

Ammoniak als zukünftiger Energievektor für Deutschland

Ammonia as a future energy vector for Germany

Jens Wartmann, ZBT GmbH, Duisburg, Deutschland, j.wartmann@zbt.de

Kurzfassung

Um das im Pariser Klimaschutzabkommen festgeschriebene Ziel der Begrenzung der Erderwärmung auf 1,5 Grad einzuhalten, ist ein umfassender Umbau unserer Energienutzung und -bereitstellung erforderlich. Unsere Klimaziele lassen sich nur durch umfassende Dekarbonisierung unserer Wirtschaft erreichen. Heute werden erst 16% [1] der gesamten Primärenergie aus erneuerbaren Energien bereitgestellt. Neben dem Ausbau der heimischen regenerativen der Stromerzeugung und möglicher Energieeinsparungen wird der restliche Energiebedarf importiert werden müssen. Wasserstoff ist dafür der Energieträger der Wahl. Dieser lässt sich zwar gut gewinnen, aber nur schwer transportieren. Daher wird Wasserstoff in einem Trägermolekül gebunden. Dafür gibt es verschiedene Ansätze, die hier dargestellt werden. Ammoniak (NH_3) als mit 200 Mio. t/a am meisten produzierte Chemikalie ist eine der möglichen Lösungen. Durch seine günstigen stofflichen Eigenschaften gewährleistet er wirtschaftliche Erzeugung, Transport und Nutzung in unterschiedlichen Sektoren. Wasserstoff aus Ammoniak kommt ohne Kohlenstoff aus der Atmosphäre aus. Daher eignet sich Ammoniak als Energievektor zur Dekarbonisierung Deutschlands. Die Möglichkeiten eines Ammoniak Eco-Systems werden zusammengefasst dargestellt.

Abstract

In order to meet the 1.5 degree target set in the Paris Agreement, a comprehensive transformation of our energy use and supply is required. Our climate goals can only be achieved through a comprehensive decarbonisation of our economy. Today, only 16% [1] of total primary energy is provided by renewable energy. In addition to the expansion of domestic renewable power generation, the remaining energy demand will have to be imported. Hydrogen is the energy carrier of choice for this. It is easy to produce but difficult to transport. Therefore, the hydrogen is bound in a carrier molecule, for which there are various approaches that are presented here. Ammonia (NH_3) as the most produced chemical with 200 million t/a is one solution. Due to its favourable material properties, its economic production ensures transport and use in different sectors of hydrogen without the use of carbon. Therefore, it is suitable as an energy vector for decarbonising Germany. The possibilities of ammonia eco-system are summarised.

1 Ein kurzer Überblick zur Primärenergienutzung in Deutschland

Im Jahre 2020 wurden in Deutschland 12.193 Petajoule an Primärenergie eingesetzt. 16 % davon stammen aus regenerativen Energiequellen, 72 % jedoch stammten aus fossilen Energiequellen wie Erdgas, Erdöl und Kohle. Damit sind in Deutschland 762 Mio. Tonnen CO_2 verbunden, was eine Abnahme um 38 % gegenüber dem Referenzjahr 1990 bedeutet. Ziel ist es, die Klimagasemissionen auf 462 Mio. t im Jahr 2035 abzusinken und 2045 die Klimaneutralität zu erreichen. Ein Teil der CO_2 -Einsparung ist durch die vermehrte Verwendung von Erdgas mit seinem hohen spezifischen Wasserstoffanteil erzielt worden. Der Anteil von Erdgas am Primärenergieverbrauch stieg von 15 auf 27 %. Davon entfallen 50 % auf russische Erdgaslieferungen, die jetzt zusätzlich sehr schnell substituiert werden müssen. Dafür kommt sofort nur LNG als Lösung in Frage. Da Deutschland heute über keine LNG-Terminals verfügt, muss das verflüssigte Erdgas aus anderen Ländern mit Terminals (z.B. Belgien, Niederlande, Frankreich) importiert werden. Das führt zu technisch anspruchsvollen Fragestellungen, die nur im Rahmen einer europäischen Zusammenarbeit zu lösen sind, da Erdgas-Pipelines in Flussumkehr betrieben werden müssen [2].

1.1 Kohlenstoffintensität Sekundärenergie

Für chemisch gebundene Sekundärenergieträger hat sich eine Farbenlehre etabliert, die hier kurz erläutert werden soll. In Bild 1 sind entsprechende Primärenergiequellen den üblichen Farbbezeichnungen zu geordnet. Dieses Schema lässt sich auf unterschiedliche Sekundärträger wie Wasserstoff, Methanol oder LOHC übertragen. Wichtig sind:

- Grün: Erzeugung aus regenerativen Energien;
- Blau: Erzeugung aus fossilen Energieträgern mit Rückhaltung von CO_2 (gasförmig);
- Grau: Erzeugung aus Erdgas ohne CO_2 -Rückhaltung;
- Schwarz/Braun: Erzeugung aus festem Kohlenstoff.

Die oben genannten wurden auch vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) so festgelegt [2]. Die weiteren Farben wurden in der Wissenschaft zum Beispiel vom Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e.V. so definiert (IKEM) [3]. Allerdings gibt es dafür keine verbindlichen Festlegungen.



Bild 1 Bewertung der Klimaneutralität am Beispiel von Ammoniak aus Wasserelektrolyse und Stickstoff aus der Luft erzeugt, kommt nur in geringen Mengen auf der Erde vor, Dampfreformierung, derzeit das häufigste Erzeugungsverfahren.

1.2 Primärenergieverbräuche nach Sektoren

Der Primärenergieeinsatz in Deutschland wird in vier verschiedene Sektoren unterteilt. Die Sektoren sind Verkehr mit einem Anteil von 30,6 %, Industrie 28 %, Gewerbe, Handel und Dienstleistungen mit 14,8 % und Haushalte mit 26,5 % am Gesamtenergieverbrauch. Der Primärenergieverbrauch verteilt sich relativ gleichmäßig auf die Sektoren. Der Dienstleistungssektor fällt im Verbrauch etwas ab. Dies hat Auswirkungen auf die Energieproduktivität [4]. Diese ist in den vergangenen Jahren bezogen auf das Bruttoinlandsprodukt konstant gestiegen. Dies wird auch durch die Erweiterung des Dienstleistungssektors an der gesamtwirtschaftlichen Leistung erreicht. Viele energieintensive Industrien verlagerten sich an kostengünstigere Standorte außerhalb Deutschlands. Die CO₂-Emissionen verteilen sich in den Sektoren unterschiedlich durch den unterschiedlichen Einsatz der bevorzugten Energieträger.

1.2.1 Sektor Verkehr

Die Klimagasintensität in den Sektoren ist sehr unterschiedlich. Der Verkehrssektor hat bis heute auf Grund des zunehmenden Verkehrs trotz Effizienzsteigerung seine gesamten Klimaziele verfehlt. 94% Prozent der eingesetzten Primärenergie sind Mineralöle und nur 1,6 % regenerative elektrische Energie. Mit 30,6% ist dies der größte Einzelsektor bezogen auf den Gesamtenergieverbrauch. Mit der Elektrifizierung des Sektors durch den Einsatz von Batteriefahrzeugen soll der Primärenergieverbrauch signifikant reduziert werden. Für den Gütertransport ist die Lösung nur bedingt tauglich und der Endenergieverbrauch liegt heute bei 105 % zum Referenzjahr 2005 [4]. Eine Dekarbonisierung dieses Teilssektors ist ohne Wasserstoff nicht erreichbar. Das in Deutschland vorhandene Potential an regenerativer Energie ist dafür alleine nicht ausreichend. Dieser Sektor ist für das Erreichen seiner Klimaziele auf den Import von grünem Wasserstoff angewiesen. Dabei kann dieser direkt oder indirekt durch die Rückverstromung für den Verkehrssektor bereitgestellt werden.

1.2.2 Sektor Industrie

Der Industriesektor benötigt zur Wärmeerzeugung große Mengen an Klimagas verursachenden Brennstoffen wie Kohle und Gas, nämlich ca. 50 % des Energiebedarfs. Energieintensive Branchen sind dabei besonders auf wettbewerbsfähige Energiekosten angewiesen, um weiter am heimischen Standort erfolgreich bestehen zu können. Daher wird auch hier der Import regenerativer Energien durch Power2X-Ansätze unerlässlich, da in Gebieten mit gutem regenerativen Angebot die Stromgestehungskosten mit 20 €/MWh [IRENA] wesentlich unter unseren Kosten liegen. Diese Lücke lässt sich naturbedingt nicht schließen. Die Stahlindustrie ist zwingend auf niedrige Wasserstoffkosten angewiesen, wenn weiter in Deutschland Stahl produziert werden soll und ist daher ebenfalls auf Energieimporte angewiesen. Das gilt in gleicher Weise für die chemische Industrie.

1.2.3 Gewerbe, Handel und Dienstleistung

Gewerbe, Handel und Dienstleistungen weisen den niedrigsten Energieeinsatz auf. Dienstleistungen sind nicht energieintensiv und beanspruchen von allen Sektoren mit 39,2 % den geringsten Anteil der Energie. Strom bildet den größten Anteil am Energiebedarf dieses Sektors damit ist dieser weniger klimagasintensiv. Aber auch hier wird viel fossile Primärenergie – mit 49,9 % hauptsächlich zur Wärmebereitstellung – eingesetzt. Zur Defossilisierung werden auch hier wesentliche Mengen an grünem Wasserstoff benötigt, um die Klimaziele zu erreichen.

1.2.4 Haushalt

80 % des Primärenergiebedarfs im Sektor Haushalt werden für die Wärmebereitung benötigt. Durch Energieeinsparung kann in diesem Sektor am meisten erreicht werden. Auf Grund der hohen Anzahl von Bestandsbauten wird hier auch Erdgas durch Wasserstoff und regenerativen Strom ersetzt werden müssen. Werden Bestandsbauten nicht energetisch saniert, ist die Nutzung von elektrischen Wärmepumpen nur begrenzt möglich. Gleiches gilt für die solarthermische Bereitstellung von Wärme zu Heizzwecken. Somit wird auch dieser Sektor de-karbonisierte Energieträger benötigen, um seine Klimaziele zu erreichen. Power2Heat sind hier neben Wasserstoff alternative Lösungsansätze.

1.3 Entwicklung der Energieproduktivität

Die Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen analysiert die Energieverbräuche und stellt die Ergebnisse [Y] regelmäßig in aufbereiteter Form dar. Betrachtet man die Energieproduktivität einmal bezogen auf die wirtschaftliche Leistung und einmal pro Kopf, sieht man, dass sich die Energieproduktivität in den letzten Jahrzehnten stetig um xx % bezogen auf das Bruttoinlandsprodukt verbessert hat. Bei der Betrachtung der Verbesserung der Energieproduktivität pro Kopf sind die messbaren jährlichen Steigerungen mit xx relativ gering. Nimmt man dies als Maßstab, wird ersichtlich, dass die Ziele in der Senkung des Primärenergiebedarfs, wie die von der Bundesregierung vorgeben

wurde, nur schwer erreichbar sind. Insbesondere, wenn man bedenkt, dass wir nur einen kurzen Zeitraum dafür zur Verfügung haben. Entweder, wir finden technologische Sprunginnovationen, die diese Problemstellung lösen und so die Energieeffizienz maßgeblich verbessern, oder es muss mehr regenerative grüne Energie zur Verfügung stehen, die in Deutschland gewonnen werden muss. Die fehlenden Energiemengen müssen zwangsläufig importiert werden, sonst sind die Vorgaben nicht erreichbar.

1.4 Entwicklung der Stromgestehungskosten regenerativer Energien

Um eine klimaneutrale wirtschaftliche Energieversorgung gewährleisten zu können, dürfen die Stromgestehungskosten nicht zu hoch sein. In den letzten 10 Jahren sind die Investitionskosten für PV um mehr als 80 % (2010 – 2019) gesunken. Dieser Trend hat sich auch in 2020 fortgesetzt. Auch bei der technisch aufwändigen Offshore-Windenergieerzeugung sind die Kosten um 34 % gesunken. Die Kohleverstromung gilt als wirtschaftlichste Methode der Stromerzeugung aus fossilen Primärenergieträgern und ist damit der relevante Vergleichsmaßstab. Alle bedeutenden regenerativen Energiewandlungsmethoden sind auf guten Standorten auch gegenüber der Kohleverstromung wirtschaftlich wettbewerbsfähig. In Deutschland wird zumindest die Preisparität erreicht [1]. Die derzeit stark gestiegenen Kosten für elektrische Energie sind ein Angebotsproblem auf Grund reduzierter Kapazität und des verzögerten Ausbaus regenerativer Anlagen auf der anderen Seite.

1.4.1 Entwicklung der Wasserstoffherstellungskosten

Damit wird in Deutschland die Erzeugung von grünem Wasserstoff gegenüber dem Import von grünem Wasserstoff wirtschaftlich unrentabel. Heimischer grüner Wasserstoff wird vielfaches mehr kosten als importierter grüner Wasserstoff. Die Erzeugungskosten von grünem Wasserstoff werden zu mehr als 60 % [x Bundestag] von den Strombezugskosten bestimmt. Bei Börsenpreisen für Strom über 100 €/MWh bleibt grüner Wasserstoff weitestgehend wirtschaftlich uninteressant.

Eine höhere Bepreisung von CO₂-Emissionen verbessert die Wirtschaftlichkeit von inländisch produziertem grünem Wasserstoff für die Nutzung in den einzelnen Sektoren. Dies ändert aber nichts an der Preisdifferenz zwischen importierter und inländischer Erzeugung von Sekundärenergie zur Sektorenkopplung. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass der grundlegende Bedarf zur Deckung von Erzeugungslücken durch den Import gedeckt werden wird. Ergänzend brauchen wir inländische Mittel- und Spitzenlasterzeugung respektive die Schaffung entsprechender Speicherkapazitäten. Um regenerative Energie wirtschaftlich auf relevanter TWh-Skala zu speichern und diese transportieren zu können, werden folgende technische Power2X-Lösungen [6] häufig genannt:

- Wasserstoff, gasförmig per Pipeline oder flüssig,
- Ammoniak flüssig,
- LOHC flüssig,
- Methanol flüssig,
- SNG gasförmig flüssig.

2 Power-2X-Optionen für den Import von grünem Wasserstoff

Wie oben bereits dargestellt, ist davon auszugehen, dass Wasserstoff als kohlenstofffreier Energieträger auch importiert werden muss, um eine hohe Energieversorgungssicherheit und Diversifizierung für Deutschland zu gewährleisten. Neben dem direkten Leitungstransport, der nicht immer möglich ist, brauchen wir Trägermoleküle, die einen günstigen Transport und - wenn möglich - auch eine direkte Nutzung des gebundenen Wasserstoffs ermöglichen. Dinberg et. al [6] hat dazu die möglichen einfachen Kohlenwasserstoffe mit stickstoffbasierten Wasserstoffträgern verglichen. Dazu bildet dieser sogenannte Power2Fuel2Power-Index, der die gesamte Wirkungsgradkette mit einer theoretischen Betrachtung bewertet. In der Tabelle 1 sind die Indexe für Moleküle dargestellt und mit Gestehungskosten nach [7] ergänzt.

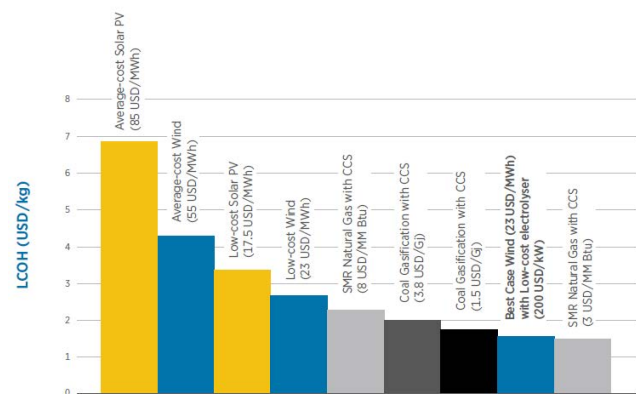


Bild 2 Kosten für die Wasserstoffherstellung unterschiedlicher Energiequellen nach IRENA [1] bezogen auf das Jahr 2019.

In der Tabelle 1 wird deutlich, dass Ammoniak sowohl Effizienz- als Kostenvorteile bietet. Schon heute ist die Gewinnung von Stickstoff energieeffizienter als diese von CO₂ in der Theorie überhaupt möglich wäre [1]. Es muss die Zukunft zeigen, in wieweit Kostensenkungspotentiale für DAC-Anlagen erfolgreich erschlossen werden können. Dies wird darüber entscheiden, ob kohlenstoffhaltige Power2X Lösungen mit SNG und e-Methanol wirtschaftlich wettbewerbsfähig werden oder nicht. LOHC als Wasserstoffträger wird in den Studien nicht mit betrachtet. Da für den Prozess kein CO₂ aus der Atmosphäre gewonnen werden muss und die Carrier vielfach beladen werden können, sind LOHC Lösungen bei Wasserstoff die preiswerteste Lösung für die Erzeugung von allen kohlenstoffbasierten Lösungen [7]. Wenn man die Wirkungsgradketten abschätzt, so kommt man zu Werten, die denen von Ammoniak entsprechen. Als Unterschied kann festgehalten werden, dass immer erst Wasserstoff durch Dehydrierung gewonnen werden muss – eine direkte Nutzung von LOHC als Energieträger ist nicht vorgesehen.

Trägermolekül	Formel	P2F2P	Wasserstoffmeng je Trägermolekül	Kosten US\$/t
Ammoniak	NH ₃	35%	17,8 %	500 - 650
Methanol	CH ₃ OH	27%	12,4 %	1230 - 2380
DME	C ₂ H ₆ O	23%	13,0 %	-
SNG	CH ₄	27 %	25 %	1380
LHOC	Perhydrodibenzyltoluo (Beispiel)	35 %	~ 6 %	-

Tabelle 1 Darstellung der Well-to-Wake Effizienz-unterschiedlicher Wasserstoffträger und Abschätzungen der damit verbundenen Kosten für den Energieträger. Es wird davon ausgegangen, dass Direct Air Capture (DAC) für CO₂ Gewinnung eingesetzt wird. [6,5,v]

3 Ammoniak als Energieträger für Deutschland

Mit mehr als 200 Mio. Tonnen ist Ammoniak heute eine der am meisten produzierten Chemikalien der Welt und benötigt heute 55 % des weltweit erzeugten Wasserstoffs. In der vergangenen Dekade sind Nordamerika und Asien in den Blickpunkt des Interesses als Energieträger und Lieferant geraten. Ammoniak bietet den wesentlichen Vorteil, eine kohlenstofffreie Energiewandlungskette aufbauen zu können. Schon heute existiert eine globale Infrastruktur für Verteilung und Umschlag von Ammoniak für die Düngemittel-Industrie. Diese Erfahrungen erleichtern den Ausbau von Ammoniak als Energieträger. Dieser Ansatz wird vom BMBF WIR! CAMPFIRE Bündnis verfolgt und in zahlreichen Projekten ein Ammoniak-ECO-System entwickelt. Bild 3 zeigt den Aufbau. Wichtig ist, dass bei den Fragestellungen zu Ammoniak als neuer Energieträger auch die Bereiche Infrastruktur, Akzeptanz und Rechtsrahmen in den Vorhaben betrachtet werden, um Ammoniak erfolgreich zu platzieren.

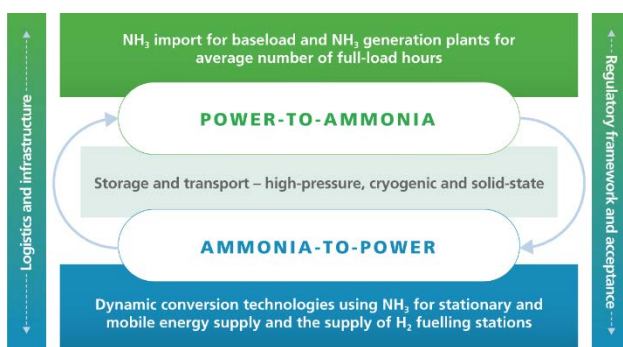


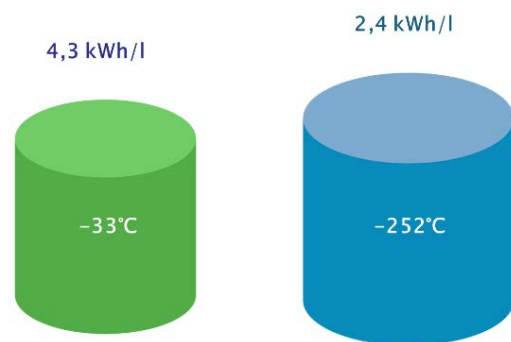
Bild 3 Ammoniak ECO System mit Power to Ammonia und Ammonia to Power. Im Rahmen des TransHyDe CAMPFIRE Umsetzungsprojekt und des CAMPFIRE Bündnisses werden dazu 23 verschiedene Verbundforschungsvorhaben dazu geführt.

3.1 Eigenschaften von Ammoniak als Energieträger

Ammoniak liegt bei -33 °C und einer Atmosphäre in flüssigem Aggregatzustand vor und weist dabei eine um 44 %

höhere Energiedichte als flüssiger Wasserstoff (-252 °C) auf wie in Bild 4 dargestellt.

Bei Umgebungstemperatur liegt bei Ammoniak 20 °C und 8 bar flüssiger Phase vor. Mit Massenanteil von 17,8 % hat es einen sehr hohen Anteil an Wasserstoff. Nur Methan ist günstiger, setzt aber bei Verbrennung CO₂ frei und selbst ein hohes GWP.



Verflüssigter Ammoniak NH₃ Verflüssigter Wasserstoff H₂

Bild 4 Links verflüssigter Ammoniak, rechts verflüssigter Wasserstoff

Ammoniak weist auch kein GWP auf, anders als Kohlendioxid 1 und Methan 40. Ein bedeutender Nachteil von Ammoniak ist seine Toxizität, was sichere Lagerung und Umgang erfordert.

3.1.1 Logistik von Ammoniak als Energieträger

Ein großes Ammoniak-Tankschiff kann mehr als 10.000 t Wasserstoff transportieren. Ein LH₂ hingegen rund 96 t. Auch ist ein solches LH₂-Schiff wesentlich teurer in der Anschaffung. Der kalte Transport von Ammoniak ist sehr kostengünstig und es existiert heute schon eine globale Tankerflotte zum Transport. Bei großen Entfernungen ist Ammoniak das günstigste Trägermolekül, um Wasserstoff über weite Distanzen zu transportieren.

Nach Erwärmung auf einen druckverflüssigten Zustand kann Ammoniak in Eisenbahn-Kesselwagen in Zügen bis 1000 t transportiert werden. Es können auch in kurzer Zeit Kapazitäten für den Binnenschifftransport aufgebaut werden. In ISO Containern ist der Transport auf der Straße in Deutschland jedoch derzeit nicht zulässig. Das heißt, Ammoniak kann als Wasserstoffträger schnell ausgerollt

werden. Der Aufbau einer vergleichbaren Infrastruktur für Wasserstoff wäre um ein Vielfaches teurer und technisch wesentlich risikobehafteter.

3.1.2 Speicherung von grünem Ammoniak

Anderes als LNG gibt es für Ammoniak in Deutschland schon einen Terminal im Rostocker Chemiehafen Peez. Die Yara GmbH & Co.KG besitzt dort einen dort ein entsprechendes Tanklager. Dort können sofort bis 3,250 TWh an grüner Energie importiert werden, dies entspricht rund 600.000 t NH₃.

3.1.3 Power2Ammoniak

Für die Herstellung von Ammoniak aus grünem Wasserstoff werden in wind- und sonnenreichen Gebieten sogenannte worldscale Anlagen entwickelt, die eine Leistung von 1800 Tagerstonnen erreichen können. Nur etwa 6 % der Energie wird für den Anlagenbetrieb benötigt. Dazu werden entsprechende Elektrolyse- und Energieerzeugungskapazitäten entwickelt und aufgebaut. Diese Anlagen sind für den Grundlastbetrieb konzipiert.

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die aktuell geplanten Großprojekte für die grüne Ammoniak-Erzeugung.

Name	Menge	Installierte Leistung	Land
Asian RE Hub	9.9 Mio t	16 GW	Australien
Svevind	15 Mio t	45 GW	Kazakhstan
Aman	20 Mio. t	30 GW	Mauritanien
AL Wusta	10 Mio t	15 GW	Oman
Western Green Engergy Hub	20 Mio t	50 GW	Australien
Grand Inga Dam	20 Mio t	40 GW	Kongo

Tabelle 2 Übersicht über die größten Grünen Ammoniak Projekte weltweit.

Im CAMPFIRE Umsetzung Projekt werden dazu ergänzend wesentlich kleinere Ammoniak-Anlagen entwickelt, die schnell gestartet und dynamischen Betrieb erlauben, dazu werden angepasste Komponenten und eine neue Generation von Haber-Bosch Reaktoren entwickelt. Dafür werden mit Katalysator beschichtete Strömungsleitelemente für einen verbesserten Wärme- und Stofftransport eingesetzt, die ein konstant fallendes Temperaturprofil zu verwenden und somit die Ausbeute der Ammoniaksynthese verbessern. Damit wird eine Technologie zur saisonalen, regionalen Energiespeicherung entwickelt, die den Import

3.2 Ammoniak2Power

Der Vorteil von Ammoniak ist, dass er sich in allen relevanten Energiewandlungsprozesse eingliedern lässt. Durch Cracking lässt Ammoniak sich wieder in Wasserstoff rückwandeln und in Zukunft in Erdgas-leitungen einspeisen. So

kann man Erdgas dekarbonisieren und die gesteckten Klimaschutzziele erreichen.

In Japan wird daran gearbeitet, Kohle als Primärenergieträger in Kraftwerken zu ersetzen [] und durch Substitution entsprechend den CarbonFoot Print zu reduzieren. Dies ist auch eine mögliche Strategie für Deutschland, da die vermehrte Nutzung von Erdgas zurückgeführt werden unsere Kohlekraftwerke länger betrieben werden müssen, um die notwendige Versorgungssicherheit zu erreichen. Alternativ gibt es von Mitsubishi Entwicklungen von Gasturbinen, deren Abgase in den Kessel eingeleitet wird.

Im Rahmen des CAMPFIRE Bündnisses werden Motoren in verschiedenen Leistungsklassen entwickelt. Im kleinsten Leistungsbereich wird ein Wasserstoff-Motor für Sportyachten entwickelt, der mit Wasserstoff aus einem Cracker versorgt wird. Parallel wird eine Bordnetzversorgung durch ein SOFC Modul sichergestellt.

In einem weiteren Projekt wird ein Binnenschiffs Motor-Generator entwickelt. Dieser Antriebsstrang kann in einer Retrofitmaßnahme in ein Binnenschiff integriert werden. Als Verbrennungshilfe wird ebenfalls in einem Ammoniak-Cracker Wasserstoff hergestellt. Dieser erzeugte Wasserstoff, wird dann zusammen mit Ammoniak dem Verbrennungsmotor zu geführt wird. In einem angepassten Brennverfahren wird so die erzeugte mechanische in elektrische Energie umgewandelt

In einem dritten Motor Forschungsprojekt wird ein stationäres BHKW entwickelt und im CAMPFIRE Open Innovation Lab demonstriert. Der Motor mit einer Leistung von 1MWel wird Anfang 2024 in den Versuchsbetrieb gehen. In diesem besteht die Möglichkeit, Am-moia2Power-Anwendungen bis 5 t/h Ammoniakverbrauch zu testen.

4 Fazit

Es konnte gezeigt werden, dass Ammoniak für den Import von grünem Wasserstoff das dominante Trägermolekül werden wird. Auf Grund der Erzeugungskosten ist das Ausbau-Potential von grünem Wasserstoff in Deutschland limitiert. Der hohe technische Reifegrad der Ammoniak-Technologie wird zu seinem schnellen Erfolg beitragen und somit kann ein Beitrag zur klimaneutralen Erdgas-Substitution geleistet werden. Dieses Ziel kann mittelfristige Sicht erreicht werden.

5 Literatur

- [1] Analog Devices: Analog Design Seminar. München: Analog Devices GmbH, 1989.
- [2] Lancaster, Don: Das Aktiv-Filter-Kochbuch. Vaterstetten: IWT, 1986.
- [3] Grütz, A.: Jahrbuch Elektrotechnik '98. Berlin Offenbach: VDE VERLAG, 1997.
- [4] Huneus, H.; Lex, A.: Magnetische Eigenschaft von nichtkornorientiertem Elektroblech. etz Elektrotech. Z. 112 (1991) H. 22, S. 1204-1208.
- [5] Abramowitz, M.: Handbook of mathematical functions. 3. Aufl., New York: Dover, 1980.