

## Sachbericht zum Verwendungsnachweis Teil I- Kurzbericht

Zuwendungsempfänger	Sunfire GmbH
Förderkennzeichen	03WIR2305C
Vorhabensbezeichnung	Verbundvorhaben CF06_2: Entwicklung eines Konzeptes für ein Funktionsmuster für die dezentrale Produktion von Green Ammonia Teilvorhaben: CF06_2.3 Wasserstoff-Erzeugung in der SOEC für Hocheffizienzanlagen
Fördermittelgeber	BMBF
Laufzeit des Vorhabens	01.05.2020 – 31.10.2022
Autoren des Berichts	Konstantin Schwarze Nilay Akre
Kontaktperson	Nilay Akre, nilay.akre@sunfire.de
Datum der Berichtsfertigstellung	25.04.2023

GEFÖRDERT VOM



**Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung**

**wir!** Wandel durch  
Innovation  
in der Region

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03WIR2305C gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Dieses Dokument enthält eine gekürzte Fassung des am 25.04.2023 von der Sunfire GmbH gegenüber dem Projektträger und dem BMBF vorgelegten Abschlussberichts.

## 1 Ursprüngliche Aufgabenstellung

Die Projektentwicklung in CF06\_2 zielte auf die Erstellung eines Konzeptes für das Funktionsmuster einer Anlage für die industrielle Erzeugung von grünem Ammoniak an einem Standort in der Region. Das Funktionsmuster soll einen autarken Betrieb unter Berücksichtigung deutscher Besonderheiten im Strommarkt durch eine Eigenversorgung mit elektrischer Energie unter Vermeidung von Stromsteuer und EEG-Umlage realisieren. Die Anlage wird für eine direkte Kopplung an ein neu erbautes hocheffizientes Windfeld oder kombiniertes Wind- und Solarfeld erarbeitet.

Das Anlagenkonzept wurde von den Partnern unter Berücksichtigung folgender Anforderungen entwickelt:

- Demonstration der Zyklen- und Teillastfähigkeit
- Demonstration eines wirtschaftlichen Betriebs der Anlage mit Kapazitäten von ca. 450.000 kg Wasserstoff/a und 2.500 t/a Ammoniak
- kontinuierliche Belieferung der Kunden mit grünem Ammoniak

Neben dem Konzept für das Funktionsmuster wurden weitere Systemkonzepte ausgearbeitet. Schwerpunkt war dabei zunächst die Berücksichtigung der Bereitstellung von elektrischer Energie aus Wind und Solar und die sich daraus ableitenden Anforderungen an die Anlagen und deren Komponenten hinsichtlich des Umgangs mit Fluktuationen. Hierbei spielte besonders die Reduzierung von Speicherkapazitäten in Form von elektrischer Energie, Wasserstoff oder Wärme eine Rolle, um die Anlagenkosten zu reduzieren, die Anforderungen an die Zyklen- und Teillastfähigkeit auf der anderen Seite erhöht.

Die Hauptaufgaben in diesem Projekt waren die Stickstoff- und Wasserstofferzeugung für den Haber-Bosch-Prozess (s.u.) auf erneuerbare Energien umzustellen und die Ammoniaksyntheschleife so zu gestalten, dass sie teillast- und zyklenfähig ist.

## 2 Wissenschaftlich-technischer Stand, an den das Vorhaben anknüpfte

Der weitere Ausbau der Wind- und Solarenergie in Deutschland droht aufgrund fehlender Stromspeicher an eine Grenze zu stoßen. Erheblich reduzieren lässt sich der Speicherbedarf momentan nur durch eine moderate temporäre Abregelung der Erzeugungsspitzen der Anlagen. Durch die Integration von nachgelagerten flexiblen Power-to-X-Anlagen und Erzeugung elektrochemischer Energiespeicher wird ein kontinuierlicher Stromnetz-unabhängiger Betrieb und eine regionale Verwertung von erneuerbarer Energie in synthetischen Kraftstoffen möglich. Wasserstoff ist der Energieträger der Zukunft, verfügt aber über eine niedrige volumetrische Energiedichte und bringt Sicherheitsrisiken sowie hohe Kosten für eine globale Infrastruktur mit sich. In den letzten Jahrzehnten wurden ausschließlich kohlenstoffbasierte Wasserstoffspeicher entwickelt. Die gute globale Verfügbarkeit von Stickstoff mit einem Anteil von ca. 78 % der Umgebungsluft eröffnet einen neuen Pfad für Ammoniak als stickstoffbasierten Wasserstoffspeicher. Ammoniak ist ein attraktiver, leicht transportierbarer Energiespeicher außerhalb des Kohlenstoff-Kreislaufes, muss aber als für einen Einsatz als grüner Kraftstoff kohlenstofffrei erzeugt werden.

Neue Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten auf dem Gebiet des Elektrolyse-Haber-Bosch-Prozesses (E-HB) sind in den letzten Jahren zu verzeichnen. Dabei wird Wasserstoff nicht mehr aus Erdgas oder der Kohlevergasung produziert, sondern mithilfe erneuerbarer Energie aus Wasser durch Elektrolyse, z.B. in alkalischen Elektrolyseuren. Festoxid-Elektrolyseure (SOEC) werden als effiziente Hochtemperatur-Technologien auf der Basis von sauerstoffionenleitenden bzw. protonenleitenden Elektrolyten entwickelt und bereits in die Umsetzung gebracht. Fokus der Vorreiter im Bereich des E-HB-Verfahrens von Proton Venture, Niederlande und Topsøe ist die kleine dezentrale Produktionskale für grünes Ammoniak.

### 3 Ablauf des Vorhabens

Die geplanten Arbeiten beinhalten vier Arbeitspakete, welche wiederum aus mehreren Teilarbeitspaketen bestehen. Die Gesamtbeschreibung der jeweiligen Arbeitspakete lassen sich hierbei der Verbundvorhabenbeschreibung entnehmen. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die vertretenen Partner **ENERTRAG AG**, Institut für Kompetenz in Automobilität GmbH (IKAM), **Zentrum Brennstoffzellentechnik GmbH (ZBT)**, **Sunfire GmbH**, und **Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e.V. (IKEM)** im Gesamtvorhaben auf Ebene der Arbeitspakete.

Tabelle 1. Arbeitsplan und Zuordnung der Partner zu den Arbeitspaketen

Arbeitspaket	Partner				
	ENERTRAG	IKAM	ZBT	Sunfire	IKEM
CF06_2.1 Konzept Erzeugung	X	X			
CF06_2.2 Prozessflussdiagramm			X		
CF06_2.3 Wasserstoff-Erzeugung				X	
CF06_2.4 Vorgehensweise für das Genehmigungsverfahren					X

### 4 Wesentliche Ergebnisse des Vorhabens

Aus den Arbeitspaketen des Verbundvorhabens konnten durch die Arbeiten der Sunfire GmbH zusammenfassend folgende Ergebnisse und Erkenntnisse abgeleitet werden:

- Es wurde ein Konzept für eine hoch-integrierte, hoch-effiziente dezentrale NH<sub>3</sub>-Erzeugungsanlage bestehend aus SOEC, Energiespeicher (Batterie oder thermisch) und NH<sub>3</sub>-Synthese entwickelt.
- Durch optimierte Wärmeintegration kann diesen einen elektrischer Gesamtwirkungsgrad von bis zu 57 % erreichen
- Für eine 16 MW Windkraftanlage sollte die SOEC aus mehreren Modulen mit insgesamt 7 MW bestehen, dazu wäre ein Wärmespeicher mit 900...1300 MWh Kapazität zur Überbrückung von Dunkelflauten notwendig, bei Nutzung eines Batteriespeichers beträgt die benötigte Kapazität nur 32...43 MWh, zur N<sub>2</sub>-Erzeugung käme ein Druckwechseladsorption mit einer Leistung von 450...600 Nm<sup>3</sup>/h zum Einsatz, die Produktionsleitung der NH<sub>3</sub>-Synthese läge damit bei 950...1200 Nm<sup>3</sup>/h.
- Auch mit dieser CO<sub>2</sub>-Bepreisung von 40 €/t CO<sub>2</sub> lägen die Kosten von grünen NH<sub>3</sub> voraussichtlich noch über denen von konventionellem NH<sub>3</sub>. D.h. für eine wirtschaftliche Umsetzung sind weitere Marktanreize notwendig (bspw. signifikant höhere CO<sub>2</sub>-Preise, höhere Erdgaspreise oder zusätzliche Vergütung von grünem NH<sub>3</sub>).

## Sachbericht zum Verwendungsnachweis Teil II – Eingehende Darstellung

Zuwendungsempfänger	Sunfire GmbH
Förderkennzeichen	03WIR2305C
Vorhabensbezeichnung	Verbundvorhaben CF06_2: Entwicklung eines Konzeptes für ein Funktionsmuster für die dezentrale Produktion von Green Ammonia Teilvorhaben: CF06_2.3 Wasserstoff-Erzeugung in der SOEC für Hocheffizienzanlagen
Fördermittelgeber	BMBF
Laufzeit des Vorhabens	01.05.2020 – 31.10.2022
Autoren des Berichts	Konstantin Schwarze Nilay Akre
Kontaktperson	Nilay Akre, nilay.akre@sunfire.de
Datum der Berichtsfertigstellung	25.04.2023

GEFÖRDERT VOM



**Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung**

**wir!** Wandel durch  
Innovation  
in der Region

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03WIR2305C gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Dieses Dokument enthält eine gekürzte Fassung des am 25.04.2023 von der Sunfire GmbH gegenüber dem Projektträger und dem BMBF vorgelegten Abschlussberichts.

© Sunfire GmbH, Gasanstaltstraße 2, D-01237 Dresden - Weitergabe sowie Vervielfältigung dieses Dokuments, Verwertung und Mitteilung seines Inhalts sind verboten, soweit nicht ausdrücklich gestattet. Zuwiderhandlungen verpflichten zu Schadenersatz. Alle Rechte für den Fall der Patent-, Gebrauchsmuster- oder Designeintragung vorbehalten. Der Begriff „Sunfire“ sowie das Logo der Sunfire GmbH sind markenrechtlich geschützt. Die Firmennamen der in diesem Bericht genannten Projektpartner unterliegen ggf. dem Markenschutz.



## Inhaltsverzeichnis

1	Projektausgangslage.....	6
1.1	Aufgabenstellung.....	6
1.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....	7
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens .....	8
1.3.1	Arbeitsplan & Meilensteine.....	8
1.3.2	Gesamtvorkalkulation lt. Zuwendungsbescheid .....	9
1.4	Wissenschaftlicher-technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....	10
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	11
2	Projektergebnisse.....	12
2.1	Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse .....	12
2.1.1	AP CF06_2.3.1 Anpassung und Neubewertung der ermittelten Systemdaten .....	12
2.1.2	AP CF06_2.3.2: Energetische Betrachtung Synthesegaserzeugung .....	12
2.1.3	AP CF06_2.3.3: Umgang mit Dunkelflauten .....	13
2.1.4	AP CF06_2.3.4: Komponentenspezifikation .....	13
2.1.5	AP CF06_2.3.5: Wirtschaftlichkeitsanalyse .....	14
2.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	14
2.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten.....	14
2.4	Verwertbarkeit der Ergebnisse.....	14
2.4.1	Wissenschaftlich-technische Erfolgsaussichten .....	14
2.4.2	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten .....	15
2.4.3	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit .....	16
2.5	Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	16
2.6	Erfolge und geplante Veröffentlichungen.....	17

## Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: SCHEMATA DER VIER UNTERSUCHTEN UNTERVARIANTEN VON ANLAGENVERSCHALTUNGS-VARIANTE 3..... 13

## Tabellenverzeichnis

TABLE 1: BALKENARBEITSPLAN FÜR DAS TEILVORHABEN LAUT VORHABENS BESCHREIBUNG .....	9
TABLE 2: MEILENSTEINPLAN.....	9
TABLE 3: FINANZIERUNGSPLAN FÜR DAS TEILVORHABEN .....	10
TABLE 4: WICHTIGSTE POSITIONEN IM ZAHLENMÄßIGEN NACHWEIS .....	14



## Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CAPEX	Kapitalkosten
FKZ	Förderkennzeichen
HTE	Hochtemperaturelektrolyse
LCOA	Levelized Cost of Ammonia
OPEX	Betriebskosten
PtX	Power-to-X
RSOC	Reversible Solid Oxid Cell
SOEC	Festoxidelektrolyse Zelle/Hochtemperaturelektrolyse
SOFC	Festoxid Brennstoffzelle

# 1 Projektausgangslage

## 1.1 Aufgabenstellung

Im Gesamtvorhaben wurde ein Konzept für eine Anlage für die industrielle Erzeugung von grünem Ammoniak mit 16 MW installierter Leistung Wind und Solar sowie einer etwa 5 MW Elektrolyseanlage an einem Standort in der Region vorgelegt. Dazu wurden im Vorhaben folgende innovative Lösungsansätze angestrebt:

- Variantenstudie an drei Standorten in MB und Erarbeitung von Flexiblen Prozessflussdiagrammen
- Entwicklung eines flexiblen Anlagenkonzeptes und Studie zu den Anforderungen an die Komponenten im flexiblen Anlagenprozess
- Energetische Betrachtung der Ammoniakherzeugung und Ermittlung der Zyklusfestigkeit und Teillastfähigkeit
- Ermittlung der Strombezugskosten an drei Standorten in MV und Erarbeitung einer Wirtschaftlichkeitsanalyse für drei Standorte in MV

Das Teilprojekt CF6\_2.3 von Sunfire zielte auf die Entwicklung eines Konzepts für ein Funktionsmodell für die dezentrale Produktion von grünem Ammoniak ab. Projektiert wurde das Konzept dabei für den netzunabhängigen Betrieb an einen neu erbauten oder existierenden Windpark mit oder ohne Solarfeld gemäß dem Arbeiten in CF06\_2.1 und einer Peakleistung von 16 MW. Davon ausgehend sollte eine Elektrolyse-Anlage zur Produktion von ca. 450.000 kg/a Wasserstoff zur Erzeugung von 2.500 t/a Ammoniak eingesetzt werden. Die projektierte dezentrale Ammoniakherzeugung sollte in der Lage sein Leistungsschwankungen des Windparks durch dynamische Betriebsweise und oder Energiespeicher (thermisch, elektrisch oder chemisch) auszugleichen und so eine möglichst hohe Ausnutzung des erzeugten Stromes zu erreichen sowie eine quasi-kontinuierliche Ammoniakproduktion sicherzustellen. Daraus wurden Anforderungen an charakteristische Anlagenparameter wie Zyklusfestigkeit, Dynamik und Wirkungsgrad abgeleitet.

## 1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Projekt baute auf einer Reihe von Vorgängerprojekten auf. Dazu gehört das Projekt SchIBZ (FKZ 03BI206A-H), in welchem erstmals eine Anlage im 50 kW SOFC-Maßstab gefertigt und geliefert (2x 25 kW Teileinheiten).

2016 lieferte Sunfire die weltgrößte reversible Elektrolyse der Welt an Boing USA aus. Das System mit einer Skalierung von 120 kW<sub>DC</sub> kann sowohl als Elektrolyse als auch als Brennstoffzelle betrieben werden. Kombiniert mit einem Wasserstoffspeicher dient das System der verlässlichen Bereitstellung von Strom auf Basis von Windkraft oder Photovoltaik mit Wasserstoff als Speichermedium. Das System wird derzeit an einem Microgrid-Teststandort der US Navy in Kalifornien eingesetzt.

Ein neuartiges reversibles-System wurde im Rahmen des EU-Projekts GrInHy entwickelt. Dieses kann im SOFC Modus neben Wasserstoff auch mit Erdgas betrieben werden. Derzeit befindet sich das System bei der Salzgitter Flachstahl AG im Langzeitbetrieb.

Im Rahmen der Entwicklung hat sich jedoch gezeigt, dass das bisherige Design eine zu hohe Komplexität aufweist und weiteres Upscaling notwendig ist, um langfristige Kostenziele zu erreichen.

Dieser Aufgabe wird sich u.a. im Projekt Zwanzig20-HYPOS (FKZ 03ZZ0735A) gewidmet, wo erstmals eine neuartige Stack-Unit in einem stark weiterentwickelten System integriert wird. Durch den Einsatz von 24 bis 36, an Stelle von derzeit 8 Stacks in einer thermischen Hülle kann eine wesentliche Erhöhung der Kompaktheit, sowie eine Verringerung von Kosten und Wärmeverlusten erreicht werden.

Bis zu 8 Stück dieser neuartigen Module werden im Rahmen des EU-Projektes GrInHy2.0 in einen 40'-Standardcontainer integriert. Die HTE stößt mit diesem Sunfire-HyLink200 (HL200) genannten Produkt in die Megawattklasse vor und nimmt somit einen wichtigen Schritt hin zu Industrialisierung und kommerziellen Markteinführung. Der erste HL200 ersetzt im April 2020 die kleinere RSOC-Anlage des Vorläuferprojektes in Salzgitter.

Darüber hinaus verfolgt die Sunfire GmbH parallel zur Wasserstofferzeugung die Synthesegaserzeugung mittels Hochtemperatur-Coelektrolyse. Diese wurde erstmals erfolgreich im Projekt „Kopernikus-P2x“ umgesetzt. In diesem BMBF geförderten Projekt wurde die Generation 0 der HTCoEl für eine Leistung von 10 kW entwickelt und in eine Fischer-Tropsch-Prozesskette am KIT integriert.

Für die Sunfire GmbH ist dieses Vorhaben als ein unverzichtbarer Meilenstein für Upscaling, Produktentwicklung und anschließende Kommerzialisierung der vielversprechenden SOEC-Technologie anzusehen.

## 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

### 1.3.1 Arbeitsplan & Meilensteine

Die Untersuchungsgegenstände im durch Sunfire bearbeiteten Teilvorhabens CF06\_2.3 Wasserstoff-Erzeugung in der SOEC für Hocheffizianzanlagen wurden in fünf Arbeitspakete unterteilt.

Das erste Arbeitspaket CF06\_2.3.1 war Management des Teilvorhabens in Abstimmung mit den anderen Teilvorhaben sowie mit den anderen Projekten des Campfire-Bündnisses. Für die bestmögliche Umsetzung des Teilvorhabens war eine umfangreiche und detaillierte Abstimmung mit den anderen Teilvorhaben des Projektes und auch mit anderen relevanten Projekten des Campfire-Bündnisses nötig. So lieferte das hier beschriebene Teilvorhaben Input für die vom ZBT und der Enertrag bearbeiteten TVs, bezog aber auch Informationen über innovative Synthesereaktoren aus dem Projekt CF06\_1. Außerdem fanden im Rahmen der Projektarbeit diverse arbeitspaket-übergreifende Projekt- und Bündnistreffen sowie regelmäßige Telefonkonferenzen statt, die der Abstimmung der unterschiedlichen Aktivitäten dienten.

Das nächste Arbeitspaket CF06\_2.3.2 war Energetische Betrachtung der Synthesegaserzeugung mittels SOEC in einer dezentralen Green Ammonia-Verbundanlage. Für die Erzeugung von grünem Ammoniak wird ein Synthesegas aus Stickstoff und Wasserstoff benötigt. Im Rahmen des Projekts wurde der spezifische Energiebedarf für die Erzeugung dieses Synthesegases unter der Berücksichtigung der zum Bsp. durch die  $\text{NH}_3$ -Synthese entstehenden Abwärmeströme und deren Nutzung zur Dampferzeugung für die SOEC untersucht. Außerdem wurde ein innovatives SOEC-Konzept entwickelt, dass es ermöglicht neben der  $\text{H}_2$ -Erzeugung im gleichen Prozessschritt auch  $\text{N}_2$  aus der Luft zu separieren. Dadurch wurde keine zusätzliche Luftzerlegungsanlage notwendig und das benötigte Synthesegasgemisch könnte in ausreichender Qualität und Quantität direkt durch die SOEC erzeugt werden. Der zu erwartende Wirkungsgrad, d.h. der spezifische Energieverbrauch der verschiedenen Green Ammonia-Verbundanlagenvarianten wurde durch Steady-State-Prozesssimulationen ermittelt und eine optimierte Prozessvariante vorgeschlagen.

Das dritte Arbeitspaket CF06\_2.3.3 war Konzeptentwicklung zum Umgang mit fluktuierender Bereitstellung elektrischen Stroms aus erneuerbaren Energien CF06\_2.1.2.2 und CF06\_2.2.2. Da der erneuerbare Strom in einem Wind- oder einem Photovoltaikkraftwerk nicht kontinuierlich erzeugt wird, ist für die Green Ammonia-Verbundanlage ein Konzept zu entwerfen, um sowohl eine möglichst hohe Anlagen- als auch Stromausnutzung zu erreichen. Dazu wurden die Teillastfähigkeit und Dynamik der Anlagenteile untersucht. Besondere Bedeutung haben dabei die Hochtemperaturprozessen (SOEC und  $\text{NH}_3$ -Synthese), die auf Grund ihrer thermischen Trägheit gewissen Einschränkungen in Bezug auf Start-/Stoppgradienten und der Anzahl an Thermorzyklen unterliegen. Außerdem wurde die mindestens benötigte sowie die optimale Energiespeichergröße definiert.

Das vierte Arbeitspaket CF06\_2.3.4 war Entwicklung der in 2.1 erarbeiteten Komponentenspezifikationen für die Anlage mit der SOEC. Die Green Ammonia-Verbundanlage besteht aus unterschiedlichen Anlagenkomponente, deren Größe und Schnittstellen auf einander abzustimmen sind. Die Hauptkomponenten sind dabei  $\text{H}_2$ - und  $\text{N}_2$ -Erzeugung, ggf. kombiniert in der SOEC, die  $\text{NH}_3$ -Synthese sowie der Energiespeicher. Für diese Hauptkomponenten wurden die grundlegenden Spezifikationen erstellt. Dazu zählten die Energiebedarfe, spezifisch und absolut, die jeweilige Produktionsleistung, der Dynamikbereich sowie die charakteristischen Parameter aller zwischen den Anlagenkomponenten auszutauschender Stoffströme (Druck, Temperatur, Massen-/Volumenströme und deren Zusammensetzung, sowie ggf. weitere Parameter wie z.B. Qualitätsanforderungen).

Das letzte Arbeitspaket CF06\_2.3.5 war Wirtschaftlichkeitsanalysen, Darstellung der zu erwartenden Ammoniakkosten. Je nach gewähltem Anlagenkonzept und dem damit verbundenen zu erwartenden Wirkungsgrad, der Anlagenausnutzung und jährlichen Produktionsleistung in t/a NH<sub>3</sub> ergeben sich in Abhängigkeit vom Strompreis über eine typische Lebensdauer von 20 Jahren unterschiedliche CAPEX und OPEX bzw. LCOA (Levelized Cost of Ammonia) in €/t. Die OPEX können dabei bereits relativ genau aus Wirkungsgrad und Strompreis sowie einem vorläufigen Wartungskonzept ermittelt werden. Für die CAPEX mussten dagegen Schätzungen der Herstellkosten für eine (Klein-)Serienproduktion herangezogen werden, da es sich bei allen Hauptkomponenten der Anlage um Erstlingssysteme handelt, die in ihrer Art noch nicht gebaut wurden. Die resultierenden Herstellkosten pro Tonne Ammoniak wurden mit den Herstellkosten von konventionell erzeugtem NH<sub>3</sub> verglichen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Szenarien für die regulatorischen Rahmenbedingungen, bspw. unterschiedliche CO<sub>2</sub>-Preise.

Die folgende Tabelle zeigt den geplanten Verlauf des Teilprojekts Sunfire.

CF ID	Teilvorhaben und Arbeitspakete	M 01	M 02	M 03	M 04	M 05	M 06	M 07	M 08	M 09	M 10	M 11	M 12	M 13	M 14	M 15	M 16	M 17	M 18	M 19	M 20	M 21	M 22	M 23	M 24	M 25	M 26	M 27	M 28	M 29	M 30
CF06_2.3	Wasserstoff-Erzeugung in der SOEC für	Sunfire GmbH																													
CF06_2.3.1	Projektmanagement																														
CF06_2.3.2	Energ. Betrachtung																														
CF06_2.3.3	Umgang mit Dunkelflauten												M																		
CF06_2.3.4	Komponentenspezifikationen																														
CF06_2.3.5	Wirtschaftlichkeitsanalyse																														

Table 1: Balkenarbeitsplan für das Teilvorhaben laut Vorhabensbeschreibung

Meilensteine, an denen Sunfire direkt mitgewirkt hat

Monat	Meilenstein	Entscheidungs- und Steuerfunktion und technischer Zielparame-ter
M12	M06_2.3.3.1	Entscheidung für ein optimales Green Ammonia-Verbundanlagenkonzept mit Energiespeicher und einer Methode zur N <sub>2</sub> -Darstellung und Definition.

Table 2: Meilensteinplan

### 1.3.2 Gesamtverkalkulation lt. Zuwendungsbescheid

Für die Durchführung der Arbeiten in CF06\_2.3 war eine Gesamtfinanzierung von 101.350 € für Personal und Reisemittel benötigt.

Jahr	Personal	Verbrauchs- material	Reisen	Investitio- nen	Unterauf- träge	Gesamt- budget	WIR Finanzierung	Förderquote %
2020	41.154	-	732			41.886	20.943	50
2021	50.880	-	976			51.856	25.928	50
2022	6.863	-	732			7.595	3.797	50
<b>Summe</b>	<b>98.897</b>	<b>-</b>	<b>2.440</b>			<b>101.337</b>	<b>50.668</b>	<b>50</b>

Table 3: Finanzierungsplan für das Teilvorhaben

#### 1.4 Wissenschaftlicher-technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Ammoniak wird nach dem bedeutendsten Chemieverfahren, dem Haber-Bosch-Verfahren, aus Luftstickstoff und Wasserstoff in großen Anlagen von bis zu 3000 Tagedstonnen Produktionsvolumen als Ausgangsstoff für Düngemittel und andere Stickstoffprodukte hergestellt. Der erforderliche Stickstoff wird durch kryogene Luftzerlegung mittels Linde-Verfahren oder im Membranreaktor gewonnen, Wasserstoff durch Dampfreformierung von Methan oder durch Kohlevergasung, worauf ca. 3 % des globalen Kohlendioxid-Ausstoßes zurückzuführen sind. Großtechnisch wird NH<sub>3</sub> heutzutage nach dem Haber Bosch Verfahren hergestellt. N<sub>2</sub> und H<sub>2</sub> werden bei Temperaturen von 400 °C bis 500 °C und Drücken von 150 bar bis 250 bar über einen Eisenkatalysator geleitet. Diese Prozessparameter sind ein Kompromiss zwischen der thermischen Stabilität von NH<sub>3</sub>, der Reaktionsrate und der Katalysatoraktivität. Unter Gleichgewichtsbedingungen wird ein Umsatz von 15 % erreicht. Pro Tonne produziertem NH<sub>3</sub> werden zwei Tonnen klimaschädliches CO<sub>2</sub> freigesetzt. Moderne Haber-Bosch-Anlagen verbrauchen ungefähr 8 MWh Energie pro Tonne NH<sub>3</sub> basierend auf CH<sub>4</sub> und 13,5 MWh Energie, basierend auf Kohle als Wasserstoffquelle.

Die Palette der Apparatechnik und der ReaktorbaufORMen zur NH<sub>3</sub>-Synthese ist mittlerweile sehr breit und reicht von klassischen Festbettreaktoren zu komplexeren Mikrostruktur-Reaktoren. Mikrostruktur-Reaktoren erreichen sehr hohe spezifische Wärmeübertragungsleistungen und zeichnen sich durch interne Strukturen im Bereich von 10...1000 µm aus, wodurch Heiz- und Kühlraten im Bereich von Millisekunden und ein dynamischer Reaktorbetrieb möglich sind.

Zukünftig werden erneuerbare Energien eingesetzt, um Wasserstoff kohlenstofffrei durch Elektrolyseverfahren zu erzeugen und für die Erzeugung von grünem Ammoniak als nachhaltigen chemischen Grundstoff und zukünftigen Energiespeicher und Kraftstoff verfügbar zu machen. Pilotprojekte zur Erzeugung von grünem Ammoniak werden derzeit von zahlreichen Großunternehmen betrieben bzw. befinden sich in der Planung. So führt die Siemens AG Power Generation derzeit am Rutherford Appleton Laboratory/UK ein Demonstrationsprojekt zur vollelektrischen Synthese von grünem Ammoniak durch. Weitere Demonstrations-Produktionsstätten werden mittlerweile auch in Japan, Australien, Marokko und den Niederlanden betrieben.

Besonders effizient kann die elektrolytische H<sub>2</sub>-Erzeugung durch den Einsatz einer Hochtemperaturelektrolyse umgesetzt werden, da diese Technology die Einkopplung von Überschusswärme aus der exothermen Synthesereaktion zur Senkung des elektrischen Energiebedarfs ermöglicht. Die Hochtemperatur-Elektrolyse basiert auf einer keramischen Festoxidzelle (SOEC).

Dieser Prozessweg wurde von Sunfire frühzeitig als Kerntechnologie von Power-to-X-(PtX)-Gesamtprozessen zu Herstellung von Energieträgern aller Art identifiziert.<sup>1</sup>

Haldor Topsoe hat bereits ein innovatives Prozesslayout zur direkten Erzeugung von Synthesegas für die NH<sub>3</sub>-Erzeugung (N<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>) mittels HTE patentiert. Statt wie bei einer gewöhnlichen HTE reinen Dampf als Edukt einzusetzen, wird nach diesem Patent dem Dampf in mehreren Elektrolysestufen immer wieder eine kleine Menge Luft zugeführt. Der enthaltene Sauerstoff verbrennt mit dem erzeugten H<sub>2</sub> und zu H<sub>2</sub>O und erzeugt dabei neuen Dampf als Edukt für die weiteren Elektrolyseschritte sowie zusätzliche Wärme, die im Stack genutzt werden kann.

### 1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Verbundvorhaben CF06\_2 wurde von den Verbundpartnern in vier Teilvorhaben durchgeführt:

**CF06\_2.1** Konzept industrielle Erzeugung mit 16 MW installierter Leistung / 5 MW Elektrolyse aus Wind und Solar an einem Standort in der Region

Partner: ENERTRAG AG, Projektleiter: Dr. Stefan Käding

**CF06\_2.2** Erarbeitung eines flexiblen Prozessflussdiagrammes aus erneuerbaren Energien

Partner: Zentrum für Brennstoffzellentechnik (ZBT), Projektleiter: Dr. Lena Engelmeier

**CF06\_2.3** Wasserstoff-Erzeugung in der SOEC für Hocheffizienzanlagen

Partner: Sunfire GmbH, Projektleiter: Konstantin Schwarze

**CF06\_2.4** Erarbeitung der Strombezugskosten und Vorgehensweise für das Genehmigungsverfahren

Partner: Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e.V. (IKEM), Projektleiter: Yasin Yilmaz

Die Projektleitung des Gesamtvorhabens wurde durch Dr. Stefan Käding, ENERTRAG AG, durchgeführt.

---

<sup>1</sup> W.M. Verdegaal, S. Becker, C. von Olshausen, Chem. Ing. Tech. 2015, 87(4), 340-346.

## 2 Projektergebnisse

### 2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Im Rahmen des Projekts wurde untersucht, wie man Wasserstoff durch Elektrolyse mit Hilfe von erneuerbarer Energie mit besonders hoher Effizienz für die Ammoniaksynthese bereitstellen kann. Dazu war der Einsatz der Hochtemperatur-Elektrolyse (HTE) auf Basis der SOEC-Technologie als vielversprechende Möglichkeit untersucht. Die Hochtemperatur-Elektrolyse bietet durch die Einbindung von Abwärme aus der Synthese das Potential vergleichsweise hohe Gesamtwirkungsgrade zu erreichen. Zusätzlich wurde bewertet, inwieweit es möglich ist in der HTE nicht nur den Wasserstoff zu erzeugen, sondern auch den für das Synthesegas benötigten Stickstoff aus Luft zu gewinnen. Dies würde eine Vereinfachung der Gesamtanlage ermöglichen, indem die eine separate Luftzerlegungsanlage entfallen könnte. Zusätzlich wurde diskutiert, wie mit der fluktuierenden Bereitstellung erneuerbaren Energien in einer dezentralen Ammoniaksyntheseanlage umgegangen werden kann, Stichwort „Dunkelflaute“. Die betrachteten Konzepte wurden durch einen Wirtschaftlichkeitsanalyse betrachtet und bewertet werden. Daraus folgte ein Konzeptvorschlag für eine hocheffiziente, dezentrale Ammoniakanlage mit HTE, für welche auch die Hauptkomponenten dimensioniert wurden.

#### 2.1.1 AP CF06\_2.3.1 Anpassung und Neubewertung der ermittelten Systemdaten

Ziel: Fortlaufende Betrachtung, Analyse und Bewertung der Simulationsergebnisse aus CF06\_2.2 sowie fortlaufende Anpassung und Neubewertung der Systemdaten und Teilvorhabensergebnisse auf Basis der Ergebnisse von CF6\_2.4 und CF6\_1

In diesem AP wurden in einem kontinuierlichen Prozess die ermittelten Simulationsergebnisse aus CF06\_2.3.2 aber auch CF06\_2.2 diskutiert und ggf. die Berechnungen angepasst. Dabei wurden bspw. Auch die Strombezugskosten für eine dezentrale, netzentkoppelte Anlage als Grundlage für dieses Arbeitspaket mit den Projektpartner auf 0,03...0,04 EUR/kWh festgelegt.

#### 2.1.2 AP CF06\_2.3.2: Energetische Betrachtung Synthesegaserzeugung

Ziel: Erarbeitung einer Steady-State-Simulation für ein integriertes, dezentrales NH<sub>3</sub>-Erzeugungskonzept sowie Optimierung des Anlagenkonzepts in Hinblick auf Dampferzeugung für die SOEC sowie die effiziente Produktion von H<sub>2</sub> und N<sub>2</sub>.

Für die dezentrale Ammoniakanlage wurden vier Verschaltungsvarianten mit jeweils mehreren Untervarianten entworfen. Für die insgesamt zwölf Untervarianten wurden mit Hilfe stationärer Prozesssimulationen die Massen- und Energiebilanzen und der elektrische Gesamtwirkungsgrad ermittelt. Für die Synthesegaserzeugung (Bereitstellung von N<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>) ausgehend von Luft und Wasser liegt nach diesen Berechnungen der elektrische Wirkungsgrad bezogen auf den Heizwert des Synthesegases je nach Variante zwischen 68 % und 77 %. Für den Gesamtwirkungsgrad der Ammoniakherstellung ist der Unterschied geringer und liegt zwischen 51 % und 57 %. Nichtsdestotrotz zeigt diese Spreizung, dass die Wahl der richtigen Verschaltung entscheidend für die Wirtschaftlichkeit der Gesamtanlage sein wird (die Wirtschaftlichkeitsanalyse erfolgt in CF06\_2.3.5). Aus Wirkungsgradsicht wurde die Variante 3 (Schemata der zugehörigen Untervarianten siehe unten) in den Untervarianten 3 und 4 (V\_fl\_NH3\_3 und V\_fl\_NH3\_4, im Bild unten jeweils rechts) mit je 2 zusätzlichen Wärmeübertragern zur besseren Wärmerecuperation mit berechneten 57,02 % bzw. 57,27 % als am besten geeignet ermittelt.

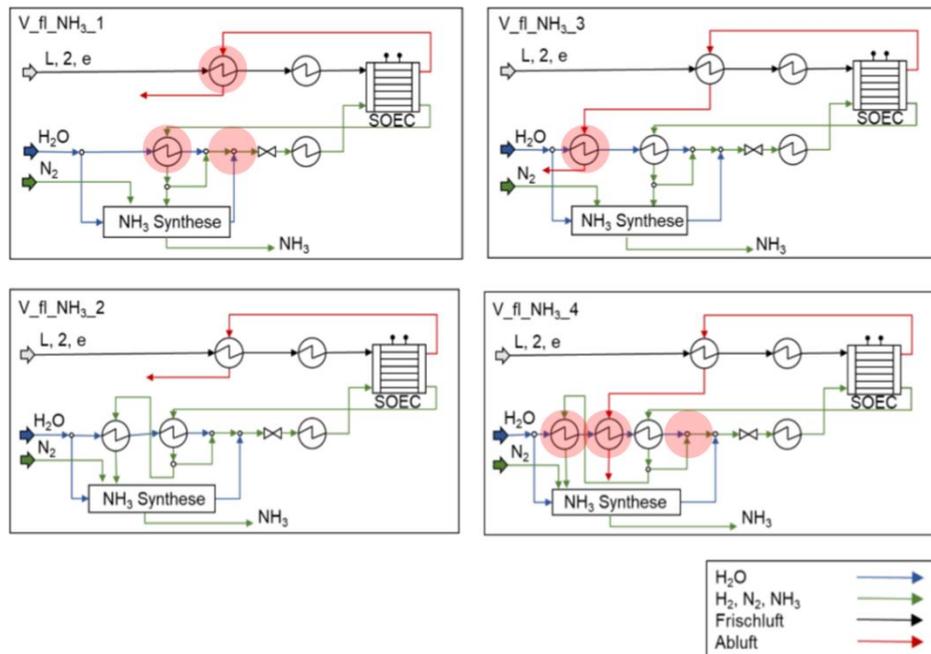


Abbildung 1: Schemata der vier untersuchten Untervarianten von Anlagenverschaltungs-Variante 3

### 2.1.3 AP CF06\_2.3.3: Umgang mit Dunkelflauten

Ziel: Entwicklung von Konzepten zum Umgang mit Dunkelflauten, dazu Abschätzung der benötigten thermischen, elektrischen oder stofflichen Speicherkapazitäten unter Berücksichtigung der Zyklenfestigkeit und Teillastfähigkeit der Anlagenkomponenten

- Zur Überbrückung von Dunkelflauten wurden Batteriespeicher und thermische Speicher zur Dampfer- bzw. Stromerzeugung mittels Dampfturbine sowie deren Kombination diskutiert
- Batterien und Wärmespeicher + Dampfturbine sind auch für tiefe Teillast geeignet, die Hochtemperaturelektrolyse durch modularen Aufbau ebenfalls, limitierend wäre die Ammoniaksynthese, hier wird eine deutliche Flexibilisierung durch neue Reaktortypen erwartet.
- Es wurde gezeigt das unter den getroffenen Annahmen ein reiner Batteriespeicher zwar einen einfachen Systemaufbau ermöglicht, der Einsatz eines Batteriespeichers im Vergleich aber ca. 10 % niedrigere Gestehungskosten des Ammoniaks ermöglicht.

### 2.1.4 AP CF06\_2.3.4: Komponentenspezifikation

Ziel: Definition der Schnittstellen der Anlagenkomponenten, Definition der Leistungsparameter der Anlagenkomponenten, insb. der SOEC

- Grundlegende Spezifikationen für die Hauptkomponenten der Green Ammonia-Anlage ( $H_2$ - und  $N_2$ -Erzeugung,  $NH_3$ -Synthese sowie Energiespeicher) für einen Windpark mit drei Turbinen (ca. 16 MW) wurden erstellt.
- Die notwendige HTE sollte aus 20-25 Modulen mit insgesamt 7 MW bestehen, dazu wäre ein Wärmespeicher mit 900-1300 MWh Kapazität zur Überbrückung von Dunkelflauten notwendig, bei Nutzung eines Batteriespeichers beträgt die benötigte Kapazität nur 32-43 MWh, zur  $N_2$ -Erzeugung käme ein Druckwechseladsorption mit einer Leistung von 450-600  $Nm^3/h$  zum Einsatz, die Produktionsleistung der  $NH_3$ -Synthese läge damit bei 950-1200  $Nm^3/h$ .

### 2.1.5 AP CF06\_2.3.5: Wirtschaftlichkeitsanalyse

Ziel: Abschätzung von CAPEX/OPEX und TCO der Green Ammonia Anlage auf Basis der verschiedenen Aufstellungsvarianten / Stromgestehungskosten, Vergleich der zu erwartenden Kosten bei einer Serienproduktion mit der konventionellen NH<sub>3</sub>-Produktion unter Berücksichtigung des regulatorischen Rahmens (z.B. CO<sub>2</sub>-Preis)

- Für die in 2.3.3 entwickelte Anlagenkonfiguration wurden für eine Nutzungsdauer von 20 Jahren spezifische NH<sub>3</sub>-Gestehungskosten von 1,4 €/kg bei Nutzung eines Batteriespeichers und 1,6 €/kg bei Nutzung eines Wärmespeichers ohne Berücksichtigung einer CO<sub>2</sub>-Bepreisung
- Wird ein CO<sub>2</sub>-Bepreisung von 40 €/t CO<sub>2</sub> berücksichtigt, würde das die Gestehungskosten von grünem NH<sub>3</sub> in diesem Szenario um 60 €/t NH<sub>3</sub> (also 0,06 €/kg) reduzieren
- Auch mit CO<sub>2</sub>-Bepreisung liegen die Kosten von grünem NH<sub>3</sub> damit voraussichtlich deutlich über denen von konventionellem NH<sub>3</sub>. D.h. für eine wirtschaftliche Umsetzung sind weitere Marktanreize notwendig (bspw. signifikant höhere CO<sub>2</sub>-Preise, höhere Erdgaspreise oder zusätzliche Vergütung von grünem NH<sub>3</sub>).

## 2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigsten Posten des zahlenmäßigen Nachweises sind der nachstehenden Tabelle erläutert.

Bezeichnung	Kosten [€]	Kategorie	Beschreibung
Personalkosten	77.397,37	0837	

Table 4: Wichtigste Positionen im zahlenmäßigen Nachweis

## 2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die Arbeiten im Teilvorhaben CF06\_2.3 waren für das Erreichen der im Gesamtvorhaben detaillierten Zielstellungen sowie die Umsetzung der CAMPFIRE-Vision notwendig. Die dafür erforderlichen personellen und wirtschaftlichen Ressourcen konnten durch Sunfire nicht abgedeckt und auch nicht von dem anderen Partner im CAMPFIRE-Bündnis erbracht werden. Da insbesondere die Arbeits- und Entwicklungsschwerpunkte für die Umsetzungsphase im vorwettbewerblichen Bereich lag, war die erste Umsetzung mit einem hohen wirtschaftlichen und wissenschaftlichen Risiko verbunden, so dass eine finanzielle Zuwendung die grundlegende Voraussetzung für eine erfolgreiche Durchführung war.

Es wurde geprüft, ob auf EU-Ebene geeignete Förderprogramme verfügbar sind. In der Recherche wurde festgestellt, dass derzeit keine Förderprogramme existieren, die die Finanzierung eines größeren multi-disziplinären Verbundprojektes auf dem Gebiet der Energiewandlung ermöglichen.

## 2.4 Verwertbarkeit der Ergebnisse

### 2.4.1 Wissenschaftlich-technische Erfolgsaussichten

Die wissenschaftlich-technischen Erfolgsaussichten des Forschungsvorhabens werden aufgrund der ausgewiesenen Kompetenzen des Konsortiums als sehr hoch eingeschätzt. Das Vorhaben wurde anhand von klar definierten Meilensteinen, Teilarbeitszielen und Forschungsschwerpunkten strukturiert.

Technisch wurde zum Projektende eine Studie zu Aufbau und Marktfähigkeit einer hoch-integrierten HTE-/NH<sub>3</sub>-Syntheseanlage abgeschlossen. Es wurden Ergebnisse zur Dimensionierung und zu den Anforderungen an die Komponenten einer solchen Anlage vorgelegt. Durch das entwickelte

Anlagenkonzept wurde eine Knowhow-Lücke zur Dekarbonisierung wichtiger Industriezweige geschlossen.

#### 2.4.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Um eine klimaneutrale Gesellschaft zu realisieren, müssen weitere Produktionskapazitäten und Verwertungsmöglichkeiten für erneuerbare Energie erschlossen werden. Die im Verbundvorhaben konzipierte und hinsichtlich ihrer Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit demonstrierte Green Ammonia Anlage kann an beliebigen dezentralen Standorten zur Erzeugung von grünem Ammoniak aus erneuerbarer Energie, z.B. Wind, Solar oder Gezeiten, eingesetzt werden. Aus 10 MWh erneuerbarer Energie kann in der Green Ammonia Anlage ca. eine Tonne Ammoniak erzeugt werden, wobei ca. 75 % des Energiebedarfs auf die Wasserstoffherzeugung entfallen. Das Produkt besitzt ein hohes Greening Potential und dadurch einen deutlichen Mehrwert auf dem Markt, wodurch die Unternehmen zukünftig attraktive und nachhaltige Wertschöpfungspfade erschließen können. Dabei werden zum einen hocheffiziente Anlagen zur Speicherung von fluktuierender erneuerbarer Energie, zum anderen aber auch grüner Ammoniak als chemischer Grundstoff und Energiespeicher von den Verbundpartnern verwertet.

Die Unternehmen schaffen sich ein Alleinstellungsmerkmal im Bereich Energietechnik – Ammonia Engineering und Construction (N-Tech Plattform). Regenerativer Strom aus netzunabhängigen dezentralen Windparks kann zukünftig in der Green Ammonia Anlage in Form von Wasserstoff beziehungsweise Ammoniak umgesetzt werden. Die Bereitstellung von Wasserstoff über eine Hochtemperatur-Elektrolyse bietet dabei besondere Chancen durch höchste Effizienz die Marktwirtschaftlichkeit zu erreichen.

Eine erste Verwertung des in der Anlage produzierten Ammoniak erfolgt in der Produktion von grünen Düngemitteln. Ammoniak ist als Grundstoff für Düngemittel eine der weltweit am meisten produzierten Chemikalie. Am Standort Rostock werden gegenwärtig durch das Unternehmen YARA GmbH & Co AG ca. 600.000 Tonnen Ammoniak / Jahr zu Düngemitteln umgesetzt. Grünes Ammoniak aus der Anlage mit einer geschätzten Jahresproduktion von ca. 6.000 Tonnen wird am Standort Poppendorf bei Rostock für die Erzeugung von nachhaltigem Dünger für die zukünftige Landwirtschaft verarbeitet oder über das Ammoniak-Tanklager im Industriehafen Rostock zu anderen Kunden transportiert.

Mittelfristig wird das grüne Ammoniak als Kraftstoff in der Schifffahrt eingesetzt und in Brennstoffzellen, Gasturbinen und Verbrennungsmotoren wieder in nutzbare Energie umgewandelt. Verwertungspfade ergeben sich zunächst für erste Funktionsmuster und Versuchsträger in der regionalen Schifffahrt. So wird eine erste Ammoniak-betriebene Sport Yacht der Hanseyacht AG in Greifswald in drei Jahren als potenzieller Kunde zur Verfügung stehen. In fünf Jahren wird der Binnenfahren-Betreiber Weiße Flotte erste Ammoniak-betriebene Gasmotoren in Retro-gefitzten Personenfähren im öffentlichen Nahverkehr als Versuchsträger einsetzen, wofür grüner Ammoniak kontinuierlich verfügbar sein muss. Durch die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Rahmen von Großprojekten durch C-Job oder aber die Aktivitäten im Rahmen eines geplanten Multi-Millionenprojektes von MAN Energy Solution, Woodward l'Orange und dem Campfire-Bündnispartner Neptun Ship Design GmbH aus Rostock werden in drei bis fünf Jahren Multi-Megawatt Großmotoren für Seeschiffe einschließlich des für den neuen Treibstoff geeigneten Schiffsdesign verfügbar sein, wodurch mittelfristig eine starke Marktaktivierung in Richtung emissionsfreie Schifffahrt zu erwarten ist.

Weitere Märkte entstehen durch die Verwertung von grünem Ammoniak als Treibstoff für den landseitigen Heavy-Duty-Verkehr oder als Energieträger für die stationäre Energieerzeugung. In Ammoniak-betriebenen BHKWs kann emissionsfrei Energie und Wärme erzeugt werden. Grüne Gewerbegebiete und emissionsfreie Produktionsstätten können an regionalen Standorten mit einem hohen Energiebedarf realisiert werden. Erste Standorte bieten sich in der Region Anklam-Torgelow im Deutsch-Polnischen Verflechtungsraum, z.B. das Unternehmen Eisengießerei Torgelow. Durch die Verfügbarkeit von grünem Ammoniak in der Region eröffnen sich neue attraktive Standorte für die Ansiedlung von Unternehmen der Zukunft, die CO<sub>2</sub>-frei produzierte Produkte an den Markt bringen wollen.

Neue Märkte entstehen für die Serviceprovider und Zulieferer der Logistikketten für die Distribution von Ammoniak für Ammonia-Farming und Ammonia-Bunkering und Marktperspektiven auf Grund der erworbenen Kompetenzen der regionalen Unternehmen im Design und Manufaktur von logistischen Subsystemen, z.B. Leitungen, Behälter und Tanksysteme.

#### 2.4.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Für erfolgreiche Ergebnisse wird zunächst das Anwendungspotential mit den Entwicklungspartnern sowie assoziierten Partnern evaluiert und darauf basierend geeignete Schutzrechtsstrategien umgesetzt. Zum Patent angemeldete Entwicklungen werden den Projektpartnern im Rahmen der im Kooperationsvertrag festgelegten Regularien bzw. bei Nichtinanspruchnahme interessierten Industrieunternehmen über Lizenzgabe zur Verfügung gestellt.

Die im Projekt erzielten Forschungsergebnisse werden als Grundlage für weiterführende Entwicklungen und Kooperationen genutzt. Des Weiteren stehen sie nach Projektabschluss für Forschung und Lehre zur Verfügung. Über Praktika, Master- und Promotionsarbeiten ermöglicht das Vorhaben im Bereich der Wissenschaft die anwendungsorientierte Ausbildung qualifizierter Fachkräfte, die ihr Wissen und ihre gewonnene Erfahrung nach Studienabschluss in Wissenschaft und/oder Wirtschaft einbringen.

Es ist geplant die entwickelte Anlage anschließend in einem Demo-Projekt umzusetzen und deren technologische Überlegenheit nachzuweisen.

Als Zeithorizont zum kommerziellen Produkt geht Sunfire derzeit von 2028 bis 2030 aus. Hierzu sind weitere Entwicklungsschritte nötig, insbesondere eine weitere Validierung der Technologie, Optimierung der technischen Umsetzung, Reduzierung der Systemkosten, Erhöhung der Robustheit und Lebensdauer, Stärkung der Lieferketten und Vertriebsnetze zu Geschäftskunden, Stärkung der Serienfertigung und des After Sales-Geschäfts.

#### 2.5 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Weltweit wird an der SOFC- bzw. (Co-)SOEC-Technologie entwickelt. Einen guten Überblick über den Stand der Forschung bieten die großen Fachtagungen der Community, an denen sich auch Sunfire aktiv beteiligt.

In Deutschland beschäftigt sich insbesondere das Campfire-Konsortium selbst mit einer alternativen bzw. ergänzenden Erzeugung von grünen NH<sub>3</sub> mithilfe von keramischen Dünnschichten<sup>2</sup>. Außerdem

---

<sup>2</sup> <https://wir-campfire.de/>

gibt zwei Wasserstoff-Leitprojekte<sup>3</sup>, die sich mit der Erzeugung bzw. dem Transport von grünem NH<sub>3</sub> beschäftigen: H2Mare (NH<sub>3</sub>-Erzeugung Off-Shore aus Windkraft) und TransHyDE (Transport von NH<sub>3</sub>).

Auf EU-Ebene beschäftigen sich ebenfalls eine Reihe Projekte mit der Erzeugung und Nutzung von NH<sub>3</sub>. Den Einsatz von von SOFC/SOEC-Technologien untersuchen dabei beispielsweise:

- AMON (SOFC zur hocheffizienten Erzeugung von Strom aus NH<sub>3</sub>, 8 kW Demonstrator)<sup>4</sup>
- WINNER (Entwicklung protonenleitender Keramikmembranen unter anderem für die Erzeugung von NH<sub>3</sub>)<sup>5</sup>

Auch international spielt grüne Ammoniakherzeugung und -Nutzung im Zuge der Energiewende eine zunehmende Bedeutung.

In UK, in den USA und in Indien bestehen bereits Versuchsanlagen zur Produktion von grünem NH<sub>3</sub> basierend auf Wasserelektrolyse (PEM, AEL)<sup>6,7,8</sup>. Außerdem existiert mit dem GenCell Fox eine kommerziell vertriebene SOFC zur Nutzung von NH<sub>3</sub> im kW-Maßstab<sup>9</sup>.

Zusätzlich sind unter anderem durch Yara, Topsoe, CF Industries und Mitsui mehrere Anlagen zur Produktion von grünem NH<sub>3</sub> mit bis zu 600 kt/a (1 GW Elektrolyse) angekündigt. Diese basieren jedoch alle auf PEM oder AEL in Kombination mit traditionellen Haber-Bosh-Synthesen. Integrierte Hocheffizienz-Anlagen basierend auf Hochtemperaturelektrolyse innovativen Syntheseverfahren wurden bisher noch nicht im industriellen Maßstab umgesetzt.

## 2.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

In der Zeit des Vorhabens wurden keine Veröffentlichungen publiziert.

---

<sup>3</sup> <https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/>

<sup>4</sup> [https://www.clean-hydrogen.europa.eu/projects-repository/amon\\_en](https://www.clean-hydrogen.europa.eu/projects-repository/amon_en)

<sup>5</sup> [https://www.clean-hydrogen.europa.eu/projects-repository/winner\\_en](https://www.clean-hydrogen.europa.eu/projects-repository/winner_en)

<sup>6</sup> <https://www.siemens-energy.com/uk/en/offerings-uk/green-ammonia.html>

<sup>7</sup> <https://wcroc.cfans.umn.edu/research/renewable-energy>

<sup>8</sup> <https://www.ammoniaenergy.org/articles/tour-acme-groups-green-hydrogen-ammonia-plant-in-india/>

<sup>9</sup> <https://www.gencellenergy.com/our-products/gencell-a5/>