



Schlussbericht vom 30.11.2020

---

## Da Vinci

# Thermelin (Thermische und elektrische Energie in Einfamilienhäusern)

---



©HEXIS AG 2020



# HEXIS Exzellente Brennstoffzellen-Technik

**Datum:** 30. November 2020

**Ort:** Bern

**Subventionsgeberin:**

Bundesamt für Energie BFE  
Sektion Energieforschung und Cleantech  
CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)  
[energieforschung@bfe.admin.ch](mailto:energieforschung@bfe.admin.ch)

**Subventionsempfängerin:**

Hexis AG  
Zum Park 5  
CH-8404 Winterthur  
<http://www.hexis.com>

**Autor/in:**

Andreas Mai, Hexis AG, [andreas.mai@hexis.com](mailto:andreas.mai@hexis.com)  
Thomas Zähringer, Hexis AG, [thomas.zaehringer@hexis.com](mailto:thomas.zaehringer@hexis.com)  
Michael Dold, Hexis AG, [michael.dold@hexis.com](mailto:michael.dold@hexis.com)  
Emanuel Dymczyk, Hexis AG, [emanuel.dymczyk@hexis.com](mailto:emanuel.dymczyk@hexis.com)  
Jan Gustav Grolig, Hexis AG, [jan.grolig@hexis.com](mailto:jan.grolig@hexis.com)

**BFE-Bereichsleitung:** Stefan Oberholzer, [stefan.oberholzer@bfe.admin.ch](mailto:stefan.oberholzer@bfe.admin.ch)  
**BFE-Programmleitung:** Men Wirz, [man.wirz@bfe.admin.ch](mailto:man.wirz@bfe.admin.ch)  
**BFE-Vertragsnummer:** SI/501156-01

**Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.**



## Zusammenfassung

Das DaVinci Projekt mit dem Hauptziel einen Demonstrator eines 1.5 kWel Brennstoffzellenheizgeräts, welcher mittels Dampf-reformierten Erdgas und einer elektrischen Effizienz über 50 % betrieben wird, konnte erfolgreich abgeschlossen werden.

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass: Die Zell- und Stacktechnologie der Hexis AG grundsätzlich für den Betrieb mit Dampf-reformiertem Erdgas geeignet ist, denn es konnten mehr als 25'000 h nachgewiesen werden. Zusätzlich ist ein Stack- sowie ein Gerätekonzept erstellt worden, welches das Potential für hinreichend niedrige Kosten, insbesondere auch des Brenngasreformers aufzeigt. Schlussendlich wurde eine zugelassene Feldanlage als Demonstrator erfolgreich installiert und in Betrieb. Weiterhin wurden Marktseitig die notwendigen technischen Erfordernisse hinsichtlich der Hausinstallation und auch der kaufmännischen Darstellung untersucht und ein signifikantes Marktpotential aufgezeigt. Das DaVinci Projekt legt somit erfolgreich den Grundstein für weitere Produktentwicklungen der Firma Hexis AG.

## Summary

The DaVinci project with the main goal of a demonstrator of a 1.5 kWel fuel cell heating device, which is operated using steam-reformed natural gas and an electrical efficiency of over 50%, was successfully completed.

In summary, it can be stated that: The cell and stack technology from the Hexis AG is in general suitable for an operation with steam-reformed natural gas, since more than 25'000 hours could be verified. In addition, a stack and a fuel cell module have been developed which show sufficient low-cost potentials, including for the fuel gas reformer. Eventually, an approved field system was successfully installed as a demonstrator and is in operation. Furthermore, on the market side, the necessary technical requirements with regard to the house installation and also the commercial aspects were examined, and a significant market potential could be shown. The DaVinci project thus successfully lays the foundation for a further product development by Hexis AG.

## Take home messages

Das DaVinci Projekt liefert folgende Take home messages:

1. Mittels Dampfreformierung lassen sich mit der ESC-basierten und offenen Stacktechnologie der Hexis AG Brennstoffzellenheizgeräte mit einem hohen elektrischen Wirkungsgrad (> 50 %), einem sehr hohen Gesamtwirkungsgrad (94%) und hinreichend hoher Robustheit und Lebensdauer darstellen.
2. Die in DaVinci demonstrierten Brennstoffzellenheizgeräte weisen damit einen ähnlich hohen elektrischen Wirkungsgrad wie gasbetriebene Grosskraftwerke und einen ähnlichen hohen Gesamtwirkungsgrad wie Gasheizungen auf. Damit stellen sie im Verhältnis zum europäischen (ENTSO-E) und deutschen Strommix aber auch zum insbesondere im Winter in der Schweiz verdrängten Strommix eine klimatechnisch und ökologisch sinnvolle Alternative dar, die sich durch Biogas oder andere regenerative Beimischungen ins Erdgas noch verbessern lässt.



3. Die Brennstoffzellenheizgerätechologie der Hexis AG lässt sich in der aktuellen (1.5 kW<sub>el</sub> Leistungsklasse) skalieren und hat das nötige Kostenpotential für eine breite Marktdurchdringung, wenn technologische Entwicklungspotentiale konsequent verfolgt werden.
4. Um noch breitere Anwendungsfelder der entwickelten Technologie zu erschliessen ist eine Skalierung der Leistung insbesondere zu höheren Leistungsklassen unabdingbar.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>3</b>
<b>Summary</b> .....	<b>3</b>
<b>Take home messages</b> .....	<b>3</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>5</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>7</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>8</b>
1.1 Ausgangslage und Hintergrund .....	8
1.2 Motivation des Projektes .....	9
1.3 Projektziele .....	9
1.4 Projektstruktur.....	11
<b>2 Anlagenbeschrieb</b> .....	<b>11</b>
<b>3 Vorgehen und Methode</b> .....	<b>13</b>
3.1 Meilensteinplan.....	15
<b>4 Ergebnisse und Diskussion der einzelnen HEXIS-Arbeitspakete</b> .....	<b>17</b>
4.1 AP2: ASC- und ESC-Zell- und Stacktechnologie .....	17
4.1.1 Benchmark der Stacktechnologien.....	17
4.1.2 Eignung der ESC Stacktechnologie .....	18
4.2 AP3: Stackmodul .....	20
4.2.1 Fuel Processor.....	20
4.2.2 Integration in das Stackmodul .....	29
4.2.3 Übersicht der Stackmodule .....	30
4.2.4 Leistungsdaten der Stackmodule .....	31
4.2.5 Langzeitverlauf und Degradation .....	33
4.3 AP4: Brennstoffzellen-System.....	35
4.3.1 Schema.....	35
4.3.2 Komponenten .....	35
4.3.3 Demonstrator (1. Gen.) und Feldtestanlagen (2. Gen.) .....	45
4.4 AP5: Hausintegration / Energiemanagement und AP6: Markt- und Kostenanalyse .....	48
4.4.1 Marktanalyse .....	48
4.5 Relevante Ergebnisse der Verbundprojektpartner .....	50
4.5.1 Viessmann Werke Allendorf .....	50
<b>5 Schlussfolgerungen und Fazit</b> .....	<b>53</b>
<b>6 Ausblick und zukünftige Umsetzung</b> .....	<b>53</b>
6.1 Vorentwicklung HEXIS BZH Vau5.....	53
6.1.1 Definition der Hauptanforderungen / Entwicklungsschwerpunkte.....	53
6.1.2 Roadmap Entwicklung / Meilensteinplanung.....	54



6.1.3	Konzepterarbeitung .....	54
6.1.4	Herstellgrenzkostenabschätzung .....	54
<b>7</b>	<b>Nationale und internationale Zusammenarbeit .....</b>	<b>55</b>
<b>8</b>	<b>Kommunikation .....</b>	<b>56</b>
<b>9</b>	<b>Publikationen .....</b>	<b>56</b>
<b>10</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>57</b>



## Abkürzungsverzeichnis

ASC	anode supported cell, anodengestützte SOFC
CPOx, CPO	catalytic partial reforming, katalytische partielle Oxidation
ESC	electrolyte supported cell, elektrolytgestützte SOFC
STR	steam reforming, Dampfreformierung
DVGW	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.
EnEV	Energieeinsparverordnung



# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangslage und Hintergrund

Beschreibung des aktuellen Standes der Technik und/oder Markt (inkl. Literaturanalyse), den existierenden Herausforderungen sowie des Kontexts des vorliegenden Projekts

Brennstoffzellensysteme ermöglichen die simultane Bereitstellung von elektrischem Strom und Wärme in Gebäuden auch in Leistungsklassen, die die Versorgung von Einfamilienhäusern (Mikro-KWK) ermöglichen. Hierbei sind höhere elektrische Wirkungsgrade als bei konventionellen Vergleichstechnologien (Verbrennungsmotor, Stirling Maschine, Dampfmotor etc.) zu erwarten.

Mikro-KWK-Anlagen haben das Potenzial konventionelle Heizungsanlagen zur Bereitstellung von Raumwärme und Brauchwarmwasser zu ergänzen oder zu ersetzen. Brennstoffzellensysteme bieten sich aufgrund ihres Wirkungsgrades bei „haushaltstypischen“ Leistungen sowie ihrer sehr geringen Schadstoffemissionen besonders an. Studien haben gezeigt, dass eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen von mehr als 20 % realistisch erscheint, selbst wenn zum Vergleich die Stromerzeugung aus GuD-Kraftwerken in Betracht gezogen wird [Obe07]. Vorteilhaft ist die Modulationsfähigkeit (Gesamtleistung und Wärmekraftverhältnis) von SOFC-BZH im Gegensatz zu anderen Mikro-BHKW.

Detaillierte Rechnungen und Feldtests zeigen jedoch, dass die Vorteile der Mikro-KWK stark vom Wärmebedarf des Gebäudes und der Einsatzdauer der Mikro-KWK-Anlage abhängen [Car07]. Es ist zu erwarten, dass Mikro-KWK-Anlagen auf Basis von Brennstoffzellen besser an die Anforderungen von Gebäuden adaptiert werden können und sich daher ein Zusatznutzen für den Betreiber ergibt [Col02].

Gegenwärtig werden zwei Brennstoffzellentechnologien für die Anwendung in der Hausenergieversorgung entwickelt. Diese sind:

- Niedertemperatur-Brennstoffzellen (PEFC)
- Hochtemperatur-Brennstoffzellen (SOFC)

Hersteller von Brennstoffzellen und Heizgerätehersteller haben verschiedene Niedertemperatur PEFC-Systeme mit einer Arbeitstemperatur um 70 °C entwickelt und im Feld getestet. Hierbei sind insbesondere die hydraulische Einbindung und die oft hohen Rücklauftemperaturen im Altbau problematisch [Moc07]. Zusammengefasst ergaben sich die folgenden Schwierigkeiten:

- hohe Kosten infolge der Systemkomplexität
- Wirkungsgradeinbußen durch Schwierigkeiten bei der Wärmeauskopplung
- geringe Systemlebensdauer infolge Schwierigkeiten beim Wasser-management, CO-Vergiftung und Taktbetrieb
- nicht passende Rücklauftemperatur

Brennstoffzellensysteme, deren Stack Betriebstemperatur im Bereich zwischen 700 und 900 °C liegt, können zur Lösung dieser Probleme beitragen. Es sind folgende Verbesserungen gegenüber Systemen mit Niedertemperatur-Brennstoffzellen (PEFC) zu erwarten:

- erhöhter elektrischer Wirkungsgrad
- erhöhter Wirkungsgrad der Wärmeauskopplung infolge der großen Temperaturdifferenz zwischen Gebäudeheizkreis und Stacktemperatur
- weiteres Marktpotenzial durch Einsatz in Heizsystemen mit hohen Rücklauftemperaturen



- höhere Zuverlässigkeit und geringere Investitionskosten durch Vereinfachungen im Wassermanagement und Reformierungsprozess

Die erwarteten Reduktionen bei Investitions- und Betriebskosten erhöhen die Wettbewerbsfähigkeit von SOFC-Mikro-KWK-Systemen im Vergleich zu anderen Technologien wie z.B. Verbrennungsmaschinen, Stirling Maschinen oder PEFC.

Das von Hexis entwickelte und in Kleinserie hergestellte BZH Galileo 1000 N ist als ein weiteres Beispiel für den derzeitigen Stand der Technik zu nennen. Es wurde erfolgreich in Pilotmärkte eingeführt und gleichzeitig ausgiebig in Feldtests erprobt. Das Galileo BZH wies folgende Gerätedaten auf: Elektrische Leistung 1,0 kW; elektrischer Wirkungsgrad: ca. 35 %; Gesamtwirkungsgrad > 95 %; Abmessungen: 640 x 560 x 1640 mm<sup>3</sup>; demonstrierte Betriebsdauer (Einzelwerte) > 40'000 h (Labor); > 35'000 h (Feld).

Herausforderungen in einer flächendeckenden Einführung von Brennstoffzellenheizgeräten liegt in den hohen Anschaffungskosten und noch tiefen elektrischen Wirkungsgraden. Studien und Aussagen von Marktteilnehmern zeigen, dass ab 3300 € pro kW installierter elektrischer Leistung eine breite Marktdurchdringung erreicht werden kann. Neben dem elektrischen Wirkungsgrad und den Endnutzerkosten sind die Gesamteffizienz, die Lebensdauer des Brennstoffzellenstapels und des Systems von entscheidender Bedeutung für eine breite Akzeptanz beim Endkunden: Es ist notwendig, niedrige Gesamtbetriebskosten darzustellen und es ist von entscheidender Bedeutung dem Endnutzer ein leises und wartungsarmes Gerät bereitzustellen.

## 1.2 Motivation des Projektes

Die Hauptmotivation des Da Vinci Projekt lag darin, eines funktionsfähigen Demonstrators mit hinreichend grosser elektrischer Effizienz und niedrigem Kostenpotential zu entwickeln (detaillierte Ziele siehe Abschnitt 1.3), um damit eine langfristige und breite Marktdurchdringung zu ermöglichen. Weiterhin sollten Ergebnisse auf Komponentenebene generiert werden, um eine zeiteffiziente und kostengünstige anschliessende Produktentwicklung zu gewährleisten, die Motivation ging also über rein reines "Proof of Concept" hinaus. Auch wurden bereits genauere Marktbetrachtungen und Analysen die nicht nur die Machbarkeit, sondern auch den Weg in den Markt aufzeigen, da sich durch die relativ langen Entwicklungszyklen somit ggf. Chancen verbauen würden, in das Projekt mit eingeplant.

Das Projekt war zusammen mit dem deutschen Projekt Thermelin als Verbundprojekt organisiert, zusammen mit den Partnern ElringKlinger (Hauptaufgabe Herstellung von ASC-Stacks), CeramTec (Hauptaufgabe Herstellung von ASC Zellen) und Viessmann (Hauptaufgabe Systemeinbindung und Marktbeurteilung).

## 1.3 Projektziele

Im Projekt Da Vinci sollten feldtestfähige Brennstoffzellen-Heizgeräte (BZH) mit einem deutlich höheren elektrischen Wirkungsgrad (> 50 %) und zudem mit dem Ziel einer deutlichen Kostenreduktion entwickelt werden. Der Gesamtwirkungsgrad sollte weiterhin hoch (> 90 %) bleiben. Im letzten Projektjahr sollte ein begrenztes Feldexperiment durchgeführt werden. Hierfür enthält das Stackmodul (SMo) einen Dampfreformer.

Es wurden folgende 9 konkrete, messbare / nachzuweisende Einzelziele definiert. In kursiv dahinter die Zielerreichung im Verhältnis zum Ziel:

1. Projekt-Ziel: Proof of Concept mit ca. 1.5 kW<sub>el</sub> (nach Vorgaben Lastenheft)  
→ *erreicht, Startleistung aller Versuche lag bei mehr als 1.5 kW<sub>el</sub>, s. Abschnitt 4.2.4*
2. Projekt-Ziel: Proof of Concept mit  $\eta_{el} \geq 50\%$  (AC, netto)  
→ *erreicht, am Leistungsprüfstand wurden 50.5% AC netto gemessen, s. Abschnitt 4.3.3*



3. Projekt-Ziel: Proof of Concept mit  $\eta_{\text{Ges}} > 90 \%$  (Hi)  
→ *erreicht, bzw. deutlich überschritten, am Leistungsprüfstand wurden 94.3 % (Hi) gemessen, s. Abschnitt 4.3.3*
4. Projekt-Ziel: Proof of Concept BZH mit Lebensdauer  $> 3000$  h, Stack-Test mit Lebensdauer  $> 10'000$  h, Leistungs-Degradation jeweils  $< 0.3 - 0.6 \%$  pro  $1'000$  h (nach Einfahrprozess)  
→ *teilweise erreicht, Lebensdauer BZH und Stack von mehr als 19500 h erreicht, Degradation jedoch höher als  $0.6 \%/1000h$  → Ursache für höhere Degradation ( $1.5\%$  bei SMO51008 und  $2.3\%$  bei SMO4004) ist u.a. die Absenkung in der Temperatur, s. Abschnitt 4.2.4, welche in weiteren Versuchen untersucht wird. Mit CPOx basierten BZHs wurden diese Degradationswerte, statistisch breit abgesichert, im Projektzeitraum deutlich unterschritten.*
5. Projekt-Ziel: Weniger als  $10 \%$  Leistungs-Degradation durch  $\geq 30$  geplante und  $\geq 10$  ungeplante Aus-Einschalt-Zyklen auf Stack- oder BZH-Ebene (je nach Lösungsansatz)  
→ *läuft noch, aktuell 25 Zyklen auf SMO51008 mit  $31 \%$  Leistungsverlust am Referenzpunkt. Leider wurde während dieses Versuchs der Reformer verrusst. Zwei weitere Versuche wurden an SMO51012 und 51013 bereits gestartet, s. Abschnitt 4.2.3*
6. Projekt-Ziel: CE-Zertifizierung / Feldzulassung  
→ *erreicht, im Oktober 2019 durchgeführt und im November die Zulassung erreicht.*

AZ: 19-00081-160  
Seite 8 von 8

Bericht über die Prüfungen zur Einführung von Feldversuchen von Brennstoffzellenheizgeräten Typ SOFC Modul (Leonardo) zu Vitovalor SA2 DaVinci-Feldtestgerät der Firma Hexis AG, Winterthur/Schweiz



#### VII. Zusammenfassung

Auf Basis der Feststellung bei den durchgeführten Prüfungen am vorgestellten Baumuster kann eine Eignung gemäß den Vorgaben der angewendeten Prüfgrundlagen festgestellt werden. Es bestehen keine Bedenken gegen die Durchführung von Feldversuchen im Rahmen der unter Abschnitt V. genannten allgemeinen Randbedingungen für Feldversuche.

Die Anbringung des CE-Zeichens ist nicht zulässig.

Dieser Prüfbericht gilt nur in Verbindung mit den in Anlage 1.1 genannten Berichten und darf nur in vollem Wortlaut – einschließlich aller Anlagen – vervielfältigt oder weitergegeben werden. Eine auszugsweise Vervielfältigung dieses Berichtes bedarf der schriftlichen Zustimmung des Prüflaboratoriums.

Karlsruhe, 11. November 2019

DVGW-Forschungsstelle  
- Prüflaboratorium Gas -

  
(Dr. Jens Hoffmann)  
Prüfstellenleiter

  
(Jörg Endisch)  
Prüfingenieur

7. Projekt-Ziel: Proof of Concept test mit Verfügbarkeit  $> 95 \%$  über  $> 3'000$  h  
→ *erreicht, mehr als 95% Verfügbarkeit über 19500 h im Laborbetrieb und (aktuell) mehr als 1000 h im Feldbetrieb.*
8. Projekt-Ziel: Studie zur Marktfähigkeit des Konzepts  
→ *erreicht, Marktfähigkeit dargelegt und mehrfach gezeigt, dass Steam-Reforming der logische nächste Schritt in der Geräteevolution sein muss, siehe dazu auch Abschnitt 4.4.1*
9. Projekt-Ziel: optimierter Energiemanager, weitere Konzepte evaluiert  
→ *erreicht, eine optimierte Hydraulik wurde vom Projektpartner Viessmann ermittelt und wird aktuell im Feldtest getestet. Als Energiemanager wird derselbe, wie im CPOx-System eingesetzt. Siehe dazu auch Abschnitt 4.4*

Insgesamt wurde nahezu alle gesteckten Projektziele erreicht und die 2 nicht voll erreichten sind auf gutem Weg innerhalb der nächsten Monate nach Projektende noch erfüllt zu werden. Das Projekt DaVinci ist damit ein sehr wertvoller Beitrag für die Weiterentwicklung von Brennstoffzellenheizgeräten.



## 1.4 Projektstruktur

Das Projekt war zusammen mit dem deutschen Projekt Thermelin als Verbundprojekt organisiert, zusammen mit den Partnern ElringKlinger (Hauptaufgabe Herstellung von ASC-Stacks), CeramTec (Hauptaufgabe Herstellung von ASC Zellen) und Viessmann (Hauptaufgabe Systemeinbindung und Marktbeurteilung). Die Projektpartner ElringKlinger und Ceramtec sind zum 31.12.2017 aus dem Projekt ausgestiegen, das Projekt endet für Viessmann zum 31.3.2021.

## 2 Anlagenbeschreibung

Eines der Hauptziele des Projekts war der Aufbau eines bzw. mehrerer feldtesttauglicher Demonstratoren, die mittels Dampfreformierung Strom und Wärme liefern. Resultat ist ein auf dem aktuellen HEXIS-Brennstoffzellenheizgerät Vitovalor SA2 basierende Feldtestanlage, welche sowohl beim Endkunden als auch im Labor erfolgreich betrieben wird.

VITVALOR SA2		VIESSMANN	
EN 50465:2015			
Herstell-Daten / N° de fabrication / Serial no.			
7609652 917099 113			
			
Typ		DaVinci-Feldtestgerät	
$Q_{th, min. (HI)}$	1,5 kW	$Q_{th, n}$	3,0 kW ( $Q_{th, max. (HI)}$ 4,5 kW)
$P_{th, min. (50/30 °C)}$	0,68 kW	$P_{th, n (50/30 °C)}$	1,4 kW ( $P_{th, max. (50/30 °C)}$ 3,5 kW)
$P_{el, min. (HI)}$	0,53 kW	$P_{el, n}$	1,5 kW ( $P_{el, max.}$ 1,7 kW)
DE		C <sub>12x</sub> , C <sub>32x</sub> , C <sub>62x</sub> , C <sub>82x</sub> , C <sub>92x</sub>	
DE		I <sub>ZELL</sub>	2E - G20 - 20 mbar 2LL - G25 - 20 mbar
PMS		3 bar (0,3 MPa)	
Max. Vorlauftemperatur		80 °C	
NO <sub>x</sub> -Klasse		5	
Elektr. Leistungsaufnahme max.		1,5 kW/11 W (standby)	
IP20 / 230 V~ / 50 Hz			
Viessmann Werke GmbH&Co. KG		D-35107 Allendorf/Germany	
Viessmann Ges.m.b.H.		A-4641 Steinhaus bei Wels	
Viessmann (Schweiz) AG		CH-8957 Spreitenbach	

Abbildung 1: Typenschild nach Feldtestzulassung des DaVinci-Feldtestgerätes

Die dazu notwendige Feldtestzulassung wurde zusammen mit dem DVGW aus Karlsruhe (D) durchgeführt. Als spezielle Anpassung im Vergleich zum Standard Vitovalor SA2 wurde die Luftführung für die CPO-Regelung entfernt und stattdessen eine Wasserstrasse, samt Dampfreformer integriert. Dazu musste die Software der Sicherheits- und Steuerungselektronik eigens angepasst werden. Aufgrund des sehr begrenzten Feldtestumfangs wurde die Zulassung nur für Deutschland durchgeführt. In Abbildung 1 ist das Typenschild der Anlage dargestellt. Als Feldteststandort wurde ein frisch renoviertes Einfamilienhaus (Baujahr 1960) in Gottmadingen (D) ausgewählt. Der Referenzgasverbrauch liegt hier bei 14000 kWh, der Referenzstromverbrauch bei 3000 kWh. Aufgrund dieser Daten wurde eine Betriebszeit von mehr als 5000 h pro Jahr erwartet. In Abbildung 2 ist der Heizungsraum im Keller des Einfamilienhauses dargestellt. Mittig im Raum steht die DaVinci-Feldtestanlage. Rechts an der Wand hängend ist eine Gastherme zu sehen, welche bei Bedarf mit bis



zu 23 kW thermischer Leistung Spitzenlasten abdecken kann. Hinzu kommen ein Pufferspeicher um die erzeugte Wärme entsprechend vorzuhalten, sowie eine Frischwasserzapfstation für die Brauchwarmwassererwärmung. Wie im Schema in Abbildung zu sehen ist, wurde diese Hydraulik im AP5: «Hausintegration und Energiemanagement» ausgewählt, um der Anlage ein möglichst tiefes



Abbildung 2: DaVinci-Feldtestanlage im Feldtest in Gottmadingen (D).

Temperaturniveau im Rücklauf zu ermöglichen. Dies führt zu tiefen Abgastemperaturen und ermöglicht somit das Auskondensieren des Wasserdampfs aus dem Abgas. Somit lässt sich das System wasserseitig selbsterhaltend betreiben. Um im Falle einer zu geringen Wärmeabnahme den Betrieb trotzdem aufrecht zu erhalten wurde zusätzlich ein Frischwasseranschluss am Gerät vorgesehen. Im AP4: «Brennstoffzellen-System» wird auf den Aufbau des DaVinci-Feldtestgerätes näher eingegangen. Als weitere Teststandorte wurden im HEXIS-Labor Konstanz (D) fünf Anlagen installiert, welche zum Teil unter Feldtest-ähnlichen Bedingungen (i.e. Lastfälle bzw. Temperaturniveaus) betrieben werden. Aufgrund des Eigentümerwechsels der HEXIS AG wurde eine weitere Anlage zur Muttergesellschaft H2E Power Systems nach Pune, Indien versandt. Diese ist zum Zeitpunkt dieses Berichts jedoch noch nicht installiert resp. in Betrieb gegangen.

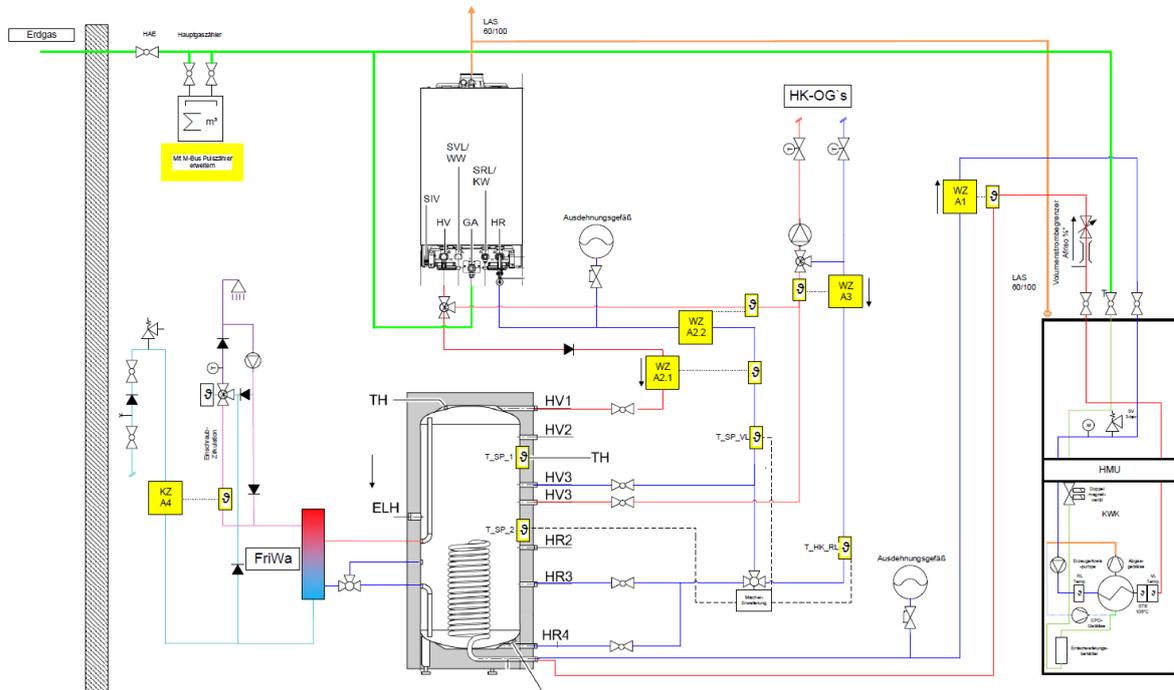


Abbildung 3: Hydraulikschemata der DaVinci-Feldtestanlage in Gottmadingen (D)

## 3 Vorgehen und Methode

### 3.1 Arbeitspakete

Die Durchführung des Projekts wurde in verschiedenen Arbeitspaketen angestrebt, welche in diesem Abschnitt detailliert beschrieben werden, die zugehörigen Ergebnisse lassen sich in Abschnitt 4 finden:

#### AP1: Projektleitung

Das im Verbund mit 3 weiteren Partnern geplante Projekt DaVinci/Thermelin wurde durch die Hexis AG koordiniert und massgeblich vorangetrieben. Bedingt durch die Einstellung der Aktivitäten bei den Partnern ElingKlinger und dementsprechend Ceramtec, musste 2017 teilweise umgeplant werden. Weiterhin musste durch Ressourcenverfügbarkeit der Zeitplan des Projekts angepasst werden. Schlussendlich liessen sich aber alle Projektziele erreichen, bzw. konnten teilweise sogar übertroffen werden.

#### AP2: ESC-Stack

Initial war die Entwicklung zweier Stackkonzepts angedacht, beim Partner Hexis AG fokussierte man sich auf die Entwicklung des ESC-Stackkonzepts und dabei auf die folgenden Unterpunkte

- 2.1 Zellentwicklung und Fertigung
- 2.2 Ableitung der Spezifikationen für Stacktechnologien (Auslegung Demonstratoren)
- 2.3 Randbedingungen für den Benchmark
- 2.4 Ausarbeitung von Versuchsprogrammen
- 2.5 Auf- / Ausbau der Prüfstands-Infrastruktur
- 2.6 Versuchsdurchführung



2.7 Gegenüberstellung der Stacktechnologien  
Siehe Meilenstein MS2: Stack-Entscheid

#### AP3: Stackmodul

Bezogen auf die Ergebnisse in AP2 ergaben sich für die Entwicklung des Stackmoduls folgende Unterpunkte:

- 3.1 STR-Fähigkeit des SMO
- 3.2 Anforderungen Stackmodul SMO
- 3.3 Brenngasaufbereitung
- 3.4 Chromfänger
- 3.5 Abgas-Luft-Wärmetauscher bzw. Luftvorwärmer
- 3.6 Test und Herstellung Stackmodule

#### AP4: System

Für den Aufbau des Demonstrators ergaben sich folgende Unterpunkte:

- 4.1 Anforderungen Gesamtsystem
- 4.2 Brenngasaufbereitung und -versorgung, Luftversorgung
- 4.3 Wärmetauscher Abgas-Heizkreis
- 4.4 Elektronik, Steuerung
- 4.5 Test und Herstellung Gesamtsystem
- 4.6 CE-Zertifizierung

#### AP5: Hausintegration / Energiemanagement

Um eine effiziente Nutzung des Demonstrators darzustellen, wurden im AP5 im Wesentlichen durch den Projektpartner Viessmann folgende Unterpunkte bearbeitet:

- 5.1 Betriebsstrategie
- 5.2 Datenaustausch
- 5.4 Haussimulation
- 5.5 Erarbeitung von hydraulischen Konzepten
- 5.6 Validierung Labor und Freigabe für Feldtest

#### AP6: Markt- und Kostenanalyse

Für die erfolgreiche Umsetzung der technischen Erkenntnisse bei der Entwicklung des Demonstrators in ein anschliessendes Produkt wurden im AP6 die folgenden Punkte adressiert:

- 6.1 Länder abhängige Marktspezifikation
- 6.2 Kosten des Gesamtsystems
  - 6.2.1 Skalierung & Kosteneinsparungspotenziale
  - 6.2.2 Lieferantenstrukturen festlegen, Lücken aufzeigen
  - 6.2.3 Kostenstruktur und -potenziale
  - 6.2.4 Wechselwirkungen Kostenpotenziale zu Funktion und Lebensdauer
  - 6.2.5 Wechselwirkung Markteinführungsstrategien und Marktakzeptanz



### 3.2 Meilensteinplan

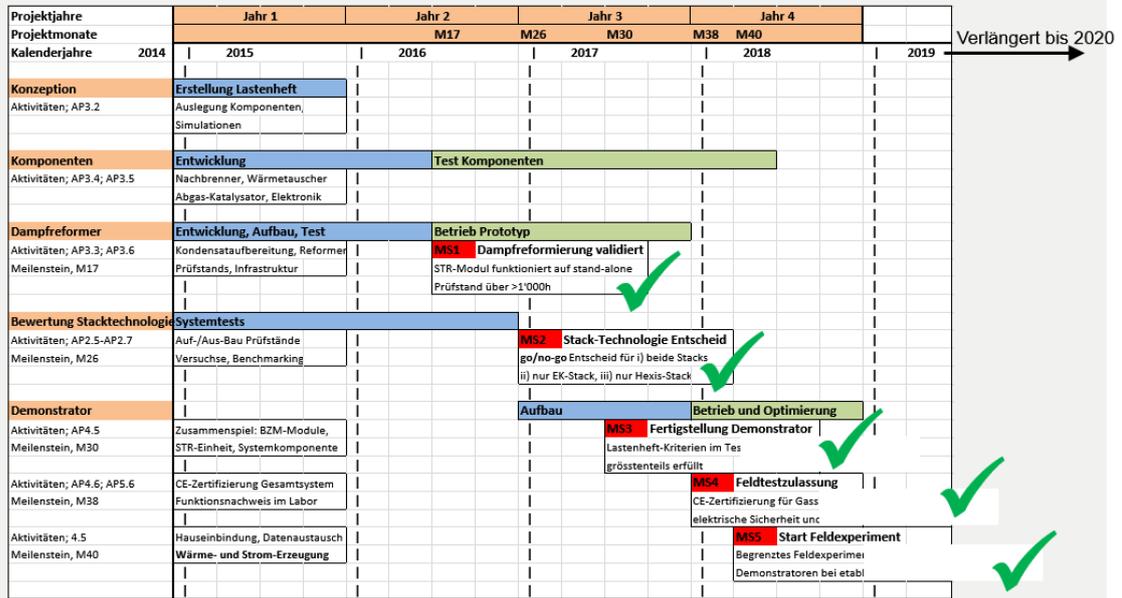
Zusätzlich zu den Arbeitspaketen waren im Gesamtprojekt folgende Meilensteine geplant:

Tabelle 1: Tabellarischer Meilensteinplan

Aktivitäten	Anfang	Ende	Meilenstein, Projektmonat, Termin	Zuständige/r Projektpartner/in
Vorstudie	10/2014	06/2016	MS1, M17, (06/2016) Dampfreaktor über 1'000h validiert	Hexis
		03/2017	inzwischen erreicht, Reaktor wurde erfolgreich über 1500 h betrieben	
Planung	10/2014	01/2017	MS2, M26, (01/2017) Stack-Entscheid	alle
			MS2: Go für System-Integration des Hexis-Stacks / No-Go Systemintegration des ASC-Stacks	
Bau / Durchführung	01/2017 09/2017	09/2017 06/2018	MS3, M30, ( <del>06/2017</del> → 06/2018) Fertigstell. Demonstrator Erfolgreich erledigt	alle
Messperiode	10/2017 03/2018	09/2018 03/2019	MS4, M38, ( <del>04/2018</del> → 10/2019) Feldtestzulassung Erfolgreich erledigt	Hexis
Erfolgskontrolle	10/2017 06/2018	10/2018 12/2019	MS5, M40, ( <del>03/2018</del> → 08/2020) Start Feldexperiment Erfolgreich erledigt	Hexis
Technologietransfer	01/2018 01/2019	10/2018 12/2019	Produkt- und Produktionsentwicklung Erfolgreich erledigt	Hexis
Kommunikation	03/2018 03/2019	10/2018 12/2020	Diverse Paper von Benjamin Vogel Ergebnisse bei diversen SOFC Konferenzen vorgestellt	
Schlussbericht		12/2020	s. vorliegendes Dokument	



# Meilensteinplanung



Verlängert bis 2020 →

Projektende 31.12.2020

Abbildung 4: Meilensteinplan in Gantt-Darstellung



# 4 Ergebnisse und Diskussion der einzelnen HEXIS-Arbeitspakete

## 4.1 AP2: ASC- und ESC-Zell- und Stacktechnologie

### 4.1.1 Benchmark der Stacktechnologien

Ein wesentlicher Teil des AP2 in den ersten 3 Jahren des Verbundprojekts war das Testen und Benchmarking der Stacktechnologien von Hexis und ElringKlinger. 2016 wurde als Meilenstein 2 der Entscheid getroffen im Projekt nur noch die Systemintegration des Hexis ESC Stacks im Projekt fortzuführen. Die Benchmarkkriterien und den Stand zum Datum des Entscheids zeigt Abbildung 4 Farblich ist der Stand des Hexis ESC-Stacks und der zwei ASC-Stack-Varianten von ElringKlinger gegenüber den Benchmark-Zielen dargestellt. Das Erreichen der Projekt-Zielwerte ist grün gekennzeichnet. Orange deutet auf eine kleinere, Rot auf eine deutlich Abweichung gegenüber den Projektzielen dar.

Kriterien					Hexis ESC	ASC-ElringKlinger		
Wichtig	Einheit	Wichtung	Produkt-Ziel	Orientierung im Projekt		D-Design	C-Design	
P el nominal	kW (AC, netto)	hoch	1-1,5	1-2	Systemleistung	1-1,5 kWel 1,5 kWel mit 50 Zellen 52%AC_netto	momentan nicht produzierbar 1-2 kWel 1,5 kWel mit 30 Zellen 50% DC_Stack mit H2	bis 1,3 kWel 1 kWel mit 30 Zellen 50% DC_Stack mit H2
eta el bei P el nominal	%	hoch	>50	<50	aus Marktsicht muss das System > 50% haben	~48%AC_netto	~55% DC_Stack	keine Messdaten, vermutlich vergleichbar mit D-Design
eta el bei P el minimal	%	hoch	>40	>40	bezug auf Teillastwirkungsgrad			
Lebensdauer	h	hoch	>80000	10'000	Mindestanforderung für System: kein Stacktausch innerhalb von 10 Jahren. Benchmark: >80.000 h. Prognosefähigkeit bewerten! // EOL bei 80% Nennleistung bei konst. Gas in oder 40% eta el bei konstant p el	28kh (gestoppt) , 15kh, 10 kh und 5kh mit aktuellen Stacks // 5kh-Stack läuft mit 50A-80%FU	D10-076: 600h (LSC, Versuchslauf)	C15-417: 9500h (LSCF)
Degradation eta el bei konst. Gas in	%/1000h	hoch	Benchmark 0,13 %/1000h (Betrieb ohne Zyklen)	A) 0,3 - 0,6 %/1000h B) 0,25 %/Zyklus	Degradation sollte getrennt werden in zwei Berechnungen: A) bezogen auf den Betrieb B) Degradation bei Zyklen -> <b>Überbetriebe</b>	HK JAS 0,5-1,5 %/kh Spannungsverlust (bei 70-80 % FU)	0,7 %/kh (projiziert) @ 70 % FU, WPS	0,6 %/kh @ 35 % FU, APS
Max. Anzahl Zyklen (geplant)	h	hoch	120	120	Für 10 Jahre Lebensdauer Projektbeschreibung: "10% Leistungs-Degr. Durch >30 geplante und >10 ungeplante	8% Leistungsverlust über 130 Redox-Zyklen // zurzeit max. 45 Thermoredox.	3% Leistungsverlust / 50 Zyklen	12% Leistungsverlust / 50 Zyklen mit Formergas >500°C mit Dampf unklar
Max. Anzahl Zyklen (ungeplant)	h	hoch	30	30	Für 10 Jahre Lebensdauer	Auf Vau3.1 prinzipiell gezeigt / mit Vau5 noch nicht gezeigt	ohne Formergas, insb. beim Hochfahren	ohne Formergas, insb. beim Hochfahren
1.000 Sik	€	hoch	1500	offen	Absolutwerte in €	Nach momentaner Prognose leicht überschritten	Einsparpotenziale zu C-Design möglich	Nach momentaner Prognose leicht überschritten
10.000 Sik	€	hoch	1000	offen	Absolutwerte in €	Nach momentaner Prognose leicht überschritten	Einsparpotenziale zu C-Design möglich	Nach momentaner Prognose leicht überschritten
Gasaufbereitung	€	hoch	offen	offen	Gasaufbereitung, Gaserzeugung etc. Absolutwerte in €	Bosal Reformier	Hytech Reformier	kein Reformier für 1 kWel
Kondensataufbereitung	€	hoch	offen	offen	Absolutwerte in €	Höhere Cr-Werte im Kondensat	tiefer Cr-Werte aber zusätzlich Anodengaskondensator	tiefer Cr-Werte aber zusätzlich Anodengaskondensator
Mittel	Einheit	Wichtung	Produkt-Ziel	Orientierung im Projekt	Kommentar	ESC	D-Design	C-Design
Startzeit (RT bis Pel nominal)	h	mittel	1h	3h	Vom Einschalten bis einblenden (insb. relevant für Service)	Orientierung an min_Startzeit Vau4: 4h	momentan nicht produzierbar 3 h Startzeit bis Pel nominal	3 h Startzeit bis Pel nominal
Stoppzeit (P el nominal bis RT)	h	mittel	1h	3h	Vom Abschalten bis Stapel herausnehmen (insb. relevant für Service)	Orientierung an min_Stoppzeit Vau: 5h	vermutlich vergleichbar mit Startzeit (Redox-Schädigung weiter unten betrachtet)	vermutlich vergleichbar mit Startzeit (Redox-Schädigung weiter unten betrachtet)
Temperatur-Band	°C	mittel	offen	nicht relevant	Werte der Stacks untereinander vergleichen // Wie groß ist das Temperaturband bei Einhaltung der Performance, Degradation und Lebensdauer // <b>Muss zur Temperaturverteilung in einem full scale stack passen</b>	800-900°C: gleiche Performance und ähnliche Degradation	Degradation stark abhängig von Temperatur Temperatur-Abhängigkeit Performance unklar	Degradation stark abhängig von Temperatur Temperatur-Abhängigkeit Performance unklar
Druck Anode	Pa	mittel	offen	nicht relevant	Werte der Stacks untereinander vergleichen // Ziel: Gasleistungsdruck ausreichend 15mbar Wie groß ist der Druckbereich bei Einhaltung der Lebensdauer	Anodendruck I.O.	Druckverlust Anode I.O. (30 Zellen)	Druckverlust Anode I.O.
Druck Kathode	Pa	mittel	offen	nicht relevant	Werte der Stacks untereinander vergleichen Wie groß ist der Druckbereich bei Einhaltung der Lebensdauer // <b>Lüfter muss ausreichen -&gt; kein Kompressor</b>	Druckverlust Kathode I.O.	Druckverlust Kathode I.O.	Druckverlust Kathode - bei 280 N/min: ca. 12 mbar -> evtl Seltenerkanalverdichter notwendig

Abbildung 5: Benchmark-Kriterien sortiert nach Gewichtung: oben wichtig (Leistung, Alterung, Kosten), unten mittel (Robustheit); niedrig eingestufte Kriterien sind ausgeblendet. Farbliche Einstufung der Stack-Varianten gegenüber den Kriterien.

Der ESC-Stack erreichte schon 2016 mehrheitlich die Benchmark-Kriterien. Die damals bestehenden geringen Abweichungen gegenüber den Zielwerten sind heute so gut wie alle «grün» zu bewerten. Eine Ausnahme stellt die Startzeit dar, dort ist klar geworden, dass die Anforderung «1h» im Markt nicht wirklich besteht, bzw. keine Mehrkosten rechtfertigen würde, so dass das bisherige Niveau beibehalten wurde.

Der D-Design ASC-Stack wurde schon 2016 nicht mehr bei ElringKlinger gefertigt. Der Stack entfiel daher, deshalb ist die Überschrift in Abbildung 4 rot gezeichnet.



Auch das C-Design von ElringKlinger hatte viele Abweichungen (orange) gegenüber den Benchmark-Kriterien und eine viel schlechtere Einschätzung (rot) bei den entscheidenden Kriterien: geringe Erprobungszeit, höhere Degradationsraten im Dauerbetrieb und bei ungeplanten Zyklen.

Aus diesen Gründen wurde das Vorgehen zum Go/No-Go Entscheid beim Meilenstein MS2 wie folgt vorgeschlagen:

- Go: System-Integration des ESC-Stacks
- No-Go: System-Integration des ASC C-Design Stacks
- Go: Weiterentwicklung des ASC C-Design Stacks im Projekt
- No-Go: Weiterentwicklung des ASC D-Design Stacks im Projekt

Im Jahr 2017 haben die Verbundprojektpartner ElringKlinger und Ceramtec ihren Ausstieg aus dem verbundenen Projekt Thermelin angekündigt und per 31.12.2017 vollzogen. Dies hat den o.g. Entscheid nochmals bestätigt, da sonst kein Stack mehr verfügbar gewesen wäre.

#### 4.1.2 Eignung der ESC Stacktechnologie

Im AP2 wurde seitens Hexis die Tauglichkeit und die etwaige Anpassung der Hexis Zelltechnologie für den Betrieb mit Dampf-reformiertem Erdgas behandelt. Bereits der ersten Projektphase konnte dies erfolgreich abgeschlossen werden. Es konnte gezeigt werden, dass die Hexis Zelltechnologie grundsätzlich für den o.g. Betrieb geeignet ist. Weiterhin konnten bereits auf «Short-Stack»-Ebene signifikante Betriebsdauern erreicht werden:

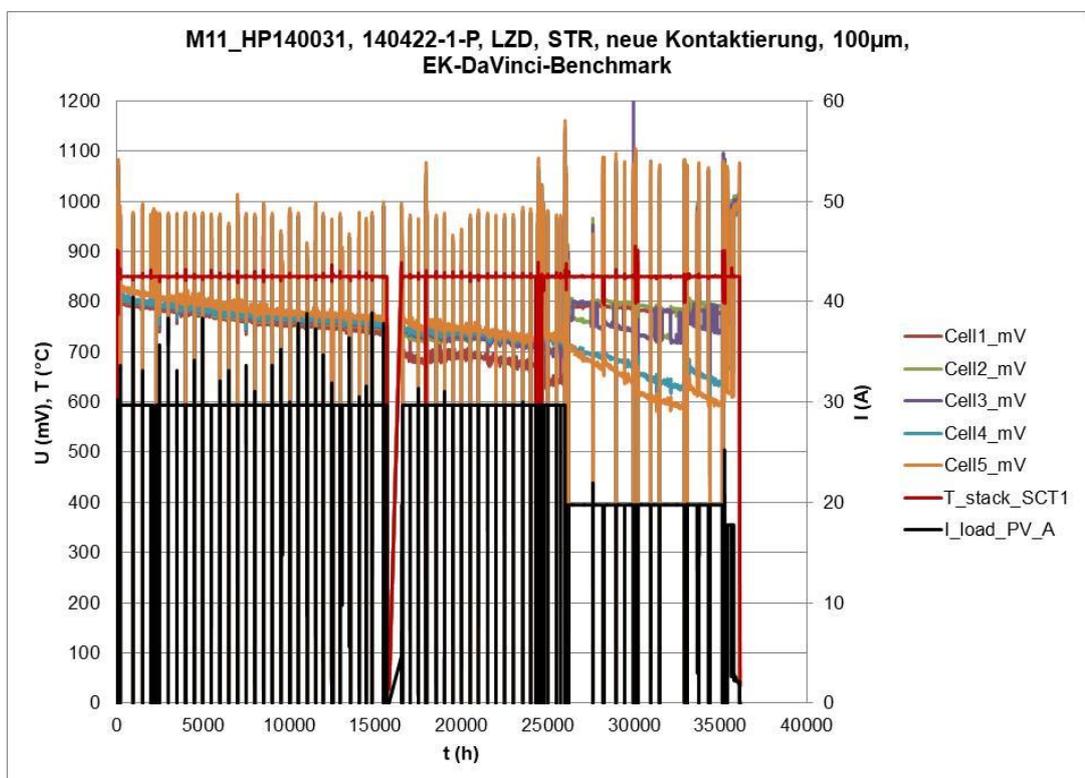


Abbildung 6: Spannungs-Zeit-Diagramm eines 5-Zellen-Stackversuchs mit einem Standard-Hexis-Stack, der mit dampfreformiertem Erdgas (4 g/h pro Ebene) betrieben wurde (bei 25994 h wurde der Stack auf CPOx Betrieb umgestellt)



Der in Abbildung 6 gezeigte Shortstack lief über ca. 26'000 h mit dampfreformiertem Erdgas. Die Degradation lag bei  $11 \text{ m}\Omega \text{ cm}^2$  pro 1000 h, (2200 - 26000 h, entsprechend  $3.5 \text{ mV} / \text{Ebene} / \text{kh}$ ). Dies entspricht einer relativen Spannungsdegradation von  $0.4 \%$  pro 1000 h bei einer Leistungsdichte von  $0.24 \text{ W/cm}^2$ . Dieser Versuch zeigt, dass die Projektanforderung  $> 10'000 \text{ h}$  Testzeit und Degradation  $< 0.6 \%$  / 1000 h erfüllt ist. Der Versuch musste wegen Problemen mit dem Wasser-Massenflussregler abgestellt werden, der verstopfte Wasser-MFC führte zu Verussung des Stacks und damit zu einer irreversiblen Schädigung, der Stack wurde danach mit CPOx reformiertem Erdgas weiterbetrieben. Der Versuch ist trotzdem als sehr erfolgreich zu sehen, zeigt aber auch auf, dass auch teure Laborkomponenten eine zuverlässige Wasserversorgung der Reformierung nicht immer gewährleisten können.

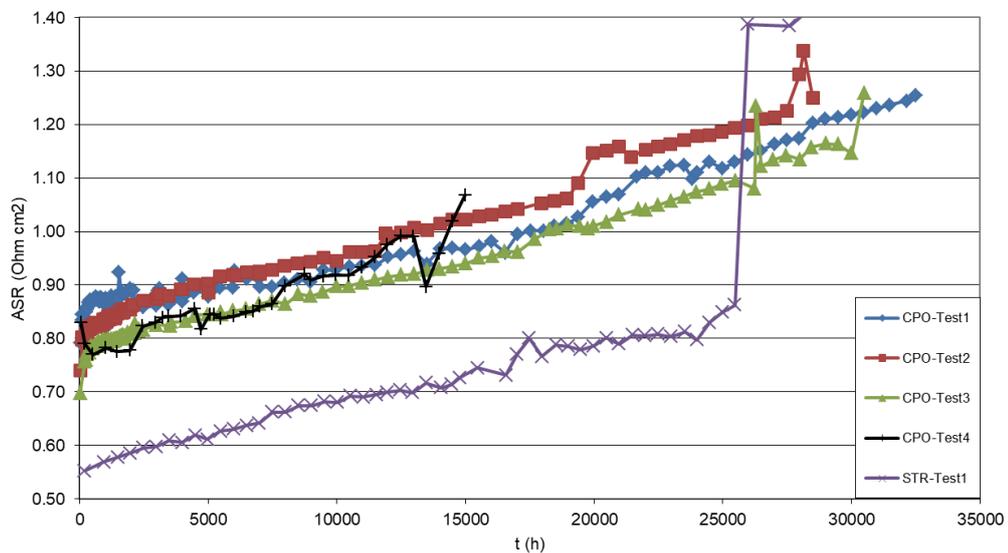


Abbildung 7: Entwicklung des flächennormierten Widerstands (ASR) für 6 Stacks. Die lila Kurve stellt den Stack aus Abbildung 5 auf CPOx Betrieb umgestellt.

Abbildung 7 zeigt, dass die Degradationsraten mit Dampfreformierung und der bisher verwendeten CPOx sehr ähnlich sind im Bereich  $10 - 15 \text{ m}\Omega \text{ cm}^2 / \text{kh}$ . Der erhöhte Wasserdampfgehalt auf der Anodenseite führt demnach nicht zu einer erhöhten Degradation bzw. verminderten Laufzeit. Dies ist eine sehr wichtige positive Erkenntnis im Projekt, d.h. die in da Vinci entwickelte Dampfreformierung kann ohne negative Auswirkungen auf die Lebensdauer verwendet werden.



## 4.2 AP3: Stackmodul

### 4.2.1 Fuel Processor

Der Fuel Processor/Reformer ist eine der Schlüsselkomponenten für den erfolgreichen Systembetrieb. Nach der erfolgreichen Testphase des 1. Prototyps wurden weitere Fuel Processoren getestet und mittlerweile über 53'000 Stunden Betriebserfahrung erzielt. In Tabelle sind die Laufzeiten der Reformer aufgelistet, wobei nach verschiedenen Entwicklungsstufen a bis c unterschieden wird. Dabei ist Stufe a, der in 2015 gelieferte erste Prototyp, der u.a. hinsichtlich seiner mechanischen Schnittstellen noch zu grosse Toleranzen hatte. Stufe b als Weiterentwicklung ist das aktuell eingesetzte Modell mit verbesserten Schnittstellen und mehr Temperaturmessstellen, mit dem am meisten Erfahrung gewonnen werden konnte. Entwicklungsstufe c ist ein kostenoptimiertes Modell, das bei dem auf eine katalytische Beschichtung verzichtet wurde. Da die Bauform dieser Reformer viele schwer zu automatisierbare Fertigungsschritte benötigt, wird mit dem Projektpartner Bosal an einem neuen Ansatz von Reformer gearbeitet. Mit möglichst vielen Standardbauteilen sollen die Fertigungskosten erheblich gesenkt werden und der aktuelle Stand der Technik kommt dem Kostenziel des Reformers schon sehr nahe.

Tabelle 2: Laufzeiten der einzelnen Fuel Processoren (FP)

Fuel Processor	Stack Module	Test Bench	Operation time	Remark
FP1 <sup>a</sup>	SMo 4001	BZ31 / SRP	≈ 1850 h / ≈22 cycles	Sawed, analyzed
FP2 <sup>b</sup>	SMo 4002	BZ31 / BZ32	≈ 13500 h / ≈10 cycles	Sawed, analyzed
FP3 <sup>b</sup> (R42893)	SMo 51006	BZ32	≈ 7200 h / blocked	≈5500 h in SMo 4003, shutdown due to soot, conversion <20%
FP4 <sup>b</sup> (R42892)	SMo 4004	Demonstrator	≈ 21000 h (running)	Milestone System
FP5 <sup>c</sup> (R45808)	SMo 4005	BZ32 / BZ31	≈ 11000 h (standby)	FMEA Tests
FP6 <sup>c</sup> (R45807)	SMo 51007	BZ36 / SR01 / SR06	≈ 7500 h (running)	Dummy SMo for commissioning



## Aufbau des Reformierprüfstandes

Der im Stackmodul integrierte Reformer wurde auf einem speziell dafür angefertigten Prüfstand getestet. Neben dem Langzeitverhalten wurden Modulationsfähigkeit, Einfluss der Wasserzugabe (Steam-Carbon-Ratio) und der Betriebstemperatur untersucht. Abbildung 8a zeigt den Aufbau des Prüfstands. Der Reformer wird mit einem simulierten Abgasstrom (grüner Pfad) aufgeheizt. Dafür wird Umgebungsluft angesaugt und mit einem elektrischen Lufterhitzer aufgeheizt. Die heiße Luft wird nach dem Reformer mit einem Wärmeübertrager wieder abgekühlt und in den Aufstellraum geblasen. Das Wasser (blauer Pfad) für den Prozess wird deionisiert (B200) und geregelt dem Reformer zugeführt. Das Erdgas (gelber Pfad) wird entschwefelt (B101) und strömt geregelt in den Reformer. Das vom Reformer erzeugte Reformat (oranger Pfad) wird zu einer Fackel geführt und verbrannt. Parallel dazu ist die Analysestrecke angebracht (roter Pfad). Das heiße Reformat wird dabei im Messgaskühler getrocknet und den Sensoren (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, CO) zugeführt. Im Anschluss wird das Messgas wieder dem Reformatstrom zugeführt und verbrannt. Das heiße Abgas wird durch einen weiteren Wärmeübertrager abgekühlt und dem Abgassystem des Labors zugeführt. Eine Thermosicherung schließt die Gasleitung bei einem Löschen der Flamme.

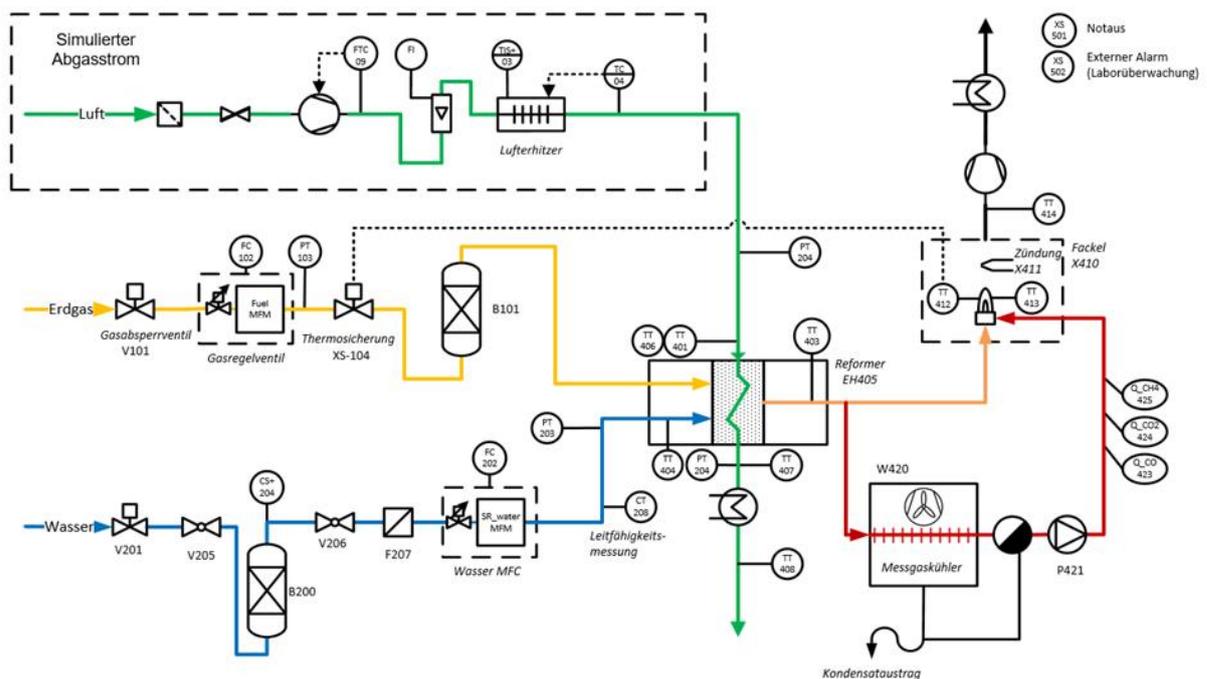


Abbildung 8a: Steam Reformer Prüfstand zur Untersuchung des Umsatzes des Reformers

In Abbildung 8b ist die Integration des Reformers in den Prüfstand zu sehen. Die simulierte Abgasluft wird in eine Verteilungskammer aus Keramik geblasen und durch die in der Abbildung erkennbaren Löcher zu den Abgasglocken aus Keramik geführt. In den vier Abgaskanälen ist jeweils ein Thermoelement (TE) zur Messung der Eintrittstemperatur angebracht. Das Reformat wird durch ein am Reformer angeschweißtes Rohr zur Fackel bzw. Messtrecke geführt.

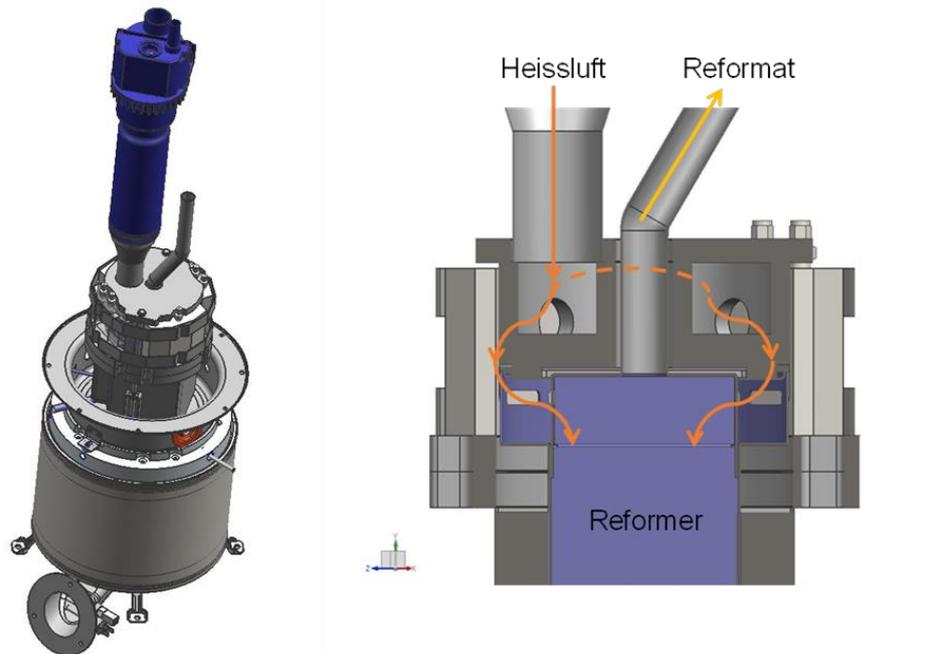


Abbildung 8b: Links: Reformer mit Luftherhitzer (blau) als Abgassimulation und nachgeschalteten WÜ. Rechts: Schnitt durch den Aufbau mit der Position der Thermoelemente zur Messung der „Abgas“-Temperatur.

Der Temperatur-Arbeitsbereich des Prüfstands ist, wie in Abbildung dargestellt, limitiert. Das Minimum der Betriebstemperatur wird bestimmt durch die Gassensorik. Die eingesetzten nicht-dispersiven Infrarotsensoren sind querempfindlich zu höheren Kohlenwasserstoffen wie Propan und Ethan. Bei niedrigen Temperaturen wird nicht der gesamte Anteil der höheren Kohlenwasserstoffe im Erdgas umgesetzt und somit wird das Messergebnis verfälscht.

Das Maximum wird begrenzt durch den elektrischen Luftherhitzer. Dieser kann laut Datenblatt zwar Temperaturen von bis zu 900 °C erzeugen, jedoch muss dafür ein Luftvolumenstrom von 600 l/min vorhanden sein. Im Gesamtsystem der BZ wird ein Luftvolumenstrom von maximal 150 l/min eingesetzt und daher wird bei dieser Untersuchung dieser Volumenstrom beibehalten. Es lassen sich Temperaturen von maximal 810 °C am Reformereintritt erzeugen.

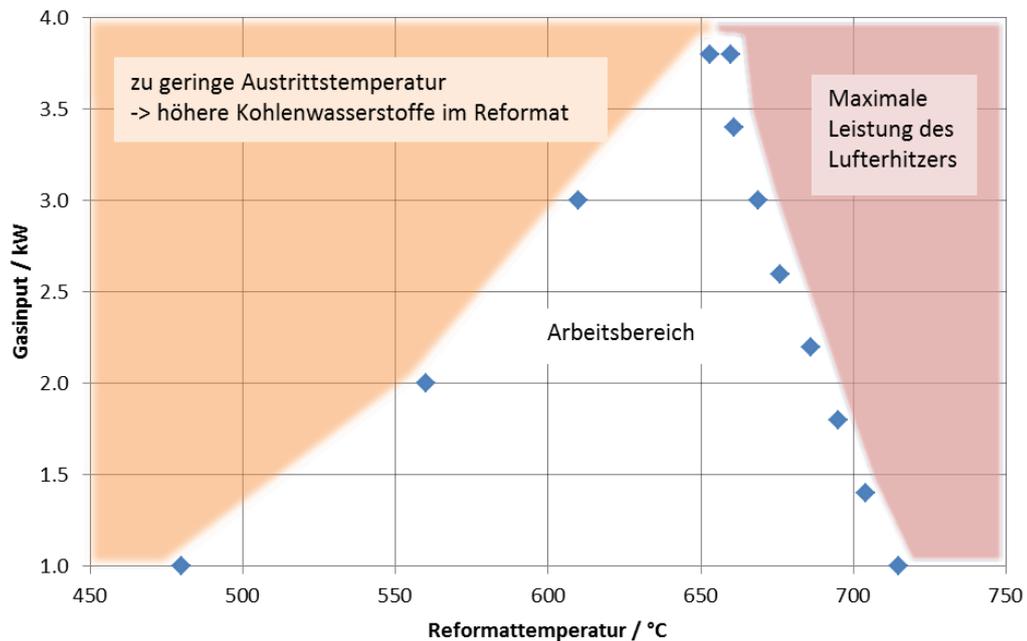


Abbildung 9: Möglicher Arbeitsbereich des Reformierprüfstandes

### Gaszusammensetzung in Abhängigkeit der Temperatur

In Abbildung 9 ist die Gaszusammensetzung des Reformiergases in Abhängigkeit der Temperatur am Reformataustritt für den Gasinput von 1 kW, 2,5 kW und 3,8 kW zu sehen. Werden die drei Diagramme verglichen, ist die Einschränkung des Prüfstandes deutlich zu erkennen. Kann bei 1 kW ein sehr breites Temperaturkennfeld abgefahren werden, ist es bei 3,8 kW dagegen nur ein sehr kleiner Temperaturausschnitt von 620-660 °C möglich.

Wie beim thermodynamischen Gleichgewicht in Abbildung 10, steigt die H<sub>2</sub>-Konzentration bei sinkendem CH<sub>4</sub> Anteil. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration steigt erst an und sinkt bei höheren Temperaturen aufgrund der verstärkten WGS Reaktion (Water-Gas-Shift Reaktion). Die WGS Reaktion führt zu einem Ansteigen der CO Konzentration mit steigenden Temperaturen.

Zu sehen ist, dass mit steigendem Gasinput sich die Kennlinien hin zu höheren Temperaturen verschieben. Schneidet bei 1 kW Gasinput die H<sub>2</sub> Kennlinie die CH<sub>4</sub> Kennlinie bei 570 °C, so liegt der Schnittpunkt bei 2,5 kW bei 680 °C. Grund für die Verschiebung ist die Verringerung von W/FCH<sub>4</sub>, in bzw. der Verweilzeit und somit des Umsatzes.

Bei 1 kW Gasinput liegt das Maximum der CO<sub>2</sub> Kennlinie zwischen 550 und 600 °C und ist somit nahe am thermodynamischen Gleichgewicht, bei dem das Maximum bei einem SCR (Steam to Carbon ratio, Verhältnis von Wasserdampf zu Kohlenstoffkonzentration (i.e. z.B. CH<sub>4</sub>)) von 1 bei 500 °C und bei einem SCR von 3 bei 600 °C liegt.

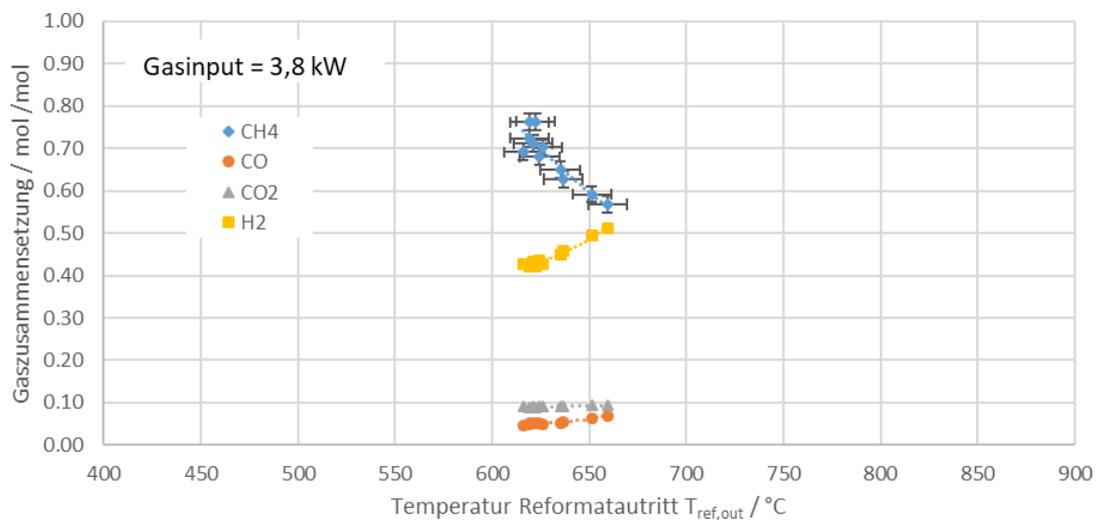
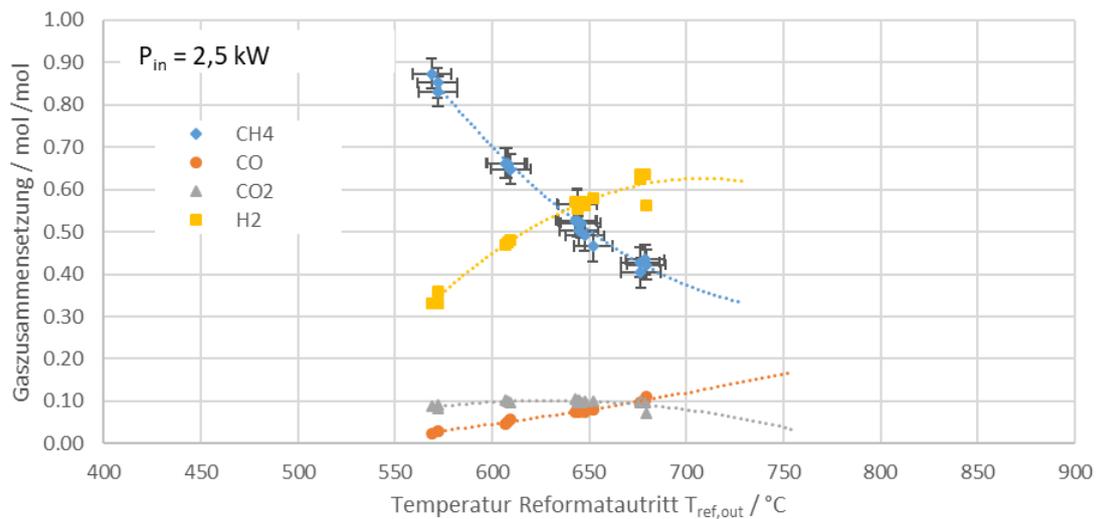
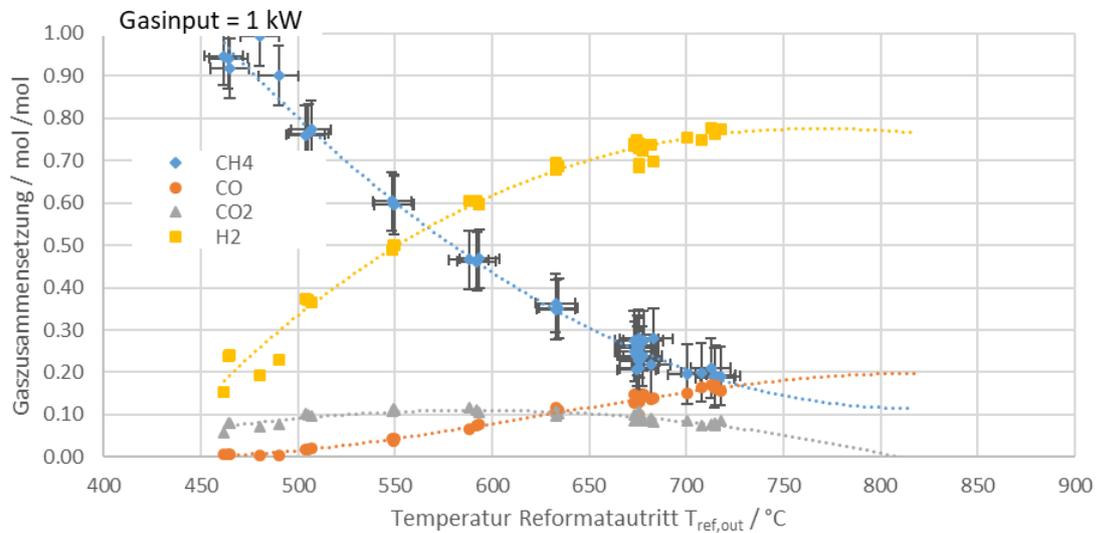


Abbildung 10: Gaszusammensetzung der drei Referenzgasinputs in Abhängigkeit von der Abgaseintrittstemperatur, SCR=2



Neben der allgemeinen Funktion des Fuel Processors stehen auch Qualität und Sicherheit der Komponente im Fokus. Nachdem bei einem Reformer Leckagen festgestellt wurden, wurde eine Qualitätskontrolle eingeführt, um den sicheren Betrieb zu gewährleisten und mögliche Leckagen des Brenngases in das Abgas des Systems zu vermeiden. Hierfür werden Öffnungen des Abgaskanals des Reformers verschlossen und ein Überdruck von 100 mbar auf der Brenngasseite angelegt. Als Qualitätsmerkmal wird die Abnahme des Drucks über die Zeit herangezogen. Ein solcher Test ist in Abbildung 11 dargestellt. Die Reformer FP3 bis FP6 sind der Reihe nach mit der Fertigungsnummer des Herstellers aufgeführt. Deutlich ist der schnelle Druckabfall bei FP3 (R42892) zu sehen, der daraufhin zur Überarbeitung zurückgeschickt wurde. FP4 (R42893) wurde als gerade noch einsetzbar eingestuft. Der Zulieferer hat daraufhin eine eigene Kontrolle vor der Auslieferung eingeführt, was dazu führt, dass FP5 und FP6 (R45807 bzw. R45808) quasi Leckagefrei angeliefert wurden.

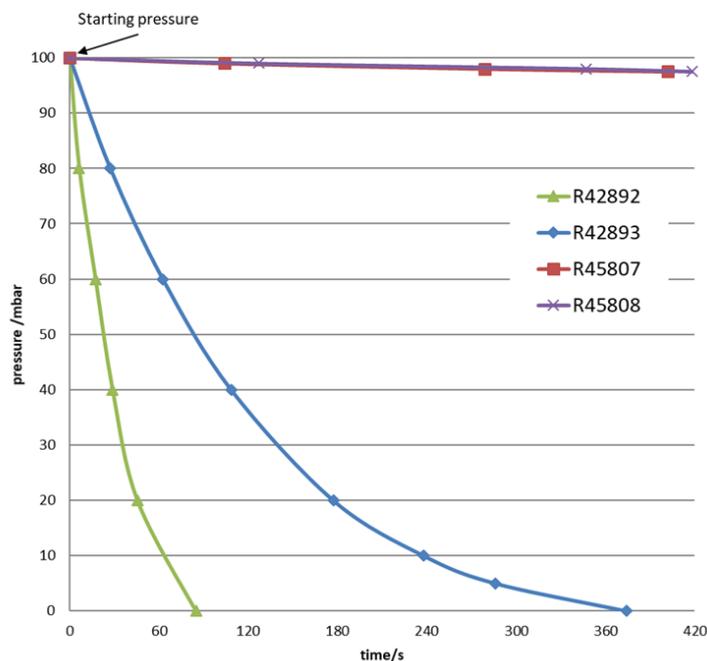


Abbildung 11: Dichtheitskontrolle der angelieferten Reformer



## Aktuelle Entwicklung

Der aktuelle Reformer besteht, wie in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** 12 links zu sehen, aus vielen einzelnen Blechteilen, die mit Handarbeit zusammenschweisst werden müssen. Es ist eine grosse Herausforderung und ein starker Kostentreiber, die Toleranzen einzuhalten. Das Ziel der Neuentwicklung des Reformers ist die Integration der standardisierten Wärmetauscher Module von Bosal, zu sehen in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** rechts. Bosal verwendet für ihre Anwendungen u.a. in der der Automobilbranche Wärmetauscher Module aus dünnen Blechen. Für Hexis und andere Partner entwickelt die Firma nun das sogenannte P3 Modul, welches für unser System kompakt genug ist. Die Entwicklungsarbeiten finden auch über das DaVinci Projekt hinaus statt, da die Weiterentwicklungen für die Integration in ein Produkt unabdingbar sind.

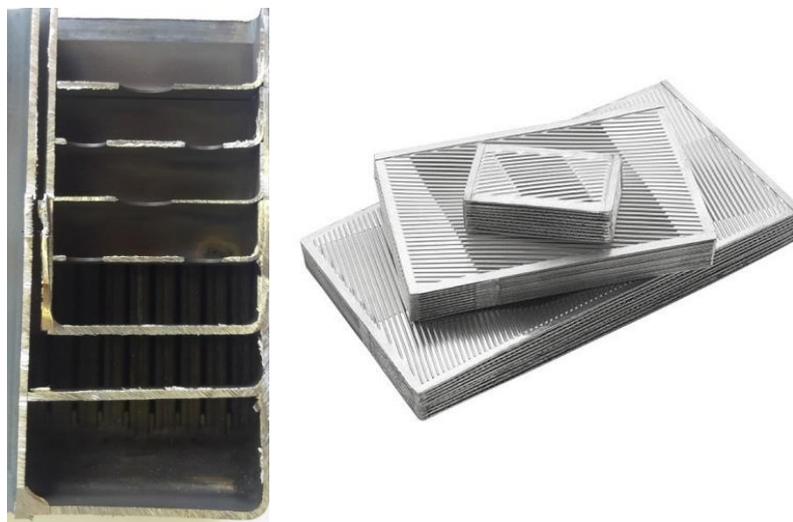


Abbildung 12: Links: Schnitt durch den Prototypen der ersten Reformergeneration  
Rechts: Standardisierte Wärmetauscher Module von Bosal

In Abbildung 13 ist das grundlegende Konzept aus den ersten Entwicklungsstufen dargestellt. Der Reformer besteht aus zwei Modulen: Ein Modul für die Verdampfung des Prozesswassers (blau) und ein Modul für die Reformierung des Erdgas-Dampf-Gemisches (orange). Die Bleche des Reformierungsmodul sind dabei katalytisch beschichtet. Im alten Design ist es zu Abplatzungen des Katalytischen Beschichtung aufgrund einer Leckage zwischen Verdampfer- und Refomierungszone gekommen. Dem wird nun entgegengewirkt indem die Funktionen in zwei unterschiedlichen Modulen getrennt werden.

Der obere runde Teil dient als Schnittstelle zu den Abgaskanälen und bietet zusätzlich Platz für die Integration des ExGaT Schaums.

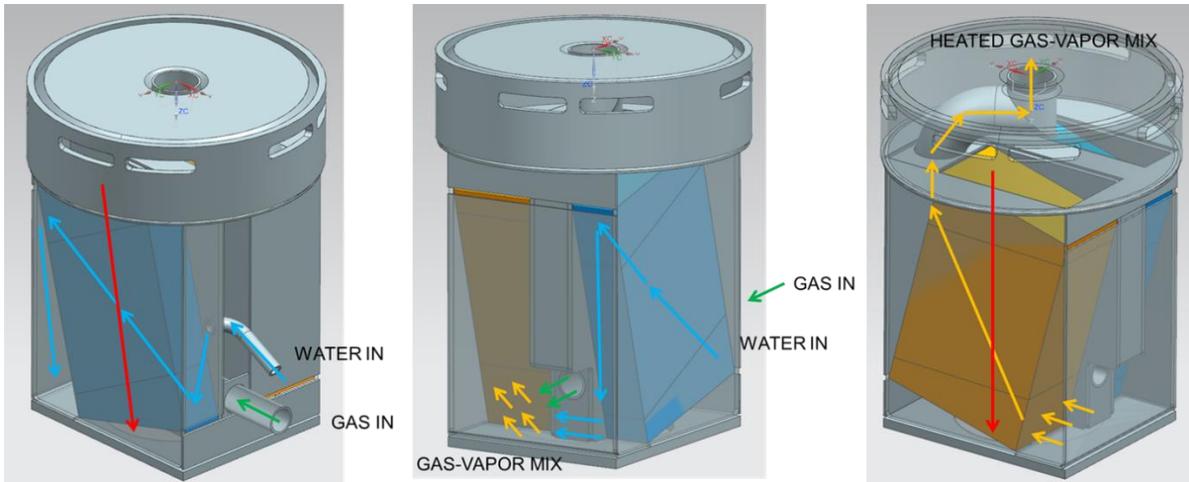


Abbildung 13: Konzept des Fuel Processors mit neuen Wärmetauscher Modulen

Um die kostspieligen Toleranzen des eckigen unteren Teils zu reduzieren ist der Ansatz verfolgt worden, die Funktionseinheit mit einem Standardrohr zu verkleiden (Abbildung 14). Der Vorteil ist, dass die Hülle aus einem Rohr gefertigt werden kann und die Toleranzen wie Parallelität in wenigen Arbeitsschritten angepasst werden können.

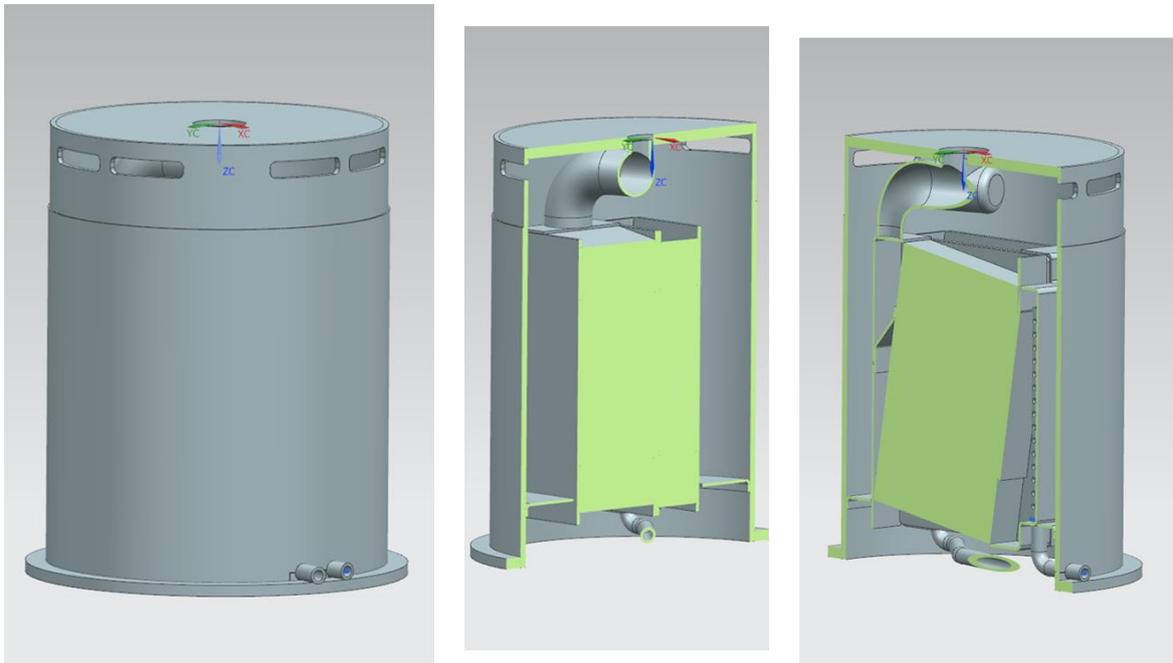


Abbildung 14: Reformerkonzept mit Rohr als Hülle



Der Nachteil ist, dass die teuren WDS Isolationen zusätzlich rund geschnitten werden müssen und so viel Verschnitt entsteht. Aufgrund der besseren Isolation wird aktuell das in Abbildung 15 dargestellte Konzept verfolgt. Der obere Teil ist erhöht, um ausreichend Platz für den ExGaT zu haben. Der untere Teil ist eckig, jedoch wird im Gegensatz zum vorherigen Modell die Isolation von Bosal übernommen. Dadurch können die innere Funktionseinheit mit grosszügigen Toleranzen fertigen und gleichen diese mit der flexibleren WDS Isolation aus. Umfasst wird die Isolation mit einem standardisierten Blech, sodass die vorgegebene Toleranzen einfacher eingehalten werden können.

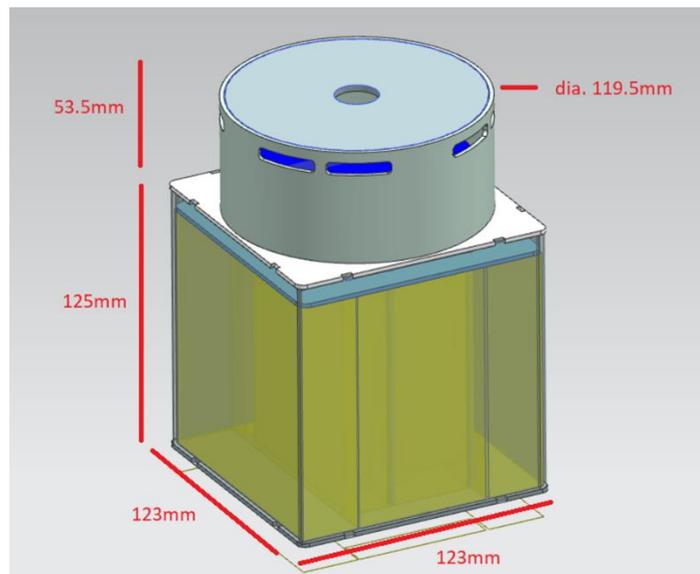


Abbildung 15: Aktuelles Reformerkonzept



#### 4.2.2 Integration in das Stackmodul

In Abbildung 16 und 17 ist die Integration des Reformers ins Stackmodul dargestellt. Der Reformer ist mittig auf dem Stackboden platziert und wird mit diversen Isolationen thermisch sowie elektrisch isoliert. Die obere, runde Abschlussplatte des Reformers bildet die Basis für den Stack, wobei das Synthesegas mittig durch die Zentrumsbohrung des Reformers zu den Zellen strömt. Stack und Reformersmodul werden mit zwei Druckfedern, Spannstäben und einer Spannplatte verspannt. Die vier Abgaskanäle im Stackmodul leiten das Abgas von der Nachverbrennungszone zum Reformersmodul. Zum Aufheizen des Stackmoduls sind vier Startheizungen symmetrisch um den Stack angeordnet.

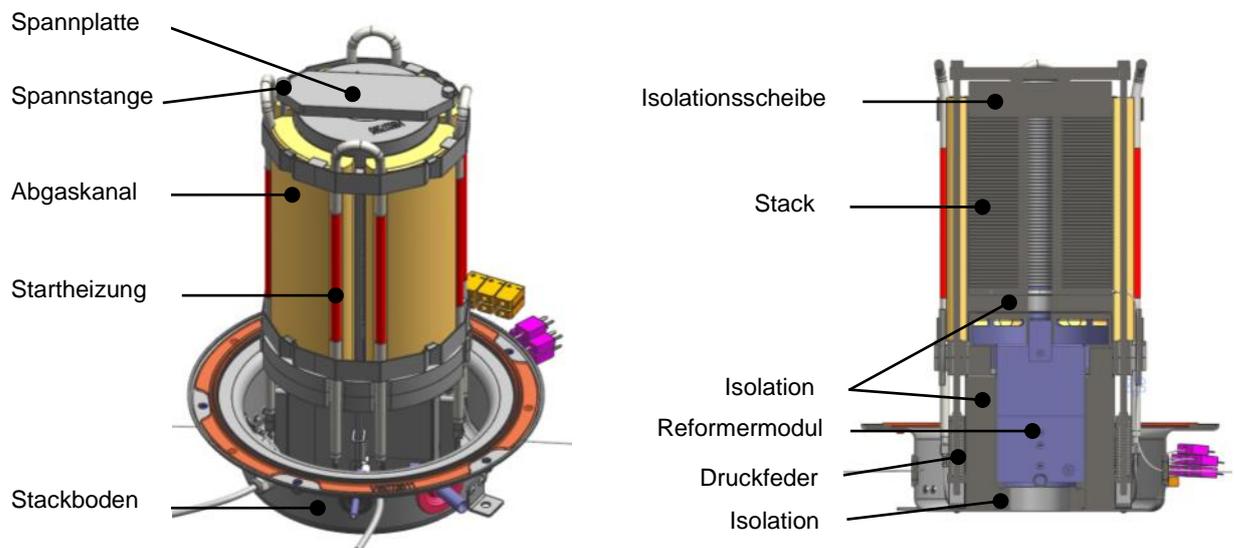


Abbildung zeigt Stackboden Aufbau (linkes Bild) und das fertiggestellte Stackmodul incl. diverser Messstellen (rechtes Bild).

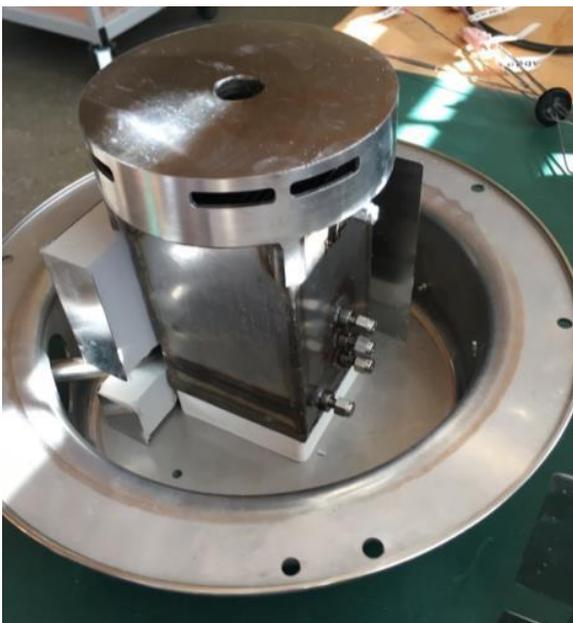


Abbildung 17 Aufbau Hexis Stackmodul mit Reformersmodul der Firma Bosal



#### 4.2.3 Übersicht der Stackmodule

Im DaVinci Projekt wurden insgesamt mehr als 12 Stackmodule gebaut und erfolgreich betrieben. In Tabelle 3 lassen sich Details über die Betriebsdaten finden.

Tabelle 3: Übersicht aller aktiven/geplanten Stackversuche auf Demonstratoranlagen (Stand 18.11.2020)

BZ-Nummer	Betriebszeit / h	Anlage	Versuchsziel
4004	19190	SR03: Demonstrator 1. Gen.	Erster Anlagenversuch, Langläufer
51007	9519	BZ36: Feldtestgerät, Demonstrator 2. Gen.	Langzeittest ohne Ionentauscher vor Vollentsalzung
51008	6711	SR06: Feldtestgerät, Demonstrator 2. Gen.	Leistungsprüfstand, Wärmetauschertests
51010	900	Feldtestanlage Gottmadingen (D)	Feldtest
51011	2539	BZ19: Feldtestgerät, Demonstrator 2. Gen.	Langzeittest ohne Ionentauscher, ohne Vollentsalzung
51012	967	BZ13: Feldtestgerät, Demonstrator 2. Gen.	Zyklusbetrieb im opt. Betriebsmodus
51013	670	BZ12: Feldtestgerät, Demonstrator 2. Gen.	Zyklusbetrieb bei konst. 3kW
51014	1402	BZ14: Feldtestgerät, Demonstrator 2. Gen.	Langzeitbetrieb im optimierten Betriebsmodus
51015	0	Feldtestanlage Pune (Indien)	Langzeitbetrieb
51016	22	BZ11: Feldtestgerät, Demonstrator 2. Gen.	Betrieb bei Teillast
51017	0	-	tbd
51018	0	-	tbd



#### 4.2.4 Leistungsdaten der Stackmodule

Die Stackmodule im DaVinci Projekt wurden mittels sog. Leistungsprüfstand auf ihre Leistung vermessen. Die Messdaten eines exemplarischen Stackmoduls sind in Abbildung 18 dargestellt.

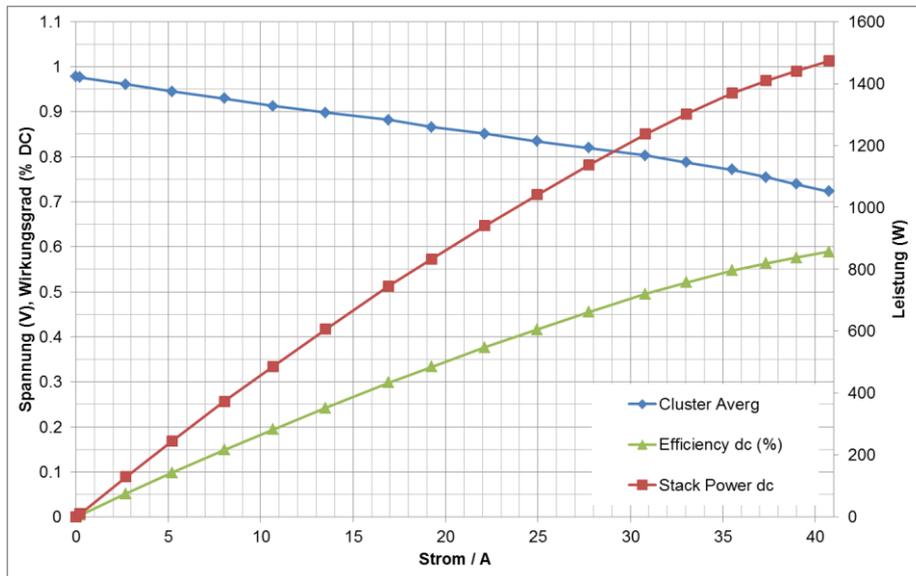


Abbildung 18: Performance des Stackmoduls im Steam-Reforming-Demonstrator

Die Leistungsdichte des „DaVinci“ Stackmoduls liegt ähnlich wie die der in AP2 gezeigten Shortstacks bei  $0.28 \text{ W/cm}^2$  bei  $4 \text{ g/h}$  Erdgas. In Abbildung ist die initiale Leistung aller Stackmodule der zweiten Steam-Reforming-Generation dargestellt. Diese wurden mit der zweiten, verbesserten Reformergeneration, einem vergrößerten Stromabgriff und dünneren Elektrolyten ausgestattet. Des Weiteren wurden diese auf dem neuen Stackingautomat hergestellt. Die Leistung aller fünf Versuche zeigt eine leichte Streuung um einen maximalen DC-Wirkungsgrad von 54% bzw.  $1620 \text{ Wdc}$  bei 80% Brenngasumsatz. Umgerechnet auf den AC-Nettowirkungsgrad (50W Eigenverbrauch, 5% Inverterverlust) ergeben sich daraus  $>50\%$  elektrische Effizienz.

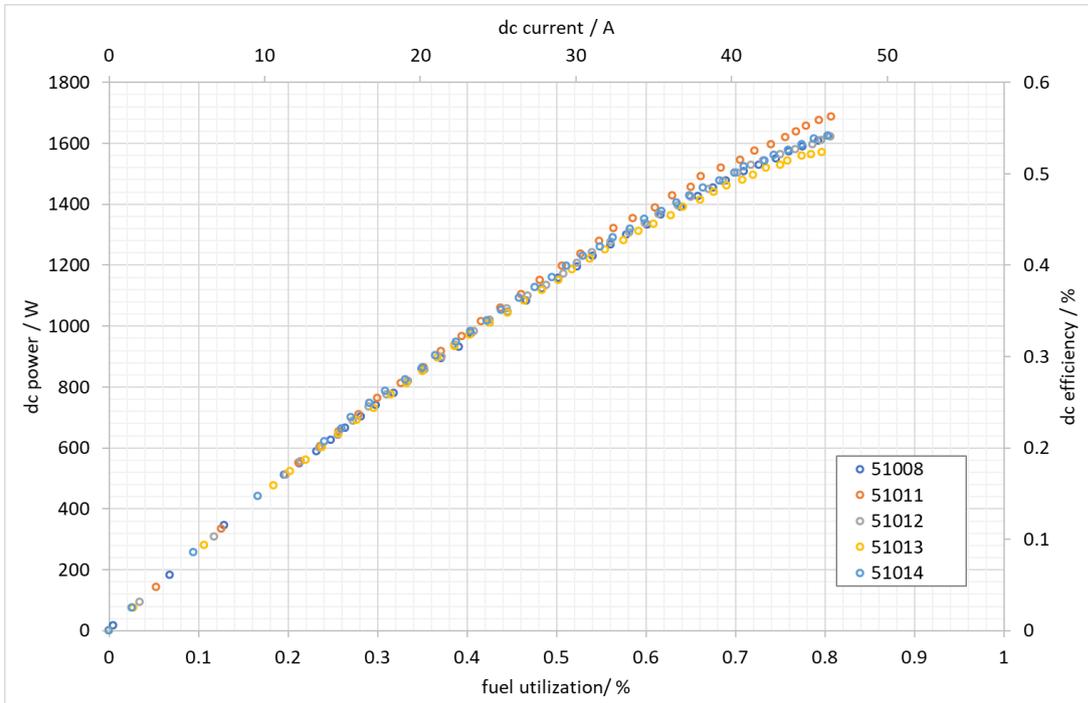


Abbildung 19: Vergleich der initialen Leistungen der zweiten Steam-Reforming-Stackgeneration

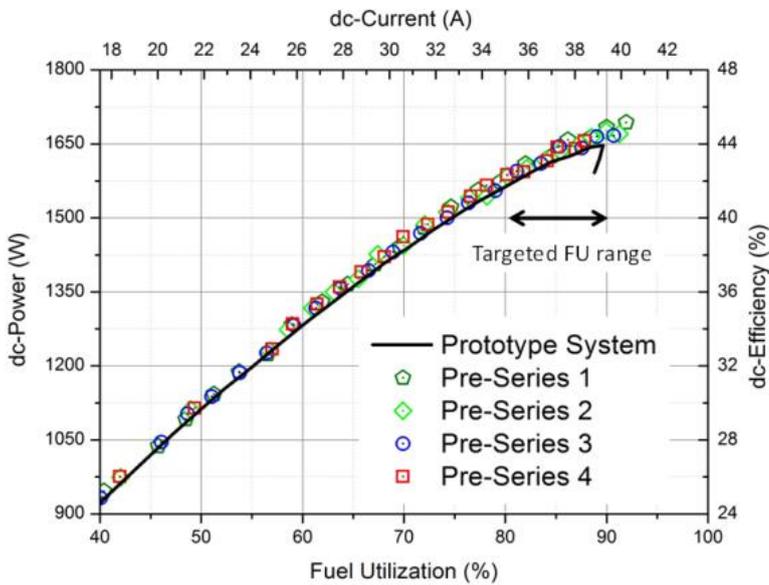


Abbildung 20: Initiale Leistungsverteilung der CPOx-Stackmodule in «Leonardo» Systemen

Abbildung 20 zeigt die Performance der derzeitigen Standard-Stackmodule welche in den „Leonardo“ Systemen mit CPOx betrieben werden und Abbildung 18 im Vergleich das SMO 4004, welches auf dem DaVinci-Demonstrator betrieben wird. Abbildung 20 zeigt reproduzierbar 1650 W DC elektrisch bei 3750 W Gasinput, dies entspricht einem elektrischen Wirkungsgrad von 44 % DC. Abbildung 19 zeigt 1470 W DC elektrisch bei 2500 W Gasinput, dies entspricht einem elektrischen Wirkungsgrad von 59 % DC.

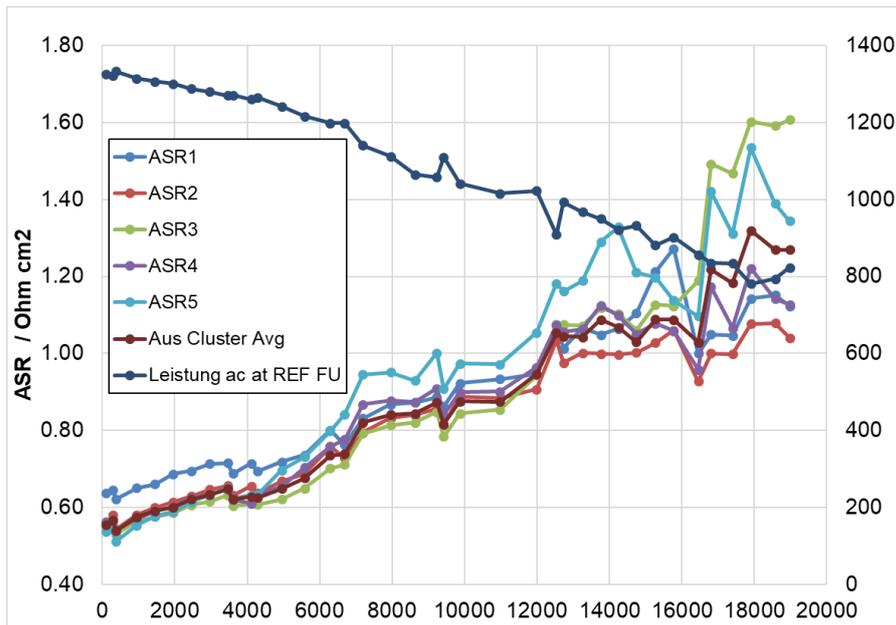


Abbildung 21: Degradationsverlauf SMO4004 auf der ersten Demonstratoranlage

#### 4.2.5 Langzeitverlauf und Degradation

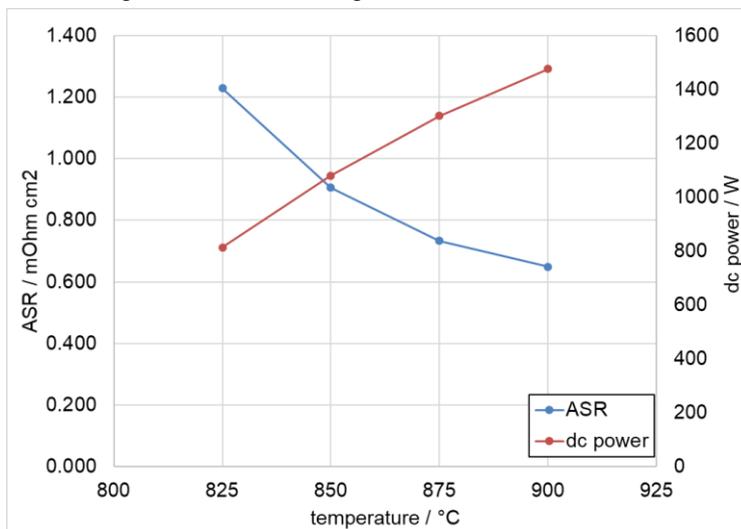


Abbildung 22: Effekt der Temperatureanhebung auf die Leistung des SMO4004 nach 10000h.

Für die Analyse des Langzeitverhaltens inklusive der Degradation des Steam-Reforming-Stacks liegen aktuell zu wenige Daten vor. Ein Stackversuch ist jedoch mit mehr als 19000 h bereits seit Juni 2018 in Betrieb. In Abbildung sind die ASR der einzelnen Cluster über die Betriebszeit dargestellt. Dieses liefert bereits Erkenntnisse, wie die Stacktechnologie im Vergleich zum CPO-System abschneidet. Mit knapp 40 mOhm cm<sup>2</sup> pro 1000 h liegt die Degradation deutlich über dem Mittelwert aller Stackversuche vorheriger Generationen. Ursache hierfür ist u.a. im Absinken der Stacktemperatur im Laufe des Betriebs zu finden. Wie in Abbildung 0 zu sehen ist, kann durch anheben der Regeltemperatur von 825 auf 900°C die Anfangsleistung des Stackmoduls auch nach über 10000h Betrieb wieder hergestellt

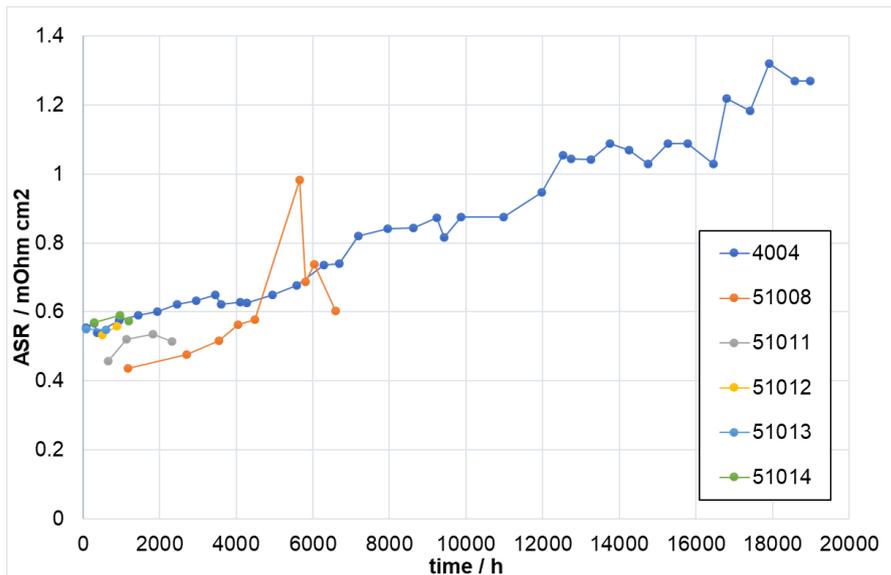


Abbildung 23: Vergleich der Degradation zwischen beiden Stackgenerationen.

werden. Der Vergleich der Gesamtdegradation der Stackversuche in Abbildung 23 zeigt, wie unterschiedlich die Stackmodule auftreten. Erkenntnis aus den ersten Montagen zeigten u.a., dass die Zentrierung des Reformers nicht Fehlersicher ist. So konnte beim Stapeln über den Automaten eine Lücke entstehen, durch welche später im Betrieb Falschluff angezogen werden kann. Dies führte bei diversen Versuchen zu einer verminderten Leistung speziell der untersten Zellen. Bei Versuch 51008 wurde diese Fehler erst nach der Inbetriebnahme entdeckt. Es konnte jedoch der bereits betriebene Stapel erfolgreich heruntergenommen und die Zentrierung korrigiert werden. Die anschließende erhöhte Degradation ist dabei auf ein häufiges Herunterfahren des Stackmoduls zurückzuführen. Der Brennstoffzellenstack hat bereits 22 Zyklen erfahren.





Langzeitstabilitätstests zu dieser Pumpe gestartet, die in „DaVinci“ fortgesetzt werden. Es konnten dabei über 40'000h Betrieb nachgestellt werden. Dieser Langzeittest wurde im Projekt mit einer Durchflussmessung auf Basis von Differenzdrucksensoren (s. Abbildung 27) erweitert. Zur Ansteuerung über die PCU des BZHs wird ein speziell gelayoutetes Treiberboard als Huckepack eingesetzt, s. Abbildung 25.



Abbildung 25: Treiberboard zur Ansteuerung der KNF FMM20 Pumpe.

Das PWM-Signal zum Einstellen der Flussmenge wird vom Steuerungscontroller über ein Flachbandkabel zu einer Treiberendstufe geleitet. Hintergrund ist, dass ein erzeugtes Signal von der Platine nur wenige Milliampere an Strom liefern kann. Die FMM20 hingegen benötigt eine Spannung von 24Vdc und bis zu 1 A Strom. Das Signal wird somit über die Boardspeisung verstärkt, sodass die Pumpe genügend Strom bekommt.

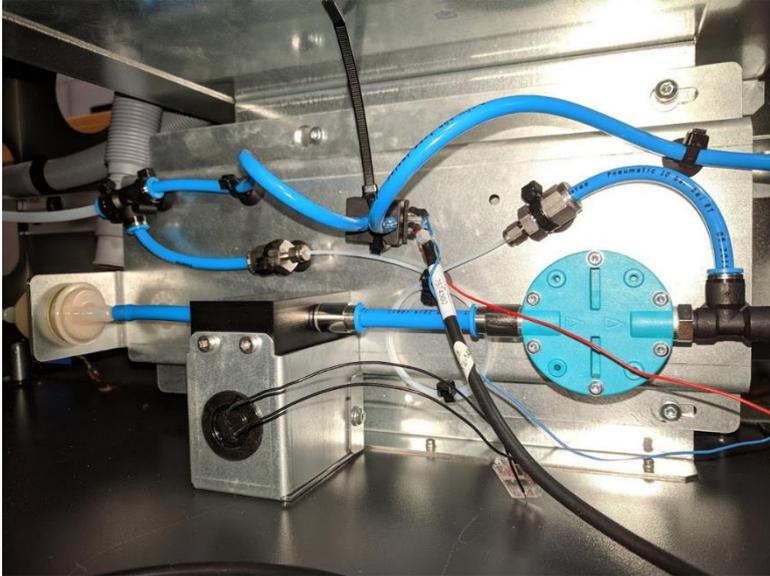


Abbildung 26: Prototyp der Wasserdosiereinheit im unteren Teil des BZH

Des Weiteren umfasst die Wasserdosierung noch einen Pulsationsdämfer um die Hübe der Pumpe zu glätten und die eigentliche Durchflussmessung. Zur Bestimmung der Wassermenge wurde eine Messblende in Form einer 60cm langen Kapillaren eingeführt. Diese verursacht bei gegebenem Fluss einen spezifischen Druckabfall, welcher über einen Differenzdrucksensor erfasst wird. Damit lässt sich die Wassermenge für die Reformierung kostengünstig überwachen. Als Sensor wird der PHPS-7500-350M-D-0-P-S der Fa. Pewatron im Feldtestgerät eingesetzt.

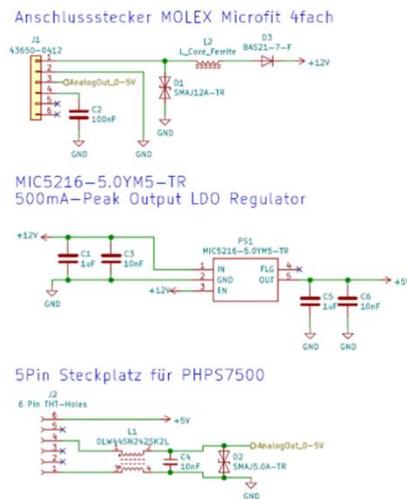


Abbildung 27: Links: Differenzdrucksensor inkl. Adapterprint zum Bestimmen der Durchflussmenge. Rechts: Schema des Adapterprints.

Da der Sensor als THT-Komponente zum Verlöten ausgelegt ist und der I2C-Bus sich nicht zur Übertragung von Signalen über längere Distanzen eignet, wurde hierfür ebenfalls eine zusätzliche Elektronik erstellt. In Abbildung 275 die fertige Sensoreinheit (l.) und der Aufbau des Adapterprints (r.) dargestellt. Dieser beinhaltet einen Spannungswandler, um die Versorgungsspannung von 12Vdc auf 5Vdc abzusenken sowie Filterelemente, die das Messsignal (0.5..4.5Vdc) entsprechend klar übermitteln.



Die Wasserstrecke muss vor Inbetriebnahme mittels geeigneten Messinstruments kalibriert werden. Für die Feldtestgeräte hat sich gezeigt, dass die Abweichung untereinander zu vernachlässigen ist. Somit wurde für alle Geräte dieselbe Kalibrationskurve hinterlegt. Um Temperaturschwankungen herauszufiltern ist im Vorlagebehälter zusätzlich ein Temperatursensor integriert.

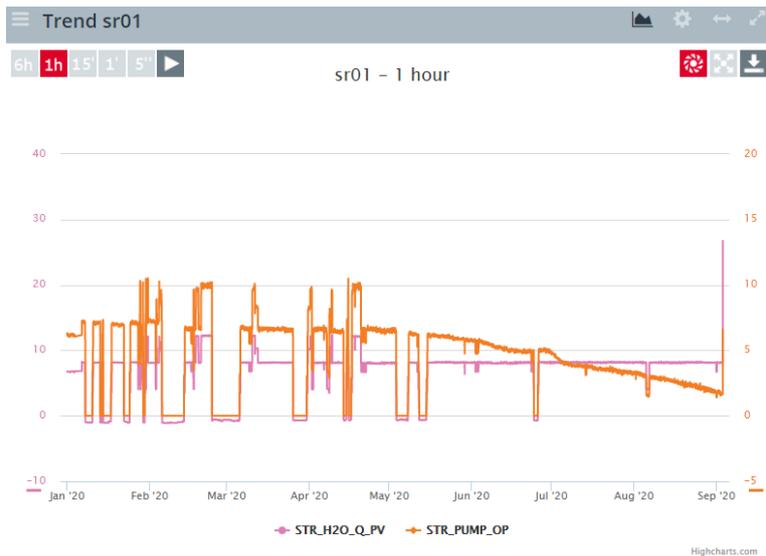


Abbildung 28: Signaldrift in Wasserflussmessung an Anlage 17074 mit SMO51008

Die Langzeitstabilität der Durchflussmessung über Differenzdruck konnte über mehrere Monate und Anlagen im Labor beobachtet werden. Dabei wurde trotz der hohen Wasserqualität (Leitfähigkeit < 5uS/cm, gefiltert dP<5um) ein Signaldrift in der Messung festgestellt werden. Dies führt im Beispiel in Abbildung 28 zum Verrutschen des Reformers, da die kritische Schwelle des SCR von 1.5 unterschritten wurde. Dies war Anlass zur Evaluation eines robusteren Messsystems. Für die Weiterentwicklung der Wasserstrecke wurde ein Sensor der Fa. Sensirion zum Langzeittest in einen Prüfstand eingebaut. Der SLF3S-1300F (s. Abbildung 29) ist preislich wie funktionell passend für den Einsatzzweck in einem Brennstoffzellenheizgerät. Er wird aktuell einem Langzeittest ausgesetzt und soll anschliessend in ein Prototypgerät integriert werden.



Abbildung 29: Sensirion SLF3S-1300F Wasserflusssensor. Quelle: Sensirion AG



## Wasseraufbereitung

Das Prozesswasser für die Dampfreformierung wird aus dem Kondensat der Brennstoffzellenanlage zurückgewonnen und muss für eine rückstandsfreie Verdampfung im Fuel Processor aufbereitet werden. Die Firma Miontec aus Leverkusen hat zu diesem Zweck drei unterschiedliche Typen von Mischbett-Ionenaustauscherharz für Testzwecke zur Verfügung gestellt:

Tabelle 4: Übersicht Ionenaustauscherharze

Testbezeichnung	Hersteller	Typ	Zusammensetzung Mischbett
Harztyp A	Dow	Amberlite IRN 170	50% stark basischer Anionentauscher 50% stark saurer Kationentauscher
Harztyp B	Purolite	MB 400	60% Stark basischer Anionentauscher 40% stark saurer Kationentauscher
Harztyp C	Lanxess	Lewatit NM 60	50% stark basischer Anionentauscher 50% stark saurer Kationentauscher

Die jeweiligen Entsalzungspatronen werden mit vorbehandeltem Kondensat aus den Stackmodulprüfständen beaufschlagt, bis deren Kapazität erschöpft ist. Dabei wird die durchgepumpte Kondensatmenge erfasst und der Reinheitsgrad mit einer Leitfähigkeitssonde gemessen. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 30 dargestellt.

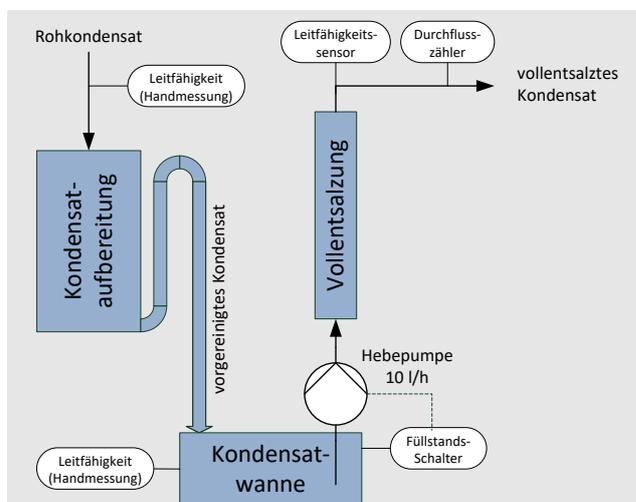


Abbildung 30: Schema der Kondensatreinigung

Die Ergebnisse der Versuchsreihen sind in Abbildung 31 zusammengefasst. Die Leitfähigkeit liegt zu Beginn der Testreihen wie erwartet bei null, was die prinzipielle Funktion des Ionenaustauschers bestätigt. Nach einem gewissen Durchsatz kommt es je nach Harztyp zu einem ersten Anstieg der Leitfähigkeit auf ca. 2 – 7 mS/cm, verursacht durch Bildung von Kohlensäure. Bei Erreichen der Kapazitätsgrenze zeigt sich ein signifikanter Anstieg der Leitfähigkeit auf knapp 12 mS/cm, was ungefähr dem Wert des zugeführten Kondensats entspricht. Die grösste Kapazität mit über 1300 Liter aufbereitetem Kondensat wurde bei Harztyp A (Amberlite IRN170) gemessen, Für die Feldversuche wird Harztyp A für die Kondensatreinigung eingesetzt.

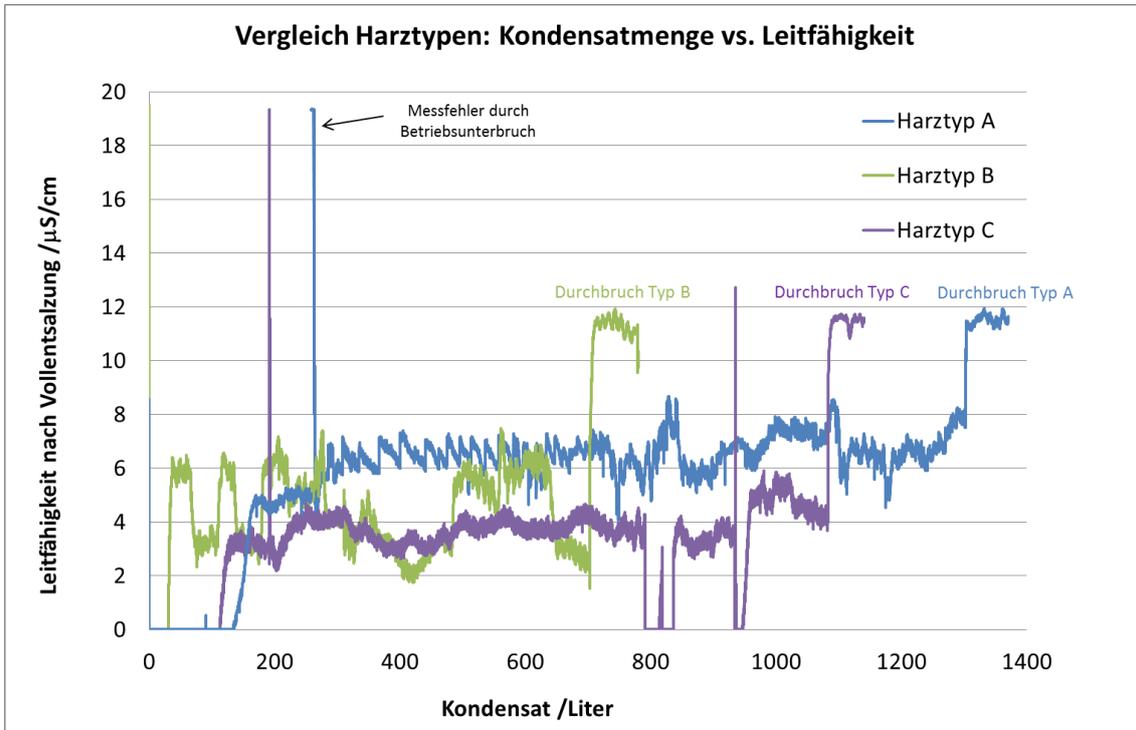


Abbildung 31: Ergebnisse verschiedenen Harztypen zur Kondensataufbereitung

Mit dem gewählten Mischbettharz Aberlite IRN170 wurden sowohl auf Stackmodulprüfständen als auch auf dem Demonstrator Versuche zur Reproduzierbarkeit durchgeführt (vgl. Abb. 32). Als Kriterium für einen durchgebrochenen Ionenaustauscher wurde das Erreichen einer Leitfähigkeit von  $>5 \mu\text{S}/\text{cm}$  im gereinigten Kondensat definiert. Im Durchschnitt lässt sich ca.  $1 \text{ m}^3$  Kondensat mit einem Liter Mischbettharz aufbereiten.

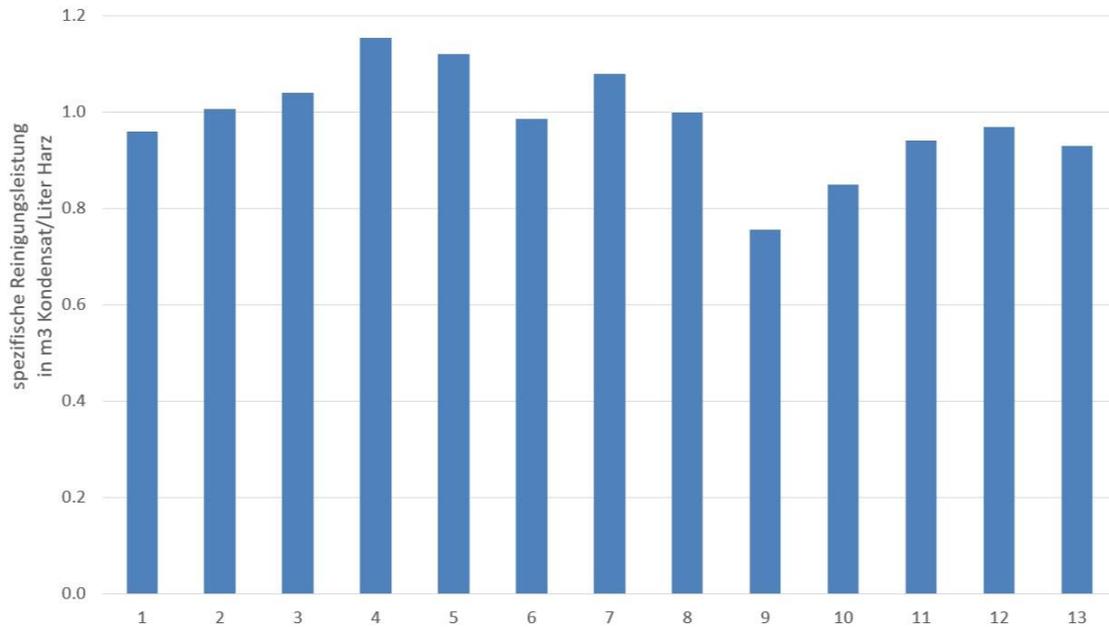


Abbildung 32: Reinigungsleistung über verschiedene Versuchsreihen.

### Vorlagebehälter und Frischwasseranschluss

Um in Übergangszeiten, bei denen keine ausreichende Wärmeabnahme im Heizkreis gewährleistet werden kann, genügend Wasser vorzuhalten, wird im Geräteboden ein Vorlagebehältnis mit 6 Liter Fassungsvermögen eingebaut, s. 33. Somit kann bei Kondensatmangel ein Zeitraum von bis zu 12 Stunden überbrückt werden.

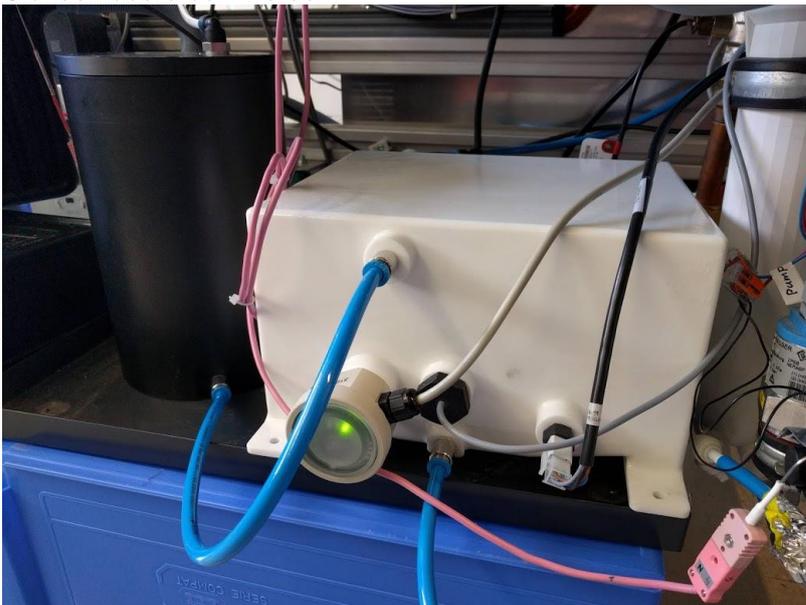


Abbildung 33: 6 Liter Vorlagebehälter mit Leitfähigkeitssensor, Temperatursensor und Levelschalter.



Die Vorlage beinhaltet des Weiteren die Sensoren zur Temperatur- und Leitfähigkeitsmessung, sowie einen Levelschalter zur Signalisierung eines Wassermangels.

Wird die Schaltschwelle des Levelschalters erreicht, wird über ein externes Ventil Frischwasser der Wasserstrecke zugeführt. Hierfür wird ein handelsübliches AquaStop-Ventil (vgl. Waschmaschine) eingesetzt. Dieses mehrfach erprobte System garantiert, dass im Fehlerfall kein Leitungswasser in grösserem Ausmass den Heizungskeller flutet. Über einen doppelwandigen Schlauch wird austretendes Wasser detektiert und führt sofort zur Abschaltung der Wasserzufuhr. Eine weitere Sicherheit, die in Verbindung mit Leitungswasser eingesetzt werden muss, ist eine dichte Bodenwanne. Diese wird in Form einer Edelstahlwanne mit Schwimmerschalter zusätzlich unter das Gerät gestellt. Der Schwimmerschalter ist dabei in Reihe geschaltet mit der Überwachung in der Kondensatreinigung. Diese sind direkt auf den Feuerungsautomat geführt und sorgen im Fehlerfall ebenfalls für eine sofortige Abschaltung.



Abbildung 34: Links: Feldtestgerät mit AquaStop an Rückwand montiert. Rechts: Umkehrosmose zur Vorreinigung des Leitungswassers.

Um die Kapazität der Deionisation nicht mit Leitungswasser zu überfordern wird dieses bei Eintritt in das Gerät durch eine Umkehrosmoseeinrichtung geleitet, s. Abbildung 2. Der Leitungsdruck in einem Standardhaushalt reicht dabei aus um eine Leitfähigkeit von 20  $\mu\text{S}/\text{cm}$  zu erreichen.

Die eingesetzte Umkehrosmoseeinheit ist ein Standardprodukt aus dem Aquaristikbereich und besteht aus einem vorgeschalteten Sedimentfilter, dem Membranmodul und einem Aktivkohlefilter zur Feinreinigung (Abbildung 35).



Abbildung 35: Darstellung der Umkehrosmoseeinheit

Zur Reinigungsleistung der Umkehrosmose wurden weiter Messungen durchgeführt, um den Einfluss eines schwankenden Vordrucks auf den Durchfluss und die Reinigungsleistung zu ermitteln. Die Resultate in Abbildung 36 zeigen, dass selbst bei sehr geringem Vordruck genug vorgereinigtes Wasser bereitgestellt werden kann.

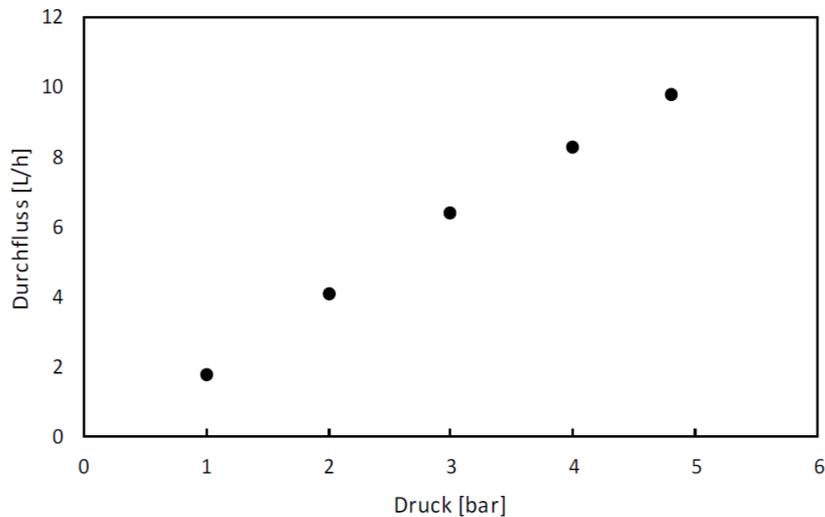


Abbildung 36: Druckabhängige Durchflussleistung des Umkehrosmosemoduls

Die Effizienz der Umkehrosmose, bzw. deren Reinigungsleistung, ist ebenfalls vom Vordruck abhängig. Prinzipiell gilt, je höher der Vordruck, desto effizienter die Reinigung. Das aufzubereitende Rohwasser im Labor in Winterthur weist eine Leitfähigkeit von  $522 \mu\text{S}/\text{cm}$  auf und wurde im Druckbereich 1 – 5 Bar gereinigt. Die Leitfähigkeit des mit der Umkehrosmose gereinigten Wassers (Permeat) ist in Abbildung 37 dargestellt. Im untersuchten Druckbereich werden Leitfähigkeiten unter  $18 \mu\text{S}/\text{cm}$  erreicht, das entspricht einer Reinigungsleistung der Umkehrosmose von  $>96\%$ .

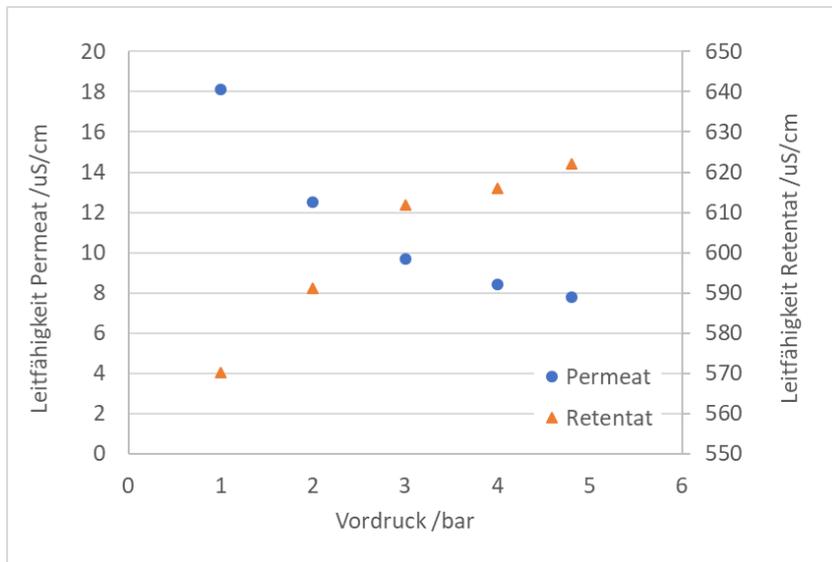


Abbildung 37: Leitfähigkeit des Permeats in Abhängigkeit des Vordrucks

## Abgasmessung

Die FMEA der Kernkomponenten legte offen, dass der Fuel Processor eine Schwachstelle aufweist, die nicht ohne weiteres kontrolliert werden kann. Da er die Wärme zwischen Abgas und Prozessgas überträgt, hat er eine Schnittstelle, welche beim Versagen, Erdgas, Wasserstoff und Kohlenmonoxid ins Abgas abgeben kann. Um diesen Fehler zu beherrschen wurden diverse Massnahmen in das Gerät und dessen Montageprozess integriert. Die Reformer werden eingangs auf Dichtheit geprüft und im Abgasstrang sowie im Aufstellraum des BZHs wird ein CO-Sensor angebracht.

Als CO-Sensor im Abgasstrang wurde der CarboSen 1000k von Lamtec (D) ausgewählt, da er sowohl die Mess-als auch Kostenkriterien für einen möglichen Serieneinsatz erfüllt, s. Abbildung 38. Dabei können CO-Konzentrationen bis zu 10000 ppm COe detektiert werden. COe steht dabei für CO equivalent, was bedeutet, dass alle oxidierbaren Stoffe im Abgas zu einem Signal am Sensor führen. Die Evaluation des Sensors und die Integration in das Brennstoffzellensystem wurde in einer separaten Masterarbeit durch Anton Reizker durchgeführt. Dabei stellte sich heraus, dass die Brennstoffzelle, entgegen der ursprünglichen Annahmen, neben CO auch geringe Mengen an Wasserstoff im Abgas abführt. Dieses ist um mehrere Faktoren reaktiver, sodass der Sensor bei dessen Anwesenheit einen deutliche Signalausschlag aufweist. Dadurch kann die Menge an CO nicht mehr genau bestimmt werden und macht den Sensor daher für den Einsatz im DaVinci-Gerät nutzlos. Aus diesem Grund wurden die Anlagen letztendlich nicht mehr damit ausgerüstet.

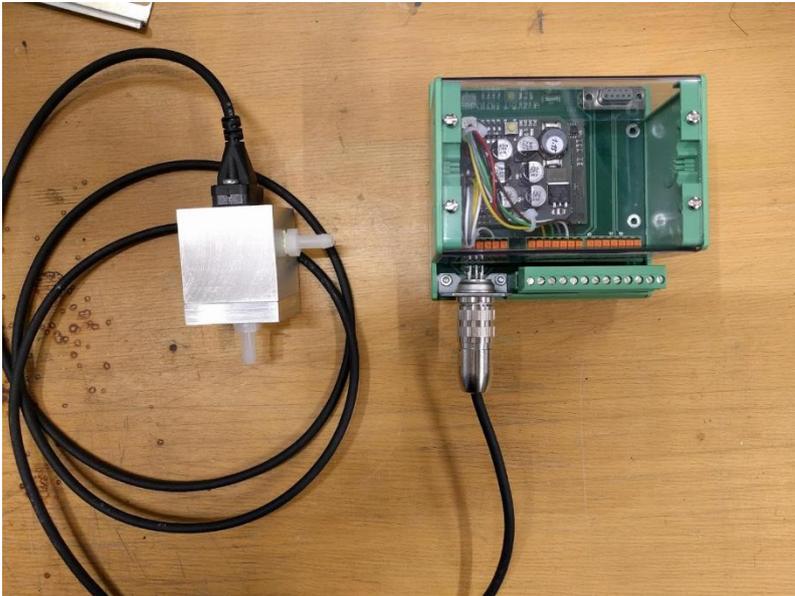


Abbildung 38: CO-Sensor CarboSen 1000K von Lamtec mit Sensorgehäuse aus Aluminium und Auswerteelektronik.

#### 4.3.3 Demonstrator (1. Gen.) und Feldtestanlagen (2. Gen.)

Im DaVinci Projekt konnten mehrere Demonstrationsanlagen gebaut werden. Details sind in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Übersicht aller Steam-Reforming-Anlagen. Ab 17074 entsprechen alle dem Stand der 2. Generation

Anlage	Betriebszeit / h	Stackmodul	Versuchsziel
17023	19527	4004	Erster Anlagenversuch, Langläufer
17074	8243	51008	Leistungsprüfstand, Wärmetauschertests
17099	1032	51010	Feldtestanlage Gottmadingen (D)
17100	0	51015	Feldtestanlage Pune (Indien)
17101	0	-	tbd
17102	8760	51007	Langzeitbetrieb ohne Ionentauscher
17108	759	51013	Zyklusbetrieb bei konst. 3kW
17109	1471	51014	Langzeitbetrieb im optimierten Betriebsmodus
17110	1050	51012	Zyklusbetrieb im optimierten Betrieb
17111	49	51016	Betrieb bei Teillast
17112	2597	51011	Langzeitbetrieb ohne Ionentauscher, ohne Vollentsalzung



Im Juni 2018 konnte die erste Versuchsanlage mit Dampfreformierung auf dem Leistungsprüfstand erfolgreich in Betrieb genommen werden. Die initialen Leistungsdaten des Demonstrators sind in Tabelle 66 aufgeführt. Es konnte ein AC-Netto-Wirkungsgrad von 50.5 % bei einer Gasleistung von 2500W erreicht werden. Dabei ist zu beachten, dass aus Kompatibilitätsgründen (Anpassung Feuerungsautomat fehlte zu diesem Zeitpunkt) die CPO-Luftstrecke (Lüfter + Regelventil) noch im Gerät verbaut und aktiv waren. Ohne diese zusätzlichen Verbraucher wäre der Wirkungsgrad somit leicht höher gewesen.

Tabelle 6: Leistungsdaten Demonstrator bei Inbetriebnahme im Juni 2018

Kategorie	Einheit	Wert
Nutzwärmeleistung	W	1093
Eigenverbrauch Gesamt	W	59
Einspeisung Netto	W	1261
Gasleistung	W	2496
Gesamtwirkungsgrad (H <sub>i</sub> )	%	94.3
Elektrischer Wirkungsgrad (AC, netto)	%	50.5
Thermischer Wirkungsgrad (H <sub>i</sub> )	%	43.8

Durch den erhöhten Wirkungsgrad ist es nun auch möglich im minimalen Betriebspunkt, derzeit 1500W Gasinput, einen geringeren Wärmeaustrag bei gleichzeitig höherem Stromertrag zu bekommen. Damit kann die Betriebszeit des Systems über das Jahr erhöht werden, was einen direkten Vorteil zum CPOx-System darstellt. In Tabelle sind die Messergebnisse dazu dargestellt. Eine vergleichbare Messung an einem CPO-System ergab eine Netto-Einspeisung von 515 W<sub>el</sub>, was bedeutet, das STR-System liegt hier um 200 W<sub>el</sub> höher. Eine Nutzwärmeleistung von ca. 600 W ist ausreichend, um im Rahmen des Sommerbetriebs die Warmwassererzeugung für einen durchschnittlichen 4-Personenhaushalt zu übernehmen.

Tabelle 7: Leistungsdaten des DaVinci-SMO4004 im minimalen Betriebspunkt

Kategorie	Einheit	Wert
Nutzwärmeleistung	W	612
Eigenverbrauch gesamt	W	39
Einspeisung Netto	W	719
Gasleistung (H <sub>i</sub> )	W	1505
Gesamtwirkungsgrad (H <sub>i</sub> )	%	88.5
Elektrischer Wirkungsgrad (AC, netto)	%	47.8
Thermischer Wirkungsgrad (H <sub>i</sub> )	%	40.7

Im Anschluss an die Leistungsbestimmung wurde das System für den Langzeitbetrieb auf einem anderen Prüfplatz installiert. Zum Zeitpunkt dieses Berichts sind 19500h Betrieb erreicht. Des Weiteren wurden 16 An-Aus-Zyklen gefahren. In Abbildung 39 ist der Langzeitbetrieb des Demonstrators dargestellt.

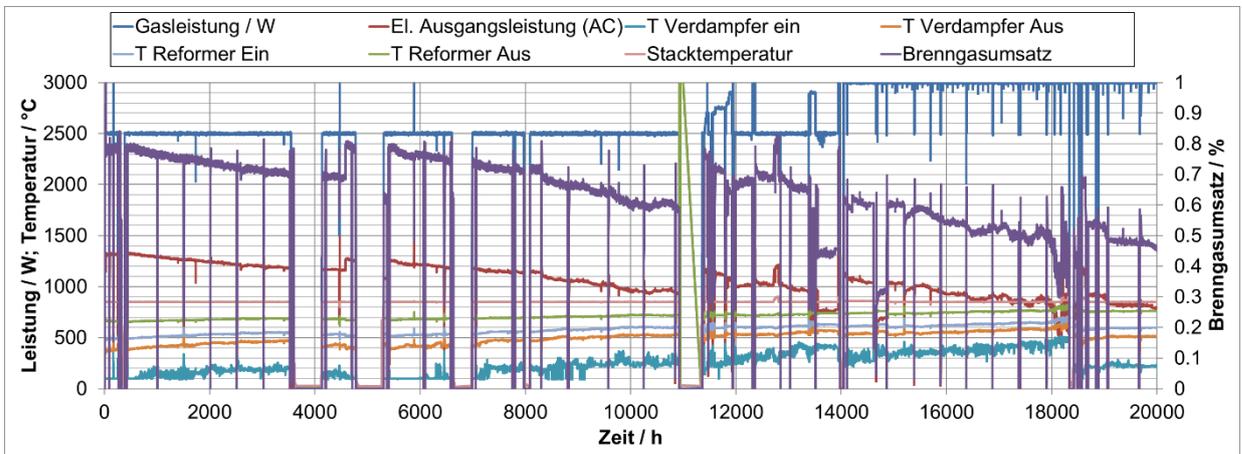


Abbildung 39: Langzeitbetrieb Vau5-Demonstrator mit Stackmodul 4004

Durch den regelungstechnisch einfacheren Betrieb bei konstanter Spannung ist die gemessene Leistungsabnahme durch die Degradation des BZ Stapels erhöht. Mittlerweile wurde die Regelung weiterentwickelt, so dass inzwischen bei konstanter Brenngasnutzung gefahren wird. Die Leistungsdaten der Brennstoffzelle wurde bereits in Abschnitt 0 beschrieben.

Um für den Feldtesteinsatz die bestmögliche Robustheit zu erreichen und Kostensenkungen sowie Optimierungen hin zum Serieneinsatz durchzuführen, wurde der Demonstrator im Folgenden weiterentwickelt. Die zweite Generation beinhaltet die zuvor beschriebene Systemarchitektur.

- Vereinfachte Wasseraufbereitung: keine Hebepumpe, grössere Vorlage
- Günstigere Durchflussmessung
- Wasserstrecke als Baugruppe
- Reformer mit nur zwei Temperaturmessstellen

Die Anlage wurde wie auch der Demonstrator auf dem Leistungsprüfstand vermessen. Tabelle 8 zeigt die Leistungsdaten bei Nominallast 3000 W Gasleistung.

Tabelle 8: Leistungsmessung DaVinci-Feldtestgerät mit SMO 51008

Kategorie	Einheit	Wert
Nutzwärmeleistung	W	1356
Eigenverbrauch gesamt	W	69
Einspeisung AC Netto	W	1501
Gasleistung (Hi)	W	2986
Gesamtwirkungsgrad (Hi)	%	95.7
Elektrischer Wirkungsgrad (AC, netto)	%	50.3
Thermischer Wirkungsgrad (Hi)	%	45.4

Zum Zeitpunkt des Berichts sind alle geplanten Anlagen im HEXIS-Labor und im Feld in Betrieb gegangen und fahren aktuell nach Versuchsplan. Dabei sollten alle Versuche bis Februar 2021 abgeschlossen sein. Des Weiteren wurde eine Anlage zum Hauptsitz des neuen Eigentümers der HEXIS AG, nach Pune (Indien) geschickt. Dort soll diese als Anschauungsanlage, zur Weiterentwicklung und zum Experimentieren unter neuen Umgebungsbedingungen betrieben werden. Schwachstellen, die aus dem Betrieb der zweiten Anlagengeneration hervorgegangen sind:

- Lebensdauer der Deionisation (aktuell 6-8 Wochen)



- Durchsatz Deionisation
- Drift in Messkapillare der Durchflussmessung
- Spannungsbereich des Inverters

Verbesserungen die direkt umgesetzt werden können:

- Wasserdichte Bodenwanne in Gerät integriert
- Dicht integriertes Frischwasserventil
- Wartungsfreundlichkeit für Wasserstreckenkomponenten

## 4.4 AP5: Hausintegration/Energiemanagement und AP6: Markt- und Kostenanalyse

### 4.4.1 Marktanalyse

Im Zuge des DaVinci Projekt wurden auch durch die HEXIS AG sog. «Use Cases», also Anwendungsfälle für das HEXIS-BZH erarbeitet:

**Use Case 1:** Privatperson Einfamilienhaus unsaniert in Deutschland

**Marktpotential:** 5.8 Mio. Einfamilienhäuser in Deutschland

**Profil:**

- Heizungssanierung steht an
- Gasanschluss vorhanden
- EnEV muss erfüllt werden

Tabelle 9: Investkosten für Use Case 1 abzgl. aller Förderungen. Invest EnEV Referenzmodell (Gas + Solarthermie): 14'000 € (inkl. MwSt)

BZ-Gerät	25'000 €
Installation	+ 5'000 €
Energieberater	+ 400 €
MwSt.	+ 5'800 €
KWK-Zuschlag	-3600 €
KFW 433 Förderung	- 12'900 €
Total	19'700 €

**CO<sub>2</sub>-Ersparnis:** Bis zu 17 t CO<sub>2</sub> in 10 Jahren

**Amortisation:** 7 Jahre, bei 8000 Volllaststunden und 60% Eigennutzungsgrad

Aus diesem Use Case ergibt sich, dass sich ein Brennstoffzellen-KWK im Leistungsbereich mit 1.5 kW elektrisch nach 7 Jahren auszahlt. Voraussetzung ist die aktuelle Förderlage, sowie ein sehr hoher Eigennutzungsgrad über das gesamte Jahr. Der Umgang des Marktpotentials muss hierbei ebenfalls in Bestandsgebäude und Neubau unterteilt werden. Bei niedrigem Energiebedarf kann die Jahresbetriebszeit für eine Amortisation innerhalb der Garantiezeit nicht erreicht werden. Dabei ist das DaVinci-Gerät mit Dampfpreformierung ggü. einem CPOx-Gerät bzgl. Wärmeaustrag im Vorteil. Durch den höheren Wirkungsgrad wird vor allem im Teillastbetrieb weniger Wärme erzeugt, was in den Übergangszeiten, sowie im Sommer zu längeren Betriebszeiten führt. Im Folgenden ist ein weitere Use Case aufgeführt, bei dem die Amortisationszeit nochmals halbiert werden könnte:



## Use Case 2: Kleinunternehmer unsaniert in Deutschland

**Marktpotential:** 3.4 Mio. Kleinunternehmen in Deutschland

### Profil:

- Möchte Energiekosten senken
- Beistelllösung als Kaskade möglich
- Wärmebedarf > 40'000 kWh
- Elektrizitätsbedarf 26'000 kWh
- EnEV muss erfüllt werden

Tabelle 10: Investkosten für Use Case 2 abzgl. aller Förderungen. Invest EnEV Referenzmodell (Gas + Solarthermie): 23'000 € (inkl. MwSt)

BZ-Gerät	50'000 €
Installation	+ 5'000 €
Energieberater	+ 400 €
MwSt.	+ 10'530 €
KWK-Zuschlag	- 7200 €
KFW 433 Förderung	- 25'800 €
Total	32'930 €

**CO2-Ersparnis:** Bis zu 36 t CO2 in 10 Jahren

**Amortisation:** 3 Jahre, bei 8000 Volllaststunden und 100% Eigennutzungsgrad

Aus dem zweiten Anwendungsfall resultieren 3 Jahre Amortisation für eine Kaskade aus zwei Geräten. Dies legt nahe, dass der Markt für Kleinunternehmen überaus attraktiv für ein uKWK mit SOFC ist. Gleiches gilt im Übrigen auch für Mehrfamilienhäuser. Leider ist dort das rechtliche Umfeld bzgl. Mieterstrommodell etc. nicht geklärt, was es momentan noch schwierig macht Anlagen hier zu installieren.

s. u. Ergebnisse der Verbundpartner



## 4.5 Relevante Ergebnisse der Verbundprojektpartner

### 4.5.1 Viessmann Werke Allendorf

Die Inbetriebnahme der Feldtestanlagen (SOFC Brennstoffzelle mit CPOX als Beistellgerät) für Hydraulikversuche im Feld wurde mittlerweile zum großen Teil abgeschlossen. Bei allen drei Hydrauliken sollen bereits existierenden Wärmeerzeuger und ggf. auch vorhandene Speicher mitbenutzt werden. Folgende Varianten wurden aufgebaut, bzw. befinden sich im Aufbau:

#### 1) Kombispeicherhydraulik

Mit dieser Hydraulikvariante soll kostengünstig ein einfach realisierbarer Systemaufbau im Einfamilienhaus umgesetzt werden können. Diese Hydraulik eignet sich besonders für Einfamilienhäuser mit einem normalen Warmwasserbedarf.

Vorhanden:

- Gasbrennwertgerät
- Lastseite (Heizkörper, Fußbodenheizung)

Ergänzt:

- Hexis Brennstoffzellenmodul als Beistellgerät
- Kombi Pufferspeicher
- einfache Hydraulikkomponenten (Umschaltventil, Verrohrung)

Funktion:

Das Brennstoffzellenmodul führt die entstehende Wärme in den unteren Teil des Kombi-Pufferspeichers (untere Wendel) ab. Der Spitzenlastkessel heizt den oberen Speicherteil auf. Das Trinkwasser kann über eine Wendel im Kombi-Pufferspeicher erwärmt werden. Der Heizkreis wird über den Pufferspeicher und das Gasbrennwertgerät bedient.

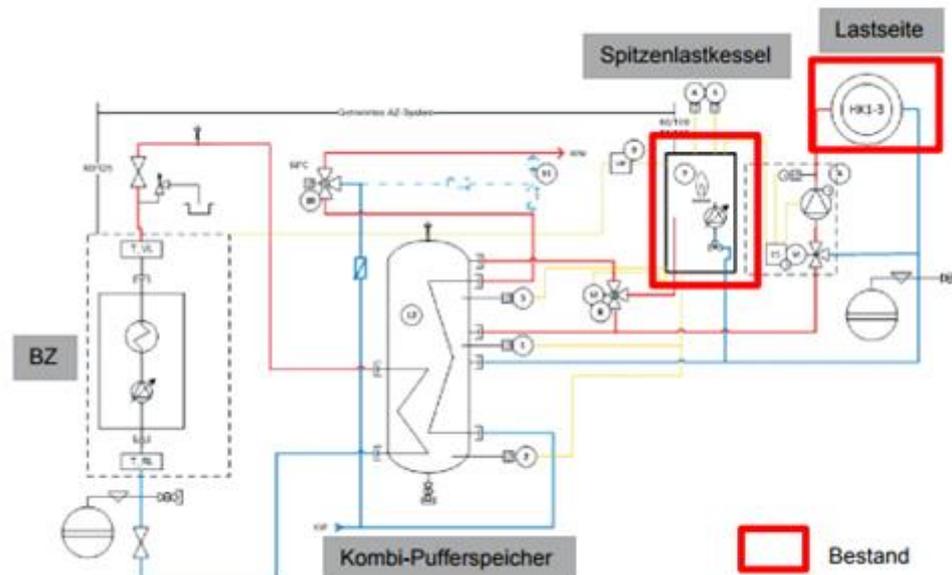


Abbildung 40: Kombispeicherhydraulik

#### 2) Zwei-Speicher-Hydraulik (Bivalenter Trinkwasserspeicher und Heizwasserpufferspeicher)

Diese im Platzbedarf etwas aufwändigere Hydraulikvariante eignet sich für Ein- bis Zweifamilienhäuser. Der Systemaufbau soll ebenfalls den Einsatz vorhandener Komponenten im Bestand ermöglichen. Ein möglicherweise vorhandener Trinkwasserspeicher kann zu einem Pufferspeicher umfunktioniert



werden. Das Trinkwasser wird über einen neuen bivalenten Trinkwasserspeicher bereitgestellt. Diese Hydraulik eignet sich besonders für Ein- und Zweifamilienhäuser mit erhöhtem Warmwasserbedarf.

Vorhanden:

- Gasbrennwertgerät
- Lastseite (Heizkörper, Fußbodenheizung)
- Trinkwasserspeicher (wird zum Heizwasserpufferspeicher umfunktioniert)

Ergänzt:

- Hexis Brennstoffzellenmodul als Beistellgerät
- Kombi Pufferspeicher
- einfache Hydraulikkomponenten (Umschaltventil, Verrohrung)

Funktion:

Das Brennstoffzellenmodul führt die entstehende Wärme entweder in den unteren Teil des bivalenten Trinkwasserspeichers (untere Wendel) oder durch Betätigung eines Umschaltventils in den Heizwasserpufferspeicher ab. Der Spitzenlastkessel heizt den oberen Speicherteil des bivalenten Trinkwasserspeichers auf. Der Heizkreis wird über den Pufferspeicher und das Gasbrennwertgerät bedient.

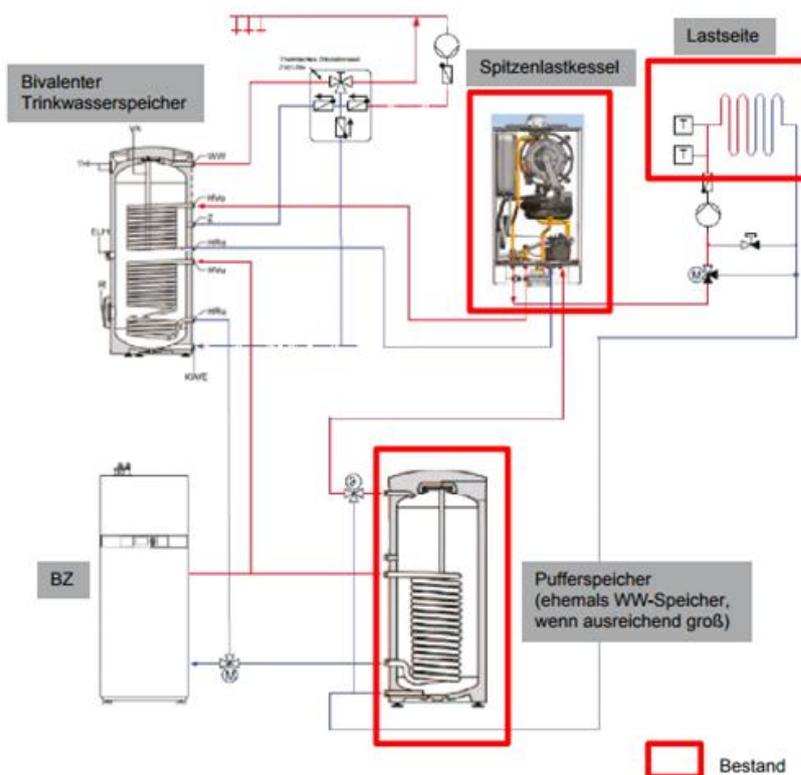


Abbildung 41: Zwei-Speicher-Hydraulik (Bivalenter Trinkwasserspeicher und Heizwasserpufferspeicher)

### 3) Zwei-Speicher-Hydraulik (Kombi-Pufferspeicher und Trinkwasserspeicher mit Umschichtfunktion)

Diese im Platzbedarf ebenfalls etwas aufwändigere Hydraulikvariante soll in einem Ein- bis Zweifamilienhaus mit erhöhtem Warmwasserbedarf eingesetzt werden. Der Systemaufbau soll den Einsatz bereits vorhandener Trinkwasser- oder Kombispeicher ermöglichen. Mit einer Umschichtfunktion soll die Möglichkeit geschaffen werden den Trinkwasserspeicher mit Wärme aus dem Kombipufferspeicher zu versorgen. Das detaillierte Hydraulikschema soll im nächsten Zwischenbericht abgebildet werden. Diese Hydraulik eignet sich besonders für Ein- und Zweifamilienhäuser mit erhöhtem Warmwasserbedarf.



Vorhanden:

- Gasbrennwertgerät
- Lastseite (Heizkörper, Fußbodenheizung)
- ggf. Trinkwasser- oder Kombipufferspeicher

Ergänzt:

- Hexis Brennstoffzellenmodul als Beistellgerät
- einfache Hydraulikkomponenten (Umschaltventil, Verrohrung)
- ggf. Trinkwasser- oder Kombipufferspeicher

Alle drei Hydraulikvarianten sollen in der bevorstehenden Heizperiode 2018/2019 abgetestet werden. Ausgewertet werden sollen insbesondere die Rücklauftemperaturen und die KWK-Laufzeiten. Die KWK-Laufzeiten der CPOX-Systeme müssen für die Bedingungen eines KWK-Systems mit Dampfreformierung bewertet werden.

## 6.2 Kosten des Gesamtsystems

Die Kosten für die Dampfreformierung wurden in einem ersten Schritt im Rahmen des Demonstratoraufbaus zusammengetragen. Die folgende Tabelle 11 stellt die im Demonstrator verwendeten neuen Komponenten dar. Alle anderen Komponenten wurden vom CPOx basierten System verwendet, das im Förderprojekt „Leonardo“ entwickelt wurde.

Tabelle 11 Kostenvergleich zusätzliche Kosten durch STR.

Bezeichnung	Einzelpreis /€	Preis 1000Stk/€
Vollentsalzung	450	450
Leitfähigkeitssensor	227	227
Vorlagebehälter	35	35
Füllstandsschalter (2 stufig)	178	111
Dosierpumpe	148	100
Messkapillare	3	3
Differenzdrucksensor	350	69
Fuel Processor	11'260	300
<b>Summe</b>	<b>12'650</b>	<b>1'295</b>

Wie aus der Tabelle 11 ersichtlich trägt der Reformerbaustein entscheidend zu den Mehrkosten des Demonstrators gegenüber dem CPOx-System bei. Mit dem Zulieferer Bosal wurde im Rahmen der Projektplanung ein Kostenziel von 300 € bei Produktion von 1000 Stk. p.a. genannt. Bosal geht weiterhin davon aus, dass dieses Ziel erreichbar ist.

Da einige Komponenten des CPOx-Systems entfallen können, ergeben sich bei 1000 Brennstoffzellenheizgeräten p.a. Mehrkosten (Herstellgrenzkosten) von 300 € für das Thermelin System gegenüber dem Leonardo-System. In Anbetracht des höheren el. Wirkungsgrads (> 50 % statt 40 %) und des daraus resultierenden höheren Stromoutputs bei wärmegeführtem Betrieb erscheint dieser Mehrbetrag gut amortisierbar.

*Weitere Details bezüglich der Ergebnisse der Verbundpartner ElringKlinger und Viessmann werden in dessen Schlussbericht (Q1/2021) auf Wunsch nachgereicht.*



## 5 Schlussfolgerungen und Fazit

Wenn auch das DaVinci Projekt durch verschiedene externe Einflüsse in seinem zeitlichen Verlauf verzögert wurde, kann man die Durchführung insgesamt als grossen Erfolg bewerten. Alle massgeblichen Ziele im Projektplan konnten erreicht oder sogar übertroffen werden. Als Highlights lassen sich insbesondere hervorheben:

- Erfolgreiche Demonstration der Dampf-reformierten Brenngasauflbereitung in einem ESC-basierten SOFC Stack
- Installation im Feld, erfolgreiche Inbetriebnahme und Betrieb
- Hoher elektrischer Wirkungsgrad, sowie hoher Gesamtwirkungsgrad.
- Degradation und Standfestigkeit hinreichend niedrig, bzw. hoch.

Die positiven Ergebnisse aus den Leistungsmessungen sowie das Erreichen der geforderten Ziele lassen für die weitere Entwicklung der Dampfreformierung wenig Raum für Optimierungen. Daher werden überwiegend Kostenpotentiale in den Fokus rücken. Der Aufbau und die Inbetriebnahme des DaVinci-BZHs konnte dabei ebenfalls problemlos durchgeführt werden. Aus den beiden Gerätegenerationen, die in diesem Projekt konstruiert wurden, konnten wertvolle Erkenntnisse für die Serienentwicklung gewonnen werden. So werden zukünftig vor allem die Wasseraufbereitung und -dosierung überarbeitet werden müssen. Obwohl dieser Stand heute funktionell einwandfrei ist. Einzig die Lebensdauer und Wartungsfreundlichkeit der Komponenten muss zwingend verbessert werden. Die Kosten des Gesamtsystems liegen darüber hinaus auf dem Niveau des CPOx-Systems. Des Weiteren konnte ein Feldtest in einem Einfamilienhaus mit speziell angepasster Hydraulik installiert werden. Die Betriebsanalyse dieser Anlage wird überdies der Entwicklung der Dampfreformierung für KWKs entsprechende Potentiale aufzeigen.

## 6 Ausblick und zukünftige Umsetzung

Die vielversprechenden Ergebnisse des DaVinci Projekts sind bereits als Grundlage für die Planung der Integration in ein Produkt geflossen: So konnten bereits die Hauptanforderungen als auch die Entwicklungsschwerpunkte der Produktentwicklung festgelegt werden, ein Zeitplan, sowie die Abschätzung der Kostenstrukturen ermittelt werden. Es wird seitens der Hexis AG die Umsetzung der Erkenntnisse des Projekts in ein Produkt weiter vorangetrieben. Als Herausforderung für die Produktentwicklung wird dabei, neben den anspruchsvollen Hauptaspekt der Kostensenkung, die Skalierung in der Leistungsklasse angesehen.

### 6.1 Vorentwicklung HEXIS BZH Vau5

#### 6.1.1 Definition der Hauptanforderungen / Entwicklungsschwerpunkte

- Leistungsklassen: Skalierbarkeit im Produktkonzept vorsehen von 0.75kW<sub>el</sub> bis 3 kW<sub>el</sub>, immer mit einem Stack
- Kostenoptimierung auf 1.5kW<sub>el</sub>, von hier aus Hoch-/Runterskalierung
- Ziel HGK (BZM+SFE inkl. Ersatzstackmodul, wenn nötig):  
4725€ @ 5000Stk/a für 1.5kW<sub>el</sub>  
Damit soll ein attraktiver Endkundenpreis ohne staatliche Förderung erreicht werden
- H<sub>2</sub> Verträglichkeit bis 30%
- Hoher (initialer) elektrischer Wirkungsgrad (> 50% AC Netto)





Stacklebensdauer von 80kh ausgegangen, was nach aktueller Datenlage für 50 Zellen unrealistisch erscheint.

Durch den Einsatz von ferritischen Interkonnektoren (& 60 SOFC Zellen) sowie weiteren Optimierungen / Visionen der einzelnen Funktionsgruppen ist es jedoch denkbar, die geforderten Materialpreise zu erreichen. So kann beispielsweise durch den Verzicht auf eine Kondensatreinigung und Vollentsalzung ein Beitrag zur Reduktion von Bauteilen realisiert werden. Bedingung hier ist die vollständige «Entchromung» des Abgases, damit kein chromhaltiges Kondensat in das häusliche Abwasser gelangt.

Der Einsatz bereits kalibrierter Gassensoren und Standard PV Wechselrichter sind denkbar, ebenso wie die Verschlankung der Elektronik und nicht zwingend zur Regelung benötigter Sensorik an verschiedenen Baugruppen. Eine grobe Kostenschätzung mit verschiedenen Stack-Szenarien ist in Abbildung 43 dargestellt.

	HGK/BZM @ 3000 Geräte/Jahr Einschätzung Funktionsgruppen 50 Zellen CFY MICs/80kh Lebensdauer		Vision Zielkosten 6.2.2020 35 Zellen CFY MICs/40kh Lebensdauer	Vision Zielkosten 6.2.2020 35 Zellen Fermics / 40kh Lebensdauer	Vision Zielkosten 6.2.2020 50 Zellen CFY MICs/80kh Lebensdauer	Vision Zielkosten 6.2.2020 60 Zellen Fermics / 80kh Lebensdauer
	[in €]	[in SFr.]	[in SFr.]	[in SFr.]	[in SFr.]	[in SFr.]
<b>Summe Gerätkosten</b>	<b>5'781</b>	<b>6'938</b>	<b>4'850</b>	<b>4'510</b>	<b>6'038</b>	<b>5'227</b>
Montage, Verpackung etc	473	567	567	567	567	567
<b>Summe Materialkosten</b>	<b>5'309</b>	<b>6'371</b>	<b>4'283</b>	<b>3'943</b>	<b>5'471</b>	<b>4'660</b>
Wärme- & Kondensatauskopplung, Abgasabführung	450	540	385	385	385	385
Gaszuführung	401	482	302	302	302	302
Elektrische Auskopplung	557	668	428	428	428	428
Wassermanagement	307	368	221	221	221	221
Sicherheitsüberwachung	282	338	296	296	296	296
Wärme- und Stromerzeugung	2'886	3'463	2'276	1'935	3'463	2'653
Steuerung	207	248	175	175	175	175
Gehäuse	220	264	200	200	200	200

Abbildung 43: Herstellgrenzkosten anhand diverser Kostenpotentiale in den einzelnen Funktionsgruppen.

Kritisch ist und bleibt jedoch die geforderte Lebensdauer eines Stackmoduls von mindestens 80kh.

## 7 Nationale und internationale Zusammenarbeit

Neben der Kooperation durch die im Verbundprojekt teilnehmenden Firmen, Viessmann, ElingKlinger, sowie Ceramtec, als auch der Untertierlieferanten wie Bosal oder Miontec gab es folgende Zusammenarbeitsaktivitäten:

1. Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW)
  - a. Entwicklung neuer Abgaskatalysator im Rahmen der «ExGaT – Projekte»
  - b. Optimierung mittels Simulationen am Institute for Computational Physics
2. Universität St. Andrews, Schottland
  - a. Optimierung der Zelltechnologie für erhöhte Robustheit



## 8 Kommunikation

Im Rahmen des DaVinci Projekt wurden folgende populärwissenschaftliche Veröffentlichungen erstellt:

1. WASSERSTOFF UND BRENNSTOFFZELLEN; Vogel; 15.10.2018 Spektrum Gebäudetechnik DaVinci
2. WASSERSTOFF UND BRENNSTOFFZELLEN; Vogel; 30.11.2018 Bundesrundschau DaVinci
3. WASSERSTOFF UND BRENNSTOFFZELLEN; Vogel; 31.10.2018 Energierundschau DaVinci
4. WASSERSTOFF UND BRENNSTOFFZELLEN; Vogel; 22.02.2019 ET Elektrotechnik DaVinci
5. WASSERSTOFF UND BRENNSTOFFZELLEN; Vogel; 04.03.2019 Aqua&Gas DaVinci

Weiterhin wurden Ergebnisse auf folgenden Konferenzen präsentiert (siehe auch Kapitel 9)

1. SOFC XIV 2015 Glasgow
2. EFCF 2016 Luzern
3. SOFC XV 2017 Hollywood, FL USA
4. EFCF 2018 Luzern
5. SOFC XVI 2019 Kyoto, Japan
6. EFCF 2020 Luzern

Veröffentlichungen können auf Anfrage zur Verfügung gestellt werden.

## 9 Publikationen

Im Rahmen des DaVinci Projekts wurden u.a. folgende Publikationen veröffentlicht:

1. A. Mai, J.A. Schuler, F. Fleischhauer, V. Nerlich, A. Schuler, ECS Transactions, 68 (1) 109-116 (2015)
2. Andreas Mai, Felix Fleischhauer, Roland Denzler and Alexander Schuler, 2017 ECS Trans. 78 97
3. Andreas Mai, Jan Gustav Grolig, Michael Dold, Felix Vandercruysse, Roland Denzler, Bernhard Schindler, Alexander Schuler, 13th European SOFC Forum, Lucerne, A0301, 2018
4. Andreas Mai, Jan Gustav Grolig, Michael Dold, Felix Vandercruysse, Roland Denzler, Bernhard Schindler, Alexander Schuler, ECS Transactions, 91(1), 63-70, 2019
5. Jan Gustav Grolig, Gino Longo, Andreas Mai, ECS Transactions, 91(1), 2181-2188, 2019

Im Rahmen des DaVinci Projekts wurden folgende Abschlussarbeiten angefertigt:

1. Baback Sadeghi Aghdam, RWTH Aachen, *Integration der Dampfreformierung in ein Brennstoffzellenheizgerät: Auf simulativer Ebene bis zur Anfangsumsetzung - 2015*
2. Philipp Seitz, FH Konstanz, *Entwicklung eines Wassermanagements für ein mit Dampfreformierung betriebenes Brennstoffzellenmodul - 2017*
3. Emanuel Dymczyk, FH Köln, *Dampfreformierung von Erdgas für stationäre Brennstoffzellenheizgeräte – 2020*



4. Anton Reizker, Hochschule Reutlingen, *Analyse eines neuen Konzepts der Abgasbehandlung und Abgasmessung am SOFC-Brennstoffzellensystem – 2019*
5. Thilini Wickrama, Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, *Product Development of Exhaust Gas Filter for Fuel Cell Energy System to Eliminate Carbon Monoxide and Chromium – 2021 (in Arbeit)*

*Abschlussarbeiten und Veröffentlichungen können auf Anfrage zur Verfügung gestellt werden.*

## 10 Literaturverzeichnis

- Xu, J., Froment, G., 1989b. Methane Steam Reforming: 2. Diffusional Limitations and Reactor Simulation. *AICHE J.* 35, 97–103.
- [Obe07] E. Obe, Zeitung für Energiewirtschaft, 31 (2007) 4
- [Car07] Carbon Trust- Micro-CHP accelerator- November 2007
- [Col02] W. Colella, Journal of Power Sources (2002) 106