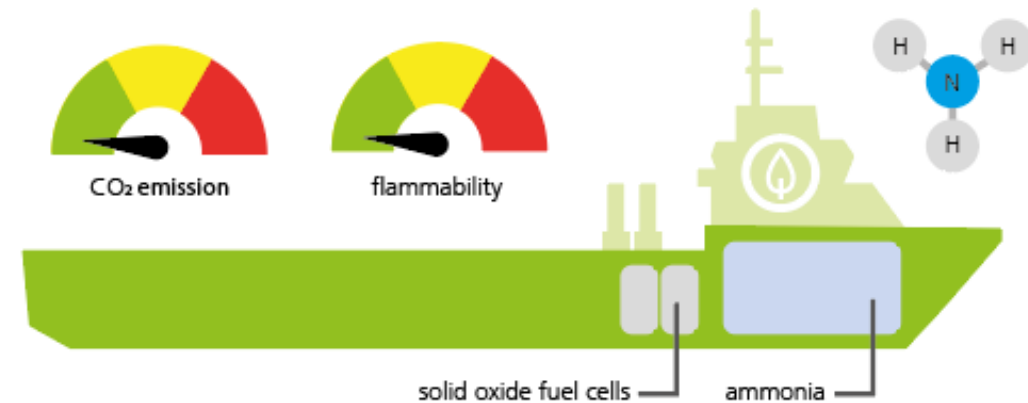


AMMONIA AS HYDROGEN CARRIER FOR MARITIME AND OTHER MOBILE AND STATIONARY APPLICATIONS

Prof. Dr. Gunther Kolb, Head of Energy and Chemical Technology, Fraunhofer IMM



PROF. DR. GUNTHER KOLB

Head of Division Energy at Fraunhofer IMM and
Deputy Head of the Institute



Part Time Full Professor „Micro Flow Energy Technology“ at Eindhoven University of Technology

Since 2001 working for IMM

5 years professional at R&D Refining Catalysts Europe GRACE Davison GmbH, Worms

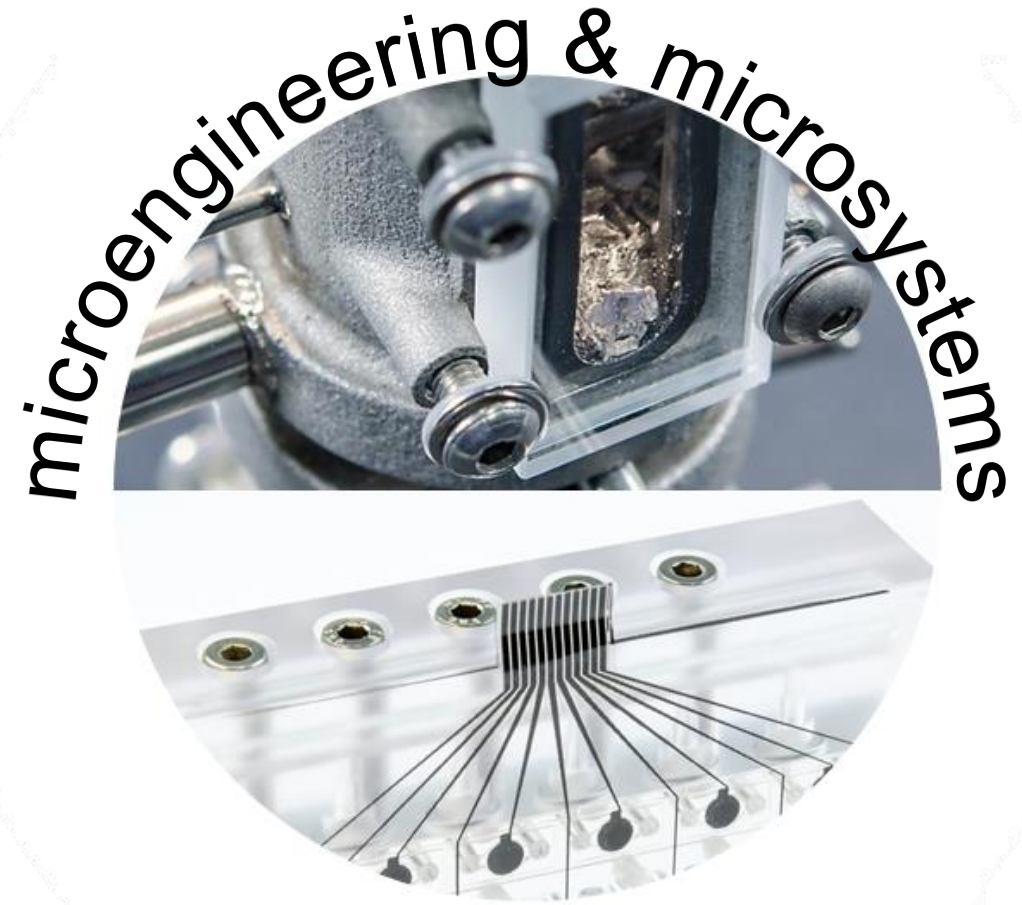
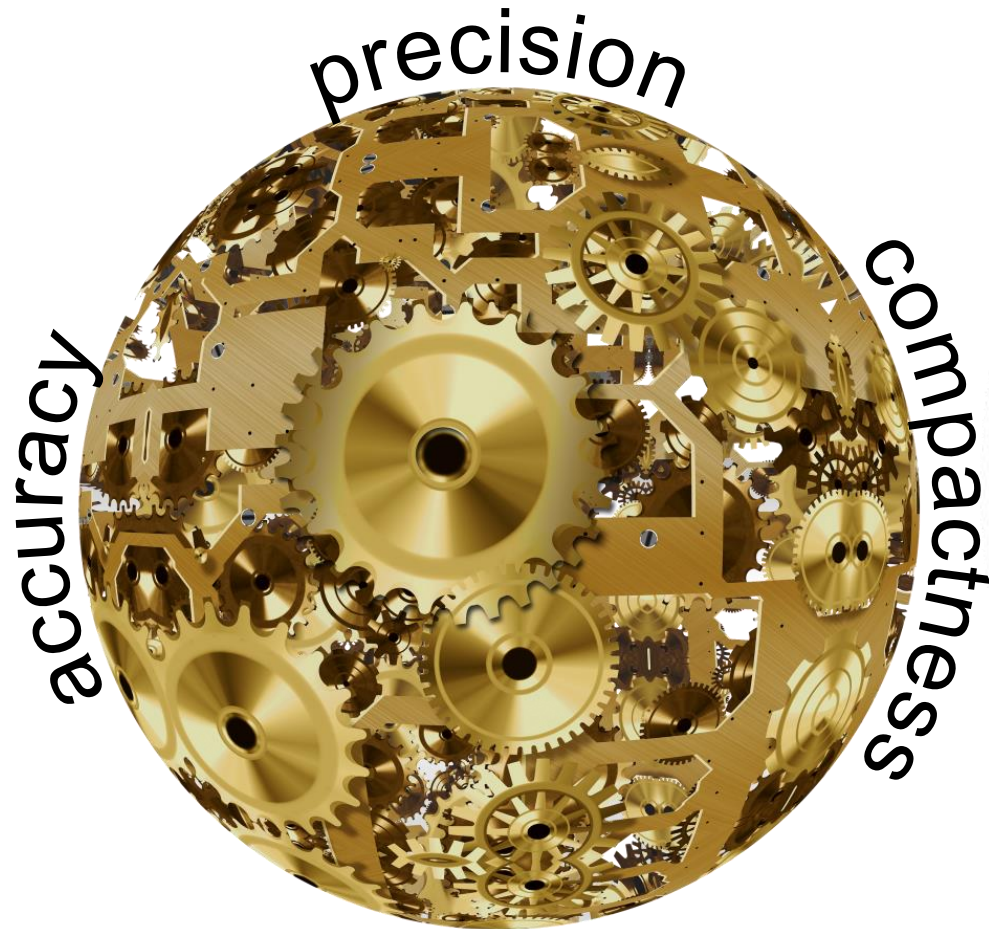
Diploma in Chemical Engineering and PhD in Reaction Engineering at University Erlangen-Nürnberg

Sole author of the book “Fuel Processing for Fuel Cells”, Wiley-VCH (2007)

104 peer reviewed publications in fields of microreactors, catalysis and fuel processing

Our Mission...

...our Solutions

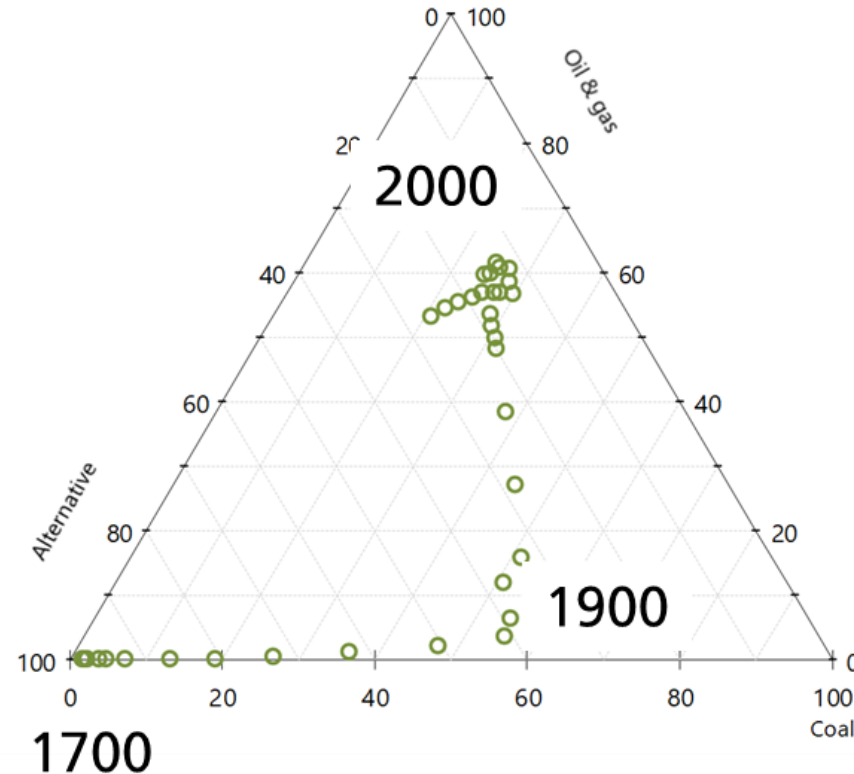


INTRODUCTION – THE ENERGY TRANSITION

Switching back from fossil energy sources to renewables will be a major effort for mankind

However, similar rigorous changes of direction **have been done twice before:**

- When switching from renewables to coal
- When switching from coal to crude oil and natural gas



Data: <https://ourworldindata.org/>
<https://www.statista.com/>

CLIMATE ACTION PLAN 2050 - GERMANY

Emissions in the areas of action contributing to the target

Area of action	1990 (in million tonnes of CO ₂ -Äquivalent)	2014 (in million tonnes of CO ₂ -Äquivalent)	2030 (in million tonnes of CO ₂ -Äquivalent)	2030 (reduction in percent compared to 1990)
Energy sector	466	358	175 to 183	62 to 61
Buildings	209	119	70 to 72	67 to 66
Transport	163	160	95 to 98	42 to 40
Industry	283	181	140 to 143	51 to 49
Agriculture	88	72	58 to 61	34 to 31
Other	39	12	5	87
Total	1248	902	543 to 562	56 to 55

Source: Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (2016). Climate Action Plan 2050.

INTRODUCTION – BATTERIES VS. FUEL CELLS

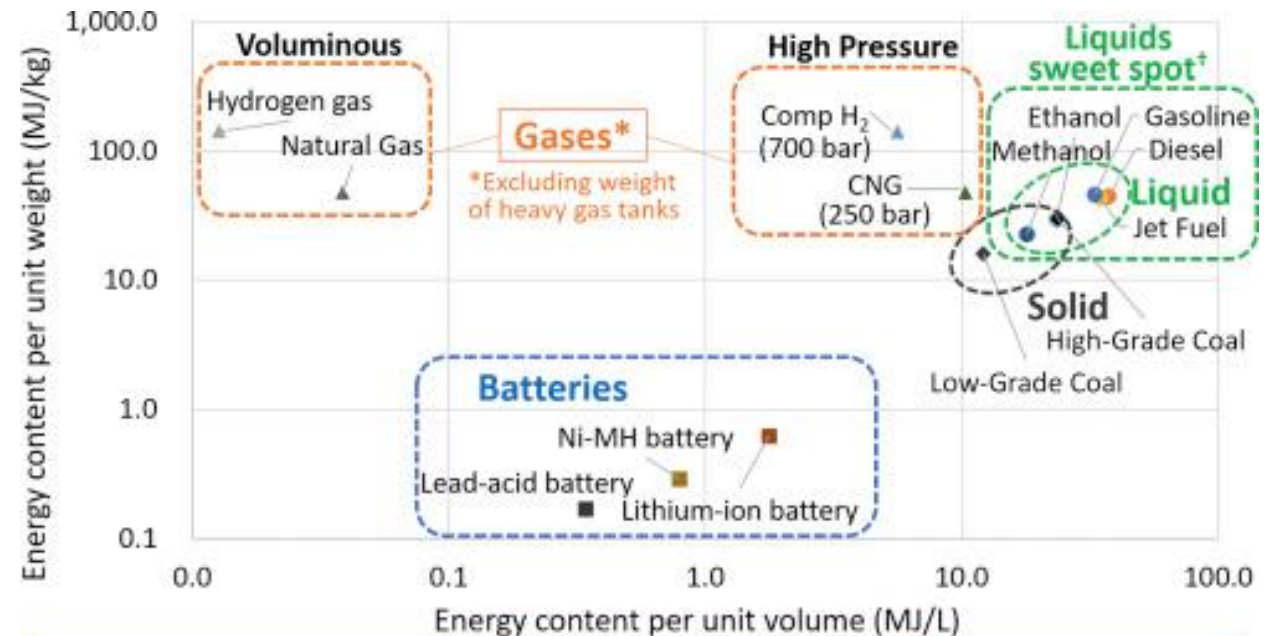
Batteries show (derived from theory) intrinsic low volumetric and gravimetric energy density

They are therefore little suited for a variety of applications such as:

- Long-distance road transport of passengers and goods
- Aviation
- Maritime applications

Fuel cells offer numerous advantages compared to combustion engines:

- Higher efficiency
- Less emissions (catalytic processes)



†Sweet Spot: high energy density by weight and volume; stable, easy to store, transport, distribute

Source: Cell Press

BATTERIES CAN BECOME HIGHLY HAZARDOUS SPECIAL WASTE

- Extremely difficult to extinguish
(burning electric car has to be cooled for days)
- The processed water is toxic and must be treated as special waste
- Only few recycling companies are able to dispose damaged batteries
- The transportation of damaged batteries is dangerous and associated with high effort
- Unclear legal situation regarding the manufacturer's responsibility



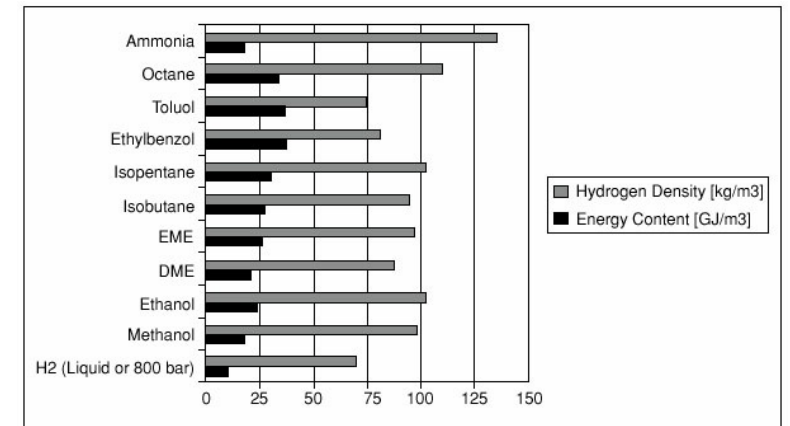
Wikipedia/Claus Ableiter



Pixabay

WHY REFORMING AND HYDROGEN CARRIERS? – BATTERIES VS. FUEL CELLS

- Mobile fuel cell applications require **compact and simple hydrogen supply**
- Still **limited availability** of compressed hydrogen
- Renaissance of liquefied hydrogen, but not fully mature
- For portable and mobile applications **liquid fuels are a viable alternative** to compressed hydrogen:
 - **Higher power density**
 - **Easy transportation**
- **Natural gas, methanol, ethanol, diesel and ammonia**
can be produced from:
 - Renewable sources
 - Carbon dioxide from industrial processes (cement fabrication) *or nitrogen*
 - Carbon dioxide from the atmosphere *or nitrogen*



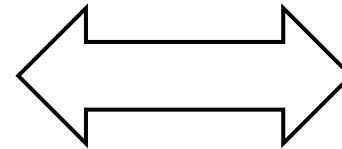
COMPARISON OF HYDROGEN STORAGE OPTIONS



- Liquid storage at 25°C / 10 bar
- Density: 512,43 kg/m³
- Energy density: 2,665 kWh/l



- Storage as gas at 25°C / 700 bar
- Density: 41,289 kg/m³
- Energy density: 1,376 kWh/l gross
- Energy density¹: 1,211 kWh/l net



¹ About 12% of the heating value of hydrogen is consumed for the compression to 700 bar

AMMONIA AS HYDROGEN CARRIER



SCHIFFFAHRT: Auf der Suche nach emissionsarmen Treibstoffen rückt Wasserstoff zunehmend in den Blickwinkel der Schifffahrtsindustrie. Doch neben technischen Themen sind noch viele regulatorische Fragen zu klären.

VON WOLFGANG HEUMER

Die „Viking Energy“ hat gute Chancen, in die Technikgeschichte der weltweiten Schifffahrt einzugehen. Das 2003 gebaute Offshore-Versorgungsschiff der norwegischen Reederei Eidesvik wird der weltweit erste kommerzielle, mit Flüssiggas (LNG) angetriebene Frachter.

2016 wurde der Spezialfrachter auf einen Hybridbetrieb umgerüstet und mit Batterien als Stromspeicher ausgestattet. Zwei Jahre später folgte ein Landstromanschluss, um auch während der Hafenbesuche die Emissionen aus dem Schiffbetrieb zu reduzieren. Nun hat der norwegische Energiekonzern Equinor das 94 m lange Schiff gechartert und lässt es zum weltweit ersten Hochseefahrzeug umbauen, dessen 2 MW starker Hauptantrieb mit elektrischer Energie aus einer Ammoniak-Brennstoffzelle versorgt wird. Es wird das erste Mal sein, dass ein Schiff ohne fossile Brennstoffe betrieben wird und trotzdem eine unbegrenzte Reichweite hat“, ist Henrette Underum überzeugt, die bei Equinor Zukunftsstrategien verantwortet.

Seitdem die internationale Schifffahrtsorganisation IMO eine Halbierung der CO₂-Emissionen im Seeverkehr bis 2050 angekündigt hat, gibt es immer mehr technische Anläufe zum Verzicht auf fossile Treibstoffe. Verlässliches Erdgas (LNG) erfreut sich derzeit wachsender Beliebtheit sowohl in der Passagier- als auch in der Frachtschifffahrt. Weil LNG immer noch mit er-

heblichen Emissionen verbunden ist, gelten Gasantriebe langfristig jedoch nur als „enabling technology“ für spätere, sauberere Systeme. Immer stärker rückt dabei Wasserstoff in den Blickwinkel von Forschern und Entwicklern. Reines H₂ scheidet für Schiffsantriebe jedoch als Energiequelle aus.

„Wasserstoff muss als Flüssigkeit bei -253 °C oder komprimiert als Gas bei Drücken um 700 bar gespeichert werden“, so Günther Kolb, stellvertretender Leiter des Fraunhofer-Instituts für Mikrotechnik und Mikrosysteme (IMM) in Mainz. Die notwendigen Tankkapazitäten und der Aufwand für die Kühlung oder Bedruckung der Tanks sprengen die räumlichen und technischen Möglichkeiten selbst auf größeren Schiffen und sind zudem wirtschaftlich kaum darstellbar.

Das Fraunhofer IMM ist deutscher Partner in dem europäischen Forschungsprojekt „Ship FC“, das gemeinsam mit Equinor die Viking Energy auf Kurs „zero emission“ bringen will. Das von der EIT mit 10 Mio. € geförderte Projekt basiert auf der Grundlage vieler anderer Projekte rund um Brennstoffzellen als Basis für den Schiffsantrieb: Um die Lagerung auf Schiffen zu erleichtern, wird Wasserstoff in einer chemischen Verbindung an Bord gebracht.

So wird im Betrieb wieder aufgespalten und der reine Wasserstoff in die Brennstoffzelle zur Erzeugung von Strom für die elektrischen Antriebe eingesetzt. Zumeist denken die Entwickler dabei an Methanol als Zwischenträger, die Viking Energy soll dagegen mit Ammoniak ver-

„Es wird das erste Mal sein, dass ein Schiff ohne fossile Brennstoff betrieben wird und trotzdem eine unbegrenzte Reichweite hat.“

Henrette Underum, Vice President Technology Management bei Equinor

sorgt werden. „Ammoniak begnügt sich als Flüssigkeit mit moderaten 33 °C bei Normaldruck und +20 °C bei 9 bar“, erläutert Kolb. In einem Spaltreaktor kann Ammoniak in Stickstoff und Wasserstoff getrennt werden. Die Mainzer Fraunhofer-Forscher beschäftigen sich in dem Projekt mit einer speziellen Herausforderung des Ammoniakniederschlags: Beim Spaltprozess bleibt ein kleiner Teil Ammoniak im Gasstrom; außerdem wird der Wasserstoff in der Brennstoffzelle nicht vollständig umgesetzt, es bleibt ein Rest von etwa 12 %. Das Fraunhofer IMM will nun einen Katalysator entwickeln, in dem der Abgasstrom auf 500 °C erhitzt und die Bildung von Stickoxiden verhindert wird.

Die größte Herausforderung des Projekts besteht aber in der Entwicklung einer Brennstoffzelle, die für die Viking Energy geforderte Leistung von 2 MW und die nötige Betriebsdauer von 3000 Stunden pro Jahr liefern kann. Das norwegische Unternehmen Prototech, das sich nach eigenen Angaben seit mehr als 30 Jahren mit Brennstoffzellen befasst, will bis Ende 2023 ersten entsprechenden Prototypen entwickeln. Diese Technologie wäre ein gewaltiger Sprung im maritimen Einsatz von Brennstoffzellen. Bisherige Systeme leisten in der Regel nicht mehr als 500 kW. Deswegen werden sie – wie auf den deutschen U-Booten der 212a-Klasse – nur als Antrieb für die Unversenkungsschleifboote – oder als Hilfsmaschine eingesetzt. Auch das Ship-FC-Projekt basiert auf kleinen Festoxid-Brennstoffzellen mit 100 kW Leistung, die in drei containerisier-

ten „Stacks“ kombiniert werden sollen. Wenn der Einsatz auf der Viking Energy erfolgreich läuft, sollen solche Zellen zu einer Maximalleistung von 20 MW kombiniert werden, z. B. für ein Containerschiff oder ein kleines Kreuzfahrtschiff.

Damit das Beispiel der Viking Energy nach erfolgreichem Probelauf voraussichtlich 2024 auf weitere Schiffe übertragen werden kann, ist aber noch eine Reihe rechtlicher Fragen zu klären. Die Richtlinien für den Einsatz leicht entflammbarer Treibstoffe an Bord müssen für die Seeschifffahrt von der IMO festgelegt werden. Die Regelwerke für den Schutz von Leben auf See (Solas) und für den maritimen Umweltschutz (Marpol) enthalten selbst für das mittlerweile weiter verbreitete Flüssiggas erst seit Kurzem grundlegende Bestimmungen. Wann Regeln für die Verwendung von Wasserstoff oder H₂-haltigen Verbindungen gelten, ist noch völlig ungewiss.

Solche Bestimmungen müssen letztlich vom IMO-Parlament abgesegnet werden, das sich aus den Flaggenstaaten je nach Zahl der dort registrierten Schiffe zusammensetzt. Je weniger Kosten ein Flaggenstaat für die Reeder verursacht, desto mehr Schiffe sind dort angemeldet – umweltpolitische Zielsetzungen haben dort selten Priorität. „Es ist es noch ein sehr langer Weg“, stellt Ralf Stören Marquardt vom Verband Schiffbau und Meerestechnik fest. Die europäischen Schiffbauer wünschen sich, dass es viel schneller geht: Sie sind mit weitem Abstand führend in der Entwicklung der Brennstoffzellentechnologie.

Manager Magazin 6.4.2021

Die Top 7 der sinnvollsten Anwendungen Nummer eins auf der Liste ist Ammoniak.

Die Verbindung von Wasser- und Stickstoff wird vor allem als Düngemittel eingesetzt, aber auch in der Chemieindustrie beispielsweise zur Kunststoffproduktion. Zusätzlich kann der vom Stickstoff abgespaltene Wasserstoff auch als Antrieb für Verbrennungsmotoren genutzt werden, beispielsweise auf Schiffen. Der norwegische Düngemittelkonzern Yara arbeitet daran in einem Modellprojekt mit einem Mainzer Fraunhofer-Institut.

MULTI MW AMMONIA SHIP FUEL CELLS



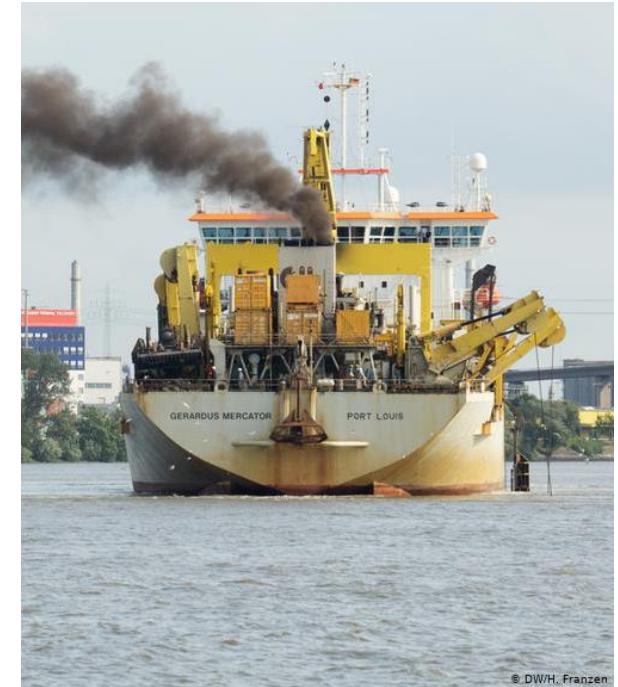
ShipFC

Maritime transport is a major contributor to greenhouse gas emissions.

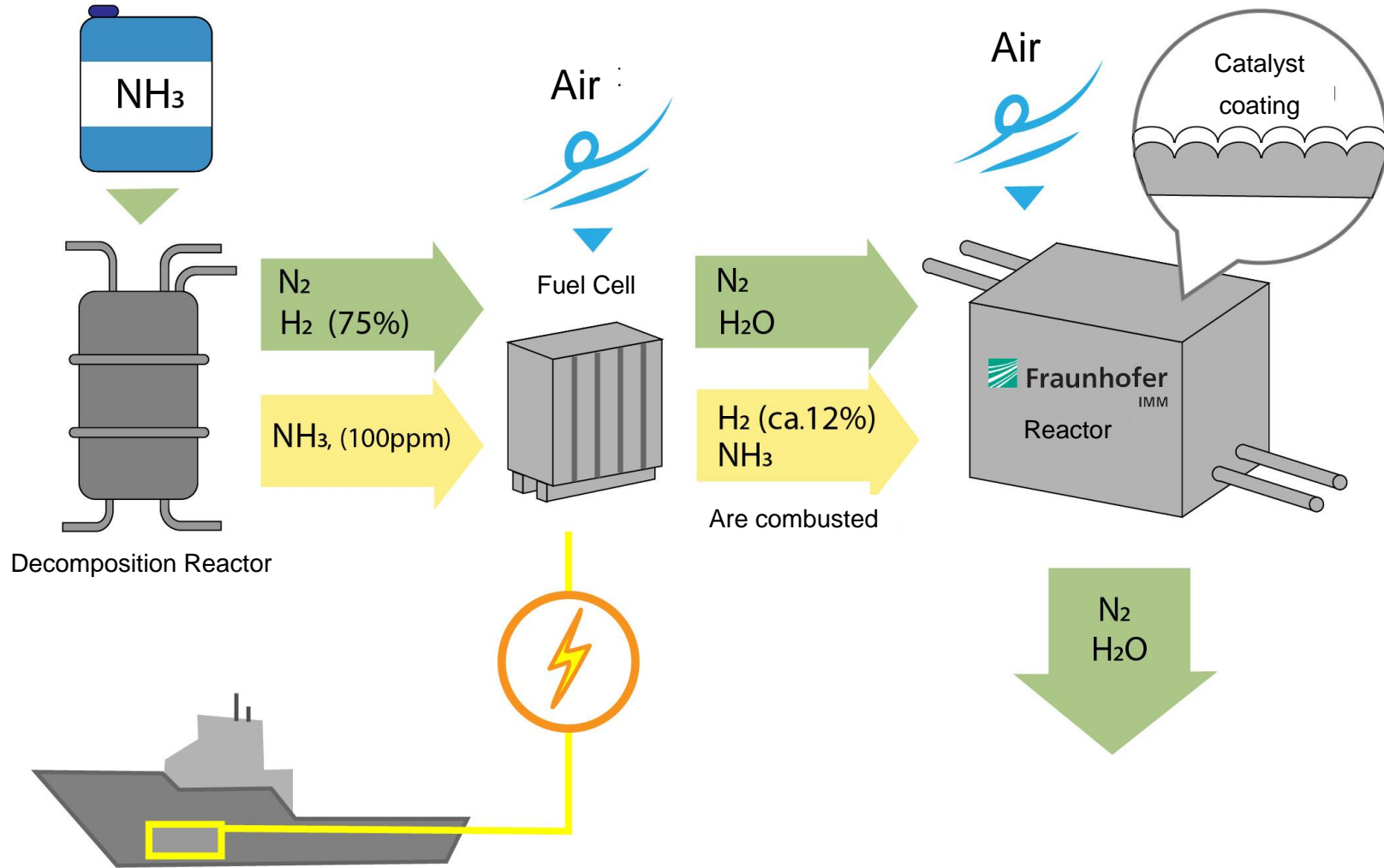
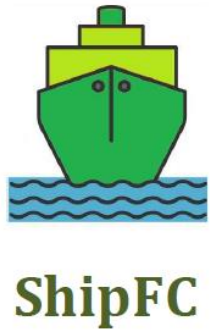
Maritime transport on the world's oceans is currently responsible for approximately 2.6 percent of global CO₂ emissions (German Environment Agency (UBA)).

In 2015, about 932 million tons of CO₂ were emitted, and that figure increases every year.

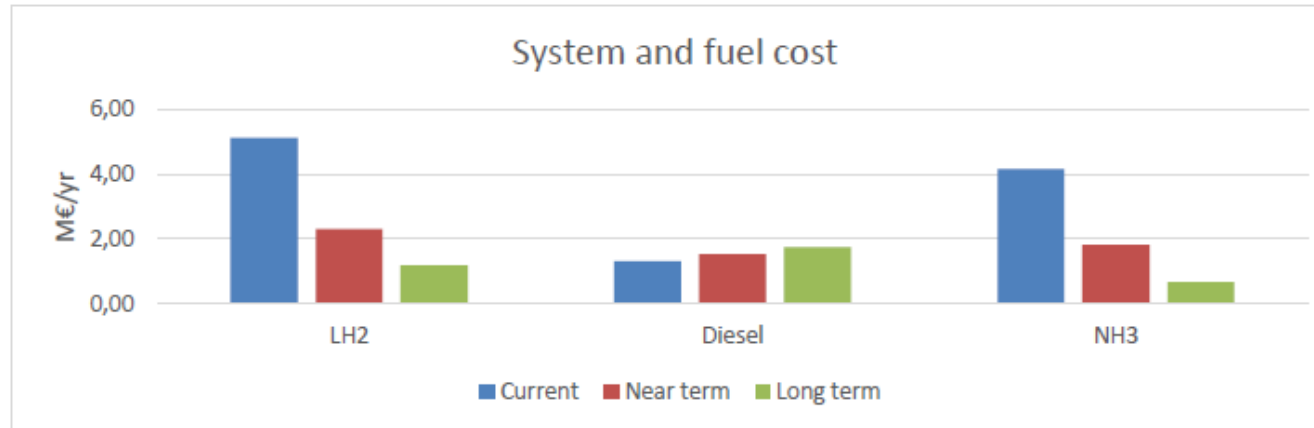
Clearly, countermeasures are urgently needed.



MULTI MW AMMONIA SHIP FUEL CELLS



MULTI MW AMMONIA SHIP FUEL CELLS



ShipFC

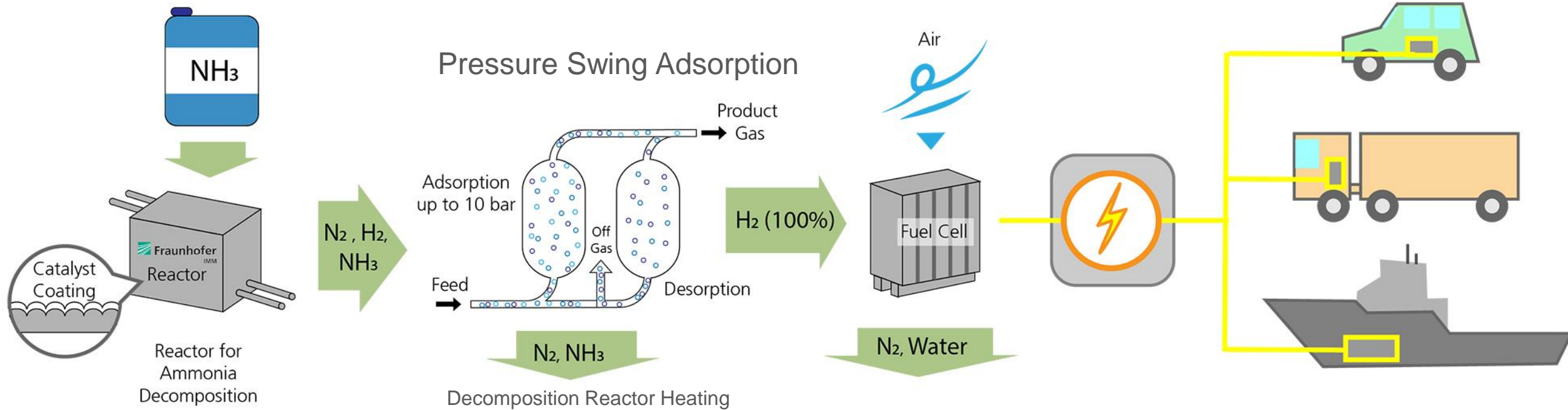


Project targets

- Prove the case for scalable, large-scale zero-emission fuel infrastructure
- 4 * 500 kW ammonia SOFC system with novel heat/air distribution
- Viking Energy, supply vessel with maximum power demand of 21 MW, 2 MW nominal auxiliary load
- Operation of a 2 MW ship for 12+ months close to zero emission
- Potential for 70% electric efficiency, 90% overall efficiency
- Projected cost of ammonia 500 \$/t (compressed H₂: 1250 €/t, liquid H₂: 2500 €/t)

Ammonia's potential has also been recognized at a political level, with the European Union providing 10 million euros in financial support for the ShipFC project (Grant agreement ID: 875156).

50 KW HYDROGEN SUPPLY FROM AMMONIA FOR FUELLING STATIONS, SMALLER SCALE MARITIME



„Nutzung von Ammoniak als kohlendioxidfreien Wasserstoff-speicher für die dezentrale Bereitstellung von Wasserstoff – Entwicklung eines innovativen kompakten Reaktorkonzeptes“, AMMONPAKTOR, funded by the Ministry of Science, Education and Culture of Rhineland-Palatinate; Funding. No.: 84009390

SUMMARY

- Ammonia is a viable option for hydrogen transportation and storage
- Technology exists already for its transportation
- Ammonia can be used as fuel
 - in (existing) combustion engines
 - directly in high temperature fuel cells
 - as hydrogen source for low temperature (PEM) fuel cells
- Ammonia is an ideal fuel for maritime applications