

# Sachbericht zum Verwendungsnachweis

## Teil I: Kurzbericht

### rSOC (b)

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)	<b>Förderkennzeichen:</b> 03ZZ0735C
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Zwanzig20 - HYPOS - Verbundvorhaben: Entwicklung und Validierung eines reversiblen SOC-Systems TP3: Experimentelle Untersuchungen am Elektrolysemodul und Entwurf von Betriebsführungsstrategien durch dynamische Simulation	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> Ursprünglich beantragt: 01.09.2018 – 31.08.2020 Kostenneutral verlängert: 01.09.2018 – 31.12.2020	
<b>Berichtszeitraum:</b> 01.09.2018 – 31.12.2020	

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

Die Verantwortung für den Inhalt dieser  
Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

## **Ursprüngliche Aufgabenstellung sowie wissenschaftlicher/technischer Stand an den angeknüpft wurde**

Vor Projektbeginn war am DLR ein transientes eindimensionales SOC-Zell-Modell entwickelt worden und in der Entwicklungsumgebung Dymola mit der Sprache Modelica implementiert. Das Zellmodell war zu einem Stack-Modell erweitert und für einen Stack mit 10 Zellen anhand von Versuchen im Ofen validiert. Es bildet die elektrochemischen und chemischen Reaktionen kinetisch ab und liefert Temperatur-, Stromdichte und Konzentrationsprofile über der Zeit. Insbesondere aufgrund der detaillierten Wiedergabe der elektrochemischen Prozesse war das Modell nicht ohne Modifikationen in einer verfahrenstechnischen Systemsimulation, die erstellt werden sollte, mit mehreren hundert Zellen einsetzbar. Weitere Teile des Modells waren nicht vorhanden.

Zur Erstellung eines SOEC-Modul-Modells musste unter anderem das Stack-Modell vereinfacht werden, ohne seine Funktionalität zu verringern. Weiter mussten die benötigten Komponenten des Moduls (u. a. Brenngas- und Luftverteilungsrohre, Ein- und Ausgangsflansche, Isolationsblöcke sowie elektrische Verbindungen) identifiziert und implementiert/integriert werden. Es sollte eine transiente Prozesssimulation der Sunfire Hotbox erstellt werden, die aus Stack Unit (SU) und Gas Processing Unit (GPU) sowie BoP-Komponenten besteht. Auch Prozessregler mussten entwickelt und implementiert werden. Letztlich sollte die Simulation mit experimentellen Daten parametrisiert und validiert werden.

Insbesondere zur Validierung der zu erstellenden Modelle sollten am DLR Experimente erfolgen. Für experimentelle Untersuchungen an SOC-Modulen im Brennstoffzellenmodus (SOFC) mit elektrischer Leistung bis 25 kW war eine Testinfrastruktur vorhanden. Diese musste für den Elektrolysebetrieb projektspezifisch erweitert werden.

## **Ablauf**

Am Ende des Jahres 2019 hat das DLR Verzögerungen beim Mittelabruf kommuniziert. Dies wurde durch den PTJ am 04.12.2019 per email akzeptiert. Am 28. Juli 2020 hat das DLR eine kostenneutrale Verlängerung beantragt. Dies wurde durch

den PTJ am 04.12.2019 per email akzeptiert. Ursache für die geplante Verlängerung war, dass noch Arbeiten in den Teilarbeitspaketen 3.2.DLR.2 „Experimente Stack Unit“ und 3.4.DLR „Validierung Gesamtsystem“ fertigzustellen waren. Weiter wurden durch Sunfire Änderungen an den Gesamtvorhabenzielen beantragt und durchgeführt. Dies hatte für die übergeordnete Zielerreichung des DLR keine Konsequenzen, da die im Vorwege formulierten Ziele mit kleinen Anpassungen an die Arbeiten bei Sunfire erreicht werden konnten.

### **Wesentliche Ergebnisse**

Die Vereinfachung des Stack-Modells wurde abgeschlossen. Es mussten jedoch einige Details eingeführt und beibehalten werden, um die Genauigkeit der Abbildung der Experimente nicht zu gefährden. Die Stacks wurden im Modell zu Türmen gestapelt und deren Wärmeübertragungsmöglichkeiten verbunden. Weitere o. g. Komponenten wurden ergänzt, um ein SOEC-Modul-Modell bzw. weiter ein Modell des Gesamtprozesses (Hotbox-Modell) inklusive Regelungsstruktur und -parametrierung entstehen zu lassen. Parametrierungsdaten wurden hauptsächlich den vorhandenen Datenblättern und Datenbanken entnommen. Die Validierung erfolgte anhand von Messdaten, die bei Versuchen bei Sunfire und dem DLR erzielt wurden. Das Modell kann das Verhalten der einzelnen Stacks hinreichend genau sowohl im regulären Betrieb als auch im anspruchsvollen (hochtransienten) Lastabwurf fall wiedergeben.

Für die Erreichung der erwähnten experimentellen Ergebnisse wurde der Teststandumbau erfolgreich abgeschlossen. Dabei ist besonders die erfolgreiche Umsetzung der Möglichkeit des Übergangs zwischen den Betriebsmodi „Brennstoffzelle“ und „Elektrolyse“ hervorzuheben. Insbesondere diese Möglichkeit hat zu den experimentellen Ergebnissen geführt, die für die Parametrierung und Validierung notwendig waren.

Bei der abschließenden „Validierung am Gesamtsystem“ wurde seitens DLR ein besonderes Augenmerk auf Strategien für eine möglichst „stackschonende“ dynamische Betriebsführung gelegt. Dazu wurden insbesondere die Umschaltvorgänge zwischen Elektrolyse- und Brennstoffzellenbetrieb und eine innovative Möglichkeit des Elektrolyse-Teillastbetriebs ohne Temperaturveränderung untersucht.

M. P. Heddrich, M. Tomberg

DLR Stuttgart, Institut für Technische Thermodynamik

Förderkennzeichen 03ZZ0735C

Sachbericht Teil I: Kurzbericht

Stuttgart, 29.06.2021

---

Ort, Datum

Marius Tomberg

Digital signiert von Marius Tomberg  
DN: c=DE, o=DLR-ST/ET/EE, ou=DLR, cn=Marius  
Tomberg, email=marius.tomberg@online.de  
Grund: Ich bin der Verfasser dieses Dokuments  
Ort: Stuttgart  
Datum: 2021.07.12 15:47:43+02'00'  
Font PDF Reader Version: 11.0.0

---

Marius Tomberg (Projektleiter)

# Sachbericht zum Verwendungsnachweis

## Teil II: Eingehende Darstellung

### rSOC (b)

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)	<b>Förderkennzeichen:</b> 03ZZ0735C
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Zwanzig20 - HYPOS - Verbundvorhaben: Entwicklung und Validierung eines reversiblen SOC-Systems TP3: Experimentelle Untersuchungen am Elektrolysemodul und Entwurf von Betriebsführungsstrategien durch dynamische Simulation	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> Ursprünglich beantragt: 01.09.2018 – 31.08.2020 Kostenneutral verlängert: 01.09.2018 – 31.12.2020	
<b>Berichtszeitraum:</b> 01.09.2018 – 31.12.2020	

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

Die Verantwortung für den Inhalt dieser  
Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

## Inhalt

0	Besondere Vorkommnisse .....	3
1	Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und anderer wesentlicher Ereignisse.....	7
1.1	TAP2.1.DLR Variantenvergleich Wirkungsgradoptimierung .....	7
1.2	TAP2.3.DLR Bewertung Systemkonzepte .....	8
1.3	TAP3.1.DLR.1 SOEC-Modul-Modell.....	8
1.4	TAP3.1.DLR.2 Hotbox-Modell .....	16
1.5	TAP3.1.DLR.3 Parametrierung und Validierung Hotbox-Modell.....	20
1.6	TAP3.2.DLR.1 Projektspezifische Teststandanpassung .....	23
1.7	TAP3.2.DLR.2 Experiment Stack Unit.....	28
1.8	TAP3.4.DLR Validierung am Gesamtsystem.....	31
<b>1.9</b>	<b>Weitere Ereignisse</b> .....	<b>34</b>
2	Vergleich des Vorhabenstands mit der ursprünglichen (bzw. mit Zustimmung des ZG geänderten) Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung .....	35
2.1	Meilensteine .....	35
2.2	Umsetzung von Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung .....	35
3	Fortschreibung des Verwertungsplans .....	35
3.1	Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte .....	35
3.2	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende .....	36
3.3	Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende	36
3.4	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit.....	37

## 0 Besondere Vorkommnisse

Verschiedene Verzögerungen haben zu einem verzögerten Mittelabruf und zu einer kostenneutralen Verlängerung des Vorhabens geführt. Diese sollen hier kurz widergegeben werden, damit bei der Darstellung der Ziele und Ergebnisse in Abschnitt 1 nicht auf Verzögerungen und Verschiebung eingegangen werden muss.

**Am Ende des Jahres 2019** hat das DLR Verzögerungen beim Mittelabruf kommuniziert. Dies wurde durch den PTJ am 04.12.2019 per email akzeptiert.

### **Begründung der Verzögerung durch das vorher abzuschließende, grundfinanzierte Projekt**

- Der Teststand wurde für ca. 800 k€ Invest Grundfinanz aufgebaut.
- Brennstoffzellenbetrieb eines Moduls sollte gezeigt werden. Danach sollte der Umbau für das Projekt rSOC(b) erfolgen.
- Der Lieferant des Brennstoffzellenmoduls hat ca. sechs Monate zu spät geliefert.
- Bei Inbetriebnahme des Teststands sind folgende Fehler/Probleme aufgetreten:
  - Ausfall des Brenngasheizers, der das Gas auf eine Eintrittstemperatur von ca. 600-800 °C vorheizen muss. Reparaturzeit: zwei Monate.
  - Ausfall der elektrischen Lasten. Reparaturzeit: ein Monat.
- Während des Betriebs des Teststands sind folgende Fehler/Probleme aufgetreten:
  - Undichtigkeiten an Hochtemperaturflanschen. Reparaturzeit aufgrund der langen Lieferzeiten für HT-Stahl: zwei Monate
  - Thermische Isolation der Rohrleitungen zwischen des Gasheizern und dem Brennstoffzellenmodul nicht ausreichend. Neues Konzept: ein Monat.
  - Abstand zwischen Gasheizern und Brennstoffzellenmodul (Rohrleitungen) zu weit. Führt zu weiteren thermischen Problemen. Konnte nur teilweise behoben werden.

- Wasserkondensation im Wärmeübertrager Austritt Brenngasseite. Konzeptänderung Kondensationsabführung notwendig. Aufwand: ein Monat.

Hinweise: die zeitlichen Aufwände konnten teilweise parallel bearbeitet werden und haben sich nicht in allen Fällen aufaddiert.

### **Begründung geringerer Personalaufwand Simulation (3.1.DLR)**

- Im Vorwege befürchtete numerische Probleme sind nicht zum Tragen gekommen.
- Ohne den Input aus den experimentellen Ergebnissen konnten einige Arbeiten noch nicht gestartet werden.
- Die personellen Kapazitäten dafür sind im kommenden Jahr vorhanden.

### **Begründung erhöhter Personalaufwand Experiment (3.2.DLR)**

- Konzeptänderung Isolation, da die thermischen Verluste im vorherigen Projekt zu hoch waren.
- Konzeptänderung Rohrleitungen, da die thermischen Verluste im vorherigen Projekt zu hoch waren.
- Test der elektrischen Lasten/Quellen, da diese im vorherigen Projekt mehrfach defekt waren und dies im Vorwege ausgeschlossen werden soll.
- Einbindung der neuen Algorithmen für die Teststandsteuerung/-regelung. Die Annahme, dass die Experimente manuell gesteuert werden können hat sich als zu optimistisch herausgestellt. Für die meisten Betriebspunkte müssen Regler implementiert und bei der Inbetriebnahme aufwändig parametrisiert werden. Dies gilt insbesondere für die Gastemperaturen am Eintritt.
- Einzelne Betriebspunkte benötigen weit längere Zeit um stationär zu werden. Daher ist für die gleiche Anzahl an Betriebspunkten eine längere Versuchszeit anzusetzen.

**Am 28. Juli 2020** hat das DLR eine kostenneutrale Verlängerung beantragt. Dies wurde durch den PTJ am 04.12.2019 per email akzeptiert.



Ursache für die geplante Verlängerung war, dass noch Arbeiten in den Teilarbeitspaketen 3.2.DLR.2 „Experimente Stack Unit“ und 3.4.DLR „Validierung Gesamtsystem“ fertigzustellen waren.

### **TAP3.2.DLR.2**

Im TAP 3.2.DLR.2. waren Versuche an der Sunfire Stack Unit zur Parametrierung und Validierung des SOEC-Modul-Modells (3.1.DLR.1) und zum Verständnis des Betriebsverhaltens durchzuführen. Die Experimente zur Parametrierung und Validierung des SOEC-Modul-Modells waren bereits abgeschlossen und ausgewertet. Allerdings wurden die experimentellen Daten bis dahin vornehmlich im Hinblick auf die Validierung des SOEC-Modul-Modells ausgewertet. Eine noch tiefergehende Analyse dieser Messdaten war geplant, verzögerte sich allerdings. Weiterhin waren die Experimente sowie deren Auswertung und Aufbereitung für das Verständnis des Betriebsverhaltens und für die Entwicklung von Betriebsstrategien noch nicht vollständig abgeschlossen.

### **TAP3.4.DLR**

Die Erarbeitung von Betriebs- und Regelungsstrategien im TAP 3.4.DLR für eine möglichst „stackschonende“ dynamische Betriebsführung war noch nicht abgeschlossen.

Dazu mussten die durch die Experimente in TAP 3.2.DLR.2 identifizierten, kritischen Betriebsabläufe mit Hilfe des SOEC-Modul-Modells untersucht und die notwendigen Anpassungen an den Betriebs- und Regelungsstrategien formuliert werden. Im Anschluss sollten diese durch die noch fehlenden Experimente in TAP 3.2.DLR.2. validiert und iterativ verbessert werden, sodass das TAP erfolgreich abschlossen werden konnte.

- Die Verzögerungen waren in beiden TAP größtenteils auf die COVID-19-Pandemie zurückzuführen. Nachdem die Auswirkungen anfangs als nicht gravierend angesehen wurden, führte der am DLR weiterhin praktizierte

„Minimalbetrieb“ bzw. der dann ausgerufenen „Normalbetrieb mit Einschränkungen“ zu Verzögerungen.

- Durch die räumliche Trennung von Labor- und Büroarbeit verzögerte sich die Auswertung der experimentellen Daten, da diese nicht parallel zu den Experimenten durchgeführt werden konnten und die Bearbeitung der großen Datenmengen im Homeoffice zeitintensiv war. Dadurch kam es bereits zu einer Verzögerung von ca. vier Wochen. Während der zweiten Messkampagne sollte es zu Verzögerungen in ähnlicher Größenordnung kommen.
- Die Simulationsarbeiten für die Entwicklung von Regelungsstrategien hatten sich als sehr rechenintensiv herausgestellt. Leider ist der leistungsstarke Rechner, der für solche Arbeiten vorhanden ist, nicht von außerhalb des DLR zu nutzen. Daher dauerte die Simulation länger als anfangs geplant und deren Fertigstellung verzögerte sich um ca. einen Monat. Dies führte dazu, dass die letzten geplanten Experimente, die auf den Simulationsarbeiten basieren, noch nicht durchgeführt werden konnten.
- Durch die Verzahnung beider TAP und die Verzögerungen in diesen kam es immer wieder zu Leerlaufzeiten im jeweils anderen TAP, die sich auf weitere 4 Wochen kumulierten.

Damit ergab sich für das DLR der dargestellte geänderte Arbeitsplan. Der ursprüngliche Plan ist in grau dargestellt. Die hellblauen Bereiche stellen den kommunizierten Planungsstand im Q4-2019 dar, die dunkelblauen Bereiche die notwendige Verlängerung.

		Projektjahr	J1												J2												J3										
AP-Nr.	AP-Titel	Projektquartal	Q1				Q2				Q3				Q4				Q5				Q6				Q7				Q8				Q9		Q10
		Projektmonat	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28							
		Kalenderjahr	2018				2019												2020																		
		Kalendermonat	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							
Ursprüngliche Planung	2.1.DLR	Variantenvergleich Wirk.	0.5																																		
	2.3.DLR	Bewertung Systemkonzepte					0.5																														
	3.1.DLR.1	SOEC-Modul-Modell				6																															
	3.1.DLR.2	Hotbox-Modell													6																						
	3.1.DLR.3	Parametr., Valid. Hotbox-Modell																									6										
	3.2.DLR.1	Projektspez. Teststandanpass.					2																														
	3.2.DLR.2	Experiment Stack Unit													5.5																						
	3.4.DLR	Validierung Gesamtsystem																														2					
Planungszeitpunkt Q3-2020	2.1.DLR	Variantenvergleich Wirk.					0.25																														
	2.3.DLR	Bewertung Systemkonzepte																																			
	3.1.DLR.1	SOEC-Modul-Modell												2												2											
	3.1.DLR.2	Hotbox-Modell													0.5											1		2									
	3.1.DLR.3	Parametr., Valid. Hotbox-Modell																														5					
	3.2.DLR.1	Teststand Planung, Bestellung													0.75																						
	3.2.DLR.1	Vortest Elektronik; Regelung																																			
	3.2.DLR.1	Umbau																																			
	3.2.DLR.2	Experiment Stack Unit																																			
	3.4.DLR	Validierung Gesamtsystem																																			

Tabelle 1: Letztgültiger Arbeitsplan

# 1 Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und anderer wesentlicher Ereignisse

Im Folgenden wird zu allen Teilarbeitspaketen mit DLR-Beteiligung berichtet. Dabei werden die Ergebnisse im Einzelnen dargestellt und den vorgegebenen Zielen gegenübergestellt. Dies geschieht indem zu jedem Teilarbeitspaket zunächst die Ausgangslage und Ziele beschrieben werden und dann Umsetzung und Ergebnis diskutiert werden. Änderungen der Zielstellungen, die sich im Projektverlauf ergeben haben, werden bei der Beschreibung der Ziele dargestellt.

## 1.1 TAP2.1.DLR Variantenvergleich Wirkungsgradoptimierung

Gemäß zuletzt gültigem Zeitplan wurde das TAP im Zeitraum 01/2019–02/2019 bearbeitet.

Aufgrund des geringen Anteils der Beteiligung des DLR (0,25 PM), wird zu diesem TAP nur verkürzt berichtet. Ein vollständiges Bild zum TAP ist im Sachbericht von Sunfire zu finden.

Das DLR war beratend in das TAP eingebunden. Dabei wurden sowohl die verschiedenen von Sunfire erarbeiteten Varianten zur Wirkungsgradsteigerung, als auch die von Sunfire erarbeiteten Systemkonzepte diskutiert. Dies fand im Rahmen eines Treffens vor Ort bei Sunfire und per Telefonkonferenz statt. Primäres Ziel für das DLR war es dabei einen möglichst guten Einblick in die Systemarchitektur des zu simulierenden Systemteils Hotbox (SOEC-Modul + Gas Processing Unit) zu erhalten (TAP3.1.DLR.2). Da das SOEC-Modul (TAP3.1.DLR.1) ein besonders wichtiger Teil der Hotbox ist, war für das DLR insbesondere die Betriebsart von Bedeutung. Daher war eines der wichtigsten Ergebnisse die Gegenüberstellung von „Gasvorheizung“ und „exothermer Betriebsführung“, bei der die Vorteile der Gasvorheizung eindeutig überwiegen.

## **1.2 TAP2.3.DLR Bewertung Systemkonzepte**

Gemäß zuletzt gültigem Zeitplan wurde das TAP im Zeitraum 01/2019–02/2019 bearbeitet.

Aufgrund des geringen Anteils der Beteiligung des DLR (0,25 PM), wird zu diesem TAP nur verkürzt berichtet. Ein vollständiges Bild zum TAP ist im Sachbericht von Sunfire zu finden.

Das DLR war beratend tätig und hat durch die Beteiligung einen guten Einblick in Hotbox- und System-Aufbau erhalten, um die Arbeiten in Simulation und Experiment durchführen zu können. Ein vollständiges Bild zum TAP ist im Sachbericht von Sunfire zu finden.

## **1.3 TAP3.1.DLR.1 SOEC-Modul-Modell**

Gemäß zuletzt gültigem Zeitplan wurde das TAP in den Zeiträumen 01/2019–06/2019 und 01/2020–03/2020 bearbeitet.

### **1.3.1 Ausgangslage**

Vor Projektbeginn wurde am DLR bereits ein transientes eindimensionales SOC-Zell-Modell entwickelt und in der Entwicklungsumgebung Dymola mit der Sprache Modelica implementiert. Anschließend wurde das Zellmodell zu einem Stack-Modell erweitert und für einen Stack mit 10 Zellen anhand von Versuchen im Ofen validiert. Es

bildet die elektrochemischen und chemischen Reaktionen kinetisch ab und liefert Temperatur-, Stromdichte und Konzentrationsprofile über der Zeit. Insbesondere aufgrund der detaillierten Wiedergabe der elektrochemischen Prozesse ist das Modell nicht ohne Modifikationen in einer Systemsimulation mit mehreren hundert Zellen einsetzbar.

### **1.3.2 Zielstellung**

Im ersten Schritt sollte das beschriebene detaillierte Stack-Modell auf 30 Zellen erweitert werden. Da das in TAP3.1.DLR.1 zu modellierende Modul aus insgesamt 24 Stacks und dementsprechend 720 Zellen besteht, war es nicht ausreichend nur das ursprüngliche Stack-Modell zu erweitern. Es musste ein Ansatz entwickelt werden, der die Rechengeschwindigkeit des Modells stark erhöht, ohne die relevanten elektrochemischen und thermischen Effekte zu vernachlässigen. Es wurde der Ansatz gewählt, ein vereinfachtes Stack-Modell zu bilden, mit dem detaillierten Modell zu vergleichen und anschließend mit experimentellen Daten zu validieren. Weiter musste zur Erstellung des Modul-Modells ein Konzept aufgestellt werden. Dabei mussten die weiteren benötigten Komponenten des Moduls (u. a. Brenngas- und Luftverteilungsrohre, Ein- und Ausgangsflansche, Isolationsblöcke sowie elektrische Verbindungen) identifiziert und implementiert/integriert werden. Abschließend sollte die Validierung des 30er Stacks mit experimentellen Messdaten erfolgen und alle Teile des Modul-Modells zu einem vollständigen Aufbau final zusammengeführt werden.

### **1.3.3 Umsetzung und Ergebnis**

Im ersten Schritt wurden vereinfachte Zellen als Modell abgebildet. Diese sind, wie die detaillierten Zellen, in Strömungsrichtung in einzelne Kontrollvolumina diskretisiert und weisen die gleichen Wärmetransport- und -speichereigenschaften auf. Im Gegensatz zu diesen werden in den vereinfachten Zellen keine elektrochemischen Berechnungen durchgeführt. Die Anzahl der vereinfachten und detaillierten Zellen in einem Stack ist variabel. Das Modellierungsframework erlaubt bis zu 27 vereinfachte Zellen in einem Stack mit 30 Ebenen.



Abbildung 1: Übergabe der Parameter an die vereinfachten Zellen am Beispiel eines Stacks mit zehn Ebenen, drei detaillierten Zellen und sieben vereinfachten Zellen.

Die Kontrollvolumina der vereinfachten Zellen haben keine physischen Verbindungen sondern erhalten nur Informationen über die Betriebsparameter. Sowohl auf Anoden- als auch auf Kathodenseite werden die Informationen über den Eingangsmassenstrom und die Eingangsenthalpie vom jeweils vorherigen vereinfachten Kontrollvolumen (s. Abbildung 2) übergeben. Die Austrittsmassenströme, -drücke und -zusammensetzungen werden von der nächstliegenden detaillierten Zelle übergeben. Weiterhin werden auch die Reaktionsenthalpie, die Zellspannung und der Strom durch das jeweilige Kontrollvolumen übergeben. Mit diesen Informationen lassen sich die Energiebilanzen in den vereinfachten Kontrollvolumina lösen. Durch die thermischen Verbindungen ergibt sich das Temperaturprofil über den Stack.

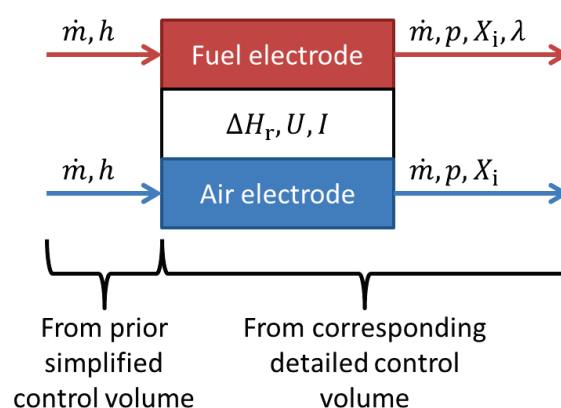
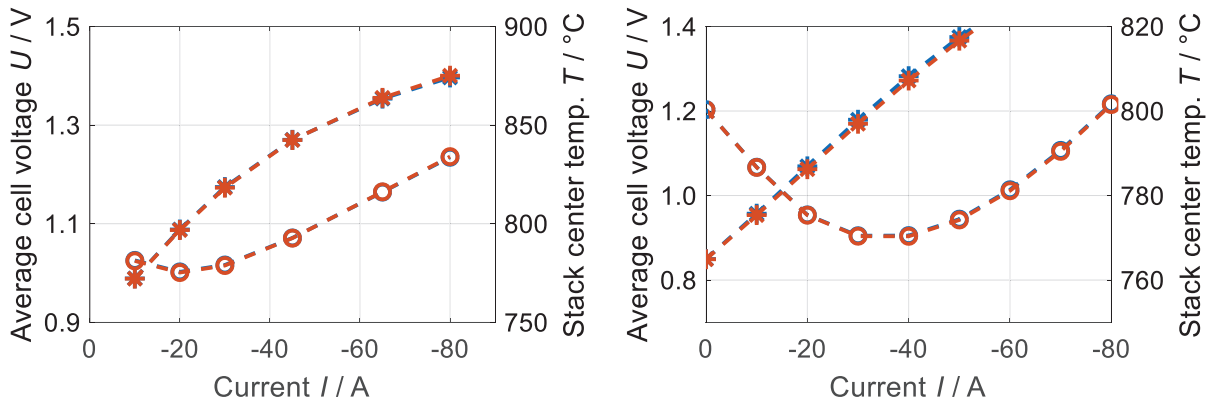


Abbildung 2: Übergabe der Parameter an die vereinfachten Kontrollvolumen

Im ersten Schritt der Validierung wurde das vereinfachte Stack-Modell bestehend aus 10 Zellen mit dem bereits validierten detaillierten Stack-Modell verglichen. Exempla-

rische Ergebnisse sind in Abbildung 3 dargestellt. Die Abweichungen sind sehr gering. Dies gilt auch für die anderen Betriebspunkte.



Ofentemperatur: 800 °C

Ofentemperatur: 801.9 °C

Wasserdampfausnutzung: 60 %

Stromrampengeschwindigkeit: -15 A/min



Abbildung 3: Vergleich des vereinfachten mit dem detaillierten Stack-Modell mit jeweils 10 Zellen anhand einer stationären und einer dynamischen Kennlinie im Elektrolysebetrieb bei 1.4 bar und einem Wasserstoff zu Wasserdampfverhältnis von 10 zu 90 % am Eintritt.

Anschließend wurden beide Stack-Modelle auf 30 Zellen erweitert und ebenfalls verglichen. In Abbildung 4 ist eine Variation der Anzahl der vereinfachten Zellen dargestellt. Wenn der Extremfall von nur drei detaillierten Zellen mit einem Stack mit 30 detaillierten Zellen verglichen wird, ergibt sich bei einer Abweichung der mittleren Temperatur von 0.78 K und der Stackspannung von -0.27 V eine Erhöhung der Rechengeschwindigkeit um den Faktor 228.

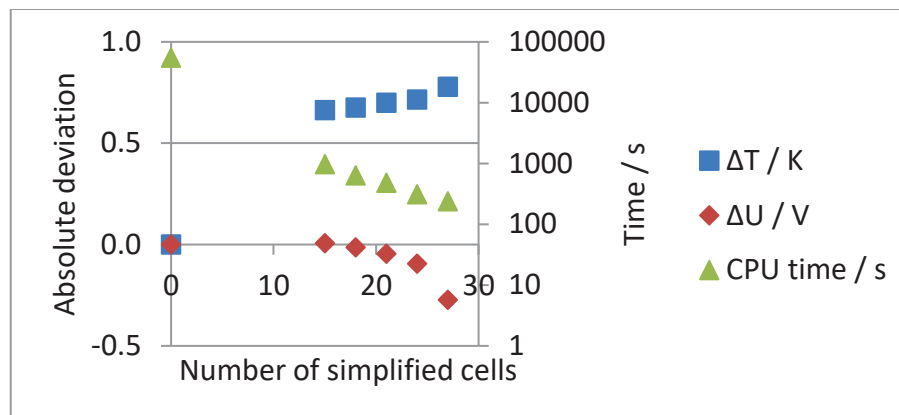


Abbildung 4: Einfluss der Anzahl der vereinfachten Zellen auf die Abweichungen in der mittleren Temperatur und die Stackspannung sowie die Rechenzeit an einem Stack mit 30 Zellen (Modus: SOFC, dynamische Kennlinie)

Das vereinfachte Stack-Modell konnte dann bereits mit anderen Stacks gekoppelt werden. In Abbildung 5 ist für einen Betriebspunkt im Brennstoffzellenmodus dargestellt, wie dadurch Informationen auf den unterschiedlichen Abstraktionsstufen gewonnen werden können. Auf Modullevel kann die Temperaturverteilung im Modul aufgrund von Wärmeverlusten an die Umgebung betrachtet werden, auf Stacklevel ist z. B. der Hotspot sehr gut zu erkennen und bei Betrachtung eines einzelnen Kontrollvolumens ist die Kühlung durch den Luftmassenstrom ersichtlich.

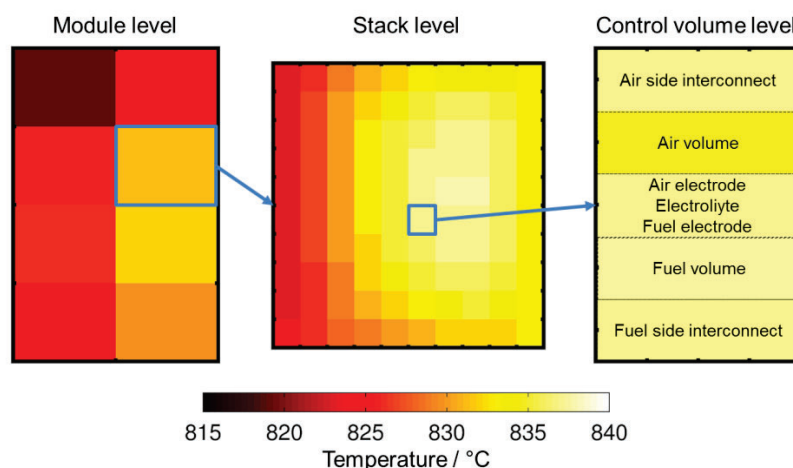


Abbildung 5: Unterschiedliche Abstraktionsstufen eines beispielhaften Betriebspunktes gekoppelter Stacks im Brennstoffzellenmodus

Zur Darstellung von SOC-Modulen sind weitere Komponenten notwendig. Um eine hohe Anpassungsfähigkeit zu erzielen wurde wie auch beim Stack-Modell ein modularer Aufbau gewählt. Die notwendigen Materialdaten, wie beispielsweise Wärmeka-



pizitäten und Dichten, wurden zusammengetragen und aufbereitet. Anschließend erfolgte die Erstellung der Modelle für Brenngas- und Luftverteilungsrohre, Ein- und Ausgangsflansche, Isolationsblöcke sowie die elektrischen Verbindungen. Die Komponentenmodelle wurden einzeln und in unterschiedlichen Kombinationen getestet. Abbildung 6 zeigt beispielsweise die modellierten Wärme- und Stoffströme zwischen den Komponenten, die um einen einzelnen Stack verteilt sind.

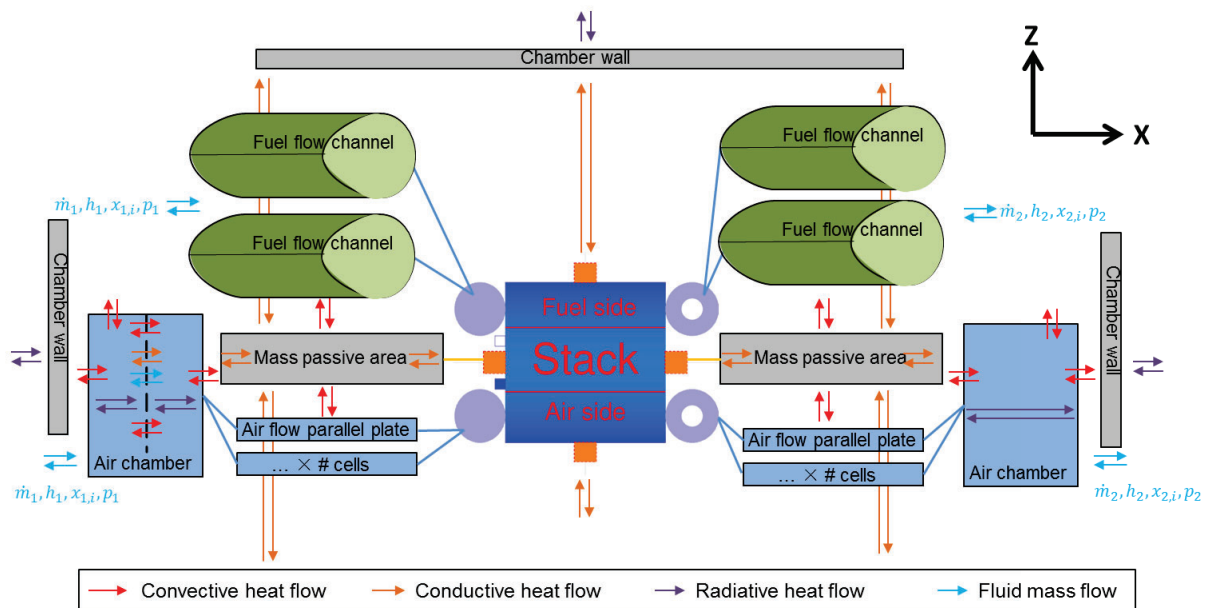


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Wärme- und Stoffströme zwischen den einzelnen Komponenten eines SOC-Moduls

Nach dem Vergleich von vereinfachtem Stackmodell mit dem detaillierten Stackmodell wurde nun eine Validierung mit experimentellen Daten durchgeführt, die vom Projektpartner Sunfire bereitgestellt wurden. Da es einen Leckageluftstrom am Teststand gab und daher der Luftstrom durch den Stack nicht bekannt ist, wurde der Luftstrom in der Simulation so eingestellt, dass die Lufttemperatur bei 75 % der Zelllänge dem experimentellen Wert entspricht. Zwei untersuchte Sensitivitäten sind in Abbildung 7 dargestellt.

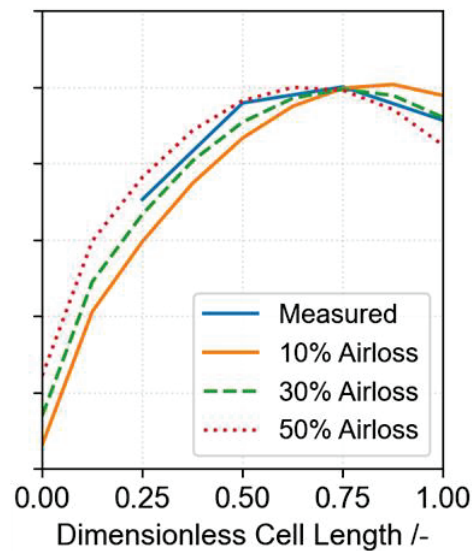


Abbildung 7: Axialer Temperaturverlauf der mittleren Zelle eines Stacks im Brennstoffzellenmodus. Die simulierten Temperaturen sind im vorderen Bereich zu niedrig und im hinteren Bereich zu hoch. Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass bei einer Verminderung der stackinternen Kühlung durch den Luftstrom, z. B. durch Leckageströme um den Stack, die Ergebnisse sich den Experimenten annähern.

Das Stackmodell wurde durch metallische Zwischenplatten zwischen Zelle 10 und 11 bzw. 20 und 21 erweitert. Dies führte zu höherer axialer Wärmeleitung (vgl. Abbildung 8).

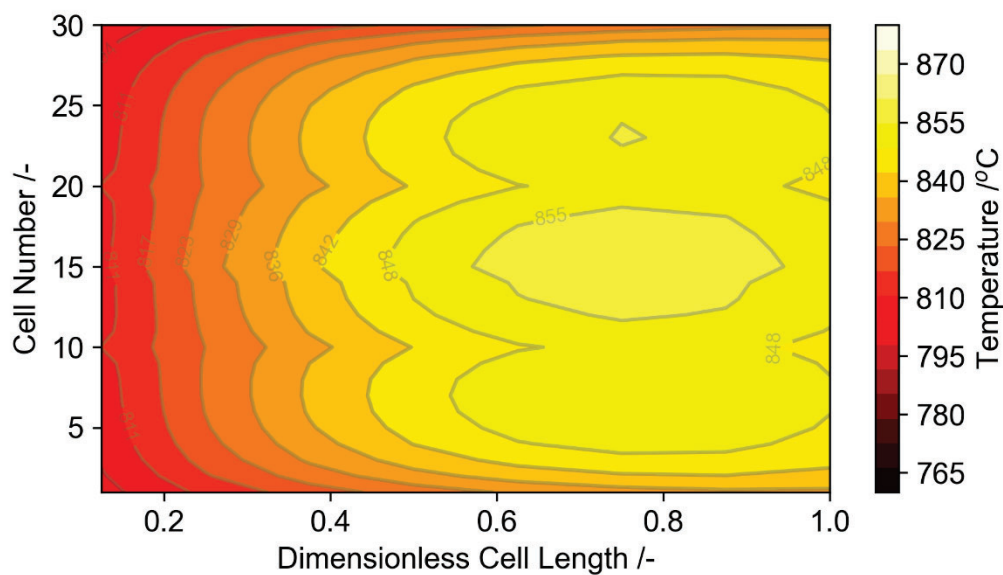


Abbildung 8: Temperaturverlauf innerhalb eines Stacks. Der Hotspot und die Zwischenplatten sind gut zu erkennen.

Die Ergebnisse zeigen, dass das vereinfachte Zellmodell die Experimente hinreichend genau wiedergibt. Damit konnte das vereinfachte Zellmodell im Modul-Modell eingesetzt werden.

Der Aufbau des Modul-Modells wurde abgeschlossen. Abbildung 9 zeigt die Stromführung in einem Stackturm. Das Brenngas tritt unten in den Passivbereich (grau) ein und wird vertikal nach oben befördert. Für jede Zelle wird dem Hauptstrom Brenngas entnommen. Die Wärmeübertragung zwischen Strömung und Stackmaterial ist für jede Stelle modelliert. Jeweils drei Stacktürme stehen nebeneinander (Abbildung 10) und werden durch ein gemeinsames Brenngasrohr versorgt. Zwei Reihen mit jeweils drei Stacktürmen stehen sich gegenüber und werden aus einer gemeinsamen Luftkammer mit Luft versorgt (Abbildung 11).

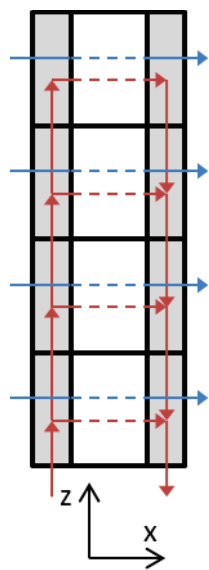


Abbildung 9: Interne Massenstromführung in einem Stackturm

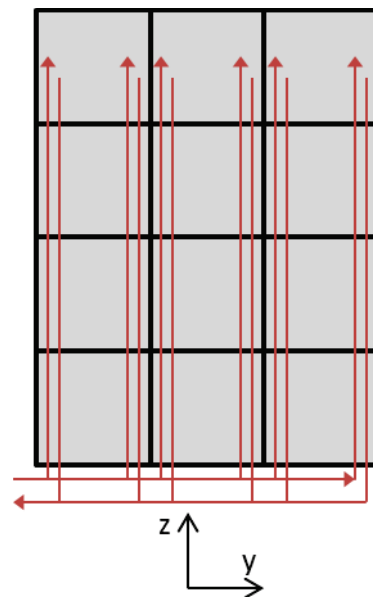


Abbildung 10: Verteilung der Brenngasströme auf die einzelnen Stacktürme

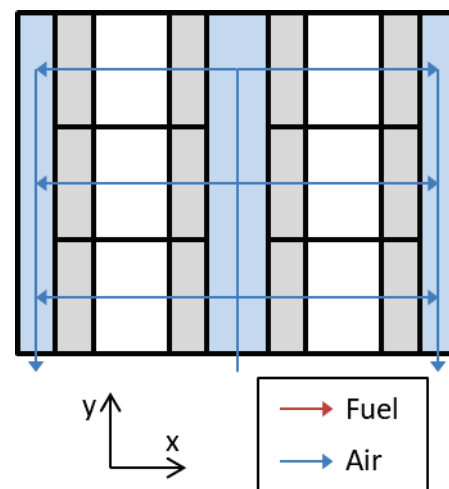


Abbildung 11: Luftströmung durch die Luftkammern und Stacktürme in einer Stack Unit

Die Wärmedämmung des Moduls ist aus ungefähr 80 Blöcken zusammengesetzt, die entsprechend der realen Geometrie um die Stacktürme angeordnet sind. Die Dämmblöcke, welche sich oberhalb und unterhalb des Stacks befinden, sind in Strömungsrichtung eindimensional ausgeführt. In jedem Block werden Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität in Abhängigkeit von der Temperatur bestimmt.

In Abbildung 12 ist der simulierte Temperaturverlauf im Modul bei einem Wechsel vom Brennstoffzellen- in den Elektrolysebetrieb dargestellt. Stack L1T1 hat die niedrigste und Stack L2T3 die höchste Temperatur. Die Temperaturdifferenz ist im Elektrolysebetrieb weitaus geringer. Die Abbildung zeigt auch die Notwendigkeit von TAP3.4, da die hohen Temperaturgradienten während des Umschaltvorgangs nicht gewünscht sind.

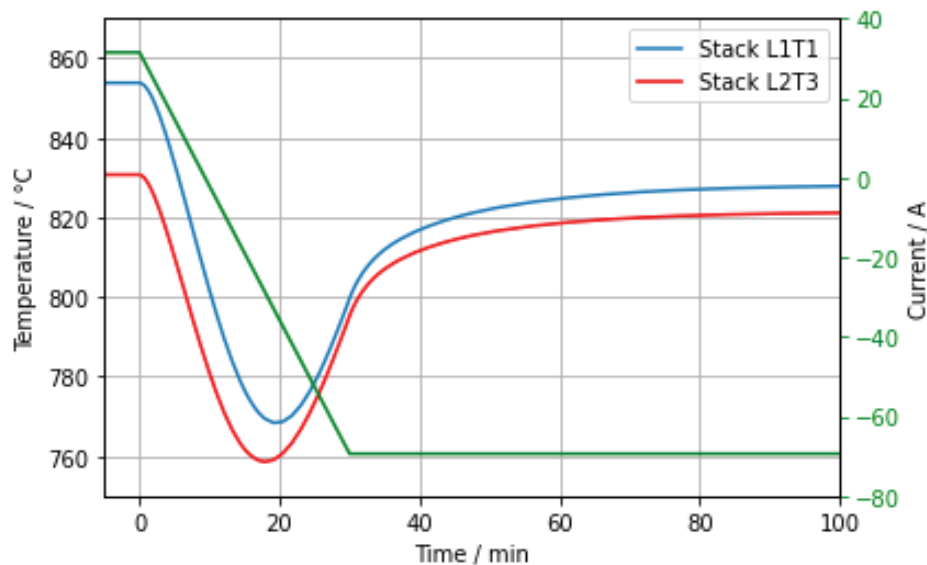


Abbildung 12: Zeigt den simulierten Temperaturverlauf zweier Stacks im SOEC-Modul bei einem Wechsel vom Brennstoffzellen- in den Elektrolysebetrieb.

Im weiteren Vorhabenverlauf wurde das gezeigte Modell mit den experimentellen Ergebnissen des DLRs und Sunfire iterativ verbessert.

## 1.4 TAP3.1.DLR.2 Hotbox-Modell

Gemäß zuletzt gültigem Zeitplan wurde das TAP im Zeitraum 07/2019–02/2020 bearbeitet.

### 1.4.1 Ausgangslage

Die interne Modelica-Modellbibliothek und die ebenfalls genutzte quelloffene ThermoPower-Bibliothek, die am Politecnico di Milano entwickelt und gewartet wird, enthalten grundlegende Komponenten für die Modellierung von verfahrenstechnischen Anlagen. Zur Modellierung der für die Hotbox notwendigen Komponenten wie Wärmeüberträger und elektrische Heizer mussten diese modifiziert, erweitert und zusammenschaltet werden.

### 1.4.2 Zielstellung

Es sollte eine dynamische Prozesssimulation der Sunfire Hotbox erstellt werden, die aus Stack Unit (SU) und Gas Processing Unit (GPU) besteht.

- Absprache und Definition der abzubildenden Komponenten über Sunfires P&IDs (Piping & Instrumentation Diagrams)
- Implementierung aller Komponenten anhand der zur Verfügung gestellten Details
- Verbindung von Gas Processing Unit mit Stack Unit zu einer Prozesssimulation der rSOC-Hotbox

### 1.4.3 Umsetzung und Ergebnis

Gemeinsam mit dem Projektpartner Sunfire wurden anhand der P&IDs die abzubildenden Komponenten und Schnittstellen definiert und besprochen. Mit den benötigten Auslegungsdaten, welche von Sunfire bereitgestellt wurden, wurden alle Subkomponenten modelliert. Dies sind vor allem die Luft- und Brenngaswärmeübertrager und die elektrischen Heizer. Nach Abschluss der Modellierung der Subkomponenten wurden diese zur Luft- (siehe Abbildung 13) und Brenngas-GPU zusammenschaltet.

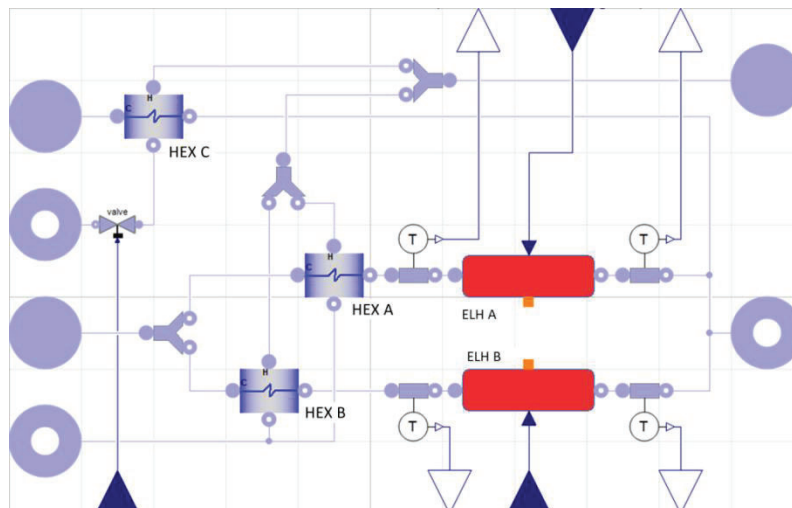


Abbildung 13: Luft-GPU bestehend aus drei Wärmeübertragern und zwei elektrischen Heizern.

Beispielhaft ist das Luft-GPU-Modell in Abbildung 13 dargestellt. Neben den erwähnten Wärmeübertragern und elektrischen Heizern, sind auch Temperatursensoren und ein Ventil modelliert. Das Modell hat Schnittstellen für die ein- und austretenden

Massenströme sowie die Sensor- und Aktorsignale, sodass es mit dem ebenfalls modellierten Regelungssystem verbunden werden kann.

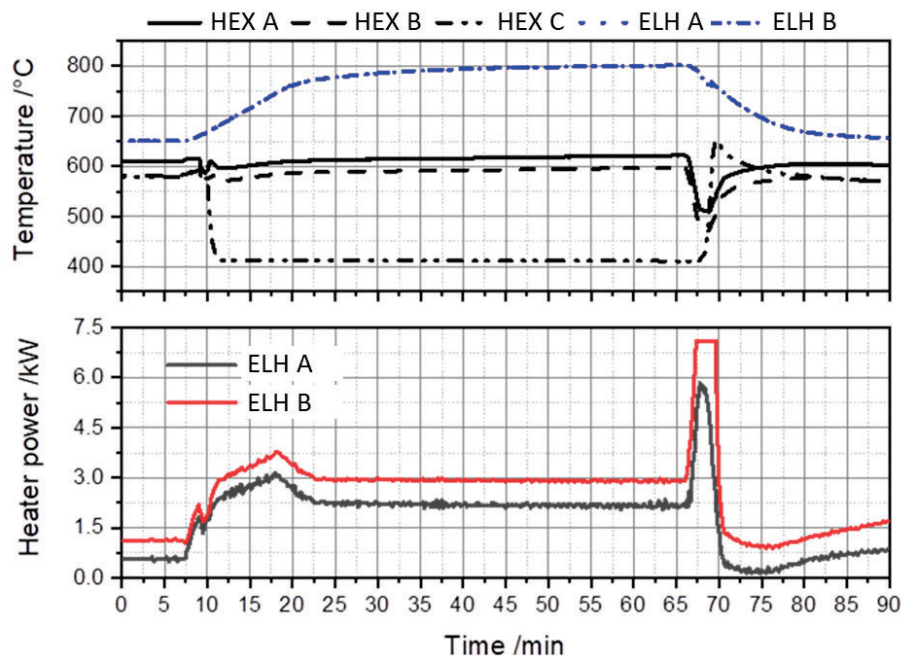


Abbildung 14: Simulationsergebnis für die Austrittstemperaturen aus Wärmeübertragern und elektrischen Heizern sowie die Leistung der Heizer der Luft-GPU für einen rSOC-Zyklus

Abbildung 14 zeigt die Austrittstemperaturen die Austrittstemperaturen aus Wärmeübertragern und elektrischen Heizern der Luft-GPU für einen rSOC-Zyklus. Weiterhin sind die Leistungen der elektrischen Heizer dargestellt.

Die fertigen Luft- und Brenngas-GPUs wurden anschließend mit der Stack Unit und der Leistungselektronik zum rSOC-System verbunden. Im nächsten Schritt wurde dieses mit einem Regelungssystem verbunden, um einen automatisierten Betrieb simulieren zu können (vgl. Abbildung 15). Das Regelungssystem besteht aus drei Komponenten:

#### 1. Temperaturregler

- Regelung von zeitlichen Temperaturgradienten ( $dT/dt$ )
- Bestimmung des Sollwerts des Luftstroms durch einen PID-Regler
- Im Brennstoffzellenmodus: Mindestluftstrom wird durch einen maximalen  $O_2$ -Umsatz festgelegt
- Im Elektrolysemodus: Mindestluftstrom wird über den gewünschten Sauerstoffanteil am Austritt festgelegt

## 2. Leistungsregler

- Galvanostatischer Ansatz mit PI-Regler
- Automatische Berücksichtigung der Mindestspannung bzw. der Maximalspannung

## 3. Regelung der Reaktantenversorgung

- Konstanter Reaktantenumsatz, Massenstrom gekoppelt an elektrischen Strom des Reaktors und Zellanzahl
- Minimale Durchflüsse werden von den BoP-Komponenten (bspw. minimaler Heizerdurchfluss) festgelegt und vom Regelungssystem berücksichtigt

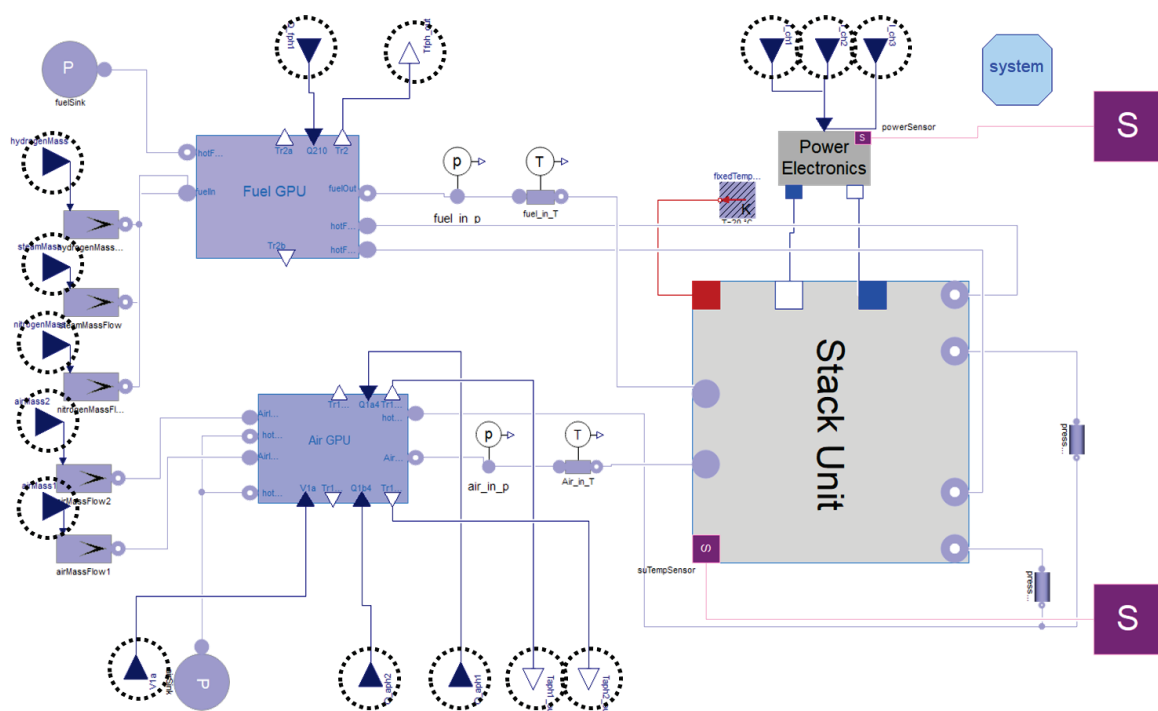


Abbildung 15: Darstellung der Hotbox inkl. Stack Unit, Luft- und Gaswärmeübertrager sowie Leistungselektronik und Gasdosierung in der Entwicklungsumgebung Dymola. Gestrichelt umrandet sind die Schnittstellen zum Regelungssystem.

Zur Parametrierung und Validierung der gezeigten Modelle wurden experimentelle Versuche zwischen dem DLR und Sunfire unter Beteiligung der experimentell und

theoretisch arbeitenden Projektmitglieder abgestimmt. Die Parametrierung und Validierung sind im folgenden Abschnitt TAP3.1.DLR.3 Parametrierung und Validierung Hotbox-Modell beschrieben. Die dazu am DLR durchgeführten Versuche sind in TAP3.2.DLR.2 Experiment Stack Unit aufgezeigt.

## **1.5 TAP3.1.DLR.3 Parametrierung und Validierung Hotbox-Modell**

Gemäß zuletzt gültigem Zeitplan wurde das TAP im Zeitraum 03/2020–07/2020 bearbeitet.

### **1.5.1 Ausgangslage**

Den Ausgangspunkt stellen die Simulationsmodelle aus den Teilarbeitspaketen TAP3.1.DLR.1 SOEC-Modul-Modell und TAP3.1.DLR.2 Hotbox-Modell dar. Weiterhin standen experimentelle Ergebnisse aus TAP3.2.DLR.2 Experiment Stack Unit und vom Partner Sunfire zur Verfügung. Zur Parametrierung wurden Datenblätter und experimentelle Daten von Zulieferern und Projektpartnern genutzt.

### **1.5.2 Zielstellung**

Eine dynamische Prozesssimulation der Hotbox von Sunfire mit experimentell parametriertem und validiertem SOEC-Modul-Modell (Stack Unit) sollte erstellt und für die Arbeiten in TAP3.4 zur Verfügung gestellt werden.

### **1.5.3 Umsetzung und Ergebnis**

Zur Parametrierung waren unterschiedliche Daten vonnöten. Diese sind unter anderem Materialdaten der eingesetzten Werkstoffe, geometrische Daten der Komponenten und Stoffwerte der eingesetzten Gase.

Bei den Materialdaten der eingesetzten Werkstoffe hat die temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit der Dämmstoffe einen hohen Einfluss auf das Simulationsergebnis. Daher wurde eine Datenbank zur Parametrierung der Modelle angelegt (vgl. Tabelle 2). Die Stoffwerte der Gase basieren auf den NASA-Polynomen.



Tabelle 2: Ausschnitt aus der Datenbank der Dämmstoffe, die im Simulationsmodell hinterlegt ist.

Werkstoff	Dichte / kg/m <sup>3</sup>	Wärmeleitfähigkeit / W/(m K) bei T / °C						
		20	23	100	200	400	600	800
Mikroporöse Dämmplatte 1	200-250	0.018	< 0,022		0.022	0.027	0.034	0.044
Mikroporöse Dämmplatte 2	300-350		< 0,022	0.022	0.025	0.031	0.037	0.042
Mikroporöse Dämmplatte 3	250-310		< 0,022		0.022	0.03	0.043	0.06
Mikroporöse Dämmplatte 4	280-350		0.022		0.023	0.027	0.034	0.046
Isolierende Calciumsilikate 1	1050 +/-10%				0.24	0.26	0.29	0.32
Isolierende Calciumsilikate 2	1300 +/-10%				0.27	0.28	0.31	0.35

Zur Validierung des Hotbox-Modells sind mit dem in Abbildung 15 dargestellten Modell Simulationen durchgeführt worden. Die Randbedingungen stammen aus Experimenten.

Abbildung 16 zeigt den Vergleich von Simulation und Experiment anhand der Stacktemperaturen und der durchschnittlichen Spannungen bei drei stationären Elektrolysebetriebspunkten. Die simulativen Ergebnisse zeigen leicht höhere durchschnittliche Zellspannungen. Die Verteilung und der Abstand zwischen maximaler und minimaler Spannung werden sehr gut getroffen. Damit ist das Ziel der Modellierung, die unterschiedlichen Betriebsbedingungen und das daraus folgende Betriebsverhalten zu simulieren erreicht.

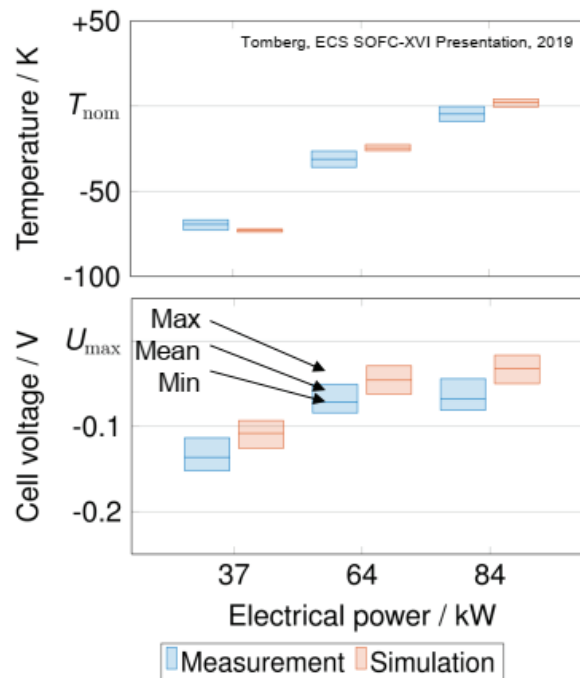


Abbildung 16: Vergleich dreier Betriebspunkte im Elektrolysebetrieb. Es sind jeweils die minimalen, maximalen und durchschnittlichen Temperaturen und Spannungen der Stack Unit angegeben. Die experimentellen Daten stammen vom Projektpartner Sunfire.

Zur Validierung des Wärmeübertragermodells sind in Abbildung 17 Daten aus der Dokumentation der Wärmeübertrager, Daten aus experimentellen Untersuchungen, sowie Simulationsergebnisse basierend auf beiden Datensätzen dargestellt. Die Ergebnisse sind hinreichend genau.

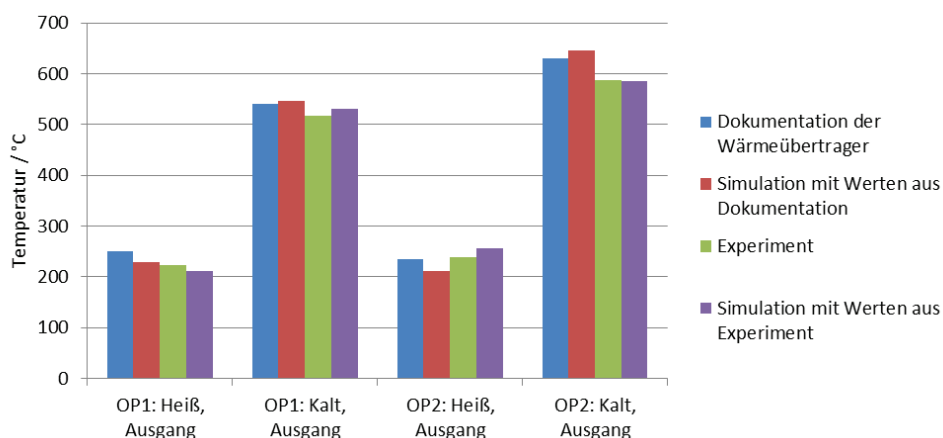


Abbildung 17: Validierung des Wärmeübertragermodells der Brenngas-Gas-Processing-Unit anhand von experimentellen Daten und Auslegungsdaten des Herstellers.

Eine genauere Betrachtung einzelner Stacks ist in Abbildung 18 dargestellt. Um das Modell zu „fordern“ wurde ein transienter Betrieb inkl. Lastabwurf ausgewählt. Das Modell kann das Verhalten der einzelnen Stacks hinreichend genau sowohl im regulären Betrieb als auch im Lastabwurf wiedergeben. Dies gilt sowohl für die stationären Betriebspunkte als auch die transienten Übergänge.

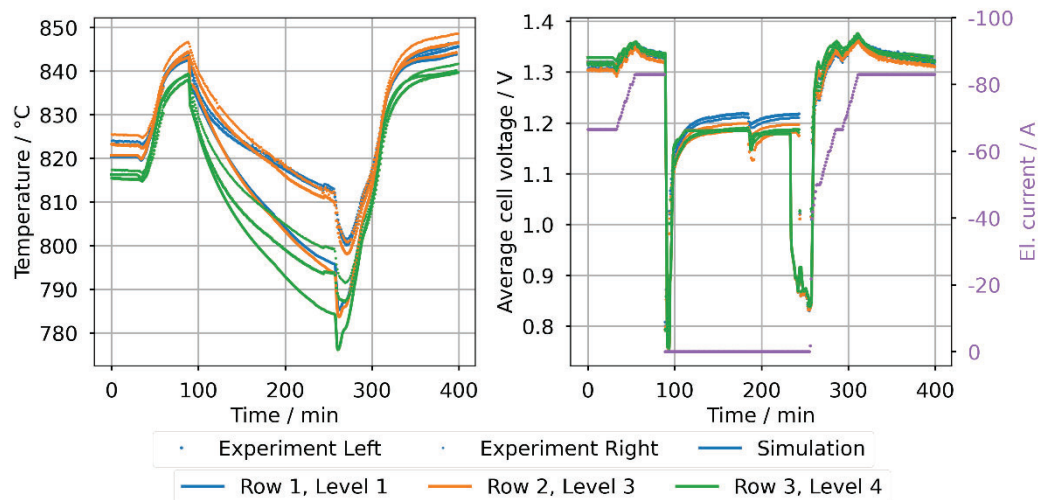


Abbildung 18: Validierung der Sunfire Stack Unit anhand von experimentellen Messdaten über einen Zeitraum von 400 Minuten. Austrittstemperatur (E15, 4/4 MEA) und durchschnittliche Zellspannung von drei unterschiedlichen Stacks werden verglichen. Es handelt sich um einen Elektrolysebetrieb inklusive eines Lastabwurfes und anschließendem Hochrampen der elektrischen Leistung. Die Abweichungen zwischen Simulation und Experiment sind hinreichend klein. Diese konkreten experimentellen Daten stammen vom Projektpartner Sunfire.

Nach Abschluss Parametrierung und Validierung der Hotbox konnten die Arbeiten in TAP3.4.DLR Validierung am Gesamtsystem durchgeführt werden.

## 1.6 TAP3.2.DLR.1 Projektspezifische Teststandanpassung

Gemäß zuletzt gültigem Zeitplan wurde das TAP im Zeitraum 01/2019–01/2020 bearbeitet.

### 1.6.1 Ausgangslage

Für experimentelle Untersuchungen an SOC-Modulen im Brennstoffzellenmodus (SOFC) mit elektrischer Leistung bis 25 kW war eine Testinfrastruktur vorhanden. Dieser Teststand umfasst Gas-, Luft- und Dampfversorgung, elektrische Erhitzer für

die zugeführten Medien und Wärmeübertrager zur Abkühlung der Abgase. Die Anlagensteuerung des Teststandes ermöglichte die Datenaufzeichnung der angeschlossenen Sensorik sowie einfache Steuer- und Regelaufgaben. Zur Aufnahme der elektrischen Leistung war eine mehrkanalige elektrische Last mit Netzurückspeisung vorhanden. Abbildung 19 zeigt eine Übersicht der Komponenten des Teststandes, u. a. um Größe und Komplexität des Teststandes aufzuzeigen, sowie das Größenverhältnis zwischen gesamter Testumgebung und dem Prüfling (hier: SOFC-Modul).

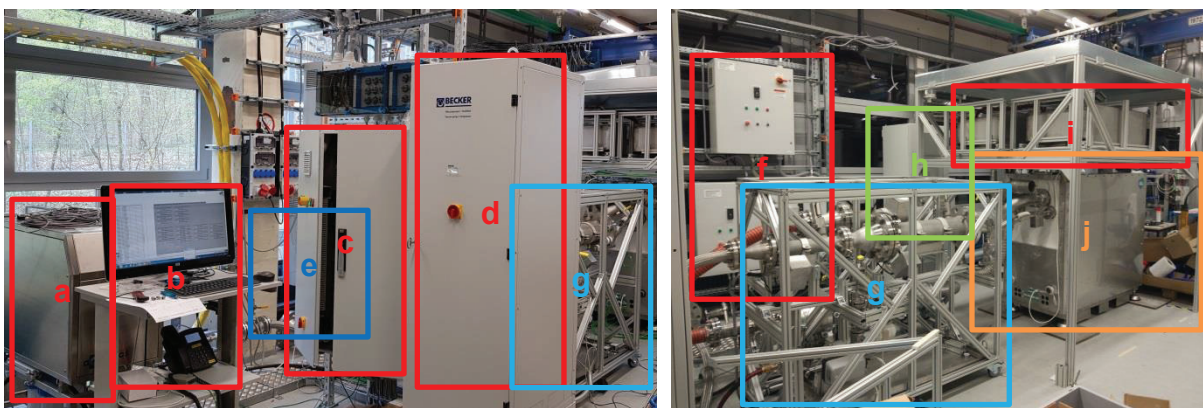


Abbildung 19: Übersicht der Komponenten des Teststandes. a Wasserverdampfer, b Bedienstation, c Anlagensteuerung, d Gebläse für Luftversorgung, e Gastableau für Gasversorgung (nicht sichtbar auf Foto), f Leistungsversorgung und Steuerung Luft- und Gasheizungen, g Luft- und Gasheizungen, h Leistungselektronik, i Wärmeübertrager zur Kühlung der Produktgase, j SOFC-Modul (Prüfling)

### 1.6.2 Zielstellung

Der vorhandene Teststand sollte für die experimentelle Charakterisierung und Qualifizierung der Stack Unit unter systemnahen Bedingungen projektspezifisch angepasst werden. Stack Unit ist der Terminus, den Sunfire für seine SOC-Module verwendet. Da es im Folgenden um die konkreten Module von Sunfire geht, wird die Bezeichnung Stack Unit verwendet. Die Anforderungen an den Teststand sollten anhand der durchzuführenden Experimente und der technischen Daten der Stack Unit spezifiziert werden. Die Anpassung zur Erfüllung der Projektinhalte sollte den Anforderungen entsprechend durchgeführt werden. Die Möglichkeit, den Prüfling im Elektrolysemodus und auch im Wechsel zwischen Brennstoffzellen- und Elektrolysemodus zu betreiben, sollte für die Experimente innerhalb dieses Projektes geschaffen werden. Die Anpassung umfasste daher Erweiterungen im Bereich der Leistungselektronik und der Teststandsteuerung sowie der Prozessdampfversorgung. Zur konkreten

Verbindung des Teststands mit dem Prüfling, der Stack Unit, mussten Adapterrohre und Adapterisolation aus hochtemperaturbeständigen Werkstoffen konstruiert und hergestellt werden. Zusätzlich müssen Anpassungen an der Medienversorgung sowie der Mess- und Regelhardware vorgenommen werden. Die Teststandsoftware soll mit zusätzlicher Funktionalität wie erweiterten Regel- und Automatisierungsfunktionen ausgestattet werden.

### 1.6.3 Umsetzung und Ergebnis

Im ersten Schritt wurden die erweiterten Anforderungen an den Teststand spezifiziert, und in enger Absprache mit dem Projektpartner Sunfire Spezifikationen für die neu zu beschaffenden Komponenten erstellt. Diese leiteten sich aus den durchzuführenden Experimenten und den technischen Daten des Stack Unit ab. Für die benötigten Komponenten wurden Leistungsbeschreibungen verfasst, die als Grundlage für die Beschaffungsmaßnahmen dienen. Die durch die projektspezifischen Anforderungen erforderlichen Anpassungen der Leistungselektronik sind in Abbildung 20 dargestellt.

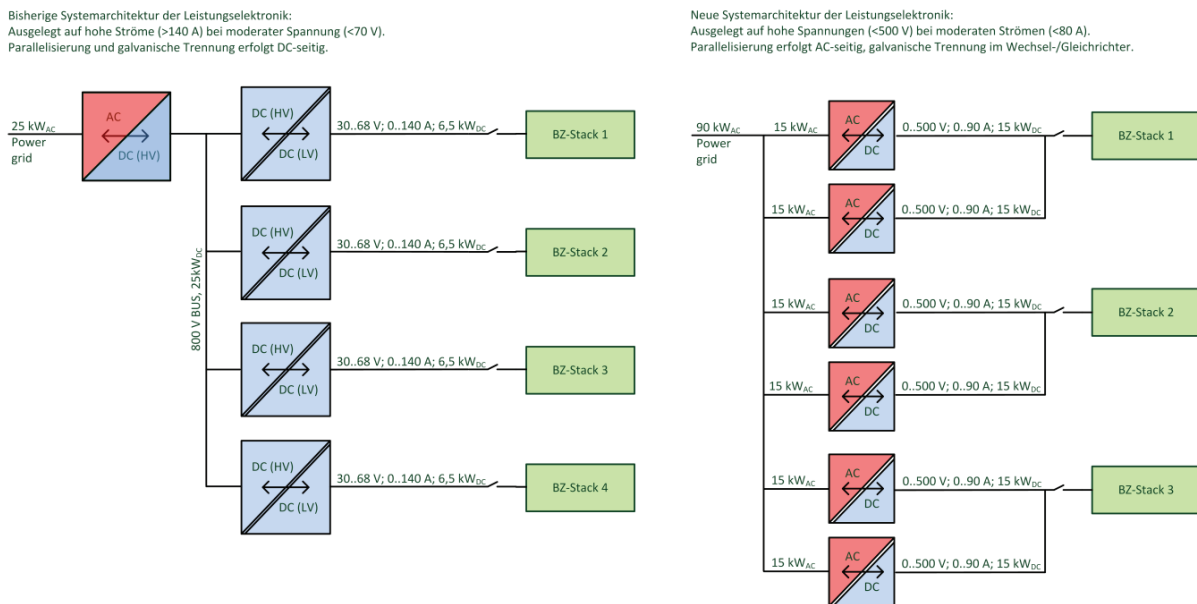


Abbildung 20: Prinzipskizze zur Anpassung der Leistungselektronik

Istzustand:	Vorgesehene Erweiterungen:
• Manuelle Steuerung	• Sequencer zur voll automatisierten Versuchsdurchführung
• Grundlegende Sicherheitsfunktionen	• Einbindung der Sensorik und Datenerfassung der Sunfire Stack Unit
• Datenaufzeichnung	• Implementierung von Regelalgorithmen u. a. für: <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ Individuelle Stackstrom-Regelung</li> <li>◦ optimierte Stackluftregelung (kombinierter Feedforward- und Feedback-Controller)</li> <li>◦ Stacktemperaturregelung</li> </ul>
	• Erweiterte Sicherheitsfunktionen
	• Weitere Kanäle für Sensorik und Aktorik

Tabelle 3: Erweiterung der Anlagensteuerung

Für die Steuerung des Teststandes wurden zusätzliche Anforderungen spezifiziert, um einen automatisierten Betrieb des Teststandes für Elektrolyseversuche zu ermöglichen. Tabelle 3 zeigt eine Übersicht der vorhandenen Funktionen der Anlagensteuerung und der vorgesehenen Erweiterungen.

Für den reversiblen Betrieb der Stack Unit wurde die oben beschriebene bidirektionale Leistungselektronik mit einer Gesamtleistung von 90 kW beschafft, die auf Gleichstromseite über drei separat regelbare Kanäle mit einer Spannung von jeweils maximal 750 V und einem Strom von maximal 120 A verfügt. Für die Erhitzung der zugeführten Gase kommen elektrische Gaserhitzer zum Einsatz, für die nach mehrmaligem Ausfall beim Hersteller eine Revision und Modifikation durchgeführt wurde. Verbesserungen wurden dabei am Dichtungskonzept sowie der mechanischen Stabilität der Heizelemente vorgenommen. Zudem wurden durch das DLR Verbesserungen am Sicherheits- und Regelkonzept der Heizer vorgesehen, mit denen eine Überhitzung der Heizer durch verbesserte Mess- und Regelfunktionen rechtzeitig erkannt und durch geeignete Gegenmaßnahmen verhindert werden soll. Dadurch soll eine höhere Sicherheit gegen einen vorzeitigen Ausfall der Heizer gewährleistet werden.

Für die umfangreiche Sensorik der Stack Unit wurde neue Messhardware für insgesamt 160 Temperatur- Druck- und Spannungssensoren zum Teststand hinzugefügt. Zudem wurden in die Teststandsteuerung zusätzliche Kanäle für Sicherheitstechnik wie Kohlenmonoxid-Sensoren und Temperaturwächter zum Überhitzungsschutz in-

tegiert. Zum Anschluss der Stack Unit an die Medienversorgung wurden Hochtemperaturverrohrungen konstruiert und gefertigt (Abbildung 21).



Abbildung 21: Hochtemperaturverrohrung der Stack Unit

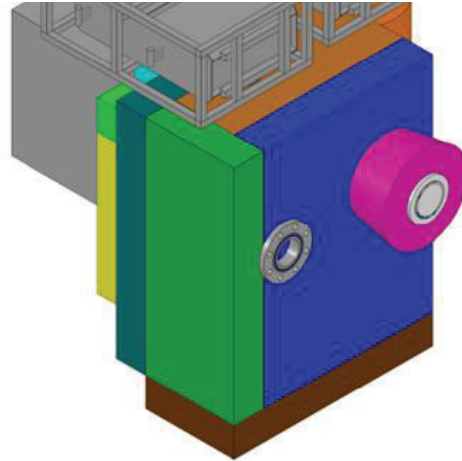


Abbildung 22: CAD-Modell der Wärmeisolierung der Verrohrung

Zur Verringerung der Wärmeverluste wurde eine Wärmeisolierung aufgebaut, bestehend aus Manschetten aus Hochtemperaturgewebe, welche die einzelnen Rohre umschließen, sowie einer isolierenden Umbauung der gesamten Verrohrung an der Ein- und Austrittsseite der Medien (Abbildung 22).

Die Teststandsoftware wurde mit einer Prozessvisualisierung und umfangreichen Regler- und Automatisierungsfunktionen ausgestattet, so dass ein teilautomatisierter Betrieb und komplexere Reglerschaltungen aus kombinierten PID- und Feedforward-Reglern ermöglicht werden. Bei der Medienversorgung des Teststandes wurden Anpassungen bei der Gasversorgung für die Gase  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  und Wasserdampf durchgeführt, um die jeweils realisierbaren Durchflussbereiche nach oben ( $\text{CO}_2$ , Wasserdampf) beziehungsweise nach unten ( $\text{CH}_4$ ) auszuweiten. Dafür wurden neue Massenflussregler verbaut und Mess- und Ventiltechnik getauscht. Für die Speisewasserversorgung des Dampferzeugers wurde ein zusätzlicher Aufbereitungsschritt vorgesehen, um die im Wasser enthaltenen Verunreinigungen, insbesondere Silizium und Schwefel, zu reduzieren. Dadurch kann einer durch diese Kontaminanten verursachte zusätzliche Degradation der Stack Unit im Versuchsbetrieb in hohem Maße vorgebeugt werden. Zur Sicherstellung einer ausreichenden Wasserqualität, wurden

regelmäßig Proben genommen und analysiert. Weiterhin werden Analysen parallel zum Versuchsbetrieb durchgeführt, um auf Verunreinigungen entsprechend schnell reagieren zu können.

Zur Vermeidung von Kohlenstoffablagerungen im Ko-Elektrolysebetrieb in den Ausgangsleitungen der Stack Unit wurden kritische Stellen identifiziert und dort das Risiko für Ablagerungen durch Maßnahmen wie Rohrbegleitheizungen, zusätzliche Temperaturüberwachungen und Injektion von Wasserdampf in das Gasgemisch vermindert. An einer anderen Testanlage zur druckaufgeladenen Untersuchung von Short-Stacks konnte dieses Verfahren bereits erfolgreich demonstriert werden.



Abbildung 23: Teststands Aufbau mit Sunfire-Stack Unit

## **1.7 TAP3.2.DLR.2 Experiment Stack Unit**

Gemäß zuletzt gültigem Zeitplan wurde das TAP im Zeitraum 01/2020–10/2020 bearbeitet.

### **1.7.1 Ausgangslage**

Ausgangspunkt der experimentellen Untersuchungen einer 24er Stack Unit von Sunfire im reversiblen Betrieb am DLR stellen die genannten Arbeiten aus TAP3.2.DLR.1 zur Anpassung der Testumgebung dar. Darüber hinaus wurden Vorarbeiten von Sunfire im Projekt GrInHy geleistet, in dem ein rSOC System erstmals aufgebaut und getestet wurde. Obgleich die enthaltene Stacktechnologie reversibel betrieben werden kann, zeigte sich im Rahmen dieser rSOC Entwicklung, dass ein Systembetrieb äußerst komplex und die dynamischen Anforderungen an die Stack Unit im Betrieb eine große Herausforderung darstellen. Anknüpfungspunkt der mit dem Projekt-



partner geplanten experimentellen Versuche am DLR waren somit die bereits geleisteten Voruntersuchungen von Sunfire.

### 1.7.2 Zielstellung

Versuche mit stationärer und dynamischer Betriebsweise an der Sunfire Stack Unit sollten zur Parametrierung und Validierung des SOEC-Modul-Modells und zum Verständnis des Betriebsverhaltens durchgeführt werden. Die Versuche sollten zunächst in Absprache mit den Projektpartnern definiert und dann umgesetzt werden.

### 1.7.3 Umsetzung und Ergebnis

Die Absprache bezüglich der experimentellen Versuche erfolgte mit dem Projektpartner Sunfire.

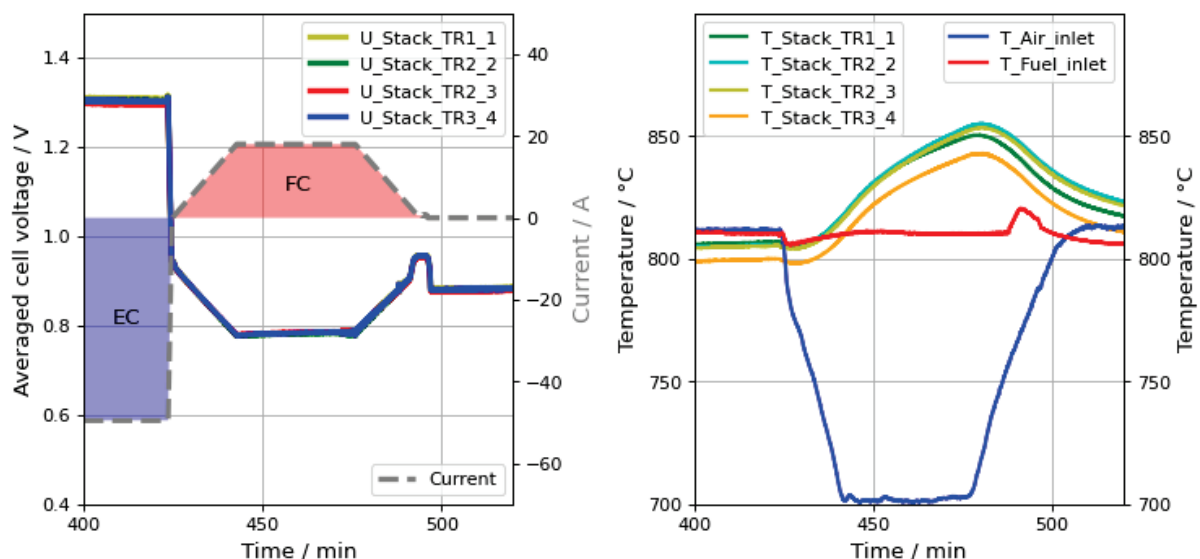


Abbildung 24: Experimentelle Untersuchung der dynamischen Umschaltung zwischen EC und FC Betriebsmodus. Exemplarisch sind das Spannungs- und Temperaturverhalten von vier der 24 Stacks der Stack Unit dargestellt.

Die transiente Umschaltung zwischen Elektrolyse- und Brennstoffzellenmodus wurde experimentell mit der 24er Stack Unit von Sunfire untersucht. Dabei wurden systemtechnisch relevante Betriebszustände für die jeweiligen Modi gewählt. Die Umschaltung erfolgte nach Erreichen eines stationären EC-Betriebspunkts. Die Regelung des transienten Übergangs vom EC- in den FC-Betriebsmodus sieht die schnelle Verrin-

gerung des Stroms im Elektrolysemodus bei gleichzeitiger Umschaltung der Gase (90/10 H<sub>2</sub>O/H<sub>2</sub> auf 60/40 H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>) vor. Damit wird einer schnellen Abkühlung durch den endothermen EC-Betriebsbereich vorgebeugt. Darüber hinaus erfolgt eine schnelle Reduzierung der Lufteintrittstemperatur bei gleichzeitiger Erhöhung des Luftmassenstroms, um dem erhöhten Kühlungsbedarf im FC-Modus zu genügen. Die experimentellen Daten zum rSOC-Betrieb wurden dazu genutzt, das reale Betriebsverhalten weitergehend zu analysieren und entsprechende Regler am Teststand zu parametrieren.

Abbildung 25 zeigt die transiente Anfahrprozedur eines stationären 50 kW<sub>el</sub> Betriebspunkts im EC-Modus der 24er Stack Unit. Weiterhin wurde mittels Erhöhung der Stromdichte die dynamische Anfahrt eines exothermen 66 kW<sub>el</sub> Betriebspunkts untersucht. Diese Art von Experimenten wurde mit unterschiedlich schnellen Stromrampen durchgeführt und dazu genutzt sowohl das Anfahren als auch die stationären Betriebszustände bestmöglich zu evaluieren und die Transienten im Modulmodell weitergehend zu parametrieren und zu validieren.

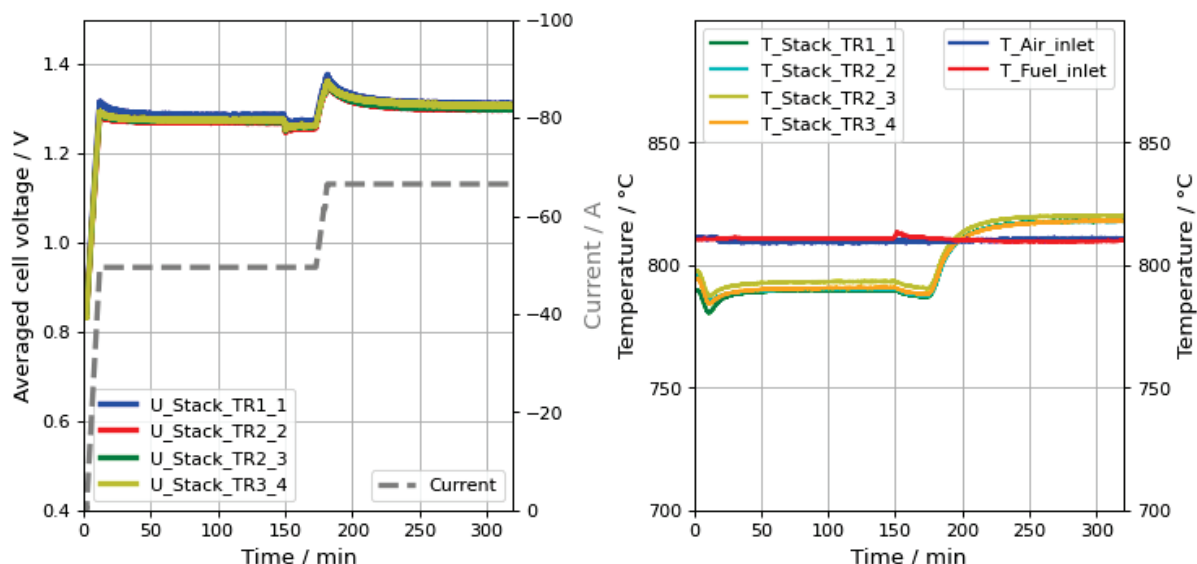


Abbildung 25: Exemplarische Darstellung der experimentellen Untersuchung des dynamischen Anfahrverhaltens von stationären und systemrelevanten EC-Betriebspunkten.

Mit Hilfe der experimentellen Versuche zum stationären und dynamischen Betrieb wurde die Parametrierung und Validierung des SOC-Modul-Modells erfolgreich unterstützt.

## **1.8 TAP3.4.DLR Validierung am Gesamtsystem**

Gemäß zuletzt gültigem Zeitplan wurde das TAP im Zeitraum 06/2020–12/2020 bearbeitet.

### **1.8.1 Ausgangslage**

Für dieses Arbeitspaket standen die Modelle aus TAP3.1.DLR und die experimentellen Ergebnisse aus TAP3.2.DLR sowie experimentelle Ergebnisse von Sunfire zur Verfügung.

### **1.8.2 Zielstellung**

Die Ergebnisse von TAP3.1, 3.2 und 3.3 sollten verwendet werden, um eine optimierte dynamische Betriebsführung zu entwickeln. Die drei wichtigsten Ziele des DLR in diesem Arbeitspaket waren (i) das Vorliegen eines validierten dynamischen rSOC-Simulationsmodells der Sunfire Hotbox (Stack Unit mit Gas Processing Unit, inkl. Einzelstacks, Wärmeübertrager, Vorheizler), (ii) die Unterstützung des Partners Sunfire bei der Generierung von Wissen zur Degradation der Stacks in Abhängigkeit von der Betriebsführung sowie (iii) die Erarbeitung von Strategien für eine möglichst „stackschonende“ dynamische Betriebsführung.

### **1.8.3 Umsetzung und Ergebnis**

Das dynamische rSOC-Simulationsmodell (i) wurde bereits in TAP3.1.DLR.2 Hotbox-Modell und TAP3.1.DLR.3 Parametrierung und Validierung Hotbox-Modell beschrieben und wird daher in diesem Abschnitt des Berichts nicht erneut aufgegriffen.

Die Unterstützung von Sunfire bei der Generierung von Wissen zur Degradation der Stacks in Abhängigkeit von der Betriebsführung (ii) erfolgte lediglich durch die Zuarbeit von Betriebsführungssimulationen wie z. B. in Abbildung 18 zu sehen ist. Die Auswertung ist im Bericht von Sunfire zu finden.

Für die Erarbeitung von Strategien für eine möglichst „stackschonende“ dynamische Betriebsführung (iii) wurden maßgeblich zwei Ansätze verfolgt. Der erste Ansatz beschäftigt sich mit dem Umschaltvorgang von SOFC zu SOEC und SOEC zu SOFC, da durch diese Umschaltung hohe thermische Belastungen für die Stacks auftreten. Der zweite Ansatz beschäftigt sich mit dem Versuch die Stacktemperaturen in ver-

schiedenen Teillastfällen möglichst unverändert zu halten. Beide Ansätze werden im Folgenden exemplarisch dargestellt.

Für das Umschalten vom SOEC- in den SOFC-Betrieb wird zunächst ein beispielhaftes Betriebskonzeptergebnis beschrieben:

- Reduktion der SOEC-Last mit definierter Rampe; langsames Erhöhen der Wasserstoffmenge im Feedgas
- Wenn die Austrittstemperatur des Reaktors unter die Eintrittstemperatur sinkt wird die restliche SOEC-Last schlagartig reduziert und der Wechsel in den SOFC-Betrieb folgt
- Im SOFC-Betrieb wird das Umschalten von der Elektrolyse- auf die Brennstoffzellen-Feedgaszusammensetzung fortgesetzt und die SOFC-Leistung langsam erhöht

Während des gesamten Betriebs werden Luftmassenstrom und Gaseintrittstemperaturen kontinuierlich angepasst. Abbildung 26 zeigt beispielhaft für einen Wechsel von einem Elektrolyse- zu einem Brennstoffzellenbetriebspunkt die Entwicklung einer Betriebsstrategie. So können mit der Simulation unterschiedliche Konfigurationen getestet werden. Dabei können neben den messbaren Größen wie Stacktemperatur- und Spannung auch Größen analysiert werden, die ohne die Simulation nicht bekannt wären. Beispielsweise ist es möglich die zeitlichen und örtlichen Temperaturgradienten zu bewerten.

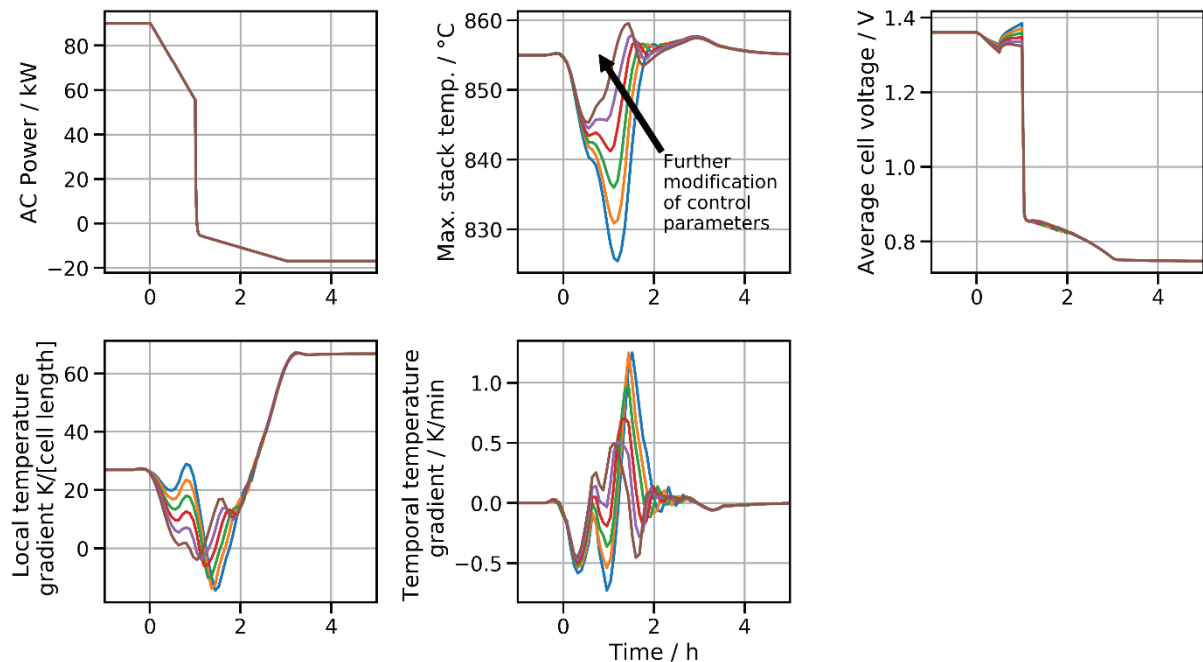


Abbildung 26: Transienter Wechsel vom Elektrolysebetrieb in den Brennstoffzellenbetrieb. Zur Entwicklung von Betriebsstrategien können unterschiedliche Konfigurationen des Regelungssystems untersucht werden. In diesem Beispiel begann die Analyse bei der blauen Konfiguration. Allerdings führte dies zu einem großen Abfall in der Stacktemperatur. Die violette Konfiguration verhält sich schließlich sehr gut. Eine weitere Veränderung der Parameter (braun) führt zu einer Übertemperatur.

Das DLR hat eine innovative, stackschonende, weil wenig temperaturverändernde, Betriebsstrategie für den Elektrolysemodus entwickelt. Diese Betriebsweise ist nur im Elektrolysemodus möglich, zeigt aber eine Möglichkeit auf von einem Standby-Betrieb oder vom thermoneutralen Betrieb aus direkt und ohne thermische Belastung in jeden Teillastbetriebszustand zu wechseln. In Abbildung 27 ist der Wechsel zwischen Standby und Elektrolysebetrieb in Teillast dargestellt. Da die Elektrolyse bei niedriger Teillast endotherm ist, kann dies zu niedrigen Betriebstemperaturen der Zellen, und damit zu hohen elektrochemischen Verlusten führen. Weiterhin können Änderungen im Betriebspunkt zu zeitlichen Temperaturgradienten führen. Dagegen ist das thermische Verhalten im thermoneutralen Betrieb und bei OCV (also im Standby) ähnlich. Daher kann zwischen beiden Betriebspunkten hin und her gesprungen werden. Bei einem solchen gepulsten Betrieb kann durch Veränderung der Pulsweite die Leistung moduliert werden. Von diesem Punkt aus kann dann wiederum auch schneller in einen möglichen Brennstoffzellenmodus übergegangen werden, da der hier vorgeschlagene Elektrolysebetrieb nicht endotherm ist. Da dieses

simulative Ergebnis erst spät im Projektverlauf erarbeitet wurde, gab es bisher weder für Sunfire noch das DLR eine Möglichkeit diese innovative Möglichkeit auch in einem Experiment zu untersuchen.

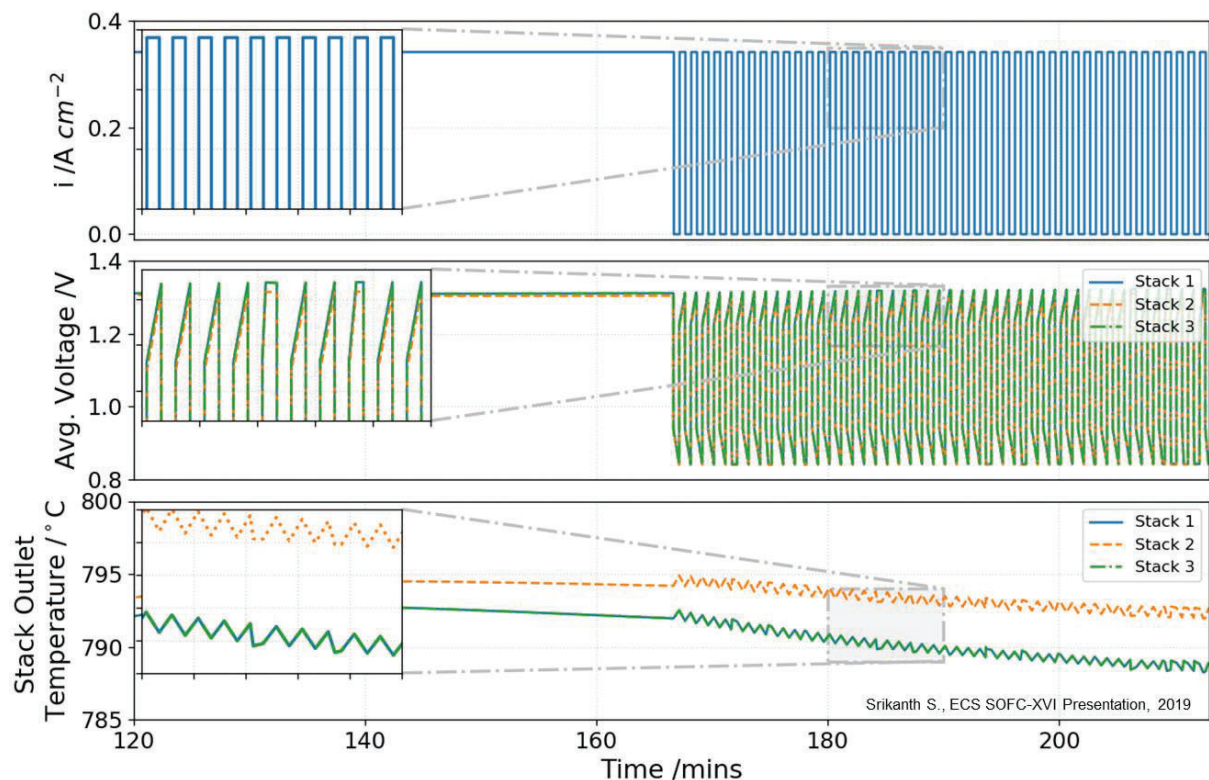


Abbildung 27: Betriebsstrategie für den Elektrolysebetrieb in Teillast. Durch einen gepulsten Betrieb zwischen OCV und thermoneutraler Spannung kann die Leistung moduliert werden.

## 1.9 Weitere Ereignisse

Außereuropäischen Reisen, die im Berichtszeitraum durchgeführt wurden:

- Die dem Projektträger angezeigte Reise von Herrn Srikanth zu den Workshops „Fuel Cell Systems“ und „BALANCE rSOC“ im Mai 2019 in Brügge, Belgien, wurde durchgeführt.

Veröffentlichungen im Berichtszeitraum:

- Im Berichtszeitraum erfolgte eine Veröffentlichung in Form eines Vortrags bei den Workshops „Fuel Cell Systems“ und „BALANCE rSOC“ im Mai 2019 in Brügge, Belgien. Der Vortrag wurde von Herrn Srikanth gehalten. Die gezeigte Präsentation und der Reisebericht wurden dem Projektträger am 08.07.2019 per E-Mail zugesandt.

## **2 Vergleich des Vorhabenstands mit der ursprünglichen (bzw. mit Zustimmung des ZG geänderten) Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung**

### **2.1 Meilensteine**

Für das DLR war Meilenstein 4 „Abschluss Validierung des dynamischen Simulationsmodells“ zur Erfüllung vorgesehen. Der Meilenstein sollte laut Gesamtvorhabenbeschreibung im Projektmonat 22 erfüllt werden, was kalendarisch Juni 2020 entspricht. Der Meilenstein wurde fristgerecht erfüllt und die Erfüllung des Meilensteins am 22.07.2020 an den PTJ mit einem kurzen Bericht gemeldet. Details zur Validierung sind in diesem Bericht im Kapitel 1.8 TAP3.4.DLR Validierung am Gesamtsystem dargestellt.

### **2.2 Umsetzung von Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung**

Die Umsetzung von Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung entspricht dem in Tabelle 1 auf Seite 7 zeitlich aufgeführten Plan.

## **3 Fortschreibung des Verwertungsplans**

### **3.1 Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte<sup>1</sup>**

Im Vorhabenzeitraum erfolgten keine Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen. Es wurden keine Schutzrechte erteilt oder in Anspruch genommen.

---

<sup>1</sup> Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte, die vom ZE oder von am Vorhaben Beteiligten gemacht oder in Anspruch genommen wurden, sowie deren standortbezogene Verwertung (Lizenzen u.a.) und erkennbare weitere Verwertungsmöglichkeiten

## 3.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende<sup>2</sup>

Die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten sind in der Verbundvorhabenbeschreibung detailliert dargelegt und haben sich während des Vorhabenzeitraums nicht verändert.

## 3.3 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende<sup>3</sup>

Die wissenschaftlichen und/oder technischen Erfolgsaussichten sind in der Verbundvorhabenbeschreibung detailliert dargelegt und haben sich während des Berichtszeitraums nicht verändert.

Zu Beginn des Projekts war die Verzahnung von Experimenten an großen SOC-Modulen und -Systemen mit Modul- und Systemsimulation völliges Neuland. Das vorliegende Projekt hat maßgeblich dazu beigetragen, das Thema voranzutreiben. SOC-Module in Experiment und Simulation zu beforschen hilft der Industrie die SOC-Technologie in den multi-MW-Maßstab zu bringen. Am Thema SOC-Module arbeiten aktuell bereits zusätzlich zum vorliegenden Vorhabenkontext drei Doktoranden im Team SOC-Systeme des DLR-Teilprojektleiters. Die Drittmittelprojekte, die diese Doktoranden finanzieren konnten auch deshalb akquiriert werden, weil die Arbeiten im hier vorliegenden Projekt vorangetrieben werden konnten. Am generellen Thema rSOC arbeitet im Team SOC-Systeme ein weiterer Doktorand. In den letzten Berichten hatte das DLR informiert: „Das DLR ist überzeugt, dass das Thema SOC-Module kurzfristig den Sprung der Technologie in den MW-Maßstab vorantreibt.“ Mittlerweile treibt die Firma Sunfire den Aufbau mehrerer multi-MW-Anlagen voran. Dieses Projekt hat auch daran einen maßgeblichen Anteil.

---

<sup>2</sup> Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont) – z. B. auch funktionale/wirtschaftliche Vorteile gegenüber Konkurrenzlösungen, Nutzen für verschiedene Anwendergruppen/-industrien am Standort Deutschland, Umsetzungs- und Transferstrategien (Angaben, soweit die Art des Vorhabens dies zulässt).

<sup>3</sup> Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont) – u. a. wie die geplanten Ergebnisse in anderer Weise (z. B. für öffentliche Aufgaben, Datenbanken, Netzwerke, Transferstellen etc.) genutzt werden können. Dabei ist auch eine etwaige Zusammenarbeit mit anderen Einrichtungen, Firmen, Netzwerken, Forschungsstellen u. a. einzubeziehen.



### 3.4 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit<sup>4</sup>

In den letzten Berichten wurde informiert: „Über die in der Verbundvorhabenbeschreibung dargelegten Aktivitäten hinaus, werden aktuell zwei Projektanträge im Team SOC-Systeme geschrieben, die experimentelle und simulative Untersuchungen von SOC-Modulen im Systemkontext beinhalten.“ Beide Projekte wurden bewilligt. Das Projekt NAUTILUS im EU-Förderprogramm Horizon 2020 wird vom Team SOC-Systeme geleitet. Das NAUTILUS-Konsortium (u. a. SolidPower, MAN, Meyer Werft) beforscht den Einsatz von SOFC-Systemen mit 5-10 MW auf Passagierschiffen. Im Projekt SWITCH (u.a. Shell, HyGear) im EU-Förderprogramm Horizon 2020 „Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking“ wird der Einsatz von SOC-Systemen für Wasserstofftankstellen vorbereiten und demonstrieren. Das hier vorliegende Projekt hat sicherlich nicht nur das DLR bei der weiteren Forschung unterstützt, sondern auch einen generellen Impuls für das industrielle Upscaling der SOC-Technologie beigetragen.

Stuttgart, 29.06.2021

---

Ort, Datum

Marius  
Tomberg

Digital signiert von Marius Tomberg  
DN: c=DE, ou=DLR-TT-ECE, o=DLR, cn=Marius Tomberg, e=marius.tomberg@online.de  
Grund: Ich bin der Verfasser dieses Dokuments  
Ort: Stuttgart  
Datum: 2021.07.12 15:48:22+02'00'  
Foxit PDF Reader Version: 11.0.0

---

Marius Tomberg (Projektleiter)

---

<sup>4</sup> Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit für eine mögliche notwendige nächste Phase bzw. die nächsten innovatorischen Schritte zur erfolgreichen Umsetzung der F&E-Ergebnisse.