

IKEM

CAMPFIRE CF10_1.2

Grünes Ammoniak und andere grüne Kraftstoffe: Vergleich und Potenzialanalyse

März 2023

Im Auftrag von: Bundesministerium
für Bildung und Forschung (BMBF)

Institut für Klimaschutz,
Energie und Mobilität e.V.

Grünes Ammoniak und andere grüne Kraftstoffe: Vergleich und Potenzialanalyse

Ziel dieser Studie ist es, das Potenzial von Ammoniak für eine erfolgreiche Energiewende zu untersuchen, und es mit dem anderer Energieträgern zu vergleichen. Die Studie konzentriert sich auf die Grenzen, Bedürfnisse und Möglichkeiten in Bezug auf Logistik und Infrastruktur, die für dieses Ziel relevant sind. Konkret geht es dabei um die Fragen, welches Marktpotenzial Ammoniak in den verschiedenen Sektoren hat, welche bisherigen Anwendungen und Energieträger dadurch ersetzt werden können und welche Treibhausgasemissionswerte dadurch vermieden werden können.

Zitiervorschlag

Belltheus Avdic, Dàmir; Moreno Kuhnke, Mariana: *Grünes Ammoniak und andere grüne Kraftstoffe: Vergleich und Potenzialanalyse*. CAMPFIRE CF10_1.2 im Auftrag des Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 2023.

Autor:innen

Dàmir Belltheus Avdic
damir.belltheus-avdic@ikem.de

Mariana Moreno Kuhnke
mariana.moreno-kuhnke@ikem.de

Auftraggeber

Bundesministerium für Bildung und
Forschung (BMBF)



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Förderhinweis

Das dieser Studie zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) durch den Ideenwettbewerb „Wasserstoffrepublik Deutschland“ im Rahmen des Leitprojektes TransHyDE und unter dem Förderkennzeichen 03HY209K gefördert.



Disclaimer

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autor:innen. Der Inhalt stellt nicht zwingend die Auffassung des Auftrag- oder Fördergebers dar.

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	2
Motivation, Ziele und Vorgehensweise	4
Grüne Energieträger: Überblick und Eigenschaften	6
Produktion und Eigenschaften von grünen Kraftstoffen	6
Biokraftstoffe	6
E-Kraftstoffe/synthetische Kraftstoffe	7
Kohlenstoffabscheidung, -nutzung und -speicherung	8
Wasserstoff	8
Ammoniak	9
Vergleich der Effizienz	9
Vergleich der Klimaauswirkungen verschiedener grünen Energieträger	10
Brennstoffe auf Kohlenstoffbasis	10
Ethanol.....	10
Methanol.....	11
Andere.....	11
Nicht-kohlenstoffhaltige Brennstoffe	11
Wasserstoff.....	11
Ammoniak.....	11
Schlussfolgerungen	12
Gängige und neue Verfahren zur Herstellung von Ammoniak	15
Haber-Bosch-Verfahren	15
Verwendung von grünem Wasserstoff im Haber-Bosch-Verfahren	15
Elektroreduktion von Stickstoff zu Ammoniak	16
Weitere neue Verfahren zur Herstellung von Ammoniak	17
Produktion von „blauem“ Ammoniak	17
Potenzial von grünem Ammoniak zur Dekarbonisierung der Ökonomie in Deutschland und Europa	19
Energiewirtschaft	19
Stromspeicherung.....	19
Verwendung von Ammoniak als Brennstoff für Kraftwerke.....	19
Mitverbrennung in Kraftwerken für fossile Brennstoffe.....	20
Industrie.....	21
Verwendung von Ammoniak als Ausgangsstoff oder zum Erhitzen in industriellen Prozessen	21
Wasserstoff und die deutsche Stahlindustrie	21
Stahlherstellung mit Ammoniak.....	22
Verwendung von Ammoniak für die industrielle Strom-, Wärme- und Kälteerzeugung	22

Gebäude	23
Ammoniak zur Innenraumkühlung.....	23
Ammoniak zur Innenraumheizung.....	23
Verkehr	23
Ammoniak und Brennstoffzellen	24
Kraftfahrzeuge	24
Züge.....	24
Seeschiffe und Binnenschiffe	25
Ammoniak in Verbrennungsmotoren	25
Schifffahrt	25
Züge.....	26
Luftfahrzeuge.....	26
Landwirtschaft	26
Abfallwirtschaft und Sonstiges	27
Die zukünftige Ammoniakwirtschaft	29
Herausforderungen	29
Herstellung und Verwendung	29
Transport und Lagerung.....	30
Chancen	30
Ein globaler Markt	30
Aktuelle und zukünftige Produktionskosten	31
Transport und Lagerung.....	32
Empfehlungen für die Politik	32
Fazit	34
Literaturverzeichnis	36

01

Einleitung

Einleitung

Die aktuelle Klimakrise hat dazu geführt, dass sowohl auf europäischer als auch auf der Ebene der Bundesrepublik Deutschland riesige Anstrengungen unternommen werden, um den Temperaturanstieg unter 2 °C vorzugsweise unter 1,5 °C zu halten, wie im Pariser Übereinkommen festgehalten.¹ In der Verfolgung dieses Zieles hat sich die Europäische Union (EU) mit dem Europäischen Klimaschutzgesetz vorgenommen, die Treibhausgasemissionen bis 2030 um 55 % zu reduzieren.² Die Bundesrepublik Deutschland strebt mit ihrem Klimaschutzgesetz (KSG) an, die Treibhausgasemissionen bis 2030 um 65 % zu reduzieren und bis 2045 die Netto-Treibhausgasneutralität erreicht zu haben.³ Dafür sieht das KSG in ihrer Anlage zwei Treibhausgasminderungsziele für die verschiedenen Sektoren der Wirtschaft vor, das heißt für die Sektoren der Energiewirtschaft, der Industrie, der Gebäude, des Verkehrs, der Landwirtschaft und der Abfallwirtschaft und Sonstiges. Das Erreichen dieser Ziele erfordert ein Umdenken in Bezug auf die bisher genutzten Energiequellen.

Fossile Brennstoffe sind hochgiftig für lebende Organismen und führen zu Treibhausgasemissionen in die Atmosphäre, die, wenn sie unkontrolliert bleiben, in den kommenden Jahrzehnten zu einem katastrophalen Zusammenbruch von Ökosystemen und menschlichen Gesellschaften führen werden. Leider sind sie auch eine äußerst bequeme und billige Energieform, die den menschlichen Gesellschaften in den letzten Jahrzehnten großen Wohlstand und Komfort beschert hat. Die Produktions-, Konsum- und Transportmethoden, auf die wir angewiesen sind, beruhen alle weitgehend oder vollständig auf ihrer leichten Verfügbarkeit, und sie zu ersetzen ist alles andere als einfach. Es gibt (zahlreiche) vielversprechende Möglichkeiten, die Energiewende zu erreichen und die schlimmsten Szenarien zu vermeiden, aber es ist keine Zeit zu verlieren.

Es gibt vielversprechende Möglichkeiten, die Energiewende zu erreichen

Die Suche nach Möglichkeiten zur Verringerung der Kohlenstoffintensität von Schwerindustrie-, Gebäude- und Verkehrssektor, welche bekanntermaßen schwer zu dekarbonisieren sind, ist sowohl schwierig als auch – angesichts der aktuellen geopolitischen Lage und der Klimakrise – wichtiger denn je. Dementsprechend werden sogar im KSG sektorale Treibhausgasminderungsziele festgelegt. Im Verkehrssektor sollen demnach bis 2030 die Treibhausgasemissionen um 65 Millionen Tonnen Kohlenstoffdioxid-Äquivalente reduziert werden. Die häufigste Lösung, die für diesen Zweck ins Gespräch gebracht wird, ist Wasserstoff. Reiner Wasserstoff ist jedoch erfahrungsgemäß schwer zu lagern und zu transportieren. Ammoniak kommt als Lösung für dieses Problem in Betracht, da es viel stabiler ist und eine höhere Energiedichte aufweist in Situationen, die normalen Atmosphären- und Temperaturbedingungen näherkommen.

Diese Studie ist IKEMs zentrales Lieferobjekt im Rahmen des CAMPFIRE Teilarbeitspakets „CF10_1.2.1 Potenzialanalyse von Ammoniak in den unterschiedlichen Sektoren“, unter der Trägerschaft des Leitprojekts TransHyDE, das die umfassende Entwicklung von Wasserstoffverkehrstechnologien zum Ziel hat.⁴ In diesem Lieferobjekt wird die Durchführung von Untersuchungen zur Ermittlung des Marktpotenzials von Ammoniak in den verschiedenen Sektoren und des Nutzens eines großflächigen Einsatzes gefordert. Ein besonderer Schwerpunkt der Studie liegt auf dem Vergleich von Ammoniak mit anderen (grünen) Kraftstoffen, insbesondere in Bezug auf die Auswirkungen auf Klima und Umwelt, da diese Parameter für das Gesamtpotenzial von grünem Ammoniak entscheidend sind. Das Teilarbeitspaket, zu dem diese Studie gehört, ist Teil der Gruppe CF10 der CAMPFIRE-Projekte, die sich mit den Besonderheiten der Bereitstellung von grünem Ammoniak als Schiffskraftstoff für Endverbraucher befasst.

1 Vereinte Nationen, Übereinkommen von Paris.

2 Europäische Union, Verordnung (EU) 2021/1119 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Juni 2021 zur Schaffung des Rahmens für die Verwirklichung der Klimaneutralität und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 401/2009 und (EU) 2018/1999 („Europäisches Klimagesetz“).

3 Deutscher Bundestag, Gesetz zur Einführung eines Bundes-Klimaschutzgesetzes und zur Änderung weiterer Vorschriften.

4 Bundesministerium für Bildung und Forschung, „Wie das Leitprojekt TransHyDE eine Wasserstoff-Transport-Infrastruktur entwickeln will“.

02

Motivation, Ziele und Vorgehens- weise

Motivation, Ziele und Vorgehensweise

Die Energiewende in Deutschland und in anderen Ländern hat sich lange Zeit vor allem auf die Dekarbonisierung der Stromversorgung konzentriert. Das ist kein einfaches Unterfangen – so stieg die Stromerzeugung aus konventionellen Energien in Deutschland 2021 gegenüber 2020 um 11,7 %, während die Einspeisung aus erneuerbaren Energien um 7,6 % sank. Im Jahr 2021 stammten noch 57,6 % des eingespeisten Stroms aus konventionellen Energieträgern, während im Jahr 2020 dieser Anteil bei 52,9 % lag. Gleichzeitig sank der Anteil der erneuerbaren Energien von 47,1 % im Jahr 2020 auf 42,4 % im Jahr 2021.⁵

Der Anteil der erneuerbaren Energien in der Stromversorgung sank von 47,1 % in 2020 auf 42,4 % in 2021

Und dies gilt nur für die Stromversorgung – Sektoren wie die Schwerindustrie, die Wärmeversorgung in Gebäuden und vor allem der Verkehrssektor schneiden deutlich schlechter ab. Im Jahr 2021 wurden in Deutschland 16,5 % des Wärme- und Kühlbedarfs aus erneuerbaren Energiequellen gedeckt (davon stammte 86 % aus Biomasse, die schon an sich nur unter bestimmten Umständen als nachhaltig angesehen werden kann). Der vergleichbare Prozentsatz für den Schienen- und Straßenverkehr betrug 6,8 %, wobei es sich auch hier fast ausschließlich um Biokraftstoffe handelte. Insgesamt wurden im Jahr 2021 nur 19,7 % des deutschen Endenergieverbrauchs durch erneuerbare Energien gedeckt (im Jahr 2020 waren es 19,3 %).⁶

Insgesamt wurden im Jahr 2021 nur 19,7 % des deutschen Endenergieverbrauchs durch erneuerbare Energien gedeckt

Man kann also mit Gewissheit sagen, dass die Energiewende in Deutschland nicht zügig genug verläuft. Die Bundesregierung scheint den Ernst der Lage zumindest verspätet erkannt zu haben.⁷ Dazu zeigt die aktuelle geopolitische Lage, dass es strategisch unsinnig ist, von Energieimporten aus Diktaturen und instabilen Regimen abhängig zu sein.⁸ Dennoch wird für die Energiewende jede Hilfe gebraucht, die bekommen werden kann.

Um die Klimaneutralität auch in den Sektoren zu erreichen, deren Kohlenstoffintensität schwer zu reduzieren ist, bedarf es eines physischen Energieträgers, der als Kraftstoff und zur

Energiespeicherung verwendet werden kann. Zurzeit wird Wasserstoff eine Schlüsselrolle in der Verkehrswende zugeteilt, da seine Energiedichte sehr hoch ist – allerdings ist die Anwendung aufgrund seiner volumetrischen Energiedichte und nach dem derzeitigen Stand der Technik viel zu umständlich für einen breiten Einsatz. Dagegen weist Ammoniak weniger dieser Probleme auf, mit denen reiner Wasserstoff zu kämpfen hat, und stellt in vielerlei Hinsicht eine gute Option für einen kohlenstofffreien Kraftstoff der Zukunft dar.⁹

Ammoniak stellt eine gute Option für einen kohlenstofffreien Kraftstoff der Zukunft dar

Ziel dieser Studie, als Ergebnis der Arbeit des IKEMs im CAMPFIRE-Teilarbeitspaket „CF10_1.2.1 Potenzialanalyse von Ammoniak in den unterschiedlichen Sektoren“, ist es, die Entwicklung und den Einsatz von grünem Ammoniak zu fördern, indem das praktische Marktpotenzial von Ammoniak in den wirtschaftlichen Sektoren (nach dem Klimaschutzgesetz) in Deutschland untersucht wird.

Die Studie gliedert sich in vier Abschnitte. Im ersten wird einen Einblick in die verschiedenen grünen Energieträger verschafft, unter besonderer Berücksichtigung der Klimaauswirkungen von jedem dieser Energieträger. Im zweiten Abschnitt werden die kohlenstoffintensiven traditionellen und nachhaltigen neuen Methoden der Ammoniakproduktion erläutert. Die aktuellen und die künftigen potenziellen Anwendungen von Ammoniak, die dazu führen werden, dass Ammoniak eine Schlüsselrolle bei der Dekarbonisierung der deutschen und europäischen Wirtschaft hat, werden im dritten Abschnitt dargestellt. Zum Schluss werden im vierten Abschnitt die Herausforderungen und die Chancen einer künftigen Ammoniakwirtschaft dargestellt und es werden politische Empfehlungen gemacht.

Die Vorgehensweise bei der Erstellung dieser Studie, ist das Desk-Research und die Literaturanalyse. In diesem Sinne wurden im Internet offen zugängliche Studien zum Thema alternativen Kraftstoffen und Dekarbonisierung der Schifffahrt zwischen Oktober 2021 und Februar 2023 untersucht, die von verschiedenen Institutionen, Organisationen und Unternehmen erstellt wurden. In einem ersten Schritt wurde die Literatur mittels einer umfassenden Internetsuche anhand von Schlüsselwörtern gefunden. In einem zweiten Schritt wurde die vorhandene Literatur verwendet (zum Beispiel über die Bibliografie), um weitere Literatur zum selben Thema zu finden.

5 Statistisches Bundesamt, „Stromerzeugung 2021“.

6 Umweltbundesamt, „Erneuerbare Energien in Zahlen“.

7 Bundesregierung, „Regierungserklärung: Aufbruch zur klimaneutralen Gesellschaft“.

8 Deutschlandfunk, „Nord Stream 2 - Wie abhängig ist Deutschland von russischem Erdgas?“

9 Umweltbundesamt, „Wasserstoff im Verkehr“.

03

Grüne Energieträger: Überblick und Eigen- schaften

Grüne Energieträger: Überblick und Eigenschaften

Es gibt keine allgemeingültigen Definitionen für grüne Energieträger und die Definitionen, die es gibt, unterscheiden sich oft in den verschiedenen Sprachen. In der Europäischen Union wird stattdessen allgemein der Begriff der alternativen Kraftstoffe verwendet, der in der Richtlinie 2014/94/EU des europäischen Parlaments und des Rates vom 22. Oktober 2014 über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe wie folgt definiert ist:¹⁰

„Alternative Kraftstoffe“ sind Kraftstoffe oder Energiequellen, die zumindest teilweise als Ersatz für Erdöl als Energieträger für den Verkehrssektor dienen und die zur Reduzierung der CO₂-Emissionen beitragen und die Umweltverträglichkeit des Verkehrssektors erhöhen können. Hierzu zählen unter anderem:

- Elektrizität,
- Wasserstoff,
- Biokraftstoffe [...]
- synthetische und paraffinhaltige Kraftstoffe
- Erdgas, einschließlich Biomethan, gasförmig (komprimiertes Erdgas (CNG)) und flüssig (Flüssigerdgas (LNG)), und
- Flüssiggas (LPG).

Für die Zwecke dieser Studie werden grüne Energieträger als nichtfossile, physikalische, transportierbare Substanzen, einschließlich kohlenstoffbasierter Kraftstoffe, die auf eine nicht kohlenstoffemittierende Weise hergestellt werden, definiert. Dies umfasst im Wesentlichen alle Arten von Biokraftstoffen, die auf der Grundlage von nichtfossilen Rohstoffen (Biomasse, Wasser und Kohlendioxid) und von synthetischen Kraftstoffen, die durch Strom oder Wärme aus erneuerbaren Energiequellen hergestellt werden. Demnach sind im Grunde die Begriffe „grüne Energieträger“ und „alternative Kraftstoffe“ austauschbar. Auch die Begriffe „erneuerbarer Wasserstoff“ und „grüner Wasserstoff“ sind austauschbar. Soeben sind es die Begriffe „erneuerbares Ammoniak“ und „grünes Ammoniak“.

Es ist wichtig zu beachten, dass es sich bei vielen Substanzen sowohl um Biokraftstoffe als auch um synthetische Kraftstoffe handeln kann, je nachdem, wie sie hergestellt werden

Produktion und Eigenschaften von grünen Kraftstoffen

Obwohl der Schwerpunkt dieser Studie auf Ammoniak liegt, werden zu Vergleichszwecken – aus den oben dargelegten Gründen – synthetische Kraftstoffe einschließlich Wasserstoff und Biokraftstoffe der zweiten Generation untersucht. Diese werden in dieser Studie als „grün“ oder „klimafreundlich“ bezeichnet. Es ist wichtig zu beachten, dass es sich bei vielen Substanzen sowohl um Biokraftstoffe als auch um synthetische Kraftstoffe handeln kann, je nachdem, wie sie hergestellt werden. So werden zum Beispiel Biomethanol und E-Methanol in unterschiedlichen Verfahren produziert, was sich auf ihre jeweilige Bilanz für die Umwelt und das Klima auswirkt – die resultierenden Substanzen sind jedoch chemisch sehr ähnlich oder sogar identisch.

Biokraftstoffe

Ein Biokraftstoff wird im Allgemeinen definiert als eine chemische Substanz, dessen gespeicherte Energie sich durch Verbrennung in nutzbare Energie umwandeln lässt und dessen Energiegehalt aus einem Prozess der biologischen Kohlenstoffbindung stammt. Diese Kohlenstoffassimilation ist ein Prozess, bei dem anorganischer Kohlenstoff (in der Regel Kohlendioxid) in relativ kurzer Zeit in organische Verbindungen umgewandelt wird – im Gegensatz zu fossilen Brennstoffen, deren Bildung Millionen von Jahren dauert, und zu syntheti-

schen Brennstoffen, die nicht durch einen biologischen Prozess erzeugt werden.

Biokraftstoffe der ersten Generation konkurrieren oft mit der Nahrungsmittelproduktion

Biokraftstoffe der ersten Generation, die aus Zuckerstärke (zum Beispiel Zuckerrohr und Mais) und Speiseöl (zum Beispiel Raps- und Sojaöl) hergestellt werden, werden häufig als Konkurrenz zur Flächennutzung für den Nahrungsmittelanbau angesehen. Mais, Weizen und Zuckerrüben können auch einen hohen landwirtschaftlichen Input in Form von Düngemitteln erfordern, wodurch die erzielbare Treibhausgasreduktion reduziert wird.

Biokraftstoffe der zweiten Generation sind ein Versuch, das Dilemma zwischen Nahrung und Kraftstoff zu umgehen. Sie werden auf der Grundlage von Biomasse hergestellt, die aus den nicht zur Ernährung bestimmten Teilen von Nutzpflanzen besteht. Darunter fallen Stängel, Blätter und Spelzen, die nach der Gewinnung der Nahrungspflanzen zurückbleiben, sowie solche

Pflanzen, die normalerweise nicht zur Ernährung verwendet werden, etwa Mais als Ganzpflanze, Getreide, das nur wenige Körner trägt oder auch Gras. Dazu gehören auch lignozellulosehaltige Biomasse oder holzige Pflanzen, landwirtschaftliche Rückstände oder Abfälle sowie eigens zu diesem Zweck auf Grenzertragsflächen angebaute Energiepflanzen, die nicht für die Nahrungsmittelproduktion geeignet sind. In Betracht kommen darüber hinaus Industrieabfälle, zum Beispiel Holzspäne, Schalen oder Fruchtfleisch aus der Obstpressung.

Eine Herausforderung besteht darin, dies in großem Maßstab zu tun, da die meisten dieser Rückstände bereits als Tierfutter verwendet oder für die Bodenfruchtbarkeit benötigt werden und andere teuer in der Ernte sind. Ein weiteres Problem bei Verfahren zur Herstellung von Biokraftstoffen der zweiten Generation ist die Gewinnung von nützlichen Rohstoffen aus holziger oder faseriger Biomasse, die überwiegend aus pflanzlichen Zellwänden besteht, und daher zäh und schwer zu verarbeiten ist.

Zur Ausweitung der Biokraftstoffproduktion aus nicht zur Ernährung bestimmten Pflanzen müssten neue Technologien auf den Markt gebracht werden

Zur Ausweitung der Biokraftstoffproduktion aus nicht zur Ernährung bestimmten Pflanzen müssten neue Technologien auf den Markt gebracht werden. So können beispielsweise Zellulose-Ethanol und biomassebasierte Fischer-Tropsch-Technologien (Bio-FT) Rohstoffe nutzen, die nicht für die Ernährung bestimmt sind, um kohlenstoffarme Biokraftstoffe für den Verkehrssektor zu erzeugen. Die durchschnittlichen Produktionskosten solcher Biokraftstoffe sind zwar immer noch doppelt bis dreifach so hoch wie die der entsprechenden fossilen Kraftstoffe, die Internationale Energieagentur (IEA) schätzt jedoch, dass sie in den nächsten zehn Jahren um bis zu 27 % sinken könnten. Die verbleibende Kostenlücke könnte durch politische Maßnahmen zur Ankurbelung von Produktion und Nachfrage geschlossen werden.¹¹

Die weltweiten Investitionen in flüssige Biokraftstoffe haben sich im Jahr 2021 mehr als verdoppelt und lagen auf über 8 Milliarden USD. Zwei Drittel dieses Wachstums entfielen auf biobasierten Diesel, angetrieben durch steigende Investitionen in erneuerbaren HVO-Diesel (hydriertes Pflanzenöl), aber auch die Investitionen in Ethanol haben sich fast verdoppelt. Außerdem ist eine Kapazitätserweiterung bei Projekten für erneuerbaren HVO-Diesel und Biojetkerosin geplant, die in naher Zukunft in Betrieb genommen werden dürften. Im Gegensatz zu

früheren Trends werden die höheren Preise für fossiles Öl, die durch die russische Aggression gegen die Ukraine verursacht wurden, in einigen Märkten nicht unbedingt zu mehr Investitionen in Biokraftstoffe führen, da die Preise für Biokraftstoff-Rohstoffe in ähnlicher Weise gestiegen sind. Allerdings dürften die Investitionsausgaben für Biokraftstoffe im Jahr 2022 insgesamt ansteigen, was auf ein erhebliches Wachstum bei Projekten für erneuerbaren HVO-Diesel und Biojetkerosin zurückzuführen ist.¹²

Eine Reihe von kohlenstoffreichen Kraftstoffen wie Flüssiggas, Diesel und verschiedenen anderen Kraftstoffen der zweiten Generation können durch die thermochemische Verarbeitung von Rohstoffen wie Kohle oder Biomasse hergestellt werden. Neben HVO haben bereits viele andere Biokraftstoffproduktionsverfahren kommerziellen Status erreicht, darunter insbesondere FAME-Biodiesel (Fettsäuremethylester) und die Ethanolproduktion aus Mais und Zuckerrohr.¹³

E-Kraftstoffe/synthetische Kraftstoffe

E-Kraftstoffe wie E-Methan, E-Kerosin oder E-Methanol sind gasförmige oder flüssige Kraftstoffe, die ausschließlich mit Strom als Energiequelle und mit Wasserstoff und Stickstoff oder Kohlenstoff aus Luft und Wasser hergestellt werden. Damit unterscheiden sie sich von Biokraftstoffen, die hauptsächlich aus Biomasse hergestellt werden. Wie bereits erwähnt, können viele Kraftstoffe wie Methanol oder Diesel mit beiden Methoden hergestellt werden, und ihre chemischen Eigenschaften sind einander ähnlich oder sogar identisch. Reiner Wasserstoff und Ammoniak werden im Allgemeinen synthetisch und nicht durch biologische Prozesse hergestellt; das heißt, sie sind fast immer ein E-Kraftstoff. Im Gegensatz zu anderen E-Kraftstoffen enthalten sie jedoch keinen Kohlenstoff. Diese beiden werden in gesonderten Unterabschnitten dargelegt.

E-Kraftstoffe werden ausschließlich mit Strom und mit Wasserstoff, Stickstoff oder Kohlenstoff hergestellt

E-Kraftstoffe auf Kohlenstoffbasis werden durch die Umwandlung von Wasserstoff und einer Kohlenstoffquelle in langkettige Kohlenwasserstoffe hergestellt, die anschließend zu brauchbaren Kraftstoffen veredelt werden. Das Fischer-Tropsch-Verfahren, bei dem Kohlenmonoxid (CO) als Kohlenstoffquelle verwendet wird, ist eine Schlüsselkomponente der meisten Verfahren zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe, die einen direkten Ersatz für die im Fernverkehr verwendeten fossilen Kraftstoffe (Kerosin, Diesel und Schweröl) darstellen. Um kohlenstoffneutral zu sein, muss dieser Kohlenstoff aus biogenem Kohlendioxid (im Falle von Biokraftstoffen aus der

11 IEA, „Biofuels – Analysis“.

12 IEA.

13 IEA.

Biokraftstoffproduktion oder aus Biomassekraftwerken) oder aus atmosphärischem Kohlendioxid (im Falle von synthetischen Kraftstoffen durch direkte Luftabscheidung) gewonnen werden. Die verschiedenen Kohlendioxidquellen (Biomasse, industrielle Prozesse, Luft) wirken sich auf die Lebenszyklusanalyse, den Umweltutzen und die Produktionskosten des synthetischen Kraftstoffs aus.¹⁴

Je nach der Form des benötigten E-Kraftstoffs wird entweder ein Power-to-Gas- oder ein Power-to-Liquid-Verfahren eingesetzt. Beide Produktionsverfahren umfassen zwei oder drei Phasen, wobei zunächst der Wasserstoff (H₂), der durch Wasserelektrolyse aus erneuerbarem Strom erzeugt wird, mit einem anderen Molekül verbunden wird – Kohlendioxid (CO₂) für E-Rohöl und synthetisches Methan oder Methanol, oder Stickstoff (N₂) für synthetisches Ammoniak. Synthetisches Rohöl muss (wie fossiles Öl) raffiniert werden, um synthetisches Kerosin oder Diesel herzustellen.¹⁵

Für die Herstellung synthetischer Brennstoffe werden dementsprechend erhebliche Mengen an Strom benötigt. Insgesamt werden für die Herstellung eines Liters synthetischen Kerosins aus elektrolytischem Wasserstoff in Verbindung mit der Abtrennung von Kohlendioxid durch direkte Abscheidung etwa 25 kWh Energie benötigt. Mehr als 80 % der hier verbrauchten Energie ist Strom, der für die Herstellung von Wasserstoff verwendet wird, und etwa 15 % der Energie sind Wärme und Strom für die direkte Abscheidung von Kohlendioxid. Der Rest wird in der Fischer-Tropsch-Synthesestufe verwendet. Mit der derzeitigen Technologie gehen nur etwa 40 % der eingesetzten Energie in das flüssige Endprodukt ein, obwohl eine Prozessoptimierung den Gesamtwirkungsgrad auf über 45 % steigern könnte.¹⁶

Die Herstellung synthetischer Brennstoffe fordert erhebliche Mengen an Strom

Kohlenstoffabscheidung, -nutzung und -speicherung

Kohlenstoffabscheidung, -nutzung und -speicherung (in Englisch Carbon Capture, Use and Storage, CCUS) in großem Maßstab ist bei Biokraftstoffen und E-Kraftstoffen eine realistische Möglichkeit als bei fossilen Kraftstoffen. So gab es im Jahr 2021 weltweit mehrere Ethanolanlagen, die Kohlenstoff mit einer Gesamtkapazität von 2,21 Millionen Tonnen Kohlendioxid pro Jahr abgeschieden haben. Ungefähr die Hälfte dieser Anlagen setzen auf Kohlenstoffspeicherung und die andere Hälfte

auf Kohlenstoffnutzung, wobei 1,65 Millionen Tonnen Kohlendioxid pro Jahr aus Projekten stammen, die für die optimierte Ölgewinnung oder -speicherung bestimmt sind. Etwa 40 Ethanolanlagen sollen bis 2030 mit der Kohlenstoffabscheidung beginnen, was einer Gesamtkapazität von über einer Million Tonnen biogenen Kohlenstoffs entspricht. Allerdings müsste bis 2030 weit mehr als die 50-fache Menge des heute bei der Herstellung von Biokraftstoffen abgeschiedenen Kohlenstoffs aufgefangen werden, um das Netto-Null-Szenario der Internationalen Energieagentur (IEA) zu erreichen, sodass bis dahin eine beträchtliche Lücke klafft, die nicht auf plausible Weise geschlossen werden kann.¹⁷

Wasserstoff

Wasserstoff wird normalerweise durch Elektrolyse aus Wasser gewonnen, ein Prozess, der viel Energie erfordert. Wenn die zur Herstellung verwendete Energie aus erneuerbaren Quellen stammt, wird der Wasserstoff als grün bezeichnet. Wasserstoff kann direkt als Kraftstoff oder Energiespeicher verwendet werden. Alternativ kann er unter Zusatz von Stickstoff zu Ammoniak oder unter Zusatz von Kohlenstoff zu anderen Brennstoffen weiterverarbeitet werden, wie in den Abschnitten oben schon erläutert.

Wasserstoff als Kraftstoff wird häufig als Schlüssel zur Klimaneutralität für die Sektoren, die schwer zu dekarbonisieren sind vorgeschlagen, denn er hat viele Vorteile. Theoretisch kann er ganz ohne Treibhausgase produziert und verbraucht werden. Außerdem, enthält ein Kilogramm Wasserstoff so viel Energie wie 2,8 Kilogramm Benzin oder 2,1 Kilogramm Erdgas. Mit anderen Worten: Wenn es um das Gewicht geht, hat Wasserstoff die höchste Energiedichte unter den gängigen Kraftstoffen.¹⁸

Wasserstoff als Kraftstoff wird häufig als Schlüssel zur Klimaneutralität für die Sektoren, die schwer zu dekarbonisieren sind, vorgeschlagen

Aber er hat auch Nachteile. Er ist schwierig zu lagern und entzündet sich schnell. Dazu kommt, dass weil er so leicht ist, die volumenbezogene Energiedichte von flüssigem Wasserstoff nur etwa einem Drittel derjenigen von Erdgas und einem Viertel derjenigen von Benzin beträgt. Bei normalem Atmosphärendruck ist er gasförmig, es sei denn, er wird auf -253 °C abgekühlt, nur 20 Grad über dem absoluten Nullpunkt. Eine andere

14 IEA, „Energy Technology Perspectives 2020“.

15 ENGIE, „E-Fuels, What Are They?“

16 IEA, „Energy Technology Perspectives 2020“.

17 IEA, „Biofuels – Analysis“.

18 TÜV NORD, „Wasserstoff: Eigenschaften, Sicherheit, Gefahren“.

Möglichkeit besteht darin, das Gas stark zu komprimieren, bis es flüssig ist. Häufig wird eine Kombination aus Kühlung und Komprimierung verwendet.¹⁹

Es liegt auf der Hand, dass es unerschwinglich ist, diese Bedingungen in einem Kraftstofftank aufrechtzuerhalten – vor allem, wenn man bedenkt, wie groß die Tanks sein müssen, da Wasserstoff so leicht ist. Außerdem kann der Transport der Tanks aufgrund des hohen Drucks und der hohen Entflammbarkeit des Inhalts gefährlich sein.

Ammoniak

Ammoniak löst viele der Probleme, die mit reinem Wasserstoff als Kraftstoff verbunden sind. Ammoniak ist ein Wasserstoffträger – ein Molekül reinen Wasserstoffgases besteht aus zwei Wasserstoffatomen, während ein Molekül Ammoniak drei enthält – und kann leicht in reinen Wasserstoff und Stickstoffgas gespalten werden. Außerdem kann es aus Wasserstoff (der wiederum aus Wasser gewonnen wird) und reichlich atmosphärischem Stickstoff (78 % der Luft, die wir atmen, besteht aus reinem Stickstoffgas) mit Hilfe von erneuerbaren Energien in einem umweltfreundlichen Verfahren hergestellt werden, bei dem keine Treibhausgase entstehen. Das so hergestellte Ammoniak wird dann als grünes Ammoniak bezeichnet. Ammoniak ist bei normalem Atmosphärendruck (ein Bar) bei -33,54 °C flüssig, bei einem Druck von sieben Bar bei 20 °C. Auch seine Energiedichte ist höher als die von Wasserstoff: Ein Liter flüssiges Ammoniak enthält 15,6 Megajoule – 70 % mehr als flüssiger Wasserstoff oder fast dreimal so viel wie komprimiertes Wasserstoffgas. Wie Wasserstoff kann Ammoniak direkt als Kraftstoff oder als Energiespeicher verwendet werden oder für Anwendungen, bei denen dies günstiger ist, wieder in Wasserstoff gespalten werden. Weiteres zu den Herstellungsverfahren und zu den Anwendungen von Ammoniak werden in einem gesonderten Abschnitt dargestellt.

Ammoniak löst viele der Probleme, die mit reinem Wasserstoff als Kraftstoff verbunden sind

Vergleich der Effizienz

Die Herstellung von Wasserstoff und Ammoniak aus erneuerbarem Strom und seine Rückumwandlung in nutzbare Energie führt zu einem großen Nettoenergieverlust. Die nachstehende Tabelle zeigt, als Beispiel, die Best-Case-Ergebnisse in einer Reihe von Szenarien sowie einen Vergleich mit Benzin als Kraftstoff für Straßenfahrzeuge, Methanol und flüssigem Wasserstoff.²⁰

Szenario	Verlust
Ammoniak zu Wasserstoff gecrackt und in einer Protonenaustauschmembran-Brennstoffzelle verwendet	81-89 %
Ammoniak direkt in stationären Brennstoffzellen mit Kraft-Wärme-Kopplung verwendet	61-75 %
Ammoniak, direkt in einer Gasturbine mit kombiniertem Zyklus verwendet	69-76 %
Ammoniak, direkt in einem Verbrennungsmotor verwendet	79-85 %
Mittelwert der Methanolvektoren	91 %
Mittelwert der Wasserstoffvektoren	91 %

(Zum Vergleich: Bei der Verwendung von Benzin in einem Verbrennungsmotor werden im Durchschnitt mehr als 80 % seines Energiegehalts bei seiner Gewinnung (Produktion) und seinem Transport bis zum Auto benötigt, so dass der Nettowirkungsgrad im Durchschnitt weniger als 20 % beträgt).²¹ Die Ergebnisse zeigen, dass, wo immer möglich, der Strom aus erneuerbaren Energiequellen direkt verwendet werden sollte.

Wo immer möglich sollte der Strom aus erneuerbaren Energiequellen direkt verwendet werden

19 TÜV SÜD, „Wasserstoff: Speicherung“.

20 Giddey u. a., „Ammonia as a Renewable Energy Transportation Media“.

21 Dash u. a., „Hydrogen Fuel for Future Mobility“.

Ammoniak hat einige Nachteile, wie zum Beispiel die geringe Stabilität der Verbrennung und die niedrige Verbrennungsgeschwindigkeit (die hohen Emissionen von Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO₂) (zusammenfassend als NO_x bezeichnet) sind zwar keine Frage der Effizienz, aber stellen auch ein Problem dar). Es gibt jedoch Strategien, um diese Probleme zu lösen. Dazu gehört eine sauerstoffangereicherte oder plasmagestützte Verbrennung oder eine Verbrennung mit

anderen reaktiven Brennstoffen wie Methan und reinem Wasserstoff (dies kann die laminare Verbrennungsgeschwindigkeit verbessern und die Emissionen senken). Einer Analyse zufolge ist der effizienteste Verbrennungsansatz die so genannte fettmager gestufte Verbrennung – dies erfordert jedoch eine sorgfältige Feinabstimmung der primären Verbrennungszone, um niedrige Emissionen von NO_x und unverbranntem Ammoniak zu erreichen.²²

Vergleich der Klimaauswirkungen verschiedener grünen Energieträger

In diesem Abschnitt werden eine Reihe von Kraftstoffen unter der Annahme verglichen, dass sie auf völlig nachhaltige und klimafreundliche Weise hergestellt werden, das heißt mit grünem Strom, aus Biomasserückständen (in Europa verfügbare forst- und landwirtschaftliche Rückstände) und nicht aus speziell für diesen Zweck angebaute Biomasse oder, im Fall von kohlenstoffhaltigen Kraftstoffen, mit anschließender Kohlenstoffabscheidung, -nutzung und -speicherung (CCUS). Dies entspricht den Anforderungen der oben genannten EU-Definition alternativer Kraftstoffe sowie den Erfordernissen einer kohlenstofffreien Zukunft.

Um die Klimaauswirkungen verschiedener Kraftstoffe zu vergleichen, werden sie in dieser Studie nach ihrer chemischen Zusammensetzung (kohlenstoffhaltige gegenüber kohlenstofffreien Kraftstoffen) und nicht nach ihrer Herstellung (Biokraftstoffe gegenüber synthetischen Kraftstoffen) unterteilt.

Brennstoffe auf Kohlenstoffbasis

Diese Kraftstoffe sind ihren fossilen Versionen chemisch ähnlich und haben daher vergleichbare physikalische Eigenschaften, Verbrennungsbedingungen und Energiedichte wie ihre erdölbasierten Versionen. Es bestehen jedoch einige Unterschiede, die unter anderem Anpassungen an bestehende Verbrennungsmotoren erforderlich machen können. Das bedeutet, dass auch sie bei der Verbrennung viele Schadstoffe und Kohlendioxid freisetzen.²³ Wenn diese Kraftstoffe jedoch auf nachhaltige Weise aus Biomasserückständen hergestellt werden, recyceln sie grundsätzlich den Kohlenstoff, der ursprünglich in den Rohstoffen enthalten war, aus denen sie hergestellt werden. Im Gegensatz wird bei der Nutzung von fossilen Kraftstoffen auf Erdölbasis, bei denen der Kohlenstoff der Erde entnommen wird – wo er sonst verblieben wäre –, zusätzlicher Kohlenstoff in die Atmosphäre freigesetzt.

Eine Kategorie von kohlenstoffbasierten Kraftstoffen sind Alkohole. Während die vier einfachsten (einwertigen) Alkohole – Methanol (CH₃OH), Ethanol (C₂H₅OH), Propanol (C₃H₇OH) und

Butanol (C₄H₉OH) – als Kraftstoffe verwendet werden, werden nur Ethanol und in geringerem Maße Methanol wirklich systemrelevant eingesetzt. Alkohole enthalten ähnlich wie Benzin (typischerweise 4-12 Kohlenstoffatome) und Diesel (ca. 12-20 Kohlenstoffatome) Kohlenstoff, und ihre Verwendung, insbesondere in Verbrennungsmotoren, führt zur Entstehung von Kohlendioxid.²⁴ Die Menge des erzeugten Kohlendioxids steht in der Regel im Verhältnis zur erzeugten Energiemenge und ist vergleichbar mit Benzin und Diesel. Mit anderen Worten: Alkohole sind nur dann klimaneutral, wenn bei ihrer Herstellung Kohlendioxid aus der Umwelt entnommen wird. In der Praxis wird bei ihrer Herstellung jedoch in der Regel eine Netto-Kohlendioxid-Menge freigesetzt – obwohl die Abscheidung von Kohlendioxid, das bei der Herstellung von Alkoholen entsteht, im Vergleich zu anderen Bioenergie- und Kohlenstoffabscheidungsoptionen relativ günstig ist.²⁵

Die Verbrennung grüner Brennstoffe auf Kohlenstoffbasis führt zur Entstehung von Kohlendioxid

Diese Studie befasst sich mit den kohlenstoffbasierten Kraftstoffen, die gemeinhin als geeignete Kandidaten für einen großtechnischen Einsatz gelten – Methanol und Ethanol – und geht kurz auf andere kohlenstoffbasierte Kraftstoffe wie Biodiesel ein.

Ethanol

Ethanol-Kraftstoff, der aus Biomasse hergestellt wird, wird schon seit einiger Zeit als Ersatz für Benzin in Autos in Betracht gezogen. Er wird vor allem in den Vereinigten Staaten und Brasilien in großen Mengen hergestellt und üblicherweise mit Benzin gemischt. Er hat eine recht hohe Energiedichte – 1,5 Liter Ethanol entsprechen einem Liter Diesel.²⁶ Das Hauptproblem bei der Herstellung von Ethanol sind seine Umweltauswirkungen

22 Kang u. a., „A Review on Ammonia Blends Combustion for Industrial Applications“.

23 O'Malley und Searle, „Air Quality Impacts of Biodiesel in the United States“; Paolini u. a., „Environmental impact of biogas“.

24 AMF TCP, „Diesel and gasoline: Engine technology“.

25 IEA, „Biofuels – Analysis“.

26 Alternative Fuels Data Center, „Alternative Fuels Data Center“.

gen, da für den Anbau der Pflanzen, aus denen der Kraftstoff hergestellt wird, riesige Landflächen in Anspruch genommen werden. Zwar ist Ethanol theoretisch kohlenstoffneutral, da das bei seiner Verbrennung freigesetzte Kohlendioxid von den Pflanzen aus der Luft aufgenommen und nicht wie bei fossilen Brennstoffen aus dem Boden gewonnen wurde, doch sind die damit verbundenen landwirtschaftlichen Praktiken unter den derzeitigen Bedingungen so kohlenstoffintensiv, dass seine Verwendung insgesamt eine vergleichbare oder sogar schlechtere Klimabilanz als Benzin aufweist – im Falle des in den Vereinigten Staaten hergestellten Ethanols auf Maisbasis einigen Schätzungen zufolge etwa 24 % schlechter.²⁷

Die Verwendung von Ethanol weist sogar eine schlechtere Klimabilanz als Benzin auf

Methanol

Methanol ist ein vielseitiger Kraftstoff: Er kann pur, in Mischung mit anderen Kraftstoffen oder zur Herstellung von Kraftstoffkomponenten verwendet werden. Für herkömmliche Motoren kann es in eine Benzinkomponente namens Methyl-Tertiär-Butylether (MTBE) oder eine Dieseldkomponente namens Fettsäuremethylester (Fatty Acid Methyl Ester, FAME) umgewandelt werden. Es wurden Technologien für die Verwendung von Methanol in Diesel- und Zweistoffmotoren entwickelt, und Methanol wird bereits in einigen Schiffen als Schiffskraftstoff verwendet. Bei der Verbrennung von Methanol entstehen im Allgemeinen nur geringe Emissionen von Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffen, Stickoxiden und Partikeln.²⁸

Theoretisch könnte emissionsarmes Methanol eine größere Rolle bei der Dekarbonisierung bestimmter Sektoren spielen, für die es derzeit nur begrenzte Möglichkeiten gibt – insbesondere als Ausgangsstoff in der chemischen Industrie oder als Kraftstoff im Straßen- oder Schiffsverkehr. Allerdings ist Methanol nach wie vor viel teurer als andere Optionen, was wohl in absehbarer Zukunft so bleiben wird.²⁹

Zurzeit ist Methanol teurer als andere Optionen

Andere

Bio-/synthetische Diesel und Benzin sind von Vorteil, da sie mit herkömmlichem Benzin, Autos und der bestehenden Infrastruktur voll kompatibel sind. Sie werden jedoch im Allgemeinen nicht in großem Maßstab hergestellt. Es ist nicht klar, ob eine solche Produktion angesichts des gegenwärtigen technologischen Reifegrads sinnvoll wäre. E-Kerosin hat die Besonderheit, dass es der einzige potenziell erneuerbare Kraftstoff ist, der mittel- oder langfristig als Treibstoff für Flugzeuge in Frage kommt – eine potenziell revolutionäre Anwendung.³⁰

Nicht-kohlenstoffhaltige Brennstoffe

Wasserstoff und Ammoniak enthalten keinen Kohlenstoff, so dass ihre Verbrennung nicht zur Emission von Kohlendioxid führt.

Wasserstoff

Bei der Verbrennung von Wasserstoff entsteht kein Kohlenstoff, sondern nur Wasser und überschaubare Mengen der indirekten Treibhausgase Stickoxide. Wird Wasserstoff nicht verbrannt, sondern zum Betrieb einer Brennstoffzelle verwendet, werden keinerlei Treibhausgase freigesetzt.³¹

Ammoniak

Ammoniak kann als Wasserstoffträger verwendet werden, da ein Ammoniakmolekül aus mehreren Wasserstoffatomen besteht, die relativ einfach wieder in reinen Wasserstoff gespalten werden können. Dies führt jedoch zu Energieverlusten und sollte daher nach Möglichkeit vermieden werden. Ammoniak kann aber auch direkt als Brennstoff verbrannt oder in Ammoniak-Brennstoffzellen verwendet werden. Theoretisch sollten bei der Verbrennung von Ammoniak nur Stickstoff und Wasser freigesetzt werden.

Ammoniak hat jedoch eine niedrige Flammgeschwindigkeit und benötigt einen anderen, schneller brennenden Brennstoff wie Erdgas oder Wasserstoff, um es zu zünden. Bei einer unvollständigen Verbrennung entstehen unverbranntes Ammoniak, Stickoxide und Distickstoffoxid, ein Treibhausgas, das 280-mal stärker wirkt als Kohlendioxid. Experimente haben gezeigt, dass eine Änderung der Reinheit des Ammoniakbrennstoffs die Emissionen von Stickoxiden und unverbranntem Ammoniak verringern, die von Distickstoffoxid jedoch erhöhen kann, oder umgekehrt. Andere Techniken könnten es in Zukunft ermöglichen, Distickstoffoxid zu kontrollieren oder zu eliminieren, aber es gibt noch keine offensichtliche Lösung für dieses Problem.³²

27 Douglas, „U.S. Corn-Based Ethanol Worse for the Climate than Gasoline, Study Finds“.

28 AMF TCP, „Methanol“.

29 IRENA und AEA, *Innovation Outlook: Renewable Ammonia*.

30 Breyer u. a., „E-Kerosene for Commercial Aviation“.

31 Bundesministerium für Bildung und Forschung, „Wissenswertes zu grünem Wasserstoff“.

32 Mashruk u. a., „Evolution of N₂O Production at Lean Combustion Condition in NH₃/H₂/Air Premixed Swirling Flames“.

Bei einer unvollständigen Verbrennung entstehen unverbranntes Ammoniak, Stickoxide und Distickstoffoxid

Schlussfolgerungen

Der Vergleich der Klimaauswirkungen verschiedener Brennstoffe ist aus einer Reihe von Gründen kompliziert. So werden sie mit unterschiedlichen, oft experimentellen, Verfahren hergestellt: Schnellpyrolyse, hydrothermale Verflüssigung, Fischer-Tropsch-Synthese oder das Haber-Bosch-Verfahren erfordern unterschiedliche Ausgangsstoffe und Energiemengen. Die Verfügbarkeit jedes dieser Kraftstoffe – ob nachhaltig und kohlenstofffrei produziert oder nicht – ist in den verschiedenen Regionen Europas sehr unterschiedlich. Darüber hinaus variiert die Kohlenstoffintensität der Volkswirtschaften der verschiedenen europäischen Länder zwischen 19 und 976 g Kohlendioxid-Äquivalent pro Kilowattstunde – also um den Faktor 51 –, was, wenn zur Herstellung dieser Kraftstoffe Strom aus dem Netz bezogen wird, eine wichtige Rolle spielt. Ebenso kann eine bestimmte Region oder ein bestimmtes Land mehr oder weniger Biomasserückstände für die Biokraftstoffproduktion zur Verfügung haben.³³ Dies bedeutet, dass die Herstellung und Verwendung eines alternativen Kraftstoffs je nach Standort mehr oder weniger positive Auswirkungen auf den Klimaschutz haben kann.

Außerdem können die verschiedenen Brennstoffe während des Transports oder der Nutzung (im Gegensatz zur Produktion) mehr oder weniger Treibhausgase emittieren. Diese Unsicherheit ist bei anderen Treibhausgasen als Kohlendioxid besonders groß. Bei synthetischem Erdgas (Erdgas, das nicht als fossiler Brennstoff gewonnen, sondern mit Hilfe von Elektrizität erzeugt wird, wie oben im Abschnitt „synthetische Kraftstoffe“ erläutert) wird beispielsweise der größte Teil der Klimabelastung durch Methan verursacht, das bei der Verbrennung entweicht, und dies hängt stark vom verwendeten Motor ab – bei Motoren für die Hochseeschifffahrt schwankt die Menge zwischen 0,2 und 2,5 Gramm Methan pro Kilowattstunde.³⁴

Angesichts des derzeitigen Stands der technologischen Entwicklung kann davon ausgegangen werden, dass Wasserstoff mittelfristig zu unhandlich sein wird, um in großem Maßstab als Kraftstoff eingesetzt zu werden. Ebenso dürften Biokraftstoffe mittelfristig unter der unzureichenden Verfügbarkeit von Biomasserückständen leiden (im Gegensatz zu Biomasse, die speziell für die Umwandlung in Kraftstoff angebaut wird und mit wildlebenden Ökosystemen und der Nahrungsmittelproduktion konkurriert). Schließlich können kohlenstoffhaltige bio-synthetische Kraftstoffe zwar mit großem Aufwand klimaneutral hergestellt werden, aber unter den technologischen Bedingungen, die kurz- und mittelfristig vorherrschen dürften, nicht klimaneutral verbrannt werden.

Ammoniak hat zwar Nachteile – nicht zuletzt seine relative Toxizität, die Probleme mit der Lachgasproduktion und die nicht zu vernachlässigenden Schwierigkeiten bei der Lagerung und Verteilung –, zeichnet sich aber wenn es mit erneuerbaren Energien hergestellt wird im Vergleich zu den oben genannten Kraftstoffen insgesamt als gute Lösung für Verkehrsanwendungen wie die Schifffahrt oder die Energiespeicherung aus.



Grünes Ammoniak zeichnet sich als gute Lösung für Verkehrsanwendungen oder die Energiespeicherung aus (Quelle: Pixabay)

33 Watanabe u. a., „Drop-in and Hydrogen-Based Biofuels for Maritime Transport“.

34 Watanabe u. a.

Die folgende Tabelle vergleicht eine Reihe von Energieträgern in übersichtlicher Weise.^{35,36}

Kraftstoff	Lager- temperatur	Sicherheit	Toxizität	Wirtschaftliche Nutzung	Verwendung als Energiespeicher
Benzin/Diesel	20 °C	Sicher	Niedrig	Gut etabliert	Ja
Biodiesel	20 °C	Sicher	Niedrig	Gleichwertig mit Diesel	Möglich
Methanol	20 °C	Sicher	Niedrig	Möglich	Möglich
Ethanol	20 °C	Sicher	Niedrig	Gut etabliert	Möglich
Wasserstoff	-253 °C	Lagerung schwierig	Keine	Unpraktisch	Unpraktisch
Ammoniak	-33 °C	Lagerung kompliziert	Mittlere	Möglich	Möglich

35 Alternative Fuels Data Center, „Alternative Fuels Data Center“.

36 AMF TCP, „Ammonia“.

04

Gängige und neue Verfahren zur Herstellung von Ammoniak

Gängige und neue Verfahren zur Herstellung von Ammoniak

Ammoniak spielt aktuell eine wichtige Rolle in der Landwirtschaft und hat das Potential künftig als Energieträger eine Schlüsselrolle in der Energie- und Verkehrswende zu spielen. Aufgrund dessen beschäftigen sich viele Studien mit der Produktion von Ammoniak, um einen wirtschaftlichen und umwelt- und klimaverträglichen Produktionsprozess zu identifizieren. Heutzutage wird das Haber-Bosch-Verfahren am häufigsten angewendet, um Ammoniak herzustellen. Dieses

Verfahren ist jedoch mit hohen Treibhausgasemissionen und hohem Energieverbrauch verbunden. Wenn es um nachhaltige oder klimaneutrale Ammoniakproduktion geht, ist vor allem die Wasserelektrolyse in Verbindung mit erneuerbaren Energien zur Erzeugung des Wasserstoffs maßgeblich.³⁷ In diesem Kapitel werden die verschiedenen Technologien für die Produktion von Ammoniak erläutert und dessen Nachhaltigkeit, Klimafreundlichkeit und Wirtschaftlichkeit erörtert.

Haber-Bosch-Verfahren

Das Haber-Bosch-Verfahren ist die am häufigsten angewandte Methode zur Herstellung von Ammoniak. Weltweit werden mehr als 90 % des Ammoniaks durch dieses Verfahren produziert.³⁸ Um Ammoniak zu produzieren, wird bei dem Haber-Bosch-Verfahren Stickstoff aus der Atmosphäre zusammen mit Wasserstoff in Ammoniak umgewandelt. Dieser Prozess findet bei hohen Temperaturen und unter hohem Druck statt. Außerdem werden Metallkatalysatoren verwendet, um die Aktivierungsenergie gering zu halten und somit die Reaktionsgeschwindigkeit zu erhöhen.³⁹

Dies hilft dabei, die Produktion zu beschleunigen sowie den Energieverbrauch zu senken. Die Temperatur und der Druck bestimmen, wie viel Ammoniak produziert wird. Wenn man eine Temperatur von ca. 450 Grad Celsius verwendet, liegt die Umwandlungsausbeute bei ungefähr 15 %. Da man aber die übriggebliebenen Gase wiederverwendet, liegt der Gesamtwirkungsgrad des Prozesses bei fast 100 %.⁴⁰

Die hohen Temperaturen sind notwendig, da sonst nach der Stickstoffabtrennung keine weiteren Reaktionen mit den Stickstoff- und Wasserstoffatomen stattfinden würden. Wenn jedoch zusätzlich zu der Temperatur nicht auch noch der Druck erhöht wird, ist die freie Energie des Systems bei der Bildung von Ammoniak höher als die anfängliche Energie. Um dies zu vermeiden, wird ein hoher Druck angewandt, der eine thermodynamische Situation ohne Energiesenke und mit einer geeigneten Energiedifferenz zwischen dem Anfangs- und Endzustand schafft.⁴¹

Ein Nachteil, welches das Haber-Bosch-Verfahren mit sich bringt, sind die hohen Treibhausgasemissionen dieser Technologie. Um Ammoniak mit dem Haber-Bosch-Verfahren herzustellen, muss Wasserstoff in das System eingespeist werden.

Dieser Wasserstoff wird heutzutage meistens aus konventionellem Methan gewonnen, welches in Erdgas enthalten ist. Die Methanmoleküle werden bei hohen Temperaturen in Wasserstoff und Kohlendioxid aufgespalten, wodurch Treibhausgase freigesetzt werden.⁴²

Ein Nachteil des Haber-Bosch-Verfahrens sind die hohen Treibhausgasemissionen

Aus diesem Grund macht aktuell die Ammoniakproduktion insgesamt 1,8 % der weltweiten CO₂-Emissionen aus.⁴³ Um dies zu verringern, werden momentan viele Studien durchgeführt, mit dem Ziel, die Ammoniakproduktion nachhaltiger und klimafreundlicher zu gestalten. Die nachhaltigen und klimafreundlichen Alternativen der Ammoniakproduktion werden in den folgenden Absätzen dargestellt.

Verwendung von grünem Wasserstoff im Haber-Bosch-Verfahren

Für die Herstellung von grünem Ammoniak werden erneuerbare Energiequellen benutzt.⁴⁴ Bereits bestehende Produktionsanlagen, die die Haber-Bosch-Technologie verwenden, können relativ einfach umgestellt werden. Grünes Ammoniak hat keine Emissionen und die Kosten der Herstellung sollen voraussichtlich vor 2050 niedriger als die Kosten der konventionellen Produktion sein. Aus diesem Grund wird sie auch von der deut-

37 Ghavam u. a., „Sustainable Ammonia Production Processes“.

38 Ghavam u. a.

39 MacFarlane u. a., „A Roadmap to the Ammonia Economy“.

40 Smith, Hill, und Torrente-Murciano, „Current and Future Role of Haber–Bosch Ammonia in a Carbon-Free Energy Landscape“.

41 Mitsushima und Hacker, „Role of Hydrogen Energy Carriers“.

42 Weart, „The Carbon Dioxide Greenhouse Effect“.

43 Bleyl u. a., „Power-to-X: A Closer Look at e-Ammonia“.

44 Salmon und Bañares-Alcántara, „Green Ammonia as a Spatial Energy Vector“.

schen Regierung als die einzige langfristige nachhaltige Produktionstechnologie betrachtet.⁴⁵

Die Herstellung von grünem Ammoniak soll vor 2050 weniger kosten als die konventionelle Produktion

Obwohl eine Umstellung der Produktion notwendig und relativ einfach umsetzbar wäre, gibt es auch hier Nachteile. Die Umstellung kostet Zeit und gerade am Anfang wäre sie mit hohen Kosten verbunden. Zusätzlich zu den Ammoniakproduktionsanlagen bräuchte man eine Protonenaustauschmembran-Wasserelektrolyse (PEM), deren Kosten momentan in der Größenordnung von USD 1 Million pro Megawatt Leistung liegen. Diese Kosten sollen

aber voraussichtlich bis 2030 halbiert werden.⁴⁶ Eine weitere Möglichkeit zur Herstellung von grünem Ammoniak, die zurzeit aber noch in der Entwicklung ist, ist die Hochtemperatur-Festoxidelektrolyse (SOE). Bei dieser Methode wird die Abwärme der Haber-Bosch-Anlage genutzt.⁴⁷ Die SOE-Technologie befindet sich momentan noch im vorkommerziellen Stadium. Es muss noch nachgewiesen werden, dass die Stabilität der wichtigsten Komponenten auch während des Langzeitbetriebs bei sehr hohen Temperaturen gegeben ist.⁴⁸

Bei den genannten Methoden, mit Ausnahme der PEM-Methode, stellt die unregelmäßige Verfügbarkeit von erneuerbaren Energien ein Problem dar. Dies kann jedoch gelöst werden, indem im Vorfeld gespeicherten Wasserstoff selbst zum Antrieb der Produktionsprozesse verwendet wird, falls die Verfügbarkeit von erneuerbaren Energien gering ist.⁴⁹

Elektroreduktion von Stickstoff zu Ammoniak

Die Elektroreduktion von Stickstoff zu Ammoniak zählt zur nächsten Generation der Ammoniakherstellung und verwendet nicht das Haber-Bosch-Verfahren. Stattdessen wird Ammoniak durch eine elektrochemische Reduktion aus Stickstoff und Wasser als Wasserstoffquelle erzeugt. Dies kann direkt geschehen, indem reiner Stickstoff (N_2) von einem Elektrokatalysator absorbiert wird und dadurch Elektronen und Protonen (H^+) hinzugefügt werden, um zwei Ammoniakmoleküle (NH_3) zu bilden.⁵⁰

Eine andere Möglichkeit ist die indirekte elektrochemische Stickstoffreduktion unter Verwendung von Lithium als Redox-Medium. Positiv geladene Lithium-Ionen (Li^+) werden auf einem Kupfersubstrat abgeschieden und reagieren mit einströmendem N_2 zu Li_3N als Zwischenprodukt. Danach wird ein Anion (A^-), das mit einem Wasserstoffatom (H^+) gebunden ist und HA bildet, eingebracht. Die Li_3N -Moleküle werden aufgebrochen und zusammen mit HA findet eine Reaktion statt, bei der Li^+ -Ionen, die im ersten Schritt des nächsten Produktionszyklus

wiederverwendet werden können, ungebundene Anionen A^- , die das System verlassen und die gewünschten NH_3 -Moleküle entstehen, die freigesetzt und dann eingefangen werden.⁵¹ Ein theoretischer Vorteil der Elektroreduktionsmethode ist die größere Widerstandsfähigkeit gegenüber den Unterbrechungen in der Verfügbarkeit von erneuerbaren Energiequellen. Zweitens ist die Produktionsmethode im Vergleich zum Haber-Bosch-Verfahren weniger empfindlich gegenüber der Reinheit des zugeführten Stickstoffs. Wenn Sauerstoff oder Wasser im Stickstoff vorhanden ist, wird die Produktionsanlage des Haber-Bosch-Verfahrens beschädigt, während bei der elektrochemischen Reduktionsmethode nur der Wirkungsgrad sinkt. Außerdem könnte das elektrochemische Reduktionsverfahren mit einer höheren Energieeffizienz arbeiten als das Haber-Bosch-Verfahren, indem entweder grüner Wasserstoff verwendet wird oder anschließend die Kohlenstoffabscheidung, -nutzung und -speicherung (Carbon Capture, Use and Storage, CCUS) eingesetzt wird.⁵²

45 Salmon und Bañares-Alcántara.

46 Holst u. a., „Cost Forecast For Low-Temperature Electrolysis – Technology Driven Bottom-Up Prognosis For PEM And Alkline Water Electrolysis Systems“.

47 Lee u. a., „Pathways to a Green Ammonia Future“.

48 MacFarlane u. a., „A Roadmap to the Ammonia Economy“.

49 Salmon und Bañares-Alcántara, „Green Ammonia as a Spatial Energy Vector“.

50 Qing u. a., „Recent Advances and Challenges of Electrocatalytic N_2 Reduction to Ammonia“.

51 MacFarlane u. a., „A Roadmap to the Ammonia Economy“.

52 Salmon und Bañares-Alcántara, „Green Ammonia as a Spatial Energy Vector“.

Weitere neue Verfahren zur Herstellung von Ammoniak

Neben den bereits genannten Verfahren gibt es noch weitere Methoden zur Herstellung von grünem Ammoniak, die zum jetzigen Forschungsstand jedoch noch im Anfangsstadium der Entwicklung stehen. Ein Beispiel hierfür ist die direkte Fotoreduktion von Stickstoff zu Ammoniak. Der Wirkungsgrad dieses Prozesses ist jedoch zu gering, um in größeren Anlagen praktikabel zu sein.⁵³

Eine weitere Methode, die auch noch im Anfangsstadium der Entwicklung steht, ist ein Verfahren, in dem versucht wird, Ammoniak mit Hilfe der Biotechnologie zu erzeugen.⁵⁴ Beide Methoden sind jedoch wahrscheinlich nicht für die großtechnische Ammoniakproduktion geeignet und werden somit vermutlich eher kleinschalig in der Landwirtschaft zum Einsatz kommen.

Allgemein lässt sich sagen, dass sich die neusten Formen der klimafreundlichen Ammoniakproduktion noch in der Entwicklungsphase befinden und viele der veröffentlichten Ergebnisse umstritten sind, da sie die Anforderungen nicht erfüllen, um als

verlässliche Ergebnisse eingestuft werden zu können. Weitere Forschung in diesem Bereich ist notwendig, um diese Methoden zu verbessern, damit sie mit den etablierten Haber-Bosch-Produktionsmethoden konkurrieren können. Die Produktion von grünem Ammoniak ist elementar zur Erreichung von Netto-Null-Kohlendioxidemission. Neben der Produktion müssen auch neue Speicher- und Transportsysteme für dekarbonisierte Rohstoffe und Energievektoren kontinuierlich entwickelt werden, um die langfristige und sichere Anwendung von Ammoniak zu gewährleisten.⁵⁵

Die Produktion von grünem Ammoniak ist elementar zur Erreichung von Netto-Null-Kohlendioxidemission

Produktion von „blauem“ Ammoniak

Bei der Herstellung von „blauem“ Ammoniak werden durch Kohlenstoffabscheidung, -nutzung und -Speicherung (Carbon Capture, Use and Storage, CCUS) die in der Produktion entstandenen Treibhausgase aufgefangen und gespeichert, bevor sie in die Atmosphäre gelangen können. Um tatsächlich als blaues Ammoniak bezeichnet werden zu können, muss die CCUS-Anlage das Kohlendioxid in beiden Abgasströmen auffangen. Dies inkludiert das Abgas, welches durch die Wasserstoffentfernung aus dem Wassergas-Shift-Reaktor übrigbleibt, sowie das Abgas, das durch den Ofen freigesetzt wird.⁵⁶ Folgend meinen die Begriffe „blaues Ammoniak“ und „kohlenstoffarmes Ammoniak“ dasselbe. „Kohlenstoffarmer Wasserstoff“ meint Wasserstoff aus fossilen Brennstoffen mit anschließende CCUS erzeugt und ist mit dem Begriff „blauer Wasserstoff“ austauschbar.

Durch dieses Verfahren steigen jedoch umgesetzt in der Praxis die Kosten und die Komplexität. Mit der CCUS-Methode werden weiterhin fossile Brennstoffe verwendet und somit wird der Umstieg zu erneuerbaren Energien verhindert, weshalb diese Methode vor allem als Übergangslösung gesehen wird. Außerdem führt der Einsatz von CCUS oftmals nicht zu einer Netto-Null-Produktion, da die Treibhausgase, die bei der Produktion und beim Transport dieser fossilen Brennstoffe entstehen öfter nicht aufgefangen werden.⁵⁷ Die Produktion von blauem Ammoniak könnte jedoch nützlich sein, um auf langfristige Sicht einen Markt für Ammoniak als Energieträger zu schaffen.

Um tatsächlich als blaues Ammoniak bezeichnet werden zu können, muss die CCUS-Anlage das Kohlendioxid in beiden Abgasströmen auffangen

53 Ithisuphalap u. a., „Photocatalysis and Photoelectrocatalysis Methods of Nitrogen Reduction for Sustainable Ammonia Synthesis“.

54 Arora u. a., „Small-Scale Ammonia Production from Biomass“.

55 Ye u. a., „Reaction“.

56 Salmon und Bañares-Alcántara, „Green Ammonia as a Spatial Energy Vector“.

57 Holst u. a., „Cost Forecast For Low-Temperature Electrolysis – Technology Driven Bottom-Up Prognosis For PEM And Alkline Water Electrolysis Systems“.

05 Potenzial von grünem Ammoniak zur Dekarbonisierung der Ökonomie in Deutschland und Europa

Potenzial von grünem Ammoniak zur Dekarbonisierung der Ökonomie in Deutschland und Europa

Die Herstellung von Ammoniak auf fossiler Basis allein macht heute 1,8 % der weltweiten Treibhausgasemissionen aus, was bedeutet, dass die Substitution durch grünes Ammoniak etwa 500 Millionen Tonnen Kohlendioxid pro Jahr einsparen würde.⁵⁸ Ammoniak bietet besondere Chancen für die Dekarbonisierung von Volkswirtschaften mit stark mechanisierter Landwirtschaft und viel Industrie wie in Deutschland. Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über die vielen möglichen Anwendungen, von der Stromerzeugung über die Nutzung in industriellen Prozessen bis hin zum Einsatz als Kraftstoff in Verbrennungsmotoren. Obwohl in diesem Abschnitt der Studie nicht zwischen grünem, blauem oder konventionellem Ammoniak unterschieden wird, können nur grünes und (übergangsmäßig) blaues Ammoniak zur Dekarbonisierung der Wirtschaft

beitragen. Deshalb wird hier vorausgesetzt, dass das Ammoniak, das potenziell in den verschiedenen Sektoren Anwendung findet auch grünes oder (übergangsmäßig) blaues Ammoniak ist. Die Analyse erfolgt hier für die Sektoren, wie sie im deutschen Klimaschutzgesetz festgelegt sind.

Die Substitution durch grünes Ammoniak würde etwa 500 Millionen Tonnen Kohlendioxid pro Jahr einsparen

Energiewirtschaft

Der unbeständige Charakter von Solar- und Windenergie bedeutet, dass ein Stromsektor, der sowohl verlässlich als auch dekarbonisiert ist, Flexibilitätslösungen in viel größerem Umfang als heute benötigt. Dazu gehören insbesondere die Energiespeicherung und kohlenstoffarme, abschaltbare Kraftwerke. Die Stromerzeugung wird dennoch im Allgemeinen nicht als vielversprechende Anwendung für Ammoniak genannt. Es gibt jedoch Möglichkeiten, Ammoniak in diesem Sektor einzusetzen.

Stromspeicherung

Ammoniak kann zur Speicherung von Energie verwendet werden, um Schwankungen in der Erzeugung erneuerbarer Energien auszugleichen: In Zeiten, in denen viel Strom aus erneuerbaren Energien erzeugt wird, kann der Überschuss in Form von reinem Ammoniak gespeichert und in Zeiten der Dunkelflaute oder in anderen Situationen, in denen die Nachfrage die Erzeugung übersteigt, wieder in Strom umgewandelt werden.

Ammoniak kann zur Speicherung von Energie verwendet werden

Eine weitere mögliche Verwendung von Ammoniak ist der Einsatz von im Vorfeld gespeichertem Ammoniak in ammoniakgespeisten Festoxid-Brennstoffzellen (auf Englisch Solid Oxide Fuel Cells, SOFC). Dabei handelt es sich um eine sehr effiziente Methode der Stromerzeugung, die von der Leistung her mit reinen Wasserstoff-Brennstoffzellen vergleichbar ist. Sie ist

kommerziell ausgereift, wird aber aufgrund der Kosten und der Komplexität nicht im industriellen Maßstab eingesetzt.⁵⁹

Verwendung von Ammoniak als Brennstoff für Kraftwerke

Ammoniak kann als direkter Brennstoff für ein Wärmekraftwerk verwendet werden. Das Institut für erneuerbare Energien in Fukushima hat die grundlegende Technologie für die direkte Verbrennung von Ammoniak entwickelt und im Jahr 2014 die weltweit erste Gasturbinen-Stromerzeugung auf der Grundlage von Ammoniak als Brennstoff realisiert.⁶⁰



Ammoniak kann als direkter Brennstoff für ein Wärmekraftwerk verwendet werden (Quelle: Wikipedia)

Als Reaktion auf die von kurzem entschlossene japanische Roadmap für Ammoniak-Brennstoff entwickelt Mitsubishi Power derzeit eine 40-MW-Gasturbine, die 100 % Ammoniak direkt verbrennt und um das Jahr 2025 auf den Markt kommen soll. Dieses Konzept zeichnet sich dadurch aus, dass es eine direkte Verbrennung von Ammoniak vorsieht, im Gegensatz zu einem Ansatz,

58 Royal Society, *Ammonia: zero-carbon fertiliser, fuel and energy store*.

59 Afif u. a., „Ammonia-Fed Fuel Cells“.

60 Kobayashi, „Power Generation by Combustion Using Ammonia“.

der auf der Rückspaltung in Wasserstoff basiert. Es werden damit eine Reihe von spezifischen Merkmalen der Ammoniakverbrennung berücksichtigt, die folgend dargestellt werden.⁶¹

Da Ammoniak zum Beispiel eine niedrige Verbrennungsgeschwindigkeit hat, ist eine viel größere Brennkammer erforderlich. Zum anderen, da Ammoniak Stickstoff enthält, muss jedes System, das es als Brennstoff verwendet, die dabei entstehenden Stickoxide in den Griff bekommen. Mitsubishi Power hat die Senkung des Stickoxidanteils durch eine zweistufige Verbrennung untersucht, aber größere Gasturbinen werfen viele technische Probleme auf, wie zum Beispiel die Vergrößerung und Komplizierung der Brennkammer. Um die Stickoxidierung einzudämmen, wird das Gasturbinensystem von Mitsubishi eine selektive katalytische Reduktion (Selective Catalytic Reduction, SCR) mit einer neu entwickelten Brennkammer kombinieren.⁶² Aufgrund ihrer geringen Größe wird diese Gasturbine nur in kleinen bis mittelgroßen Kraftwerken für industrielle Anwendungen sowie auf abgelegenen Inseln eingesetzt werden können, nicht aber in netzgebundenen Kraftwerken.

Mitverbrennung in Kraftwerken für fossile Brennstoffe

Nach Angaben der Internationalen Energieagentur (IEA) lassen sich durch die Substitution fossiler Brennstoffe durch kohlenstoffarmen Wasserstoff und Ammoniak in Wärmekraftwerken erhebliche Reduzierungen der Treibhausgasemissionen über den gesamten Lebenszyklus erzielen. Die Umstellung von erdgasbasierter Stromerzeugung auf Stromerzeugung durch Wasserstoff aus fossilen Brennstoffen mit 95 % CCUS (blauer Wasserstoff) führt zu einer Verringerung der Treibhausgasemissionen um etwa 70 %, während grüner Wasserstoff aus erneuerbaren Energieträgern die Emissionen um 85-95 % reduziert. Ebenso führt die Umstellung von kohlebasierter Stromerzeugung auf kohlenstoffarmes Ammoniak zu einer Verringerung der Emissionen um etwa 80 %, wenn Ammoniak aus fossilen Brennstoffen mit 95 % CCUS hergestellt wird (blaues Ammoniak) und um 90-95 %, wenn Ammoniak aus Wind- und Sonnenenergie erzeugt wird (grünes Ammoniak).⁶³

Das sind Zahlen, die einen Unterschied machen können, vor allem wenn man bedenkt, dass bis 2030 noch 79 % der kohle- und gasbefeueren Kraftwerke in den hochentwickelten Volkswirtschaften noch nicht ans Ende ihrer technischen Nutzungsdauer gekommen sind. Diese Zahl sinkt bis 2040 auf 43 %. Die entsprechenden alternativen Technologien machen zum Glück aber rasche Fortschritte. Die Internationale Energieagentur

(IEA) geht davon aus, dass Wärmekraftwerke, die mit kohlenstoffarmen Brennstoffen betrieben werden, bereits 2030 eine wichtige Rolle als steuerbare Energiequelle spielen könnten, um Nachfragespitzen zu decken, wenn Strom besonders teuer ist, und um Systemdienstleistungen zu erbringen, die die Energieversorgungssicherheit und die Angemessenheit der Kapazitäten gewährleisten, um kostspielige Unterbrechungen der Energieversorgung zu vermeiden.⁶⁴

Die Internationale Organisation für erneuerbare Energien (International Renewable Energy Agency, IRENA) geht ebenfalls davon aus, dass Ammoniak, je nach Produktionsmethode, den Kohlenstoff-Fußabdruck von Kohlekraftwerken erheblich verringern könnte, da ein Gemisch von bis zu 60 % Ammoniak, bezogen auf den Energiegehalt, dem Einsatzmaterial beigemischt werden kann – dies wurde 2020 in einem 1,2-MW-Feuerraum demonstriert. Eine solche Beimischung senkt auch die Stickoxidemissionen bei der Kohleverbrennung. Nach erfolgreichen Feuerungstests im August 2021 plant Japans größtes Stromerzeugungsunternehmen JERA, bis 2024 die Mitverbrennung von bis zu 20 % Ammoniak in einem 1-GW-Kohlekraftwerk zu demonstrieren, bis zu den 2030er Jahren auf 50-60 % Ammoniak-Mitverbrennung überzugehen und bis zu den 2040er Jahren eine hundertprozentige Ammoniakverbrennung zu erreichen. In ähnlicher Weise schlägt die norwegische Regierung vor, das bestehende kohlebefeuerte Kraftwerk in Longyearbyen auf der Insel Svalbard durch einen Mehrstoffmotor zu ersetzen, der mit Ammoniak betrieben werden kann.⁶⁵ Auch Südkorea hat kürzlich seine Pläne zur gemeinsamen Verbrennung von Wasserstoff und Ammoniak in Wärmekraftwerken erweitert.⁶⁶

Ammoniak könnte den Kohlenstoff-Fußabdruck von Kohlekraftwerken erheblich verringern

Die Mitverbrennung von Ammoniak in Kraftwerken, die mit fossilen Brennstoffen betrieben werden, wird in Europa derzeit nicht in Betracht gezogen, da Kohlekraftwerke eher stillgelegt als umgewidmet werden sollen. Das Beratungsunternehmen Bloomberg schätzt, dass ein Kohlenstoffpreis von mindestens 300 USD pro Tonne Kohlendioxid erforderlich wäre, um die Mitverbrennung von sauberem Ammoniak bei einer Beimischungsquote von 20 % im Jahr 2030 wirtschaftlich tragfähig zu machen. Bis 2050 könnte der Kohlenstoffpreis, der erforderlich ist, um

61 Patel, „Mitsubishi Power Developing 100% Ammonia-Capable Gas Turbine“.

62 Patel.

63 Frankl und Hannula, „The Role of Low-Carbon Fuels in the Clean Energy Transitions of the Power Sector“.

64 Frankl und Hannula.

65 IRENA und AEA, *Innovation Outlook: Renewable Ammonia*; Zhang u. a., „Techno-Economic Comparison of Green Ammonia Production Processes“; Frankl und Hannula, „The Role of Low-Carbon Fuels in the Clean Energy Transitions of the Power Sector“.

66 Wood Mackenzie, „Ammonia Co-Firing in Thermal Power Plants Could Be Worth US\$100 Billion in 2050“.

100 % mit Ammoniak befeuerte, nachgerüstete Kohlekraftwerke wirtschaftlich zu machen, auf etwa 159 USD/Tonne Kohlendioxid gesenkt werden, was zeigt, dass Ammoniak in Zukunft in der Lage sein wird, mit fossilen Brennstoffen zu konkurrieren. Diese

Lösungen sind natürlich nicht annähernd so schnell, billig oder bequem wie die direkte Nutzung erneuerbarer Energiequellen.⁶⁷

Industrie

Heute wird Ammoniak hauptsächlich als Düngemittel verwendet, aber ein erheblicher Anteil wird auch als Ausgangsstoff in verschiedenen industriellen Prozessen eingesetzt. Eine andere, vielleicht vielversprechendere künftige Verwendung für Ammoniak ist die als Brennstoff für industrielle Hochtemperaturprozesse – ein Sektor, der häufig als Beispiel für schwer zu dekarbonisierende Bereiche angeführt wird, unter anderem weil Strom direkt als Energieträger für die Erzeugung hoher Temperaturen schlecht geeignet ist.

Verwendung von Ammoniak als Ausgangsstoff oder zum Erhitzen in industriellen Prozessen

Wie bereits erwähnt, entfallen allein auf die Produktion von Ammoniak 1,8 % aller Treibhausgasemissionen, und 20 % der derzeitigen weltweiten Ammoniakproduktion (etwa 176 Millionen Tonnen pro Jahr) werden für nichtlandwirtschaftliche Anwendungen verwendet, vor allem für Kühlung, Sprengstoffe, Textilien, Kunststoffe, Farbstoffe, Pestizide und Arzneimittel. Es wird auch bei der Herstellung von Gummiprodukten, in der Papier- und Zellstoffindustrie, in der Lebensmittel- und Getränkeindustrie sowie in der Kältetechnik als Neutralisator, Stabilisator und Stickstoffquelle verwendet. Wie oben erwähnt, könnte man heute bis zu 500 Millionen Tonnen Kohlendioxid pro Jahr einsparen, wenn man fossiles Ammoniak vollständig durch grünes Ammoniak ersetzen würde.⁶⁸

Ammoniak wird in einer Reihe von industriellen Prozessen verwendet

Ammoniak wird in einer Reihe von industriellen Prozessen verwendet, zum Beispiel für Ofenatmosphären bei der Wärmebehandlung einer breiten Palette von Metallkomponenten. Dissoziiertes Ammoniak, das in der Regel durch thermisches Cracken von wasserfreiem Ammoniak hergestellt wird, um eine reduzierende Gasatmosphäre zu erzeugen, die zu 75 % aus Wasserstoff und zu 25 % aus Stickstoff besteht, wird als Ambiente verwendet, um Metalloberflächen vor Oxidation zu schützen, während sie

hohen Temperaturen ausgesetzt sind. Dissoziiertes Ammoniak ist häufig die wirtschaftlichste Möglichkeit, eine solche Atmosphäre für Chargen- oder kontinuierliche Wärmebehandlungsverfahren bereitzustellen. Zu den häufigsten Wärmebehandlungsverfahren, für die es verwendet wird, gehören Glühen, Sintern und Löten von kohlenstoffarmem Stahl, Edelstahl und Kupferlegierungen. Rohes, nicht dissoziiertes Ammoniak wird auch bei bestimmten Wärmebehandlungsverfahren verwendet, bei denen Stickstoff bei hohen Temperaturen direkt in die Oberfläche bestimmter Stahlliegierungen eingebracht werden muss wie zum Beispiel beim Nitrieren und Karbonitrieren.⁶⁹

Eine parallele Rolle kann Ammoniak auch als Wasserstoffträger spielen. Wasserstoff selbst ist ein wichtiger Rohstoff für die Industrie, nicht zuletzt in Deutschland, wo bereits heute rund 55 TWh (überwiegend fossiler) Wasserstoff pro Jahr für stoffliche Anwendungen eingesetzt werden. Die Umstellung der deutschen Raffinerie- und Ammoniakproduktion auf Wasserstoff würde wiederum rund 22 TWh grünen Wasserstoffs erfordern.⁷⁰

Wasserstoff und die deutsche Stahlindustrie

In Deutschland sind die größten Vorteile der Dekarbonisierung durch den Einsatz von grünen Brennstoffen in der Stahlindustrie zu finden. Die europäische Stahlindustrie ist für 5,7 % der gesamten Treibhausgasemissionen in der Europäischen Union verantwortlich und ein Großteil des europäischen Stahls wird in Deutschland produziert.⁷¹ Vor dem Hintergrund ihrer Industriestrategie 2030 sowie ihres Klimaschutzplans 2050, des Klimaschutzprogramms 2030 und des Europäischen Green Deals hat die Bundesregierung gemeinsam mit der Stahlindustrie im Jahr 2020 ein „Handlungskonzept Stahl“ entwickelt. Dieses Dokument gibt den Rahmen für eine grüne Stahlproduktion vor und fordert, die Verwendung von Kokskohle in der Stahlproduktion schrittweise durch grünen Wasserstoff zu ersetzen.⁷²

67 BloombergNEF, „Japan’s Ammonia-Coal Co-Firing Strategy a Costly Approach to Decarbonization, Renewables Present More Economic Alternative“.

68 Royal Society, *Ammonia: zero-carbon fertiliser, fuel and energy store*.

69 Airgas Specialty Products, „Ammonia Applications: Heat Treatment“.

70 BMWi, „Die Nationale Wasserstoffstrategie“.

71 Home of Steel, „Grüne Welle für die Stahlindustrie“.

72 BMWi, „Handlungskonzept Stahl“.



Die Stahlindustrie positioniert sich als einer der Hauptabnehmer von grünem Wasserstoff (Quelle: Pixabay)

Die Unternehmen reagieren bereits auf die Strategie, wobei sich die Stahlindustrie als einer der Hauptabnehmer von grünem Wasserstoff positioniert. thyssenkrupp Steel, ArcelorMittal und Salzgitter planen spektakuläre Reduzierungen ihres Kohlenstoff-Fußabdrucks und streben eine klimaneutrale Produktion bis 2045 oder 2050 an. Sie wollen dies erreichen, indem sie ab 2025 schrittweise Hochöfen durch Direktreduktionsanlagen ersetzen, die mit grünem Wasserstoff betrieben werden, jeweils ergänzt durch Schmelzaggregate, die den festen Rohstoff in flüssiges Roheisen umwandeln. Allein thyssenkrupp Steel gibt an, dass diese Umwandlung bis zu acht Milliarden Euro kosten wird.⁷³

Es gibt eine Reihe von Initiativen, die diese Revolution mit grünem Wasserstoff versorgen wollen

Es gibt eine Reihe von Initiativen, die diese Revolution mit grünem Wasserstoff versorgen wollen: Uniper plant ein Importterminal für Ammoniak, wo es in Wasserstoff umgewandelt werden kann, sowie eine grüne Wasserstoff-Elektrolyseanlage mit einer Kapazität von bis zu 1.000 MW. Parallel dazu ermöglicht ein neues, von der Ingenieurgesellschaft Paul Wurth entwickeltes Verfahren, die so genannte Trockenreformierung, die Umwandlung des in der Kokerei entstehenden Koksofengases in ein heißes Reduktionsgas oder Synthesegas. Dieses kann mit Wasserstoff angereichert werden und als Reduktionsmittel für die Reduktion der Eisenerze eingesetzt werden.⁷⁴

Die Umstellung der Primärstahlerzeugung wird mit hohen Kosten und einem großen Bedarf an grünem oder, übergangsmäßig, an blauem Wasserstoff einhergehen. So schätzt das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, dass für die Umstellung der heimischen Stahlproduktion auf eine treibhausgasneutrale Produktion bis 2050 über 80 TWh Wasserstoff benötigt werden.⁷⁵ Nach einer Studie des Deutschen Wasserstoff und Brennstoffzellen-Verbandes (DWV) besteht bis 2030 ein Investitionsbedarf von rund 10 Milliarden Euro. Ein ehrgeiziger Ausbau der Produktionskapazitäten für direktreduziertes Eisen kann bereits kurz- und mittelfristig zu einer deutlichen Reduzierung der Treibhausgasemissionen führen. So gibt es Möglichkeiten, Kohlendioxidreduzierungen schon für 50 Euro/Tonne zu erreichen. Voraussetzung dafür ist, dass die Politik entsprechende Investitionsanreize und Planungssicherheit für die deutsche Stahlindustrie schafft.⁷⁶

Stahlherstellung mit Ammoniak

Forscher des Max-Planck-Instituts für Eisenforschung haben eine Methode zur Herstellung von nachhaltigem Stahl entwickelt, bei der feste Eisenoxide mit aus Ammoniak freigesetztem Wasserstoff reduziert werden (im Gegensatz zur direkten Verwendung von Wasserstoff). In ihrer Studie zeigen die Forscher, dass die Reduktion von Eisenoxid mit Ammoniak durch eine autokatalytische Reaktion erfolgt, kinetisch genauso effektiv ist wie die direkte Reduktion mit Wasserstoff, die gleiche Metallisierung ergibt und mit bestehenden Technologien industriell umgesetzt werden kann. Außerdem scheint sie weniger kostspielig zu sein als die direkte Verwendung von Wasserstoff. Diese Studie, die Ende März 2023 veröffentlicht wurde, könnte das Denken über die grüne Stahlproduktion revolutionieren.⁷⁷

Verwendung von Ammoniak für die industrielle Strom-, Wärme- und Kälteerzeugung

Wie bereits erwähnt, kann Ammoniak verbrannt oder in Brennstoffzellen zur Energieerzeugung verwendet werden. Diese kann ohne weiteres in Wärme umgewandelt werden. Es kann auch direkt zur Kühlung verwendet werden, da es beträchtliche Wärmemengen aus der Umgebung absorbiert (ein Gramm Ammoniak absorbiert 1.368 Kilojoule Wärme), was es als Kühlmittel in Kühl- und Klimaanlage nützlich macht.⁷⁸ Seine Toxizität ist in kontrollierten industriellen Umgebungen, in denen es von geschultem Personal sicher gehandelt und gewartet werden kann, kein Problem.

73 Home of Steel, „Grüne Welle für die Stahlindustrie“.

74 Home of Steel.

75 BMWi, „Die Nationale Wasserstoffstrategie“.

76 Albrecht u. a., „Emissionsfreie Stahlerzeugung“.

77 Ma u. a., „Reducing Iron Oxide with Ammonia“.

78 Zumdahl, „Ammonia: Definition & Uses“.

Gebäude

In Gebäuden kann Ammoniak hauptsächlich zum Heizen oder Kühlen verwendet werden.

Ammoniak zur Innenraumkühlung

Vor der Entdeckung der Fluorchlorkohlenwasserstoffe wurden Ammoniak, Kohlenwasserstoffe (vor allem Propan) und Kohlendioxid in den verschiedensten Anwendungsbereichen zur Kühlung eingesetzt. Aufgrund ihrer ozonschädigenden Eigenschaften und ihres enormen Treibhauseffekts wurden die Fluorchlorkohlenwasserstoffe schrittweise durch Fluorkohlenwasserstoffe ersetzt, die jedoch immer noch Nachteile aufweisen. Kohlenwasserstoffe sind außerdem leicht entzündlich, während Kohlendioxid hohe Drücke und damit viel Energie für die Kühlung benötigt. Ihr Ersatz durch grünes oder blaues Ammoniak oder Kohlendioxid könnte schon allein den Anstieg der Welttemperatur bis 2050 um 0,1 Grad Celsius verringern.⁷⁹

Im Gegensatz zu Kohlenwasserstoffen oder Kohlendioxid hat grünes Ammoniak keine Treibhausgaswirkung.⁸⁰ Ammoniak ist zwar giftig, wenn es in die Luft freigesetzt wird und erfordert korrosionsbeständige Komponenten, was seine Verwendung in kleinem Maßstab einschränkt, doch kann es problemlos in großen Lagerhäusern und an Industriestandorten abseits der Ballungszentren eingesetzt werden. Im Zuge des technologischen Fortschritts könnte grünes Ammoniak auch zum bevorzugten Arbeitsmittel werden, um die heute meist in Autos, Supermärkten und Wärmepumpen verwendeten Fluorkohlenwasserstoffe zu ersetzen.⁸¹

Ammoniak zur Innenraumheizung

Wie im deutschen Anreizprogramm Energieeffizienz (APEE) von 2016 anerkannt, können hocheffiziente Brennstoffzellenheizgeräte für die Innenraumheizung verwendet werden.⁸² Theoretisch können dazu auch Brennstoffzellenlösungen auf Ammoniakbasis gehören, obwohl diese in absehbarer Zeit wahrscheinlich noch nicht ausgereift genug für einen solchen dezentralen, kleinräumigen Einsatz sind.

Verkehr

Einigen Schätzungen zufolge ist der potenzielle *künftige* Markt für grünes Ammoniak *nur als Kraftstoff* größer als alle anderen *heutigen* Märkte für Ammoniak zusammen.⁸³ Ammoniak kann in Fahrzeug-Brennstoffzellen als solches oder nach Aufspaltung in Wasserstoff verwendet werden, oder es kann direkt in Verbrennungsmotoren eingesetzt werden. Aufgrund der begrenzten Reichweite eignen sich die erstgenannten Anwendungen am besten für kürzere Fahrten, zum Beispiel in Privatfahrzeugen oder öffentlichen Verkehrsmitteln in Städten, während sich die letzteren besser für Langstrecken Anwendungen wie den Gütertransport, insbesondere auf Fracht- und Tankschiffen, eignen.⁸⁴ Der Luftverkehr ist eine weitere mögliche Anwendung, die jedoch beim derzeitigen Stand der Technik in naher Zukunft nicht realisierbar erscheint.^{85,86}

Ammoniak kann direkt in Brennstoffzellen oder in Verbrennungsmotoren eingesetzt werden

Deutschlands Innovationsprogramm Logistik 2030⁸⁷ und nationale Wasserstoffstrategie⁸⁸ sowie das Nationale Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie⁸⁹ erwähnen alle ausdrücklich die Förderung von grünem Wasserstoff für den Verkehrssektor. Es gibt zwar Ammoniak-Brennstoffzellen, aber aus kommerziellen und praktischen Gründen wird Ammoniak in naher Zukunft am ehesten als Wasserstoffträger in Brennstoffzellen zum Einsatz kommen.

- 79 Burton, „Air Conditioning: A Global Contradiction“.
- 80 Burton.
- 81 Reisch, „Why Interest in Ammonia Refrigerants Is Surging“.
- 82 KfW, „Zuschuss Brennstoffzelle“.
- 83 MacFarlane u. a., „A Roadmap to the Ammonia Economy“.
- 84 Giddey u. a., „Ammonia as a Renewable Energy Transportation Media“.
- 85 Umweltbundesamt, „Wasserstoff im Verkehr“.
- 86 UK Government, *UK Hydrogen Strategy*.
- 87 BMVI, „Innovationsprogramm Logistik 2030“.
- 88 BMWi, „Die Nationale Wasserstoffstrategie“.
- 89 NOW GmbH, „Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP)“.

Ammoniak und Brennstoffzellen

Brennstoffzellen werden in Straßenfahrzeugen, Zügen und Schiffen verwendet, und es gibt Pläne, sie mittelfristig auch in Flugzeugen einzusetzen.

Kraftfahrzeuge

Die meisten elektrischen Kraftfahrzeuge nutzen Batterien und keine Brennstoffzellen – in den letzten zehn Jahren wurden in Deutschland weniger als 1000 neue Personenkraftwagen mit einer Wasserstoff-Brennstoffzelle zugelassen, während allein im Jahr 2020 rund 395.000 Plug-in-Hybride oder batterieelektrische Fahrzeuge zugelassen wurden. Batterien sind billiger, effizienter und weniger kohlenstoffintensiv, haben aber eine kürzere Reichweite, weshalb sie für fast alle Personenkraftwagen und Nahverkehrsbusse überlegen sind, woran sich kurz- oder mittelfristig wohl auch nichts ändern wird.⁹⁰

Für Lastkraftwagen und Fernlinienbusse fehlt einem Batterieantrieb oft die nötige Reichweite. In diesen Situationen ist ein Brennstoffzellenantrieb sinnvoll – allerdings sind solche Anwendungen derzeit noch in der Minderheit: Anfang 2020 waren 24 Brennstoffzellenbusse und 385 batterieelektrische Busse auf Deutschlands Straßen unterwegs. Dennoch wird der Einsatz von Brennstoffzellen im Fernverkehr für Lastkraftwagen oder Busse intensiver diskutiert – aber so auch andere Alternativen wie Oberleitungssysteme.⁹¹ Das Advanced Energy Center in Stony Brook, New York, hat vor kurzem einen 100-kW-Brennstoffzellenantrieb vorgeführt, bei dem der Wasserstoff im Motor aus dem im Gastank gespeicherten Ammoniak ge crackt wird.⁹² Dennoch ist es unwahrscheinlich, dass die Brennstoffzellentechnologie in Deutschland und Europa kurz- und mittelfristig eine breite Anwendung in Fahrzeugen findet.

Züge

Eine weitere Anwendung für Brennstoffzellen ist der Einsatz in Zügen. Während 60 % der Strecken in Deutschland elektrifiziert sind, sind für den Rest Züge mit Dieselmotoren erforderlich. Die Deutsche Bahn plant bis 2040 klimaneutral zu werden, aber die verbleibenden Strecken sind größtenteils nicht für eine Elektrifizierung geeignet – sie können aus Tälern, Brücken oder Tunneln bestehen, die einen Neubau schwierig machen und für weniger frequentierte regionale Nebenstrecken unerschwinglich sind. Die Elektrifizierung ist außerdem kostspielig und hat eine lange Planungs- und Ausführungszeit. Einige der derzeitigen Diesellinien können von Zügen mit Batterien betrieben werden – heutzutage können Züge 80 Kilometer zurücklegen, ohne nachgeladen werden zu müssen, was für viele Nebenstrecken ausreicht, insbesondere wenn sogenannte „Oberleitungsinseln“, das heißt, dass kurze Oberleitungsabschnitte, die die Batterien beim Vorbeifahren laden, verwendet werden.⁹³

Eine weitere Anwendung für Brennstoffzellen ist der Einsatz in Zügen

Für die restlichen Strecken arbeitet die Deutsche Bahn im Rahmen des öffentlich geförderten Projekts „H2goesRail“, in einer Kooperation u.a. mit Siemens, an Zügen, die mit Brennstoffzellen betrieben werden sollen. Ab 2024 soll ein Brennstoffzellenzug mit einer Reichweite von rund 800 Kilometern und einer Höchstgeschwindigkeit von 160 km/h, der schnell betankt werden kann (gleichwertig zu Elektrozügen), im Regelbetrieb zwischen Pforzheim und Tübingen verkehren und 330 Tonnen Kohlendioxid-Äquivalente pro Jahr einsparen.⁹⁴

90 Umweltbundesamt, „Wasserstoff im Verkehr“.

91 Umweltbundesamt.

92 Eckinger, „John Deere 6195M“.

93 tagesschau, „Wie die Deutsche Bahn ihre Dieselloks ersetzen will“.

94 Deutsche Bahn, „Neuer Wasserstoffzug und Speichertrailer vorgestellt“.

Seeschiffe und Binnenschiffe

Brennstoffzellen sind eine vielversprechende Technologie für Schiffsantriebe. Das erste Schiff mit ammoniakbasierten Brennstoffzellen, das Versorgungsschiff *Viking Energy* der norwegischen Reederei Eidesvik, wird Ende 2023 in See stechen.⁹⁵ Weitere Projekte sind im Gange und könnten in den kommenden Jahren zur kommerziellen Nutzung führen.⁹⁶ Seit Ende 2022 werden in den Niederlanden zehn Binnenschiffe auf Brennstoffzellenbetrieb umgerüstet.⁹⁷

Brennstoffzellen sind eine vielversprechende Technologie für Schiffsantriebe

Die Entwicklungen bei der Elektrifizierung von Schiffen in den kommenden Jahren werden in hohem Maße vom technischen Fortschritt, den Kosten und der Ernsthaftigkeit der Schifffahrtsindustrie bei der Verringerung ihres Kohlenstofffußabdrucks abhängen. Ein wichtiges Problem ist die Tatsache, dass die meisten Schiffe eine Lebensdauer von mehreren Jahrzehnten haben und nicht ohne weiteres mit neuen Systemen nachgerüstet werden können, die mehr Platz oder neuartige Lösungen erfordern. Es ist daher wichtig, dass die Branche einen längerfristigen Ansatz verfolgt.

Ammoniak in Verbrennungsmotoren

Bei direkter Verwendung in Verbrennungsmotoren ist Ammoniak zwar wesentlich wirtschaftlicher als Batterien oder Brennstoffzellen, hat aber eine geringere Energiedichte.⁹⁸ Diese Ineffizienz bedeutet, dass solche Motoren in den meisten Straßenfahrzeugen oder Schiffen außer Langstreckenfrachtschiffen wahrscheinlich nie sinnvoll eingesetzt werden können. Allerdings könnten viele Zuglokomotiven als Überbrückungsmaßnahme auf Verbrennungsmotoren umgerüstet werden – bei einer Lebensdauer von mehr als 30 Jahren wird es Jahrzehnte dauern, sie durch elektrische Versionen zu ersetzen. Mittel- und langfristig werden wasserstoffbetriebene Verbrennungsmotoren auch für Flugzeuge in Betracht gezogen.

Schifffahrt

Obwohl Ammoniak derzeit nicht als Treibstoff für Hochseeschiffe verwendet wird, haben umfangreiche Analysen der Europäischen Agentur für die Sicherheit des Seeverkehrs,⁹⁹ der Internationalen Organisation für erneuerbare Energien,¹⁰⁰ des Weltverkehrsforums,¹⁰¹ der internationalen akkreditierten Registrierungs- und Klassifizierungsgesellschaft DNV¹⁰² u. a. gezeigt, dass dies mittelfristig eine realistische Perspektive ist. Wie bereits erwähnt, hat Ammoniak den entscheidenden Vorteil, dass es pro Energieeinheit billiger zu speichern ist als Wasserstoff, Elektrizität in Batterien oder Flüssigerdgas. Seine Nachteile – Toxizität, mögliche Emissionen von anderen Treibhausgasen als Kohlendioxid, begrenzte Erfahrung mit der Verwendung als Kraftstoff in Verbrennungsmotoren und geringe Energienutzungsrate – dürften mit Zeit und Mühe überwunden werden können.¹⁰³

Nach Angaben der Internationalen Seeschifffahrtsorganisation (IMO) ist der Anteil der Schifffahrtsemissionen an den weltweiten anthropogenen Emissionen von 2,76 % im Jahr 2012 auf 2,89 % im Jahr 2018 gestiegen. Die absoluten Kohlendioxidemissionen sind in diesem Zeitraum von 848 auf 919 Millionen Tonnen gestiegen, was einer Zunahme von 8,4 % entspricht. Für eine Reihe plausibler langfristiger Wirtschafts- und Energieszenarien wird für den Zeitraum von 2018 bis 2050 ein Anstieg der Emissionen um 0-44,4 % prognostiziert. Auch die Emissionen von Methan, Schwefeloxiden, Stickstoffoxiden und Feinstaub haben zugenommen.¹⁰⁴

Um das erklärte Ziel der IMO zu erreichen, die Emissionen des Sektors bis 2050 um 50 % gegenüber dem Stand von 2008 zu senken, sind revolutionäre Maßnahmen erforderlich. Verschiedene Schifffahrtsunternehmen haben sich zu ehrgeizigeren Emissionssenkungszielen verpflichtet, die durch nationale Ziele, Kundennachfrage und/oder Nachhaltigkeitsziele bestimmt werden. Es wird erwartet, dass die ersten mit Ammoniak betriebenen Schiffe 2024 und 2025 in See stechen und bis 2030 in größerem Umfang eingesetzt werden.¹⁰⁵

95 Fraunhofer-Gesellschaft, „Weltweit erste Hochtemperatur-Brennstoffzelle mit Ammoniak für Schiffe“.

96 DLR, „Brennstoffzellen senken Schiffsemissionen“; DLR, „Zukünftige maritime Treibstoffe und deren mögliche Importkonzepte“.

97 Schaal, „Niederländer rüsten zehn Schiffe auf BZ-Antrieb um“.

98 Hasan u. a., „A Comprehensive Review on the Recent Development of Ammonia as a Renewable Energy Carrier“.

99 Laursen u. a., „Potential of Ammonia as Fuel in Shipping“.

100 IRENA und AEA, *Innovation Outlook: Renewable Ammonia*.

101 Kopf, Bunsen, und Craglia, „The Potential of E-fuels to Decarbonise Ships and Aircraft“.

102 Brinks und Hektor, „Ammonia as a Marine Fuel“.

103 Ming, Mengyao, und Ng Kay Leng, „Ammonia as a Marine Fuel: Bunkering, Safety and Release Simulations“.

104 Faber u. a., „Fourth IMO GHG Study 2020“.

105 IRENA und AEA, *Innovation Outlook: Renewable Ammonia*.



Einige Projekte forschen zu der Möglichkeit, Ammoniak als Kraftstoff für Verbrennungsmotoren anzuwenden (Quelle: Pixabay)

Einige Projekte forschen zu der Möglichkeit, Ammoniak als Kraftstoff für Verbrennungsmotoren anzuwenden. Darunter fallen z.B. Wärtsilä, die zusammen mit anderen Partnern Ammoniak in einem maritimen Viertakt-Verbrennungsmotor getestet haben und ab 2022 Feldversuche in Zusammenarbeit mit Schiffseignern durchführen wollen sowie Man Energy Solutions, die Ammoniak in ihren Motoren getestet haben und ein Entwicklungsprojekt für ein mit Ammoniak betriebenes Feeder-Containerschiff mit Partnern ins Leben gerufen haben, welches diese Technologie nutzen soll.¹⁰⁶

Maersk zum Beispiel hat sich verpflichtet, bis 2050 keine Kohlenstoffemissionen mehr zu verursachen. Die derzeitige Flotte von rund 750 Containerschiffen würde etwa 20 Millionen Tonnen Ammoniak pro Jahr benötigen, wenn nur Ammoniak als Brennstoff verwendet würde. Schiffe haben in der Regel eine Lebensdauer von 20-25 Jahren oder länger, was bedeutet, dass Investitionen für die Dekarbonisierung von Schiffsneubauten bald getätigt werden müssen und dass bis 2030 kohlenstofffreie Schiffe in Betrieb sein müssen, um die Ziele für die Reduzierung der Treibhausgasemissionen bis 2050 zu erreichen.

Landwirtschaft

Wie oben erwähnt, werden derzeit mehr als 80 % des weltweit produzierten Ammoniaks in Stickstoffdünger umgewandelt und in der Landwirtschaft verwendet.¹¹¹ Das Ammoniak ist aktuell hauptsächlich durch das Haber-Bosch Verfahren gewonnen, wobei herkömmliche Haber-Bosch-Anlagen Ammoniak unter Verwendung von Erdgas (50 %), Öl (31 %) oder Kohle (19 %) als Ausgangsmaterial produzieren, was ursächlich für den großen Treibhausgasemissionswert von Dünger auf Ammoni-

jüngste Prognosen gehen davon aus, dass die Nachfrage nach Ammoniak als Schiffskraftstoff bis 2050 zwischen 0,1 und mehr als 1 Milliarde Tonnen Ammoniak liegen wird, je nach dem Anteil von Ammoniak im Kraftstoffmix, dem künftigen Nachfrageszenario und der Geschwindigkeit der sektoralen Dekarbonisierung.¹⁰⁷

Die Hersteller von Schiffsmotoren gehen davon aus, dass sie bis 2024 oder 2025 mit Ammoniak betriebene Zweitakt- und Viertaktmotoren sowohl für Neubauten als auch für die Nachrüstung auf den Markt bringen werden. Zweistoffmotoren ermöglichen Kraftstoffflexibilität bei der Einführung von Ammoniak als Treibstoff.¹⁰⁸

Züge

Die Einführung von Lokomotiven mit Wasserstoffverbrennungsmotor in Europa ist nicht geplant, aber Forscher des Argonne National Laboratory und des Oak Ridge National Laboratory in den Vereinigten Staaten arbeiten an einem gemeinsamen Projekt zu diesem Zweck.

Luftfahrzeuge

Es gibt mehrere Projekte, vor allem im Vereinigten Königreich, die darauf abzielen, in den kommenden Jahren Prototypen emissionsfreier Flugzeuge zu entwickeln. Airbus plant die Entwicklung und den Start eines emissionsfreien großen Verkehrsflugzeugs mit Wasserstoffantrieb bis 2035.¹⁰⁹ Die Unternehmensberatung McKinsey & Company geht davon aus, dass wasserstoffbetriebene Flugzeuge Ende der 2030er Jahre auf den Markt kommen werden und bis 2050 ein Drittel des Energiebedarfs der Luftfahrt decken könnten.¹¹⁰

ak- und Nitratbasis ist.¹¹² Aufgrund seiner entscheidenden Rolle bei der Herstellung von Lebensmitteln wurde Ammoniak oft als strategischer Faktor betrachtet. Infolgedessen verfügt die europäische Düngemittelindustrie über mehr als 120 Produktionsstätten, die über die meisten europäischen Länder verteilt sind. Im Jahr 2022 beschäftigte sie 74 000 Menschen (einschließlich der Lieferkette) und erwirtschaftete einen Umsatz von 9,5 Milliarden Euro. Im Jahr 2019 importierte die EU 3.253.000 Tonnen

106 Mallouppas, Ioannou, und Yfantis, „A Review of the Latest Trends in the Use of Green Ammonia as an Energy Carrier in Maritime Industry“.

107 IRENA und AEA, *Innovation Outlook: Renewable Ammonia*.

108 IRENA und AEA.

109 Airbus, „The ZEROe Demonstrator Has Arrived“.

110 Esqué u. a., „Decarbonizing aviation“.

111 Palys u. a., „Renewable Ammonia for Sustainable Energy and Agriculture“.

112 Rodrigues u. a., „Application of Ammonium Fertilizers Recovered by an Electrochemical System“; Smith, Hill, und Torrente-Murciano, „Current and Future Role of Haber–Bosch Ammonia in a Carbon-Free Energy Landscape“.

und exportierte 114.000 Tonnen Ammoniak. Die europäische Düngemittelindustrie hat ihre Energieeffizienz erheblich verbessert, doch angesichts der hohen Ammoniakeinfuhren besteht Bedarf an einem lokalisierten, umwelt- und klimafreundlicheren Sektor, der kohlenstoffarme Düngemittel herstellt.¹¹³

Aufgrund seiner entscheidenden Rolle bei der Herstellung von Lebensmitteln wurde Ammoniak oft als strategischer Faktor betrachtet

Seit 2020 ist die europäische Düngemittelindustrie für 35 Millionen Tonnen Treibhausgasemissionen verantwortlich, wobei die Ammoniakproduktion mit rund 30 Millionen Tonnen der größte Emittent ist. Die Herstellung einer Tonne Ammoniak nach dem Haber-Bosch-Verfahren führt im Durchschnitt zu direkten Emissionen von 1,9 Tonnen Kohlendioxid. Außerdem

verursacht der Einsatz von Strom zusätzliche indirekte Emissionen außerhalb des Standorts, wo er verbraucht wird, zum Beispiel bei seiner Produktion.¹¹⁴ Demnach würde eine kohlenstofffreie Ammoniakproduktion natürlich zu einer erheblichen Verringerung der Treibhausgasemissionen führen.

Das Problem der Verschmutzung durch atmosphärisches Ammoniak aus der Landwirtschaft, das erheblich zur Versauerung der Umwelt beiträgt und erhebliche Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit hat, wird dadurch natürlich nicht gelöst. In Europa und den Vereinigten Staaten ist atmosphärisches Ammoniak für die Bildung von 30 % bzw. 50 % aller PM_{2,5}-Feinstaubpartikel verantwortlich. PM_{2,5} kann tief in die Lunge eindringen und langfristige Krankheiten wie chronisch obstruktive Lungenerkrankung (COPD) und Lungenkrebs verursachen. Eine Verringerung dieser atmosphärischen Ammoniakemissionen dürfte jedoch leichter zu erreichen sein als bei vielen anderen Schadstoffen.¹¹⁵ In Deutschland sind die Ammoniakemissionen, die zu 95 % aus der Landwirtschaft stammen, zwischen 1990 und 2020 um 181.000 Tonnen oder 25 % zurückgegangen.¹¹⁶

Abfallwirtschaft und Sonstiges

Die Abfallwirtschaft und Sonstiges ist zwar eine Rubrik im Rahmen des Klimaschutzgesetzes, es gibt aber keine offensichtli-

chen Ammoniakwendungen, die sich auf Aktivitäten innerhalb dieser Kategorie beziehen.

113 Ausfelder, Oze Herrmann, und López González, *Perspective Europe 2030*; Faria, „Renaissance of Ammonia Synthesis for Sustainable Production of Energy and Fertilizers“.

114 Ausfelder, Oze Herrmann, und López González, *Perspective Europe 2030*.

115 Wyer u. a., „Ammonia Emissions from Agriculture and Their Contribution to Fine Particulate Matter“.

116 Umweltbundesamt, „Ammoniak-Emissionen“.

06 Die zukünftige Ammoniak- wirtschaft

Die zukünftige Ammoniakwirtschaft

Nach Angaben der Internationalen Organisation für erneuerbare Energien (auf Englisch International Renewable Energy Agency, IRENA) lag die weltweite Produktion von Ammoniak im Jahr 2020 bei 183 Millionen Tonnen und wird bei den derzeitigen Trends (d. h. unter der Annahme, dass keine größeren Paradigmenwechsel stattfinden) bis 2030 auf 223 Millionen Tonnen und bis 2050 auf 333 Millionen Tonnen ansteigen (267 Millionen Tonnen werden dann für Düngemittel verwendet). Wenn Ammoniak als Wasserstoffträger, als Kraftstoff für den Verkehr und als Brennstoff für die stationäre Strom- und Wärmeerzeugung eingesetzt wird, rechnet die IRENA ab 2030 mit einer wesentlich schnelleren Wachstumsrate, sodass die weltweite Ammoniakknachfrage bis 2050 bis zu 688 Millionen Tonnen erreichen wird.¹¹⁷ In Verbindung mit einer umfassenden Elektrifizierung könnte die massenhafte Einführung von Am-

moniak Anwendungen in allen Bereichen – Fertigung, Verkehr, Bauwesen usw. – eine vollständige Umgestaltung unserer Gesellschaft ermöglichen, die zu einer saubereren, wohlhabenderen und zukunftsfähigeren Welt führt.

Die massenhafte Einführung von Ammoniak Anwendungen könnte zu einer saubereren, wohlhabenderen und zukunftsfähigeren Welt führen

Herausforderungen

Zunächst ist es wichtig, festzustellen, dass eine wesentliche Umstellung von fossiler Kohlenstoffenergie auf grüne Ammoniak-Energie als Hauptgrundlage unserer Wirtschaft und Gesellschaft eine sorgfältige Abwägung der sich daraus ergebenden Klima- und Umweltauswirkungen erfordern wird. Ebenso wie der globale Kohlenstoffkreislauf ein komplexes Geflecht biogeochemischer Prozesse umfasst, ist auch der planetarische Stickstoffkreislauf komplex und nicht vollständig erforscht. Es ist von entscheidender Bedeutung, dass eine durch Kohlendioxidemissionen verursachte Krise nicht durch eine weitere Krise ersetzt wird, die durch Ammoniak- und Stickoxidemissionen hervorgerufen wird. Die anthropogene Stickstofffixierung stellt bereits eine Menge an fixierten Stickstoffverbindungen pro Jahr dar, die in etwa den „natürlichen“ Prozessen entspricht. Mit anderen Worten: Die Gesamtbelastung der Kreislauf- und Wiederemissionssysteme der Erde hat sich in den letzten 100 Jahren, seit die Haber-Bosch-Technologie in großem Umfang eingesetzt wird, bereits verdoppelt. Viele der Auswirkungen der Einträge dieser Stoffe in die Umwelt sind bisher noch unbekannt, insbesondere im Hinblick auf die Auswirkungen der steigenden Nitratkonzentrationen auf die marinen Ökosysteme.¹¹⁸

Investitionen begrenzt, die Lernkurve bezüglich klimafreundlicher Technologien verlangsamt und den Wendepunkt für wettbewerbsfähiges erneuerbares Ammoniak verzögert. Der zweite Engpass ist der Mangel an Elektrolyseur-Produktionskapazitäten, die Berichten zufolge im Jahr 2020 bei 2,1 GW pro Jahr lagen – etwa 40-65 GW pro Jahr sind die Kapazitäten, die erforderlich sind, um die 566 Millionen Tonnen erneuerbares Ammoniak pro Jahr zu produzieren, die im optimistischsten Treibhausgas-Szenario der IRENA für 2050 benötigt werden.¹¹⁹

In erster Linie geht es darum, die Umstellung auf grünes Ammoniak überhaupt erst zu ermöglichen

Herstellung und Verwendung

In erster Linie geht es darum, die Umstellung auf grünes Ammoniak überhaupt erst zu ermöglichen. Die IRENA erkennt vier große Engpässe in den Lieferketten für grünes Ammoniak. Der erste ist das Fehlen klarer staatlicher Anreize zur Verringerung der Kohlendioxidemissionen, was Zweifel hervorruft,

Der dritte Engpass ist die fehlende Transportinfrastruktur für Ammoniak, die bis 2050 um das 10- bis 15-fache ausgebaut werden muss – dies erfordert jährliche Investitionen in die Ammoniak-Lieferkette in Höhe von mehreren zehn Milliarden USD, insbesondere für Lagerung und Transport. Bis 2050 werden 235 Schiffe mit einem Fassungsvermögen von je 85.000 Kubikmetern (d.h. 58.000 Tonnen Ammoniak) benötigt werden, um die 354 Millionen Tonnen Ammoniak aufzunehmen, die zusätzlich um die Welt transportiert werden müssen: Das bedeutet, dass von heute bis 2050 etwa alle zwei Monate ein Schiff für den Ammoniaktransport gebaut (oder vom Flüssiggastransport

117 IRENA und AEA, *Innovation Outlook: Renewable Ammonia*.

118 MacFarlane u. a., „A Roadmap to the Ammonia Economy“.

119 IRENA und AEA, *Innovation Outlook: Renewable Ammonia*.

umgerüstet) werden muss. Schließlich muss Ammoniak noch von zwischenstaatlichen Instanzen (der Internationalen Seeschiffahrtsorganisation IMO) als Schiffskraftstoff zugelassen werden, um eine breite weltweite Nutzung zu ermöglichen.¹²⁰

Die genaue Form der künftigen grünen Ammoniakwirtschaft und die genauen Mengen an grünem Ammoniak, die produziert und gehandelt werden sollen, hängen natürlich von der künftigen Politik und der Marktakzeptanz ab, die schwer vorherzusagen sind. Die wichtigsten Fragen stehen im Zusammenhang mit der Entwicklung des Rechtsrahmens für den Klimaschutz und politische Entscheidungen über die Anwendungsbereiche der dekarbonisierten Rohstoffe und grünen Energieträger.

Transport und Lagerung

Nach Angaben der Internationalen Vereinigung des Rheinschiffregisters besteht die europäische Flotte von Binnenschiffen aus 1680 Schiffen, von denen 389 für die Beförderung besonders giftiger und gefährlicher Stoffe geeignet sind, 878 für die Beförderung weniger gefährlicher Stoffe (in der Regel entzündliche Brennstoffe oder Säuren) und 76 für die Beförderung von

Gas (344 fallen in die Kategorie „Sonstige“). Es ist nicht klar, wie viele von ihnen über Drucktanks verfügen, in denen Ammoniak transportiert werden kann (etwa 8,6 bar sind erforderlich, damit Ammoniak bei Raumtemperatur flüssig bleibt), oder problemlos umgerüstet werden können, um sie zu beschaffen.¹²¹

Ein Teil des Ammoniaks könnte mit dem Zug transportiert werden. Nach Angaben des Verbands der Güterwagenhalter in Deutschland beträgt der Anteil der Kesselwagen, die für den Transport von Gas geeignet sind jedoch nur 30 % – und ein Großteil davon ist für den Transport von Ammoniak nicht geeignet.¹²² Der Straßentransport könnte eine weitere realistische Option darstellen.

Ein weiterer wichtiger Punkt bei der Verwendung von Ammoniak ist die Lagerung. Aus politischen, rechtlichen und regulatorischen Gründen dürfte der Bau neuer Großlager schwierig sein, nicht zuletzt wegen der Toxizität von Ammoniak. Mit entsprechenden Vorsichtsmaßnahmen könnten sogar bestehende Lagereinrichtungen erweitert oder umgewidmet werden, zum Beispiel Erdölproduktenlager.

Chancen

Ein Forscherteam der University of Monash School of Chemistry hat einen dreistufigen Fahrplan für eine künftige grüne Ammoniakwirtschaft vorgeschlagen. Nach diesem Konzept basiert der erste Schritt auf einer Ausweitung der heutigen Haber-Bosch-Ammoniakproduktion unter Verwendung von CCUS oder Offsets (Klimakompensationsmechanismen). In der zweiten Stufe wird der Haber-Bosch-Prozess auf erneuerbaren Wasserstoff umgestellt. In der dritten Stufe wird das Haber-Bosch-Verfahren durch den Einsatz der direkten elektrochemischen Umwandlung von reinem Stickstoff in Ammoniak völlig überflüssig. Diese Technologie der dritten Generation muss in jeder Größenordnung – von Kilowatt bis zu Gigawatt – und in stark verteilter Form eingesetzt werden können. Sie wird den Beginn einer groß angelegten Umstellung auf Kraftstoff- und Energiespeicheranwendungen auf der Grundlage von grünem Ammoniak ermöglichen, die voraussichtlich um 2040 beginnen wird.¹²³

Ein globaler Markt

In ihrem optimistischsten Szenario geht die IRENA davon aus, dass die neuen Märkte für Ammoniak von heute null auf insgesamt 15 Millionen Tonnen im Jahr 2030 und 354 Millionen Tonnen im Jahr 2050 wachsen werden. Davon werden 127 Millionen Tonnen Ammoniak (entspricht 2.363 Petajoule) als Wasserstoffträger international gehandelt werden, hauptsächlich

als chemischer Rohstoff und industrieller Brennstoff. 197 Millionen Tonnen Ammoniak werden im Jahr 2050 als Schiffskraftstoff verbraucht werden. Dazu sollen 30 Millionen Tonnen als Brennstoff für die Stromerzeugung verwendet werden. (Dies bezieht sich auf die oben genannte Politik Japans, obwohl sie, wie oben erwähnt, objektiv nicht wirklich effizient oder für das erklärte Ziel gut geeignet ist und aufgegeben werden kann).¹²⁴

Das optimistische Szenario der IRENA geht davon aus, dass mehr als 80% von den 688 Millionen Tonnen Ammoniak in 2050 erneuerbar sein werden

Das optimistische Szenario der IRENA geht davon aus, dass von dem gesamten im Jahr 2050 produzierten und gehandelten Ammoniak (688 Millionen Tonnen) mehr als 80 % – oder 566 Millionen Tonnen pro Jahr – erneuerbar sein werden. Der größte Teil davon wird aus der Elektrolyse stammen, mit einem zusätzlichen Angebot aus der biomassebasierten Produktion während einer Übergangsphase, in der Harnstoff ein dominierendes Düngemittel bleibt. Die Ammoniakproduktion auf fossiler Basis würde von 183 Millionen Tonnen im Jahr 2020 auf

120 IRENA und AEA.

121 IVR, „Schiffs InformationsSystem“.

122 VPI, „Jahresbericht 2021-2022“.

123 MacFarlane u. a., „A Roadmap to the Ammonia Economy“.

124 IRENA und AEA, *Innovation Outlook: Renewable Ammonia*.

122 Millionen Tonnen im Jahr 2050 schrumpfen, davon 71 Millionen Tonnen mit CCUS und nur 51 Millionen Tonnen ohne. Beim Business-as-usual-Szenario hingegen würden im Jahr 2050 492 Millionen Tonnen Ammoniak auf fossiler Basis produziert werden.¹²⁵ Diese äußerst unhaltbare Zahl verdeutlicht, wie wichtig es ist, heute schnell zu handeln.

Aktuelle und zukünftige Produktionskosten

Nach Angaben der Internationalen Energieagentur (IEA) wird es noch eine Weile dauern, bis grüner Wasserstoff wirtschaftlich tragfähig wird. Die Verwendung von Strom aus erneuerbaren Energiequellen zur Herstellung von Wasserstoff kostet aktuell 3 bis 8 USD pro Kilogramm (2,75-7,34 Euro). Die Gesteuerungskosten der Wasserstoffproduktion aus Erdgas liegen bei 0,5 bis 1,7 USD pro Kilogramm, und durch den Einsatz von Technologien zur Kohlenstoffabscheidung, -nutzung und -speicherung (CCUS) zur Verringerung der Treibhausgasemissionen bei der Wasserstoffproduktion steigen sie auf etwa 1 bis 2 USD pro Kilogramm.¹²⁶

Glücklicherweise besteht ein erheblicher Spielraum für die Senkung der Produktionskosten durch technologische Innovationen und einen breiteren Ausbau. Der Preis für Wasserstoff aus erneuerbaren Energien könnte bis 2030 in Regionen mit hervorragenden erneuerbaren Ressourcen auf 1,3 bis 3,5 USD pro Kilogramm und bis 2050 auf 1 bis 3 USD pro Kilogramm sinken.¹²⁷ Wasserstoff ist potenziell recht einfach zu produzieren, da die einzigen Inputs Wasser und Energie sind. Groß angelegte Anlagen für erneuerbare Energien an Orten mit viel Sonne oder Wind (oder vorzugsweise beidem) könnten industrielle Mengen reinen Wasserstoffs zu praktisch null Grenzkosten produzieren.

Glücklicherweise besteht ein erheblicher Spielraum für die Senkung der Produktionskosten durch technologische Innovationen und einen breiteren Ausbau

Die Kosten für die Produktion von erneuerbarem Ammoniak in neuen Anlagen liegen aktuell nach Schätzungen der IRENA im Bereich von 720-1.400 USD pro Tonne und werden bis 2050 auf 310-610 USD pro Tonne sinken. Bestehende Ammoniakproduktionsanlagen könnten jedoch ein Hybridverfahren mit fossilem und erneuerbarem Wasserstoff nutzen, um die entsprechenden Kosten zu senken – die Kosten der Produktion in Hybridanlagen

werden auf 300-400 USD pro Tonne im Jahr 2025 geschätzt und sollen bis 2040 auf etwa 250 USD pro Tonne sinken.¹²⁸

Laut einer Studie, die unter der Schirmherrschaft wichtiger Branchenakteure durchgeführt wurde, dürfte erneuerbares Ammoniak vor 2050 billiger werden als Ammoniak auf fossiler Basis, insbesondere wenn die Kohlenstoffabscheidung, -nutzung und -sequestrierung (CCUS) berücksichtigt wird, die heute Kosten von 110-340 USD pro Tonne verursacht. Die IRENA geht davon aus, dass die Kosten für Ammoniak aus fossilen Brennstoffen mit CCUS im Jahr 2025 ähnlich hoch sein werden, wie die Kosten für erneuerbares Ammoniak aus Hybridanlagen und im Jahr 2050 höher als die Kosten für erneuerbares Ammoniak aus einigen neuen Anlagen. Die Kosten für erneuerbares Ammoniak werden hauptsächlich von den Kosten für erneuerbaren Wasserstoff abhängig sein, der mehr als 90 % der Kosten für die Ammoniakproduktion ausmacht. Die beiden anderen wichtigen Schritte der Ammoniakproduktion – die Stickstoffreinigung und das Haber-Bosch-Verfahren – machen nur einen geringen Teil der Gesamtausgaben aus.¹²⁹

Künftige Kostensenkungen bei der Erzeugung von Wasserstoff aus erneuerbaren Energieträgern hängen hauptsächlich von der Senkung der Kosten für erneuerbare Energien und der Kosten für Elektrolyseure sowie von Effizienzsteigerungen und einer optimierten Speicherung, Pufferung, Dimensionierung und Flexibilität des Ammoniak-Synthesekreislaufs von Haber-Bosch ab. Die Anzahl der Betriebsstunden pro Jahr spielt eine Schlüsselrolle bei der Bestimmung der Produktionskosten, da jede Erhöhung des Nutzungsgrades dieser kapitalintensiven Anlagen direkt die Produktkosten senkt. Dies kann eine Herausforderung für Projekte sein, die variable erneuerbare Stromspeisungen verwenden, aber eine ergänzende Kombination von Wind- und Solarenergie kann dieses Problem abmildern – an optimalen Standorten könnte erneuerbares Ammoniak ab 2030 mit fossilem Ammoniak mit CCUS kostenmäßig wettbewerbsfähig sein.¹³⁰

Die IEA geht auch davon aus, dass kohlenstoffarme Kraftstoffe, die aus flüssigem Erdgas mit CCUS hergestellt werden, am billigsten sind. Die IEA schätzt die Kosten für blauen Wasserstoff auf 8-16 USD/GJ (0,9-1,9 USD/kg) und für blaues Ammoniak auf 12-24 USD/GJ (230-440 USD/t) in den Regionen, die im Jahr 2030 Zugang zu Erdgas und Kohlendioxid-Speicherkapazitäten haben. Allerdings sinken auch die Produktionskosten für die Elektrolyse rasch, da Strom aus erneuerbaren Energien billiger wird und durch die Vergrößerung der Elektrolyseure Größenvorteile erzielt werden. So dürften die Kosten für grünen Wasserstoff bis 2030 in günstigen Regionen auf 13-19 USD/GJ (1,5-2,2 USD/kg) und die Kosten für grünes Ammoniak auf 22-33 USD/GJ (400-620 USD/Tonne) fallen. Mit anderen Wor-

125 IRENA und AEA.

126 IEA, „Global Hydrogen Review 2021“.

127 IEA.

128 IRENA und AEA, *Innovation Outlook: Renewable Ammonia*.

129 Alfa Laval u. a., „Ammonfuel“.

130 Alfa Laval u. a.

ten: Wie in der oben erwähnten Studie der Industrie werden die Kosten für kohlenstoffarmes Ammoniak bis 2030 mit denen für die fossile Erzeugung vergleichbar sein. Fossile Brennstoffe werden jedoch im Jahr 2030 noch billiger sein als jede Art von Ammoniak als Brennstoff.¹³¹

Transport und Lagerung

Ammoniak ist eine der weltweit am häufigsten industriell hergestellten chemischen Verbindungen, und es gibt gut etablierte Infrastrukturen und Verfahren für seine Lagerung und seinen Transport.¹³² Die IEA schätzt die Kosten für den Transport von flüssigem Wasserstoff per Schiff über eine Entfernung von 10 000 km auf 14-19 USD/GJ, während sie für Ammoniak nur 2-3 USD/GJ betragen. Die sich daraus ergebenden voraussichtlichen Gesamtkosten für die Versorgung im Jahr 2030, einschließlich Produktion und Seetransport, betragen 22-35 USD/GJ (2,6-4,2 USD/kg) für kohlenstoffarmen Wasserstoff bzw. 14-27 USD/GJ (260-500 USD/Tonne) für kohlenstoffarmes Ammoniak.¹³³

Der Transport von Wasserstoff und Ammoniak über Pipelines ist eine ausgereifte Technologie und macht aktuell nur einen relativ geringen Teil der Gesamtversorgungskosten aus. Der interkontinentale Ammoniaktransport ist ebenfalls gut entwickelt und benutzt Chemikaliertanker und halbgekühltes Flüssiggas (LPG).

Der Transport von Wasserstoff und Ammoniak über Pipelines ist eine ausgereifte Technologie

Empfehlungen für die Politik

Damit ein umfassender Ersatz fossiler Brennstoffe durch grüne alternative Kraftstoffe realistisch ist, müssen mittelfristig eine Reihe von Hindernissen überwunden werden. Das erste Problem ist die Verfügbarkeit von grüner Energie, die zur Herstellung dieser Kraftstoffe benötigt wird. Wie wir oben gesehen haben, wurden im Jahr 2021 57,6 % des Stroms und 80,7 % der Energie in Deutschland aus fossilen Quellen erzeugt. Weitere Probleme sind der relative Mangel an privaten Investitionen (und öffentlicher Investitionsförderung), an unterstützenden Vorschriften und an einer unterstützenden Politik, zum Beispiel der Bereitschaft, die Hürden für den Zugang zu bezahlbarem Strom aus erneuerbaren Energien drastisch zu senken.

Wie bei allen anderen Wegen zur Dekarbonisierung können auch bei grünem Wasserstoff Nachfrage und Angebot durch geeignete Vorschriften, Mandate und politische Maßnahmen gefördert werden. Zu den von der IRENA vorgeschlagenen Beispielen gehören Normen für erneuerbare Brennstoffe, Kohlenstoffsteuern, Anreize wie Unterstützung bei der Pro-

jektfinanzierung und kostengünstige Finanzierungen, langfristige garantierte Preisuntergrenzen, Differenzverträge, Cap-and-Trade-Systeme, niedrigere Steuern auf erneuerbare Kraftstoffe, Zertifizierungssysteme für kohlenstoffarmes Ammoniak und Informationskampagnen.¹³⁴

Ein wichtiger Schritt ist die Festlegung und Harmonisierung von Methoden für die Kohlenstoffintensität und die Lebenszyklusanalyse sowie andere Standards und Benchmarks. Diese sollten aussagekräftige Treibhausgasemissionen in der Lieferkette einbeziehen, zum Beispiel Methanemissionen erzeugt durch die Produktion von Ammoniak auf fossiler Basis mit Kohlenstoffminderung. Starke, stabile und nachhaltige politische Maßnahmen sind von entscheidender Bedeutung, da sich Investitionen in langlebige, kapitalintensive Technologien für erneuerbare Energien ohne Vertrauen nicht auf dem Markt verbreiten können.¹³⁵

131 Frankl und Hannula, „The Role of Low-Carbon Fuels in the Clean Energy Transitions of the Power Sector“.

132 Valera-Medina u. a., „Ammonia for Power“.

133 Frankl und Hannula, „The Role of Low-Carbon Fuels in the Clean Energy Transitions of the Power Sector“.

134 IRENA und AEA, *Innovation Outlook: Renewable Ammonia*.

135 IRENA und AEA, *Innovation Outlook: Renewable Ammonia*.

07

Fazit

Fazit

Nur 19,7 % des deutschen Endenergieverbrauchs wurden 2021 durch erneuerbare Energiequellen gedeckt (eine sehr geringe Verbesserung gegenüber den 19,3 % im Jahr 2020). **Bei dem derzeitigen Tempo kommen wir nicht zügig genug voran.** Zudem hat die aktuelle geopolitische Lage gezeigt, wie unklug es ist, sich bei der Energieversorgung von Diktaturen abhängig zu machen. Glücklicherweise gibt es heute viele Initiativen, die ernsthaft versuchen, das Klimawandelproblem in den Griff zu bekommen – nicht zuletzt Versuche, die Elektrifizierung zu beschleunigen und Alternativen für schwer zu dekarbonisierende Sektoren zu finden. **Wie im Leitprojekt TransHyDE des Bundesministeriums für Bildung und Forschung erkannt wurde, ist grünes Ammoniak ein untersuchenswerter Energieträger, der in dieser Hinsicht etwas bewirken kann.**

Diese Studie, die Teil der Arbeit des IKEMs im Projekt CAMPFIRE 10_1 (CF10_1.) im Rahmen vom Leitprojekt TransHyDE ist, analysierte die verschiedenen Arten von grünen Kraftstoffen (Biokraftstoffe und synthetische Kraftstoffe) und viele ihrer Auswirkungen auf die Wirtschaft, die Umwelt und das Klima. **Aussagekräftige Schlussfolgerungen sind schwer zu ziehen, da die meisten dieser Kraftstoffe noch nicht in großem Umfang eingesetzt werden** und es daher an gründlichen Analysen und Vergleichen mangelt. Es gibt jedoch Grund zu der Annahme, dass mehrere dieser Kraftstoffe die Lücke schließen können, die die Elektrifizierung allein nicht decken kann.

Ein Schwerpunkt der Studie waren die praktischen Marktpotenziale und Einsatzmöglichkeiten von Ammoniak in den verschiedenen Wirtschaftssektoren im Sinne des deutschen Klimaschutzgesetzes. **Dabei wurde festgestellt, dass Ammoniak in vielerlei Hinsicht ein erstklassiger Kandidat ist, um als grünen Energieträger der Zukunft Strom zu ergänzen.** Schließlich wurde ein zukünftiger großtechnischer Einsatz von Ammoniak untersucht, wobei die Herausforderungen und Chancen der sozialen und wirtschaftlichen Veränderungen, die ein solcher Einsatz erfordern würde, berücksichtigt wurden.

Die wichtigsten Variablen, die dabei betrachtet wurden, waren Sicherheit, Verfügbarkeit, Kosten und die Auswirkungen auf Umwelt und Klima. Alle diese Variablen sind derzeit schlechter als vergleichbare Werte für fossile Brennstoffe, mit Ausnahme der letzten (und selbst diese sind nicht so eindeutig, wie man erwarten könnte). Dank des raschen technologischen Fortschritts besteht jedoch Hoffnung auf eine rechtzeitige Einführung von alternativen Kraftstoffen, um die drohende Klimakatastrophe aufzuhalten. Dies gilt sowohl für erneuerbares Ammoniak als auch für erneuerbaren Wasserstoff, für den ersterer häufig als Träger dienen dürfte, und sogar für grüne kohlenstoffbasierte Kraftstoffe.

Um das Beste aus den Möglichkeiten zu machen, müssen die Regierungen die Produktion und den Einsatz von Ammoniak und Wasserstoff in jeder Hinsicht unterstützen. Eine Kohlenstoffsteuer und ein angemessenes Cap-and-Trade-System wären in dieser Hinsicht sehr hilfreich, aber es bleibt abzuwarten, wie realistisch ihre tatsächliche Umsetzung ist oder wie lange die dauert. Zu den leichter umzusetzenden Maßnahmen gehören **verbindliche Verpflichtungen** bezüglich des Einsatzes von erneuerbaren Kraftstoffen (sowie vorgeschriebene Einschränkungen oder Verbote der Nutzung fossiler Brennstoffe), **finanzielle Anreize, Normung und Kennzeichnung** für kohlenstoffarme Kraftstoffe und Prozesse und nicht zuletzt Informationskampagnen.

Nur ein breites Spektrum an Maßnahmen und Vorschriften – proaktiv im Hinblick auf grüne Kraftstoffe und Elektrizität und prohibitiv im Hinblick auf den Einsatz fossiler Kraftstoffe – wird ein Umfeld schaffen, in dem Ammoniak und andere grüne Energieträger gedeihen und zur Eindämmung des Klimawandels beitragen können. Ein zügiger technischer Fortschritt wird dazu beitragen, dass grüne Energieträger preislich mit fossilen Brennstoffen konkurrieren können, was auch der Innovation durch den freien Markt einen Schub verleiht. Im Idealfall wird die Kombination dieser Faktoren dazu beitragen, eine sauberere, wohlhabendere und sicherere Zukunft für Deutschland, Europa und darüber hinaus einzuleiten.

08

Literatur- verzeichnis

Literaturverzeichnis

- Affif, Ahmed, Nikdalila Radenahmad, Quentin Cheok, Shahriar Shams, Jung H. Kim, und Abul K. Azad. „Ammonia-Fed Fuel Cells: A Comprehensive Review“. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 60 (1. Juli 2016): 822–35. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.120>.
- Airbus. „The ZEROe Demonstrator Has Arrived“, 22. Februar 2022. <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2022-02-the-zeroe-demonstrator-has-arrived>.
- Airgas Specialty Products. „Ammonia Applications: Heat Treatment“. Zugegriffen 8. Februar 2023. <https://airgasspecialtyproducts.com/applications/ammonia-applications/anhydrous-ammonia-heat-treatment/>.
- Albrecht, Uwe, Michael Ball, Ulrich Bünger, Christopher Kutz, und Jan Michalski. „Emissionsfreie Stahlerzeugung: Metastudie zu den technischen, technologischen und wirtschaftlichen Parametern für die Umstellung der deutschen Stahlindustrie auf eine emissionsarme Stahlproduktion auf Basis von grünem Wasserstoff“. Berlin: Deutscher Wasserstoff und Brennstoffzellen-Verband (DWV), März 2022. https://www.dwv-info.de/wp-content/uploads/2015/06/2022-03-30-HySteel-LBST_Emissionsfreie_Stahlerzeugung.pdf.
- Alfa Laval, Hafnia, Haldor Topsøe, Vestas, und Siemens Gamesa. „Ammonfuel: an industrial view of ammonia as a marine fuel“, August 2020. <https://www.alfalaval.com/globalassets/documents/industries/marine-and-transportation/marine/fcm-lff/ammonia-as-fuel/ammonfuel-report-version-09.9-august-3.pdf>.
- Alternative Fuels Data Center. „Fuel Properties Comparison“. Washington, D.C.: Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, United States Energy Department. Zugegriffen 1. Februar 2023. <https://afdc.energy.gov/fuels/properties>.
- AMF TCP. „Ammonia“. Technology Collaboration Programme on Advanced Motor Fuels, 2022. https://www.iea-amf.org/content/fuel_information/ammonia.
- . „Diesel and gasoline: Engine technology“. Technology Collaboration Programme on Advanced Motor Fuels, 2022. https://www.iea-amf.org/content/fuel_information/diesel_gasoline.
- . „Methanol“. Technology Collaboration Programme on Advanced Motor Fuels, 2022. https://iea-amf.com/content/fuel_information/methanol.
- Arora, Pratham, Andrew F.A. Hoadley, Sanjay M. Mahajani, und Anuradda Ganesh. „Small-Scale Ammonia Production from Biomass: A Techno-Enviro-Economic Perspective“. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 55, Nr. 22 (8. Juni 2016): 6422–34. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b04937>.
- Ausfelder, Florian, Eghe Oze Herrmann, und Luisa Fernanda López González. *Perspective Europe 2030: Technology options for CO₂-emission reduction of hydrogen feedstock in ammonia production*. Frankfurt am Main: DECHEMA e.V, 2022. https://dechema.de/dechema_media/Downloads/Positionspapiere/Studie+Ammoniak.pdf.
- Bleyl, Fenna, Ute Rohr, Zac Cesaro, Ian Wilkinson, und Andreas Eisfelder. „Power-to-X: A Closer Look at e-Ammonia“. Technical document. Siemens Energy, 2021. file:///C:/Users/D%C3%A1mirBelltheusAvdic/Desktop/20211122_WP_eAmmonia.pdf.
- BloombergNEF. „Japan’s Ammonia-Coal Co-Firing Strategy a Costly Approach to Decarbonization, Renewables Present More Economic Alternative“, 28. September 2022. <https://about.bnef.com/blog/japans-ammonia-coal-co-firing-strategy-a-costly-approach-to-decarbonization-renewables-present-more-economic-alternative/>.
- BMVI. „Innovationsprogramm Logistik 2030“. Bundesminister für Verkehr und digitale Infrastruktur, September 2019. https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/innovationsprogramm-logistik-2030.pdf?__blob=publicationFile.
- BMWi. „Die Nationale Wasserstoffstrategie“. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Juni 2020. https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/downloads/files/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf;jsessionid=90B8BE40C5BAFAFBAD9470B7E64F9230.live381?__blob=publicationFile&v=1.
- . „Handlungskonzept Stahl: Für eine starke Stahlindustrie in Deutschland und Europa“. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Juli 2020. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Wirtschaft/handlungskonzept-stahl.pdf?__blob=publicationFile&v=10.

- Breyer, Christian, Mahdi Fasihi, Matteo Micheli, Solomon Oyewo Ayobami, Patrick Schmidt, und Werner Weindorf. „E-Kerosene for Commercial Aviation“. Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH, September 2022. https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2022/STUDY_E-Kerosene_for_Commercial_Aviation.pdf.
- Brinks, Hendrik, und Erik Andreas Hektor. „Ammonia as a Marine Fuel“. Hamburg: DNV GL – Group Technology & Research, September 2020.
- Bundesministerium für Bildung und Forschung. „Wie das Leitprojekt TransHyDE eine Wasserstoff-Transport-Infrastruktur entwickeln will“. Wasserstoff-Leitprojekte. Zugegriffen 20. Dezember 2021. <https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/leitprojekte/transhyde>.
- . „Wissenswertes zu grünem Wasserstoff“. Bundesministerium für Bildung und Forschung - BMBF, 15. Mai 2022. <https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/kurzmeldungen/de/wissenswertes-zu-gruenem-wasserstoff.html>.
- Bundesregierung. „Regierungserklärung: Aufbruch zur klimaneutralen Gesellschaft“, 2022. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutz-1992452>.
- Burton, Lily. „Air Conditioning: A Global Contradiction“. Illinois Science Council, 14. November 2022. <https://www.illinois-science.org/2022/11/air-conditioning-a-global-contradiction/>.
- Das Europäische Parlament und der Rat. Richtlinie 2014/94/EU über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe (2014). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:02014L0094-20211112&from=EN>.
- Dash, Santanu Kumar, Suprava Chakraborty, Michele Roccotelli, und Umesh Kumar Sahu. „Hydrogen Fuel for Future Mobility: Challenges and Future Aspects“. *Sustainability* 14, Nr. 14 (Januar 2022): 8285. <https://doi.org/10.3390/su14148285>.
- Deutsche Bahn. „Neuer Wasserstoffzug und Speichertrailer vorgestellt“, 5. Mai 2022. <https://nachhaltigkeit.deutschebahn.com/de/news/deutsche-bahn-siemens-praesentieren-wasserstoffzug/>.
- Deutscher Bundestag. Gesetz zur Einführung eines Bundes-Klimaschutzgesetzes und zur Änderung weiterer Vorschriften (2019). http://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBI&jumpTo=bgbl119s2513.pdf.
- Deutschlandfunk. „Nord Stream 2 - Wie abhängig ist Deutschland von russischem Erdgas?“, 25. Februar 2022. <https://www.deutschlandfunk.de/nord-stream-2-gas-kritik-abhaengig-100.html>.
- DLR. „Brennstoffzellen senken Schiffsemissionen“. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 18. Mai 2021. https://www.dlr.de/content/de/artikel/news/2021/02/20210518_brennstoffzellen_senken_schiffsemissionen.html.
- . „Zukünftige maritime Treibstoffe und deren mögliche Importkonzepte“. Geesthacht: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) Institut für Maritime Energiesysteme, Mai 2022. https://www.dlr.de/content/de/downloads/publikationen/broschueren/2022/kurzstudie-maritime-treibstoffe.pdf;jsessionid=496B8A0FA4C91FC-B60C4092CC4A3EA70.delivery-replication2?_blob=publicationFile&v=4.
- Douglas, Leah. „U.S. Corn-Based Ethanol Worse for the Climate than Gasoline, Study Finds“. *Reuters*, 14. Februar 2022, Abschn. Environment. <https://www.reuters.com/business/environment/us-corn-based-ethanol-worse-climate-than-gasoline-study-finds-2022-02-14/>.
- Eckinger, Eva. „John Deere 6195M: Traktor läuft mit Ammoniak“. *agrarheute*, 10. Juli 2022. <https://www.agrarheute.com/technik/john-deere-6195m-traktor-laeuft-ammoniak-595494>.
- ENGIE. „E-Fuels, What Are They?“, 21. April 2022. <https://www.engie.com/en/news/e-fuels-what-are-they>.
- Esqué, Axel, Adam Mitchell, Kritika Rastogi, und Robin Riedel. „Decarbonizing aviation: Making net zero possible“. McKinsey & Company, 15. Juli 2022. <https://www.mckinsey.com/industries/aerospace-and-defense/our-insights/decarbonizing-the-aviation-sector-making-net-zero-aviation-possible>.

- Europäische Union. Verordnung (EU) 2021/1119 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Juni 2021 zur Schaffung des Rahmens für die Verwirklichung der Klimaneutralität und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 401/2009 und (EU) 2018/1999 („Europäisches Klimagesetz“) (2021). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=OJ:L:2021:243:TOC>.
- Faber, Jasper, Shinichi Hanayama, Shuang Zhang, Paula Pereda, Bryan Comer, Elena Hauerhof, Wendela Schim van der Loeff, u. a. „Fourth IMO GHG Study 2020“. London: International Maritime Organization, 2020. https://greenvoyage2050.imo.org/wp-content/uploads/2021/07/Fourth-IMO-GHG-Study-2020-Full-report-and-annexes_compressed.pdf.
- Faria, Jimmy A. „Renaissance of Ammonia Synthesis for Sustainable Production of Energy and Fertilizers“. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* 29 (1. Juni 2021): 100466. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2021.100466>.
- Frankl, Paolo, und Ilkka Hannula. „The Role of Low-Carbon Fuels in the Clean Energy Transitions of the Power Sector“. Paris: International Energy Agency, Februar 2022. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/01ca16c8-e493-475c-81c4-04ac5d3b9882/Theroleoflow-carbonfuelsinthecleanenergytransitionsofthepowersector.pdf>.
- Fraunhofer-Gesellschaft. „Weltweit erste Hochtemperatur-Brennstoffzelle mit Ammoniak für Schiffe“. Fraunhofer-Gesellschaft, 1. März 2021. <https://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2021/maerz-2021/weltweit-erste-hochtemperatur-brennstoffzelle-mit-ammoniak-fuer-schiffe.html>.
- Ghavam, Seyedezhoma, Maria Vahdati, I. A. Grant Wilson, und Peter Styring. „Sustainable Ammonia Production Processes“. *Frontiers in Energy Research* 9 (29. März 2021): 580808. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.580808>.
- Giddey, S., S. P. S. Badwal, C. Munnings, und M. Dolan. „Ammonia as a Renewable Energy Transportation Media“. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 5, Nr. 11 (6. November 2017): 10231–39. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b02219>.
- Hasan, Muhammad Heikal, Teuku Meurah Indra Mahlia, M. Mofijur, I. M. Rizwanul Fattah, Fitri Handayani, Hwai Chyuan Ong, und A. S. Silitonga. „A Comprehensive Review on the Recent Development of Ammonia as a Renewable Energy Carrier“. *Energies* 14, Nr. 13 (Januar 2021): 3732. <https://doi.org/10.3390/en14133732>.
- Holst, Marius, Stefan Aschbrenner, Tom Smolinka, Christopher Voglstätter, und Gunter Grimm. „Cost Forecast For Low-Temperature Electrolysis – Technology Driven Bottom-Up Prognosis For PEM And Alkline Water Electrolysis Systems“. Freiburg: Institute for Solar Energy Systems ISE, 2021. <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/cost-forecast-for-low-temperature-electrolysis.pdf>.
- Home of Steel. „Grüne Welle für die Stahlindustrie“, 25. Mai 2022. <https://www.home-of-steel.de/news/grune-welle-fur-die-stahlindustrie-1833>.
- IEA. „Biofuels – Analysis“, September 2022. <https://www.iea.org/reports/biofuels>.
- . „Energy Technology Perspectives 2020: Special Report on Carbon Capture Utilisation and Storage“. Paris: International Energy Agency, September 2020. https://iea.blob.core.windows.net/assets/181b48b4-323f-454d-96fb-0bb1889d96a9/CCUS_in_clean_energy_transitions.pdf.
- . „Global Hydrogen Review 2021“. Paris: International Energy Agency, Oktober 2021. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/5bd46d7b-906a-4429-abda-e9c507a62341/GlobalHydrogenReview2021.pdf>.
- IRENA und AEA. *Innovation Outlook: Renewable Ammonia*. International Renewable Energy Agency. Abu Dhabi, 2022. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/May/IRENA_Innovation_Outlook_Ammonia_2022.pdf.
- Ithisuphalap, Kemakorn, Hanguang Zhang, Lin Guo, Qingui Yang, Haipeng Yang, und Gang Wu. „Photocatalysis and Photoelectrocatalysis Methods of Nitrogen Reduction for Sustainable Ammonia Synthesis“. *Small Methods* 3, Nr. 6 (2019): 1800352. <https://doi.org/10.1002/smt.201800352>.
- IVR. „Schiffs InformationsSystem“. Internationale Vereinigung des Rheinschiffsregisters. Zugegriffen 28. Februar 2023. <https://www.ivr-eu.com/expertise/ivr-schiffs-informationsystem/?lang=de>.

- Kang, Lianwei, Weiguo Pan, Jiakai Zhang, Wenhuan Wang, und Congwei Tang. „A Review on Ammonia Blends Combustion for Industrial Applications“. *Fuel* 332 (15. Januar 2023): 126150. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126150>.
- KfW. „Merkblatt Energieeffizient Bauen und Sanieren: Zuschuss Brennstoffzelle“. Kreditanstalt für Wiederaufbau, 1. Juli 2021. [https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/F%C3%B6rderprogramme-\(Inlandsf%C3%B6rderung\)/PDF-Dokumente/6000003811_M_433_Brennstoffzelle.PDF](https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/F%C3%B6rderprogramme-(Inlandsf%C3%B6rderung)/PDF-Dokumente/6000003811_M_433_Brennstoffzelle.PDF).
- Kobayashi, Hideaki. „Power Generation by Combustion Using Ammonia“. Japan Science and Technology Agency, 2019. <https://www.jst.go.jp/EN/achievements/research/bt111-112.html>.
- Kopf, Andreas, Till Bunsen, und Matteo Craglia. „The Potential of E-fuels to Decarbonise Ships and Aircraft“. International Transport Forum Policy Papers. Paris: OECD Publishing, 24. Januar 2023.
- Laursen, R., D. Barcarolo, H. Patel, M. Dowling, M. Penfold, J. Faber, J. Király, R. van der Ven, E. Pang, und A. van Grinsven. „Potential of Ammonia as Fuel in Shipping“. Lissabon: European Maritime Safety Agency, 16. September 2022. <https://www.emsa.europa.eu/newsroom/latest-news/item/4833-potential-of-ammonia-as-fuel-in-shipping.html>.
- Lee, Boreum, Lea R. Winter, Hyunjun Lee, Dongjun Lim, Hankwon Lim, und Menachem Elimelech. „Pathways to a Green Ammonia Future“. *ACS Energy Letters* 7, Nr. 9 (9. September 2022): 3032–38. <https://doi.org/10.1021/acsenergylett.2c01615>.
- Ma, Yan, Jae Wung Bae, Se-Ho Kim, Matic Jovičević-Klug, Kejiang Li, Dirk Vogel, Dirk Ponge, Michael Rohwerder, Baptiste Gault, und Dierk Raabe. „Reducing Iron Oxide with Ammonia: A Sustainable Path to Green Steel“. *Advanced Science*, 30. März 2023. <https://doi.org/10.1002/advs.202300111>.
- MacFarlane, Douglas R., Pavel V. Cherepanov, Jaecheol Choi, Bryan H.R. Suryanto, Rebecca Y. Hodgetts, Jacinta M. Bakker, Federico M. Ferrero Vallana, und Alexandr N. Simonov. „A Roadmap to the Ammonia Economy“. *Joule* 4, Nr. 6 (17. Juni 2020): 1186–1205. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.04.004>.
- Mallouppas, George, Constantina Ioannou, und Elias Ar. Yfantis. „A Review of the Latest Trends in the Use of Green Ammonia as an Energy Carrier in Maritime Industry“. *Energies* 15, Nr. 4 (16. Februar 2022): 1453. <https://doi.org/10.3390/en15041453>.
- Mashruk, S., E. C. Okafor, M. Kovaleva, A. Alnasif, D. Pugh, A. Hayakawa, und A. Valera-Medina. „Evolution of N₂O Production at Lean Combustion Condition in NH₃/H₂/Air Premixed Swirling Flames“. *Combustion and Flame* 244 (1. Oktober 2022): 112299. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2022.112299>.
- Ming, Liu, Yang Mengyao, und Clara Ng Kay Leng. „Ammonia as a Marine Fuel: Bunkering, Safety and Release Simulations“. Singapore: Nanyang Technological University Singapore, Oktober 2022.
- Mitsushima, Shigenori, und Viktor Hacker. „Role of Hydrogen Energy Carriers“. In *Fuel Cells and Hydrogen*, 243–55. Elsevier, 2018. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811459-9.00011-6>.
- NOW GmbH. „Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie“. Zugegriffen 9. Februar 2023. <https://www.now-gmbh.de/foerderung/foerderprogramme/wasserstoff-und-brennstoffzelle/>.
- O’Malley, Jane, und Stephanie Searle. „Air Quality Impacts of Biodiesel in the United States“. Washington, D.C.: International Council on Clean Transportation, 17. März 2021. <https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/US-biodiesel-impacts-mar2021.pdf>.
- Palys, Matthew J, Hanchu Wang, Qi Zhang, und Prodromos Daoutidis. „Renewable Ammonia for Sustainable Energy and Agriculture: Vision and Systems Engineering Opportunities“. *Current Opinion in Chemical Engineering* 31 (1. März 2021): 100667. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2020.100667>.
- Paolini, Valerio, Francesco Petracchini, Marco Segreto, Laura Tomassetti, Nour Naja, und Angelo Cecinato. „Environmental impact of biogas: A short review of current knowledge“. *Journal of Environmental Science and Health, Part A* 53, Nr. 10 (24. August 2018): 899–906. <https://doi.org/10.1080/10934529.2018.1459076>.
- Patel, Sonal. „Mitsubishi Power Developing 100% Ammonia-Capable Gas Turbine“. *POWER Magazine*, 3. März 2021. <https://www.powermag.com/mitsubishi-power-developing-100-ammonia-capable-gas-turbine/>.

- Qing, Geletu, Reza Ghazfar, Shane T. Jackowski, Faezeh Habibzadeh, Mona Maleka Ashtiani, Chuan-Pin Chen, Milton R. Smith, und Thomas W. Hamann. „Recent Advances and Challenges of Electrocatalytic N₂ Reduction to Ammonia“. *Chemical Reviews* 120, Nr. 12 (24. Juni 2020): 5437–5516. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00659>.
- Reisch, Marc S. „Why Interest in Ammonia Refrigerants Is Surging“. *Chemical & Engineering News*, 11. Juli 2016. <https://cen.acs.org/articles/94/i28/interest-ammonia-refrigerants-surging.html>.
- Rodrigues, Mariana, R. Jensen Lund, Annemiek ter Heijne, Tom Sleutels, Cees J. N. Buisman, und Philipp Kuntke. „Application of Ammonium Fertilizers Recovered by an Electrochemical System“. *Resources, Conservation and Recycling* 181 (1. Juni 2022): 106225. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106225>.
- Royal Society. *Ammonia: zero-carbon fertiliser, fuel and energy store*. London: The Royal Society, 2020. <https://royalsociety.org/-/media/policy/projects/green-ammonia/green-ammonia-policy-briefing.pdf>.
- Salmon, Nicholas, und René Bañares-Alcántara. „Green Ammonia as a Spatial Energy Vector: A Review“. *Sustainable Energy & Fuels* 5, Nr. 11 (2021): 2814–39. <https://doi.org/10.1039/D1SE00345C>.
- Schaal, Sebastian. „Niederländer rüsten zehn Schiffe auf BZ-Antrieb um“. *electrive.net*, 11. Oktober 2022. <https://www.electrive.net/2022/10/11/niederlaender-rueten-zehn-schiffe-auf-bz-antrieb-um/>.
- Smith, Collin, Alfred K. Hill, und Laura Torrente-Murciano. „Current and Future Role of Haber–Bosch Ammonia in a Carbon-Free Energy Landscape“. *Energy & Environmental Science* 13, Nr. 2 (19. Februar 2020): 331–44. <https://doi.org/10.1039/C9EE02873K>.
- tagesschau. „Wie die Deutsche Bahn ihre Dieselloks ersetzen will“, 10. September 2022. <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/deutsche-bahn-siemens-wasserstoff-zug-brennstoffzelle-101.html>.
- TÜV NORD. „Wasserstoff: Eigenschaften, Sicherheit, Gefahren“. Zugriffen 10. November 2022. <https://www.tuev-nord.de/de/unternehmen/energie/wasserstoff/wasserstoff-eigenschaften-sicherheit-gefahren/>.
- TÜV SÜD. „Wasserstoff: Speicherung“, 2022. <https://www.tuvsud.com/de-de/indust-re/wasserstoff-brennstoffzellen-info/wasserstoff/speicherung-von-wasserstoff>.
- UK Government. *UK Hydrogen Strategy*. London: UK Government, 2021. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1011283/UK-Hydrogen-Strategy_web.pdf.
- Umweltbundesamt. „Ammoniak-Emissionen“. Umweltbundesamt, 30. März 2022. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/luftschadstoff-emissionen-in-deutschland/ammoniak-emissionen>.
- . „Erneuerbare Energien in Zahlen“. Text. Umweltbundesamt, 14. März 2022. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen>.
- . „Wasserstoff im Verkehr: Häufig gestellte Fragen (FAQs)“. Umweltbundesamt, 9. August 2022. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/kraftstoffe/wasserstoff-im-verkehr-haeufig-gestellte-fragen>.
- Valera-Medina, A, H Xiao, M Owen-Jones, W.I.F. David, und P.J. Bowen. „Ammonia for Power“. *Progress in Energy and Combustion Science* 69 (November 2018): 63–102. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2018.07.001>.
- Vereinte Nationen. Übereinkommen von Paris (2016). https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/paris_abkommen_bf.pdf.
- VPI. „Jahresbericht 2021-2022“. Hamburg: Verband der Güterwagenhalter in Deutschland e.V., 2022. <https://vpihamburg.de/attachment/2340/download/vpi-jahresbericht+2021-2022>.
- Watanabe, Marcos D. B., Francesco Cherubini, Alexandre Tisserant, und Otavio Cavalett. „Drop-in and Hydrogen-Based Biofuels for Maritime Transport: Country-Based Assessment of Climate Change Impacts in Europe up to 2050“. *Energy Conversion and Management* 273 (1. Dezember 2022): 116403. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116403>.

- Weart, Spencer. „The Carbon Dioxide Greenhouse Effect“. The Discovery of Global Warming, April 2022. <https://history.aip.org/climate/co2.htm>.
- Wood Mackenzie. „Ammonia Co-Firing in Thermal Power Plants Could Be Worth US\$100 Billion in 2050“, 18. Mai 2022. [https://www.woodmac.com/press-releases/ammonia-co-firing-in-thermal-power-plants-could-be-worth-us\\$100-billion-in-2050/](https://www.woodmac.com/press-releases/ammonia-co-firing-in-thermal-power-plants-could-be-worth-us$100-billion-in-2050/).
- Wyer, Katie E., David B. Kelleghan, Victoria Blanes-Vidal, Günther Schaubberger, und Thomas P. Curran. „Ammonia Emissions from Agriculture and Their Contribution to Fine Particulate Matter: A Review of Implications for Human Health“. *Journal of Environmental Management* 323 (1. Dezember 2022): 116285. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116285>.
- Ye, Lin, Richard Nayak-Luke, René Bañares-Alcántara, und Edman Tsang. „Reaction: “Green” Ammonia Production“. *Chem* 3, Nr. 5 (November 2017): 712–14. <https://doi.org/10.1016/j.chempr.2017.10.016>.
- Zhang, Hanfei, Ligang Wang, Jan Van herle, François Maréchal, und Umberto Desideri. „Techno-Economic Comparison of Green Ammonia Production Processes“. *Applied Energy* 259 (1. Februar 2020): 114135. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114135>.
- Zumdahl, Steven. „Ammonia: Definition & Uses“. Encyclopaedia Britannica, 9. Dezember 2022. <https://www.britannica.com/science/ammonia>.

IKEM