

# Schlussbericht

**Wissenschaftlich-experimentelle Integration, Demonstration,  
Evaluation und Analyse „idea“ von nachhaltigen und innovativen Brennstoff-  
zellen-Anwendungen für Insel-Energie-Systeme „SUNIES“**

**Förderkennzeichen:  
03SF0551B**

GEFÖRDERT VOM



**Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung**

**Autoren:**

Nadine Lucke, Eren Tali, Hristina Cigarida

**Zuwendungsempfänger:**

Gas- und Wärme-Institut Essen e. V.

**Förderkennzeichen:**

03SF0551B

**Verbundvorhaben: SUNIES**

SUstainable and Novel fuel cell applications for Island Energy Systems

Nachhaltige und innovative Brennstoffzellen-Anwendungen  
für Insel-Energie-Systeme

**Teilvorhaben: ideaSUNIES**

Wissenschaftlich-experimentelle Integration, Demonstration, Evaluation und Analyse „Idea“ von nachhaltigen und innovativen Brennstoffzellen-Anwendungen für Insel-Energie-Systeme „SUNIES“

**Projektlaufzeit:**

01.03.2018 – 30.11.2021

Essen, August 2021

# Inhalt

I.	Kurzdarstellung.....	1
1.	Aufgabenstellung.....	1
2.	Voraussetzung .....	4
3.	Planung und Ablauf .....	4
4.	Wissenschaftlicher Stand .....	8
5.	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	10
II.	Ausführlicher Bericht.....	12
1.	Verwendung der Zuwendung und erzielttes Ergebnis .....	12
2.	Positionen und Nachweise .....	14
3.	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	14
4.	Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit.....	15
5.	Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	16
6.	Veröffentlichung der Ergebnisse .....	18

# I. Kurzdarstellung

## 1. Aufgabenstellung

Brennstoffzellen ermöglichen eine hocheffiziente Bereitstellung elektrischer Energie bei niedrigen Treibhausgasemissionen. Durch das Konzept der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), bei dem die Abwärme zusätzlich z.B. zu Heizzwecken genutzt wird, wird die gesamtsystemische Effizienz weiter gesteigert und eine CO<sub>2</sub>-arme Energieversorgung erzielt. Aufgrund der technischen Besonderheit mit Hilfe eines Reformers unterschiedliche Brennstoffe einsetzen zu können, weisen Brennstoffzellen eine signifikante Flexibilität in puncto Brennstoffauswahl auf.

Oxidkeramische Brennstoffzellen (engl. solid oxid fuel cell; SOFC) sind Hochtemperaturbrennstoffzellen, die für die dezentrale elektrische Energieerzeugung in Form von Kraft-Wärme-Kopplung mit hoher Effizienz und gleichzeitig niedrigen Abgas- und Schallemissionen besonders geeignet sind. Aufgrund des hohen Temperaturniveaus des Abgases und der darin enthaltenen brennbaren Restgase ergeben sich weitere Nutzungsmöglichkeiten für das Abgas. Diese Energie kann z.B. in einer nachgeschalteten Mikro-Gasturbine (MGT) zur Stromerzeugung eingesetzt werden. Solche Hybrid-SOFC-Systeme erreichen in der elektrischen Leistungsklasse unter 1 MW heute bereits elektrische Wirkungsgrade von über 55 %. Durch eine zusätzlich nachgeschaltete Dampfturbine, dem Triple-Cycle-System, wird eine weitere Wirkungsgradsteigerung möglich.

Die Energieversorgung (Elektrizität, Wärme und Kälte) und die Wasserversorgung von Inseln – sowohl geographisch als auch im Sinne von dezentral organisierten Insel-Regionen – stehen im Mittelpunkt einer modernen, nachhaltigen Energiepolitik.

Aufgrund der geographischen Konstellation Griechenlands mit den zahlreichen – teilweise weit voneinander entfernten – kleinen Inseln bieten sich Brennstoffzellen als zentrales Element der zukünftigen Energieversorgung an.

Ziel des Verbundvorhabens „SUNIES“ war die Entwicklung und Analyse nachhaltiger und innovativer Brennstoffzellen-Anwendungen für Insel-Energie-Systeme im Sinne eines durchgängigen Energiekonzeptes. Dabei sollten speziell Hybrid-SOFC-Systeme und deren systemische sowie betriebstechnische Konzeptvarianten unter Berücksichtigung der Nachhaltigkeit bei der Erzeugung elektrischer Energie betrachtet werden. Daraus ergaben sich folgende wissenschaftliche Ziele:

1. Abbildung des Betriebsverhaltens und Simulationsberechnungen
  - Testen des Betriebsverhaltens einer Hochtemperaturbrennstoffzelle in Kombination mit einer Mikro-Gasturbine (Hybrid-SOFC-System) mit einer elektrischen Leistung von ca. 250 kW
  - Entwicklung eines Simulationsmodells für das Hybrid-SOFC-System
  - Entwicklung eines Simulationsmodells für den „Triple Cycle Modus“ bestehend aus dem Hybrid-SOFC-System und einer nachgeschalteten Dampfturbine
  - Entwicklung eines Simulationsmodells zu Berechnung von dynamischen Vorgängen bei der Energieversorgung der Insel

2. Entwicklung von durchgängigen Konzepten
  - Entwicklung angepasster SOFC-Konzepte für Insel-Energie-Systeme zur Versorgung der Inseln mit Strom, Wärme, Kälte und Wasser, die in einem weiteren Prozess zur Entwicklung von marktreifen Anlagen führen können (s. Abbildung 1).
  - Auch die Möglichkeit der Skalierung der Konzepte bis zu einer elektrischen Leistung von ca. 1 MW soll untersucht werden.
3. Zukunftsorientierter Betrieb der Brennstoffzelle als Elektrolyseur
  - Untersuchung des SOEC-Modus zur Speicherung von regenerativ erzeugter überschüssiger Elektrizität in Form von Wasserstoff.
  - Überprüfung der Möglichkeit eines umschaltbaren Betriebes von dem SOFC-Modus in den SOEC-Modus (s. Abbildung 1).

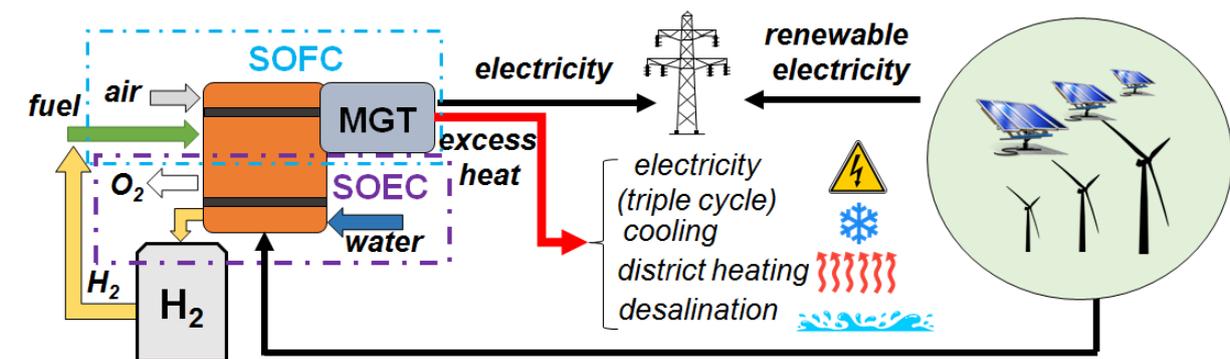


Abbildung 1: Vorschlag eines durchgängigen Energie-Konzeptes zur Inselversorgung

Durch das Erreichen dieser Ziele können weitere technische Entwicklungen und die adaptive Optimierung des am Markt vorhandenen Hybrid-SOFC-Systems von dem Verbundpartner Mitsubishi Hitachi Power Systems Europe (MHPSE) vorangetrieben werden. Dazu sind die verschiedenen stationären Simulationsberechnungen und dynamische Analysen des Gesamtsystems, welche von den Forschungspartnern, dem Lehrstuhl für Umweltverfahrenstechnik und Anlagentechnik (LUAT) der Universität Duisburg-Essen und dem Gas- und Wärme-Institut Essen e.V. (GWI), durchgeführt wurden, von besonderer Bedeutung.

Im dem Verbundprojekt SUNIES wurde angestrebt, das durchgängige Konzept, also sowohl die Strombereitstellung im SOFC-Modus als auch die Stromnutzung im SOEC-Modus, stationär und dynamisch zu untersuchen. Damit soll eine maximale anlagensystemische Effektivität und gleichzeitig eine hohe Netzstabilität gewährleistet werden können. In diesem Zusammenhang spielen die jahres- und tageszeitlichen Schwankungen in Bezug auf Wärme, Kälte und Wasser eine signifikante Rolle. Für die Simulation dieses Konzeptes und Durchführung einer technoökonomischen Analyse für einen Inselbetrieb auf der Basis einer SOFC-Anlage ist das Betriebsverhalten des Hybrid-SOFC-Systems von besonderer Bedeutung.

Vor diesem Hintergrund hat das GWI folgende konkrete Ziele und Aufgaben im Verbundprojekt „SUNIES“ fokussiert:

- Unterstützung von MHPSE beim Aufbau einer Demonstrationsanlage am Standort des GWI
- Definition der Betriebsparameter und Versuchsreihen für die Testmessung mit der Demonstrationsanlage in Bezug auf die Anwendung von Hybrid-SOFC-Systemen in Insel-Energie-Systemen
- Durchführung der Versuchsreihen, Datenerfassung, -aufbereitung und -auswertung
- Bereitstellung der Messdaten zur Validierung der Simulationsmodelle von LUAT

Da die Bereitstellung des Hybrid-SOFC-Systems im Rahmen des Arbeitspaketes AP 3 innerhalb der geplanten Projektlaufzeit aus organisatorischen Gründen nicht gewährleistet werden konnte, war eine Änderung der Aufgabestellung des GWI erforderlich. Die Untersuchung des Betriebsverhaltens des Hybrid-SOFC-Systems erfolgte auf Basis bereits vorhandener Erfahrungen und Betriebsdaten des Herstellers MHPSE<sup>1</sup>. Ergänzend hat das GWI die theoretische, simulationsgestützte Untersuchung verschiedener Brennstoffe für Hybrid-SOFC-Systeme durchgeführt. Folgende Aufgaben wurden bearbeitet:

- Aufbau der Wissensbasis zur katalytischen Oberflächenreformierung für die interne Reformierung in tubularen Hochtemperatur-Brennstoffzellen
- Entwicklung eines konzeptionellen Ansatzes zur Abbildung der katalytischen Oberflächenreformierung entsprechend der internen Reformierung in Hochtemperatur-Brennstoffzellen
- Modellierung des Reformierungsprozesses
- Simulation des Reformierungsprozesses mit verschiedenen reinen Alkanen und realen Gaszusammensetzungen
- Zusammenfassung der Ergebnisse in Form einer „Datenbank“

Für LUAT standen folgende wesentliche Aufgaben im Fokus des Projekts:

- Entwicklung stationärer Simulationsmodelle und Durchführung von Simulationen für Hybrid-SOFC-Systeme sowie deren Validierung anhand von Messdaten
- Entwicklung stationärer Simulationsmodelle und Durchführung von Simulationen für Triple-Cycle-Systeme und
- Entwicklung stationärer Simulationsmodelle und Durchführung von Simulationsstudien für einen möglichen SOEC-Betrieb (Elektrolyseur)

Für MHPSE standen ursprünglich folgende wesentliche Aufgaben im Fokus des Projekts.

- technische Auslegung der Anlage
- Lieferung aller benötigten Komponenten des Gesamtsystems
- Inbetriebnahme des Gesamtsystems
- Planung und die Evaluierung der Tests (in Zusammenarbeit mit GWI)

Außerdem hat MHPSE die anderen Partner bei der technischen und wirtschaftlichen Bewertung der Technologie unterstützt.

---

<sup>1</sup> MHPSE: Mitsubishi Hitachi Power Systems, Japan

Da die Bereitstellung des Hybrid-SOFC-Systems zwecks Durchführung von Messungen innerhalb der geplanten Projektlaufzeit aus organisatorischen Gründen nicht gewährleistet werden konnte, wurde der Arbeitsplan entsprechend angepasst. MHPSE hat dann folgende Aufgaben übernommen:

- Evaluierung der SOFC Technologie
- Evaluierung in Zusammenarbeit mit LUAT der verfügbarer Simulationsansätze für die Modellierung von Hybrid-SOFC-Systemen
- Bericht über die Betriebserfahrung von Hybrid-SOFC-Systemen mit verschiedenen Gasmischungen

## 2. Voraussetzung

Gegenwärtig entwickeln sich verschiedene neue Technologien und Anlagenkonzepte zur Energieversorgung mit Strom und Wärme, welche unterschiedlichen Bewertungskriterien unterliegen. Der Ausbau von erneuerbaren Energien dominiert diese Entwicklung. Aufgrund der natürlichen Volatilität der Energiebereitstellung aus Wind und Sonne, entsteht ein zunehmender Bedarf an Anlagen und Systemen, welche zugleich die Resilienz als auch die Flexibilität des Gesamtsystems sichern. Dazu gehören umweltfreundliche, regelbare Anlagen und Speichersysteme. Diese Anforderung trifft auch auf „Insel-Energie-Systeme“ zu, die zusätzlich von lokalen Bedingungen geprägt sind.

Eine neue und zukunftsorientierte Technologie ist die Hochtemperatur-Brennstoffzelle. Auch wenn in den letzten Jahrzehnten einiges an Entwicklungsarbeit auf diesem Gebiet geleistet worden ist, ist diese Technologie – nicht zuletzt auch wegen der bis dato hohen Investitionskosten – nur für spezifische Anforderungen wettbewerbsfähig und hat somit weiteres Ausbaupotenzial. Dies trifft auch auf das Hybrid-SOFC-System von MHPSE zu, welches in den letzten Jahren erfolgreich weiterentwickelt wurde und nun serienreif am Markt verfügbar ist. Somit wurde das Vorhaben in einer Zeit ausgeführt, in der die Weiterentwicklung eines solchen Systems und seine Integration in ein Energieversorgungssystem von besonderer Bedeutung waren und weiterhin sind.

## 3. Planung und Ablauf

Das Vorhaben wurde von folgenden Partnern durchgeführt:

- Griechische Partner
  - **(C.E.R.T.H.)** Centre for Research and Technology Hellas
  - **(P.P.C.)** Power-Public-Corporation
- Deutsche Partner
  - **(GWI)** Gas- und Wärme-Institut Essen e.V.
  - **(LUAT)** Lehrstuhl für Umweltverfahrenstechnik und Anlagentechnik Uni Duisburg-Essen (Uni DuE)
  - **(MHPSE)** Mitsubishi Hitachi Power Systems Europe GmbH

Das Forschungsprojekt ist in sechs einzelne Arbeitspakete (AP 1 - AP 6) gegliedert. Die Gliederung dieser Arbeitspakete ist in der nachfolgenden Abbildung 2 schematisch dargestellt. Die Gesamtkoordination wurde vom griechischen Partner CERTH übernommen. Für den deutschen Verbund hat LUAT die Koordination übernommen.

Neben Koordination (AP 1) und Verbreitung der Ergebnisse (AP 6) waren noch folgende Arbeitspakete zu bearbeiten:

- AP 2 Auswahl der Insel-Varianten und Definition von Randbedingungen
- AP 3 Versuche zum Betriebsverhalten eines Hybrid-SOFC-Systems
- AP 4 Berechnungen mit Simulationsmodellen
- AP 5 Technische und wirtschaftliche Bewertung der ausgewählten Varianten

Diese vier Hauptarbeitspakete im Forschungsvorhaben SUNIES interagierten miteinander, waren jedoch technisch-wissenschaftlich klar voneinander abgegrenzt.

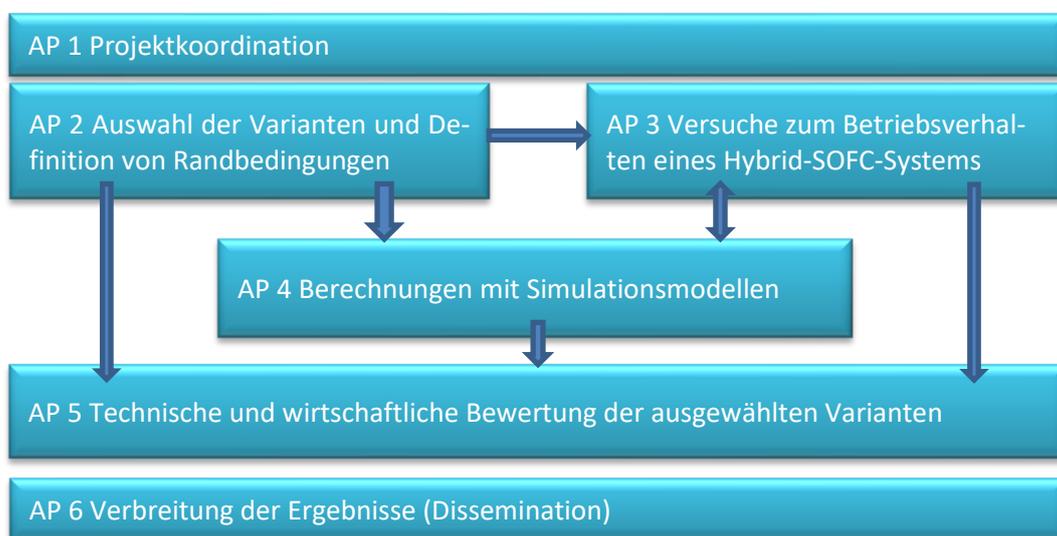


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Arbeitspakete in SUNIES

Da das für die Versuche geplante Hybrid-SOFC-System aus organisatorischen Gründen nicht zur Verfügung gestellt werden konnte, wurde Anfang 2019 – nach einem genehmigten Antrag auf Änderung an das PtJ – das AP 3 „Versuche zum Betriebsverhalten eines Hybrid-SOFC-Systems“ durch ein neues AP 3 „Untersuchung des Betriebsverhaltens eines Hybrid-SOFC-Systems“ ersetzt, siehe Abbildung 3.

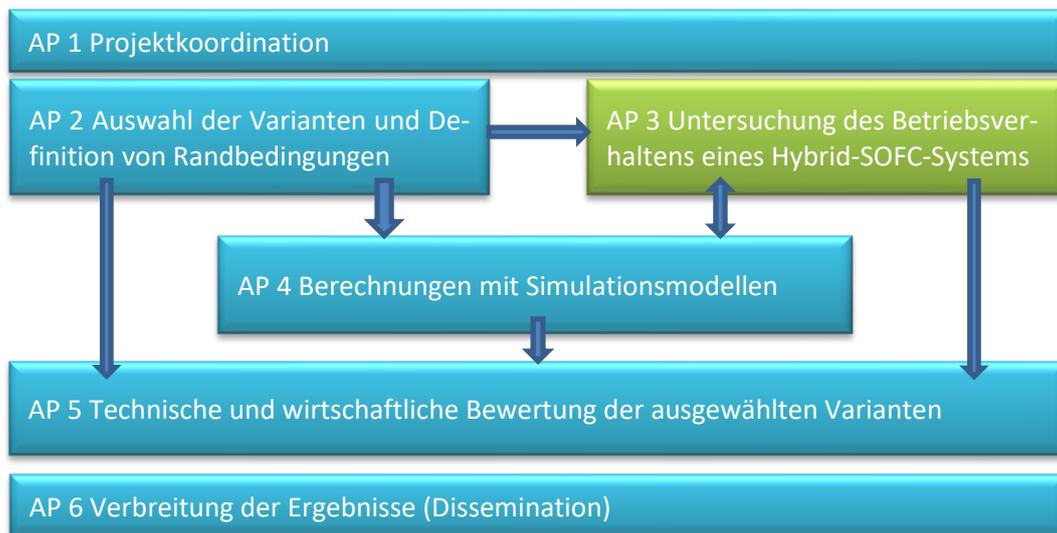


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Arbeitspakete in SUNIES (Änderung 2019)

MHPSE sollte die Auswahl der Varianten (AP 2) unterstützen, die in erster Linie von den griechischen Partnern durchgeführt werden sollte. Weiterhin sollte MHPSE ursprünglich die technische Auslegung der Anlage und die Lieferung der Komponenten übernehmen und die Installation der Anlage unterstützen (AP 3). Dabei war eine Zusammenarbeit mit GWI angedacht. Da die Bereitstellung des Hybrid-SOFC-Systems zwecks Durchführung von Messungen im Rahmen des Arbeitspaketes AP 3 innerhalb der geplanten Projektlaufzeit aus organisatorischen Gründen nicht gewährleistet werden konnte, wurde eine Änderung vorgenommen, nach der die Untersuchung des Betriebsverhaltens des Hybrid-SOFC-Systems anhand von Erfahrungswerten des Herstellers und zusätzlichen theoretischen Untersuchungen durch das GWI durchgeführt werden sollte. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sollten als Input für das AP 4 verwendet werden.

LUAT übernahm die Erstellung der stationären Simulationsmodelle und die Durchführung der Simulationsberechnungen (AP 4). Hierzu sind die Ergebnisse der obengenannten Untersuchungen erforderlich. Diese Ergebnisse sollten dann von den griechischen Partnern übernommen und in den verschiedenen Szenarien (AP 5) weiterverarbeitet werden.

Daraus ergab sich der dargestellte zeitliche Ablauf der Arbeitspakete, siehe Abbildung 4. Dieser Terminplan entspricht dem Stand nach der Änderung des AP 3. Gegen Ende des Projektes wurde infolge der COVID19-Pandemie eine 3-monatige kostenneutrale Verlängerung von LUAT und MHPSE beantragt und genehmigt. Diese Verlängerung ist in dem dargestellten Terminplan nicht enthalten.

AP - Bezeichnung		2018												2019												2020											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		Tätigkeiten und Meilensteine		Partner			griechischer Terminplan																														
AP 1	Projektkoordination	alle			LUAT																																
AP 2	Auswahl der Varianten und Definition von Randbedingungen	GR-Partner																																			
		GR-Partner																																			
AP 3	Untersuchung des Betriebsverhaltens eines Hybrid-SOFC-Systems	MHPSE																																			
		GWI																																			
		GR-Partner																																			
AP 4	Berechnungen mit Simulationsmodellen	LUAT																																			
		GR-Partner																																			
AP 5	Technische und wirtschaftliche Bewertung der ausgewählten Varianten	GR-Partner																																			
		GR-Partner																																			
AP 6	Verbreitung der Ergebnisse (Dissemination)	GR-Partner																																			

Projekttablauf - Terminplan Projekt "SUNIES" (Rev. Nov. 2019)

Abbildung 4: Zeitlicher Ablauf der Arbeitspakete

## 4. Wissenschaftlicher Stand

Festoxidbrennstoffzellen (engl. solid oxid fuel cell; SOFC) bieten als Hochtemperaturbrennstoffzellen einige entscheidende Vorteile gegenüber anderen Brennstoffzellentechnologien. Wenn Erdgas als Brennstoff genutzt wird, ist es nicht erforderlich dieses zuvor unter Einsatz von zusätzlicher Energie zu Wasserstoff zu reformieren. Aufgrund der hohen Betriebstemperaturen erfolgt die Reformierung des Brenngases innerhalb des SOFC-Systems. Ein weiterer Vorteil der SOFC ist der Einsatz von Keramik, sodass auf die sonst benötigten vergleichsweise kostenintensiven Elektrolyte sowie Edelmetalle verzichtet werden kann. Zudem ermöglicht die interne Reformierung eine hohe Effizienz bei der thermochemischen Umsetzung des Brennstoffes und infolgedessen hohe elektrische Wirkungsgrade. Durch die hohe Betriebstemperatur von ca. 500 bis 1.000 °C sind SOFC-Anlagen für den Einsatz in der Kraft-Wärme-Kopplung oder auch in Kombination mit einem anschließenden thermischen Turbinenprozessen zur Strombereitstellung mit elektrischen Wirkungsgraden von ca. 60 % auch in den kleineren elektrischen Leistungsklassen unter 1 MW prädestiniert<sup>2</sup>.

Eine Anzahl von Studien beschäftigt sich mit verschiedenen SOFC-Thematiken:

- Stationäres Modell für eine Kombination von SOFC und einer Mikro-Gasturbine in einer Anlage zur Produktion von Wasserstoff oder zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung<sup>3,4</sup>
- Nutzung der Abwärme in Wasserentsalzungsanlagen oder für Fernwärme<sup>5,6</sup>
- Diverse dynamische Simulationen mit verschiedenen Simulationstools wie Matlab Simulink<sup>7</sup>, APROS<sup>8</sup> and gPROMSTM<sup>9</sup>
- SOEC-Modus zur Erzeugung von Methan<sup>10</sup> oder Synthesegas<sup>11,12</sup>

In Tabelle 1 sind die angestrebten Neuentwicklungen im Rahmen des Projektes SUNIES verglichen mit dem aktuellen Stand der Technik dargestellt.

<sup>2</sup> Forschungszentrum Jülich GmbH, „fz-juelich.de,“ 05 Dezember 2013. [Online]. Available: [http://www.fz-juelich.de/portal/DE/Forschung/EnergieUmwelt/Brennstoffzellen/SOFC/\\_node.html](http://www.fz-juelich.de/portal/DE/Forschung/EnergieUmwelt/Brennstoffzellen/SOFC/_node.html). [Zugriff am 19 Oktober 2017]

<sup>3</sup> Mahsa Aghaie, Mehdi Mehrpooya, Fathollah Pourfayaz. Introducing an integrated chemical looping hydrogen production, inherent carbon capture and solid oxide fuel cell biomass fueled power plant process configuration. *Energy Conversion and Management* Volume 124, 15 September 2016, Pages 141–154

<sup>4</sup> Stefano Campanari, Luca Mastropasqua, Matteo Gazzani, Paolo Chiesa, Matteo C. Romano. Predicting the ultimate potential of natural gas SOFC power cycles

<sup>5</sup> Mousa Meratizaman, Monadzadeh, Sina, Majid Amidpour. Simulation and economic evaluation of small-scale SOFC-GT-MED. *Desalination and Water Treatment*, Volume 57, 2016 - Issue 11 Pages 4810-4831

<sup>6</sup> C. Stiller, Ø. Mathisen, S. Seljebø, O. Bolland, H. Karoliussen, B. Thorud. Simulation-based comparison of combined SOFC/GTcycles with flat-plate and tubular fuel cell models. *Fuel Cell Seminar 2003*, Miami.

<sup>7</sup> L. Barelli, G. Bidini, A. Ottaviano. Part load operation of a SOFC/GT hybrid system: Dynamic analysis. *Applied Energy* Volume 110, October 2013, Pages 173–189

<sup>8</sup> Toni Ollikainen, Jaakko Saarinen, Matias Halinen, Tero Hottinen, Matti Noponen, Erkki Fontell and Jari Kiviaho. Dynamic Simulation Tool APROS in SOFC Power Plant Modeling at Wärtsilä and VTT. *ECS Trans.* 2007 volume 7, issue 1, 1821-1829

<sup>9</sup> Dionysios P. Xenos, Philipp Hofmann, Kyriakos D. Panopoulos, Emmanuel Kakaras. Detailed transient thermal simulation of a planar SOFC (solid oxide fuel cell) using gPROMS™. *Energy* Volume 81, 1 March 2015, Pages 84–102

<sup>10</sup> Jan Pawel Stempień, Meng Ni, Qiang Sun, Siew Hwa Chan. Production of sustainable methane from renewable energy and captured carbon dioxide with the use of Solid Oxide Electrolyzer: A thermodynamic assessment. *Energy* Volume 82, 15 March 2015, Pages 714–721.

<sup>11</sup> Yu Luo, Yixiang Shi, Wenying Li, Ningsheng Cai. Comprehensive modeling of tubular solid oxide electrolysis cell for co-electrolysis of steam and carbon dioxide. *Energy* 70 (2014) 420-434

<sup>12</sup> Haoran Xu, Bin Chen, z and Meng Ni. Modeling of Direct Carbon-Assisted Solid Oxide Electrolysis Cell (SOEC) for Syngas Production at Two Different Electrodes. *Journal of The Electrochemical Society*, 163 (11) F3029-F3035 (2016)

Tabelle 1: Angestrebte Neuentwicklungen im Rahmen von SUNIES verglichen mit dem aktuellen Stand der Technik

Parameter	Stand der Technik	Neuentwicklungen
Konfiguration	Hybrid-SOFC-System	Option für Triple-Cycle-System
Brennstoffzellengröße (el. Leistung)	Optimierter Betrieb für 250 kW	Skalierung bis zu 1 MW
Brennstoffflexibilität	Begrenzt	Unterschiedliche Erdgasqualitäten, Biogas
Brennstoffzellenbetrieb	SOFC-Betriebsmodus	Reversibler Betriebsmodus (SOFC-SOEC), Simulationsaktivitäten
Betriebslast	100 %	Optimierte Fahrweise für den Inselbetrieb auch in Teillast
Abgasnutzung	Konventionelle Wärmerückgewinnung	Fernwärme, Absorptionskühlung, Wasserentsalzung

MHPS<sup>13</sup> erforscht und entwickelt seit nun mehr als 30 Jahre Brennstoffzellen. Das Resultat der intensiven Entwicklungsarbeit ist das Hybrid-SOFC-System von MHPS mit einer elektrischen Leistung von 2590 kW, bestehend aus gebündelten röhrenförmigen (tubularen) Festoxidbrennstoffzellen mit einer nachgeschalteten Mikro-Gasturbine. MHPS plante schon länger kommerziell mit diesem Produkt in den japanischen Markt einzusteigen<sup>14</sup>. So sind im Rahmen von japanisch geförderten Projekten (u.a. NEDO - New Energy and Industrial Technology Development Organization) seit 2015 zehn Demonstrationsanlagen dieses Hybrid-SOFC-Systems an unterschiedlichen Standorten in Japan erfolgreich in Betrieb genommen worden (u.a. Kyushu Universität und Industriestandorte wie bspw. Toyota<sup>15</sup>), siehe Abbildung 5. Das erste System für den europäischen Markt wurde im Jahr 2020 beauftragt und soll im März 2022 in Betrieb gehen, siehe Tabelle 2.

Tabelle 2: Übersicht der seit 2015 realisierten und geplanten Demonstrationsanlagen des Hybrid-SOFC-Systems von MHPS

Region	Kunde	Anwendung	Klasse	Brennstoff	In Betrieb seit
Japan	Kyushu Universität	Universität Campus Microgrid	210 kW	Erdgas	Okt. 2015
	Taisei Corp.	Bürogebäude KWK	210 kW	Erdgas	Okt. 2017
	Tokyo Gas Co., Ltd.	Bürogebäude, Kommerzielle KWK	210 kW	Erdgas	Apr. 2017
	Toyota Motor Corp.	Industrielle KWK	210 kW	Erdgas	Mär. 2017
	NGK Spark Plug Co., Ltd.	Industrielle KWK	210 kW	Erdgas	Mär. 2017
	Electric Power Development Co., Ltd (J-Power)	Mitsubishi Power-SOFC, Brennstoffflexibilität, Demonstrationsanlage	210 kW	Erdgas/H <sub>2</sub>	Nov. 2017
	Mitsubishi Estate Co., Ltd	Bürogebäude, Kommerzielle KWK	210 kW	Erdgas	Anfang 2019
	HAZAMA ANDO Corp.	Bürogebäude, Kommerzielle KWK	210 kW	Erdgas/H <sub>2</sub>	Mitte 2019
	ASAHI BREWERIES	Industrielle KWK	210 kW	Biogas	Okt. 2020
Deutschland	Gas- und Wärme-Institut	Bürogebäude, Kommerzielle KWK	210 kW	Erdgas/H <sub>2</sub>	März 2021

<sup>13</sup> MHPS: Mitsubishi Hitachi Power Systems, Japan

<sup>14</sup> "Demonstration Testing Started of SOFC-MGT Hybrid Power Generation System, Toward Commercial Launch for Business and Industrial Uses", <https://www.mhps.com/en/news/20160921.html>

<sup>15</sup> Toyota Motor Cooperation, „toyota-global.com“, 26. April 2017. [Online]. Verfügbar: <http://newsroom.toyota.co.jp/en/detail/16581051>. [Zugriff am 27. Oktober 2017]

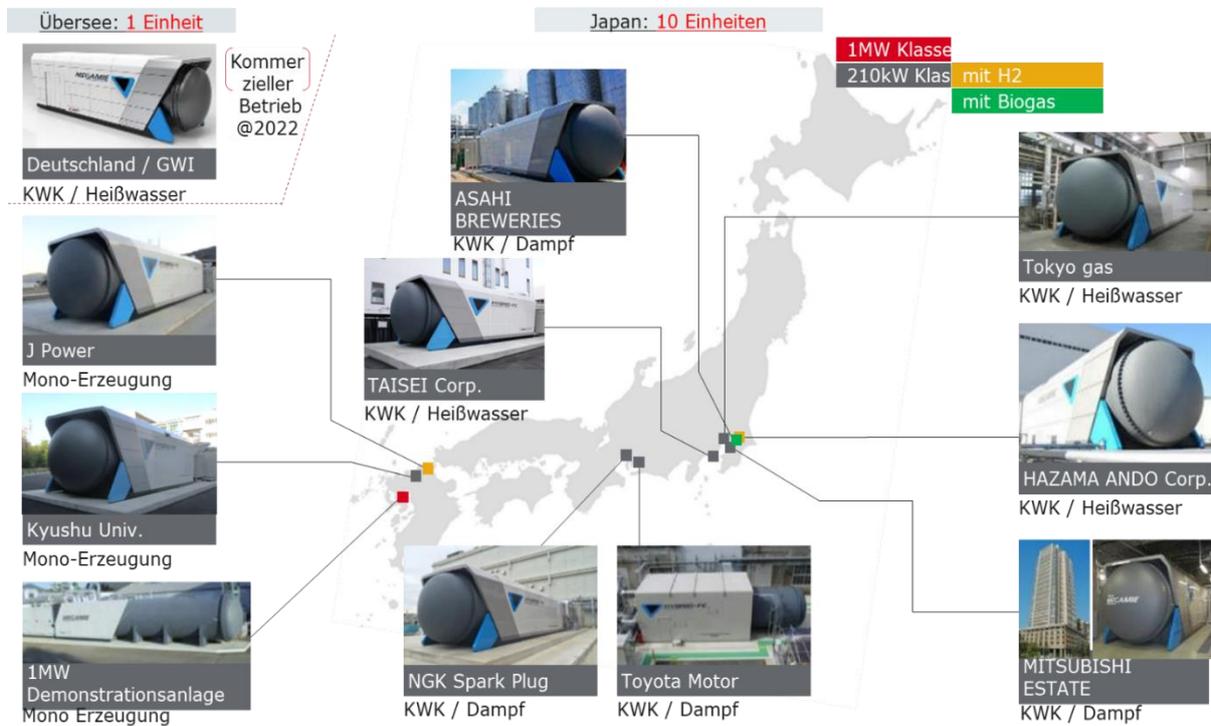


Abbildung 5: Standorte, Leistungsklassen und Anwendung der seit 2015 realisierten und geplanten Demonstrationsanlagen des Hybrid-SOFC-Systems von MHPS

Für die Kommerzialisierung des Hybrid-SOFC-Systems in den Europäischen Markt sind jedoch weitere Entwicklungsaktivitäten notwendig. Die Anforderung an die Zertifizierung des Systems nach den europäischen Normen (u.a. CE-Zertifizierung) fordert eine Revision der gesamten Systemauslegung, sodass alle Haupt- und Nebensysteme mit den europäischen Normen und Richtlinien konform sind (u.a. Stromgeräterichtlinie, Druckgeräterichtlinie, Gasgeräterichtlinie, Richtlinie zur elektromagnetischen Verträglichkeit). Dies führt auch dazu, dass die für das adaptierte Hybrid-SOFC-System wesentlichen Nebenaggregate (Ventile, Schaltanlagen, Elektronik usw.) auch von europäischen Herstellern beschafft werden sollen. Die Anforderung der Anpassung an die Europäischen Richtlinien ist daher ein zentraler Grund für die Aktivitäten zur Weiterentwicklung und Optimierung des Gesamtsystems entsprechend der Europäischen Randbedingungen im Rahmen des „SUNIES“ Projekts.

In Bezug auf die Patentsituation ist festzuhalten, dass MHPS drei Patente über die SOFC-Technologie besitzt (US2014190173, JP2014127271, JP5769695). Andere Hersteller besitzen zwar auch weitere Patente zu dieser Thematik, jedoch sind inzwischen die meisten davon aufgrund der verstrichenen Zeit nicht mehr juristisch relevant.

## 5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Projektkonsortium besteht aus fünf Partnern, siehe Kapitel 0.3. Da drei der Partner ihren Sitz in Deutschland und die anderen zwei Partner ihren Sitz in Griechenland haben und in jedem Land Forschungsinstitute sowie Industriepartner vertreten waren, wurde die Zusammenarbeit so organisiert,

dass die Forschungsinstitute jeweils die nationale Koordinationsarbeit der in diesem Land vertretenen Partner übernommen hatten. Die Gesamtkoordination des Projektes oblag entsprechend der in Kapitel 0.3 beschriebenen „Planung und Ablauf des Vorhabens“ dem griechischen Partner CERTH. Die Koordination auf deutscher Ebenen hat der LUAT der Universität Duisburg-Essen übernommen.

Die Zusammenarbeit des GWI mit den Partnern zur Erfüllung seiner Forschungsaufgabe erfolgte in Abhängigkeit des Projektfortschrittes. Bei der Entwicklung des Simulationsmodells zur Abbildung und Analyse des Reformierungsprozesses erfolgte eine intensive Zusammenarbeit mit LUAT und dem Industriepartner MHPSE, da technischer Details zum Hybrid-SOFC-Anlage wichtige Modellparameter beeinflussen. Solche Details konnten nur auf Basis der Industrieerfahrung übermittelt werden, insbesondere da nach der Änderung des Vorhabens keine Versuchsreihen zur Generierung neuer Betriebsdaten durchgeführt werden konnten. Mit den bereits vorhandenen Daten von MHPSE konnten das Grundmodell verifiziert werden, welches wiederum eine solide Basis für die erweiterten Modelle darstellte. Die theoretischen, simulationsgestützten Untersuchungen von LUAT zum Gesamtsystem bestätigten die Ergebnisse aus der Modellentwicklung und Simulation des GWI.

Parallel dazu erfolgte bereits zu einem frühen Zeitpunkt der Austausch mit den griechischen Partnern in Bezug auf die Auswahl der Insel hinsichtlich der Modellierung des Inselbetriebes durch LUAT als auch in Hinblick auf die von GWI zu untersuchenden Brennstoffzusammensetzungen. Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen von LUAT sind vom griechischen Partner CERTH als Basis zur Verifizierung eigener Modellrechnungen mit einer weiteren Software übernommen worden. Somit konnten die Ausgangslagen beider Modellierungen harmonisiert werden. Die Ergebnisse des GWI zum Einfluss der Brennstoffzusammensetzung auf den internen Reformierungsprozess wurden ebenfalls allen Partnern zur Verfügung gestellt.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die technisch-wissenschaftlichen Aufgaben innerhalb des Projektes klar strukturiert waren und benötigte Zwischenergebnisse schnell und effizient ausgetauscht wurden. Durch die geringe Anzahl an involvierten Projektpartnern konnte am Anfang des Projektes durch diverse Projektmeetings eine direkte Kommunikation erreicht und aufrechterhalten werden. Die intensive Kommunikation und der Wissenstransfer konnten in dem letzten Jahr des Projektes aufgrund der Corona-Pandemie nur durch Web-Konferenzen und Telefonate fortgeführt werden.

## II. Ausführlicher Bericht

### 1. Verwendung der Zuwendung und erzielttes Ergebnis

Aus der Aufgabenstellung und Planung des Vorhabens, siehe Kapitel 0.3 ergaben sich für das Gas- und Wärme-Institut Essen e.V. (GWI) definierte Ziele. Neben unterstützenden Tätigkeiten im Sinne des Technologie- und Wissenstransfers über alle Arbeitspakete des Gesamtvorhabens, waren die zentralen Aufgaben des GWI in Arbeitspaket 3.2 formuliert. Übergeordnetes Ziel des AP 3.2 war die Untersuchung verschiedener Brennstoffe für ein Hybrid-SOFC-System. Die daraus abgeleiteten Teilaufgaben, die zu deren Erfüllung nötigen technisch-wissenschaftlichen Arbeiten auf Basis der Zuwendung und die erzielten Ergebnisse werden im Folgenden kurz dargestellt.

#### **AP 3.2 Untersuchung verschiedener Brennstoffe für ein Hybrid-SOFC-System (GWI)**

---

##### **Ziele:**

- Modellierung/Simulation des Reformierungs-Prozesses mit verschiedenen Gaszusammensetzungen in ChemCAD und Cosilab.
- Zusammenfassung der Ergebnisse in Form einer „Datenbank“

##### **Zuwendungen:**

Zur Erreichung der Ziele wurden folgende Teilaufgaben identifiziert und umgesetzt:

- Aufbau der Wissensbasis
  - Grundlagen der katalytischen Oberflächenreformierung; Recherche bzgl. der katalytischen Oberflächenreformierung für die interne Reformierung von Kohlenwasserstoffen in Hochtemperatur-Brennstoffzellen
  - Prozessbedingungen, Reaktionsbedingungen katalytischen Oberflächenreformierung in Hochtemperatur-Brennstoffzellen
  - Einfluss von Temperatur, Druck, Reaktionsgeschwindigkeit, Gasbeschaffenheit auf die Reformierungseffizienz
- Entwicklung eines konzeptionellen Ansatzes zur Abbildung der katalytischen Oberflächenreformierung entsprechend der internen Reformierung in Hochtemperatur-Brennstoffzellen
- Modellierung des BZ-(Reformierungs-)Prozesses
  - optimal: mit Betriebsdaten von MHPS
  - alternativ: mit eigenen Annahmen
- Simulation des Prozesses mit bis zu 10 verschiedenen Gaszusammensetzungen in ChemCAD und Cosilab.
- Bestimmung der relevante Gaszusammensetzungen: 3 europäische H-Gase; 3 LNG-Qualitäten, 4 Wasserstoff-Konzentrationen
- Zusammenfassung der Ergebnisse in Form einer „Datenbank“

Zur Bearbeitung der Aufgaben wurden zwei festangestellte wissenschaftliche Mitarbeiterinnen und ein Mitarbeiter eingesetzt, welche anteilig entsprechend ihren Fachkompetenzen in dem Projekt gearbeitet haben. Die Haupttätigkeiten bestanden zum einen in der Modellierung und Simulation und zum anderen in der Aufbereitung der Ergebnisse für die Partizipation der Verbundpartner und der Öffentlichkeit.

**Ergebnisse:**

Das entwickelte Konzept und die Modelle für die Abbildung und Bewertung des Reformierungsprozesses im Gleichgewichtszustand ist sowohl für reine Gase als auch für Gasgemische validiert und anwendbar. Das Konzept und Modell zur Simulation der Reaktionskinetik ist validiert, aber aufgrund der Komplexität nur für reine Gase, wie bspw. CH<sub>4</sub>, anwendbar.

---

**Koordination und Kommunikation / Dissemination der Forschungsergebnisse**

**Ziele:**

- Unterstützenden Tätigkeiten im Sinne des Technologie- und Wissenstransfers innerhalb des Verbundprojektes über alle Arbeitspakete
- Dissemination der Forschungsergebnisse

**Zuwendungen:**

Der Technologie- und Wissenstransfers erfordert neben dem Personaleinsatz in Form einer festangestellten wissenschaftlichen Mitarbeiterin vor allem die Verwendung der Zuwendung für Reisekosten. Bedingt durch die Corona-Pandemie haben jedoch sowohl die Projekttreffen als auch das Midterm-Meeting in Berlin (2020) und die geplanten internationale Konferenzen nicht stattgefunden. Da diese Mittel zum größten Teil nicht in Anspruch genommen worden sind ist nur ein Teil der vorgesehenen Reisekosten in Verbindung mit den Projektmeetings in den Jahren 2018 und 2019 abgerechnet worden. Die übrigen Reisekosten wurden auf entsprechenden Antrag des Gas- und Wärme-Instituts Essen e.V. an das PTJ auf Personalausgaben umgewidmet.

**Ergebnisse:**

Von Seite der deutschen Partner sind keine Projektergebnisse auf internationale Konferenzen oder bei Fachtagungen vorgestellt worden.

Weitere Aktivitäten zur Dissemination der Ergebnisse waren:

- Unterstützung beim Aufbau der Website für SUNIES (erstellt von CERTH)
- Unterstützung bei der Erstellung eines Steckbriefes für BMBF (erstellt von LUAT & MHPSE)
- Unterstützung bei der Erstellung einer Broschüre (für Thessaloniki International Fair)

## 2. Positionen und Nachweise

Im Rahmen des Änderungsantrags (März 2019) wurden die Sachmittel vollständig in Personalkosten umgewidmet, da keine Versuchsanlage zur Verfügung stand und infolgedessen keine Investition in Hardware, wie z.B. Messtechnik, notwendig war. Im Folgenden wird auf den Kostenplan gem. des Änderungsbescheids (Juli 2019) eingegangen.

Die Personalausgaben des zahlenmäßigen Nachweises beinhaltet die Personalmittel der wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter (LG 2), die mit dem Aufbau der Simulationsmodelle und der Durchführung der Simulationsstudien betraut waren. Der Aufbau der Simulationsmodelle zur Abbildung der katalytischen Oberflächenreformierung beinhaltete insbesondere die Zusammenstellung, Sichtung und Aufbereitung relevanter Reaktionsmechanismen, Auslegungsgrößen und Betriebsdaten zu der internen Reformierung in tubularen SOFC-Systemen entsprechend dem Hybrid-SOFC-System von MHPSE. Neben den der konzeptionellen Entwicklung des Modellierungsansatzes für den Gleichgewichtszustand wurde eine umfangreiche Recherche zur Abbildung und Simulation der Reaktionskinetik durchgeführt. Das generierte Wissen ist in beiden Fällen erfolgreich in die Modelle integriert worden, sodass der Einfluss von Temperatur, Druck, Katalysator und Gasbeschaffenheit auf die Reformierungseffizienz im Rahmen einer Simulationsanalyse durchgeführt werden konnte.

Die Reisekosten ergeben sich aus den Kosten für Anreise, Unterkünfte und Spesen der Projekttreffen. Ein Teil der Reisekosten gem. des genehmigten Änderungsantrags wurden im Jahr 2020 in Personalmittel umgewidmet. Dies war darin begründet, dass die geplanten Projekttreffen sowie Fachveranstaltungen zur Präsentation der Projektergebnisse bedingt durch die Corona-Pandemie nicht stattfinden konnten. Die höheren Personalmittel sind darin begründet, dass durch die Pandemie zudem ein größerer Koordinations- und Kommunikationsaufwand erforderlich war und neue Projektorganisationsstrukturen etabliert werden mussten.

## 3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Alle formulierten Aufgaben des Gas- und Wärme-Instituts Essen e.V. gemäß des Arbeitsplans nach dem Änderungsantrag wurden erfolgreich bearbeitet. Es waren keine zusätzlichen finanziellen Ressourcen für das Projekt nötig. Die durchgeführten Arbeiten waren zur Zielerreichung notwendig und angemessen.

Speziell die Untersuchungen zum Einfluss der Prozess- und Reaktionsbedingungen auf die Reformierungseffizienz waren elementar für das Verständnis der katalytischen Oberflächenreformation in tubularen SOFC, zur Entwicklung des Modells und zur Ableitung von Optimierungsansätzen und Handlungsempfehlungen. Der Arbeitsaufwand ergab sich nicht nur aus der Vielzahl der zu berücksichtigenden Einflussgrößen – Temperatur, Druck, Dampfzahl, Gasbeschaffenheit und Reaktionsgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Katalysators – sondern vor auch durch deren Korrelationen untereinander.

Weiterhin stellt die numerische Abbildung der chemischen Reaktionskinetik eine anspruchsvolle Aufgabe dar. Dies ergibt sich insbesondere aus der hohen Komplexität des Reaktionsschemas, welches durch eine Vielzahl sich gegenseitig komplex beeinflussender Größen und dynamischer Vorgänge bedingt ist.

#### 4. Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit

Die modell- und simulationsbasierten Ergebnisse des Vorhabens können zur (Weiter-)Entwicklung von hocheffizienten Hybrid-SOFC-Systemen beitragen, welche zur Deckung des Energiebedarfs griechischer Inseln als auch ähnlichen geografischen oder strukturellen Inselsystemen eingesetzt werden können. Dazu sind allerdings weitere Betriebserfahrungen und -daten insbesondere zu den verschiedenen Betriebszuständen und -arten in Kombination mit den Ergebnissen der Rechenmodelle erforderlich. Nur so kann der Betrieb hybrider SOFC-Systeme im Zusammenhang mit den realen lokalen Anforderungen und individuellen Bedarfsszenarien valide bewertet und Lösungen für die notwendigen Weiterentwicklungen hervorgebracht werden. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse dieses Projektes wird die anschließende detaillierte Untersuchung der „optimalen“ Systemvariante bzw. -kombinationen ermöglicht. Das Skalieren der Anlage in Bezug auf die Leistungsklasse kann weitere Fragestellungen aufkommen lassen, die von hoher Relevanz für die zielorientierte Weiterentwicklung solcher adaptierten Konzepte sind. Gleiches gilt für die Betriebserfahrungen und -daten bisheriger Pilotanlagen und insbesondere für Versuchsreihen mit zukünftigen, für den Europäischen Markt adaptiertem Demonstrationssystemen.

Weiterhin können die Ergebnisse des Projekts „SUNIES“ dem Industriepartner **MHPSE** die Weiterentwicklung von hybriden SOFC-Systemen für den kommerziellen und industriellen Einsatz ermöglichen. Das Projekt dient der Weiterentwicklung sowohl zur Optimierung des bestehenden Anlagenkonzepts als auch Neuentwicklung eines Produkts, das an die speziellen Anforderungen des Europäischen Markts und speziell der geografischen Inseln angepasst ist. Das Hybrid-SOFC-System kann aufgrund des hohen elektrischen Wirkungsgrades gegenüber anderen vergleichbaren Technologien zur Bereitstellung von Strom und Wärme ein konkurrenzfähiges Produkt werden. Konventionelle Technologien – wie z. B. Dieselaggregate – können ersetzt und so eine deutliche Primärenergie- und Treibhausgas-minderung erreicht werden. Dies ist im Hinblick auf die geplante Versorgung von Inseln mittels LNG (Flüssig-Erdgas; engl. liquefied natural gas) von besonderer Bedeutung. Die Möglichkeit, ein solches hybrides System unter bestimmten Bedingungen auch im Elektrolyse-Betrieb (SOEC-Modus) fahren zu können, könnte zukünftig einen zusätzlichen ökologischen als auch systemischen Nutzen bedeuten. Mit Blick auf die Volatilität der regenerativen Energieerzeugung aus Wind und Sonne bedeuten kann der Wechsel vom SOFC- in den SOEC-Modus zur Entlastung des Stromnetzes beitragen, wobei gleichzeitig regenerativer Wasserstoff (H<sub>2</sub>) erzeugt wird.

In Verbindung mit den untersuchten Konzepten können Lösungsansätze für die Energieversorgung von Inseln entstehen, die für den Elektrizitätsbetreiber **PPC** von besonderer Bedeutung sein können. Zusätzlich können solche „durchgängigen“ Konzepte weitere kommerzielle Ansätze für andere Inselregionen – sowohl im geografischen als auch im systemischen Sinn – in Europa bedeuten.

Durch die Mitarbeit an dem Forschungsprojekt fließen neue fundierte Erkenntnisse und Entwicklungen direkt in die Ausbildungsarbeit der **Universität Duisburg-Essen** ein, sodass hierdurch eine Rekrutierung von qualifiziertem wissenschaftlichem Personal für die Industrie sichergestellt wird. An der Universität Duisburg-Essen konnte in diesem Zuge ein wissenschaftlicher Mitarbeiter durchgehend beschäftigt werden und es sind darüber hinaus zwei studentische Abschlussarbeiten entstanden.

Die Beteiligung des **Gas- und Wärme-Instituts Essen e.V.** wirkt positiv auf die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten des Projektes und des Produktes, da die entwickelten Modelle sowie die durchgeführten Simulationen und Analysen die Ableitung von Optimierungs- und Entwicklungspotenzialen für das Hybrid-SOFC-System von MHPS ermöglichen. Es ist davon auszugehen, dass die im Vorhaben analysierte und sich als geeignet erweisenden Forschungs- und Entwicklungsansätze von MHPSE und PPC genutzt werden, um eine nachhaltige, integrierte Energieversorgung für griechische Inseln und auch strukturelle Inselsysteme zu realisieren. Zudem trägt das generierte Knowhow – sowohl im methodischen als auch im fachlichen Kontext der Modellierung der katalytischen Oberflächenreformierung – zur Stärkung der wissenschaftlichen Kompetenzen der Forschungspartner und insbesondere des GWI bei. Entsprechend wurde die Erweiterung der Kapazitäten im Bereich der Systemsimulation am GWI sowie die Erweiterung der fachlichen Kompetenz in den genannten Bereichen erzielt. Darüber hinaus bieten die Ergebnisse des Projekts eine hohe wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit. Die erarbeiteten Ergebnisse können von der Wirtschaft und wissenschaftlichen Institutionen herangezogen werden, um adaptierte Versorgungskonzepte auf Basis der Hybrid-SOFC-Technologie bewerten und validieren zu können. Weiter hat das Verbundprojekt zur Intensivierung und zum Ausbau des wissenschaftlichen Netzwerkes in der deutsch-griechischen Forschungslandschaft beigetragen.

Die **Universität Duisburg-Essen** und das **Gas- und Wärme-Institut Essen e.V.** profitieren von den Ergebnissen, da auf der Basis der Ergebnisse von SUNIES weitere Projekte durchgeführt werden können. Dies gilt auch für die anderen Partner des Projektes. In diesem Zusammenhang war inzwischen ein Konsortium – bestehend aus mehreren Instituten der Universität Duisburg-Essen, dem Zentrum für Brennstoffzellen-Technik GmbH und dem GWI – erfolgreich im Rahmen des 5. Wettbewerbs „Forschungsinfrastrukturen“ des Landes NRW (EFRE). Das Verbundprojekt KWK.NRW 4.0 widmet sich unter anderem der Analyse von Hybrid-SOFC-Systemen als KWK-Anlage im deutschen Energiesystem sowie dem Bau und Demonstrationsbetrieb eines solchen Systems am Standort des GWI in Essen.

## 5. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Im Hinblick auf die Forschungsaufgabe des GWI – die Modellierung der katalytischen Oberflächenreformierung sowohl im Gleichgewichtszustand als auch unter Berücksichtigung der Reaktionskinetik – wurden im Durchführungszeitraum des Projekts keine aktuelleren Forschungsergebnisse von Dritten veröffentlicht. Vielmehr wurden die öffentlich verfügbaren Literaturquellen zum Aufbau des Knowhows und zur Validierung der Ergebnisse genutzt.

- Reaktionskinetik der Oxidation und Reformierung von H<sub>2</sub>, CO und CH<sub>4</sub> über Platinkatalysatoren; L. Kahle; Fakultät für Chemie und Biowissenschaften, Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – Universitätsbereich; 2013
- Verfahrenstechnische Optimierung und Leistungsskalierung eines Festoxid-Brennstoffzellensystems mit Hilfe multiphysikalischer Modellierung und experimenteller Daten; S. Wahl; Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik der Universität Stuttgart; 2015
- Entwicklung eines Bioethanol-Dampfreformers zur Erzeugung von Wasserstoff für den Einsatz in einem PEM-Brennstoffzellen-BHKW; T. Rampe; Universität Duisburg-Essen; 2004
- Eine praktische Anwendung von netzautarken Erzeugungsanlagen auf Basis Erneuerbarer Energien und Strom- und Wärmespeicher für kleine Siedlungen; I. Shalaginov; Fakultät für

Maschinenbau, Elektrotechnik und Wirtschaftsingenieurwesen der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg; 2014

- Dynamic-Characteristics Analysis of an Independent Microgrid by a SOFC Triple Combined Cycle; S. Obara; Kitami Institute of Technology, Power Engineering Lab., Dep. of Electrical and Electronic Engineering; 2015
- Effiziente Verstromung von Biogas in einem SOFC-System – Entwicklung, Charakterisierung und Betriebsverhalten; J. Oelze; Fakultät für Energie- und Wirtschaftswissenschaften der Technischen Universität Clausthal; 2016
- Power to Gas – eine Systemanalyse. Markt- und Technologiescouting und -analyse; H. Steinmüller et al; Linz, Loeben, Wien; 2014
- Kinetic and modelling study of methane steam reforming over sulfide nickle catalyst on a gamma alumina support; D. L. Hoang et al.; Chemical Engineering Journal 112; 2005; 1-11
- Wärmehaushalt einer Karbonat-Brennstoffzelle zur Wasserstoffherstellung für eine Polymer-elektrolyt-Brennstoffzelle; L. Adamek; Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen; 2006
- First law energy analysis of thermochemical waste-heat recuperation by steam methane reforming; D. Pashchenko; Samara State Technical University; Energy 143 (2018) 478-487
- Simulation eines SOFC-Brennstoffzellensystems mit Anodenabgasrückführung; S. Chen; Technische Universität Braunschweig; Band 19; Cuvillier Verlag
- Kinetics, catalysis and mechanism of methane steam reforming; J. A. Liu; Faculty of the Worcester Polytechnic Institute; Department of Chemical Engineering; 2006
- Extremely High-efficiency Thermal Power System-Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) Triple Combined-cycle System; Mitsubishi Heavy Industries Technical Review Vol. 48 No. 3; September 2011
- Demonstration of SOFC-Micro Gas Turbine (MGT) Hybrid Systems for Commercialization; Mitsubishi Heavy Industries Technical Review Vol. 52 No. 4; December 2015

Aktuellere Forschungsarbeiten, die die sich auch mit der Modellierung von Reformierungsprozessen, aber nicht speziell mit der katalytischen Oberflächenreformierung in tubularen SOFC-Systemen befassen sind:

- Thermodynamische Analyse eines Ethanol SOFC Range Extender Systems; B. Reiter; Technischen Universität Graz; 05/2020
- Katalysatorentwicklung für die Dehydrierung von Perhydro-Dibenzyltoluol; F. Auer; Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg; 06/2020
- Rh promoted and ZrO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> supported Ni/Co based catalysts: High activity for CO<sub>2</sub> reforming, steam–CO<sub>2</sub> reforming and oxy–CO<sub>2</sub> reforming of CH<sub>4</sub>; A. Al-Fatesh et al.; International journal of hydrogen energy; 2018

Die Untersuchung von Brennstoffzellen und Wasserstoffelektrolysen ist derzeit Gegenstand der Forschung bei mehreren deutschen Forschungsinstituten. Es zeichnet sich hierbei eine Forschungslinie ab, bei der sich das Forschungszentrum Jülich auf die Forschung einer reversiblen wasserstoffbetriebenen Festoxidbrennstoffzelle fokussiert. Dabei wurde ein rSOC-System mit zwei Betriebsmodi entwickelt, das im Elektrolysebetrieb den überschüssigen Strom in Wasserstoff umwandelt. Dieser wird

zwischen gespeichert und anschließend bei Strombedarf im Brennstoffzellen betrieb rückverstromt.<sup>16</sup> Aktuellere Forschungsergebnisse im Zuge der Forschungsbestrebungen dieser Unternehmen, insbesondere während der Laufzeit dieses Forschungsprojektes, sind nicht offiziell zugänglich, da detaillierte Ergebnisse als Know-How dieser Unternehmen in der Regel nicht explizit veröffentlicht werden.

## 6. Veröffentlichung der Ergebnisse

Es gab bis dato keine Veröffentlichung von Forschungsergebnissen durch die Partner des deutschen Verbundes. Und weil - Corona bedingt - sowohl das Midterm-Meeting in Berlin (2020) als auch die Messe in Thessaloniki (Thessaloniki International Fair) nicht stattgefunden haben, konnten auch die vorbereitete Präsentation und die Broschüre nicht publiziert werden.

Ein Teil der Forschungsergebnisse wurde vom griechischen Partner CERTH auf der 8th Global Conference on Global Warming (GCGW-2019) April 22-25, 2019 Doha, Qatar vorgestellt. Dieselben Ergebnisse wurden auch als Veröffentlichung in „International Journal of Hydrogen Energy“ publiziert.

### Conference paper

“Technical assessment of power production using SOFC and LNG for non-interconnected island cases.”  
8th Global Conference on Global Warming (GCGW-2019) April 22-25, 2019, Doha, Qatar  
*C. Samlis, K. Manou, K. Atsonios, A. Nikolopoulos, K. Sfetsioris, A. Mitsotakis, P. Grammelis.*

### Journal Paper

“Technical assessment of LNG based polygenerationsystems for non-interconnected island cases”.  
International Journal of Hydrogen Energy.  
*C. Samlis, K. Atsonios, K. Manou, A. Nikolopoulos, K. Sfetsioris, A. Mitsotakis, P. Grammelis.*

Zur Verbreitung von Ergebnissen und Ereignissen in Zusammenhang mit dem Vorhaben wurde vom griechischen Partner CERTH eine Internetseite aufgebaut: [www.sunies-fuelcell.eu](http://www.sunies-fuelcell.eu)

---

<sup>16</sup> Matthias Helmut Frank: Reversible wasserstoffbetriebene Festoxidzellensysteme; Dissertation; RWTH Aachen University; Jülich: Forschungszentrum Jülich GmbH, Zentralbibliothek, Verlag 2019