

# Kurzeinschätzung von Ammoniak als Energieträger und Transportmedium für Wasserstoff

## Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken

### 1 Einleitung

Mit der Revision des Klimaschutzgesetzes im Jahr 2021 hat sich Deutschland u.a. verbindlich das langfristige Ziel gesetzt, bis zum Jahr 2045 treibhausgasneutral zu werden, also alle Emissionen von Treibhausgasen (THG) soweit wie möglich zu vermeiden und die verbleibenden Emissionen durch entsprechende THG-Senken auszugleichen. Eine herausragende Bedeutung kommt dabei der direkten Nutzung von erneuerbarem Strom zu, nicht nur, weil dies effizient ist, sondern die erneuerbare Stromerzeugung auch insgesamt hohe Potenziale aufweist, die über Sektorenkopplung in einem breiten Anwendungsfeld effizient genutzt werden und so in hohem Maße zur Vermeidung (energiebedingter) THG-Emissionen beitragen können. Darüber hinaus hat sich in den letzten Jahren in der wissenschaftlichen und politischen Debatte ein weitgehender Konsens entwickelt, dass eine treibhausgasneutrale Energieversorgung selbst im Fall von einem hohen Maß an Elektrifizierung und Sektorenkopplung ergänzend auf gasförmige und flüssige Energieträger aus erneuerbaren Quellen angewiesen sein dürfte, wobei der Umfang über die Studien hinweg je nach Anwendung über die energieintensive Industrie hinaus stark variiert (vgl. Umweltbundesamt (UBA) 2019; Stiftung Klimaneutralität et al. 2022).

Hierfür wird erwartet, dass grüner Wasserstoff ( $H_2$ ), der per Elektrolyse aus erneuerbarem Strom hergestellt wird, eine zentrale Rolle spielt. Dies gilt nicht nur für Deutschland und Europa, sondern global im Zuge der globalen Transformation im Klimaschutz. Da die international konkurrenzfähigen Erzeugungspotenziale in Europa begrenzt sind, muss grüner  $H_2$  voraussichtlich in Teilen importiert werden, insbesondere aus sonnen- und windreichen Regionen auch außerhalb Europas. Daher werden verschiedene Transportarten für Wasserstoff und Trägermedien diskutiert, die sich nach Brennwert, Energiedichte, Emissionen und Siedepunkt, welcher für den Aufwand einer eventuellen Verflüssigung relevant ist, unterscheiden.

Eine wichtige Option für das Transportmedium ist Ammoniak ( $NH_3$ ). Im Gegensatz zu Alternativen (z. B. Methanol) wird keine treibhausgasneutrale Kohlenstoffquelle benötigt. Gleichwohl wird ein anderes Element zur Bindung des Wasserstoffs benötigt: Stickstoff. Ammoniak ist leichter zu verflüssigen als Wasserstoff, da sein Siedepunkt unter atmosphärischem Druck bei  $-33\text{ °C}$  liegt (National Library of Medicine (NIH) 2022) und enthält etwa 1,7-mal mehr Wasserstoff pro Kubikmeter als flüssiger Wasserstoff ( $LH_2$ ) (ACER 2021). Damit ergeben sich deutlich geringere energetischen Aufwendungen beim Transport. Nachdem der Wasserstoff in Form von Ammoniak transportiert wurde (z. B. per Seeschiff), kann dieser auch wieder in reinen Wasserstoff umgewandelt werden, wofür allerdings Hochtemperaturwärme benötigt wird. Daher rückt auch verstärkt in den Fokus, in welchen Anwendungen eine direkte Nutzung/Verbrennung von Ammoniak sinnvoll umgesetzt werden kann.

In diesem Kurzpapier erfolgt eine Auswertung der Literatur zur Herstellung, Nutzung und Transport von Ammoniak sowie ein kurzer Einblick in die damit verbundenen Umweltwirkungen. Darauf basierend erfolgt eine Bilanzierung der THG-Emissionen von grünem Ammoniak entlang der Lieferkette und eine Zusammenfassung von Stärken und Schwächen von Ammoniak sowie den Chancen und Risiken einer verstärkten Nutzung.

## 2 Literaturüberblick

### 2.1 Fossile und grüne Herstellung

Mehr als 90 % des weltweit produzierten Ammoniaks wird derzeit nach dem Haber-Bosch-Verfahren hergestellt. Bei der Herstellung von Ammoniak nach diesem altbekannten und etablierten Verfahren werden Wasserstoff und Stickstoff bei Temperaturen zwischen 400 und 450 °C und Drücken von 120 bis 220 bar in Gegenwart eines Katalysators auf Eisenbasis zu Ammoniak gewandelt (Ausfelder 2022). Die Ammoniaksynthese ist ein sehr energieintensiver Prozess. Je nach verwendetem Rohstoff liegt der typische Bruttoenergieverbrauch für die Ammoniakherstellung zwischen 28 und 49 GJ/t Ammoniak (Amonia Energy Association 2022).

Der für das Haber-Bosch-Verfahren benötigte Wasserstoff wird in der Regel durch die Dampfreformierung von Erdgas (Steam-Methane-Reforming, SMR) hergestellt (ca. 70 % der weltweiten Produktion) (International Energy Agency (IEA) 2022). Neben SMR gewinnt auch die autotherme Reformierung (ATR) an Bedeutung. Bei SMR entstehen zum einen direkte CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Reaktion von Wasserdampf und Erdgas, zum anderen wird für die Bereitstellung der erforderlichen Prozessenergie (Druck, Wärme) ein Teil des Erdgases verbrannt. Insgesamt ergibt sich in der Literatur eine Emissionsbandbreite von ca. 83-95 g CO<sub>2</sub>/MJ H<sub>2</sub> für SMR (Parkinson et al. 2019). Beim SMR-Verfahren wird Druckluft zugeführt, weshalb das produzierte Synthesegasgemisch bereits den für das Haber-Bosch-Verfahren benötigten Stickstoff enthält. In der Ammoniaksynthese entsteht ein Gasgemisch aus NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub> und N<sub>2</sub>. Mithilfe von Kühlkompressoren wird NH<sub>3</sub> abgeschieden, während H<sub>2</sub> und N<sub>2</sub> über einen Recyclingkompressor wieder dem Haber-Bosch-Reaktor zugeführt werden. Der Energieeinsatz für Hilfsprozesse, wie der Kompression, wird in der Literatur mit einer Bandbreite von 3,9-6,5 GJ/t NH<sub>3</sub> angegeben. Der Gesamtenergieverbrauch von SMR-basierter NH<sub>3</sub>-Produktion wird mit 26-34 GJ/t NH<sub>3</sub> beziffert. Stöchiometrisch ergeben sich für einen idealen Prozess Emissionen von 0,97 t CO<sub>2</sub>/ t NH<sub>3</sub>. Unter Berücksichtigung von Verlusten eines realen Prozesses ergibt sich ein Wert von 1,33 t CO<sub>2</sub>/t NH<sub>3</sub>. Für die Prozessenergie entstehen zusätzlich 0,5 t CO<sub>2</sub>/t NH<sub>3</sub>, woraus sich real ein Gesamtfußabdruck von 1,83 t CO<sub>2</sub>/ t NH<sub>3</sub> ergibt. In diesem sind die Emissionen aus der Erdgasvorkette noch nicht enthalten. Außerdem entsteht ein Wasserverbrauch von 0,656-0,79 t H<sub>2</sub>O/t NH<sub>3</sub> (Ghavam et al. 2021). Für eine Tonne Ammoniak werden 0,823 Tonnen Stickstoff und 0,178 Tonnen Wasserstoff benötigt (Bicer et al. 2017).

Durch die Integration von SMR mit dem Haber-Bosch-Prozess ergeben sich Synergieeffekte in der Wärmeproduktion und -nutzung. Die Wärmerückgewinnung ermöglicht es, Dampf (Bazzanella und Ausfelder 2017) in örtlich nahen Prozessen (beispielsweise zur Stromproduktion) zu nutzen (ca. 2,7 - 4,3 GJ/t NH<sub>3</sub>). Wird die Dampfreformierung mit Kohlenstoffabscheidung (Carbon Capture and Storage - CCS) kombiniert, können die Emissionen reduziert werden. Zur signifikanten Emissionsreduktion müssen sowohl die Prozessemissionen nach der Wasser-Gas-Shift-Reaktion, als auch die Verbrennungsemissionen abgeschieden werden. Der Betrieb der Abscheidungsanlage benötigt jedoch noch zusätzliche Energie (Mallouppas et al. 2022). Teilweise wird heute bereits in der Ammoniakherstellung CO<sub>2</sub> abgeschieden, um es in der nachgelagerten Urea-Produktion (Harnstoff) (Umweltbundesamt (UBA) 2001) zu verwenden (The European Chemical Industry Council (Cefic) 2013).

Statt der Dampfreformierung kann der benötigte Wasserstoff auch mittels Elektrolyse produziert werden (grüner Wasserstoff). Auch die Elektrolyse kann mit dem Haber-Bosch-Prozess verbunden werden, allerdings ergeben sich nicht die gleichen Prozessintegrationsmöglichkeiten. Der elektrolytisch produzierte grüne Wasserstoff kann dem Produktgas der konventionellen Wasserstoffherstellung beigemischt werden, dies geht jedoch nur bis zu einem

Prozentsatz von ca. 15 % (Agora Industrie et al. 2022), da bei grünem Wasserstoff keine Synthese mit Druckluftgemisch stattfindet. Wird mehr als 15 % grüner Wasserstoff in der Ammoniaksynthese verwendet, muss Stickstoff daher über eine Luftzerlegungsanlage gewonnen werden (Bazzanella und Ausfelder 2017). In dieser Prozesskonfiguration entsteht ein höherer Wasserverbrauch als bei konventionellen Verfahren. Er wird in der Literatur 1,56-1,59 t H<sub>2</sub>O/t NH<sub>3</sub> angegeben. Der Elektrolysewasserstoff hat zudem ein relativ geringes Druckniveau (<20 bar) (Ye et al. 2017), weshalb für den Haber-Bosch Prozess weitere Kompression notwendig ist. Ein weiteres Verfahren zur Herstellung von Ammoniak ist die elektrochemische Direktsynthese aus Luft und Wasser, welche sich jedoch noch im Forschungsstadium befindet (Lan et al. 2013).

In der Literatur wird die Emissionsbandbreite für die Herstellung von grünem Ammoniak mit 0,12 t CO<sub>2</sub>-äq./t NH<sub>3</sub> (Bazzanella und Ausfelder 2017) bis 0,53 t CO<sub>2</sub>-äq./t NH<sub>3</sub> (Smith et al. 2020) angegeben. Die Bandbreite ergibt sich aus den Annahmen bezüglich Einbezug der Anlagenproduktion von Grünstrom, Elektrolysetechnologie, Energieverbrauch von Luftzerlegungsanlage und Kompressoren sowie der Kompensation der Dampfproduktion, die durch die Umstellung von SMR auf Elektrolyse fehlt. Aus diesem Grund können die Literaturwerte nicht direkt miteinander verglichen werden. NH<sub>3</sub>-Leckagen werden in den Studien nicht berücksichtigt.

## 2.2 Direkte Nutzung und Rückumwandlung in Wasserstoff

Ammoniak ist eine der sieben Grundchemikalien, die zur Herstellung vieler anderer chemischer Produkte verwendet werden. Nach Schwefelsäure ist es die am häufigsten produzierte Chemikalie. Etwa 80-85 % des gesamten Ammoniaks wird heutzutage zur Herstellung von Stickstoffdünger verwendet. Nach Prognosen von IRENA wird der Ammoniakbedarf für Düngemittelanwendungen aufgrund des Bevölkerungswachstums in einem Szenario, welches mit dem 1,5 Grad Celsius (°C) im Einklang steht, von 156 Mio. t im Jahr 2020 auf 267 Mio. t im Jahr 2050 steigen (ACER 2021). Neben der Düngemittelproduktion wird Ammoniak in zahlreichen weiteren Bereichen eingesetzt wie z.B. in Kompressionskälteanlagen, dem Bergbau, bei der Herstellung von Pharmazeutika, Polymeren, Möbeln und Nylon sowie von Elektronik, zur Wasseraufbereitung und zur Stickoxidreduzierung (ACER 2021).

Mit der Energiewende kommt Ammoniak stärker als Energieträger bzw. als Wasserstoffträger in die Diskussion. Nachdem der Wasserstoff in Form von Ammoniak transportiert (z. B. per Schiff) wurde, kann dieser wieder in reinen Wasserstoff umgewandelt werden. Um den hochreinen Wasserstoff zurückzugewinnen, wird Ammoniak unter Zufuhr von Wärme und in Gegenwart eines Nickelkatalysators aufgespalten (dehydriert). Es handelt sich dabei um die Umkehrung der Synthesereaktion (cracking). Die Reaktionstemperatur liegt zwischen 850 und 950 °C (Black & Veatch (BV) 2020). Der Energieverbrauch für die grüne Ammoniakroute in Abschnitt 2.1 umfasst den Stromeinsatz für Elektrolyse, N<sub>2</sub>-Separation und Kompression. Wird die anschließende Rückumwandlung in Wasserstoff mitbetrachtet, wird in der Regel angenommen, dass ein Teil des Wasserstoffs zur Bereitstellung der Reaktionswärme im Cracker verbrannt wird. Je nach benötigter H<sub>2</sub>-Güte ist außerdem eine nachgelagerte Reinigung notwendig. IRENA (2022) gibt für die Energieverlustrate bei der Rückumwandlung eine Bandbreite von 13 – 34 % an. Die Energieverbräuche für Herstellung und Aufspaltung von Ammoniak sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

**Tabelle 1 Energieverbrauch für die Herstellung und Aufspaltung von grünem Ammoniak**

Parameter	Bandbreite der ausgewerteten Literatur
Energieverbrauch grüne Ammoniakherstellung	ca. 38,2 - 45,6 GJ/t NH <sub>3</sub> (ca. 2 MJ/MJ NH <sub>3</sub> )
- davon Elektrolyse	33 - 35,5 GJ/t NH <sub>3</sub> (1,8-1,9 MJ/MJ NH <sub>3</sub> )
- zusätzlicher Stromeinsatz für N <sub>2</sub> -Separation, Kompression (H <sub>2</sub> und H <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> )	2,2 - 7,2 GJ/t NH <sub>3</sub> (0,1-0,3 MJ/MJ NH <sub>3</sub> )
Energieverbrauch Ammoniakaufspaltung	13 – 34 % des H <sub>2</sub> -Einsatzes (0,13 – 0,34 MJ/MJ H <sub>2</sub> )

Quelle: eigene Zusammenstellung von (Zhang et al. 2020); (Bazzanella und Ausfelder 2017); (Geres et al. 2019); (Ishimoto et al. 2020; International Renewable Energy Agency (IRENA) 2022a)

Neben der Rückumwandlung in Wasserstoff werden auch direkte Anwendungen von Ammoniak in Schiffsantrieben, bei der stationären Stromerzeugung mit BHKW, in Kraftfahrzeugen und im Heizungsbereich bzw. in Industrieöfen gesehen. Somit stellt Ammoniak einen vielseitigen Brennstoff dar (International Renewable Energy Agency (IRENA) 2022b). Auch könnten Verbrennungsmotoren im Bestand grundsätzlich für den Betrieb mit Ammoniak umgerüstet werden. Allerdings sind die Entwicklungen großteils noch in einem Versuchsstadium und nicht in einer großtechnischen Umsetzung. In Südkorea wurde schon erfolgreich ein Personenkraftwagen mit einem Ottomotor mit einem Hybridkraftstoff aus 70 % Ammoniak und 30 % Benzin betrieben. Es gibt auch eine Reihe von laufenden Projekten zur Umrüstung von Lkw-Motoren mit Selbstzündung (MacFarlane et al. 2020). Zu bedenken ist, dass gerade der Einsatz in Motoren zusätzliche, erhebliche Effizienzverluste bzw. Wirkungsgradeinbußen ggü. den Alternativen (Brennstoffzellen und direktelektrische Nutzung) mit sich brächte. Der Einsatz von Ammoniak als THG-freier Schiffskraftstoff wird ebenfalls getestet. Dabei zeigt sich, dass mit Ammoniak betriebene Verbrennungsmotoren in der Schifffahrt in Bezug auf Leistung und NO<sub>x</sub>-Emissionen mit denen vergleichbar sind, die Dieselkraftstoff verwenden. Die Nutzbarkeit in Gasturbinen wurde in Japan durch das AIST (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Japan) nachgewiesen. Allerdings ist die dortige Turbine mit 41,8 kW noch relativ klein. Darüber hinaus kann Ammoniak auch direkt in SOFC-Brennstoffzellen ohne externe Reformer oder Crack-Reaktoren verwendet werden. Mit Ammoniak betriebene SOFCs werden im Allgemeinen bei hohen Temperaturen (600–800 °C) mit hohem Wirkungsgrad zur Stromerzeugung mit Wärmeauskopplung betrieben (MacFarlane et al. 2020). Mit Ammoniak betriebene SOFC könnten prinzipiell auch in der Seeschifffahrt eingesetzt werden.

In der Diskussion wird der Einsatz von regenerativem Ammoniak in der Schifffahrt und in der stationären Stromerzeugung als vielversprechende Lösungen genannt. In der Seeschifffahrt ist eine direkte Elektrifizierung der Hochseeschifffahrt aufgrund der großen zurückgelegten Strecken nicht möglich. Hier kann regeneratives Ammoniak als Alternative für fossile Brennstoffe und auch für regeneratives Methan oder kohlenstoffhaltige regenerative Flüssigkraftstoffe verwendet werden (Cames et al.). In der Stromerzeugung kann Ammoniak als Brennstoff eingesetzt werden, um verbleibende Residuallasten in einem zukünftigen Energiesystem zu decken sowie heute schon fossile Energien zu substituieren (MacFarlane et al. 2020; International Renewable Energy Agency (IRENA) 2022b). Auch hier konkurriert Ammoniak mit regenerativem Methan und mit regenerativem Wasserstoff.

Wenn direkt genutzter Ammoniak aus grünem Wasserstoff hergestellt wird, kann es durch Substitution fossiler Brennstoffe CO<sub>2</sub>-Emissionen vermeiden. Andererseits ist zu erwähnen, dass die Verwendung von Ammoniak als Brennstoff die Emissionen von Stickoxiden (NO<sub>x</sub> und Lachgas) erhöhen könnte sowie auch mit Emissionen unverbrannten Ammoniaks („Schlupf“) zu

rechnen wäre. (International Renewable Energy Agency (IRENA) 2022b). Für eine Minimierung der Lachgasemissionen müssen noch für Ammoniak spezifische Motoren bzw. Filtermöglichkeiten entwickelt werden (Billerbeck 2021). Ebenso muss der motorische Schlupf eng begrenzt werden.

**Tabelle 2: Zusammenfassung der direkten Nutzung von NH<sub>3</sub>**

Bereits im Einsatz	Zukünftige Nutzung
Düngemittelproduktion	Schiffsantriebe
Kompressionskälteanlagen	Stationäre Stromerzeugung mit BHKW
Bergbau	Kraftfahrzeugen
Herstellung von Pharmazeutika, Polymeren, Möbeln und Nylon	Heizungsbereich bzw. Industrieofen
Elektronik	Verbrennungsmotoren
Wasseraufbereitung	Gasturbinen
Stickoxidreduzierung	

Legende:

dunkelgrün	Bereits im Einsatz/Direkte Nutzung
gelb	Kann <b>kurzfristig</b> umgesetzt werden
rot	Kann <b>langfristig</b> umgesetzt werden

## 2.3 Transport von Ammoniak

Ammoniak wird seit vielen Jahrzehnten in großen Mengen gehandelt, und die Technologien für die Lagerung, den Transport sind sehr ausgereift. Entsprechende technische Regelwerke und Sicherheitsvorschriften existieren. Da Ammoniak unter atmosphärischen Bedingungen ab einer Temperatur von weniger als -33 °C oder bei einem Druck von mindestens 7,5 bar bei höchstens 15 °C verflüssigt werden kann und dann eine hohe volumetrische Dichte hat, wird Ammoniak vorzugsweise in flüssiger Form transportiert. Für den Transport von Ammoniak in größeren Mengen (mehr als 5 Kilotonnen Ammoniak) wird die Verflüssigung durch Kühlung bevorzugt. Für die Lagerung des gekühlten Ammoniaks werden einwandige Tanksysteme verwendet. Für kleinere Mengen (weniger als 1,5 Kilotonnen) wird Ammoniak bei Drücken von 16-18 bar gelagert (International Renewable Energy Agency (IRENA) 2022b).

Ammoniak kann auf der Straße (mit LKW), mit dem Zug, per Schiff und in Pipelines transportiert werden. Insgesamt werden pro Jahr etwa 25-30 Mio. Tonnen Ammoniak weltweit transportiert. Davon werden etwa 18-20 Mio. t Ammoniak weltweit per Schiff transportiert. Es sind etwa 170 Seeschiffe in Betrieb, die Ammoniak transportieren können (International Renewable Energy Agency (IRENA) 2022b). In den Vereinigten Staaten werden jährlich etwa 1,5 Mio. t Ammoniak durch eine 3.220 km lange Rohrleitung aus Karbonstahl transportiert. In Europa hingegen wird Ammoniak überwiegend mit der Bahn transportiert, insgesamt etwa 1,5 Mio. t jährlich. In Europa wird der Transport per Pipeline nur für kurze Entfernungen von 1-12 km in Industriegebieten eingesetzt. Erdgaspipelines oder Ölpipelines können für den Transport von Ammoniak umgerüstet werden (International Renewable Energy Agency (IRENA) 2022b).

In der EU werden bereits 30 Ammoniak-Terminals betrieben (Moser 2022). Außerdem bietet die bereits bestehende LNG-Infrastruktur bei moderater Anpassung (sowie die geplante

Infrastruktur) eine Möglichkeit für den Import von Ammoniak. Da flüssiges Ammoniak eine höhere Dichte als LNG aufweist, kann es zu höheren Belastungen an den Strukturen und Fundamenten der LNG-Terminals führen. Dies kann dazu führen, dass die Volumina nicht voll ausgeschöpft werden können. Alternativ müssen einige Komponenten der LNG-Terminals (wie Speichertank, Pipelinesystem, Kryopumpen usw.) entweder getauscht oder modifiziert werden (Black & Veatch (BV) 2020). In Deutschland wird das LNG-Terminal Brunsbüttel voraussichtlich 2027 mit einer Kapazität von 8 Mio. m<sup>3</sup>/a LNG in Betrieb gehen. Und es ist bereits geplant, dass die Umstellung dieses Terminals von LNG auf Ammoniak in der Zukunft erfolgen wird (Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV (Fraunhofer IGCV) 2021).

Ammoniak soll zum einen mit Schiffen nach Europa transportiert werden. Dabei können zukünftig die Transportschiffe selbst grünes Ammoniak anstelle von Schweröl als Brennstoff verwenden und die THG-Emissionen aus der Verbrennung vermieden werden. Als Anhaltspunkt für die Abschätzung des Energieaufwands für den Ammoniaktransport mit Schiffen werden in einer Studie 2.500 MJ/km für ein 53.000 tNH<sub>3</sub> Schiff in (Bartels 2008) angegeben. (Ishimoto et al. 2020) geben den Emissionswert für den Schiffstransport von NH<sub>3</sub> zwischen Hammerfest und Rotterdam (2.539 km) mit ca. 7 kg CO<sub>2</sub>/MWh<sub>th</sub> an sowie nochmals ca. 7 kg CO<sub>2</sub>/MWh<sub>th</sub> für die Verflüssigung an den Terminals. Diese ergeben sich aus dem Einsatz von Öl beim Schiffsantrieb und dem Netzstromeinsatz. Die Transportemissionen können durch die Nutzung von NH<sub>3</sub>-Siedegas im Schiffsantrieb reduziert werden. Zum anderen eignen sich Pipelines für den landgestützten Transport von Ammoniak, wie ein Beispiel aus den USA mit über 4.830 km Länge beweist (U.S. Department of Energy 2006). Hierbei wird das Ammoniak flüssig transportiert. In Bartels wird der energetische Aufwand mit ca. 11,5 kJ / (100 km\*kg NH<sub>3</sub>) angegeben. Für den energetischen Transportaufwand von Ammoniak per Zug und LKW ist in der Literatur keine verwertbaren Angaben zu finden. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass sich der Energiebedarf beim Transport mit Zügen und LKW ungefähr im Bereich von LPG liegt.

## 2.4 Umweltwirkungen von Ammoniak

Aus der Nutzung von Ammoniak (NH<sub>3</sub>) ergeben sich verschiedene Umweltwirkungen. Ammoniak ist ein farbloses, stechend riechendes Gas. Es ist giftig, korrosiv und umweltgefährdend. Es kann bereits bei Konzentrationen von 2-5 ppm als Geruch wahrgenommen werden. Diese Konzentration in Luft liegt weit unterhalb der Explosionsgrenzen. Obwohl Ammoniak in hohen Konzentrationen (über 0,1 Volumenprozent) korrosiv, giftig und beim Einatmen potenziell lebensbedrohlich ist, können diese Risiken durch die Anwendung bewährter Verfahren, Sicherheitsvorschriften und Anwendung von Regelwerken in der Industrie wirksam gemindert werden. Durch die großskalige Nutzung in der Landwirtschaft ist die Prävention der negativen Umweltwirkungen bereits auch teilweise in die Umweltgesetzgebung eingegangen, zum Beispiel durch Grenzwerte in der Bodenbelastung (United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) 1999).

Eine Weiterentwicklung des Regelwerks für einen öffentlichen Raum wäre dann notwendig, um die Sicherheit von Laien zu gewährleisten. Im Falle von Leckagen an und in Gewässern kann Ammoniak pH-Veränderungen verursachen, die das Leben im aquatischen Ökosystem stören bzw. abtöten. Daher sollte eine sehr gute Leckdetektion durchgeführt werden, um Leckagen zu verhindern. Wenn Ammoniak bei atmosphärischem Druck aus einem Kühleispeichertank austritt, geht es schnell in die Gasphase über. Da es leichter ist als Luft ist, kann meist der Gefährdungsbereich eingegrenzt werden. Tritt Ammoniak jedoch aus einem unter Druck stehenden Speichertank aus, bildet sich ein Aerosol, das zu einer dichten Wolke führt, die schwerer als Luft ist. Aus diesem Grund ist es aus sicherheitstechnischer Sicht oft besser, Ammoniak als Flüssigkeit unter Kühlung (-33 °C) und nicht unter Druck (7,5 bar) zu lagern, um eine mögliche Bildung dieser



dichten Wolke an der Oberfläche zu verhindern (International Renewable Energy Agency (IRENA) 2022b; MacFarlane et al. 2020).

Durch die Nutzung von  $\text{NH}_3$  wird in den globalen Stickstoffkreislauf eingegriffen. Dieser ist noch nicht komplett erforscht, ein Ungleichgewicht durch anthropogene Einflüsse ist aber bereits sichtbar. 50 % des fixierten Stickstoffs sind bereits heute auf anthropogene Aktivitäten zurückzuführen. Diese Verdopplung der Stickstoffbelastung geht einher mit der Entwicklung des Haber-Bosch-Prozesses zu Beginn des 20. Jahrhundert. Die Stickstofffixierung umfasst beispielsweise  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  (MacFarlane et al. 2020). Der gebundene Stickstoff sammelt sich teilweise als Nitrat in Gewässern und sorgt hier für Eutrophierungseffekte.

Entstehen durch unsachgerechten Umgang oder durch Störfälle an Betriebsmitteln direkte  $\text{NH}_3$ -Emissionen, ergeben sich weitere Umweltwirkungen. Hier gilt es zu klären, ob diese bspw. wie stickstoffhaltige Düngemittel zur Versauerung der Böden beitragen können.

Neben den genannten direkten Einflüssen auf Ökosysteme hat  $\text{NH}_3$  auch eine indirekte Treibhauswirkung. Da  $\text{NH}_3$  nach kurzer Zeit in der Atomsphäre zerfällt, kann seine direkte Treibhauswirkung vernachlässigt werden. Dementsprechend zählt Ammoniak nicht zu den Klimagasen. Gleichwohl wirkt  $\text{NH}_3$  indirekt über die folgenden unterschiedlichen Mechanismen.

- ▶  $\text{NH}_3$  lagert sich entweder trocken ab oder verbindet sich in Gewässern mit Schwefeloxiden und Stickoxiden zu Salzen. In der Atmosphäre kommt es durch die Salze in den Aerosolen oder durch Reaktion von  $\text{NH}_3$  mit  $\text{NO}_2$  und  $\text{O}_3$  zur Bildung von Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ).  $\text{N}_2\text{O}$  ist ein direktes Klimagas, welches langlebig (ca. 120 Jahre), 273-mal klimaschädlicher als  $\text{CO}_2$  gemessen als GWP 100 und global verteilt ist.
- ▶ Wird  $\text{NH}_3$  direkt in Verbrennungsmotoren verbrannt, entsteht nach Reaktionsgleichung Stickstoff und Wasser ( $4\text{NH}_3 + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$ ) (Kobayashi et al. 2019). Durch Reaktion von Stickstoff mit Sauerstoff kann, wie auch bei anderen Verbrennungsprozessen, dabei  $\text{NO}_x$  sowie Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ) und Feinstaub entstehen.  $\text{NO}_x$  ist wiederum ein Vorläufer von Ozon ( $\text{O}_3$ ) und eine Erhöhung der  $\text{NO}_x$ -Emissionen führt zu einer Zunahme von troposphärischem Ozon (Nguyen et al. 2022).

Gerade durch entstandenes Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ) kann die THG-Bilanz von Ammoniak stark beeinträchtigt werden.  $\text{N}_2\text{O}$  wird in der Stratosphäre abgebaut. Dabei bildet sich  $\text{NO}_x$  ( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ), welches wiederum zum Abbau der stratosphärischen Ozonschicht beiträgt (Müller 2021). Über die genaue Wirkung von  $\text{NH}_3$  selbst besteht jedoch noch große Unsicherheit, weshalb es noch nicht in den Treibhausgasinventaren gelistet ist. Laut Europäischer Umweltagentur (EEA) (European Environment Agency (EEA) 2022) werden die Lachgas-Emissionen in Deutschland im Jahr 2020 etwa 5 % (etwa 30.000 kt  $\text{CO}_2$ -äq.) der gesamten Treibhausgasemissionen ausmachen. Obwohl die Lachgas-Emissionen in Deutschland zwischen 1990 und 2020 vor allem aufgrund gesetzlicher Vorschriften um etwa 50 % gesunken sind, könnte die Verwendung von Ammoniak als Kraftstoff für den Energie- und Schifffahrtssektor wie oben erwähnt einen Anstieg der Lachgas-Emissionen verursachen.

Die beschriebene Disruption des Stickstoffkreislaufs ergibt sich bereits ohne die großskalige Nutzung von  $\text{NH}_3$  als Energieträger. Die zusätzlichen Auswirkungen, die sich aus dieser Nutzung ergeben, müssen quantifiziert werden. Zum einen müssen die Folgen von  $\text{NH}_3$ -Leckagen in der Wertschöpfungskette zur Verwendung als Energieträger bestimmt werden. Zum anderen müssen die produzierten  $\text{NO}_x$  und  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen durch die Verbrennung von Ammoniak ermittelt werden. Durch die toxische Wirkung von  $\text{NH}_3$  auch auf Menschen sollten Leckagen in

der Wertschöpfungskette in jedem Fall verhindert werden. Hierzu besteht noch Forschungsbedarf.



### 3 THG-Emissionsbilanz von grünem Ammoniak

Aufbauend auf den Ergebnissen der Literaturlauswertung wird hier eine Gesamtbilanz von Herstellung und Transport von grünem Ammoniak sowie einer eventuellen Rückumwandlung in Wasserstoff erstellt. Darauf basierend erfolgt ein Vergleich mit grünem Wasserstoff in einem analogen Rahmen wie dies in einem weiteren Papier für verschiedene Herstellungsverfahren von Wasserstoff erfolgt ist (vgl. Riemer und Wachsmuth (im Erscheinen)). Dabei wird unterschieden zwischen dem heutigen, noch stark fossil dominierten System („heutiges Energiesystem“), in der entlang der Kette noch THG-Emissionen aus dem Einsatz fossiler Brennstoffe entstehen und einem System mit vollständig dekarbonisierter Energiebereitstellung („erneuerbares System“).

In den hier berechneten Fällen wird angenommen, dass die für die Herstellung des verwendeten grünen Wasserstoffs primär zusätzlicher erneuerbarer Strom eingesetzt wird, die Produktion aber nicht unbedingt THG-neutral ist. Als Obergrenze wird hier analog zu (Riemer und Wachsmuth (im Erscheinen)) der Wert der Green Finance Taxonomie verwendet, die sich an den Festlegungen der RED II für Kraftstoffe orientiert. Hiernach wird für Wasserstoff eine Reduktion um 73,4 % im Vergleich zum fossilen Äquivalent mit Emissionen von 94 g CO<sub>2</sub>-äq./MJ H<sub>2</sub> angestrebt, was in Emissionen von maximal 25 g CO<sub>2</sub>-äq. /MJ H<sub>2</sub> resultiert (Oyarzabal und Falco 2021). Sonstige wasserstoffbasierte Kraftstoffe werden nur als erneuerbare Kraftstoffe anerkannt, wenn diese mindestens 70 % weniger Treibhausgase emittieren als der fossile Referenzkraftstoff. Für die Emissionen der grünen Ammoniakproduktion ergibt die 70 %ige Minderung eine Bandbreite von 0 bis 28,2 g CO<sub>2</sub>-äq./MJ NH<sub>3</sub>, weswegen im Mittel von 14,1 g CO<sub>2</sub>-äq. /MJ NH<sub>3</sub> ausgegangen wird. Die gegenüber Wasserstoff etwas höheren Werte können die Bereitstellung des Stroms für N<sub>2</sub>-Separation und Kompression widerspiegeln, wobei entsprechend davon ausgegangen wird, dass auch dieser Strom überwiegend grün ist und in der Spannbreite für die Produktion von erneuerbaren Kraftstoffen enthalten ist.

Für den Ammoniaktransport werden die Daten aus (Ishimoto et al. 2020) verwendet. Umgerechnet für die im Wasserstoffvergleichsfall in Riemer et al. verwendete Transportdistanz von 3.000 km ergeben sich bei konventionellen Schiffsantrieben ca. 4,1 g CO<sub>2</sub>/MJ NH<sub>3</sub> für Transport und Verflüssigung. Damit ergeben sich in Bezug auf das heutige Energiesystem Gesamtemissionen von 18,2 g CO<sub>2</sub>-äq. /MJ NH<sub>3</sub> für den angelandeten Ammoniak. Werden Leckagen in der Emissionsbilanz nicht einbezogen, würde sich in einer erneuerbaren Welt hingegen für die grüne Ammoniakroute eine CO<sub>2</sub>-äq.-Bilanz von 0 ergeben, da Produktion und Transport mittels NH<sub>3</sub>-betriebener Schiffe zu keinen Restemissionen mehr führen würden. Allerdings sollten die zu erwartenden flüchtigen Ammoniakemissionen durch weitere Forschungsarbeit quantifiziert werden, da diese sich wesentlich auf die Emissionsbilanz von grünem Ammoniak auswirken könnten. Die Datenlage um diese zu ermitteln ist hier aber noch unzureichend. Darüber hinaus können sich durch die Nutzung von Ammoniak in Verbrennungsmotoren NO<sub>x</sub> und N<sub>2</sub>O Emissionen bilden, diese sind aber in den Bilanzgrenzen dieser Betrachtung nicht enthalten.

Zusätzlich wird hier betrachtet, wie sich das Cracking von Wasserstoff aus Ammoniak auf die Emissionsbilanz auswirkt. Für die Emissionsberechnung in dieser Studie wird ausgehend von der Bandbreite in (International Renewable Energy Agency (IRENA) 2022a) ein Wert für niedrige Energieverluste (13 %) und ein Wert für hohe Energieverluste (34 %) verwendet. Um die Emissionen pro Einheit Wasserstoff aus Ammoniak zu ermitteln, wird zunächst bestimmt, wie viel Wasserstoff durch Cracking zurückgewonnen wird. Der Wasserstoffgehalt in Ammoniak beträgt 0,178 kg H<sub>2</sub>/kg NH<sub>3</sub>. Auf Basis des Heizwerts von Wasserstoff (120 MJ/kg) und Ammoniak (18,8 MJ/kg), ergibt sich eine Relation nach Heizwert von 1,14 MJ H<sub>2</sub>/MJ NH<sub>3</sub>. Damit ergeben sich in Bezug auf das heutige Energiesystem  $18,2/1,14 = 16,0$  g CO<sub>2</sub>/MJ H<sub>2</sub>. Weiterhin

muss hinzugerechnet werden, dass ein Teil des Wasserstoffs (oder alternativ ein anderer Brennstoff) verbrannt wird, um die Wärmeenergie des Cracking bereitzustellen (13 % bzw. 34 %). Damit erhöhen sich die Emissionen pro nutzbare Einheit Wasserstoff auf 18,0 bzw. 21,4 g CO<sub>2</sub>/MJ H<sub>2</sub> (siehe Tabelle 3).

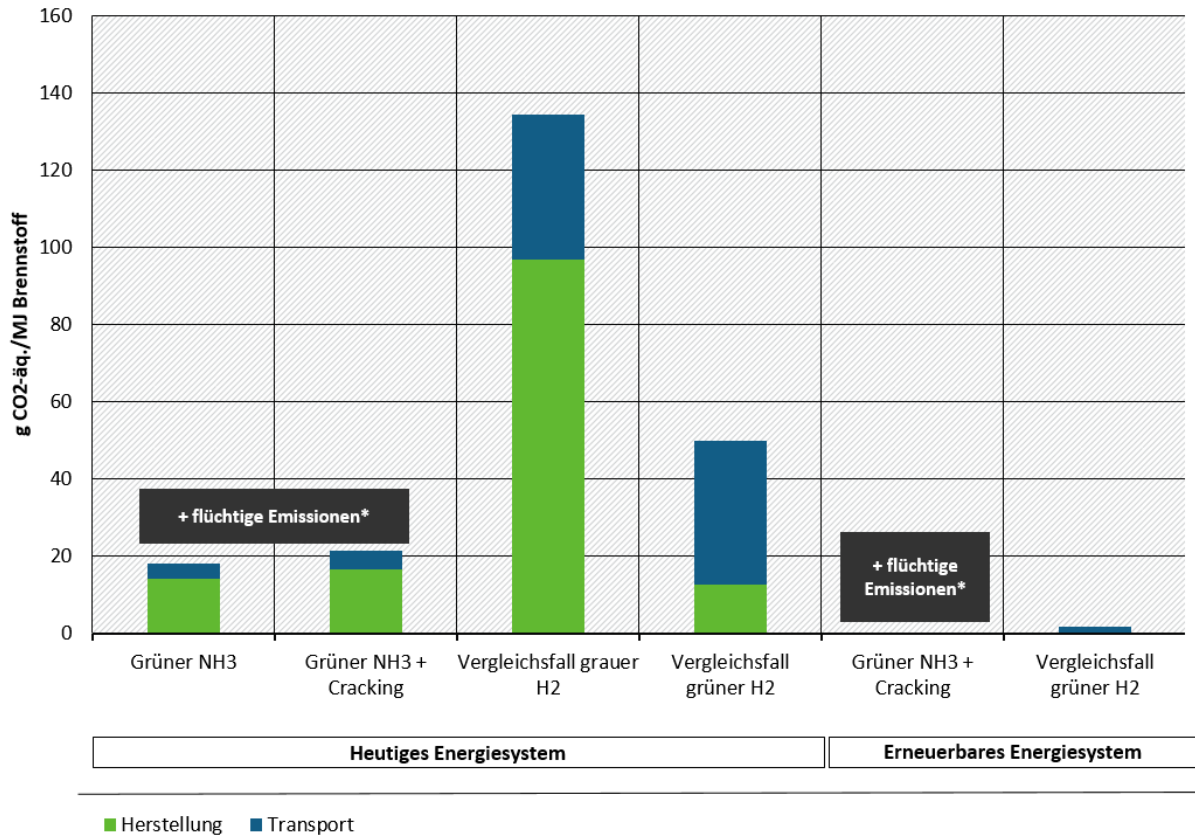
Aus der Analyse in Riemer und Wachsmuth (im Erscheinen) ergab sich in Bezug auf das heutige Energiesystem für importierten grauen Wasserstoff eine Treibhauswirkung von 134 g CO<sub>2</sub>-äq./MJ und für importierten grünen Wasserstoff eine Treibhauswirkung von 50 g CO<sub>2</sub>-äq./MJ, die maßgeblich durch die Transportemissionen bestimmt ist. Es wurde davon ausgegangen, dass gasförmiger Wasserstoff zunächst in bestehenden parallelen Gasfernleitungen unter Verwendung erdgasbetriebener Kompressoren transportiert wird. Außerdem wurden flüchtige Wasserstoffemissionen miteinberechnet. In einem erneuerbaren Energiesystem sind Herstellung und Transport per Pipeline vollständig THG-neutral und es verbleiben nur die geringfügigen flüchtigen Wasserstoffemissionen. Ein vollständiger Vergleich mit grünem Ammoniak als Energieträger ist nicht möglich ohne eine genauere Kenntnis der flüchtigen Ammoniakemissionen und deren potenziell wesentlichen Auswirkungen auf die Emissionsbilanz.

**Tabelle 3 Emissionsbilanz von grünem Ammoniak im heutigen Energiesystem**

	Einheit	THG-Emissionen	Referenz
Emissionen aus Elektrolyse	g CO <sub>2</sub> -äq./ MJ NH <sub>3</sub>	14,1	Mittelwert aus Green Finance Taxonomie, orientiert an der RED II.
Transport	g CO <sub>2</sub> / MJ NH <sub>3</sub>	4,1	Basierend auf Ishimoto et al. (2020), skaliert mit Transportdistanz von 3000 km
Gesamtemissionen pro Einheit NH <sub>3</sub>	g CO <sub>2</sub> -äq./ MJ NH <sub>3</sub>	18,2	
Emissionen pro rückgewonnene Einheit H <sub>2</sub>	g CO <sub>2</sub> -äq./ MJ H <sub>2</sub>	18,0 – 21,4	H <sub>2</sub> -Anteil in Ammoniak, basierend auf Energiegehalt: 1,14 MJ H <sub>2</sub> /MJ NH <sub>3</sub> . Berücksichtigung von Cracking-Verlusten zwischen 13 – 34 %

Quelle: eigene Berechnungen auf Basis der angegebenen Quellen

**Abbildung 1 Treibhauswirkung von grünem Ammoniak im Vergleich mit grauem und grünem Wasserstoff heute und im erneuerbaren Energiesystem in g CO<sub>2</sub>-äq./MJ Brennstoff**



\*Bei H<sub>2</sub> wurden flüchtige Emissionen miteinberechnet. Für grünen NH<sub>3</sub> gibt es hierzu noch keine Daten.

Quelle: eigene Berechnung, basierend auf den Daten von Ishimoto et al. (2020) und Riemer und Wachsmuth (im Erscheinen).

## 4 Fazit

Für das Erreichen eines treibhausgasneutralen Energiesystems wird in gewissem Umfang der Einsatz von aus erneuerbarem Strom hergestelltem Wasserstoff nötig sein, welcher auch durch außereuropäische Importe gedeckt werden wird. Für große Transportdistanzen, insbesondere über den Seeweg, ist voraussichtlich ein Trägermedium für den Wasserstoff wegen höherer Energiedichten und geringeren Kühlbedarfen im Vergleich zu flüssigem Wasserstoff sinnvoll. Hierfür stellt Ammoniak eine Option dar.

Ammoniak bietet Vorteile ggü. Wasserstoff durch den geringeren Aufwand für den Schifftransport und die bereits etablierten Transportinfrastrukturen. Diese Vorteile kommen insbesondere dann zum Tragen, wenn eine direkte Nutzung des Ammoniaks ohne die energieintensive Rückgewinnung des Wasserstoffs möglich ist. Dies wird vor allen Dingen in der Schifffahrt gesehen und potenziell auch für die Erzeugung von Residualstrom.

Nachteile in der Nutzung von Ammoniak ergeben sich allerdings durch den geringen Heizwert und unerprobte Technologien sowie durch die potenziell benötigte energieaufwendige Aufspaltung zur Rückgewinnung des Wasserstoffs. Außerdem ist Ammoniak toxisch und kann durch Leckagen in der Wertschöpfungskette sowie bei seiner Verbrennung in Motoren mit hohen Umweltwirkungen einhergehen (durch  $\text{NO}_x$  - und  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen sowie Feinstaub). Andere Träger wie Methanol und Methan sind in dieser Hinsicht vorteilhafter und genauso etabliert im Umgang. Sie benötigen allerdings in der Herstellung eine treibhausgasneutrale Kohlenstoffquelle, was für Ammoniak nicht der Fall ist.

Ammoniak stellt damit vor allem für den Import von grünem Wasserstoff über lange Strecken eine vergleichsweise günstige Option dar, weil der Transport nur mit geringfügigen THG-Emissionen verbunden und die Umstellung der existierenden Infrastrukturen mit relativ geringem Aufwand möglich ist.

Es gibt aber eine Reihe von Unsicherheiten über die Umweltwirkungen von Ammoniak, welche potenziell ein Risiko für den großskaligen Einsatz als Energieträger darstellen. Insbesondere bestehen Unsicherheiten über den Stickstoffkreislauf, die Wirkung von Ammoniak diesbezüglich und auch dessen das Treibhauspotential. Aus der heutigen Nutzung als Düngemittel und den damit verbundenen Umweltauswirkungen kann nur teilweise auf die Folgen einer Verwendung als Energieträger geschlossen werden, weil Ammoniak in diesem Fall nicht auf Ackerflächen verteilt, sondern in Verbrennungsmotoren und Brennstoffzellen verbrannt oder gecrackt wird. Für diese technischen Komponenten ist die Datenlage zu Verbrennungsemissionen ( $\text{NH}_3$ -Schlupf, Bildung von  $\text{NO}_x$  und Lachgas) und  $\text{NH}_3$ -Leckagen noch unzureichend. Ohne diese Daten ist es eine abschließende Bewertung von Ammoniak nur bedingt möglich.

Schließlich ist auch zu vermerken, dass die bisherige heimische Herstellung von Ammoniak durch großskalige Importe potenziell überflüssig wird, die derzeitigen diffusen Ammoniakemission der fossilen Wirtschaft entfallen und insgesamt damit die Wertschöpfung ins Ausland verschoben werden könnte. Ohne eine Anwendung strikter Zertifizierungsbedingungen ergäbe sich dadurch womöglich auch eine Verlagerung mit der Herstellung verbundene THG-Emissionen ins Ausland.

---

## Impressum

### Herausgeber

Umweltbundesamt  
Wörlitzer Platz 1  
06844 Dessau-Roßlau  
Tel: +49 340-2103-0  
Fax: +49 340-2103-2285  
[buergerservice@uba.de](mailto:buergerservice@uba.de)  
Internet: [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de)  
[f/umweltbundesamt](https://www.facebook.com/umweltbundesamt)  
[t/umweltbundesamt](https://www.twitter.com/umweltbundesamt)

### Autoren, Institutionen

Matia Riemer, Jakob Wachsmuth  
Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung ISI  
Volkan Isik, Wolfgang Köppel  
Forschungsstelle des DVGW am Engler-Bunte-Institut des KIT  
  
Im Rahmen des Forschungsvorhaben „Transformation der Gasinfrastruktur zum Klimaschutz“ (FKZ 3720435030).  
  
Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Fertigstellung: 10/2022

## Literaturverzeichnis

- ACER (2021): Transporting Pure Hydrogen by Repurposing Existing Gas Infrastructure: Overview of existing studies and reflections on the conditions for repurposing. ACER. Slovenia. Online verfügbar unter [https://acer.europa.eu/Official\\_documents/Acts\\_of\\_the\\_Agency/Publication/Transporting%20Pure%20Hydrogen%20by%20Repurposing%20Existing%20Gas%20Infrastructure\\_Overview%20of%20studies.pdf](https://acer.europa.eu/Official_documents/Acts_of_the_Agency/Publication/Transporting%20Pure%20Hydrogen%20by%20Repurposing%20Existing%20Gas%20Infrastructure_Overview%20of%20studies.pdf), zuletzt aktualisiert am 2021.
- Agora Industrie; FutureCamp; Wuppertal Institut (2022): Klimaschutzverträge für die Industrietransformation: Kurzfristige Schritte auf dem Pfad zur Klimaneutralität der deutschen Grundstoffindustrie. Hg. v. Agora Industrie. Berlin. Online verfügbar unter [https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021\\_10\\_DE\\_KIT/A-EW\\_249\\_Klimaschutzvertraege-Industrietransformation-Studie\\_WEB.pdf](https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_10_DE_KIT/A-EW_249_Klimaschutzvertraege-Industrietransformation-Studie_WEB.pdf), zuletzt geprüft am 13.10.2022.
- Amonia Energy Association (2022): High Flow Ammonia Cracking between 400-600°C – Ammonia Energy Association. Online verfügbar unter <https://www.ammoniaenergy.org/paper/high-flow-ammonia-cracking-between-400-600c/>, zuletzt aktualisiert am 12.10.2022, zuletzt geprüft am 12.10.2022.
- Ausfelder, Florian (2022): Perspective Europe 2030 Technology options for CO<sub>2</sub>- emission reduction of hydrogen feedstock in ammonia production. Hg. v. DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V (DECHEMA). Online verfügbar unter [https://dechema.de/dechema\\_media/Downloads/Positionspapiere/Studie+Ammoniak.pdf](https://dechema.de/dechema_media/Downloads/Positionspapiere/Studie+Ammoniak.pdf), zuletzt geprüft am 12.10.2022.
- Bartels, Jeffrey (2008): A feasibility study of implementing an Ammonia Economy. Online verfügbar unter <https://dr.lib.iastate.edu/entities/publication/0d44bb27-0317-4e6f-901c-3d709853a435>.
- Bazzanella, A.; Ausfelder, F. (2017): Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry. Technology Study. Hg. v. DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V (DECHEMA). Frankfurt am Main, Germany. Online verfügbar unter [https://dechema.de/dechema\\_media/Downloads/Positionspapiere/Technology\\_study\\_Low\\_carbon\\_energy\\_and\\_feedstock\\_for\\_the\\_European\\_chemical\\_industry-p-20002750.pdf](https://dechema.de/dechema_media/Downloads/Positionspapiere/Technology_study_Low_carbon_energy_and_feedstock_for_the_European_chemical_industry-p-20002750.pdf), zuletzt geprüft am 13.10.2022.

- Bicer, Yusuf; Dincer, Ibrahim; Vezina, Greg; Raso, Frank (2017): Impact Assessment and Environmental Evaluation of Various Ammonia Production Processes. In: *Environmental management* 59 (5), S. 842–855. DOI: 10.1007/s00267-017-0831-6.
- Billerbeck, Jens (2021): Ammoniak für Schiffsmotoren. In: *VDI Verlag GmbH (VDI)*, 03.11.2021. Online verfügbar unter <https://www.vdi-nachrichten.com/technik/mobilitaet/ammoniak-fuer-schiffsmotoren/>, zuletzt geprüft am 12.10.2022.
- Black & Veatch (BV) (2020): Hybrid LNG & Ammonia Infrastructure: Key to a Green Economy. Black & Veatch (BV). Online verfügbar unter <https://www.bv.com/perspectives/hybrid-lng-ammonia-infrastructure-key-green-economy>.
- Cames, M.; Graichen, J.; Kasten, P.; Kühnel, S., Faber, J.; Nelissen, D.; Shanti, H. et al.: Climate Protection in Aviation and Maritime Transport: Roadmaps for Achieving the Climate Goals. Im Auftrag des Umweltbundesamts, FKZ 3717 43 102 0, wird in Kürze veröffentlicht. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Dessau-Roßlau.
- European Environment Agency (EEA) (2022): EEA greenhouse gases - data viewer. Online verfügbar unter <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/data-viewers/greenhouse-gases-viewer>, zuletzt geprüft am 12.10.2022.
- Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV (Fraunhofer IGCV) (2021): Hintergrundpapier zu Gasinfrastrukturen im Lichte des russischen Angriffskriegs auf die Ukraine. Online verfügbar unter <https://www.ieg.fraunhofer.de/content/dam/ieg/documents/Hintergrundpapier%20zu%20Gasinfrastrukturen%20TransHyDE%20final.pdf>, zuletzt aktualisiert am 2021, zuletzt geprüft am 17.08.2022.
- Geres, Roland; Kohn, Andreas; Lenz, Sebastian Cornelius; Ausfelder, Florian; Bazzanella, Alexis; Möller, Alexander (2019): Roadmap Chemie 2050. Auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie in Deutschland : eine Studie von DECHEMA und FutureCamp für den VCI. Frankfurt am Main: DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. Online verfügbar unter <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/2019-10-09-studie-roadmap-chemie-2050-treibhausgasneutralitaet.pdf>, zuletzt geprüft am 13.10.2022.
- Ghavam, Seyedehhoma; Vahdati, Maria; Wilson, I. A. Grant; Styring, Peter (2021): Sustainable Ammonia Production Processes. In: *Front. Energy Res.* 9, Artikel 580808. DOI: 10.3389/fenrg.2021.580808.
- International Energy Agency (IEA) (2022): Executive Summary – Ammonia Technology Roadmap – Analysis - IEA. Online verfügbar unter <https://www.iea.org/reports/ammonia-technology-roadmap/executive-summary>, zuletzt aktualisiert am 13.10.2022, zuletzt geprüft am 13.10.2022.
- International Renewable Energy Agency (IRENA) (2022a): GLOBAL HYDROGEN TRADE TO MEET THE 1.5°C CLIMATE GOAL. PART II TECHNOLOGY REVIEW OF HYDROGEN CARRIERS (978-92-9260-431-8). Online verfügbar unter [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Apr/IRENA\\_Global\\_Trade\\_Hydrogen\\_2022.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Apr/IRENA_Global_Trade_Hydrogen_2022.pdf), zuletzt geprüft am 17.08.2022.
- International Renewable Energy Agency (IRENA) (2022b): Innovation Outlook: Renewable Ammonia. Online verfügbar unter <https://irena.org/publications/2022/May/Innovation->



- Outlook-Renewable-Ammonia, zuletzt aktualisiert am 12.10.2022, zuletzt geprüft am 12.10.2022.
- Ishimoto, Yuki; Voldsund, Mari; Neksa, Petter; Roussanaly, Simon; Berstad, David; Gardarsdottir, Stefania Osk (2020): Large-scale production and transport of hydrogen from Norway to Europe and Japan: Value chain analysis and comparison of liquid hydrogen and ammonia as energy carriers. In: *Hydrogen Energy*, S. 32865–32883.
- Kobayashi, Hideaki; Hayakawa, Akihiro; Somarathne, K. Kunkuma A.D.; Okafor, Ekenechukwu C. (2019): Science and technology of ammonia combustion. In: *Proceedings of the Combustion Institute* 37 (1), S. 109–133. DOI: 10.1016/j.proci.2018.09.029.
- Lan, Rong; Irvine, John T. S.; Tao, Shanwen (2013): Synthesis of ammonia directly from air and water at ambient temperature and pressure. In: *Scientific reports* 3, S. 1145. DOI: 10.1038/srep01145.
- MacFarlane, Douglas R.; Cherepanov, Pavel V.; Choi, Jaecheol; Suryanto, Bryan H.R.; Hodgetts, Rebecca Y.; Bakker, Jacinta M. et al. (2020): A Roadmap to the Ammonia Economy. In: *Joule* 4 (6), S. 1186–1205. DOI: 10.1016/j.joule.2020.04.004.
- Mallouppas, George; Ioannou, Constantina; Yfantis, Elias Ar. (2022): A Review of the Latest Trends in the Use of Green Ammonia as an Energy Carrier in Maritime Industry. In: *Energies* 15 (4), S. 1453. DOI: 10.3390/en15041453.
- Moser, Joel (2022): Why green ammonia will be the workhorse of EU's future hydrogen economy. In: *EURACTIV*, 30.06.2022. Online verfügbar unter <https://www.euractiv.com/section/energy/opinion/why-green-ammonia-will-be-the-workhorse-of-eus-future-hydrogen-economy/>, zuletzt geprüft am 12.10.2022.
- Müller, Rolf (2021): The impact of the rise in atmospheric nitrous oxide on stratospheric ozone : This article belongs to Ambio's 50th Anniversary Collection. Theme: Ozone Layer. In: *Ambio* 50 (1), S. 35–39. DOI: 10.1007/s13280-020-01428-3.
- National Library of Medicine (NIH) (2022): PubChem - Compound Summary Ammonia. National Center for Biotechnology Information. Online verfügbar unter <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Ammonia>, zuletzt geprüft am April 2022.
- Nguyen, Duy-Hieu; Lin, Chitsan; Vu, Chi-Thanh; Cheruiyot, Nicholas Kiprotich; Nguyen, Minh Ky; Le, Thi Hieu et al. (2022): Tropospheric ozone and NO<sub>x</sub>: A review of worldwide variation and meteorological influences. In: *Environmental Technology & Innovation* 28, S. 102809. DOI: 10.1016/j.eti.2022.102809.
- Oyarzabal, Rosa; Falco, Lucas (2021): The EU Commission approves the EU criteria on sustainable hydrogen activities. Inside Energy & Environment. In: *Inside Energy & Environment* 2021, 2021. Online verfügbar unter <https://www.insideenergyandenvironment.com/2021/04/the-european-commission-approves-the-eu-criteria-on-sustainable-hydrogen-activities/>, zuletzt geprüft am 29.10.2021.
- Parkinson, B.; Balcombe, P.; Speirs, J. F.; Hawkes, A. D.; Hellgardt, K. (2019): Levelized cost of CO<sub>2</sub> mitigation from hydrogen production routes. In: *Energy Environ. Sci.* 12 (1), S. 19–40. DOI: 10.1039/C8ee02079E.
- Riemer, M.; Wachsmuth, J. ((im Erscheinen)): Welche Treibhausgasemissionen verursacht die Wasserstoffproduktion? Vergleich der Treibhauswirkungen verschiedener



- Wasserstoffherstellungsprozesse entlang der Wertschöpfungskette. UBA Factsheet. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Dessau-Roßlau.
- Smith, Collin; Hill, Alfred K.; Torrente-Murciano, Laura (2020): Current and future role of Haber-Bosch ammonia in a carbon-free energy landscape. In: *Energy Environ. Sci.* 13 (2), S. 331–344. DOI: 10.1039/C9EE02873K.
- Stiftung Klimaneutralität; Agora Energiewende (AGORA); Agora Verkehrswende (Agora); Bundesverband der Deutschen Industrie e. V. (BDI); Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena); Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2022): Vergleich der "Big 5" Klimaneutralitätsszenarien. Online verfügbar unter [https://ariadneprojekt.de/media/2022/03/2022-03-16-Big5-Szenarienvergleich\\_final.pdf](https://ariadneprojekt.de/media/2022/03/2022-03-16-Big5-Szenarienvergleich_final.pdf), zuletzt geprüft am 10.10.2022.
- The European Chemical Industry Council (Cefic) (2013): Energy-Roadmap: European chemistry for growth. Unlocking a competitive, low carbon and energy efficient future. Brochure. Brussels. Online verfügbar unter [https://cefic.org/app/uploads/2019/01/Energy-Roadmap-The-Report-European-chemistry-for-growth\\_BROCHURE-Energy.pdf](https://cefic.org/app/uploads/2019/01/Energy-Roadmap-The-Report-European-chemistry-for-growth_BROCHURE-Energy.pdf), zuletzt geprüft am 13.10.2022.
- U.S. Department of Energy (2006): Potential roles of ammonia in a hydrogen economy. A Study of Issues Related to the Use Ammonia for On-Board Vehicular Hydrogen Storage. U.S. Department of Energy. Online verfügbar unter [https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/01/f19/fcto\\_nh3\\_h2\\_storage\\_white\\_paper\\_2006.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/01/f19/fcto_nh3_h2_storage_white_paper_2006.pdf).
- Umweltbundesamt (UBA) (2001): German Notes on BAT for the production of Large Volume Solid Inorganic Chemicals. Harnstoff. Endbericht. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3229.pdf>, zuletzt geprüft am 13.10.2022.
- Umweltbundesamt (UBA) (2019): Roadmap Gas für die Energiewende – Nachhaltiger Klimabeitrag des Gassektors. Umweltbundesamt (UBA).
- United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) (1999): Multikomponentenprotokoll zur UNECE-Luftreinhaltekonvention - (Gothenburg Protocol). Online verfügbar unter <https://unece.org/environment-policy/air/protocol-abate-acidification-eutrophication-and-ground-level-ozone>.
- Ye, Lin; Nayak-Luke, Richard; Bañares-Alcántara, René; Tsang, Edman (2017): Reaction: "Green" Ammonia Production. In: *Chem* 3 (5), S. 712–714. DOI: 10.1016/j.chempr.2017.10.016.
- Zhang, Mo; Guan, Jing; Tu, Yunchuan; Chen, Shiming; Wang, Yong; Wang, Suheng et al. (2020): Highly efficient H<sub>2</sub> production from H<sub>2</sub>S via a robust graphene-encapsulated metal catalyst. In: *Energy Environ. Sci.* 13 (1), S. 119–126. DOI: 10.1039/C9EE03231B.