

# MARITIME RESEARCH FORUM 2019

ZUKÜNFTIGE KRAFTSTOFFE,  
ENERGIE- UND  
ANTRIEBSSYSTEME



Deutsches  
Maritimes  
Zentrum



HELMUT SCHMIDT  
UNIVERSITÄT  
Universität der Bundeswehr Hamburg

Programm - Abstracts

Follow us on



## Konzeption:

**Dr.-Ing. Wolfgang Sichermann** – Geschäftsführer des Deutschen Maritimen Zentrums

**Prof. Dr. Klaus Beckmann** – Präsident der Helmut-Schmidt-Universität

**Prof. Dr.-Ing. Detlef Schulz** – Helmut-Schmidt-Universität, Fakultät für Elektrotechnik

## Impressum

Maritime Research Forum,  
Programm – Abstracts, 2019  
Stand: Oktober 2019

**Herausgeber:**  
Deutsches Maritimes  
Zentrum e.V.  
Hermann-Blohm-Str. 3  
20457 Hamburg

**E-Mail:** [info@dmz-maritim.de](mailto:info@dmz-maritim.de)  
[www.d mz-maritim.de](http://www.d mz-maritim.de)

**Redaktion:** Dr. Regine Klose-Wolf,  
Rita Gwardys

**Lektorat:** Joanne Runkel,  
Hanns-Stefan Grosch (printprojekt)

**ViSdP:** Dr.-Ing. Wolfgang Sichermann,  
Dr. Regine Klose-Wolf

**Sitz des Vereins:** Hamburg  
Eingetragen beim Amtsgericht  
Hamburg, Nr. VR 23400

**Vorstand:** Dr. Reinhard Lüken,  
Lutz M. Birke, Ingelore Hering,  
Ralf Nagel, Daniel Hosseus

## Wissenschaft trifft Wirtschaft: Zukünftige Kraftstoffe, Energie- und Antriebssysteme

### Maritime Research Forum 2019

Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr Hamburg  
Thomas-Ellwein-Saal, Mittwoch, 06.11.2019

## PROGRAMM

9:00 **Begrüßung der Gäste**  
*Prof. Dr. Klaus Beckmann,  
Präsident der  
Helmut-Schmidt-  
Universität*

9:10 **Eröffnung**  
*Dr. Peter Tschentscher,  
Erster Bürgermeister der  
Freien und Hansestadt  
Hamburg*

9:25 **Einführung**  
*Dr.-Ing. Wolfgang  
Sichermann,  
Geschäftsführer des  
Deutschen Maritimen  
Zentrums*

9:50 **Wie weiter mit der  
Brennstoffzelle?**  
**Elektrisch steuerbare  
Brennstoffzellenmem-  
branen und interne  
Methanisierung in  
Elektrolysezellen**  
*Prof. Dr.-Ing. Detlef  
Schulz, Helmut-Schmidt-  
Universität*

10:10 **Alternative Kraftstoffe  
für die Schifffahrt  
Entwicklung und  
Lieferung – Eine  
Perspektive aus der  
Sicht eines Energie-  
unternehmens**  
*Matthias Mundt, Shell  
Global Solutions  
(Deutschland) GmbH*

10:30 **Kaffeepause**

## IMPULSE/SCHLAGLICHTER I

**Moderation:**  
*Dr.-Ing. Wolfgang Sichermann*

9:30 **Green Shipping  
Verwendung von Big  
Data zur Emissionsbe-  
wertung, Verbrauchs-  
optimierung und  
Effizienzsteigerung**  
*Tina Scheidweiler,  
Fraunhofer-Center  
für Maritime Logistik und  
Dienstleistungen*

## WORLD CAFÉ I – PRÄSENTATIONEN

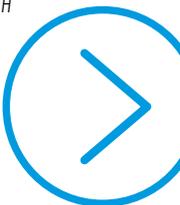
11:00 bis 12.30  
*Fünf zeitgleiche Präsentationen,  
Wechsel alle 30 Minuten*

**1. Optimierung von  
Verbrennungsmotoren**  
*Moderation: Dr.-Ing. Markus  
Druckenbrod, thyssenkrupp  
Marine Systems GmbH*

**Experimentelle Untersuchung  
der Ammoniakherzeugung für  
großskalige SCR-Systeme  
unter Druck**  
*Markus Höltermann, Leibniz  
Universität Hannover*

**eta-up – Reduzierung der  
Reibungsverluste bei  
mittelschnelllaufenden  
Marine-Dieselmotoren**  
*Marko Püschel,  
Forschungszentrum für  
Verbrennungsmotoren und  
Thermodynamik Rostock GmbH*

**Modellbasierte Regelung  
von Erdgas/Diesel-Dual-  
Fuel-Motoren für  
maritime Anwendungen**  
*Dennis Ritter,  
RWTH Aachen*





## 2. Synthetische Kraftstoffe

Moderation: Matthias Mundt,  
Shell Global Solutions  
(Deutschland) GmbH

### BEST - BioEnergyStorage (Biotechnologisches Verfahren zur Erzeugung von synthetischem Erdgas)

Philip Schmit, Hochschule für  
Technik und Wirtschaft des  
Saarlandes

### Methanol - klimaneutraler Schiffskraftstoff der Zukunft?

Thilo Jürgens-Tatje, Technische  
Universität Hamburg

### Degradationsminimierung von Pre-Reforming-Katalysatoren für flüssige Kraftstoffe zur Prozessgaszerzeugung für Brennstoffzellen

Oliver Zöllner, OWI Oel-  
Waerme-Institut gGmbH

## 3. Energiespeicher / Brennstoffzellen

Moderation: Dirk Lehmann,  
Becker Marine Systems GmbH

### Projekt HyReflexS: Umschalt- bare Brennstoffzellen- und Elektrolyseanlagen in der Sektorkopplung

Robert Hankers, Helmut-  
Schmidt-Universität

### Hocheffiziente, kompakte und sichere Wasserstoffspeicher für maritime Anwendungen

Dr.-Ing. Julian Jepsen,  
Helmut-Schmidt-Universität/  
Helmholtz-Zentrum Geesthacht

### Wasserstoffspeicherung in Metallhydriden für maritime Anwendungen

Dr. Claudio Pistidda, Hel-  
mut-Schmidt-Universität/  
Helmholtz-Zentrum Geesthacht

## 4. Windkraft- und Wasser- stoffanwendungen

Moderation: Tina Scheidweiler,  
Fraunhofer-Center für Maritime  
Logistik und Dienstleistungen

### Projekt Elektra - Batterie- und Brennstoffzellen-Antrieb für ein Schubboot

Sebastian Apenbrink,  
Technische Universität Berlin

### Maritime intermodale Transportketten -

### Wasserstoff-Anwendungen im Lkw-Hinterlandtransport

Dr. Nils Meyer-Larsen, ISL  
Institut für Seeverkehrswirt-  
schaft und Logistik

### A Fast and Complete Simulation Tool for Ships Towed by Kite: Assessment of Propulsion Efficiency

Dr.-Ing. habil. Christian Jochum,  
ENSTA Bretagne

## 5. E-Fuels in Großmotoren

Moderation: Alexander  
Marczewski, MAN Energy  
Solutions SE

### Potenziale und Herausforde- rungen einer Nutzung von E-Fuels für mittelschnelllau- fende Großmotoren

Benjamin Stengel, Universität  
Rostock

### Ottomotorischer Gasantrieb

Alexander Lehmann,  
Helmut-Schmidt-Universität

### Verbrennungstechnische Untersuchungen zum Einsatz

### von alternativen Kraftstoffen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Kraftstoff- eigenschaften

Marcel Pietsch, Helmut-Schmidt-  
Universität

12:30 Mittagspause

## WORLD CAFÉ II - BERICHTE UND DISKUSSION

13:30 bis 14.30 Uhr

Mit: Dr.-Ing. Markus Druckenbrod,  
Matthias Mundt, Dirk Lehmann,  
Tina Scheidweiler, Alexander  
Marczewski

Moderation: Dr.-Ing. Wolfgang  
Sichermann

## IMPULSE/SCHLAGLICHTER II

Moderation: Dr.-Ing. Wolfgang  
Sichermann

14:30 **Schweröl, Marinediesel  
- was kommt danach?**

Alexander Marczewski,  
MAN Energy Solutions SE

14:50 **Kaffeepause**

15:10 **Wasserstoff in der  
maritimen Wirtschaft**

Dirk Lehmann, Becker  
Marine Systems GmbH

15:30 **Streitkräfte und  
Klimawandel**

Prof. Dr. Stefan Bayer,  
German Institute for  
Defence and Strategic  
Studies

**Anschließend Get together**

17:00 **Ende der Veranstaltung**

## ABSTRACTS WORLD CAFÉ

# 1. Optimierung von Verbrennungsmotoren

## Experimentelle Untersuchung der Ammoniakzerzeugung für großskalige SCR-Systeme unter Druck

M. Höltermann, J. Wichmar, F. Dinkelacker -  
Leibniz Universität Hannover, Institut für  
Technische Verbrennung (ITV)

Die selektive katalytische Reduktion (SCR) ist ein bei Nutzfahrzeugen und größeren Diesel-Pkw etabliertes Verfahren, um Stickoxide im Abgas zu reduzieren. Strengere Grenzwerte machen eine Nachbehandlung auch von Schiffsabgasen erforderlich. Damit auch hier die SCR-Technologie effizient und betriebssicher eingesetzt werden kann, müssen die Prozesse der Ammoniakzerzeugung aus wässriger Harnstofflösung (HWL) genauer untersucht werden. Für den Entwicklungsprozess von Großmotoren ist insbesondere die Verwendung von numerischen Methoden zentral. Bei Schiffsmotoren besteht zudem die Option, ein SCR-System vor dem Turbolader einzubauen. Um die Ammoniakzerzeugung unter Druck untersuchen zu können und entsprechende Validierungsdaten zu liefern, wurde am ITV ein Hochdruck-Heißgasprüfstand aufgebaut.

Ein Schwerpunkt der Forschung ist es, die Eindüsung von HWL per Zweistoffdüsen durch Parameterstudien zu charakterisieren. Der Sprayaufbruch wurde dabei mittels High-Speed-Shadowgraphy aufgenommen, die

Tropfenspektren wurden mit einem Phasen-Doppler-Anemometer (PDA) gemessen. Die Untersuchungen zeigen zum einen, dass sich die Tropfenverteilungen der Sprays mit zunehmendem Gegendruck zu größeren Durchmessern verschieben - mit der Veränderung bestimmter Parameter lässt sich dem aber entgegenwirken. Zum anderen dienen die Parameterstudien dazu, Skalierungseffekte aufzuzeigen. Außerdem zeigen die Untersuchungen, unter welchen Bedingungen die Düse von Ablagerungen betroffen ist, die eine Verstopfung nach sich ziehen können.

## eta-up - Reduction of Friction Losses in Medium-Speed Marine Diesel Engines/Reduzierung der Reibungsverluste bei mittel- schnelllaufenden Marine-Diesel- motoren

M. Püschel - Forschungszentrum für  
Verbrennungsmotoren und Thermodynamik  
Rostock GmbH

In recent decades, the overall efficiency of two-stroke and four-stroke large-bore diesel engines has been unmatched by any other engine application, due mostly to high indicated efficiencies. But smaller engines, such as heavy-duty truck engines, have achieved significant progress in indicated and mechanical efficiency.

To transfer this potential to medium-speed large-bore engines, a consortium was formed within the publicly funded eta-up project, which aimed to decrease the parasitic losses of medium-speed diesel engines.

To investigate the friction behavior of a modern medium-speed marine diesel engine, the cooling and lubricating systems of a MaK 6M20 were upgraded on various levels. All media circuits are now separated from the engine and can be operated electrically. Flow rates and temperature levels can be individually adjusted. One of the six cylinders is equipped with a specially machined piston that features surface thermocouples at the top and bottom of the piston crown. In addition to carrying out test bed measurements, the project partners utilize new and self-developed simulation approaches to analyze all major friction surfaces. The ability to utilize waste heat on the basis of higher temperature levels is another feature of the system that increases the quantity and quality of the total utilization rate.

## Modellbasierte Regelung von Erdgas/Diesel-Dual-Fuel-Motoren für maritime Anwendungen

*D. Ritter, D. Abel – RWTH Aachen, Institut für Regelungstechnik/M. Korkmaz, H. Pitsch – RWTH Aachen, Institut für Technische Verbrennung/T. Albin – embotech AG, Zürich*

Steigende Treibstoffkosten und strengere Umweltstandards bei gleichzeitig hohen Zuverlässigkeits- und Sicherheitsanforderungen sind die treibenden Größen der künftigen Schiffsmotoren-Entwicklung. Speziell in Emission Control Areas (ECA) werden die Grenzwerte schon in naher Zukunft massiv gesenkt werden. Erdgas hat als Treibstoff gegenüber Dieselkraftstoff erhebliche Vorteile – sowohl im Hinblick auf CO<sub>2</sub>- und Schadstoff-Emissionen als auch bezüglich der Betriebskosten. Der konventionelle Dieselmotor bietet wiederum Vorteile im transienten Betriebsverhalten und ist im Schiffsbetrieb aufgrund der Sicherheitsanforderungen zweckmäßig. Erdgas/Diesel-Dual-Fuel-Motoren nutzen sowohl Erdgas als auch Dieseldieselkraftstoff und kombinieren so die Vorteile beider Kraftstoffe.

Es wird ein modellbasiertes Regelungskonzept für Erdgas/Diesel-Dual-Fuel-Motoren vorgestellt, das in der Lage ist, in einem weiten Kennfeldbereich eine stabile Prozessführung zu gewährleisten – und zwar sowohl im konventionellen Diesel- als auch im Dual-Fuel-Betrieb und unter stationären wie transienten Betriebsbedingungen. Herausforderungen sind dabei vor allem die hohe Anzahl an Freiheitsgraden, das stark nichtlineare Übertragungsverhalten und die unterschied-

lichen Dynamiken der beiden Kraftstoffpfade. Kernelement des Regelungskonzeptes ist der eigentliche Verbrennungsregler, der auf einem modellbasierten prädiktiven Regelungsansatz basiert. Die Entwicklung wurde an einem skalierten Einzylinder-Forschungsmotor unter

realitätsnahen Betriebsbedingungen erfolgreich validiert.

Die vorgestellten Untersuchungsergebnisse sind im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Verbundvorhabens „JB-X-Clean – Entwicklung eines neuen Dual-Fuel-Konzeptes für sicheren, emissionsarmen und flexiblen Binnen- und Küstenschiffsantrieb“ (Fördernummer: BMBF 03SX375C) realisiert worden.

## 2. Synthetische Kraftstoffe

### BEST – BioEnergyStorage (Biotechnologisches Verfahren zur Erzeugung von synthetischem Erdgas)

*M. Brunner, P. Schmit – Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes, Fakultät für Ingenieurwissenschaften*

BEST ist ein biotechnologisches Verfahren, das an der Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes (htw Saar) entwickelt wurde. Dabei wandeln Mikroorganismen klimaschädliches CO<sub>2</sub> mittels erneuerbarer Energie effizient zu Methan in Erdgasqualität (SNG) um. Synthetisches Erdgas ersetzt fossiles Erdgas 1:1. Es lässt sich in jeder gewünschten Menge in das Erdgasnetz einspeisen, dort transportieren und an beliebiger Stelle nutzen.

Das BEST-Verfahren kann zur Lösung einiger aktueller Herausforderungen beitragen:

- Stoffliche Speicherung und Transport erneuerbarer Energie
- CO<sub>2</sub>-Minderung

- E-Fuels
- Sektorkopplung

Die mikrobielle Methanbildung erfolgt in einfachen, drucklosen Submersreaktoren. Die Reaktoren sind so konstruiert, dass sie ohne bewegte Teile in ihrem Inneren auskommen. Sie zeichnen sich durch einen geringen Wartungsaufwand und hohe Verfügbarkeit aus und sind in jede Größenordnung skalierbar. Dezentrale und zentrale Anlagen sind möglich. Im Gegensatz zu BEST arbeiten chemisch-katalytische Verfahren mit höchstem Wasserstoff und CO<sub>2</sub> bei hohen Drücken und Temperaturen. Die Reaktoren müssen für diese extremen Bedingungen aufwendig konstruiert sein. Die mikrobielle Bakterienkultur von BEST arbeitet dagegen bei Temperaturen von 30° bis 40°C optimal. Sie ist unempfindlich gegenüber Verunreinigungen wie Schwefelverbindungen oder Schwermetallen. Dadurch kann CO<sub>2</sub> aus diversen Quellen genutzt werden. Die Reaktoren lassen sich in ihrer Leistung uneingeschränkt variieren, stilllegen und umgehend wieder anfahren.

## Methanol – klimaneutraler Schiffskraftstoff der Zukunft?

T. Jürgens-Tatje – Technische Universität Hamburg, Arbeitsgruppe Schiffsmaschinenbau

Durch den Einsatz von Abgasreinigungssystemen wie Scrubbern und Katalysatoren oder die Verwendung von verflüssigtem Erdgas (LNG) als alternativer Kraftstoff lassen sich die Schwefel-, Stickoxid- und Rußemissionen von Schiffen bereits heute wirkungsvoll minimieren. Um die Klimaziele im Verkehrssektor zu erreichen, muss jedoch auch der Ausstoß von klimaschädlichen Gasen wie CO<sub>2</sub> deutlich gesenkt werden.

Es werden auf Schiffen also klimaneutrale Energieträger gebraucht. Diese könnten im Power-to-X-Verfahren entstehen. Damit ist es möglich, eine ganze Reihe von synthetischen Kraftstoffen herzustellen, die zwar Kohlenstoff enthalten und bei der Verbrennung CO<sub>2</sub> emittieren, in der Gesamtbilanz jedoch als CO<sub>2</sub>-neutral gelten, da der Kohlenstoff zuvor für die Synthese aus der Atmosphäre entnommen wurde.

Die Erfahrungen mit LNG haben gezeigt: Die bei Umgebungsbedingungen gasförmigen Energieträger sind zwar auf Schiffen grundsätzlich einsetzbar, bringen aber eine Reihe von Nachteilen mit sich. Ein synthetischer Kraftstoff sollte also nach Möglichkeit flüssig, gut handhabbar sowie leicht und effizient zu synthetisieren sein.

Methanol erfüllt alle diese Anforderungen – und verbrennt zudem sehr sauber. Allerdings ist es ähnlich wie LNG nicht zur Selbstzündung im Dieselmotor geeignet. Daher wird ein Zündöl benötigt, das idealerweise ebenfalls CO<sub>2</sub>-neutral sein sollte. Hierfür bietet sich Oxymethylenether (OME) an. Im Verbundforschungsprojekt E2Fuels

untersucht die Arbeitsgruppe Schiffsmaschinenbau den Einsatz von Methanol und OME als maritime Kraftstoffe. Dabei liegt der Fokus sowohl auf der landseitig notwendigen Hafinfrastruktur und der Bunkerschnittstelle als auch auf dem Kraftstoffsystem an Bord.

## Degradationsminimierung von Pre-Reforming-Katalysatoren für flüssige Kraftstoffe zur Prozessgaserzeugung für Brennstoffzellen

T. Schiekkel, O. Zöllner, B. Wildrath, E. Pohl – OWI Del-Waerme-Institut gGmbH

Als bedeutender Verursacher steht die Schifffahrtsbranche unter hohem politischem Druck, Treibhausgas- und lokale Schadstoff-Emissionen signifikant zu reduzieren. Eine vielversprechende Lösung ist die Bordstromversorgung über Brennstoffzellensysteme anstelle von Dieselmotoren oder Gasturbinen.

Die vorgestellte Arbeit untersucht den adiabaten Pre-Reforming-Prozess von Diesel zur Bereitstellung eines wasserstoffreichen Gases, das in einer Hochtemperaturbrennstoffzelle genutzt wird. Gegenüber konventionellen Antrieben sind bei einem solchen System um jeweils 99% reduzierte Feinstaub- und Stickoxidemissionen sowie um über 25% geringere Kohlendioxidemissionen zu erwarten. Bei der Verwendung von flüssigen Mitteldestillaten wie Diesel ist eine schnelle Degradation der genutzten Katalysatoren zu beobachten. Diese ist im Wesentlichen auf die Phänomene Rußbildung und Schwefelvergiftung zurückzuführen. Rußbildung lässt sich bei einer optimalen Einstellung von

Temperaturbereich und Dampfmenge sowie mit einer Teilzirkulation des Anodenabgases in den Reformer minimieren. Zur Reduzierung der Schwefelvergiftung wird die Tiefentschwefelung des Dieselmotorkraftstoffes mittels selektiver Adsorption untersucht.

Um die angestrebte Katalysatorlebensdauer von 10.000 Stunden zu erreichen, wird in weiteren Versuchen die Auswirkung der Tiefentschwefelung des Diesels bei gleichzeitig

optimierten Bedingungen zur Rußvermeidung untersucht. Außerdem wird im Rahmen des Projekts eine Methode zur Online-Bestimmung des Katalysatorzustandes entwickelt. Es zeigt sich, dass die Veränderung des Temperaturprofils im Reaktor hier die größte Aussagekraft besitzt.

*Die vorgestellte Arbeit wird im Rahmen des Projekts MultiSchIBZ durchgeführt.*

*Koordiniert durch: Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NÖW)*

*Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) im Rahmen des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP)*

## 3. Energiespeicher / Brennstoffzellen

### Projekt HyReflexS: Umschaltbare Brennstoffzellen- und Elektrolysesysteme in der Sektorkopplung

D. Schulz, R. Hankers – Helmut-Schmidt-Universität, Fachgebiet Elektrische Energiesysteme

Derzeit forschen wir an einer systemischen Gesamtlösung für das Zusammenspiel zwischen einer Brennstoffzelle und einem Elektrolyseur im Doppelstrang. Eine Kopplung dieser Technologien mit den Leitwarten der Strom- und Gasnetzbetreiber ermöglicht einen netzbedarfsgerechten Sektorkopplungsbetrieb. Die weitere Anbindung beispielsweise an die Leitwarte eines Busbetriebshofes erlaubt den Einsatz der Technologie für eine nachhaltige Notstromversorgung, die in Zeiten des normalen Netzbetriebes im Elektrolysemodus dazu dienen kann, dass sich die Anlage amortisiert.

Durch die Kombination mit einer auf Metallhydriden basierenden Speichertechnologie, die im Rahmen des Projektes ebenfalls erforscht wird, ist die direkte Einspeisung und Entnahme von Wasserstoff in das bzw. aus dem Gasnetz möglich, was die Speicherkapazität des Systems perspektivisch enorm erhöht. Das Poster stellt das technologische Konzept detaillierter vor.

## Highly Efficient, Compact and Safe Hydrogen Storage for Maritime Applications/Hocheffiziente, kompakte und sichere Wasserstoffspeicher für maritime Anwendungen

J. Jepsen<sup>1,2</sup>, G. Capurso<sup>1</sup>, K. Taube<sup>1</sup>, M. Dornheim<sup>1</sup>, T. Klassen<sup>1,2</sup> – <sup>1</sup>Helmholtz-Zentrum Geesthacht/ <sup>2</sup>Helmut-Schmidt-Universität, Institut für Werkstofftechnik

New developments in materials for solid-state hydrogen storage are promising [1,2]. Complex hydrides exhibit excellent gravimetric storage ability and great technical potential for storing hydrogen, especially in maritime applications. Although hydrides can provide an efficient and safe way to store hydrogen, there is still not enough comprehensive evaluation of their economic competitiveness, especially in the case of LiBH<sub>4</sub> / MgH<sub>2</sub> storage material, so-called Li-RHC. This study presents an assessment of the economic feasibility of using complex hydrides to store hydrogen. We also point out the potentials and challenges of the Li-RHC system based on small-scale investigations and compare these results with different generations of tank systems. Compaction of the material plays a key role in the technical application of RHCs regarding storage mass and volume as well as improving heat transfer. We also explore and discuss the good potential of this system to meet DoE system targets related to gravimetric and volumetric storage, and present possible solutions for the remaining challenges, in particular the integrated storage of heat.

[1] Barkhordarian G, Klassen T, Dornheim M, Bormann R.

Unexpected kinetic effect of MgB<sub>2</sub> inactive hydride composites containing complex borohydrides. *Journal of Alloys and Compounds*. 2007;440:L18-L21.  
[2] Vajo JJ, Skeith SL, Mertens F. Reversible Storage of Hydrogen in Destabilized LiBH<sub>4</sub>. *J Phys Chem B*. 2005;109:3719-22.

## Developments in Solid-state Hydrogen Storage Materials for Maritime Applications/Wasserstoffspeicherung in Metallhydriden für maritime Anwendungen

C. Pistidda<sup>1</sup>, G. Gizer<sup>1</sup>, M. Dornheim<sup>1</sup>, T. Klassen<sup>1,2</sup> – <sup>1</sup>Helmholtz-Zentrum Geesthacht/ <sup>2</sup>Helmut-Schmidt-Universität, Institut für Werkstofftechnik

Reactive amide composites are considered suitable candidates for solid-state hydrogen storage media in mobile and stationary applications [1]. In recent years, the possibility of operating these systems in near-ambient temperatures has been demonstrated [2]. The system that most attracts the attention of the scientific community is the 6Mg(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>-9LiH-x(LiBH<sub>4</sub>) system, which allows H<sub>2</sub> capacities and operating temperatures to be tailored to the molar ratios of Mg(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>, LiH and LiBH<sub>4</sub> [2-5]. The 6Mg(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub> + 9LiH + xLiBH<sub>4</sub> (x = 0, 0.5, 1, 2) system offers theoretical H<sub>2</sub> capacities ranging from 4.0 to 4.5 wt. % at moderate temperatures (170 °C – 200 °C), based on the general reaction (1).



In this work, both the hydrogen storage properties of the 6Mg(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>-9LiH-x(LiBH<sub>4</sub>) (x = 0, 0.5, 1, 2) system and the role of LiBH<sub>4</sub> in the kinetic behavior

and dehydrogenation/hydrogenation reaction mechanism were systematically investigated for 20 dehydrogenation / hydrogenation cycles.

[1] Garroni S, Santoru A, Cao H, Dornheim M, Klassen T, Milanese C, et al. Recent progress and new perspectives on metal amide and imide systems for solid-state hydrogen storage. *Energies*. 2018;11.  
[2] Wang H, Wu G, Cao H, Pistidda C, Chaudhary AL, Garroni S, et

al. Near Ambient Condition Hydrogen Storage in a Synergized Tricomponent Hydride System. *Advanced Energy Materials*. 2017;7.  
[3] Cao H, Wang H, He T, Wu G, Xiang Z, Qiu J, et al. Improved kinetics of the Mg(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>-2LiH system by addition of lithium halides. *RSC Advances*. 2014;4:32555-61.  
[4] Gizer G, Puszkiel J, Cao H, Pistidda C, Le TT, Dornheim M, et al. Tuning the reaction mechanism and hydrogenation/dehydrogenation properties of 6Mg(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>-9LiH system by adding LiBH<sub>4</sub>. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019;44:11920-9.  
[5] Wang H, Cao H, Pistidda C, Garroni S, Wu G, Klassen T, et al. Effects of Stoichiometry on the H<sub>2</sub>-Storage Properties of Mg(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>-LiH-LiBH<sub>4</sub> Tri-Component Systems. *Chemistry – An Asian Journal*. 2017;12:1758-64.

## 4. Windkraft- und Wasserstoffanwendungen

### Projekt Elektra – Batterie- und Brennstoffzellenantrieb für ein Schubboot

S. Apenbrink – Technische Universität Berlin, Institut für Land- und Seeverkehr

Das Projekt Elektra demonstriert die Machbarkeit alternativer, emissionsarmer Energieversorgungssysteme auf Binnenschiffen und setzt damit einen wichtigen Impuls für den Markt. Erstmals wird ein hybrides Antriebskonzept aus Brennstoffzellen und Akkumulatoren auf einem Binnenschubboot realisiert. Dabei geht es auch darum, das dynamische Zusammenwirken der Komponenten im Betrieb des Schiffes zu optimieren, um eine möglichst große Reichweite zu erzielen. Die Brennstoffzellentechnologie trägt hier nicht nur zur Stromversorgung von Hotelkosten und Verbrauchern an Bord bei, sondern versorgt auch den Antriebsstrang mit Energie.

Mit dem Vorhaben wird gezeigt, dass sich Wasserstoff mit seinen spezifischen Besonderheiten und Anforderungen als direkter bzw. indirekter Energiespeicher in der Schifffahrt

eignet. Im Rahmen des Projekts werden außerdem Infrastrukturmaßnahmen für die Aufladung der Akkumulatoren mit Landstrom und zur Versorgung der Brennstoffzellen mit Wasserstoff realisiert und evaluiert. Auf dem Schubboot wird ein Energie-Management-System implementiert. Es dient dazu, die limitierte Energie optimal zu nutzen und so die Wirtschaftlichkeit und Konkurrenzfähigkeit gegenüber konventionell angetriebenen Schiffen zu stärken. Erstmals in der Binnenfrachtschifffahrt wird ein Fahrassistenz mit integrierter Routenplanung eingesetzt und optimiert, um so eine Reichweitensteigerung zu ermöglichen.

Parallel zur Erprobung des neuen Energie- und Antriebssystems auf der Elektra werden weitere potenziell sinnvolle Anwendungsfälle in der Binnen- und küstennahen Schifffahrt identifiziert und die entsprechenden Komponenten und Systeme darauf angepasst und weiterentwickelt.

## Maritime intermodale Transportketten – Wasserstoff-Anwendungen im Lkw-Hinterlandtransport

N. Meyer-Larsen – ISL Institut für Seeverkehrswirtschaft und Logistik/Claas Schott – H2BX – Wasserstoff für die Region Bremerhaven e.V.

Anforderungen durch Klimawandel und Umweltverschmutzung sowie übermäßiger Ressourcenverbrauch erfordern neue Rahmenbedingungen für die Ökonomie. Der Gütertransport mit fossilen Energieträgern als Treibstoff ist in diesem Zusammenhang als Auslaufmodell zu sehen. Wasserstoff gilt als ein Treibstoff der Zukunft, doch der entsprechende Erfahrungsschatz ist derzeit noch gering. Nach der im Januar 2018 vorgelegten unabhängigen BDI-Studie „Klimapfade für Deutschland“<sup>[1]</sup> wären für Emissionssenkungen im schweren Straßengüterverkehr „aus heutiger Sicht Lkw-Oberleitungen die günstigste Option. Daneben befinden sich vor allem Brennstoffzellen, Verbrenner mit synthetischen Kraftstoffen und batterieelektrische Lkw in einem Technologiewettbewerb mit offenem Ausgang. In den nächsten Jahren müsste daher eine zusätzliche Technologieerprobung und -entwicklung aller Optionen erfolgen“.

In der Schweiz fährt seit 2017 der Prototyp eines Wasserstoff-Lastzuges für die Firma Coop<sup>[2]</sup> – der erste schwere Lkw, der auf Wasserstoffantrieb umgerüstet wurde<sup>[3]</sup> und auch im Alltagsbetrieb eingesetzt werden kann. Die Lkw-Hersteller Toyota Trucks und Kenworth betreiben ebenfalls seit 2017 in den Häfen von Los Angeles einen ersten seriennahen Konzept-Truck mit

Brennstoffzellenantrieb im Testbetrieb und planen ein entsprechendes Serienfahrzeug<sup>[4]</sup>. Das US-amerikanische Startup Nikola Motor plant, mit der Serienproduktion eines speziell für den europäischen Markt konzipierten Wasserstoff-Trucks 2022 oder 2023 zu beginnen<sup>[5]</sup>. Im Hamburger Hafen ist nach Aussage eines Akteurs für das Jahr 2020 ein prototypischer Testbetrieb mit bis zu fünf Lkws im Bereich Containertransport geplant.

Vorgestellt werden Konzepte, wie Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnik im Lkw-gestützten Hinterlandverkehr zukünftig zum Einsatz kommen könnten und welche positiven Auswirkungen für die Umwelt hierdurch zu erwarten sind.

- [1] BDI-Studie „Klimapfade für Deutschland“, S. 116, <https://bdi.eu/publikation/news/klimapfade-fuer-deutschland/>  
[2] <https://www.hzwei.info/blog/2017/09/07/erster-wasserstoff-truck-auf-der-strasse/>  
[3] <https://www.dvz.de/rubriken/test-technik/alternative-antriebe/detail/news/leuchtturmprojekt-brennstoffzellen-lkw.html>  
[4] <https://www.dvz.de/rubriken/test-technik/detail/news/wasserstoff-als-sprit.html>  
[5] <https://ecomento.de/2018/11/06/nikola-motor-stellt-wasserstoff-lkw-fuer-europa-vor/>

## A Fast and Complete Simulation Tool for Ships Towed by Kite: An Assessment of Propulsion Efficiency

A. Morvan, N. Bigi, J.B. Leroux, A. Nême, C. Jochum – ENSTA Bretagne

In the context of global warming and the increasing use of fossil fuels, more and more research programs in recent decades have explored the development of innovative and green propulsion systems for maritime transportation. The work we present here is in this framework, and

looks at how to reduce the fuel consumption of container ships by using an alternative propulsion technology. The pioneer work of Duckworth in 1983<sup>[1]</sup> indicates that utilising wind energy through kite propulsion is a very good candidate. Pondeur et al.<sup>[2]</sup> have also shown that this technology has the potential to generate significant fuel savings. However, kite operability needs to be assessed, especially regarding the kite load ratio and overall propulsion efficiency. Parameters such as true wind angle and sea state also need to be taken into account. This requires an approach of coupling modelling between the kite and the ship, which as yet has not been studied consistently in the literature.

Some discussions and/or recommendations can be found in a few papers<sup>[3]</sup>, but they take only static equilibrium into consideration. The dynamic interactions between a ship and a kite have remained a rarely investigated area since

publication of the N. Bigi thesis<sup>[4]</sup>. The main objective of our research is therefore to define dynamic effects on a ship more precisely, as well as understand kite operability regarding kite load ratio and propulsion efficiency in a realistic sea and wind environment. To achieve this, we use a unified seakeeping/manoeuvring numerical code by updating the equation of motions with the forces generated by the kite (see Bigi et al.)<sup>[5]</sup>.

- [1] D. Duckworth, „The Application of Elevated Sails (Kites) for Fuel Saving Auxiliary Propulsion of Commercial Vessels“ *Journal of Wind Energy and Industrial Aerodynamics*, n°12, pp. 75-97, 1983.  
[2] V. Pondeur, D. Merdrignac, M. Behrel, K. Rancin, C. Jochum, Y. Parlier et P. Renaud, „Simulation de voyage au long cours pour le calcul d'économies de carburant: Application à la propulsion par cerf-volant“ in *15e Journées de l'Hydrodynamique*, Brest, France, 2016.  
[3] J. Wellicome and S. Wilkinson, „Ship Propulsive Kites: An Initial Study“, University of Southampton, 1984.  
[4] N. Bigi, *Investigation of The Dynamic Motions and Operability of a Ship Towed by Kite“* Brest, 2017.  
[5] N. Bigi, J.-B. Leroux, K. Rancin, A. Nême, C. Jochum, Y. Parlier, „Ship Towed By Kite In Waves: A Strongly Coupled System“, *The 4th International Conference on Innovation in High Performance Sailing Yachts*, 2017, Lorient, France.

## 5. E-Fuels in Großmotoren

### Potenziale und Herausforderungen einer Nutzung von E-Fuels für mittelschnelllaufende Großmotoren

B. Stengel, B. Buchholz – Universität Rostock, Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren/F. Pinkert, E. Swiderski – Forschungszentrum für Verbrennungsmotoren und Thermodynamik Rostock GmbH (FVTR)

Nur wenn die Treibhausgasemissionen im Transportsektor sinken, lassen sich die europäischen Klimaziele erfüllen. Die Schifffahrt ist für ca. 2–3% der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich, abhängig von der Entwicklung des Welthandels mit steigender Tendenz. Die International Maritime Organization (IMO) hat sich deswegen ein Emissionsminderungsziel bis 2050 von mindestens 50% gegenüber 2008 gesetzt. Anders als im Onroad-Bereich ist für die Schifffahrt die Nutzung von batterie-

elektrischen Antrieben aufgrund der niedrigen Energiedichte und langen Ladezeiten keine Option. Eine Lösung bietet die Nutzung CO<sub>2</sub>-neutraler Kraftstoffe im konventionellen Verbrennungsmotor. Insbesondere synthetische Kraftstoffe, die aus regenerativ erzeugtem Wasserstoff und CO<sub>2</sub> aus der Umgebungsluft hergestellt werden können, sind wegen ihrer unbegrenzten Verfügbarkeit und ihrer flexibel anpassbaren Eigenschaften in diesem Zusammenhang attraktiv. Im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Forschungsprojektes ISystem4EFuels haben Experten der Universität Rostock und der FVTR GmbH solche E-Fuels auf ihre Eignung für Großmotoren im Schiffsbereich untersucht. Da E-Fuels aufgrund der unterschiedlichen Herstellungsverfahren unscharf definiert sind, wurden exemplarisch ein sauerstoffhaltiger Oxymethylenether (OME) und ein paraffinischer Diesel (HVO) untersucht.

Die Analyse der Eigenschaften der Versuchskraftstoffe zeigte für OME und HVO mit deutlich höheren Cetanzahlen ein verbessertes Zündverhalten gegenüber herkömmlichem Diesel (DIN EN 590). Insbesondere der niedrigere Energiegehalt von OME erfordert allerdings verlängerte Ansteuerzeiten der Injektoren. Das Einspritzverhalten der Kraftstoffe wurde in einer Hochdruck-/Hochtemperatur (HD/HT)-Kammer unter Bedingungen untersucht, die denen in einem Großmotor ähneln. Dabei wurden vor allem Einspritzstrahl-Charakteristiken wie Eindringtiefe und Aufbruchverhalten der flüssigen und verdampften Phase mittels eines Schlieren-Streulicht-Verfahrens bestimmt. Außerdem konnten das Zünd- und Rußverhalten

der Kraftstoffe in der HD/HT-Kammer unter reaktiven Bedingungen verglichen werden.

Ergänzend wurden an einem Einzylinder-Versuchsmotor mit modernem Common-Rail-System Kurzzeittests an unterschiedlichen Lastpunkten durchgeführt. Dabei wurden verschiedene Parameter verändert und Motorverhalten, Brenneigenschaften und Emissionen untersucht. Der Beitrag erläutert die Einflüsse der Kraftstoffe auf Einspritzung und Verbrennung qualitativ und quantitativ und stellt ihr Potenzial als Blendkomponente zu konventionellem Diesel heraus.

## Ottomotorischer Gasantrieb

A. Lehmann – Helmut-Schmidt-Universität, Institut für Antriebssystemtechnik

Das Methanmolekül besitzt das günstigste Verhältnis zwischen Kohlenstoff- und Wasserstoffatomen und den höchsten Heizwert unter den Alkanen. Infolgedessen lässt sich bei der Verbrennung in einem Ottomotor im Vergleich zu Benzin bei gleichen Rahmenbedingungen etwa ein Viertel der CO<sub>2</sub>-Emissionen einsparen.

Da eine reale Verbrennung stets unvollkommen ist, enthält das Abgas auch unverbranntes Methan, das eine 25-fach höhere klimaschädigende Wirkung hat als CO<sub>2</sub>. Bei einer stöchiometrischen Verbrennung kann zur Abgasreinigung die Konvertierung in einem Drei-Wege-Katalysator erfolgen. Das wird allerdings dadurch erschwert, dass Methan ein sehr stabiles Molekül ist und eine deutlich höhere Temperatur im Katalysator benötigt. Am besten hält man also bereits die Rohemissionen von Methan

möglichst niedrig. Eine gute Homogenisierung und ein besserer Durchbrand des Luft-Kraftstoff-Gemischs tragen maßgeblich dazu bei, die Rohemissionen der unverbrannten Kohlenwasserstoffe zu senken. Die Güte der Homogenisierung hängt bereits davon ab, wie das Gas in das Saugrohr eingebracht wird. Hier spielen sowohl die Position des Injektors als auch der Zeitpunkt der Einblasung eine Rolle. Eine weitere Maßnahme, die sowohl die Vermischung als auch die Verbrennung unterstützen kann, ist es, eine definierte Strömung im Zylinder zu erzeugen.

Mithilfe der numerischen Strömungsmechanik können diese Vorgänge simuliert, untersucht und optimiert werden. Die Strömungseigenschaften der luftführenden Bauteile können an einem Durchströmungsprüfstand bestimmt werden, um die Ergebnisse der Simulation zu überprüfen und die Randbedingungen vorzugeben. Thermodynamische Analyse und Prozessrechnung erlauben eine Auswertung der am Prüfstand durchgeführten Versuche und die Bestimmung von Kenngrößen, die ohne Weiteres nicht messbar sind. Die verwendete Software berücksichtigt verschiedene Kraftstoffzusammensetzungen und ist auf jeden Motortyp anpassbar.

Mit der Abgasmessanlage am Institut können limitierte Abgaskomponenten wie unverbrannte Kohlenwasserstoffe, gesondert auch Methan, aber auch Stickoxide, Kohlenmonoxid und Kohlendioxid gemessen werden. Das ermöglicht es, unterschiedliche Maßnahmen beim Gemischbildungsprozess und der verbrennungstechnischen Prozessführung zu bewerten.

## Verbrennungstechnische Untersuchungen zum Einsatz von alternativen Kraftstoffen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Kraftstoffeigenschaften

G. Marsch, M. Pietsch – Helmut-Schmidt-Universität, Institut für Antriebssystemtechnik

Der Verbrennungsablauf im Dieselmotor und alle davon abhängigen Größen leiten sich unmittelbar von der Einspritzung sowie den physikalisch-chemischen Eigenschaften des Kraftstoffs ab. Im Rahmen unserer Forschung werden insbesondere die Einflüsse alternativer Kraftstoffe auf die Verbrennung untersucht. Dabei werden ihre unterschiedlichen Eigenschaften berücksichtigt. Stellvertretend dafür steht die Cetanzahl, da sie die Zündwilligkeit eines Kraftstoffs beschreibt. Die Untersuchung der Vorgänge im Verbrennungsmotor bei der Nutzung alternativer Kraftstoffe ist erforderlich, um daraus abzuleiten, welche Änderungen an Einspritzsystemen notwendig sind und welche Anforderungen künftige Kraftstoffe erfüllen müssen. Das Thema Emissionen muss hierbei besonders berücksichtigt werden. Ziel ist es, eine umweltfreundliche Alternative zu finden, um den Verbrennungsmotor auch in Zukunft mit all seinen Stärken optimal nutzen zu können.

