

## **Grüner Ammoniak als Diesel, Kerosin, Flüssiggas und Erdgasersatz**

Die Verwendung von grünem Ammoniak ist vielfältig. Er kann die konventionelle Ammoniakherstellung aus Erdgas ersetzen und somit den CO<sub>2</sub> Ausstoß weltweit um 2 Prozent verringern.

Grüner Ammoniak ist aber auch ein vielseitig einsetzbarer Treibstoff, der in verschiedenen Aggregaten verbrannt oder mittels einer Brennstoffzelle in elektrischen Strom umgewandelt werden kann. Ammoniak Brennstoffzellen sind allerdings noch in der Entwicklung, haben aber den Vorteil, dass ihr Wirkungsgrad gegenüber Verbrennern deutlich höher ist und keine Stickoxide entstehen. Ammoniak in modernen Dieselaggregaten, Gasmotoren und Turbinen zu verbrennen ist Stand der Technik. Als Abgas fallen Wasserdampf, Stickstoff und Stickoxide in unterschiedlichen Konzentrationen an. In Dieselmotoren werden die Stickoxide wie gewohnt katalytisch umgewandelt, wobei der notwendige Ammoniak überwiegend aus der unvollständigen Verbrennung stammt. Der Unterschied zu Diesel und Kerosin ist, dass aufgrund des geringeren Heizwertes die 2,25-fache Masse benötigt wird. Bei größeren Kraftfahrzeugen wie SUVs, Kleinbussen, Transportern, Bussen und Lkws sowie bei Lokomotiven und Schiffen ist dies kein Problem. Bei Verkehrsflugzeugen ist das höhere Gewicht ein Problem, was aber dadurch gelöst werden kann, dass man nur für 1.000 km Ammoniak tankt. Will man weiter fliegen geschieht, dies wie bisher mit Kerosin. Auf diese Weise kann der CO<sub>2</sub> Ausstoß im Flugverkehr um 50 Prozent reduziert werden, da weltweit die durchschnittliche Flugstrecke bei ca. 2000 km liegt. Der wesentliche Vorteil von Ammoniak gegenüber reinem Wasserstoff ist sein problemloser Transport einschließlich Lagerung. Hier kann auf die existierende Ausrüstung, wie sie bei LPG (Flüssiggas) Verwendung findet, zugegriffen werden. Es gibt genügend Tanker, die für den Ammoniaktransport zur Verfügung stehen, wenn man LPG Tanker mitberücksichtigt. Dass diese Tanker dann mit Ammoniak als Treibstoff betrieben werden, versteht sich von selbst. Das Gleiche gilt für den landgebundenen Transport mittels Lkw oder Bahn, die Lagerung in Behältern, die Zapfanlagen an Tankstellen sowie für die Treibstofftanks von Fahrzeugen fast aller Kategorien. Je nach Einsatzfall kommen Niederdruckbehälter bis 16 Bar, isolierte Behälter mit und ohne Kühlung oder eine Mischung von beiden zum Einsatz. Dass man bei der Ammoniakherstellung im Vergleich zur Wasserstoffherstellung weitere Produktionslinien wie Luftzerlegung und Ammoniak Synthesereaktor benötigt, wird durch die wesentlich niedrigeren Folgekosten mehr wie ausgeglichen. Ammoniak hat gegenüber komprimiertem und flüssigem Wasserstoff in vielen Bereichen deutliche Vorteile. Hierzu zählt vor allem der Verkehrssektor, aber auch die stationäre Energieerzeugung.

## **Projekt zur Einführung von Ammoniak als Treibstoff in Fahrzeugen und stationären Energieerzeugungsanlagen mit Dieselmotoren, Gasmotoren und Turbinen**

Der Traum vieler Fahrzeughersteller ist es, den Verbrennungsmotor mittels E-Fuels weiterhin am Leben zu erhalten. E-Fuels benötigen für die Herstellung große Mengen an CO<sub>2</sub>, das vorzugsweise aus Luft gewonnen werden muss, um klimaneutral zu sein. Sie sind aufgrund des geringen CO<sub>2</sub> Gehalts der Luft (unter 0,1 %) deutlich teurer als E-Ammoniak. E-Fuels, die ihr CO<sub>2</sub> aus einer fossilen Brennstoffquelle wie Kraftwerken, Zementwerken oder konventionellen Ammoniakwerken beziehen, sind nicht wirklich klimaneutral. Sie haben

allenfalls einen Verbrennungsvorgang gratis, bevor das CO<sub>2</sub> in der Luft landet. E-Ammoniak ist zwar per Definition kein E-Fuel, eignet sich aber trotzdem bestens als Treibstoff für Hubkolbenmotoren. Jedes Euro 6 Dieselfahrzeug kann problemlos mit mindestens 80 Prozent Ammoniak betrieben werden, wenn es mit einen zusätzlichen Ammoniaktank ausgerüstet wird. Die Umbaukosten für gebrauchte Fahrzeuge beginnen bei 2.000 Euro. Mit geringen Mitteln lässt sich hier der CO<sub>2</sub>-Ausstoß um 80 Prozent verringern, womit die CO<sub>2</sub>-Bilanz deutlich besser ist als bei derzeitigen batterieelektrischen Fahrzeugen. Bei Neufahrzeugen ist mit entsprechender Technik ein 100-prozentiger Ammoniakbetrieb möglich, was keine unerwünschten Emissionen zur Folge hat. Sie haben das gleiche Preisniveau wie dieselbetriebene Fahrzeuge. E-Ammoniak kann heute schon an den richtigen Orten in großen Mengen wirtschaftlich produziert werden. Der Verkaufspreis von Ammoniak in Deutschland, der in unserer Pilotanlage in Bagamoyo produziert werden wird, liegt bei ca. 46 Eurocent / Liter. Dies entspricht einem Dieselpreis von ca. 1,25 Euro / Liter. Die anfängliche Produktionskapazität dieser Pilotanlage liegt bei 220 Tonnen oder 322.500 Liter Ammoniak am Tag. Hiermit können bis zu 9.000 umgebaute und neue Dieselfahrzeuge mit einer durchschnittlichen täglichen Laufleistung von 200 Kilometern betrieben werden. Durch einen kontinuierlichen Ausbau dieser Pilotanlage auf über 7.000 Tonnen am Tag und weiteren Anlagen an insgesamt 7 Standorten in Tansania kann die Produktionskapazität innerhalb von 10 Jahren auf 80.000 Tagedonnen gesteigert werden, womit 30 Prozent des Dieserverbrauchs in Deutschland (Stand 2019) durch Ammoniak ersetzt werden kann. Die Investitionskosten an diesen 7 Standorten liegen zwischen 140 und maximal 160 Mrd. Euro. Allein in Tansania kann die Produktionskapazität mindestens vervierfacht werden. Weitere Länder im südlichen und westlichen Afrika haben ähnliche Potenziale für Power to X Anlagen bzw. für die Produktion von E-Ammoniak. E-Fuels in Bezug auf E- Ammoniak sind also keine teuren, ineffizienten und in geringen Mengen produzierbare Kraftstoffe, die allenfalls als Übergangslösung für den schweren Güterverkehr geeignet sind.

E-Ammoniak ist das Rückgrat bei der Umstellung von fossilen auf erneuerbare Energieträger. Er ist deutlich wirtschaftlicher als komprimierter und flüssiger Wasserstoff oder ineffiziente Batteriespeicher bei elektrischen Fahrzeugen. Die Lebensdauer von Lithiumionenakkus in E-Fahrzeugen beträgt 200 bis 1.000 Ladezyklen. In PV Energiespeichern bis zu 30.000 Ladezyklen und mehr. Da die Rohstoffe für solche Akkus endlich und im Falle des Lithiums nicht wirtschaftlich recycelbar sind, ist die massenweise Verwendung in E-Fahrzeugen nicht sinnvoll und alles andere als effizient. Wer nachhaltige Fahrzeuge produzieren will, sollte die Akkugröße auf maximal 60 kWh beschränken und größere Fahrzeuge wie Mittelklasse PKWs, SUVs, Kleinbusse, Transporter usw. mit Ammoniakmotoren ausstatten, wenn ihm die Wasserstoff Brennstoffzellentechnologie und die hierfür notwendige Infrastruktur zu teuer und zu unausgereift ist.

## Projektdetails

Ein sinnvoller Weg E Ammoniak im Verkehr einzuführen, ist dies zunächst in einer bestimmten Region mit großem Verkehrsaufkommen zu tun. Da der Ammoniak vom Süden angeliefert wird, sind die Metropolregionen Stuttgart und München für Deutschland besonders gut geeignet. Ulm ist dabei der zentrale Verteilort für diese Regionen. Der Transport erfolgt mittels Ammoniaktanker in den Hafen von Genua, von dort mit der Bahn in speziellen Ammoniakesselwagen nach Ulm. Hier erfolgt die Verteilung durch

Gastanklastzüge im Umkreis von 150 bis 200 Kilometern an Tankstellen und Großabnehmer wie städtische Verkehrsunternehmen, Speditionen und Betreiber von Blockheizkraftwerken. An Tankstellen können die meisten LPG Anlagen durch eine zusätzliche Zertifizierung auf Ammoniak umgestellt werden. Der Anteil LPG betriebener Fahrzeuge ist in den letzten Jahren stark rückläufig, was einen rentablen Betrieb der Tankanlagen oft nicht mehr zulässt. Diese Fahrzeuge können mit geringem Aufwand auf Ammoniakbetrieb umgestellt werden, wenn ein Mischbetrieb von Ammoniak und Benzin erfolgt. Bei warmem Motor kann dieser mit 80 bis 85 Prozent Ammoniak betrieben werden.

Da Ammoniak in Dieselmotoren deutlich effizienter verbrannt werden kann, soll der Umbau aber im Wesentlichen auf diese beschränkt bleiben. Umgebaut werden können alle Dieselfahrzeuge, bei denen ein Umbau wirtschaftlich ist. Bei Lkws über 7,5 Tonnen und größeren Bussen dürfte die Altersgrenze wohl bei 8 Jahren und einem Kilometerstand bis 250.000 km liegen. Bei Nutzfahrzeugen bis 7,5 Tonnen, Kleinbussen und Pkws liegt sie bei 5 Jahren und 150.000 km. Der Umfang eines Umbaus ist weitgehend gleich wie der Umbau von einem Benzinfahrzeug auf ein Flüssiggasfahrzeug. Der für die Stickoxidumwandlung benötigte Ammoniak wird direkt in die Abgasanlage eingespritzt, was deutlich effizienter ist wie der Umweg über Harnstoff (AdBlue). Bei allen Umbauten ist ein Mischbetrieb mit bis zu 85 Prozent Ammoniak und 15 Prozent Diesel vorgesehen. Da der reine Dieselmotor erhalten bleibt, können diese Fahrzeuge auch außerhalb des Pilotgebiets eingesetzt werden. Verfügbar sind solche Umbaukits in einem Jahr.

Weitere Fahrzeuge, die umgerüstet werden können, sind Diesellokomotiven, Dieseltriebwagen und Schiffe. Dieselmotorene Schienenfahrzeuge sind auch im Pilotgebiet reichlich im Einsatz und sind so schnell nicht ersetzbar. Ein Umbau ist auf jeden Fall wirtschaftlich und ökologisch sinnvoll und geschieht mit denselben Umbaukits wie für große Nutzfahrzeuge. Zweitakt Schiffsmotoren umzurüsten ist laut MAN Energy Solution schon heute kein Problem. Deshalb sollen die für den Ammoniaktransport benötigten Tankschiffe auch umgebaut werden.

Ein weiterer Schritt ist die Entwicklung von Motoren, die zu 100 Prozent mit Ammoniak laufen und in Neufahrzeugen innerhalb des Pilotgebiets ihre Wirtschaftlichkeit beweisen können. Zielführend ist auch ein Mischbetrieb mit 90 bis 95 Prozent Ammoniak und 5 bis 10 Prozent regenerativen Kraftstoffen wie C.A.R.E Diesel, Biodiesel oder Äthanol, die bereits jetzt schon in ausreichender Menge produziert und konventionellen Kraftstoffen beigemischt werden. Das Gleiche kann auch mit flüssigem Ammoniak gemacht werden, da dieser eine sehr gute Löslichkeit für diese Stoffe besitzt. Herstellungsbedingt sind diese Kraftstoffe zwar noch nicht zu 100 Prozent CO<sub>2</sub> neutral, auf Grund der geringen Menge hat dies jedoch kaum Auswirkung auf die gesamte CO<sub>2</sub> Bilanz solcher Motoren. Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung von komprimiertem E Wasserstoff mit maximal 1 Gewichtsprozent. Problematisch hierbei ist dessen Verfügbarkeit an nur sehr wenigen Tankstellen und seine sehr geringe Löslichkeit in flüssigem Ammoniak. Da es sich auch hier um kleine Mengen handelt, ist eine getrennte Bereitstellung des Wasserstoffs an Ammoniaktankanlagen möglich. Die Kombination Ammoniak und Wasserstoff ist allerdings in jeder Hinsicht die teuerste Lösung. Mit der Verfügbarkeit von Neufahrzeugen wird in 1,5 Jahren gerechnet.

Was bei Fahrzeugmotoren geht, funktioniert auch bei stationären Energieerzeugungsanlagen wie Blockheizkraftwerken, die mit Gas oder Dieselaggregaten (Heizöl) betrieben werden. Erdgas und Heizölpreise sind auch in Zukunft mit einer CO<sub>2</sub> Steuer von 55 € / Tonne CO<sub>2</sub> um durchschnittlich 15 bis 25 Prozent günstiger, wenn man mit einem Ammoniakpreis von 0,40 € / l rechnet. Bei einer Erweiterung der Pilotanlage in Bagamoyo können solche Ammoniakpreise voraussichtlich realisiert werden. Bei Erdgasaggregaten kann auch ein Mischbetrieb mit Ammoniak, Erdgas und grünem Wasserstoff realisiert werden. Da der Umbau der gleiche wie bei Fahrzeugen ist, wird er auf jeden Fall rechtzeitig innerhalb der Pilotregion angeboten. Ähnliches gilt für neue Aggregate.

Turbinenbetriebene Gaskraftwerke, die mit Erdgas betrieben werden, sind vielfach in Planung oder im Bau. Ein wirtschaftlicher Betrieb ist aber schwierig darzustellen, da sie als letzte zugeschaltet werden, wenn nicht genügend Strom aus erneuerbaren Energien und konventionellen Kraftwerken zur Verfügung steht. Da auch hier ein 100-prozentiger oder Teilbetrieb mit Ammoniak und Erdgas mit Biogas oder Wasserstoff möglich ist, ändert sich hiermit auch die Rangfolge. Als erneuerbare Energieanlagen haben sie ein vorrangiges Einspeiserecht. Sie sind dann Grundlastkraftwerk und Regelkraftwerk in einem, was den Kohleausstieg deutlich vereinfacht. Bei einem ausgewogenen Energiemix und entsprechenden Volllaststunden (größer 5.000 Stunden pro Jahr) können Stromgestehungskosten zwischen 10 und 11 Eurocent / kWh erzielt werden. Solche Kraftwerke sind dann vergleichbar mit deutschen Offshore Windkraftanlagen, insbesondere dann, wenn man die Transportkosten über weite Strecken z. B. nach Süddeutschland mitberücksichtigt. Innerhalb des Pilotgebiets soll dies unter Beweis gestellt werden. Ein möglicher Standort ist in Leipheim bei Ulm.

Eine deutliche Reduzierung der Emissionen ist auch im Flugverkehr notwendig. Eine Umstellung auf Wasserstoff betriebene Flugzeuge, die auf Brennstoffzellentechnologie basiert, ist zeitintensiv und mit extremen Kosten verbunden. Eine CO<sub>2</sub> Reduktion um 50 Prozent im Flugverkehr ist mit dieser Technik nicht vor 2050 zu erwarten, da die Entwicklung solcher Flugzeuge gerade erst begonnen hat. Anders sieht dies beim Einsatz von Ammoniak in konventionellen Flugzeugen aus. Die Verbrennung von Ammoniak in Flugturbinen ermöglicht zwar aus Gewichtsgründen auf Mittel und Langstrecken keinen 100-prozentigen Ammoniakbetrieb, auf Kurzstrecken bis 1.000 km ist dies aber sehr wohl möglich. Immerhin finden hier die meisten Flüge mit dem höchsten Passagieraufkommen innerhalb Europas statt. Ferner findet bei Ammoniakbetrieb kein Rußpartikelaustritt statt, was einen starken Einfluss auf die Kondensstreifenbildung hat. Kondensstreifen von Flugzeugen in großen Höhen verstärken den Treibhauseffekt nachweislich um ein Vielfaches im Vergleich zum CO<sub>2</sub>, das Flugzeuge zurzeit produzieren. Wie ein Umbau funktionieren soll, wird im Folgenden am Beispiel eines Airbus A 320 neo erläutert. Dieses Flugzeug kann maximal 26.730 l oder 21.384 kg Kerosin tanken und hat voll ausgelastet eine Reichweite von 6300 km. Einschließlich Reserven sind dies 4.455 l pro 1.000 km. Substituiert man 4.000 l Kerosin durch Ammoniak mittels 2 Zusatztanks im vorderen und hinteren Bereich des Laderaums können Flüge bis 1.000 km ohne CO<sub>2</sub> Emissionen durchgeführt werden. Notwendig hierfür sind 10.719 l oder 7.310 kg Ammoniak, was einem Mehrgewicht von 4110 kg plus ca. 300 kg für die Tanks entspricht. Der durch das höhere Startgewicht verursachte Mehrverbrauch liegt bei ca. 70 l Kerosin oder 187,5 l Ammoniak. Die Treibstoffkosten pro 1.000 km Flug

erhöhen sich bei einem Kerosinpreis von 0,40 € / l und einem Ammoniakpreis von 0,336 € / l jeweils ohne Steuern um das 2,3-fache. Bei 180 Passagieren sind dies inklusive Mehrwertsteuer 13,63 €. Bei einer durchschnittlichen Auslastung von 80 Prozent verteuert sich ein Hin und Rückflug von München nach Hamburg um 23,85 Euro oder 10 Prozent. Die Umbaukosten für Bestandsflugzeuge können an dieser Stelle nicht genau beziffert werden, dürften aber die 100.000 € Marke nicht wesentlich übersteigen, wenn innerhalb eines C oder D-Checks der Umbau gemacht wird. Bei Neuflugzeugen liegen die Zusatzkosten etwa in derselben Höhe. Das erste auf Ammoniakbetrieb umgerüstete Flugzeug wird in 3 Jahren im Pilotgebiet eingesetzt werden können.

## Resümee

Die Verwendung von grünem Ammoniak Made in Afrika als Kraftstoff in Dieselmotoren, Gasmotoren und Turbinen ist heute schon wirtschaftlich, technisch problemlos und mit vergleichsweise geringen Kosten umsetzbar. Dies schließt auch die Produktion des Ammoniaks in Afrika mit ein. Stromgestehungskosten von unter 1 Eurocent für PV Strom und maximal 1,25 Cent bei einer Kombination aus PV Strom, Zwischenspeichern und Offshore Energie aus Wind und Wellenkraft sind die Grundlage für die Wirtschaftlichkeit. Deutlich niedrigere Bau und Betriebskosten gleichen die höheren Transportkosten mehr wie aus. Der größte Vorteil von Ammoniak ist allerdings, dass die notwendige Technik und Infrastruktur verfügbar ist und eine Umstellung innerhalb von 10 Jahren möglich ist. Eine Umstellung auf Brennstoffzellentechnik, egal mit welchem Medium, dauert Jahrzehnte länger und ist mit enormen Mehrkosten verbunden. Um Wasserstoff in Fahrzeugen effizient zu nutzen, wäre eine neue Speichertechnik notwendig, die aber nicht in Sicht ist. Hochdruckkompression und Verflüssigung des Wasserstoffs sind aus wirtschaftlicher Sicht keine Alternative zu grünem Ammoniak und scheitern spätestens an der Akzeptanz durch den Endkunden. Annähernd doppelt so hohe Fahrzeugkosten, lange Wartezeiten beim Tanken von mehreren Fahrzeugen und die vielfältigen Probleme beim Umgang mit flüssigem Wasserstoff sind die Hauptgründe dafür. Wasserstoff Made in Europe ist dann sinnvoll und wirtschaftlich, wenn er in Pipelines zum Endkunden transportiert wird und dort in stationären Anlagen Verwendung findet. Bis batteriebetriebene Fahrzeuge die gleiche CO<sub>2</sub> Bilanz wie mit Diesel betriebene Fahrzeuge haben, dürften mit Sicherheit 10 Jahre vergehen. Ob sich die kurzlebigen Batterien jemals wirtschaftlich recyceln lassen, ist mehr wie fragwürdig.

Erst der günstige afrikanische Ammoniak ermöglicht eine nicht so effiziente Nutzung in Verbrennungsmotoren und Turbinen. Dies mit europäischem Ammoniak zu versuchen, ist mit Sicherheit ein sinnloses Unterfangen. Eine effizientere Nutzung ist dann immer noch mit Ammoniak Brennstoffzellen möglich, wenn deren Wirtschaftlichkeit mit Verbrennungsaggregaten vergleichbar ist.

Will man die Klimaziele bis 2030 und 2050 erreichen, führt kein Weg an einer umfangreichen Nutzung des Potenzials von Grünem Ammoniak vorbei. Es ist keinesfalls ausreichend, ihn als Kraftstoffersatz in der Schifffahrt oder bei der Düngemittelherstellung zu verwenden und bei allen anderen Anwendungen auf Wasserstoff, Batterien oder E-Fuels auf Kohlenstoffbasis mit all ihren Unzulänglichkeiten und Nachteilen zu setzen.

Übrigens ist Ammoniak bei Verwendung als Kraftstoff nicht gefährlicher als andere gasförmige oder flüssige Kraftstoffe. Dies belegen zahlreiche Studien und die durch Ammoniak verursachten Unfälle in der Kühltechnik und Düngemittelherstellung.

### Berechnung des Verkaufspreises von Ammoniak an Tankstellen

Gesamtinvestitionskosten Pilotanlage Bagamoyo mit einem Ammoniakreaktor 340 tato	500 Mio. €
Zinsen über 25 Jahre 0,5% effektiv	31 Mio. €
Betriebs und Wartungskosten über 25 Jahre	200 Mio. €
Summe	731 Mio. €
Gesamtproduktion in 25 Jahren bei durchschnittlich 221 tato	2.016.625 t
Ammoniakkosten pro Tonne	362 €
Transportkosten pro Tonne bei 4.400 t pro Lieferung	95 €
Summe	458 €
Ammoniakkosten pro 1000 l	312 €
Gewinn und sonstige Kosten 25 %	78 €
Preis pro Liter incl. MwSt. ohne Energiesteuer *)	0,464 €

\*) Es ist anzunehmen, dass auf Ammoniak als Kraftstoff, ähnlich wie auf Wasserstoff, zumindest vorübergehend keine Energiesteuer zu entrichten ist.