

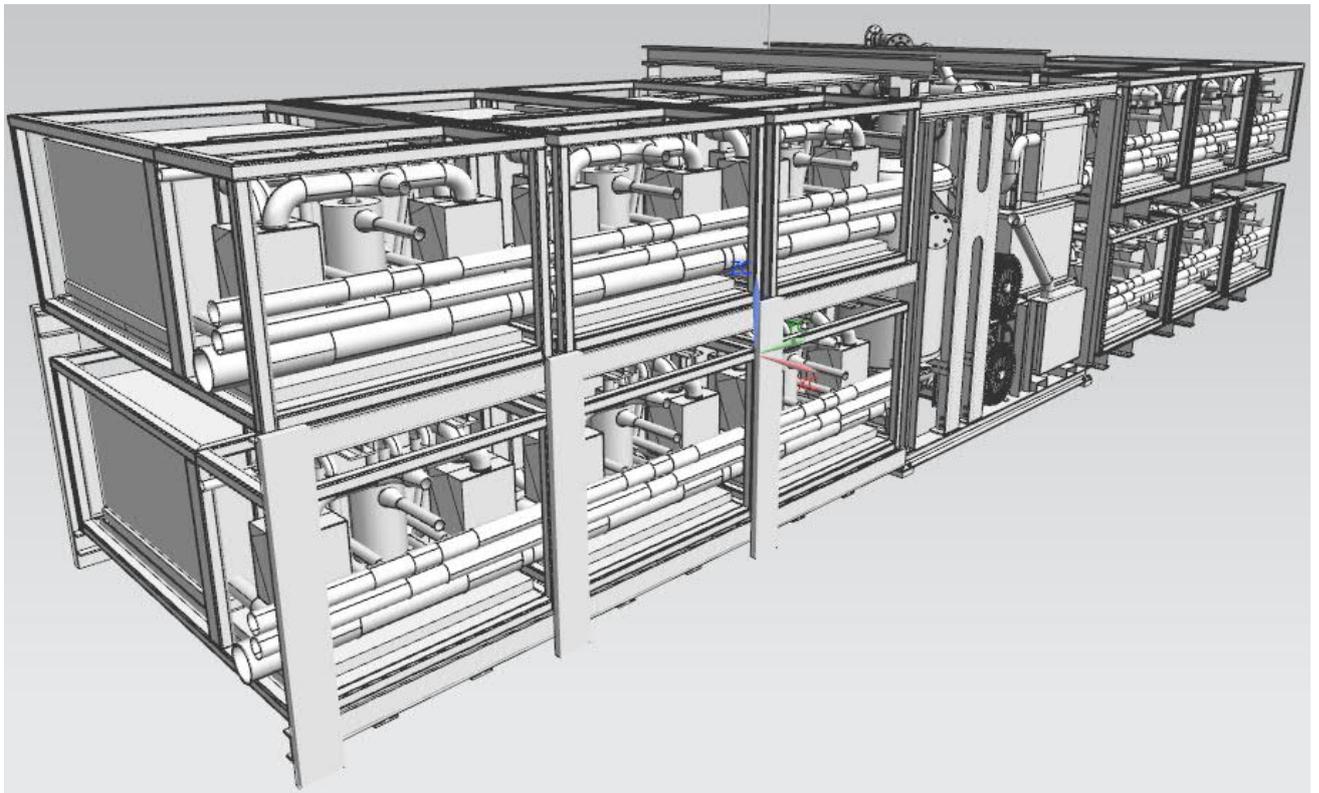
Abschlußbericht thyssenkrupp Marine Systems GmbH

MULTISCHIBZ

ENTWICKLUNG EINES BRENNSTOFFZELLENSYSTEMS DER MW-KLASSE AUF BASIS VON
SOFC ZUM BETRIEB MIT DIESELBRENNSTOFF ODER LNG

FKZ 03B10605A

Anschlußvorhaben an das Projekt *SchIBZ 2*



Projektlaufzeit: 01.09.2018 – 30.06.2021

INHALTSVERZEICHNIS

I.	ÜBERBLICK ÜBER DAS PROJEKT.....	3
II.	EINGEHENDE DARSTELLUNG DES PROJEKTANTEILES DER TK MS.....	4
1.	Aufgaben und Tätigkeiten der thyssenkrupp Marine Systems	4
III.	WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE ERGEBNISSE DES TEILPROJEKTES..	5
1.	thyssenkrupp Marine Systems.....	5
1.1.	AP 1 Administration.....	5
1.2.	AP 2 Prozeßgasmodul Diesel.....	5
1.3.	AP 3 Prozeßgasmodul LNG	5
1.4.	AP 4 Skalierung des BZ-Moduls.....	6
1.5.	AP 5 Balance-of-Plant-Komponenten	7
1.6.	AP 6 Simulationsmodell.....	8
1.7.	AP 7 Erprobung im Labormaßstab	8
1.8.	AP 8 Leistungselektronik und Automation	8
1.9.	AP 9 Schiffsintegration	10
1.10.	Notwendigkeit und Angemessenheit der Aufwände.....	11
IV.	LISTE DER VERÖFFENTLICHUNGEN	13
V.	ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	14

i. Überblick über das Projekt

Das Projekt *MultiSchIBZ* wurde als Anschlußvorhaben an die Projekte *SchIBZ* und *SchIBZ 2* geplant und durchgeführt. Die Tätigkeiten basierten auf den Ergebnissen dieser Projekte und der zwischenzeitlichen Entwicklungen der Technologien und externen Anforderungen.

Der Beginn der Arbeiten war gekennzeichnet durch die späte Erstellung der Zuwendungsbescheide, so daß bei den wissenschaftlichen Partnern Investitionen in Personal und Material erst mit mehrmonatiger Verspätung vorgenommen werden konnten. Gleichwohl wurde die Zeit genutzt, um das Lastenheft zu erstellen und die Prozeßführung festzulegen.

In dieser Phase wurden u.a. folgende grundlegenden Festlegungen getroffen:

- Zielabmessungen der SOFC-Module
- Prozeßführung LNG-System
- Verbesserungen am Diesel-System
- Bauteile für den Einsatz der additiven Fertigung
- Typ der SOFC-Module für die Laborerprobungen
- Konzept des Automationssystems
- Komponentenkonzept der dezentralen Energieversorgung

Die Bearbeitungsphase in 2019 war geprägt durch die Ausarbeitung der getroffenen Festlegungen. Mit Sunfire wurden verschiedenen Details der Module besprochen, die in die Konstruktion einfließen sollten. Mit ZBT wurde intensiv an der Auslegung der Apparate für den Laborversuchsstand gearbeitet, damit sich ein möglichst ähnlicher Betrieb darstellen läßt, wie bei einem 300 kW Aggregat erwartet wird. Maßgebend dafür war das P&I Diagramm. Aufgrund der um den Faktor 20 kleineren umgesetzten Leistung stellten hier die Wärmeverluste eine große Herausforderung dar. Ende des Jahres wurde deutlich, daß Sunfire die vereinbarten Eigenschaften der Module nicht einhalten kann, da diese mit Anforderungen aus dem Elektrolysebetrieb kollidierten.

Im Laufe des Projektes hat tk MS mehrere Anfragen von Schiffseignern nach Brennstoffzellensystemen erhalten. Dies umfasste die Bandbreite von einem Demonstrator bis zu Installationen im kleinen MW-Bereich. Durch die Corona-Pandemie sind diese Projekte überwiegend aufgeschoben worden, so daß kein Abschluß erzielt werden konnte.

Nach mehreren Gesprächen mit Sunfire zur Ausrichtung der Entwicklung und zusätzlich unter dem Eindruck der Auswirkungen der Pandemie auf die Zielmärkte, wurde von tk MS beschlossen, die Mitarbeit an dem Projekt zum Ende 2020 zu beenden, da auch die eigenen Finanzmittel unter der Pandemie gelitten haben.

ii. Eingehende Darstellung des Projektanteiles der tk MS

1. Aufgaben und Tätigkeiten der thyssenkrupp Marine Systems

thyssenkrupp Marine Systems war in diesem Verbundvorhaben Koordinator und als Projektpartner zuständig für das Layout des 300 kW Aggregates sowie des Automationssystems. Das Ziel war die Schaffung der Grundlagen für den Markteintritt eines 300kW Aggregates für die maritime Nutzung.

Insbesondere die Berücksichtigung der schiffbaulichen Anforderungen hinsichtlich Integration und Sicherheit in allen Arbeitspaketen oblag tk MS. Hierfür waren die Tätigkeiten im Rahmen des Clusters *e⁴ships* relevant, da diese einen direkten Abgleich der Entwicklungserkenntnisse mit dem Diskussionsstand der internationalen Vorschriftenentwicklung ermöglichten.

Neben der Steuerung der Entwicklung des Prozeßteils des Aggregates lag die elektrische Einbindung in Bordnetze in der Verantwortung von tk MS. Dies umfasste den Entwurf des Automationssystems sowie den Entwurf der Grundlagen eines dezentralen Verteilungsnetzes inkl. Energiespeichern.

In allen Aspekten wurde dem Cluster *e⁴ships 2* sowie dem Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur zugearbeitet.

Daneben hat tk MS verschiedene Anfragen von Schiffseignern bearbeitet. Hierbei war ein Spektrum von Kreuzfahrtschiffen über Handelsschiffe bis zu Sonderschiffen vertreten.

iii. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse des Teilprojektes

1. thyssenkrupp Marine Systems

1.1. AP 1 Administration

thyssenkrupp Marine Systems war in diesem Projekt der Koordinator. In dieser Funktion hat tk MS Projektsitzungen geplant und durchgeführt, die Kommunikation mit PtJ und NOW und in die Öffentlichkeit geführt und die Zuarbeit für den Cluster e4ships geleistet.

Die Öffentlichkeitsarbeit war ab Ausbruch der Corona-Pandemie stark reduziert, da zunächst viele Veranstaltungen ausgefallen sind und später wenige online nachgeholt wurden.

1.2. AP 2 Prozeßgasmodul Diesel

In diesem Arbeitspaket hat tk MS vor allem an der Recherche und Evaluierung verschiedener Möglichkeiten für ein Heißgasgebläse für die Rezirkulation mitgearbeitet. Nach überschlägigen Untersuchungen mit verschiedenen Herstellern, wurde zunächst eine Übereinkunft mit AVL erzielt, auf die Entwicklung im SOFC5-60 Projekt aufzusetzen. Hierbei sollte zuerst ein Gebläse für den Versuchsstand am OWI aus dem Bestand von AVL adaptiert und genutzt werden, um die geänderte Prozeßführung zu validieren. Anschließend sollte eine Skalierung für ein 300 kW+ Aggregat auskonstruiert werden.

Nach Vereinbarung der technischen Bedingungen und Erstellung des Aufstockungsantrages für OWI, wurde das Angebot von AVL zurückgezogen, da diese keine Freigabe von Ihrem Projektkonsortium erhalten hätten.

Da es seinerzeit keine weiteren Optionen gab, haben OWI und tk MS beschlossen, die neuen Brennstoffzellenmodule im alten Prozeß, mit Zwischenkühlung zu testen und nur die verbesserten und z.T. gedruckten Komponenten im Teststand zu tauschen.

Wegen der Bedeutung der heißen Rezirkulation für das Gesamtdesign des Aggregates wurden parallel weitere Möglichkeiten gesucht. Dabei wurde auch wieder eine passive Lösung mittels Ejektor aufgegriffen. Nach ersten Berechnungen stellte sich dies als potentiell erfolgreich dar. Die Ausarbeitung sollte im Rahmen der schon beantragten Aufstockung durch Umwidmung der Mittel von einem Gebläse zu einem Ejektor erfolgen. Durch die Beendigung der Mitarbeit hat tk MS hieran keinen Anteil mehr.

1.3. AP 3 Prozeßgasmodul LNG

In diesem Arbeitspaket hat tk MS die Auswahl der Prozeßführung begleitet. Dies umfasste mehrere Workshops und weitere Abstimmungen. Hierbei war neben der Optimierung des elektrischen Wirkungsgrades die Vermeidung zusätzlicher Betriebsmedien ein Entwicklungsziel. In der Folge begleitete tk MS das Design der Teststandsapparate, auch im Hinblick auf eine spätere Hochskalierung.

Des Weiteren hat tk MS bei der Recherche nach Methan-Katalysatoren unterstützt. Dabei zeigte sich, daß hier ein Engpaß besteht, insbesondere für kleine Mengen. Von ZBT wurde schließlich ein außereuropäischer Lieferant gefunden. Es erscheint notwendig, daß von deutscher Seite aus Aktivitäten aufgenommen werden, die in der Katalysatorindustrie die Verfügbarkeit von entsprechenden Materialien verbessern.

Zum Zeitpunkt der Beendigung der Mitarbeit von tk MS an *MultiSchIBZ* war der Teststand noch nicht fertig gestellt.

1.4. AP 4 Skalierung des BZ-Moduls

In der ersten Phase des Projektes wurde mit Sunfire das Lastenheft aktualisiert. Hierbei wurden im Wesentlichen die angestrebten Abmessungen und die bis dahin bekannten Erkenntnisse aus der FMEA aus dem Projekt *SchIBZ* eingearbeitet. Von tk MS wurde auch über die aktuellen Entwicklungen bei der IMO informiert, wobei es hier im Projektverlauf noch Veränderungen gab.

Auf Basis des seinerzeitigen Entwicklungsstandes von Sunfire wurde eine Leistung von ca. 25 kW pro SOFC-Modul vereinbart. Dies ist etwas weniger als von Sunfire für andere Anwendungen angestrebt, läßt sich allerdings durch relativ einfache Modifikation (Reduzierung der Stapelhöhe der Stacks) ableiten. Damit wurde die beste räumliche Platznutzung für den Schifffahrtseinsatz erreicht. Unter Einbeziehung der Erkenntnisse aus *SchIBZ 2* wurde ein erster Entwurf für ein hochskaliertes Aggregat mit 300 kW Leistung erstellt.

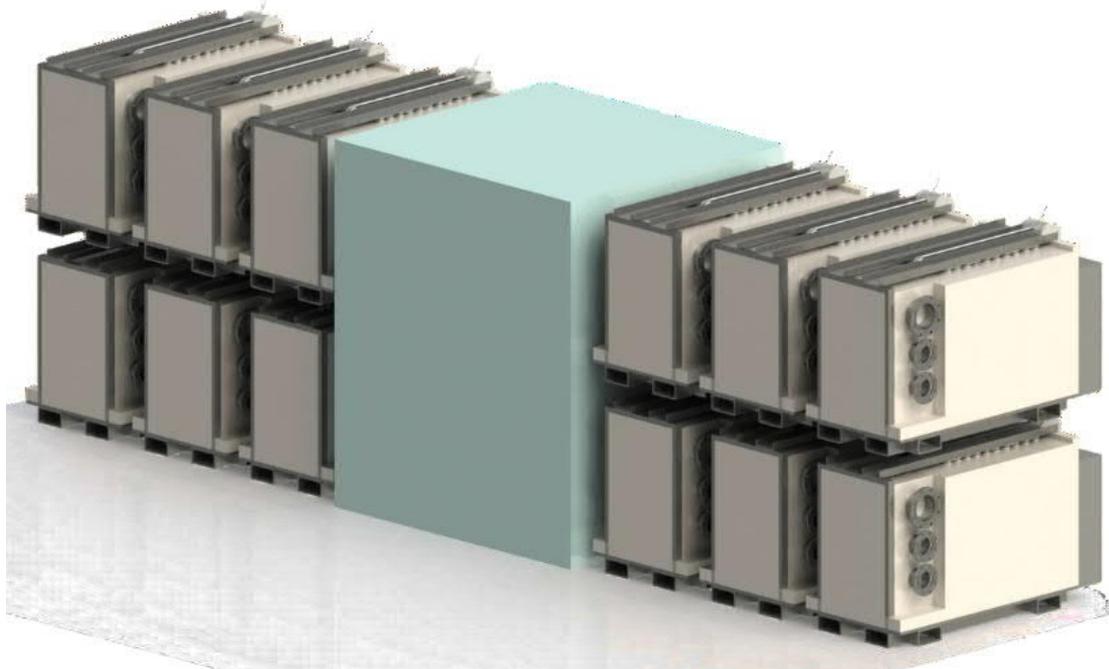


Abbildung 1.1: 1. Skizze eines 300 kW Aggregates auf Basis geplanter Sunfire-Gen2-Module, Länge ca. 8 m (2018)

Im weiteren Verlauf hat Sunfire an verschiedenen Details des Moduls gearbeitet. Ein wesentlicher Arbeitspunkt zusammen mit tk MS war z.B. die elektrische Isolierung des Stacks gegen das Gehäuse. Dies hat Einfluß auf die Gestaltung der DC/DC-Wandler.

Weiter hat Sunfire am Verspannungskonzept und der Umhausung des Stacks gearbeitet. Ende 2019 gab es hierzu wieder einen Austausch mit tk MS, wobei Sunfire darlegte, daß das Modul die vereinbarten Abmessungen nicht einhalten wird. Des weiteren wurden verschiedene andere Details offenbar, die Zweifel an der Schiffstauglichkeit der Konstruktion erzeugten.

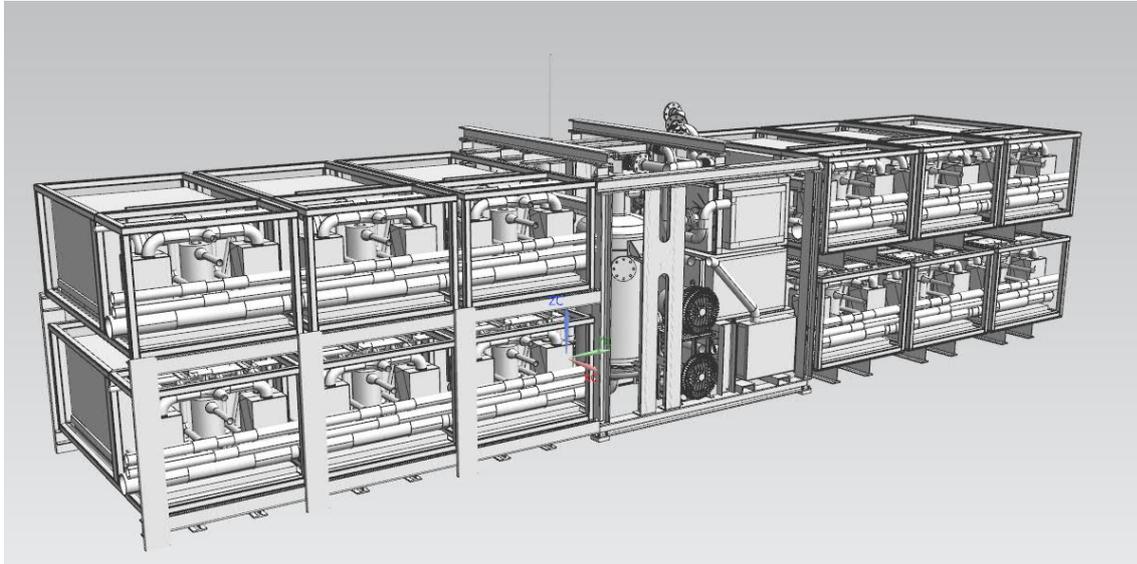


Abbildung 1.2: 300 kW Aggregat auf Basis der weiterentwickelten Sunfire-Module (2020) – es ergibt sich eine signifikante Verlängerung um 3,6 m zur 2018 Skizze

Nach Aussage Sunfire stand bei der Konstruktion das Elektrolysemodul im Fokus, eine spätere Anpassung an den Brennstoffzellenbetrieb könne in einem weiteren Projekt erfolgen.

Dieses Vorgehen war für tk MS nicht akzeptabel, so daß zusammen mit den Auswirkungen der Pandemie festgestellt wurde, daß dieses Projekt für tk MS nicht mehr zu vertreten ist und daher die Mitarbeit beendet wird.

1.5. AP 5 Balance-of-Plant-Komponenten

In diesem Arbeitspaket wurde wieder auf den Erfahrungen aus *SCHIBZ 2* aufgebaut. Während der Mitarbeit von tk MS wurde an dem Design der einzelnen Apparate gearbeitet, das Packaging jedoch noch nicht aufgenommen.

Da die Verwendung additiv gefertigter Apparate, insbesondere der Wärmetauscher, wesentliche Verbesserungen im Platzbedarf und Wärmeverlusten verspricht, wurde zunächst die Schiffszulassung der additiven Fertigung inkl. der entsprechenden Materialien bearbeitet. tk MS hat hierbei insbesondere in der Zusammenarbeit mit DNV unterstützt, als auch die Gestaltung der neuartigen Rohrbündel begleitet. Für den Gesamtwärmetauscher wurden die Erkenntnisse aus den Ersatzwärmetauschern im Projekt *SCHIBZ 2* eingebracht, um möglichst kompakte Apparate zu erhalten. Ähnliches wurde für den beheizten Reformer vorgenommen.

Ein weiterer Aspekt war die Isolierung. Hierbei hat tk MS die Erfahrungen in der Handhabung der mikroporösen Isolierung beigetragen und die notwendigen

Anforderungen an diese formuliert. Diese setzen sich aus einer hinreichenden Isolierungsgüte und der notwendigen physischen Stabilität zusammen. Erste Gespräche mit Herstellern wurden geführt, um herauszufinden, wie das mikroporöse Material gegen die mechanischen Beanspruchungen geschützt werden kann.

Aufgrund der Verzögerungen in der Konstruktion und Fertigung der Apparate für die Laborteststände wurde das Packaging des 300 kW Prozeßmoduls nicht mehr unter Beteiligung von tk MS begonnen.

1.6. AP 6 Simulationsmodell

In diesem Arbeitspaket hat tk MS zu den Simulationswerkzeugen gearbeitet.

Für die Berechnungen der Partner HA und LUH hat tk MS Stoffdatensätze berechnet und die Stoffdatenbanken mit HA und LUH abgeglichen. Dies diente zur Erreichung übereinstimmender Ergebnisse. Darauf aufbauend wurden die Ergebnisse der Berechnungen der Partner verglichen, bewertet und diskutiert.

Im Zusammenhang mit den Tätigkeiten im Projekt *SchIBZ 2* wurde das Auslegungstool von HA bewertet und diskutiert. Hierbei wurden u.a. die sog. Matlab S-Funktions für Input/Output abgestimmt.

Weiterhin wurde mit dem Partner ZBT an den Auslegungsgrundlagen für adiabate LNG-Reformer gearbeitet.

1.7. AP 7 Erprobung im Labormaßstab

In diesem Arbeitspaket hat tk MS während ihrer Arbeitszeit bei der Planung der Versuche unterstützt.

Hierbei hat tk MS die Auslegung und das Design der neuen Apparate für den Teststand am OWI begleitet und bei der Bewertung der Berechnungsergebnisse und Konstruktionsentwürfe mitgearbeitet.

Weiter wurden für den Teststand am ZBT die Abstimmungen zu Auslegung und Fertigung des Prozeßgasmoduls intensiv unterstützt, z.B. die Berechnungen von ZBT und Hülsenbusch bewertet und der Informationsaustausch zwischen den Beteiligten koordiniert.

1.8. AP 8 Leistungselektronik und Automation

Dieses Arbeitspaket wurde von tk MS geführt und im Schwerpunkt bearbeitet. Es gab insbesondere Verknüpfungen mit AP 4, SOFC Modul.

Im Teilarbeitspaket Leistungselektronik wurden in Abstimmung mit den Anforderungen der Sunfire Module verschiedene Hersteller von DC/DC-Wandlern um Angebote für entsprechende Geräte angefragt. Während es aus dem PV-Bereich geeignete Wandler für die Strom-/Spannungsanforderungen gibt, ist eine interne galvanische Trennung derzeit kaum zu finden. Einen entsprechenden Wandler hat M&P im Rahmen des *SchIBZ* Projektes entwickelt, dessen Kostenniveau jedoch für eine kommerzielle Anwendung zu hoch ist. Daher wurden Gespräche neben M&P auch mit verschiedenen anderen

Herstellern geführt, um die Aussichten für ein Serienprodukt zu eruieren. Zusätzlich wurden Möglichkeiten für eine externe galvanische Trennung untersucht. Eine Entscheidung wurde nicht getroffen, da es absehbar wurde, daß zukünftig andere SOFC-Module zur Anwendung kommen werden, die andere Strom-/Spannungswerte haben und eventuell auch keine galvanische Trennung innerhalb des Wandlers benötigen.

Parallel wurden erste Überlegungen für die Gestaltung eines dezentralen Gleichspannungsverteilsnetzes angestellt. Diese sollten vor allem dazu dienen, dem BMVI zuzuarbeiten, um eine Eingabe bei der IMO zu starten, nach der die Zulassungsfähigkeit eines solchen Verbundnetzes geklärt werden sollte. Auch hier ist aufgrund der Pandemie der Prozeß nicht vorangeschritten, da die Arbeit an der IMO für mehrere Monate nahezu eingestellt wurde.

Im zweiten Teilarbeitspaket Automation wurde einerseits begonnen, den Umfang der erforderlichen Meßstellen zusammenzutragen und die notwendigen Schaltschrankgrößen zu bestimmen. Nach der ersten Erhebung wurde mit den Partnern vereinbart, daß diese Liste zu überarbeiten wäre, um die Anzahl der Meßstellen und damit I/O-Kanäle zu reduzieren. Hinsichtlich der übergreifenden Architektur wurde mit Bachmann ein Konzept aus der Offshore-Industrie mit DNV besprochen und als deutscher Vorschlag in die interim guideline (IG) fuel cells der IMO eingebracht. Die Besonderheit dieser Architektur ist, daß die Prozeß- und die Sicherheitssignale über denselben, redundanten Bus mittels einer softwareseitigen Trennung sicher übertragen werden. Bisher ist im Schiffbau vorgeschrieben, Sicherheitssignale über gesonderte Hardware zu übertragen. Die erfordert jedoch zusätzliche Schnittstellenmodule, welche zusätzlichen Platzbedarf und Kosten verursachen.

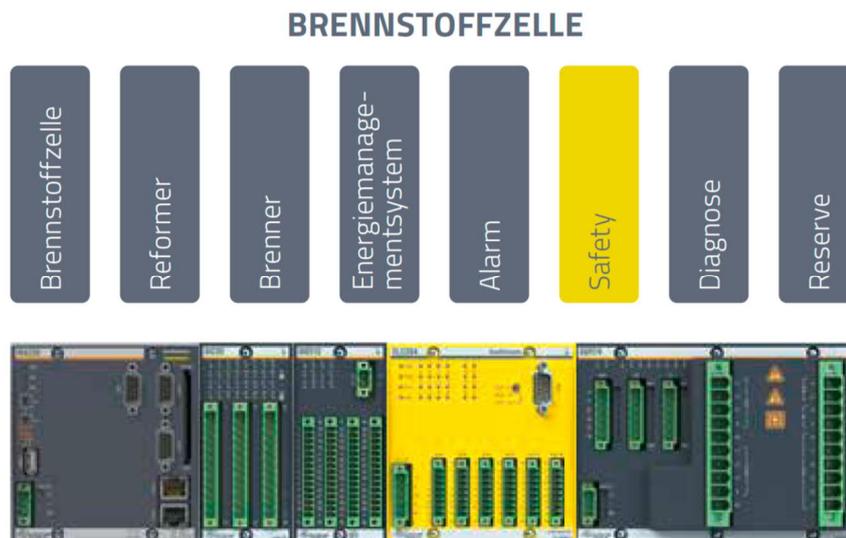


Abbildung 1.3: Aufbau eines SOFC-Schnittstellenmoduls mit integriertem Sicherheitsmodul

Zusätzlich wurden Überlegungen angestellt, die Steuerungssoftware so zu gestalten, daß die Leistungsanforderung auf die einzelnen Aggregate von einem Master-System verteilt wird. Bei Ausfall dieses Masters soll verzugslos nach einer vorbestimmten Reihenfolge ein Slave-System übernehmen und die restlichen Aggregate koordinieren. Hiermit soll eine sehr hohe Verfügbarkeit und Redundanz erreicht werden.

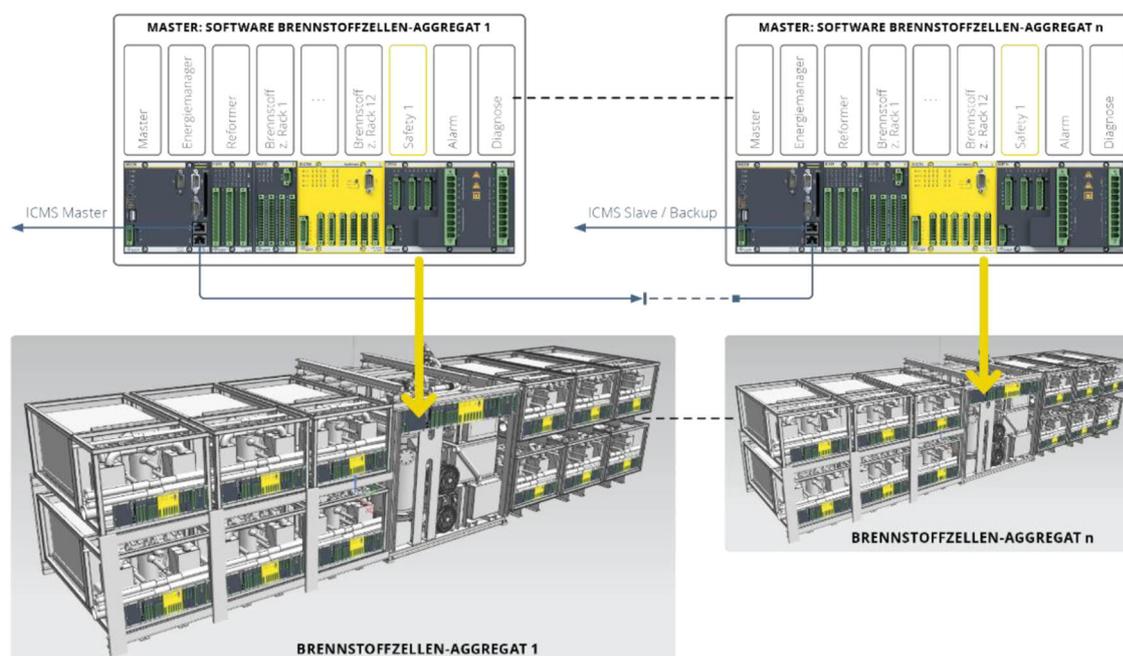


Abbildung 1.4: Kommunikation mehrerer Brennstoffzellenaggregate untereinander im Master-Slave-Prinzip

1.9. AP 9 Schiffsintegration

In diesem Arbeitspaket wurden Ausarbeitungen zu Nutzungsszenarien des Systems auf Schiffen, mit dem Fokus Kreuzfahrtschiffe, erstellt.

Das Skalierungskonzept wurde im Zusammenhang mit den APs 4 und 5 durchgeführt. tk MS hat Untersuchungen zur mechanischen Verbindung mehrerer SOFC-Module mit einem Reformiermodul angestellt und Überlegungen hieraus an Sunfire zurückgespielt für die Gestaltung der Module, siehe Abbildung 1.2. Des Weiteren wurden mit HA zusammen lösbare Verbindungen für die Rohrleitungen evaluiert, um sinnvolle Wartungskonzepte erstellen zu können. In diesem Zusammenhang steht auch die Zuarbeit für den Abschnitt Low-Flashpoint-Diesel des IGF Code. Durch Verzögerungen in der IMO-Arbeit ist die Bearbeitung dieses Brennstoffes allerdings zunächst zurückgestellt worden, so daß keine Erfolge erzielt werden konnten.

Parallel dazu ist an den Grundlagen der Dezentralisierung gearbeitet worden. Dies umfasste die räumliche Anordnung, sicherheitstechnische Gestaltung, Medienzu- und -abführung sowie die Gestaltung des elektrischen Netzes mit einem Konzept für eine sinnvolle Verteilung von SOFC-Aggregaten und Energiespeichern. Hierbei stellte sich auf der Hardwareseite heraus, daß Schaltelemente für solche Ströme noch nicht marktgängig sind. Es wurden daher Gespräche mit Herstellern initiiert, die bei Projektbeendigung noch nicht zu Ergebnissen geführt haben. Für das Auslegungskonzept von Aggregaten und Energiespeichern wurde LUH IfES mit Informationen über typische wesentliche Verbraucher und Lastgängen verschiedener Schiffe zugearbeitet sowie die Ergebnisse ausgewertet und besprochen.

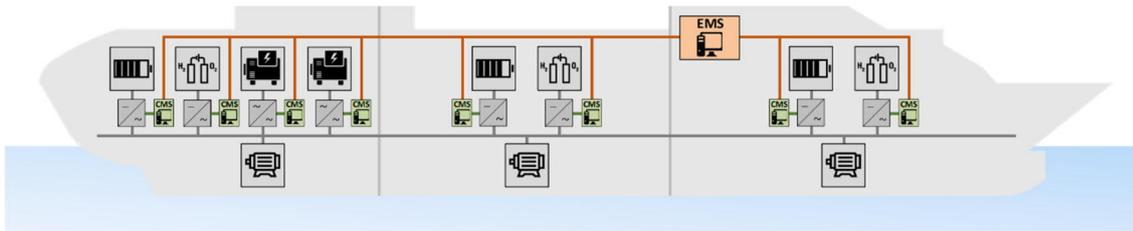


Abbildung 1.5: Schema der dezentralen Netzwerktopologie zur Auslegung der Netzwerkkomponenten (©LUH IfES)

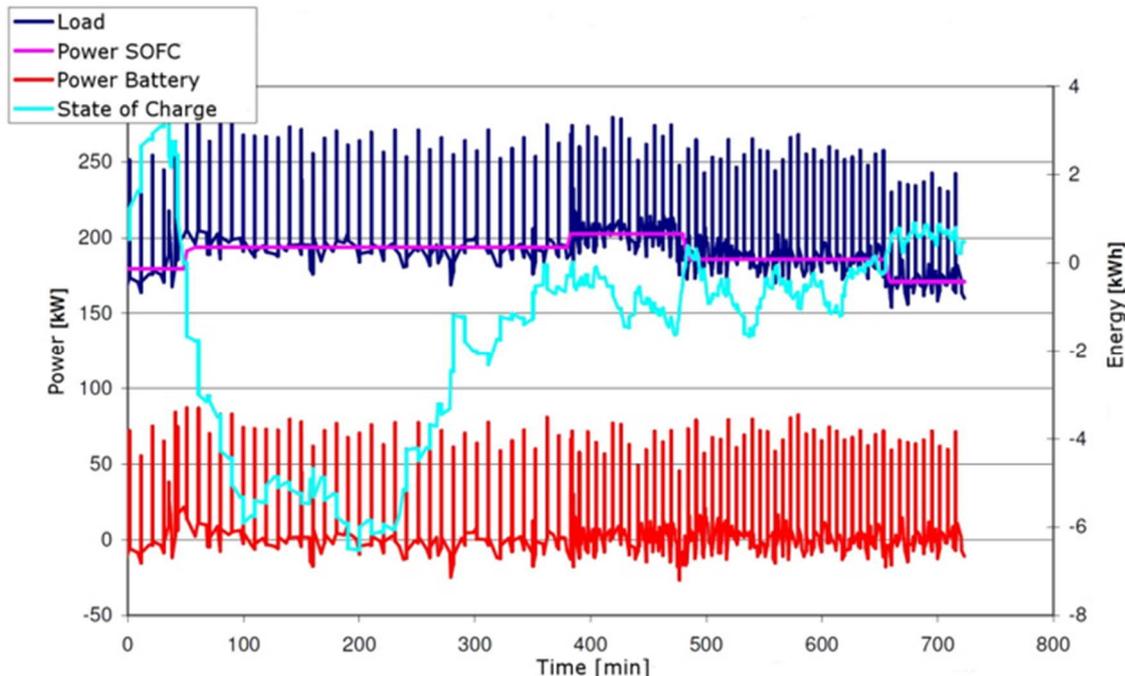


Abbildung 1.6: schematischer Lastgang in einem Bordnetz und Leistungsabgabe einer SOFC zur Veranschaulichung der Problemstellung

Im Rahmen der Veröffentlichungen über das Projekt wurden Kontakte mit potentiellen Anwendern geknüpft. Das größte Interesse kam aus dem Markt der Kreuzfahrtschiffe. Hier gingen die Anfragen von Demonstrator bis zu mehreren MW-Installationen. Mehrere Konzepte wurden ausgearbeitet. Dabei stellten sich mehrfach die derzeitigen Einstandskosten und mangelnde öffentliche Unterstützung als Hürde heraus. Mit Beginn der Pandemie sind diese Gespräche pausiert worden. Bei einem erneuten Interesse von Schiffseignern werden diese Anfragen mit dem verbliebenen Konsortium von *MultiSchIBZ* besprochen.

1.10. Notwendigkeit und Angemessenheit der Aufwände

Der Aufwand von ca. 2 Vollzeitkräften über die Projektlaufzeit ist notwendig gewesen, um die koordinativen und inhaltlichen Aufgaben durchzuführen. Durch die Anzahl der neuartigen Prozesse und Komponenten war viel Detailarbeit nötig, um die verschiedenen Prozeßteile auf einander abzustimmen. Hinsichtlich der im Projekt *SchIBZ 2* kennengelernten Themen bei der Hochskalierung und zu erwartenden unbekanntem Effekten bei der Systemoptimierung, ist das Risiko für den Schritt zum Markteintritt noch



hoch und für tk MS nicht alleine zu tragen gewesen. Trotz des wirtschaftlich bedingten vorzeitigen Ausscheidens waren die Aufwände und Zuwendung angemessen, da das verbliebene Konsortium daran anschließen kann und ihre Tätigkeiten weiterführen. Auch für einen möglichen Nachfolgepartner bestehen gute Anknüpfungspunkte.

iv. Liste der Veröffentlichungen

Technologieforum “Neue flüssige Energieträger” – Keno Leites: *MultiSchIBZ* – Weniger Emissionen, mehr Effizienz: Bordstrom aus Brennstoffzellen; 3. Technologieforum “Neue flüssige Energieträger”, 26. September 2019, Hamburg

SFC 2019 – Dr. Pedro Nehter, Keno Leites, Barbara Wildrath: SOFC APU for Maritime Applications; Fuel Cell Seminar & Energy Exposition 2019, 07. November 2019, 16:00, Long Beach, USA

DWT-SGW – Keno Leites: Brennstoffzellen für die Versorgung von Feldlagern und schwimmenden Einheiten; Zukünftige Energieversorgung für mobile Systeme der Bundeswehr, Deutsche Gesellschaft für Wehrtechnik e.V., 09.09.2020, Bonn

EFCF 2020 – Keno Leites: *SchIBZ*[®] - experiences with liquid fuelled SOFC for ship applications; 14th European SOFC&SOE Forum Virtual, 23. Oktober 2020, 14:15

Real.Times – Der grüne Antrieb; Bachmann Kundenmagazin 11/2020, S. 24/25

Schiff und Hafen – Keno Leites; Bernhard Staudacker: Automatisierung grüner Energieerzeugung mit Brennstoffzellen; Schiff und Hafen, Februar 2021, S. 16

SMM Digital 2021 – Elmar Pohl; Keno Leites: *SchIBZ*[®]-SOFC system for large ship installations; Open Stream Fuel Cells in Maritime Application, 02. Februar 2021, 10:45, <https://www.smm-hamburg.com/smm-streams/event/fuel-cells-in-maritime-applications@46946>

v. **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1.1: 1. Skizze eines 300 kW Aggregates auf Basis geplanter Sunfire-Gen2-Module, Länge ca. 8 m (2018).....	6
Abbildung 1.2: 300 kW Aggregat auf Basis der weiterentwickelten Sunfire-Module (2020) – es ergibt sich eine signifikante Verlängerung um 3,6 m zur 2018 Skizze.....	7
Abbildung 1.3: Aufbau eines SOFC-Schnittstellenmoduls mit integriertem Sicherheitsmodul.....	9
Abbildung 1.4: Kommunikation mehrerer Brennstoffzellenaggregate untereinander im Master-Slave-Prinzip	10
Abbildung 1.5: Schema der dezentralen Netzwerktopologie zur Auslegung der Netzwerkkomponenten (©LUH IfES)	11
Abbildung 1.6: schematischer Lastgang in einem Bordnetz und Leistungsabgabe einer SOFC zur Veranschaulichung der Problemstellung	11