerechte Vor-Ort-Verstromung und der Treibstoffgewinnung.

Zitierte Literatur:

17. Götz, Manuel; Lefebvre, Jonathan; Mörs, Friedemann; McDaniel Koch, Amy; Graf, Frank; Bajohr, Siegfried et al. (2016): Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review. *Renewable Energy* 85, S. 1371–1390. DOI: 10.1016/j.renene.2015.07.066.
18. Quelle 1: Mörs, Friedemann; Schlautmann, Ruth; Gorre, Jachin; Leonhard, Robin (2020): Innovative large-scale energy storage technologies and power-to-gas concepts after optimisation (STORE&GO). D 5.9 Final report on evaluation of technologies and processes. Hg. v. DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT). Online verfügbar unter <https://cordis.europa.eu/project/id/691797/results>.

B) THERMO-CHEMISCHE/KATALYTISCHE VERFAHREN ZUR BEREITSTELLUNG VON ENERGIETRÄGERN UND CHEMIKALIEN

Katalytische Methanisierung

Kurze Beschreibung der Technologie:

Die katalytische Methanisierung ist die Umsetzung von CO₂/CO mit Wasserstoff an einem Metallkatalysator (z. B. Nickel). Dieser Prozess wird bei Temperaturen von 300–500 °C und Prozessdrücken von bis zu 30 bar betrieben. Vorteile der katalytischen Methanisierung ist die hohe volumetrische Methanbildungsrate, was in einem geringeren Reaktorvolumen im Vergleich mit der biologischen Methanisierung resultiert. Weiterhin ist das hohe Temperaturniveau für eine Abwärmenutzung vorteilhaft. Dies ermöglicht eine effiziente Nutzung der Wärme und erhöht den energetischen Ausnutzungsgrad des Prozesses.

Motivation und Erfolgsfaktoren

- Erzeugung eines gasförmigen Sekundärenergieträgers,
- Gas mit hoher Energiedichte, guter Verflüssigbarkeit und geringer Diffusionsneigung, dadurch sehr gut handhabbar, transportierbar und speicherbar,
- Unter den thermo-chemischen und thermo-katalytischen Verfahren besonders für kleine und dezentrale Anlagen geeignet,
- im Vergleich zu anderen thermo-katalytischen Synthesen einfacher und unempfindlicher Prozess,
- geringer Anfall an Nebenprodukten,
- Nutzung der Erdgasinfrastruktur für Verteilung und Nutzung,
- sinnvolle Kombination sowohl mit Vergasungsanlagen als auch mit Biogasanlagen (Nutzung des CO₂ aus dem Biogas).

Herausforderungen

- Katalysatorgifte gefährden wirtschaftlichen Dauerbetrieb,
- Wirtschaftliche Konkurrenz anderer Methanquellen,
- Wärmemanagement, das gemeinsame Optimierung von Umsatz, Wärmenutzung und Anlagenkosten ermöglicht,
- Bedarf an kleinen, dezentralen Anlagen bei mit der Anlagengröße sinkenden spezifischen Kosten,
- Nutzung des CO₂ aus nicht oder wenig aufbereiteten Biogas,
- möglicher Beitrag zur Flexibilisierung vs. thermischer Trägheit der Reaktoren und der Wasserstoffbereitstellung.

Entwicklungsstand und Kennzahlen

Für die katalytische Methanisierung auf der Basis von CO-reichem Synthesegas aus der thermochemischen Vergasung und von CO₂/H₂-Gemischen existiert eine Reihe von Demonstrationsanlagen. Dabei konkurrieren verschiedene Reaktorkonzepte, wie Festbettreaktoren (hier noch mehrere Typen), Wirbelschichtreaktoren und Suspensionsreaktoren. Daneben variieren die Möglichkeiten der Wärmeabfuhr (adiabat, (teil)-isotherm) und die eingesetzten Katalysatoren.

Die direkte Nutzung von Biogas als Edukt befindet sich noch in der Entwicklung.

TRL-Bereich: 6–7

Forschungs- und Entwicklungsbedarf

- Gestaltung dezentraler Lösungen,
- Optimierung zwischen Gasreinigung und Unempfindlichkeit des Katalysators gegen Störstoffe

- Katalysatorweiterentwicklung hinsichtlich Effizienz, Unempfindlichkeit, Kosten und Umweltauswirkungen,
- Optimierung der Reaktoren hinsichtlich Umsetzung, Wärmenutzung, Flexibilität und Kosten
- Integration der Methanisierung in komplexe Systeme (SynBioPtX).

Zitierte Literatur:

19. Rönsch, S.; Schneider, J.; Matthischke, S; Schlüter, M.; Götz, M.; Lefebvre, J. et al. Review on methanation – From fundamentals to current projects. *Fuel* 2016; 166: 276–296. doi:10.1016/j.fuel.2015.10.111
20. Götz, M.; Lefebvre, J.; Mörs, F.; McDaniel Koch, A.; Graf, F.; Bajohr, S. et al. Renewable Power-to-Gas. A technological and economic review. In: *Renewable Energy* 85 (2016), S. 1371–1390. DOI: 10.1016/j.renene.2015.07.066.
21. Thema, M.; Bauer, F.; Sterner, M. (2019): Power-to-Gas. Electrolysis and methanation status review. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 112 (2019), S. 775–787. DOI: 10.1016/j.rser.2019.06.030.
22. Aziz, M. A. A.; Jalil, A. A.; Triwahyono, S.; Ahmad, A.: CO₂ methanation over heterogeneous catalysts. Recent progress and future prospects. In: *Green Chem.* 17 (2015), S. 2647–2663. DOI: 10.1039/C5GC00119F.

Fischer-Tropsch-Verfahren

Kurze Beschreibung der Technologie:

In der Fischer-Tropsch-Synthese (FTS) wird Synthesegas bestehend aus CO und H₂ direkt zu langkettigen Kohlenwasserstoffen umgesetzt. Das Synthesegas kann dabei unter anderen durch Biomassevergasung, Biomassevergasung mit Zugabe weiteren Wasserstoffs oder aus Wasserstoff und CO₂ mittels umgekehrter Shift-Reaktion bereitgestellt werden.

Die FTS ähnelt prozesstechnisch der katalytischen Methanisierung, jedoch werden unter Verwendung anderer Katalysatoren bei niedrigeren Temperaturen (150-300 °C) längerkettige Kohlenwasserstoffe erzeugt. Als Produkt entsteht ein Gemisch aus einer Vielzahl von Komponenten mit unterschiedlicher Kettenlänge. Es setzt sich beispielsweise aus Alkanen (gesättigte Kohlenwasserstoffe), Alkenen (einfach ungesättigte Kohlenwasserstoffe) und Alkoholen zusammen. Das Produktspektrum beginnt bei Flüssiggasen (Propan und Butane) und verläuft dann über flüssige Produkte und Weichparaffin bis hin zu Hartparaffin. Insgesamt ist die Verteilung des Produktspektrums abhängig vom eingesetzten Katalysator und den gewählten Reaktionsbedingungen (Druck und Temperatur) und damit innerhalb gewisser Grenzen gezielt einstellbar. Häufig kommen eisen- oder kobalt-basierte Katalysatoren zum Einsatz. Bei Co-Katalysatoren entsteht Wasser als Koppelprodukt, wohingegen Katalysatoren mit anderen aktiven Komponenten, wie Fe, auch die heterogene Wassergas-Shift-Reaktion begünstigen, wodurch das gebildete Wasser zusammen mit CO zu CO₂ und H₂ weiterreagiert. Auch die Erzeugung gasförmiger C₂-C₄-Kohlenwasserstoffe ist bei der Hochtemperatur-FTS (>300 °C) möglich. Diese bildet produktseitig den Übergang von katalytischer Methanisierung zur klassischen FTS.

Die weitere Aufreinigung benötigt, bedingt durch das verfahrensimmanent breite Produktspektrum, je nach angestrebtem Anwendungsfall teilweise sehr aufwendige Nachbehandlungsschritte. Zunächst muss das Gesamtgemisch in verschiedene Siedeschritte aufgetrennt werden. Zur Erhöhung der Benzin- bis Kerosin-/Dieselfraktion müssen die hochmolekularen Weich- und Hartparaffine durch Hydrocracken in Kohlenwasserstoffe mit kürzeren Kettenlängen zerlegt und anschließend die Alkene und Alkohole hydriert werden. Unter anderen für die Anwendung als Flugkraftstoff muss als letztes zur Senkung des cold filter plugging points noch eine Isomerisierung durchgeführt werden, in der aus einigen geradkettigen Kohlenwasserstoffen verzweigte Kohlenwasserstoffe erzeugt werden.

Motivation und Erfolgsfaktoren

- Erzeugung eines flüssigen Sekundärenergieträgers, der verbreitete Kraftstoffe direkt ersetzen kann,
- Kraftstoff mit hoher Energiedichte, im Vergleich zu Wasserstoff sehr gut handhabbar, transportierbar und speicherbar,
- Erzeugung von Basischemikalien durch gezielte Prozessführung bzw. Nachbehandlung möglich,
- Nutzung der bestehenden Infrastruktur für Verteilung und Nutzung,
- sinnvolle Kombination mit Vergasungsanlagen und Wasserstofferzeugungsanlagen,

Herausforderungen

- sehr breites Produktspektrum, energieaufwendige Aufbereitungsschritte bzw. Abprodukte müssen minimiert werden,
- wirtschaftliche Konkurrenz zu anderen Kraftstoffquellen,
- Wärmemanagement, das gemeinsame Optimierung von Umsatz, Wärmenutzung und Anlagenkosten ermöglicht,
- Beschränkung der Möglichkeiten des Wärmemanagements durch die starke Temperaturabhängigkeit der Produktqualität,
- verschiedene Katalysatorgifte in Abhängigkeit der CO-Quelle,
- noch nicht hinreichend untersuchte spezifische Katalysatorgifte bei biogenen Kohlenstoffquellen,

- möglicher Beitrag zur Flexibilisierung vs. Temperaturabhängigkeit der Reaktion sowie thermischer Trägheit der Reaktoren und der Wasserstoffbereitstellung.

Entwicklungsstand und Kennzahlen

Die FTS auf der Basis von Synthesegas aus fossilen Kohlenstoffträgern war viele Jahre im großtechnischen Einsatz. Die Nutzung von nichtfossilem Synthesegas in der FTS wurde mehrfach demonstriert, weiterhin existieren eine Reihe von Versuchsanlagen. Für die FTS werden verschiedene Arten von Reaktoren eingesetzt wie z. B. Festbett-, Rohrbündel-, Slurry- und Wirbelschichtreaktoren, weitere reaktortechnische Varianten befinden sich in der Entwicklung. Der Entwicklungsstand differiert stark nach Kohlenstoff- und Energieträgern, Zielprodukten und Verfahrensvariante.

TRL-Bereich: 5–8

Forschungs- und Entwicklungsbedarf

- Einengung des Produktspektrums auf gewünschte Zielprodukte, etwa durch spezielle Katalysatordesigns,
- Weiterentwicklung, insbesondere energetische Optimierung, der Produktaufbereitung,
- Optimierung zwischen Gasreinigung und Empfindlichkeit des Katalysators gegen Störstoffe
- Katalysatorweiterentwicklung hinsichtlich Effizienz, Standzeit, Kosten und Umweltauswirkungen,
- Reaktorweiterentwicklung zu optimierter Wärmeabfuhr, leichter Skalierbarkeit, geringem Katalysatorverschleiß und einfachem Katalysatorwechsel,
- Anpassungen an CO₂ als Kohlenstoffquelle.

Zitierte Literatur:

23. Mahmoudi, H., Mahmoudi, M., Doustdar, O., Jahangiri, H., Tsolakis, A., Gu, S., Lech Wyszynski, M.; A review of Fischer Tropsch synthesis process, mechanism, surface chemistry and catalyst formulation. *Biofuels Engineering* 2017, 2(1), 11-31.
24. Joelsson, J. M., Gustavsson, L.: Reductions in greenhouse gas emissions and oil use by DME (di-methyl ether) and FT (Fischer-Tropsch) diesel production in chemical pulp mills. *Energy* 2012 (39), S. 363–374
25. Kirsch, H., Brübach, L., Loewert, M., Riedinger, M., Gräfenhahn, A., Böltken, T., Klumpp, M., Pfeifer, P. and Dittmeyer, R. (2020), CO₂-neutrale Fischer-Tropsch-Kraftstoffe aus dezentralen modularen Anlagen: Status und Perspektiven. *Chemie Ingenieur Technik*, 92: 91-99. <https://doi.org/10.1002/cite.201900120>
26. Martinelli, M.; Gnanamani, M. K.; LeViness, S.; Jacobs, G.; Shafer, W. D.: An overview of Fischer-Tropsch Synthesis: XtL processes, catalysts and reactors. *Applied Catalysis A: General*, Volume 608,2020,117740,ISSN 0926-860X, <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2020.117740>.

CB - Synthese E-Fuels (Methanol)

Kurze Beschreibung der Technologie:

Methanol wird aus Synthesegas in einer katalytischen Reaktion hergestellt. Die reaktiven Komponenten des Synthesegases sind CO und H₂ sowie CO₂. Ein gewisser Anteil an CO₂ führt dabei erheblich zur Erhöhung der Reaktionsgeschwindigkeit im Vergleich zu Synthesegasen mit reinem CO. Das Verhältnis aus Wasserstoff zu den Kohlenstoffträgern muss entsprechend der Stöchiometrie eingestellt werden mit einem geringen Wasserstoff-Überschuss $[(H_2 - CO_2)/(CO + CO_2) = 2,1]$. Aus CO entsteht reines Methanol, aus CO₂ Methanol und Wasser. Insgesamt zeichnet sich dieser industriell in sehr großem Maßstab erfolgreich etablierte Prozess, der heute üblicherweise mit Katalysatoren auf der Basis von Cu/ZnO/Al₂O₃ durchgeführt wird, durch eine sehr geringe Nebenproduktmenge aus und daher ist das Produkt vergleichsweise einfach destillativ zumindest auf fuel grade-Qualität zu bringen (im Wesentlichen Wasserabtrennung).

Das Synthesegas kann über (autothermes) Biogasreformierung genauso gewonnen werden wie durch Biomassevergasung. Bei der Biogasreformierung entsteht ein leichter Wasserstoffüberschuss wohingegen es bei der Vergasungsrute erst die Zugabe von erneuerbarem Wasserstoff ermöglicht, den Kohlenstoffgehalt im Ausgangsmaterial vollständig zu nutzen.

Motivation und Erfolgsfaktoren

Neben der direkten Nutzung als Kraftstoff(-Komponente) kann Methanol über den MtG-Prozess zu Benzin umgewandelt werden, das chemisch identisch mit Erdöl-basiertem Otto-Kraftstoff ist. Darüber hinaus ist Methanol ein Grundstoff für die chemische Industrie, der bereits heute in der Petrochemie vielfältige Produktlinien begründet wie Formaldehyd, Methylformiat, Essigsäure und auch über den Methanol-to-Olefinsprozess (MtO) mit nachfolgender Polymerisation Massenkunststoffe wie Polyethylen (PE) und Polypropylen (PP). Der letztgenannte Prozess ist bereits in mehreren großtechnischen Produktionsanlagen in China installiert – allerdings wenig umweltfreundlich auf Basis von Kohlevergasung.

Herausforderungen

- Akzeptanz für Methanol als Treibstoff in der Gesellschaft
- Rückhaltung der Kraftstoffdämpfe aufgrund des gegenüber konventionellen Benzin-Kraftstoffen vergleichsweise hohen Dampfdrucks

Forschungs- und Entwicklungsbedarf

- Entwicklungsstand, Kennzahlen und TRL-Bereich ließen sich nicht genau evaluieren

Zitierte Literatur:

27. Olag, G.A.; Göppert, A.; Surya Prakash, G.K. (2018): Beyond oil and gas: the methanol economy. 3rd ed., Wiley-VCH, Weinheim, Germany, ISBN 978-527-33803-0

Hydrotreatment biogener Ester und Fettsäuren (HEFA)

Kurze Beschreibung der Technologie:

Das HEFA-Verfahren (engl. Hydrotreated Esters and Fatty Acids, auch bekannt als HVO, engl. Hydrotreated Vegetable Oils) beschreibt die thermo-katalytische Beaufschlagung von Ester- und Fettsäurehaltigen Rohstoffen mit Wasserstoff. Verfahrenstechnisch können Pflanzenöle, Altspeiseöle (engl. Used Cooking Oils, UCO), tierische Fette aber auch Exoten wie Algen- und Tallöle eingesetzt werden. Aus diesen wird eine Bandbreite an paraffinischen Kohlenwasserstoffen in einem mit der Erdölraffination vergleichbarem Spektrum hergestellt. Die Produktfraktionen reichen von gasförmigen, kurzkettigen Kohlenwasserstoffen (Propan, Butan) über Naphtha/Benzin und Diesel bis hin zu Kerosin. Letzteres kann nach ASTM D7566 als synthetisch paraffinisches Kerosin (engl. Sustainable Aviation Fuel, SAF) und somit Blendkomponente in der kommerziellen Luftfahrt eingesetzt werden.

Motivation, Erfolgsfaktoren und Entwicklungsstand

Die Technologie befindet sich für konventionelle Rohstoffe wie Pflanzenöle und Altspeiseöl/-fette auf einem sehr hohen Entwicklungsstand (**TRL 9**), Das (Diesel-)Produkt ist bereits marktverfügbar und kann mit einem TRL = 9 bewertet werden. HEFA-SAF ist lediglich auf dem US-Markt verfügbar und wird Europaweit derzeit nur chargenweise produziert. Für sog. fortschrittliche Rohstoffe wie Tallöl (**TRL 8**) oder andere Biocrudes (**TRL 3 bis 4**) gibt es erste Anlagen kleinerer Kapazität in Skandinavien.

Herausforderungen

Derzeit werden HEFA-Anlagen maßgeblich von (ehemaligen) Erdölkonzernen betrieben, üblicherweise werden bestehende Versorgungsinfrastrukturen der Raffinerien (mit-)genutzt. Die Bereitstellung von Wasserstoff findet hier über eine interne Nutzung des im Prozess anfallenden Naphthas oder extern über Erdgasreformierung statt und versorgt den gesamten Raffineriestandort.

Forschungs- und Entwicklungsbedarf

- Einsatz von grünem Wasserstoff in HEFA-Anlagen zur Produktion von HEFA-SAF
- Pilotierung und Demonstration
- Betriebsflexibilisierung bzgl. der Produkte (SAF/Kerosin, Naphtha, Diesel und anderer Fraktionen)

Zitierte/weiterführende Literatur:

28. <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/19/4047>

29. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S030626191831479X>

3.3. SYSTEMDIENLICHE KOMBINATION VON WASSERSTOFF UND BIOENERGIE

BHKW-Energie mit Wasserstoff/Biogas (Hythane) Verbrennung

Kurze Beschreibung der Technologie:

Wasserstoff kann der Verbrennung von Biogas vor dem BHKW beigemischt werden. Wasserstoff führt auf Grund seiner Eigenschaften (z. B. geringe Grenzspaltweite, hohe Diffusivität) zu einer vollständigeren Verbrennung, was die Bestandteile an Methan (Methanschlupf) und Formaldehyd (kanzerogen) reduziert. Versuche haben gezeigt, dass bis zu 30 Vol.-% Wasserstoff dem BHKW ohne konstruktive oder regelungstechnische Anpassungen zugegeben werden kann. Dabei ist es unproblematisch, die Beimischung der Verfügbarkeit von Wasserstoff flexibel anzupassen.

Motivation und Erfolgsfaktoren

- Neben Biogas/Biomethan, Strom aus erneuerbaren Quellen und fester Biomasse eine der wenigen Lösungen für die Prozesswärmeversorgung durch erneuerbare Energien
- Flexible einsetzbar
- Verbesserung von Abgaswerten und Wirkungsgrad von Biogas/Biomethan BHKW

Herausforderungen

- Sichere Zwischenlagerung von Wasserstoff, Anbindung an Lieferfahrzeuge, Weiterleitung vor Ort muss gewährleistet sein
- Vermutlich hohe Genehmigungs-Hürden zu erwarten (Betriebssicherheitsverordnung!)
- Anpassung von Erdgas-Brennern für Betrieb mit CH₄/H₂-Gemisch bzw. ausschließlich H₂
- Effektive Abtrennung von Wasserstoff aus gemischtem Gasnetz für Verbraucher von reinem Wasserstoff

Forschungs- und Entwicklungsbedarf

- Optimierung der Brennertechnologie hinsichtlich Logistik, Lagerung von reinem Wasserstoff (z. B. Notwendigkeit der Zumischung vor Ort in Spezialbrenner erforschen)
- Bilanzierung von durchgeleitetem Wasserstoff im Erdgas Netz (Direktbefuerung mit Wasserstoff)
- Potenzial für separaten Netzaufbau für Wasserstoff
- Materialforschung für langlebige Verbrennungssysteme bei der H₂-Verbrennung
- Erhöhung der positiven Auswirkungen auf Wirkungsgrad und Abgaswerte von Wasserstoff bei der Beimischung zu Biogas
- Entwicklungsstand, Kennzahlen und TRL-Bereich ließen sich nicht genau evaluieren

Zitierte Literatur:

Primärstahlgewinnung mittels Wasserstoff und Biomasse

Kurze Beschreibung der Technologie:

Für die Produktion von Primärstahl aus Eisenerz ist neben dem Aufschmelzen und den Reduktionsprozessen auch ein Austragen von Verunreinigungen notwendig. Dieser Vorgang scheint bei alleinigem Einsatz von Wasserstoff als Reduktionsmittel erschwert zu werden. Hier zeigen erste Untersuchungen vielversprechende Möglichkeiten der Kombination von Wasserstoff und entsprechend aufbereiteter fester Biomasse.

Motivation und Erfolgsfaktoren

- In der Kombination ist der ggf. notwendige Einsatz aufbereiteter Biomasse mengenmäßig optimiert und die entsprechenden Mengen könnten bei Bedarf nachhaltig bereitgestellt werden.
- Anreize (finanziell und RED II) für die Zugabe der aufbereiteten Biomasse
- Qualität der aufbereiteten Biomasse und deren Verfügbarkeit in ausreichenden Mengen muss sichergestellt sein
- Bidirektionale Flexibilität durch Technologiekombination analog zu Speichertechnologien

Herausforderungen

- Verfügbarkeit von ausreichend kostengünstigen Wasserstoff
- geeignete und auf den Wasserstoffeinsatz optimierte Biomassequalitäten
- Optimierung des Prozesses und der Brennstoffeinbringung

Forschungs- und Entwicklungsbedarf

- Realisierung des Kombi-Prozesses
- Optimierung des Prozesses und der Mischungsverhältnisse ggf. auch hin Abhängigkeit von der Verweilzeit im Meiler
- Kosteneffiziente Bereitstellung der notwendigen Biomassekoksqualitäten
- Wirtschaftlichkeit
- Entwicklungsstand, Kennzahlen und TRL-Bereich ließen sich nicht genau evaluieren

Zitierte Literatur:

Kombination von thermischer Biomassevergasung und Elektrolyse

Die thermo-chemische Vergasung von (trockener/getrockneter) Biomasse und End-of-Life Kunststoffen mit nachfolgender Synthese von chemischen Grundstoffen wie z. B. Methanol stellt eine gute Möglichkeit dar, unsere Kohlenwasserstoff-basierte chemische Industrie mit nicht-fossilem Kohlenstoff zu versorgen. Insbesondere bei der Verwendung von Sauerstoff als Vergasungsmittel ergeben sich Synergien und Flexibilisierungsoptionen (Schulzke 2017) im Zusammenspiel mit einer (Hochtemperatur-)Elektrolyse. In Zeiten, in denen kein Überschussstrom zur Verfügung steht, läuft der Vergaser in seinem Auslegungspunkt und liefert ein Synthesegas für die nachfolgende chemische Synthese, die in einem abgesenkten Leistungspunkt arbeitet. Aufgrund des Wasserstoff-Defizits in der Biomasse verlässt, neben dem Zielprodukt z. B. Methanol, eine nennenswerte Menge CO₂ den Reaktor als Koppelprodukt. Steht erneuerbarer Strom im Überschuss zur Verfügung, wird dieser in einer (Hochtemperatur-)Elektrolysezelle zu Wasserstoff und Sauerstoff umgesetzt. Der Sauerstoff steht dann dem Vergaser als Vergasungsmittel zur Verfügung und der Wasserstoff wird dem Synthesereaktor zugeführt. Dadurch kann die Umsetzung des im Einsatzstoff enthaltenen Kohlenstoffs zum Zielprodukt bis hin zum Vollumsatz gesteigert werden, da anders als bei den meisten allothermen Vergasern üblich, bei der Sauerstoffvergasung der Kohlenstoff des Ausgangsmaterials vollständig im Synthesegas enthalten ist, wenn auch zu größeren Teilen als CO₂. Die im Reaktor anfallende Reaktionswärme dient zur Erzeugung des Wasserdampfes, welcher die Energieeffizienz in der Hochtemperatorelektrolyse steigert. Damit kann zukünftig negative Regelleistung im Bereich von mehreren 100 MW an einem Anlagenstandort realisiert werden.

Forschungs- und Entwicklungsbedarf

- Erfolgsfaktoren, Entwicklungsstand und Kennzahlen, TRL-Bereich und Herausforderungen ließen sich nicht genau evaluieren

Zitierte Literatur:

30. Schulzke, T. (2017): Synergies from direct coupling of BtL- and PtL-plants. *Chemical Engineering & Technology* 40, 254-259; doi: 10.1002/ceat.201600179

Produktion von Wasserstoff aus Biomasse mit gekoppelter CO₂-Abscheidung und -Speicherung (HyBECCS)

Im aktuellen Sachstandsbericht des Weltklimarats (IPCC) werden in allen Szenarien Technologien zur aktiven CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre zur Erreichung des 1,5-Grad-Ziels vorgesehen. Die Kopplung der Bioenergieerzeugung mit einer gezielten CO₂-Abscheidung und -Speicherung (BECCS) hat darin eine zentrale Bedeutung. Die Erzeugung von Wasserstoff aus Biomasse als Grundlage für solche Prozesse im Rahmen sogenannter HyBECCS-Verfahren (Hydrogen Bioenergy with Carbon Capture and Storage) hat in diesem Zusammenhang großes Potenzial, da in den meisten Fällen CO₂ als Nebenprodukt entsteht. Aufgrund der hohen CO₂-Konzentration der Nebenströme ergibt sich beispielsweise gegenüber der Direktabscheidung aus der Umgebungsluft (DAC) ein thermodynamischer Effizienz-Vorteil. Bei der Nutzung des Energieträgers Wasserstoff entstehen darüber hinaus keine THG-Emissionen. Es ergibt sich demnach ein vergleichsweise hohes CO₂-Abscheidungspotenzial und eine neue Technologieperspektive für die Erreichung der Klimaziele, die von der Integration der biogenen Wasserstoffherzeugung in eine zukünftige Wasserstoffwirtschaft abhängt.

Motivation und Erfolgsfaktoren

- Einzige Möglichkeit der Erzeugung von kohlenstoffnegativem bzw. klimapositivem Wasserstoff. Marktvorteil gegenüber beispielsweise elektrolytisch produziertem grünem Wasserstoff und anderen klimaneutralen Alternativen

Herausforderungen

- Politische Rahmenbedingungen (z. B. CO₂-Bepreisung) sind Schlüsselfaktoren für die Wirtschaftlichkeit von HyBECCS-Verfahren
- Die ordnungspolitischen Rahmenbedingungen müssen Innovationen ermöglichen. Eine mögliche Förderung über einen Strikeprice könnte z. B. im Rahmen eines CFDs ein geeignetes Instrument darstellen

Forschungs- und Entwicklungsbedarf

- Analyse und Bewertung sowie technologische Weiterentwicklung sämtlicher HyBECCS-Technologiekombinationsmöglichkeiten über die Biomasseaufbereitung, Wasserstoffproduktion, Gastrennung und Aufbereitung und Nutzung bzw. Speicherung
- Weiterentwicklung der Teilprozesse und Kombinationsmöglichkeiten sowie ganzheitliche Bilanzierung, Bewertung und Optimierung. Beispielsweise erreichbar durch Aufbau und Analyse von Pilotanlagen

Zitierte Literatur:

31. IPCC (2018): Summary for Policymakers. In: Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.)]. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 32 pp.
32. Full, J.; Merseburg, S.; Mieke, R.; Sauer, A. (2021): A New Perspective for Climate Change Mitigation—Introducing Carbon-Negative Hydrogen Production from Biomass with Carbon Capture and Storage (HyBECCS). *Sustainability*, 13, 4026. <https://doi.org/10.3390/su13074026>

AUTOR*INNEN

KERNGRUPPE

1. Autenrieth, Caroline, Institut für Biomaterialien und biomolekulare Systeme, Universität Stuttgart
2. Baganz, Andre, ALENSYS Engineering GmbH
3. Bär, Katharina, Engler-Bunte-Institut, EBI ceb & DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)
4. Birth, Torsten, Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF
5. Bumharter, Cornelius, Sunfarming (Unternehmen der ALENSYS Gruppe)
6. Ciroth, Andreas, Greendelta
7. Dietrich, Sebastian, DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum
8. Dotzauer, Martin, DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum
9. Eltrop, Ludger, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart
10. Fritsche, Uwe, IINAS GmbH – Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien
11. Full, Johannes, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA und Institut für Energieeffizienz in der Produktion, Universität Stuttgart
12. Gehrman, Hans-Joachim, Karlsruher Institut für Technologie
13. Gerd, Reinhold
14. Ghosh, Robin, Institut für Biomaterialien und biomolekulare Systeme, Universität Stuttgart
15. Gradel, Andy, Institut für Wasser- und Energiemanagement der Hochschule Hof (iwe)
16. Graf, Frank, DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)
17. Gress, Hans-Werner, IINAS GmbH – Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien
18. Hachenberg, Marius, Enviva Biomass
19. Hausschild, Stephanie, DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum
20. Herbes, Carsten, Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen (HfWU)
21. Herkendell, Katharina, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
22. Hermann, Kristina, Fördergesellschaft Erneuerbare Energien e.V. (FEE)
23. Hilse, Hagen, GICON – Großmann Ingenieur Consult GmbH
24. Himmelstoss, Alfons, AEV Energy GmbH
25. Hoch, Janet, Biogasrat
26. Junne, Stefan, Technische Universität Berlin
27. Kaltschmitt, Martin, Technische Universität Hamburg
28. Karl, Jürgen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
29. Klemm, Marco, DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum
30. Kolb, Prof. Dr.-Ing. Thomas, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
31. Krautkremer, Bernd, Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik IEE
32. Kretzschmar, Jörg, DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH
33. Krumm, W., Lehrstuhl für Energie- und Umweltverfahrenstechnik, Universität Siegen
34. Kuhles, Alfons, GRENOL GmbH
35. Leitner, Walter, Institut für Technische und makromolekulare Chemie, RWTH Aachen

36. Lenz, Volker, DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH
37. Lutz, Johanna, Schmidmeier NaturEnergie
38. Meier, Matthias, Forschungszentrum Jülich
39. Miehe, Robert, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA
40. Mörs, Friedemann, DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)
41. Müller-Langer, Franziska, DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH
42. Ngoc, Ha Nu, Hochschule Ansbach
43. Öttel, Eberhard, Fördergesellschaft Erneuerbare Energien e.V. (FEE)
44. Pfeiffer, Diana, DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum
45. Rau, Florian, Helmholtz Zentrum Dresden Rossendorf
46. Rösch, Christine, Karlsruher Institut für Technologie
47. Rösler, Johannes, Rösler Ceramino
48. Sauer, Alexander, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA und Institut für Energieeffizienz in der Produktion, Universität Stuttgart
49. Schindler, Harry, DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum
50. Schleupen, Maximilian Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik, RWTH Aachen
51. Schmid, Max, Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK), Universität Stuttgart
52. Schmieder, Uta, DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum
53. Schmidmeier, Thomas, Schmidmeier NaturEnergie
54. Schmidmeier, Ferdinand, Schmidmeier NaturEnergie
55. Schrumm, Peter, Sunfarming (Unternehmen der ALENSYS Gruppe)
56. Schulzke, Tim, Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, Oberhausen
57. Schurr, Forschungszentrum Jülich
58. Steinort, Hendrik, Enviva Germany
59. Tauschke, Martin, Sunfarming (Unternehmen der ALENSYS Gruppe)
60. Tenbrink, Jürgen, EnviTec Biogas AG
61. Tietze, Michael, Großmann Ingenieur Consult GmbH
62. Wander, Paul Moritz, Leibniz Institute for Agricultural Engineering and Bioeconomy

WEITERER KOMMENTIERUNGSKREIS

1. Weide, Tobias, FH Münster – University of Applied Sciences, FB Energie-Gebäude-Umwelt
2. Peters, Ralf, Forschungszentrum Jülich GmbH, Institut für Energie- und Klimaforschung IEK-14: Elektrochemische Verfahrenstechnik
3. Leuchtweis, Christian, C.A.R.M.E.N. e.V.
4. Gleich, Jasmin, C.A.R.M.E.N. e.V.

REDAKTION (BEGLEITFORSCHUNG AM DBFZ)

1. Hauschild, Stephanie, DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH
2. Dietrich, Sebastian, DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH
3. Klemm, Marco, DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH
4. Kretzschmar, Jörg, DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH

5. Pfeiffer, Diana, DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH
6. Schmieder, Uta, DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH
7. Schindler, Harry, DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH
8. Thrän, Daniela, DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH

KONTAKT

Begleitforschung BMWi-Forschungsnetzwerk Bioenergie

E-Mail: uta.schmieder@dbfz.de und begleitvorhaben@dbfz.de

Webseite: www.energetische-biomassenutzung.de

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

BECCS...	Bioenergy with Carbon Capture and Storage
CCS...	Carbon Capture and Storage
CCU...	Carbon Capture and Use
HTC...	Hydrothermal Carbonization
HEFA...	Hydrotreated Esters and Fatty Acids (auch als HVO im Deutschen)
HVO...	Hydrogenated Vegetable Oil
IPCC...	Intergovernmental Panel on Climate Change
KUP...	Kurzumtriebsplantage
MtG...	Methanol to Gasoline
RDF...	Refuse Derived Fuel
SRF...	Short Rotation Forestry
THG...	Treibhausgas