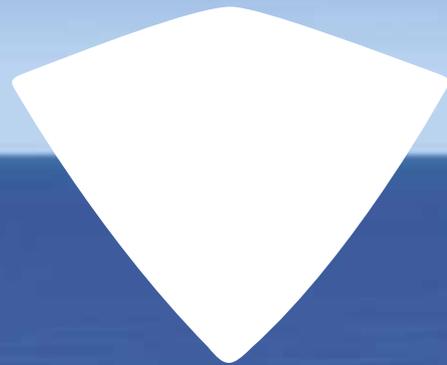


e4ships
BRENNSTOFFZELLEN IM MARITIMEN EINSATZ
2009 - 2016



INHALT

3

4	Grußwort Enak Ferlemann
5	Vorwort Dr. Klaus Bonhoff
6	Einleitung Dr. Gerd Würsig
7	Aufbau des Projekts
8	Modul Toplaterne
10	Life Cycle Costing
11	Brennstoffanalyse
14	Projekt Pa-X-ell
18	Projekt SchIBZ
22	Gesamtergebnisse
23	Ausblick
24	Kommunikation
26	Partner
27	Impressum

GRUSSWORT



Sehr geehrte Damen und Herren,

Wasserstoff und Brennstoffzellen können in der Mobilität aber auch im Gebäudebereich die entscheidende Verbesserung sein, die unser Energiesystem effizienter und emissionsfreier macht. Sie sind Schlüsseltechnologien, die es uns ermöglichen, erneuerbare Energien in den Energiesektor und als strombasierte Kraftstoffe in den Verkehrsbereich zu integrieren. Darum investieren in Deutschland Bund und Industrie gemeinsam in strategischer Partnerschaft seit 2006 in die Erprobung der Technologien und ihrer Produkte im Alltag.

Nicht zuletzt durch das Nationale Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP) ist es gelungen, wesentliche Produkte an den kommerziellen Markt heranzuführen. Heute stehen beispielsweise Brennstoffzellenheizgeräte für Eigenheime und erste wasserstoffbetriebene Fahrzeuge am Beginn der Kommerzialisierung. Das NIP, für welches die Bundesministerien für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) und Wirtschaft und Energie (BMWi) 500 Millionen Euro bzw. 200 Millionen Euro bereitgestellt haben - ergänzt um 700 Millionen Euro der beteiligten Industrie - bietet den verlässlichen Rahmen, welchen Forschungs- und Entwicklungsarbeit benötigen.

Im Bereich der Brennstoffzellen im maritimen Einsatz konnte im Leuchtturmvorhaben e4ships der Zusammenschluss von führenden deutschen Werften, Reedereien, Brennstoff-

zellenherstellern, Zulieferern und Klassifikationsgesellschaften gelingen. Gemeinsam haben sich die Partner dem Ziel verschrieben, Brennstoffzellen für die Energieversorgung in der Schifffahrt zu nutzen, Emissionen wie beispielsweise Schwefeldioxid, Stickoxid, Kohlendioxid, Kohlenmonoxid und Rußpartikel zu reduzieren und damit einen Beitrag zum Klimaschutz und zur Zukunftsfähigkeit der maritimen Industrie zu leisten.

Das BMVI hat von 2009 bis 2016 über 20 Millionen Euro in die Erprobung der Brennstoffzellentechnologie im maritimen Bereich investiert. Die Erfahrungen und Ergebnisse aus e4ships zeigen, dass sich die Technologie zu einer echten Alternative für die spezifischen Bedürfnisse der Schifffahrt entwickelt. Sie gibt uns eine technologisch innovative Antwort auf Klimaschutzfragen - insbesondere, wenn die Schiffe in Häfen und küstennahen Gebieten sind. Auch der Antrieb auf kleineren Schiffen ist zukünftig vorstellbar. Jetzt gilt es, die zweite Etappe bis zum kommerziellen Marktdurchbruch zu organisieren und die Weichen für die Marktaktivierung ab 2017 zu stellen.

Enak Ferlemann

Parlamentarischer Staatssekretär beim Bundesminister für Verkehr und digitale Infrastruktur

VORWORT



Sehr geehrte Damen und Herren,

Die Brennstoffzellentechnologie kann einen wertvollen Beitrag zum Klimaschutz und zur Zukunftsfähigkeit der maritimen Industrie leisten. Denn durch die Nutzung von Brennstoffzellen für die Energieversorgung in der Schifffahrt können Emissionen wie Schwefeldioxid, Stickoxid und Rußpartikel reduziert werden. Insbesondere in sogenannten Emission Control Areas, wo sinkende Emissionsobergrenzen aufgrund von Umweltverordnungen Schifffahrtsunternehmen vor große Herausforderungen stellen, spielt sich dieser Vorteil positiv aus.

Führende deutsche Werften und Reedereien haben in Zusammenarbeit mit Brennstoffzellenherstellern frühzeitig darauf gesetzt, im NIP-Leuchtturmprojekt e4ships vorwettbewerblich zu kooperieren, um die Technologie entlang des spezifischen Bedarfes der Schifffahrtsindustrie zu erproben. Mit einem Projektbudget von insgesamt über 35 Millionen Euro seit 2009 (davon über 20 Millionen Förderung durch das BMVI) werden neben der technischen Entwicklung seither Fragen nach Wirtschaftlichkeit, Klimaschutzeffekten oder sicherheitstechnischen Standards bearbeitet.

Dank der Zusammenarbeit in e4ships blickt das Konsortium auf wichtige Erfahrungen mit einem HT PEM Brennstoffzellensystem (60 kW) beziehungsweise einem batteriehybriden Brennstoffzellensystem (50 kW) auf zwei seegängigen Schiffen zurück. Die Technologie hat dabei bereits heute unter Beweis gestellt, dass sie durchaus eine attraktive und wirtschaftliche Alternative zu konventionellen Schiffsaggregaten darstellen kann.

Das Projekt e4ships wird über die nächsten Jahre fortgesetzt. Für Brennstoffzellen im maritimen Bereich wird es dann in Ergänzung zur weiteren Technologieerprobung im Alltag darum gehen, einen geeigneten Rahmen für den Markteintritt vorzubereiten.

Dr. Klaus Bonhoff

Geschäftsführer der NOW - Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie



EINLEITUNG



6

Die Energiewandlung durch Brennstoffzellen ist eine Schlüsseltechnologie zur Steigerung der Effizienz von Schiffsantrieben und damit zur Reduzierung von CO₂-Emissionen. Gleichzeitig sind Brennstoffzellen die effizienteste Art Schadstoffe wie NO_x und Partikel praktisch auf null zu reduzieren. Allerdings benötigen Brennstoffzellen „saubere“, schwefelfreie Brennstoffe. Solche Brennstoffe sind neben Wasserstoff, als dem idealen Brennstoff für Brennstoffzellen, Methan, Methanol, Ethanol sowie sowie schwefelfreier Diesel. Es war und ist ein langer aber lohnender Weg bis zur breiten Einführung dieser Brennstoffe in die Schifffahrt.

Unterstützt vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur hat sich der deutsche Schiffbau bereits Mitte des letzten Jahrzehnts auf den Weg gemacht, innovative technische Konzepte für die Zeit nach Ablösung des Schweröls als dominierenden Brennstoff für Seeschiffe zu entwickeln. Der Start des e4ships Leuchtturmprojektes im Jahr 2009 war ein erster wichtiger Meilenstein auf dem Weg hin zu nachhaltigen Antriebssystemen für die Schifffahrt der Zukunft.

Das in dieser Broschüre vorgestellte e4ships Leuchtturmprojekt ist ein von der Bundesregierung gefördertes Forschungsvorhaben. Als Partner sind führende deutsche Werften, Reedereien und Brennstoffzellenhersteller sowie wir als Klassifikationsgesellschaft dabei. Gemeinsam beantworten wir die wichtigen Fragen zu Klimaschutzeffekten, Wirtschaftlichkeit und sicherheitsrelevanten technischen Standards.

Neben den technischen Fragestellungen ist die Unterstützung der Entwicklung der notwendigen internationalen Vorschriften ein wesentlicher Bestandteil des Leuchtturmprojektes e4ships. Bereits seit 2004 unterstützt das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur die Entwicklung des IGF Codes der International Maritime Organization (IMO), als die IMO Vorschrift für saubere und umweltverträgliche Schiffsbrennstoffe. Nachdem 2009 zunächst eine Richtlinie für die Anwendung von Gas als Schiffsbrennstoff von der IMO verabschiedet wurde, werden die weiterführenden Arbeiten am „International Code of Safety for Ships Using Gases or other Low-Flashpoint Fuels“ (IGF-Code) durch die Partner im e4ships Vorhaben gezielt unterstützt. Zusammen mit dem BMVI hat hier insbesondere der deutsche Schiffbauverband (VSM) gemeinsam mit dem europäischen Schiffbauverband (CESA) die Entwicklung vorangetrieben.



Ohne die strukturierte Unterstützung durch das e4ships Vorhaben wäre diese Arbeit erheblich schwieriger zu bewältigen gewesen.

Nach acht Jahren Arbeit an diesem Regelwerk, tritt im Januar 2017 der IGF-Code zunächst für Methan als Brennstoff in Kraft. Zur Zeit arbeitet die IMO an den Vorschriften für Methanol, Ethanol und niedrig siedenden, schwefelfreien Dieselmotorkraftstoff sowie die Einbeziehung der Brennstoffzellentechnologie in das IGF-Code Regelwerk. Neue Regelungen für verteilte Stromnetze an Bord von Schiffen sind dabei eine wichtige Voraussetzung für den Einsatz der Brennstoffzellentechnologie. Wie die Entwicklung des IGF Codes veranschaulicht, ist die Anpassung internationaler Regelwerke das „Bohren dicker Bretter“. Deshalb wird die Arbeit an IMO Regelwerken auch in Zukunft wichtiger Bestandteil bei der Fortführung des Leuchtturmprojektes e4ships bleiben.

Ich bin dankbar, dass ich die Entwicklungsarbeiten im e4ships Leuchtturm und die Arbeiten in Pa-X-e11 und SchIBZ bis hierhin begleiten durfte, und hoffe, dass ich weiterhin meinen Beitrag leisten kann, um diese Brennstoffzellensysteme zur Marktreife zu bringen.

Dr. Gerd Würsig
Vorsitzender des Steuerkreises e4ships,
Business Director Alternative Fuels, DNV GL

AUFBAU DES PROJEKTS



7

Das gemeinsame Interesse der Projektpartner liegt in der Nutzung der Brennstoffzellentechnologie für die klimafreundliche Energieversorgung vor allem von Nebenaggregaten und Versorgungssystemen auf Schiffen.

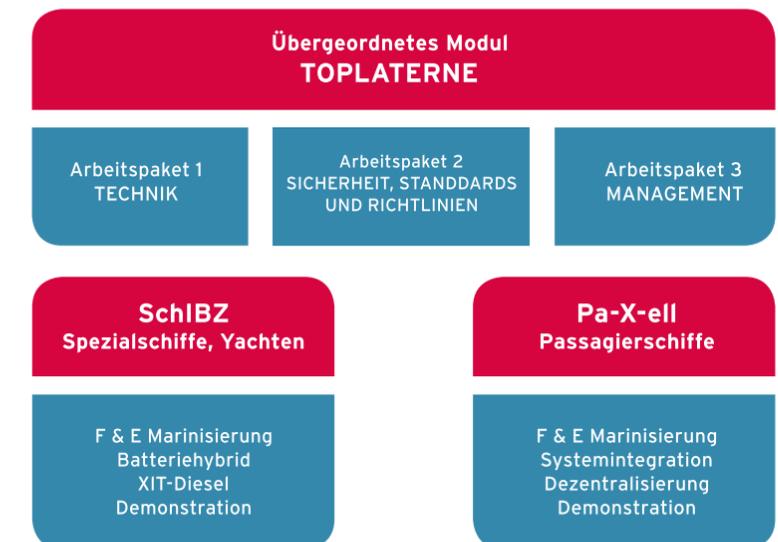
In einem übergeordneten Modul TOPLATERNE wurden Fragen zu den Klimaschutzeffekten, der Wirtschaftlichkeit, sicherheitstechnischer Standards sowie der Markteinführungsstrategie auch für die bislang noch nicht üblichen Brennstoffe wie schwefelfreier Dieselmotorkraftstoff oder Methanol bearbeitet.

Die beiden untergeordneten Projekte, SchIBZ und Pa-X-e11 realisieren die praktische Nutzung von Brennstoffzellen im maritimen Sektor. Die Erkenntnisse aus diesen beiden Demonstrationsprojekten wurden unter anderem genutzt, um bei der Formulierung von weltweit gültigen Regeln und Standards für die Zulassung und Installation von Brennstoffzellen auf Schiffen mitzuwirken.

Neben der praktischen Erprobung der Brennstoffzellen selbst wurden für die Nutzung emissionsarmer Treibstoffe wie schwefelfreier Diesel, Erdgas oder Methanol auf Schiffen und ihre Bereitstellung in Häfen Vorschläge für die gängigen Regelwerke erarbeitet, damit diese innovative Technologie künftig auch weltweit genutzt werden kann.

Das Projekt e4ships ist ein von der Bundesregierung gefördertes Gemeinschaftsprojekt führender deutscher Werften, Reedereien, Brennstoffzellenhersteller und Klassifikationsgesellschaften im Rahmen des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP).

Schematischer Aufbau des Projektes e4ships



MODUL TOPLATERNE



8

e4ships hat sich zum Ziel gesetzt, durch den Einsatz von Brennstoffzellen auf seegängigen Schiffen die Schadstoffemissionen deutlich zu senken. Dabei geht es im ersten Schritt um eine saubere Energieversorgung an Bord in Form von Strom, Wärme und gegebenenfalls Kälte. Wenn künftig Schiffe im Hafen ihre Energie aus Brennstoffzellen beziehen, kann eine deutliche Verbesserung der Luftqualität erreicht werden. Für die Brennstoffzellen werden gasförmige Brennstoffe eingesetzt, die künftig in vielen Häfen standardmäßig verfügbar sind.



Im Verbundprojekt e4ships entwickeln die beiden großen Werften MEYER WERFT und thyssenkrupp Marine Systems mit ihren Partnern jeweils technisch unterschiedliche Brennstoffzellensysteme und setzen mit Methanol bzw. Diesel auch verschiedene Treibstoffe ein. Das Ergebnis ist in beiden Fällen eine fast vollständige Reduktion der Emissionen von Ruß, Schwefel und Stickoxiden sowie deutlich sinkende Anteile des klimaschädlichen Kohlendioxids.

Neben dem Vorteil der Reduktion von Emissionen zeichnen sich die Systeme auch durch eine hohe Effizienz aus. Zudem bieten sie die Möglichkeit der besonders effizienten Kraft-Wärme-Kopplung an Bord von Schiffen. Gegenüber konventionellen mit Marinediesel oder Schweröl betriebenen Systemen konnten in einer die technische Umsetzung begleitenden Evaluation signifikant reduzierte Geräusch- und Abgasemissionen nachgewiesen werden. Zudem bietet der modulare Ansatz eine flexible und sichere Anordnung an Bord. Durch den modularen Aufbau wird zugleich eine redundante Energieversorgung und damit eine höhere Sicherheit für gerade die kritischen Systeme geschaffen.

Der Schiffbau und die Schifffahrt sind aus Sicherheitsgründen international stark reglementiert. Oft dauert es sehr lange,

MODUL TOPLATERNE



9

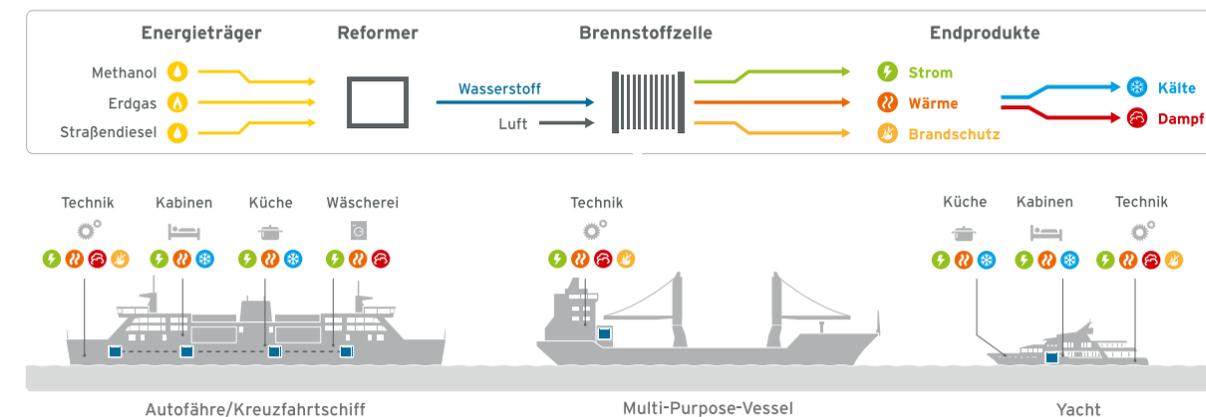
Der deutsche Schiffbau steht in einem starken internationalen Wettbewerb. Seine Zukunft hängt ganz maßgeblich davon ab, ob er auch künftig innovative technische Systeme entwickeln und zu wirtschaftlichen Konditionen zur Verfügung stellen kann. Dabei steht die Ausrichtung auf die drängenden Fragen des Umwelt- und Klimaschutzes im Mittelpunkt. Zukunftsfähige Schiffe sind vor allem saubere Schiffe.

Zurzeit setzen die Partner die nächste Stufe der Erprobung der Brennstoffzellen im praktischen Einsatz auf einer Fähre sowie einem Frachtschiff um. Auch hier werden gemeinsame Initiativen darauf ausgerichtet sein, neben dem Nachweis der technischen Tauglichkeit, die internationalen Rahmenbedingungen zu verbessern, indem weitere Treibstoffe zugelassen werden, und der Nachweis der Wirtschaftlichkeit erbracht wird.

International Maritime Organization (IMO)



bevor neue technische Systeme oder Treibstoffe für die Nutzung in den Häfen der Welt zugelassen werden. Zuständig für die Regelwerke und Standards ist dabei die International Maritime Organization (IMO). In dem Verbundprojekt e4ships ist es durch die gemeinsame Initiative der Partner und des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) für Deutschland als Mitgliedsstaat gelungen, die Ergebnisse aus der Erprobung erfolgreich in die Entscheidungsprozesse bei der IMO einzubringen und so die regulatorische Grundlage zu schaffen, zukünftig Brennstoffzellen an Bord von Schiffen kommerziell nutzen zu können. Jetzt wird es darum gehen, auch weitere umweltfreundliche Treibstoffe für den internationalen Einsatz in Häfen zuzulassen.



Verbesserung der Luftqualität durch Reduktion von Schadstoffen wie Stickoxide (NO _x) und Schwefeldioxide (SO ₂)	+	Reduktion von CO₂-Emissionen um 25-30%, als Beitrag zum Klimaschutz und Antwort auf strengere Emissionsrichtlinien	+	Erhalt der Wirtschaftlichkeit durch Unabhängigkeit von endlichen fossilen Brennstoffen
---	---	---	---	--

LIFE CYCLE COSTING



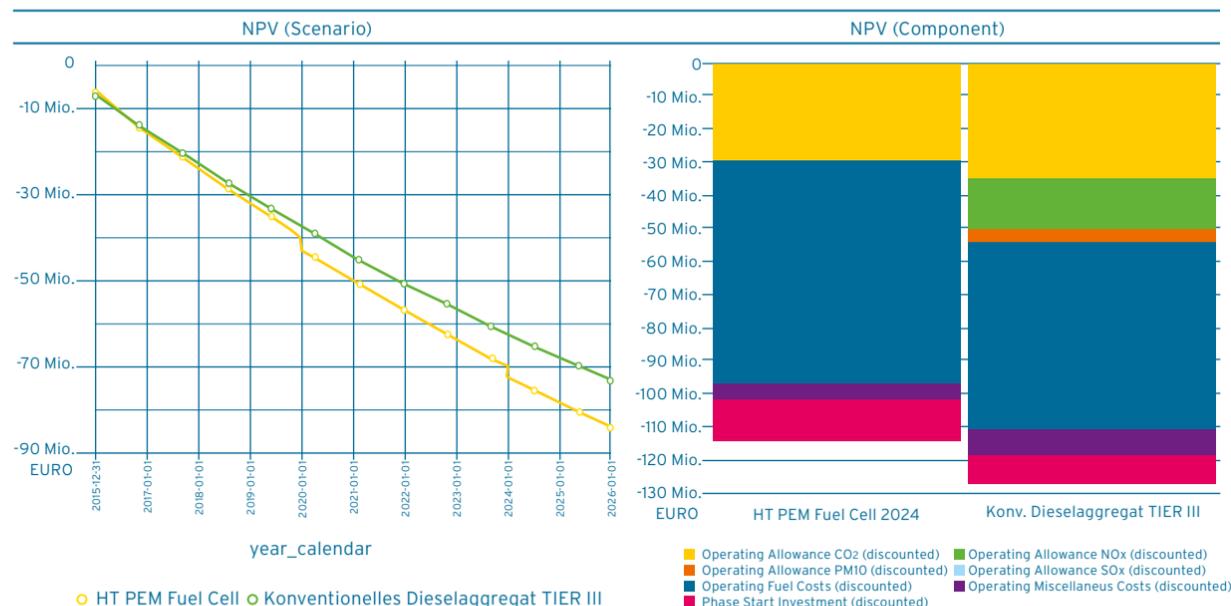
Eine Lebenszyklusanalyse ist eine Methodik, um die gesamten Kosten und Umweltwirkungen eines Produktes zu ermitteln und ggf. mit anderen innovativen Lösungen zu vergleichen.

10

Für die wirtschaftliche Bewertung wurde ein innovatives Brennstoffzellensystem zur Erzeugung von elektrischer Energie mit einem konventionellen Dieselmotor einschließlich Stromgenerator, wie er heute an Bord benutzt wird, verglichen.

Als Eingangswerte dienten ein typisches Bedarfsprofil für die Stromerzeugung, Kosten für Herstellung und Wartung der zu vergleichenden Stromerzeugungssysteme, Kraftstoffkosten sowie der notwendige Tausch des Brennstoffzellenstacks nach einer Betriebszeit von ca. 4 Jahren (siehe auch Verlaufskurve des Barwertes). Dabei wurden neben Umweltwirkungen während des Betriebs der beiden Stromerzeugungssysteme auch die zur Herstellung der Kraftstoffe nötigen Aufwendungen für Energie und daraus resultierenden CO₂-Emissionen ermittelt. Zusätzlich wurde der Einfluss einer möglichen Internalisierung von externen Kosten basierend auf den im „Update of the Handbook on External Costs of Transport“ der EU aufgeführten sozialen Kosten je emittierter Tonne schädlicher Emission untersucht.

Die Ergebnisse zeigen, dass Brennstoffzellen zukünftig wirtschaftlich betrieben werden können, wenn weitere Kostensenkungen bei der Herstellung, Effizienzsteigerungen und längere Standzeiten der Brennstoffzellenstacks realisiert werden können. Dies erfordert eine intensive technische Weiterentwicklung, aus Sicht der Partner können die angestrebten Zielwerte aber in der nächsten Dekade erreicht werden. Daneben bedarf es einer politischen Gleichstellung in Bezug auf die Umweltwirkungen wie die Internalisierung der externen Kosten zeigt (Bild links unten), da heutige Dieselgeneratoren im Rahmen der geltenden Gesetzgebung höhere Emissionen aufweisen dürfen.



BRENNSTOFF ANALYSE



Bewertung alternativer Brennstoffe für die Bordstromversorgung durch Brennstoffzellen auf Schiffen

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen in e4ships zeigen die großen Potenziale von Brennstoffzellen in Kombination mit umweltfreundlichen Brennstoffen auf. Ihre Effizienz übersteigt dabei die von herkömmlichen Energiewandlern für Schiffe, sodass diese Technologie einen wichtigen Beitrag zur Reduzierung von Schadstoffemissionen in der Schifffahrt und zur Reduzierung des CO₂-Ausstoßes von Schiffen leisten wird. Die sich durch den Einsatz von Brennstoffzellen ergebenden Möglichkeiten zur Verbesserung der Energie- und Emissionsbilanzen zeigen, dass diese Technologie in Verbindung mit umweltfreundlichen Brennstoffen die Schiffsemissionen erheblich senken kann.

Im sogenannten IGF Code (International Code of Safety for Ships using Gas and other low flashpoint fuels), der von der IMO in London im Jahr 2015 verabschiedet wurde, sind bereits die Voraussetzungen für die Verwendung von LNG als Schiffsbrennstoff geschaffen. Nunmehr geht es darum den IGF Code auf andere alternative Brennstoffe wie Methanol und schwefelfreien Diesel zu erweitern, um die dringend benötigte breite Palette der möglichen Brennstoffe für Brennstoffzellen zu schaffen.

Beim Vergleich von Brennstoffzellensystemen für die Energieerzeugung an Bord von Seeschiffen mit konventionellen Systemen (wie etwa Motoren oder Gasturbinen) müssen grundsätzlich neben den brennstoffspezifischen Emissionen, wie Kohlendioxid (CO₂) und Schwefeldioxid (SO₂), auch die systemspezifischen Emissionen, wie z.B. Rußpartikel (Particulate Matter-PM), Stickoxid (NO_x), Kohlenmonoxid (CO) und Kohlenwasserstoffe (C_xH_y), berücksichtigt werden. Im Folgenden gibt es eine kurze Übersicht zu den Ergebnissen der Untersuchung eines Kreuzfahrtschiffs und einer Megayacht sowie den allgemeinen Trend der Emissionsvorschriften in der Seeschifffahrt.

11

Beispiel Kreuzfahrtschiff

Am Beispiel eines Kreuzfahrtschiffes mit konventioneller Energieversorgung im Vergleich zu einem Schiff mit integriertem Brennstoffzellensystem werden die Reduktionspotenziale besonders deutlich (siehe Abb. unten).

Dabei wird zugunsten des herkömmlichen Dieselmotoren-systems angenommen, dass durch eine verbesserte Nutzung der Abwärme sehr hohe thermische Wirkungsgrade erreicht werden. Auch unter diesen Bedingungen ergeben sich durch HT-PEM Brennstoffzellensysteme beachtliche Emissionsminderungen. So zeigt sich, dass mit Methanol die CO₂-Emissionen um bis zu 30% reduziert werden. Alle anderen Emissionen lassen sich lokal nahezu vollständig vermeiden.

Beispiel Yacht

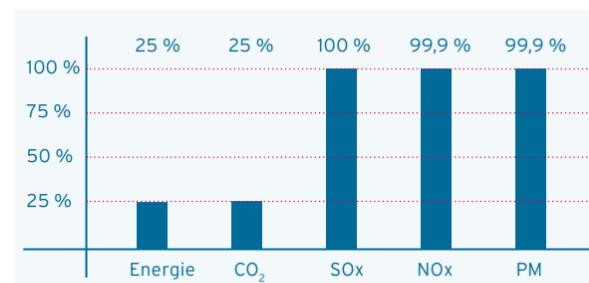
Ein ähnliches Bild ergibt sich beim Einsatz von Brennstoffzellensystemen auf Yachten (vgl. Abb. unten). Ausgehend von einer unregelmäßigen Nutzung, wie sie hier häufig auftritt, wurde in der Bilanzrechnung von 1500 h/a auf See ausgegangen. Im Vergleich zu einem herkömmlichen Dieselsystem betrieben mit Marineöldiesel lassen sich mit einer SOFC-Brennstoffzelle betrieben mit Straßendiesel ca. 25% der CO₂-Emissionen vermeiden. Auch sämtliche weitere Emissionen werden nahezu vollständig vermieden.

Neben den sehr niedrigen lokalen Emissionen liegt ein weiterer Vorteil der Brennstoffzellen in ihrer hohen Effizienz. Dieses gilt insbesondere, wenn sie zur Kraft-Wärme- bzw. Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung eingesetzt werden. Sie erlauben signifikante Reduktionen von Stick- und Schwefeloxiden sowie Ruß gegenüber der heute üblichen Nutzung von Schwerölen oder Schiffsdiesel in verbrennungsmotorischen Bordstromversorgungen.

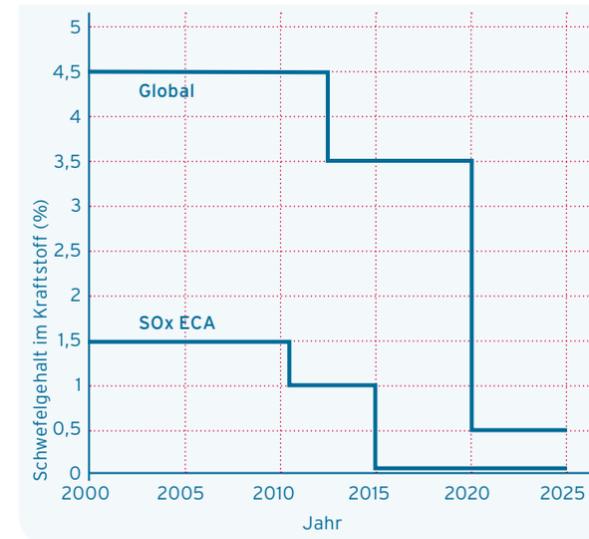
Energie- und Emissionsreduktionspotenzial eines typischen Kreuzfahrtschiffes



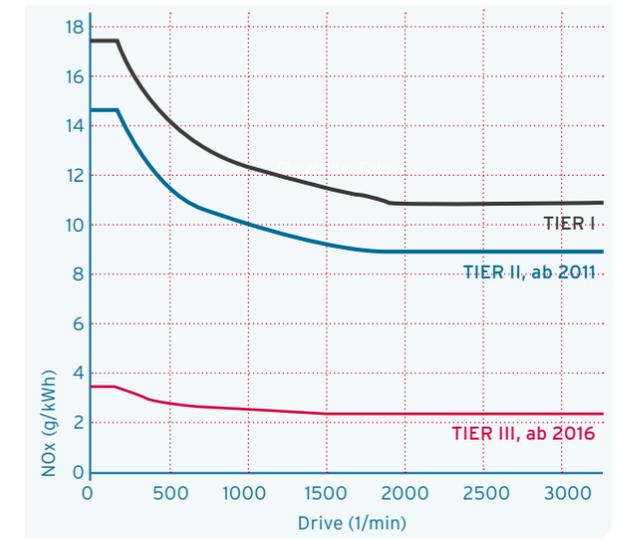
Energie- und Emissionsreduktionspotenziale einer Megayacht



Grenzwerte für Schwefel im Treibstoff [Quelle: IMO]



Grenzwerte für Stickoxid-Emissionen [Quelle: IMO]



Brennstoffabhängige Emissionen

Die brennstoffabhängigen Emissionen, im Wesentlichen CO₂ und SO₂, ergeben sich aus der Brennstoffzusammensetzung. Über die vom System gelieferte elektrische Arbeit und den Systemwirkungsgrad können die benötigte Energie- bzw. Treibstoffmenge und die emittierte Menge an CO₂ und SO₂ berechnet werden.

Insbesondere der Schwefelgehalt der jeweiligen Brennstoffe wurde durch die IMO bereits reglementiert. Im Jahr 2010 wurde ein Grenzwert von max. 1,0% Massenanteil in sogenannten „Sulphur Emission Controlled Areas“ (SECAs) verabschiedet.

Außerhalb der SECAs gilt seit 2012 ein Grenzwert von 3,5% Schwefelanteil (35.000 ppm) im Brennstoff. Seit dem 1. Januar 2015 liegt der Grenzwert in der Nord- und Ostsee sowie in den 200-Seemeilen-Zonen der USA und Kanadas bei 0,1% Schwefelanteil. Im Jahr 2020 wird in den 200-See-meilen-Zonen der EU ein Wert von 0,5% gelten. Es ist geplant, diesen Grenzwert ab den Jahr 2020 bzw. dem Jahr 2025 global einzuführen. Eine Entscheidung der IMO wird hierzu im Jahr 2018 erwartet (Abb. oben).

Systemspezifische Emissionen

Die systemspezifischen Emissionen unterliegen einem breiten Spektrum von Abhängigkeiten. Maßgeblicher Einflussfaktor ist die Effizienz des Umwandlungs- bzw. Verbrennungsprozesses.

Durch die offene Verbrennung in Kolbenmotoren und Gasturbinen wird eine Mischung verschiedener Schadstoffe erzeugt, die entweder emittiert werden oder mit einer aufwendigen Nachbehandlung neutralisiert werden müssen. In Brennstoffzellen wird der Brennstoff physikalisch oxidiert. Dabei sind die Temperaturen weit unter denen einer offenen Verbrennung und die notwendige einfache Struktur aus hauptsächlich Wasserstoff und Methan schließen die Bildung von Schadstoffen aus. Bei Verwendung kohlenstoffhaltiger Brennstoffe wird CO₂ emittiert, jedoch entsprechend des höheren Wirkungsgrades, in geringerer Menge als bei Motoren und Turbinen.

Damit ist eine Einhaltung der neuen Grenzwerte mit Brennstoffzellen viel einfacher möglich, ohne dass komplexe Abgasreinigungsstufen benötigt werden.

PROJEKT PA-X-ELL



14

Die in Pa-X-ell entwickelten Brennstoffzellensysteme sind flüssigkeitsgekühlte HT-PEM Brennstoffzellen auf modularer Basis, die ein Methanol-Wasser-Gemisch als Brennstoff verwenden. Die Flüssigkeitskühlung erlaubt eine anschließende Verwendung der Abwärme in thermischen Prozessen, wie beispielsweise einer Absorptionskälteanlage.

Ein Brennstoffzellenmodul hat derzeit eine maximale elektrische Leistung von 5kW und enthält alle für den Betrieb benötigten Komponenten. So sind neben dem Zellstapel selbst auch der Reformer, Nachbrenner, prozessinterne Wärmeübertrager sowie DC/DC-Wandler und die Steuerung im Modulgehäuse untergebracht. Sechs solcher Module können in einem mit Abluftschacht sowie Brennstoff- und Kühlwasserleitungen modifizierten 19"-Schaltschrank integriert werden, sodass dieser eine elektrische Leistung von 30 kW erreicht. Die Brennstoffzellenmodule wurden unter verschiedenen klimatischen Bedingungen getestet, um die Grenzen ihrer Einsetzbarkeit auszuloten. Die Ergebnisse zeigen, dass die Systeme mit den im maritimen Umfeld gegebenen Lufttemperaturen und Luftfeuchtigkeit eingesetzt werden können.

Im Vorhaben Pa-X-ell wurde unter Federführung der MEYER WERFT mit ihren Projektpartnern der Einsatz von Hochtemperatur-PEM Brennstoffzellen in verschiedenen Anwendungen erprobt. Ziel ist die langfristige dezentrale Energieerzeugung auf Passagierschiffen.

Die eingesetzten Brennstoffzellen zeichnen sich durch einen hohen Wirkungsgrad über einen sehr großen Leistungsbereich aus. Gerade im Teillastbereich weisen sie deutlich bessere Wirkungsgrade auf als konventionelle Dieselaggregate auf. Neben der reinen Entwicklung der Brennstoffzellensysteme wurden auch Simulationen zur Brennstoffzellenintegration in vorhandene Bordnetze durchgeführt. Hier wurden stationäre sowie transiente Vorgänge untersucht, um die Einflüsse der Brennstoffzellen auf die Gesamtsysteme herauszufinden.

Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Einführung dieser neuen Technologie ist die wirtschaftliche Bilanz. Eine Übersicht der Ergebnisse sind im Abschnitt „Life Cycle Costing“ dieser Broschüre zu finden.

Zur Sammlung von Betriebserfahrung wurden im Laufe des Projekts Pa-X-ell zwei Demonstrationsanlagen gebaut. Die erste Installation fand in einer landseitigen Demonstrationsanlage statt. Dabei wurde neben den Brennstoffzellen auch eine Absorptionskälteanlage in einem 20-Fuß-Container installiert, um erste praktische Erfahrungen mit den Brennstoffzellen machen zu können und gleichzeitig das Zusammenspiel mit der Kälteanlage zu erproben. Dieser Demonstrator steht auf dem Gelände der MEYER WERFT und wird weiterhin für Langzeittestzwecke eingesetzt.

PROJEKT PA-X-ELL

Zusammenstellung zur Brennstoffzelle mit dem Innenleben des Moduls, dem Modulgehäuse und dem Brennstoffzellenschrank



15

Die zweite Installation einer Brennstoffzellenanlage fand auf der Fähre MS Mariella statt, die zwischen Stockholm und Helsinki pendelt. Hier wurde eine 60-kW-Anlage konzipiert und als vorgefertigte Einheit auf dem Sonnendeck der Fähre installiert. Zusätzlich wurde ein Methanoltank im Schiff integriert, der per Lkw von Land aus gefüllt wird. Die Anlage ist ebenfalls für den Langzeitbetrieb vorgesehen, um Erfahrungen beim Betreiben der Brennstoffzellen

auf Schiffen zu sammeln. Die Herausforderung besteht hier vor allem in den dauerhaften Vibrationen und Schiffsbewegungen, die durch die Antriebsanlage des Schiffes und durch Seegang verursacht werden. Beide Demonstratoren werden über Pa-X-ell hinaus weiter genutzt, um immer die aktuellsten Brennstoffzellenmodulgenerationen testen zu können.

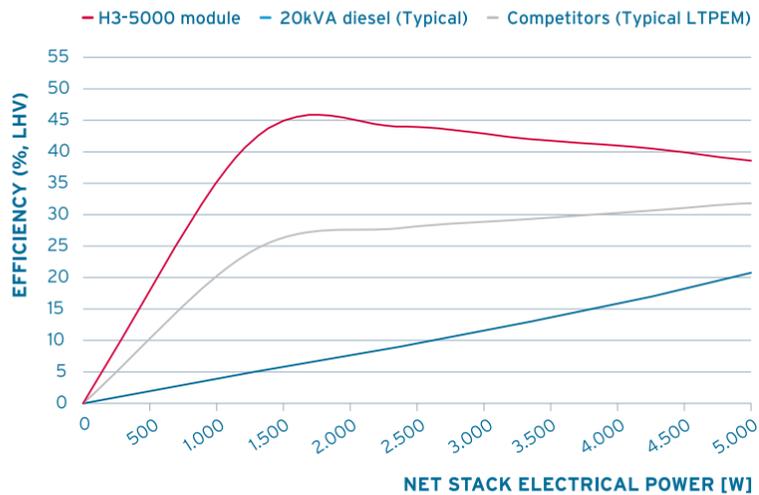


Brennstoffzellendemonstrator auf dem Gelände der MEYER WERFT in Papenburg



Das langfristige Ziel der Projektpartner ist es, Brennstoffzellen in dezentralen Netzen an Bord von Passagierschiffen einzusetzen. Die Dezentralität steigert die Sicherheit, da der Ausfall einer einzelnen Einheit keine gravierenden Auswirkungen auf das Gesamtsystem hat. Jede einzelne Feuerzone auf einem Schiff kann dann mit Brennstoffzellen versorgt werden. Neben dem positiven Sicherheitsaspekt der Energieversorgung des Hotelbereiches kommen ebenfalls reduzierte Energieströme zum Tragen, die die Effizienz des Gesamtsystems steigern.

Die in Pa-X-ell entwickelten Brennstoffzellensysteme sind technisch weit ausgereift, jedoch sind die bisher erzielten Kosten pro installierter Leistung als auch die Leistung pro Modul für große Anwendungen noch nicht wettbewerbsfähig. Hier bedarf es weiterer intensiver Entwicklung u.a. bei der Produktion der Module als auch der höheren Energiedichte.



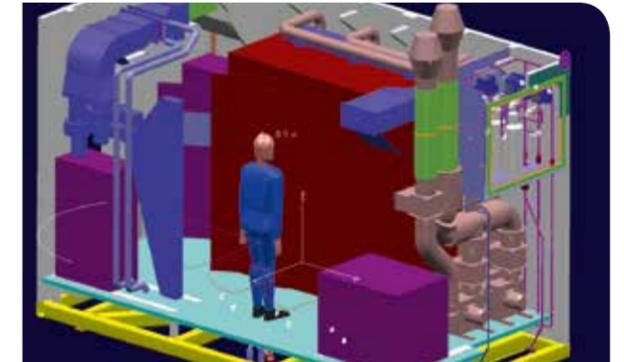
Prinzip des dezentralen Netzwerks mit Brennstoffzellen zur Hotelversorgung und konventionellen Verbrennungsmotoren zum Antrieb des Schiffes



Das Demoprojekt Pa-X-ell ist ein Meilenstein für den Passagierschiffbau. Die in Pa-X-ell durchgeführten Entwicklungen und praktischen Umsetzungen sowie das Konzept der dezentralen Nutzung der Brennstoffzellen haben bereits erste Erfolge gezeigt. So ist geplant, auf einigen Schiffsneubauten der MEYER WERFT solche Brennstoffzellensysteme zur Energieversorgung einzusetzen. Nun müssen weitere Anstrengungen folgen, um durch niedrigere Kosten und höhere Leistungen die Brennstoffzelle zu einer echten Alternative der konventionellen Energieerzeuger zu machen.

Bernard Meyer
Geschäftsführer der MEYER WERFT

3D-Modell der Testanlage (oben) und fertige Installation an Bord der Fähre MS Mariella (unten)



Der Brennstoffzellendemonstrator wurde auf dem Sonnendeck hinter dem Schornstein installiert



PROJEKT SCHIBZ

Das Forschungsprojekt SchIBZ [SchiffsIntegration BrennstoffZelle] wurde initiiert, um die Stromversorgung von Fahrgast- und Spezialschiffen zu verbessern.



Brennstoffzellenmodul für bis zu 50 kw Leistung

Aufgrund der stetig steigenden gesetzlichen Anforderungen an die Emissionen von Schiffen und der oftmals darüber hinausgehenden Wünsche der Schiffseigner und -betreiber ist die Notwendigkeit gegeben, die bisher übliche Stromerzeugung durch einfache Dieselmotoren um zusätzliche Verfahren zu ergänzen oder durch ein anderes Konzept zu ersetzen. Dabei ist eine hohe Effizienz der Stromerzeugung ein wichtiges Kriterium.

Da die verfügbaren Zusatzmaßnahmen zur Schadstoffreduzierung und Schalldämpfung zum Teil komplexe Aggregate und zusätzliche Verbrauchsstoffe beinhalten, hat thyssenkrupp Marine Systems GmbH, Standort

Hamburg, begonnen, alternative Lösungen zu betrachten und die aussichtsreichste in einem Projekt für die schiffbauliche Anwendung zu entwickeln.

Interne Vorstudien brachten das Ergebnis, dass die Brennstoffzelle als Aggregat die derzeit beste Alternative zum Motor ist, da sie prinzipbedingt keine Schadstoffe erzeugt und keine rotierenden Massen besitzt.

Als Brennstoff wurde schwefelarmer Diesel gewählt, der den heutigen Brennstoffen im Schiffsbetrieb verwandt ist. Dieser hat den Vorteil, weltweit gut verfügbar zu sein und die höchste volumetrische Energiedichte zu

PROJEKT SCHIBZ

ins Leben gerufen, in dem fünf Unternehmen und Institutionen in interdisziplinärer Zusammenarbeit ein hochseetaugliches Stromaggregat auf der Basis von Festoxidbrennstoffzellen (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC) entwickeln, fertigen und erproben, die von der sunfire GmbH, Dresden, zugeliefert wurden. Das Aggregat soll geeignet sein, den sogenannten Hotelbetrieb an Bord zu gewährleisten. Dabei ist es sowohl in sich skalierbar als auch die Anzahl der Module pro Schiff, sodass ein schrittweiser Aufbau der elektrischen Leistung bis in den Megawatt-Bereich möglich wird. Die Integration der Brennstoffzellenaggregate kann zudem an unterschiedlichen Stellen an Bord erfolgen, um eine hohe Sicherheit der Stromversorgung zu gewährleisten.

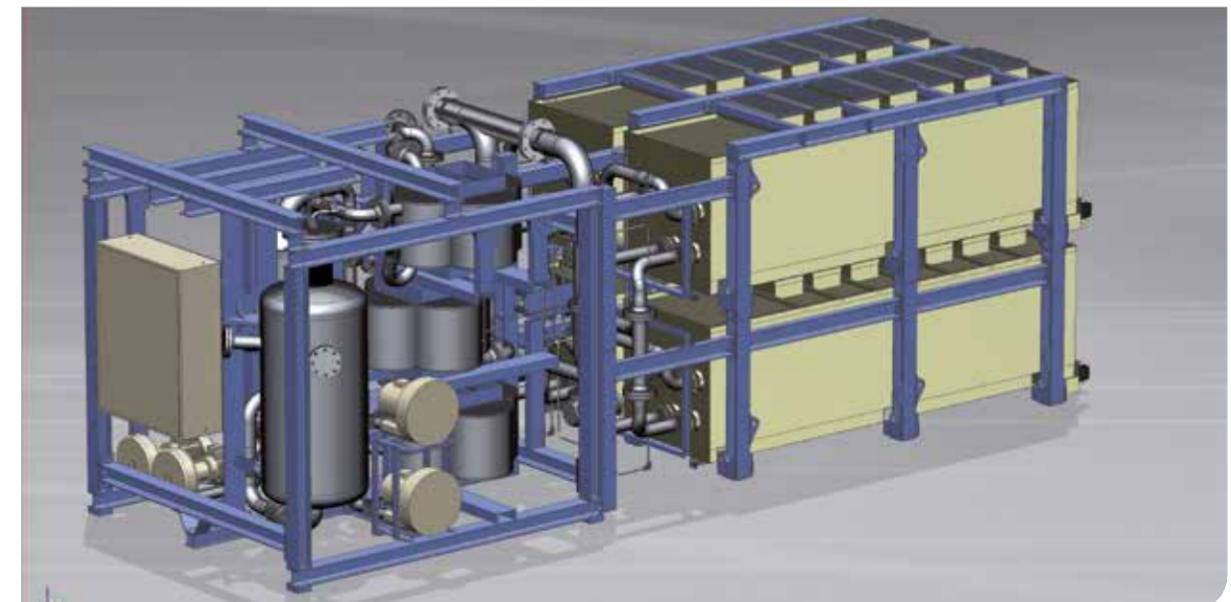


besitzen. Zudem sind die erforderlichen Sicherheitsmaßnahmen erprobt und abgesichert. Methanol benötigt um den Faktor 2 mehr Platz und Gewicht, Flüssigerdgas um den Faktor 4 und Wasserstoff bis zu Faktor 10. Das ausgewählte System ist zwar nicht CO₂-frei, aber durch den höheren elektrischen Wirkungsgrad sinken die CO₂-Emissionen um rund 25 %. Bei Verwendung biologischer oder regenerativer Dieselsarten kann die CO₂-Gesamtbilanz in der Zukunft darüber hinaus weiter reduziert werden. Alle anderen Emissionen entfallen sogar vollständig.

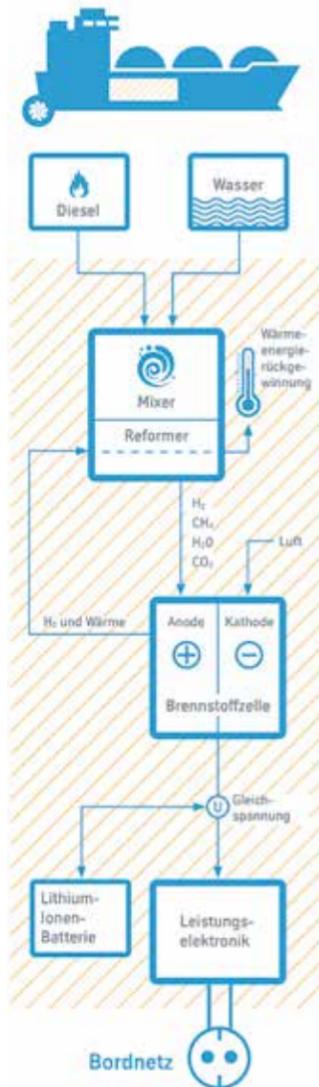
Um die motorisch getriebenen Generatoren langfristig durch umweltschonendere Brennstoffzellenanlagen zu ersetzen hat thyssenkrupp Marine Systems ein Konsortium

Die Arbeit an dem Brennstoffzellensystem umfasste alle Aspekte vom Entwurf und der Auslegung des System-Designs über die Brenngaserzeugung bis hin zur Brennstoffzelle und der Leistungselektronik. Dazu zählt auch die Entwicklung von Aufstellungsanforderungen, Raumbelüftungs- und Sicherheitskonzepten. Ein ergänzendes Nebenaggregat ist ein Energiepuffer, der die Dynamikunterschiede zwischen Verbrauchernetz und Brennstoffzelle ausgleicht. Hierzu wurde mit der M&P GmbH, Dresden, eine Hybridlösung mit Lithium-Ionen-Zellen und Super-Kondensator erarbeitet, die nach den Gegebenheiten des Verbrauchernetzes auf dem späteren Versuchsträger ausgelegt wurde. Weitere Arbeitsfelder waren die Entwicklung der Systemsteuerung und Betriebsstrategie sowie der Aufbau des Demonstrators. Die Arbeitsschritte wurden durch numerische Simulationen und experimentelle Untersuchungen des Oel-Waerme-Instituts,

Entwurf eines Aggregats mit bis zu 200 kW Leistung



Ansicht der Versuchsanlage auf das Prozeßmodul im Container



Aachen, und der Leibniz-Universität Hannover gestützt. Dabei ist das von der Leibniz-Universität gepflegte piping & instrumentation-Diagramm das führende Dokument.

Basierend auf diesem Systemkonzept und mit Hilfe von realen Parametern der einzelnen Apparate wurden diese modelliert und in einer Matlab/Simulink Programmumgebung zu einem Gesamtsystem zusammengeschaltet. Unter anderem wurde eine thermodynamisch Exergie-Analyse, eine Parametervariation des Dieselmodells mit diese Modell durchgeführt und ausgewertet. Anhand dieser wurden einzelne Apparate und das gesamte Systemkonzept thermodynamisch unter den gegebenen Randbedingungen optimiert. Eine Validierung des Modells mit experimentellen Daten der Anlage ist begleitend zum Versuchsbetrieb vorgesehen. Mit dem validierten Modell sollen dann verschiedene mögliche Lastfälle sowie Regelungsstrategien entwickelt werden.

Die Besonderheit des Systems liegt darin, Dieseldieselkraftstoff mit einem Schwefelgehalt von 15 ppm als Energieträger für den Betrieb der SOFC zu verwenden. Mit einem relativ einfachen, kostengünstigen Brenngasprozess, den das Oel-Waerme-Institut entwickelt hat, wird ein elektrischer Wirkungsgrad von über 50 % und durch die Nutzung der Abwärme ein Gesamt-Nutzungsgrad von 90 % erreicht.



thyssenkrupp Marine Systems fühlt sich bei der Gestaltung seiner Produkte dem Umweltschutz verpflichtet. Deshalb haben wir das Projekt SCHIBZ ins Leben gerufen, um der Schifffahrt eine umweltverträgliche Energieversorgung zur Verfügung zu stellen. Die in dem Projekt erzielten Ergebnisse bestätigen die hohe Effizienz und Schadstoffarmut der Anwendung von Diesel in einer Brennstoffzelle. Gerade für Anwendungen mit hohen Reichweiten ist die hohe Energiedichte von Diesel vorteilhaft. Nach dem Nachweis der Seetauglichkeit sind wir bereit für Pilotprojekte.

Andreas Burmester,
COO thyssenkrupp Marine Systems

Sowohl die Brennstoffzelle als auch das Restgasbrennersystem arbeiten bei Temperaturen um 750 °C, bei denen noch keine thermische Stickoxidbildung (NOx) auftritt, sodass das Aggregat trotz der Verwendung von Diesel ohne Abgasnachbehandlung minimale NOx-Emissionen aufweist.

Die Emission von Schwefeloxiden (SOx) und Methan (CH₄) wird komplett unterbunden. Um alle Teilprozesse, die im Vorfeld einzeln erprobt wurden, im System-Zusammenhang zu prüfen, wurde ein Demonstrator mit einer Nettol Leistung von zunächst 50 Kilowatt elektrisch an Land aufgebaut und getestet. Es handelt sich dabei um eine containerisierte Anlage, die von der Klassifikationsgesellschaft DNVGL, Hamburg, geprüft wurde. Parallel wird ein Konzept zur Skalierung der Aggregatleistung auf bis zu 500 kW_{el} erarbeitet.

Vorbereitend für den Betrieb auf See wurden Tests nach den Regeln des DNVGL durchgeführt. Dies war zum einen ein Test unter 22,5° Neigung, wie es auf offener See vorkommt, und zum anderen ein Test mit einem definierten Vibrationspektrum, welches die Belastungen durch Maschinenvibrationen und Seegang nachbildet. In beiden Versuchen traten unter Betriebsbedingungen keine Ausfallerscheinungen bei den SOFC auf. Der Demonstrator wird an Bord der MS Forester der Reederei Braren, Kollmar, ab 2017 zwischen 25 und 50 % zu der Bordstromversorgung beitragen.

Anordnung der Versuchsanlage auf der Testplattform MS Forester



ERGEBNISSE



22

In der Schifffahrt wachsen die Anforderungen aus den Klimaschutzvorgaben etwa des europäischen Rechts sehr schnell. Im Leuchtturmprojekt e4ships werden klimaschonende Brennstoffzellen in zwei technisch unterschiedlichen Varianten (HT-PEM und SOFC) entwickelt und an Bord von Schiffen erprobt, um deren Schadstoffemissionen deutlich zu senken. Der Einsatz bewirkt eine deutliche Verbesserung der Luftqualität, vor allem in Häfen und küstennahen Seegebieten. Die Brennstoffzellentechnologie ist somit ein wichtiger Baustein bei der Beantwortung der drängenden Frage zur Reduzierung der Emissionen von Schiffen. Zudem ist eine Umstellung auf emissionsarme Antriebe bzw. Brennstoffe eine Voraussetzung dafür, dass der Schiffsverkehr vor allem im Tourismus weiter auf seinem hohen Niveau nachgefragt wird. Für Reeder und Werften liegt die Umstellung auf saubere und effiziente Systeme deshalb in ihrem eigenen Interesse und wird aktiv betrieben.

Im Projekt e4ships wurden erstmalig neue technische Lösungen für die Reduzierung von Emissionen durch den Einsatz von Brennstoffzellen auf Schiffen erfolgreich demonstriert. Die erprobten Systeme bieten die Möglichkeit der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung und sind deswegen besonders effizient. konventionellen, mit Marinediesel oder Schweröl betriebenen Systemen, konnten signifikant reduzierte Geräusch- und Abgasemissionen nachgewiesen werden. Der dezentrale und modulare Ansatz bietet nicht nur eine flexible und sichere Anordnung an Bord sondern auch erhebliche Vorteile durch die Redundanz der Systeme (Safe Return to Port). Gleichzeitig wurden gemeinsame Anforderungen bei der Erstellung von nationalen, europäischen und internationalen Regelwerken, Normen und Standards in die relevanten Fachgremien eingebracht, um zukünftig grundsätzlich den Einsatz alternativer Kraftstoffe und Brennstoffzellen in der internationalen Schifffahrt zu ermöglichen. Im Rahmen von regelmäßigen Projekttreffen wurde eine Plattform für den fachlichen Austausch der Projektpartner untereinander geschaffen und durch eine gemeinsame Kommunikation eine hohe Wahrnehmung des Leuchtturmvorhabens in Politik und Öffentlichkeit erreicht.

AUSBLICK



Die in den Demonstrationsprojekten Pa-X-ell und SchIBZ erprobten Anlagen sind noch Prototypen, die im Echtbetrieb weiter erprobt und optimiert werden müssen. Mögliche Forschungsaktivitäten beinhalten dabei den Einsatz von Hochtemperaturbrennstoffzellen (SOFC und HT-PEM) bei den seegängigen Schiffen sowie Niedrigtemperaturbrennstoffzellen (PEM) bei Binnenschiffen. Mögliche Brennstoffe sind Methanol, Erdgas (CNG, LNG), Diesel oder Wasserstoff. Wesentliche technische Herausforderungen sind neben der Umsetzung auf den verschiedenen Schiffstypen die Ableitung einheitlicher technischer Standards für alle Systemvarianten und Leistungsklassen. Für die Zukunft sind zudem leistungsstärkere Systeme planerisch vorzubereiten.

Die bereits erworbenen Erkenntnisse bilden die Grundlage für die Fortführung der Weiterentwicklung. Sie bieten vielfältige Adaptionspotenziale zur Weiterentwicklung der Komponenten, ihrer Integration in ein System und zur Vorbereitung der Markteinführung. Schwerpunkte für weitere Forschungsaktivitäten sind ebenfalls die Energieversorgung der Nebenaggregate für große Schiffe mit redundanten Systemen sowie die weitere Verbesserung der Effizienz. Dieses gilt nicht nur für große seegängige Schiffe sondern auch für Binnenschiffe, wobei hier der gesamte Antrieb im Mittelpunkt steht.

Parallel zur technischen Entwicklung sind regelmäßige Abstimmungen mit den für die Genehmigung des Einsatzes von Brennstoffzellen und gasförmigen Brennstoffen zuständigen Instanzen, vor allem der International Maritime Organization (IMO) die Voraussetzungen für die Zulassung der Systeme auf Schiffen. Dafür ist ein intensiver Austausch mit den Koordinatoren der Mitgliedsstaaten der IMO, d.h. in Deutschland dem Bundesminister für Verkehr und digitale Infrastruktur erforderlich. Im Bereich der Binnenschifffahrt erfolgt diese Abstimmung mit der Zentralstelle Schiffsuntersuchungskommission/Schiffseichamt (ZSUK), um Brennstoffzellen auch an Bord von Binnenschiffen einsetzen zu können.

Der Einsatz von Brennstoffzellen bewirkt eine deutliche Verbesserung der Luftqualität, was besonders in Häfen und küstennahen Seegebieten wichtig ist.



Mit dem Projekt e4ships wurde ein Meilenstein bei der Nutzung von klimafreundlichen Brennstoffzellen im maritimen Einsatz erreicht.

23

KOMMUNIKATION



24

Das Projekt e4ships wurde im Rahmen von eigenen Konferenzen zu Beginn und zum Abschluss des Projektes sowie auf zahlreichen weiteren Veranstaltungen, Konferenzen und Messen sehr erfolgreich und mit großer Resonanz vorgestellt.

Dazu gehörte die regelmäßige Teilnahme an der weltgrößten Schiffbaumesse, der SMM (Shipbuilding, Machinery and Marine Technology) in Hamburg und an den Tagen der Offenen Tür der Bundesregierung sowie die Vorstellung des Projektes im Rahmen einer Statuspräsentation beim Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur und der regelmäßig stattfindenden Nationalen Maritimen Konferenz des Bundeswirtschaftsministeriums.

Hinzu kamen Veröffentlichungen in der Fachpresse (u. a. Schiff und Hafen, Hansa, Schiffbau Industrie, Neue Energie) und Berichte im Hörfunk (NDR, Deutschlandfunk). Zur wirkungsvollen PR-Arbeit gehörten zudem Aufbau und Pflege der Webseite, die regelmäßige Veröffentlichung und Aktualisierung von Broschüren und Flyern sowie die Erstellung von zwei Filmen über das Projekt.



Abschlussfilm

25

Ergebniskonferenz September 2016



PARTNER



IMPRESSUM



e4ships
c/o VSM - Verband für Schiffbau und Meerestechnik e.V.
Steinhöft 11, 20459 Hamburg, Germany

c/o hySOLUTIONS GmbH
Steinstraße 25, 20095 Hamburg, Germany

info@e4ships.de

Dezember 2016



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Verkehr und
digitale Infrastruktur

Koordiniert durch:

