

# Abschlussbericht BWPLUS

## Entwicklung, Validierung und Industrialisierung eines modularen Gaserzeugers für stationäre Brennstoffzellen (Modularer Gaserzeuger)

von

Stephan Pflugfelder

smk | systeme metall kunststoff gmbH & co kg

Am smk-Kreisel 1

70794 Filderstadt

Förderkennzeichen: BWZPH222127

Laufzeit: 01.01.2022 – 30.06.2024

Finanziert aus Landesmitteln, die der Landtag Baden-Württemberg beschlossen hat.

Oktober 2024



**Baden-Württemberg**

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

## Kurzfassung

Nach den Vorgaben des Klimaschutzgesetzes soll Deutschland bis 2045 treibhausgasneutral werden. Um dieses ambitionierte Ziel zu erreichen, sind eine Vielzahl von Maßnahmen erforderlich, die den Ausstoß an Treibhausgasen signifikant reduzieren. In diesem Kontext wird dem Einsatz von Brennstoffzellensystemen eine zentrale Rolle zukommen, da sie sowohl für die CO<sub>2</sub>-neutrale Stromerzeugung als auch für die CO<sub>2</sub>-neutrale Wasserstoffherstellung von großer Bedeutung sind.

Die Brennstoffzellentechnologie mit der derzeit höchsten Effizienz ist die Solid Oxide Cell (SOC). Wenn SOC-Systeme zur Stromerzeugung genutzt werden, spricht man von Solid Oxide Fuel Cell Systemen (SOFC). Diese Systeme können über 60% der bei der Reaktion von Sauerstoff mit Wasserstoff freigesetzten Energie in Form von elektrischem Strom bereitstellen. Bei der Wasserstoffherzeugung in der sogenannten Solid Oxide Electrolyzer Cell (SOEC) liegt der Wirkungsgrad, dank der möglichen Integration von Wasserdampf, sogar bei bis zu 90% (Köllner, 2024).

Eine Besonderheit der SOC-Technologie ist, dass sie bei hohen Temperaturen von über 650°C bis 1000°C betrieben werden muss. Diese hohen Temperaturen stellen erhebliche Anforderungen an das Design und die Materialien im Hochtemperaturbereich (Hot Box) des Brennstoffzellensystems. Im Rahmen des Förderprojekts wurde ein modulares Konzept für Wärmetauscher und Reformer entwickelt, die im Hochtemperaturbereich des Systems zum Einsatz kommen und mit für die Gaserzeugung für den Brennstoffzellenstack verantwortlich sind.

Die Wärmetauscher sind in der Lage, einen Großteil der in den Abgasen des Stacks vorhandenen thermischen Energie an die in den Stack eintretenden Gase zu übertragen. Erst durch diese Wärmerückgewinnung ist es möglich, einen hohen Gesamtwirkungsgrad im System zu erzielen. Das im Rahmen des Förderprojekts entwickelte modulare Wärmetauscherkonzept erfüllt die am Markt gefragten technischen Leistungsparameter, wobei hohe Effizienz und geringer Druckverlust bei hoher Leistungsdichte entscheidend sind. Das modulare Konzept ermöglicht eine effiziente Auslegung des Wärmetauschers mittels Standardisierung und bietet durch die flexible Gestaltung der Diffusoren die Möglichkeit, trotzdem projektspezifische Geometrien zu realisieren.

Reformer kommen in SOFC-Systemen zum Einsatz, wenn statt Wasserstoff alternative Brenngase wie Erdgas oder Biogas verwendet werden. Im Reformer wird das Gas mithilfe von Katalysatoren so aufgespalten, dass es für die Brennstoffzelle nutzbar wird, zusätzlich werden für das System schädlichen Gaskomponenten beseitigt. Analog zum Wärmetauscher wurde auch für den Reformer ein modulares Konzept entwickelt, das eine flexible Anpassung an verschiedene Brenngase ermöglicht.

Zusätzlich werden in SOFC-Systemen Klappenventile zur Regelung der Gasströme benötigt. Im Rahmen des Projekts wurden bewährte Klappenkonzepte aus dem Automotive Umfeld weiterentwickelt, um sie für den Brennstoffzellenbereich nutzbar zu machen.

Das Förderprojekt konnte erfolgreich abgeschlossen werden. Das modulare Konzept für Wärmetauscher und Reformer wurde erfolgreich entwickelt. Auch für die Klappenventile wurden erfolgreich Konzepte zum Designtransfer in den Brennstoffzellenbereich definiert. Die Entwicklung einer Klappe aus Kunststoff ist noch nicht abgeschlossen, läuft jedoch nach Projektende firmenintern weiter.

# Inhalt

Kurzfassung.....	II
Inhalt.....	IV
Abbildungsverzeichnis.....	VI
Abkürzungsverzeichnis.....	VII
1 Einleitung.....	8
1.1 Motivation und Zielsetzung.....	8
1.2 Überblick über den Projektinhalt.....	9
1.2.1 Marktanalyse.....	9
1.2.2 Entwicklung und Simulation des modularen Wärmetauscherdesigns.....	9
1.2.3 Musteraufbau von Wärmetauschern und Simulationsabgleich.....	10
1.2.4 Designschleife im Wärmetauscherbereich.....	10
1.2.5 Reformer.....	10
1.2.6 Beschichtung zur Vermeidung der Chromevaporation.....	10
1.2.7 Klappenventile.....	10
1.2.8 Berücksichtigung einer möglichen Industrialisierung.....	11
2 Technologiehintergrund.....	12
2.1 Elektrochemische Funktionsweise einer SOFC-Brennstoffzelle.....	12
2.2 Aufbau eines SOFC-Systems.....	14
2.3 Mögliche Aggregation von BoP-Komponenten beim Systemaufbau.....	15
2.4 Technischer Stand zum Projektstart.....	16
2.4.1 Klappenventile.....	16
2.4.2 Wärmetauscher für SOC-Systeme.....	17
2.4.3 Gasreformierung und Beschichtung von Wärmetauschern.....	17
3 Marktumfeld und Anforderungsdefinition.....	18
3.1 Marktumfeld SOFC/SOEC.....	18
3.2 Ermittlung der Anforderungen an Systemkomponenten.....	19
3.2.1 Leistungsparameter für Wärmetauscher.....	20
3.2.2 Besondere Anforderungen an SOFC-Reformer.....	22
4 Modulares Wärmetauscherdesign.....	23
4.1 Plattenwärmetauscher in SOC-Systemen.....	23
4.2 Entwicklung des modularen Wärmetauscherkonzept.....	25
4.3 Simulation der Betriebspunkte.....	27
4.4 Entwickelte modulare Designvarianten.....	27
4.5 Leistungsmessung und Simulationsabgleich.....	29
4.6 Haltbarkeit und Validierung von Wärmetauschern.....	30

5	Reformer in SOFC-Systemen.....	32
5.1	Chemische Prozesse bei der Reformierung in SOFC-Systemen .....	32
5.2	Häufig verwendete Katalysatoren in SOFC-Systemen.....	32
5.2.1	Small-Scale-Tests von Katalysatormaterial.....	34
5.3	Entwicklung des modularen Reformerkonzepts .....	36
5.4	Beschichtung zur Reduzierung der Chromevaporation .....	37
6	Klappenventile für Brennstoffzellensysteme.....	39
6.1	Typische Modifikation des Klappendesigns .....	39
7	Industrialisierung .....	42
7.1	Aufbau und Qualifizierung eines Lieferantenpools .....	42
7.2	Mögliche Automatisierung der Fertigungsabläufe .....	42
7.3	Identifikation von alternativen Fertigungsverfahren .....	43
7.4	Innovation bei bestehenden Fertigungsverfahren .....	43
8	Zusammenfassung.....	44
9	Regionale Partner und Verwertung .....	45
10	Ausblick .....	46
	Literaturverzeichnis .....	47

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1 Grundfunktion einer einzelnen SOFC-Zelle .....	13
Abbildung 2.2 vereinfachte Grundstruktur eines SOFC-Systems .....	14
Abbildung 2.3 Aufbau SOFC-System (Bild: Robert Bosch GmbH) .....	15
Abbildung 2.4 smk Klappendesign aus dem Automotive Bereich .....	16
Abbildung 2.5 smk „zwei in eins“ SOFC-HEX-Design - stark projektspezifisch .....	17
Abbildung 3.1 Marktentwicklung Bereich SOFC, smk Internet Recherche .....	18
Abbildung 4.1 Betrieb Plattenwärmetauscher im Gegenstromprinzip .....	24
Abbildung 4.2 Temperaturgradient im Gegenstromprinzip .....	24
Abbildung 4.3 Modularer Ansatz im HEX Design – Folie aus Projekttreffen.....	26
Abbildung 4.4 Variation der Anschlusspositionen im smk HEX-Design.....	26
Abbildung 4.5 Wärmetauscher auf Basis des ersten modularen Designkonzepts....	28
Abbildung 4.6 Wärmetauscher auf Basis des zweiten modularen Designkonzepts..	28
Abbildung 4.7 Verkabelter Wärmetauscher vor Leistungsmessung .....	29
Abbildung 5.1 Schüttgutpellets auf Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Basis.....	33
Abbildung 5.2 Versuchsaufbau zum Small-Scale-Test von Katmaterial .....	35
Abbildung 5.3 Konversionsrate C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> im Reaktor über der Temperatur .....	35
Abbildung 5.4 Modell eine smk Reformers mit Schüttgut Katalysator .....	36
Abbildung 6.1 Klappendesign mit Dichtungseinsatz .....	39
Abbildung 6.2 Unterschiede zwischen zentrischer und exzentrischer Lagerung .....	40
Abbildung 6.3 Modell eines EGR-Klappenventils aus Kunststoff.....	41

## Abkürzungsverzeichnis

°C	Grad Celsius
3D	dreidimensional
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Aluminiumoxid
BoP	Balance of Plant
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	Ethan
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	Propan
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	Butan
CFD	computational fluid dynamics
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Chrom III
CrO <sub>3</sub>	Chrom VI
e <sup>-</sup>	Elektron
EGR	Exhaust Gas Recirculation
H <sup>+</sup>	Proton
H <sub>2</sub>	Wasserstoff
H <sub>2</sub> O	Wasser
HEX	Heat Exchanger
kW	Kilowatt
kWe	elektrische Leistungsabgabe in Kilowatt der SOFC
MW	Megawatt
NDIR	nichtdispersiver Infrarotspektroskopie
O <sub>2</sub>	Sauerstoff
O <sup>2-</sup>	Sauerstoffionen
OEM	Original-Equipment-Manufacturer
SiO <sub>2</sub>	Siliziumdioxid
smk	Firma smk I systeme metall kunststoff gmbh & co. kg
SOC	Solide Oxide Cell
SOEC	Solid Oxide Electrolyzer Cell
SOFC	Solide Oxide Fuel Cell
WLD	Wärmeleitfähigkeitsdetektor
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Yttriumoxid
YSZ	Yttrium-stabilisiertes Zirkoniumdioxid
ZrO <sub>2</sub>	Zirkoniumdioxid

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation und Zielsetzung

Angesichts der globalen Herausforderungen durch den Klimawandel wird es immer wichtiger, weniger von fossilen Brennstoffen abhängig zu sein. Daher rückt die Entwicklung nachhaltiger und effizienter Energieversorgungslösungen zunehmend in den Fokus.

Stationäre Brennstoffzellen, insbesondere die Festoxidbrennstoffzellen (SOFC), stellen eine vielversprechende Technologie dar, die nicht nur die Erzeugung von elektrischer Energie ermöglicht, sondern auch die Flexibilität bietet, im Umkehrprozess Wasserstoff zu erzeugen. Diese Dualität macht SOFC-Systeme besonders attraktiv für die zukünftige Energieversorgung, da sie sowohl als Energiequelle als auch als Speicher für erneuerbare Energien fungieren können.

Der Markt für SOFC- und SOEC-Systeme wird bis 2030 voraussichtlich erheblich wachsen. Laut einer Marktanalyse von ResearchAndMarkets wird der Markt für SOFC bis 2030 auf etwa 24,5 Milliarden USD geschätzt, mit einer jährlichen Wachstumsrate (CAGR) von etwa 25,4% (Research and Markets, 2022). Diese Zahlen verdeutlichen das wachsende Interesse und die Investitionen in die Brennstoffzellentechnologie, insbesondere in den Bereichen der stationären Energieerzeugung und Wasserstoffproduktion.

Ein wichtiger Aspekt der SOFC-Technologie ist ihre Fähigkeit, neben reinem Wasserstoff auch verschiedene andere Brennstoffe wie Erdgas, Biogas und Ammoniak zu nutzen. Diese Flexibilität ermöglicht es, die Technologie in unterschiedlichen Anwendungen und Märkten zu integrieren. In den letzten Jahrzehnten wurden große Fortschritte bei der Optimierung der Zelltechnologie gemacht, auf der die Technologie aufbaut. Die Stacks haben inzwischen eine Effizienz und Haltbarkeit erreicht, die sie marktfähig macht. Immer mehr Original-Equipment-Manufacturers (OEM) beschäftigen sich mit der Entwicklung von SOFC/SOEC-Systemen und planen, diese zeitnah in höheren Stückzahlen zu vermarkten.

Auch wenn die Stacks inzwischen marktfähig geworden sind, bleibt die Systemarchitektur und der Betrieb des Gesamtsystems komplex. Alle Subsysteme müssen optimal aufeinander abgestimmt sein und die Betriebsbedingungen, die einen stabilen und effektiven Betrieb der Stacks ermöglichen, müssen unter allen Eventualitäten gesichert sein. Auch unerwartete Betriebsituationen dürfen keine Schäden am System verursachen. Insbesondere plötzliche Temperaturschwankungen und unzulässige Zusammensetzungen in den Prozessgasen müssen vermieden werden. Vor diesem Hintergrund kommt der Konzeption der Gasversorgung eines SOFC/SOEC-Systems eine ganz entscheidende Bedeutung zu. Die Firma smk beschäftigt sich im Rahmen des hier beschriebenen Forschungsprojekts intensiv mit der schnellen und effektiven Auslegung der wesentlichen Komponenten einer Gasversorgungseinheit für SOFC/SOEC-Systeme. Im Rahmen der Entwicklung werden auch die zugrundeliegenden Fertigungskonzepte erarbeitet.



## 1.2 Überblick über den Projektinhalt

Der vorliegende Bericht basiert auf den Inhalten und der Chronologie des Projektplans. Ziel ist es, dem Leser einen Überblick über die wesentlichen Schritte und Ergebnisse des Projekts zu bieten. An Stellen, an denen internes technisches Know-How der Firma smk berührt wird, kann häufig leider nicht tiefer in technische Details oder auf konkrete Fertigungstechnologien eingegangen werden. Die Ausführungen beschränken sich dann auf die Beschreibung der Ergebnisse. Dafür wird beim technisch interessierten Leser schon vorab um Verständnis gebeten. Im ersten Kapitel wird ein Überblick über die im Rahmen des Projekts bearbeiteten Bereiche gegeben. Im weiteren Bericht wird dann detaillierter auf die einzelnen Komponenten und Themenfelder eingegangen.

### 1.2.1 Marktanalyse

Zu Projektbeginn wurde eine Analyse des Marktumfelds durchgeführt. Diese Analyse umfasste eine Recherche zum Marktwachstum sowie die Identifikation der wichtigsten Marktteilnehmer, darunter OEMs und Forschungsinstitute. Zudem wurden die Marktbegleiter im Bereich der Herstellung von Balance of Plant (BoP) Komponenten identifiziert.

Die Aktivitäten zur Marktanalyse und die kontinuierliche Verfolgung der Trends im Bereich der SOFC und SOEC wurden während des gesamten Projektverlaufs fortgeführt. Aus den Erkenntnissen der Marktanalyse und dem vertieften Systemverständnis von SOFC und SOEC konnten spezifische Anforderungen für die BoP Komponenten abgeleitet werden.

Durch intensiven Kontakt mit verschiedenen OEMs und Forschungseinrichtungen konnte ein tiefes Verständnis für die konkreten Anforderungen an Komponenten und mögliche Lieferumfänge entwickelt werden. Bei Projektstart war es das Ziel, den kompletten Gaserzeuger für ein SOFC-System in modularer Auslegung zu planen. Im Verlauf des Projekts zeigte sich jedoch, dass die OEMs noch nicht bereit sind, diese Entwicklungsverantwortung vollständig aus der Hand zu geben. Daher wurde im Projektverlauf entschieden, den modularen Entwicklungsansatz auf zentrale, wertige Komponenten der Gaserzeugung zu konzentrieren. Dies betrifft insbesondere die Wärmetauscher und Reformer, die entscheidend für die Effizienz und Leistung der Gaserzeugung sind. Zusätzlich wurden Klappenventile für die Gasflussregelung in der Peripherie der Brennstoffzelle entwickelt.

### 1.2.2 Entwicklung und Simulation des modularen Wärmetauscherdesigns

Im nächsten Schritt wurde ein modularer Designansatz für die Wärmetauscher in SOC Systemen entwickelt. Zu Projektbeginn war bereits ein sehr spezifisches Design für einen Wärmeübertrager für ein SOFC-System vorhanden, wodurch einige Punkte, die verbessert werden mussten, teilweise bekannt waren. Neue Erkenntnisse und Input kamen aus der zuvor durchgeführten Marktstudie. Für das entwickelte modulare HEX-Design wurde eine Simulationsstrategie erarbeitet, und es wurde eine geeignete Simulationssoftware identifiziert. Eine der Herausforderungen bestand darin, dass die Bauteile sehr groß sein können und dennoch mit der zur Verfügung stehenden IT-Infrastruktur rechnerisch bearbeitet werden müssen. Der Simulationsansatz wurde im gesamten Projektverlauf kontinuierlich verfeinert und auf eine Vielzahl unterschiedlicher Betriebszustände angewendet.

### *1.2.3 Musteraufbau von Wärmetauschern und Simulationsabgleich*

Nachdem die Simulationsergebnisse vielversprechende Resultate lieferten, wurden Wärmetauscher entsprechend dem modularen Design zur Erprobung aufgebaut. Um die Simulationsdaten abzugleichen, erfolgten mit diesen Bauteilen reale Leistungsmessungen an Heißgasprüfständen sowie in SOFC-Systemen. Sowohl die Simulationen als auch die Tests mit den Wärmetauschern lieferten wertvolle Hinweise zur kontinuierlichen Weiterentwicklung des modularen Designkonzepts. Es zeigte sich, dass das HEX-Design sehr gut mit den Simulationsergebnissen übereinstimmte und eine deutliche Leistungssteigerung im Vergleich zum Stand vor Projektbeginn erzielt werden konnte.

### *1.2.4 Designschleife im Wärmetauscherbereich*

Der Trend zu immer größeren Einheiten und die firmeninterne Zielsetzung zur weiteren Steigerung der Leistungsdichte bei reduziertem Materialeinsatz führte dazu, dass innerhalb der Projektlaufzeit das HEX-Design weiter überarbeitet und fertigungstechnisch nochmals vereinfacht wurde. Mit dem neuen Wärmetauscher Design ist es nun möglich, auch Wärmetauscher für >1 MW SOEC mit dem bestehenden Maschinenpark zu fertigen. Dieses HEX Design wurde noch im Rahmen des Projekts mittels CFD & FE-Simulationen ausgelegt und dimensioniert, der Aufbau und der Simulationsabgleich auf dem Prüfstand müssen aus zeitlichen Gründen allerdings nach Projektabschluss erfolgen.

### *1.2.5 Reformer*

Der Reformer ist eine Komponente, die in einer SOFC enthalten sein muss, wenn sie nicht mit reinem Wasserstoff betrieben werden soll. Da die Verfügbarkeit von reinem Wasserstoff derzeit noch begrenzt ist, werden aktuell Systeme überwiegend mit Reformer ausgelegt. Da neben der Wärmeübertragung in einem Reformer auch chemische Reaktionen ablaufen, mussten in diesem Segment weitere technische und chemische Grundlagen erarbeitet werden. Kontakte zu Spezialisten wurden geknüpft, die im Bereich der Katalysatorauswahl unterstützen und für alle am Markt gängigen Reformersmodelle die entsprechenden Materialien zur Verfügung stellen können. Um die OEMs kurz- bis mittelfristig mit haltbaren und erprobten Systemen versorgen zu können, wurde im Rahmen des Projekts ein modulares Reformerskonzept zum Einsatz mit Schüttgutkatalysatoren entwickelt.

### *1.2.6 Beschichtung zur Vermeidung der Chromevaporation*

Die Beschichtungstechnologie im Wärmetauscherbereich von SOFC ist definitiv ein wichtiger Punkt in der Zukunft. Um hier weiter Know-How aufzubauen, wurden Beschichtungen zur Reduzierung der Chromevaporation untersucht. Zum Abschluss des Projekts sind diese Beschichtungen noch in der Untersuchung bei externen Partnern. Parallel dazu sind auch Untersuchungen zur katalytischen Beschichtung von Wärmetauschern projektiert, die parallel und redundant in Systemen mit Schüttgutkatalysatoren durchgeführt werden.

### *1.2.7 Klappenventile*

Ein weiterer Bereich im Projekt betrifft Klappenventile zur Gasflussregelung für SOFC/SOEC-Systeme. In diesem Segment kann seitens smk schon auf umfangreiches Know-How aus dem Automotive-Bereich zurückgegriffen werden. Diese Erkenntnisse konnten als Grundlage für die Weiterentwicklung und Adaption von

Klappenkonzepten für den Bereich der Brennstoffzelle verwendet werden. smk hat ein Konzept zur Adaption der Klappen aus dem Automotive-Segment entwickelt. Weiterentwicklungen zu hochdichten Varianten und Versionen, die vollständig aus Kunststoff gefertigt sind, befinden sich in Planung.

#### *1.2.8 Berücksichtigung einer möglichen Industrialisierung*

Alle Projektinhalte wurden immer auch vor dem Hintergrund einer später möglichen Serienverwertung betrachtet. Daher kommen als Fertigungstechnologien auch nur Verfahren in Frage, die später in teil- und vollautomatische Fertigungsprozesse integriert werden können.

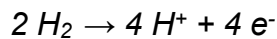
Insgesamt bietet der Bericht eine detaillierte Darstellung der Entwicklungsleistung und den durchgeführten Analysen und Tests, die mit den BoP-Komponenten durchgeführt wurden. Die Ergebnisse und Erkenntnisse aus den verschiedenen Projektphasen werden im Folgenden ausführlich behandelt, dabei wird detailliert auf die unterschiedlichen Projektinhalte eingegangen, der Stand der Arbeiten sowie die Ergebnisse und Erkenntnisse dargestellt.

## 2 Technologiehintergrund

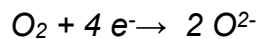
### 2.1 Elektrochemische Funktionsweise einer SOFC-Brennstoffzelle

In einer SOFC erfolgt die Stromerzeugung durch elektrochemische Reaktionen, die im Stack ablaufen. Ein Stack besteht aus mehreren Zellen, die in Serie geschaltet sind, um die Spannung zu erhöhen. Die grundlegenden Abläufe im Stack können in mehrere Schritte unterteilt werden.

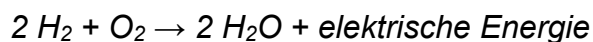
Vereinfacht dargestellt wird Wasserstoff an die Anodenseite der Brennstoffzelle geleitet. Dort findet die Aufspaltung des Wasserstoffs in Wasserstoffionen ( $H^+$ ) und Elektronen ( $e^-$ ) statt. (Kurzweil, 2016)



Die Elektronen fließen durch den externen Stromkreis von der Anode zur Kathode. Auf der Kathodenseite befindet sich Luft. Die Elektronen an der Kathode bilden mit dem in der Luft enthaltenen Sauerstoff Sauerstoffionen ( $O^{2-}$ ).



Zwischen Anode und Kathode befindet sich ein keramischer Elektrolyt, der selektiv durchlässig für Sauerstoffionen ist. Die Sauerstoffionen wandern durch den Elektrolyten von der Kathodenseite auf die Anodenseite. Dort rekombinieren Sauerstoffionen und Wasserstoffionen zu Wasser. Die Gesamtreaktion in der SOFC kann somit wie folgt beschrieben werden:



Die erzeugte Energie wird in Form von elektrischem Strom genutzt, während das Wasser als Nebenprodukt entsteht. Ein wichtiger Aspekt der SOFC ist die hohe Betriebstemperatur, die typischerweise zwischen  $600^\circ\text{C}$  und  $1.000^\circ\text{C}$  liegt. Diese hohen Temperaturen ermöglichen eine effiziente elektrochemische Reaktion und tragen somit zur hohen Effizienz der Brennstoffzelle bei.

Die Struktur des Stacks ist wie bereits oben erwähnt so gestaltet, dass die Anoden- und Kathodenmaterialien durch einen festen Elektrolyten getrennt sind, der die Ionenleitfähigkeit gewährleistet, während er gleichzeitig die Elektronenleitung verhindert. Dies ist entscheidend, um die elektrochemischen Reaktionen in der gewünschten Weise zu gewährleisten. Am häufigsten wird Zirkoniumdioxid ( $ZrO_2$ ) als Elektrolyt verwendet, das mit Yttriumoxid ( $Y_2O_3$ ) dotiert wird, um die Ionenleitfähigkeit zu erhöhen. Diese dotierte Form von Zirkoniumdioxid wird als Yttrium-stabilisiertes Zirkoniumdioxid (YSZ) bezeichnet (Kurzweil, 2016).

YSZ bietet mehrere vorteilhafte Eigenschaften, die es zu einem besonders geeigneten Elektrolyten für SOFCs machen. Zunächst ermöglicht es eine hohe Ionenleitfähigkeit, die die effiziente Bewegung von Sauerstoffionen ( $O^{2-}$ ) bei hohen Temperaturen unterstützt. Diese Eigenschaft ist entscheidend für die elektrochemischen Reaktionen, die in der Brennstoffzelle ablaufen. Darüber hinaus ist das Material chemisch stabil und widerstandsfähig gegenüber den aggressiven Bedingungen, die in einer SOFC

herrschen, einschließlich der hohen Temperaturen und der Reaktivität der verwendeten Brennstoffe (Kurzweil, 2016).

Ein weiterer Vorteil von YSZ ist seine Hitzebeständigkeit. Es kann bei den hohen Betriebstemperaturen von SOFCs eingesetzt werden, ohne seine strukturellen Eigenschaften zu verlieren. Zudem weist das Material gute mechanische Eigenschaften auf, da es eine hohe Festigkeit besitzt und den thermomechanischen Belastungen standhalten kann, die während des Betriebs auftreten (Kurzweil, 2016).

Die folgende Grafik veranschaulicht die elektrochemischen Reaktionen, die in der einzelnen Zelle ablaufen und die zur Stromerzeugung führen. In einem SOFC-System werden mehrere hundert solcher Zellen gestapelt und bilden den Stack.

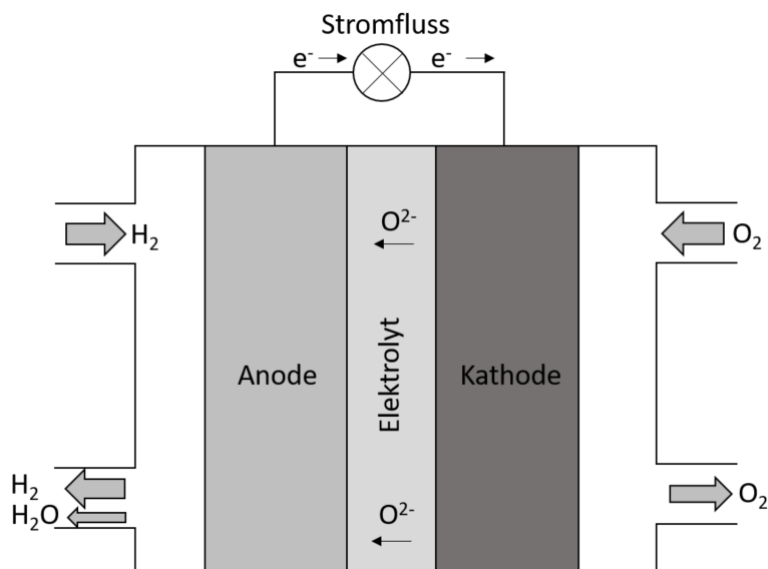


Abbildung 2.1 Grundfunktion einer einzelnen SOFC-Zelle

Der umgekehrte Prozess der Wasserstofferzeugung in einem Festoxid-Elektrolyseur (SOEC) nutzt elektrische Energie, um Wasserdampf in Wasserstoff und Sauerstoff zu zerlegen. In diesem System wird Wasserdampf an die Kathodenseite geleitet, wo dieser durch die Zufuhr von Strom in Wasserstoff und Sauerstoffionen aufgespalten wird. Die Sauerstoffionen wandern dann durch das feste Elektrolyt zur Anodenseite und rekombinieren hier zu Sauerstoff. Auf der Kathode kann Wasserstoff abgeleitet werden.

Die SOC ist derzeit die Brennstoffzellentechnologie mit dem höchsten Wirkungsgrad. Der elektrische Wirkungsgrad von SOFC-Systemen zur Stromerzeugung liegt bei über 60%, bei SOEC-Systemen zur Wasserstoffproduktion, unter Einbindung von Wasserdampf kann der Wirkungsgrad auf bis zu 90% gesteigert werden (Köllner, 2024). Diese Effizienzvorteile führen dazu, dass der Einsatz der SOC Technologie kontinuierlich an Bedeutung gewinnt und sich weltweit Forschungseinrichtungen und Firmen mit der Industrialisierung von SOC-Systemen beschäftigen. Insbesondere die Haltbarkeit der Systeme, die Automatisierung der Fertigungsabläufe und die Skalierung der Anlagengröße stehen dabei im Fokus.

## 2.2 Aufbau eines SOFC-Systems

Im Folgenden wird der typische Aufbau eines SOFC-Systems, mit dem Strom erzeugt wird, näher erläutert. Da im SOEC-System der Umkehrprozess abläuft, ist der Aufbau verwandt.

Der vereinfachte Grundaufbau eines Festoxid-Brennstoffzellen-Systems (SOFC) umfasst mehrere Komponenten, die in der unten stehenden Abbildung dargestellt sind. Im Zentrum des Systems steht der SOFC-Stack, in dem die elektrochemischen Reaktionen stattfinden. Der Stack besteht aus mehreren Brennstoffzellen, die in Serie geschaltet sind, um elektrischen Strom zu erzeugen. An der Anode wird das vorkonditionierte Brenngas oxidiert, während an der Kathode Sauerstoff reduziert wird.

Um die Effizienz des Systems zu steigern, sind air/air Wärmetauscher und fuel/fuel Wärmetauscher integriert. Der air/air Wärmetauscher nutzt die Abwärme aus dem Abgasstrom der Kathodenseite, um die einströmende Luft vorzuheizen. Dies reduziert den Energiebedarf, um die Luft auf die erforderliche Betriebstemperatur zu bringen.

Ähnlich funktioniert der fuel/fuel Wärmetauscher, der die Abwärme aus dem Anodengasstrom verwendet, um den einströmenden Brennstoff vorzuwärmen. Durch die Anodengasrezirkulation wird Anodengas, das nach der Reaktion noch einen Wasserstoffanteil enthält, zurück in den Anodengasstrom zum Stack geleitet. Erst durch die Abkühlung des Gases im fuel/fuel Wärmetauscher ist eine Rezirkulation des Gases möglich, da ansonsten die hohe Austrittstemperatur des Brenngases das Gebläse beschädigen würde. Die Rezirkulation trägt zur Reduzierung des Brennstoffverbrauchs und zur Verbesserung der Gesamtleistung des Systems bei.

Um den Gasfluss zu steuern und die Druckverluste in BoP und Stack zu überwinden, sind im SOFC-System Gebläse auf der Luft- und Anodengasseite verbaut. Da diese Gebläse einen nicht unerheblichen Stromverbrauch verursachen, ist es stets das Ziel, die Druckverluste in sämtlichen Komponenten des Systems möglichst gering zu halten. Dies trägt ebenfalls direkt zu einer Steigerung des Gesamtwirkungsgrades bei.

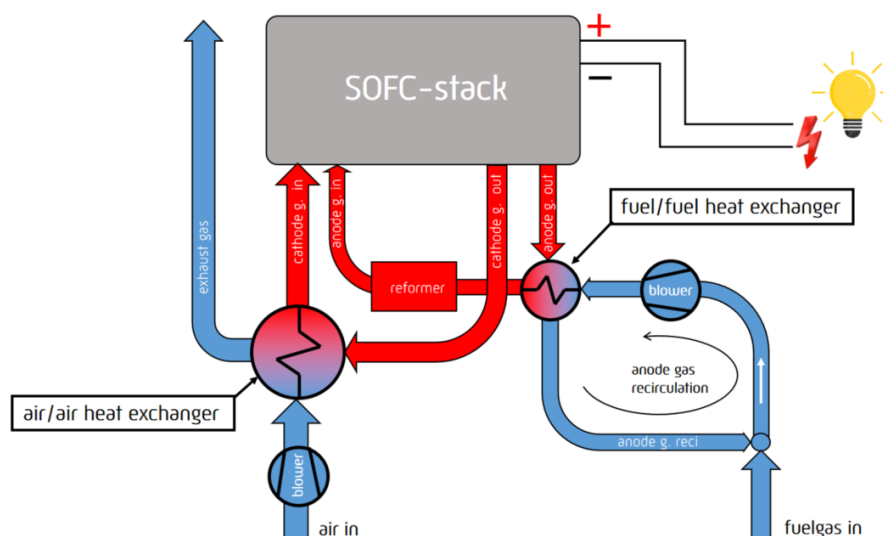


Abbildung 2.2 vereinfachte Grundstruktur eines SOFC-Systems

Wenn diese Komponenten in ein Serienprodukt integriert werden sollen, kommt es besonders darauf an, die Komponenten möglichst kompakt zu arrangieren.

Meist sieht eine seriennahe Systemarchitektur eine kompakte BoP unterhalb der Stackplatte vor. In der BoP sind sämtliche Komponenten enthalten, die unmittelbar mit der Konditionierung und Temperierung der Prozessgase zu tun haben, also z.B. Wärmetauscher, (katalytische) Brenner, Reformier und Verrohrung. Eine Tragstruktur nimmt die nicht unerheblichen Gewichtskräfte der BoP und des Stacks auf. Die Isolation begrenzt den heißen Bereich der SOFC, der sogenannten HotBox.

Außerhalb der HotBox, innerhalb des Systemgehäuses, sind die restlichen meist temperaturempfindlichen Komponenten wie z.B. Gebläse, Ventile, Spannungswandler und das Bediendisplay installiert.

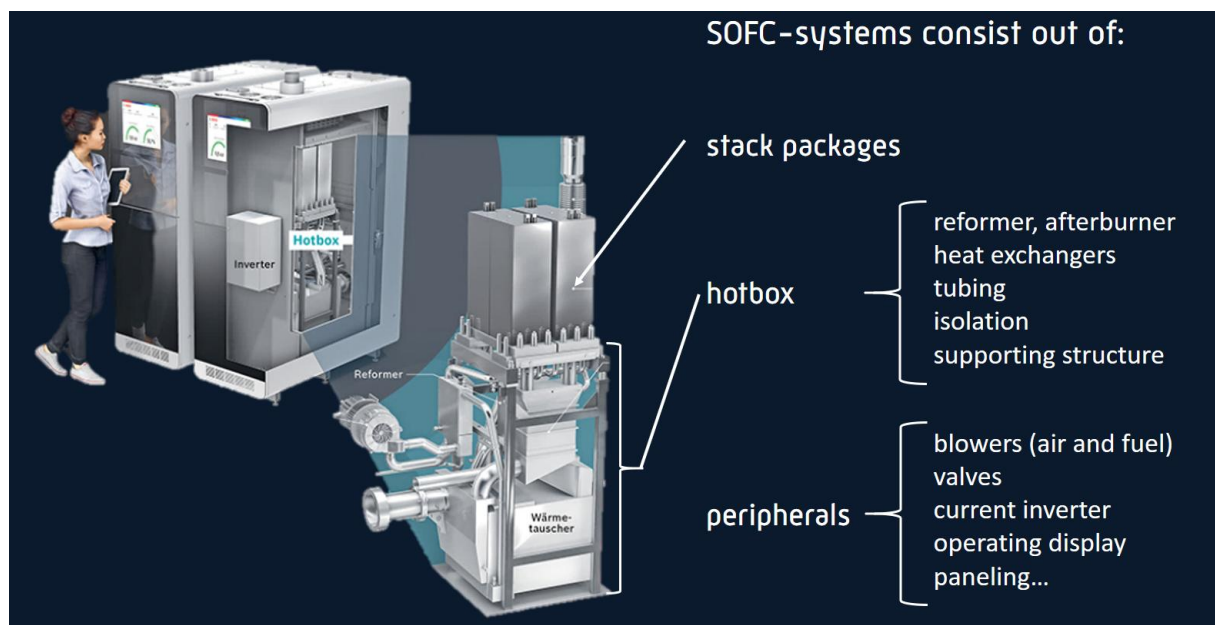


Abbildung 2.3 Aufbau SOFC-System (Bild: Robert Bosch GmbH)

## 2.3 Mögliche Aggregation von BoP-Komponenten beim Systemaufbau

Grundsätzlich bestehen Brennstoffzellensysteme aus mehreren Komponenten – den Stacks, dem Gaserzeuger inkl. Wärmetauscher, diversen Peripherie Baugruppen (z.B. Rezirkulationsgebläse) und dem Gehäuse. Zumeist werden die Komponenten des BOP und der Peripherie von verschiedenen Lieferanten bezogen und erst beim Systemhersteller einzeln in das System integriert.

Aus Sicht von smk bietet es entscheidende Vorteile, wenn die Komponenten der BoP, bzw. des Gaserzeugers, aus einer Hand stammen. smk plante im Rahmen des Forschungsprojektes ein modulares Gaserzeugerkonzept zu entwickeln, das schnell an verschiedene Brennstoffzellengrößen adaptiert werden kann. Zudem sah das Konzept vor, katalytische Elemente aus dem Gaserzeuger in den Wärmetauscher zu integrieren, um die Effizienz der Brennstoffzelle zu erhöhen und Bauraum zu reduzieren.

Im Projektverlauf zeigte sich, dass die OEMs aktuell noch nicht bereit sind, die Entwicklung und Fertigungsverantwortung so umfangreich aus der Hand zu geben.

Aktuell werden lediglich die Betriebspunkte von einzelnen Subkomponenten geteilt, aber kein umfassender Einblick in die Gesamtsystemkonfiguration gegeben, was für die Auslegung des Gaserzeugers erforderlich wäre. Die OEMs signalisieren, dass dies zu einem späteren Zeitpunkt durchaus sinnvoll sein könnte.

Vor diesem Hintergrund hat man sich im Projektverlauf auf die wertigen Komponenten wie Wärmetauscher, Reformer und Klappen konzentriert und hier einen modularen Designsatz entwickelt. smk sieht in diesem Vorgehen eine deutliche Beschleunigung in der Auslegung, Detailanpassung und Fertigung dieser Komponenten.

## 2.4 Technischer Stand zum Projektstart

### 2.4.1 Klappenventile

Die Firma smk produziert seit Jahrzehnten Klappenventile für das Abgasmanagement in Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor. Dabei werden zwei unterschiedliche Klappentypen unterschieden: Sogenannte AGR-Klappen sind in der Lage, den Abgasgedruck im Auspufftrakt so zu regeln, dass eine Zumischung von Abgasen in die Frischluftzufuhr des Verbrennungsprozesses möglich ist. Dieses Verfahren nennt sich Abgasrückführung (AGR) und ist ein wichtiges Instrument bei der Reduzierung des Stickoxidgehaltes in Abgasen von Verbrennungsfahrzeugen (Hörnig, 2012).

Des Weiteren produziert smk Akustikklappen, die in bestimmten Betriebszuständen den Abgasgedruck in der Auspuffanlage deutlich reduzieren, indem ein Bypass freigeschaltet wird. Dies ist der Fall, wenn es im Fahrbetrieb nicht auf besonders geringe Geräuschemissionen ankommt. Dadurch kann die Abgasanlage tendenziell leichter und kleiner dimensioniert werden.

Die folgende Abbildung zeigt ein typisches Klappenventil aus dem Automotive Bereich:



Abbildung 2.4 smk Klappendesign aus dem Automotive Bereich

Das smk-Klappendesign wird im Rahmen des Forschungsprojektes so weiterentwickelt, dass es auch die Anforderungen für den Betrieb in einer SOFC-Brennstoffzelle erfüllt. Da die bestehenden Klappen bereits umfangreiche Validierungsmaßnahmen durchlaufen haben, kann bei dieser Anpassung auf den bestehenden Entwicklungsstand aufgebaut werden.



#### 2.4.2 Wärmetauscher für SOFC-Systeme

smk hat 2021 ein Wärmetauscher Design zum Patent angemeldet, das sehr spezifisch auf die Anforderungen eines einzelnen SOFC-Projekts zugeschnitten war. Die Auslegung war sehr aufwändig und zeitintensiv. Es handelt sich um ein „zwei in eins“ Wärmetauscher Design. Das Konzept ist kompakt, hat aber nur eine eingeschränkte Verwendbarkeit für andere SOFC-Systeme.

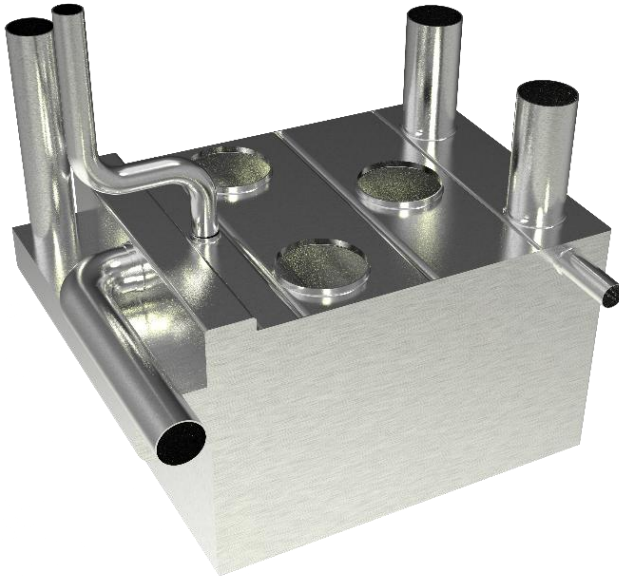


Abbildung 2.5 smk „zwei in eins“ SOFC-HEX-Design - stark projektspezifisch

Auf die Erkenntnisse aus dem oben vorgestellten Wärmetauscher Design und die große, langjährige Erfahrung der Firma smk im Bereich des Wärmemanagements im Automotive und Gasthermenbereich konnte ebenfalls aufgebaut werden.

#### 2.4.3 Gasreformierung und Beschichtung von Wärmetauschern

Im Unterschied zum Bereich der Klappen und Wärmetauscher konnte bei der zur Gasreformierung erforderlichen Katalysatorchemie noch nicht auf umfangreiche Vorkenntnisse zurückgegriffen werden.

Im Rahmen des Projekts wurde das Know-How im Bereich der Gas-Reformierung mit klassischen Katalysatoren und zur Beschichtung von Wärmetauschern stark ausgeweitet. Hier wurden externe Partner identifiziert, die im Bereich der Katalysatorchemie wertvollen Wissenstransfer geleistet haben und auch in Zukunft in der Detailauslegung und Definition von geeigneten Katalysatorwerkstoffen zur Seite stehen werden. Aber auch hier ist das tiefe Wissen von smk im Bereich des Wärmemanagements entscheidend, da die Katalysatoren immer durch geeignete geometrische Reformerauslegung im korrekten Temperaturbereich gehalten werden müssen. Nur dann können die gewünschten chemischen Reaktionen stattfinden und unerwünschte Begleitprozesse vermieden werden.

### 3 Marktumfeld und Anforderungsdefinition

Zu Beginn des Projekts wurde eine umfassende Marktanalyse durchgeführt, um die zuvor abgeschätzten Potentiale des Marktes für Brennstoffzellen und Elektrolyseure zu evaluieren. Diese Analyse war entscheidend, um ein fundiertes Verständnis der aktuellen Marktbedingungen, der Wettbewerbslandschaft und der technologischen Trends zu gewinnen. Zunächst konzentrierte sich die Untersuchung ausschließlich auf das Marktpotential der Festoxidbrennstoffzellen (SOFC). Im Verlauf des Projekts wurde jedoch erkannt, dass auch der Markt für die Solid Oxide Electrolyzer Cells (SOEC) bedient werden kann, was die Perspektiven zusätzlich erweitert.

#### 3.1 Marktumfeld SOFC/SOEC

Die im Rahmen des Projekts durchgeführte Marktanalyse bestätigt die seitens smk positive Markteinschätzung für den Bereich der Hochtemperaturbrennstoffzellen. Das folgende Diagramm zeigt die Markteinschätzung unterschiedlicher Forschungsinstitute und Forschungsdienstleister für den SOFC-Markt.

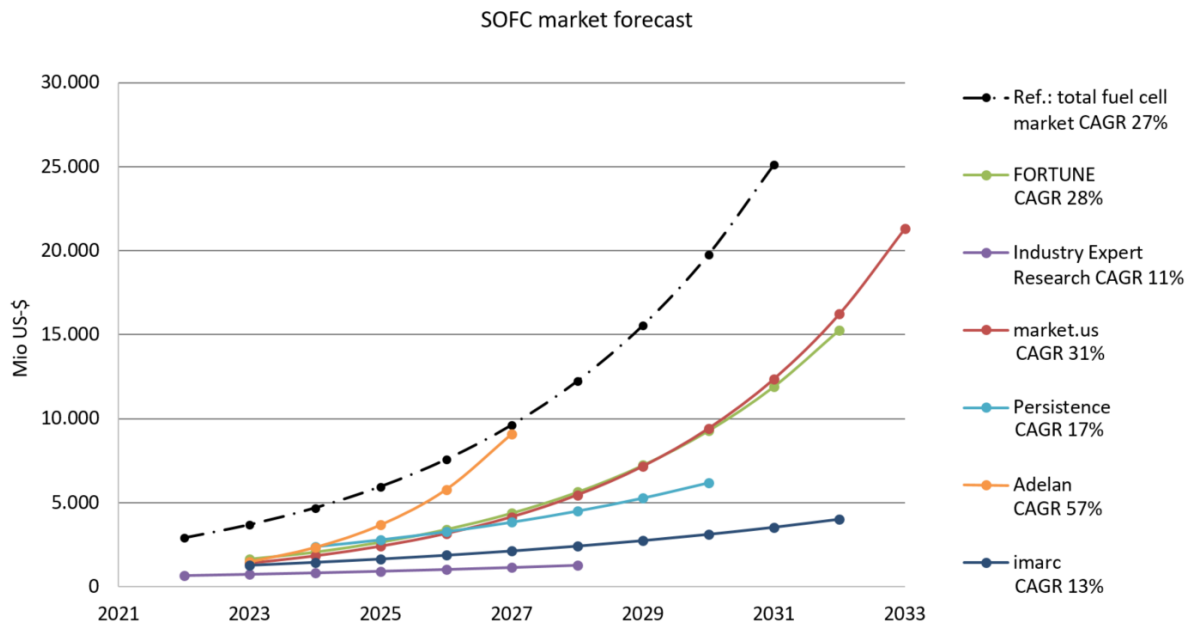


Abbildung 3.1 Marktentwicklung Bereich SOFC, smk Internet Recherche

Dazu wurden die im Internet frei verfügbare Prognosen gesammelt und zueinander ins Verhältnis gesetzt. Falls lediglich Zahlenwerte und Zeitabschnitte veröffentlicht sind wurde das CAGR errechnet. Sämtliche Quellen prognostizieren ein deutlich positives Marktwachstum im Segment der SOFC. Die prognostizierte Wachstumsrate (CAGR) liegt je nach Quelle zwischen 11% und 31% Prozent p.a. und ist damit sehr attraktiv.

Hintergrund für die durchweg positive Markteinschätzung ist, dass sich die Technologien der Festoxidbrennstoffzellen (SOFC) und der Festoxid-Elektrolysezellen (SOEC) in den letzten Jahren als vielversprechende Lösungen im Bereich der Wasserstoffnutzung/-erzeugung etabliert haben. Die Festoxidtechnologie ermöglicht die sehr effiziente Umwandlung von chemischer Energie in elektrische Energie und die Elektrolyse von Wasserstoff. Ein wesentlicher Treiber für dieses überdurchschnittliche Wachstum ist die zunehmende Nachfrage nach Wasserstoff als

sauberer Energieträger. Die SOEC-Technologie, die Wasserstoff durch Elektrolyse erzeugt, wird immer relevanter, insbesondere im Kontext der Energiewende. Technologische Fortschritte in der Materialwissenschaft und Zelltechnologie haben die Effizienz und Lebensdauer von SOFC und SOEC erheblich verbessert, was zu einer breiteren Akzeptanz und Anwendung dieser Technologien führt. Darüber hinaus unterstützen viele Regierungen weltweit die Entwicklung und den Einsatz von Brennstoffzellen- und Elektrolysetechnologien durch Subventionen, Steueranreize und Forschungsförderung, was das Wachstum des Marktes weiter fördert.

Zudem macht die Vielseitigkeit in der Anwendung die Technologie attraktiv. SOFCs können in einer Vielzahl von Bereichen eingesetzt werden, von stationären Energieerzeugungssystemen und der Integration in Mikronetze bis hin zu mobilen Anwendungen im maritimen Bereich. Diese Flexibilität ermöglicht es, die Technologie an unterschiedliche Bedürfnisse und Anforderungen anzupassen. SOECs finden Anwendung in der Wasserstoffproduktion für industrielle Prozesse, Energiespeicherung und als Teil von Wasserstoffinfrastrukturen, was ihre Relevanz in der heutigen Energieversorgung unterstreicht. Aber der wohl entscheidende Vorteil der Technologie ist ihre hohe Effizienz. SOFCs bieten eine elektrische Effizienz von über 60% und können in Kombination mit Abwärmennutzung, auch bekannt als Kraft-Wärme-Kopplung, noch effizienter arbeiten. SOECs erreichen noch höhere Effizienzen bei der Elektrolyse. Durch die mögliche Integration von Wasserdampf kann der Wirkungsgrad sogar auf bis zu 90% gesteigert werden (Köllner, 2024). Was sie unter den geeigneten Voraussetzungen zur attraktiven Option für die Wasserstoffproduktion macht. Die Technologien tragen zur Reduzierung der Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen bei und unterstützen die Energiewende. Wenn sie mit erneuerbaren Energiequellen wie Wind- und Solarenergie kombiniert werden, können sie zur nachhaltigen und zuverlässigen Energieversorgung beitragen. In einer Zeit, in der die Nachfrage nach dezentralen Energieerzeugungslösungen wächst, insbesondere in ländlichen und abgelegenen Gebieten, die über keine stabile Netzanbindung verfügen, bieten SOFC-Systeme eine vielversprechende Lösung, da sie unabhängig vom zentralen Stromnetz betrieben werden können.

Die Analyse der wesentlichen Marktteilnehmer im SOFC/SOEC-Segment zeigt eine globale Präsenz. Forschungsinstitute, Stackhersteller und OEMs sind international verteilt. Besonders aktive Märkte neben Europa sind Nordamerika, Asien, Südafrika und Australien.

### 3.2 Ermittlung der Anforderungen an Systemkomponenten

Die Erkenntnisse aus der Marktanalyse führten zur Ableitung spezifischer Anforderungsprofile für die Gaserzeugung und die verwendeten Unterkomponenten des Balance of Plant sowohl für SOFC- als auch für SOEC-Systeme. Diese Anforderungsprofile sind entscheidend, um die Bedürfnisse der Systemhersteller zuerst zu verstehen und im nächsten Schritt passende Produkte zu entwickeln.

Im Rahmen der Projektlaufzeit sind die projektierten Systemgrößen bei SOFC und SOEC kontinuierlich größer geworden. Lagen die typischen Systemgrößen zu Projektbeginn im Bereich der SOFC bei 10 kWe bis 30 kWe, so sind heute typische Systemgrößen bei 40 kWe bis 60 kWe, wobei durch die Bündelung mehrerer Einheiten sogar noch größere Systeme realisiert werden. Diese Entwicklung ist ein Indikator für den wachsenden Bedarf an effizienter und skalierbarer Energieerzeugung,

insbesondere in industriellen Anwendungen und bei der dezentralen Energieversorgung.

Im Bereich der SOEC-Systeme war zu Projektbeginn die Entwicklung von Pilotsystemen mit einer Leistung von etwa 100 kW im Fokus. Diese Systeme dienten dazu, die Technologie zu erproben und die Machbarkeit der Elektrolyse von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff zu demonstrieren. Mit den Fortschritten in der Technologie und der zunehmenden Nachfrage nach grünem Wasserstoff hat sich die typische projektierte Systemgröße für SOEC-Systeme jedoch erheblich vergrößert. Heute liegt die durchschnittliche Systemgröße bei etwa 1 MW, was durch die Skalierbarkeit der Technologie gut darstellbar ist. Dazu werden mehrere Stacks kombiniert und gleichzeitig die Stackhöhe gesteigert. Die Versorgung mehrerer Stackbündel erfolgt zumeist durch eine zentrale BoP. Dies erfordert eine Steigerung der Leistung und größere Dimensionierung der BoP Komponenten.

### *3.2.1 Leistungsparameter für Wärmetauscher*

Die entscheidenden Leistungsparameter für Wärmetauscher im Balance of Plant (BoP) von Brennstoffzellen- und Elektrolysesystemen sind die Effizienz und der Druckverlust, die bei den unterschiedlichen Betriebspunkten der Systeme auftreten. Diese Parameter sind von zentraler Bedeutung, um die Gesamtleistung und Wirtschaftlichkeit der Systeme zu optimieren.

#### *3.2.1.1 Effizienz der Wärmetauscher*

Stationäre SOFC-Systeme sind dafür prädestiniert kontinuierlich im Sinne einer Grundlastversorgung betrieben zu werden. Daher ist bei der Wärmetauscherlegung eine hohe Effizienz im 100% Nennbetriebspunkt von besonderer Bedeutung. smk strebt in der Auslegung der Wärmetauscher im Nennlastpunkt eine Effizienz von mindestens 93% an. Das heißt, dass die Wärmeenergie im Gasstrom, der den Stack verlässt, möglichst weitgehend an die Frischgase, die Richtung Stack strömen, übertragen wird. Eine hohe Effizienz ist entscheidend, um die thermische Energie optimal zu nutzen und die Gesamtenergieeffizienz des Systems zu maximieren. Zusätzlich sollte der Wärmetauscher auch im Teillastbetrieb und bei Überlast keine großen Effizienzeinbußen aufzeigen. Da der Brennstoffzellenstack einem Alterungsprozess unterliegt, sind Anpassungen der Gasversorgung über die Lebensdauer des Systems von „Beginning of Life“ (BOL) zu „End of Life“ (EOL) erforderlich. Dies betrifft sowohl Durchflussraten, als auch Betriebstemperaturen und Gaszusammensetzungen. Die Wärmeübertrager sind so zu dimensionieren, dass sie über die gesamte Lebensdauer des Systems in verschiedenen Betriebszuständen den hohen Effizienzanforderungen des Stacks gerecht werden.

#### *3.2.1.2 Druckverlust von Reformer und Wärmetauscher*

Ein weiteres wichtiges Bewertungskriterium für einen Wärmetauscher und Reformer im SOC Bereich ist der Druckverlust, der bei der Durchströmung der Komponenten auftritt. Ein hoher Druckabfall kann die Effizienz des Systems erheblich beeinträchtigen, da dies eine höhere Gebläseleistung erfordert, um den Druckverlust zu überwinden. Dies führt zu einem Anstieg des systemeigenen Energieverbrauchs und verringert damit die Gesamteffizienz des Systems. Daher ist es von großer Bedeutung, den Druckverlust im Wärmetauscher so gering wie möglich zu halten. Durch die Optimierung der Strömungswege und die Auswahl geeigneter

Plattengeometrien kann der Strömungswiderstand reduziert werden, was zu einem geringeren Druckabfall führt. Die für die Effizienz beschriebene Anforderung an die Erfüllung der Druckverlustvorgaben für mehrere Betriebspunkte gilt beim Druckabfall in gleicher Weise.

### 3.2.1.3 *Begleitende Faktoren*

Neben der Effizienz und dem Druckverlust sind auch weitere begleitende Faktoren bei der Bewertung der Wärmetauscher von Bedeutung. Eine hohe Leistungsdichte ist wünschenswert, da sie es ermöglicht, mehr Wärme in einem kompakteren Design zu übertragen. Dies trägt dazu bei, den Materialeinsatz zu minimieren, was wiederum die Bauteilkosten und den erforderlichen Bauraum reduziert. Ein geringer Materialeinsatz ist nicht nur kostensparend, sondern auch vorteilhaft für die Gesamtgewichtsreduktion des Systems. Dies wird relevant in Anwendungen, in denen auch das Gewicht eine Rolle spielt, wie beispielsweise in mobilen Energieerzeugungssystemen - zumeist im maritimen Umfeld. Ebenfalls ermöglicht eine geringere thermische Masse der BoP Komponenten verkürzte Aufheiz- bzw. Abkühlzeiten beim Starten und Herunterfahren des Systems.

Die Haltbarkeit von Wärmetauschern und Reformern in Festoxid-Brennstoffzellen (SOFC) und Festoxid-Elektrolyseuren (SOEC) ist von entscheidender Bedeutung für die Gesamtleistung und Wirtschaftlichkeit dieser Systeme. In der Regel wird eine Lebensdauer von 20.000 bis 60.000 Stunden gefordert, um den Anforderungen an Zuverlässigkeit und Effizienz gerecht zu werden.

Die geforderte Lebensdauer von 20.000 bis 60.000 Stunden stellt eine große Herausforderung dar, da die Komponenten extremen thermischen und chemischen Bedingungen ausgesetzt sind. Hohe Temperaturen, Druckschwankungen und die Wechselwirkungen mit verschiedenen Gasen können zu Materialermüdung, Korrosion und Ablagerungen führen. Bei Katalysatoren kann über die Betriebsdauer die Aktivität nachlassen. Daher ist es wichtig, dass die verwendeten Materialien und die Konstruktion der Wärmetauscher sorgfältig ausgewählt werden, um diesen Belastungen standzuhalten.

Neben dem Design ist auch ein zuverlässiges Fertigungsverfahren eines der Schlüsselkriterien bei der Herstellung haltbarer Komponenten in SOFC- und SOEC-Systemen. Die Qualität der Fertigung beeinflusst direkt die Leistungsfähigkeit und Lebensdauer der Wärmetauscher, da selbst kleinste Mängel in der Verarbeitung zu Schwachstellen führen können, die im Betrieb zu vorzeitigen Ausfällen führen.

Eine große Herausforderung in diesem Bereich ist zusätzlich, dass aktuell die zugrundeliegenden Alterungsprozesse und Wechselwirkungen der Komponenten und Medien noch nicht umfassend bekannt sind. Diese Unsicherheiten erschweren eine präzise Vorhersage der Haltbarkeit. Faktoren wie thermische Zyklen, chemische Reaktionen mit den durchströmenden Gasen und mechanische Belastungen sind komplex und variieren je nach Betriebsbedingungen. Ohne ein umfassendes Verständnis dieser Prozesse ist es schwierig, die Lebensdauer der Komponenten zuverlässig zu prognostizieren.

Daher ist eine umfassende Erprobung und Testung der Systeme unerlässlich. Durch Thermozyklustests und Thermoschocks kann die Haltbarkeit der Wärmetauscher zwar optimiert werden, aber Langzeitstudien und Belastungstests unter realen Bedingungen

sind unumgänglich, um die Auswirkungen von Temperatur, Druck und chemischen Einflüssen auf die Materialien zu untersuchen. Diese Erkenntnisse sind entscheidend, um die Designs der Komponenten weiterzuentwickeln.

### *3.2.2 Besondere Anforderungen an SOFC-Reformer*

Reformer spielen eine entscheidende Rolle in SOFC-Systemen, wenn anstelle von reinem Wasserstoff z.B. Biogas oder Erdgas als Brennstoff verwendet werden soll. Diese Möglichkeit zur Nutzung alternativer Brenngase ist besonders relevant in Situationen, in denen die Wasserstoffversorgung noch nicht etabliert ist. Der Reformer hat die Aufgabe, die Gasbestandteile so aufzuspalten, dass sie im SOFC-Stack genutzt werden können, zudem müssen sämtliche langkettigen Kohlenwasserstoffe katalytisch umgewandelt werden, da es ansonsten zu Ablagerungen von Kohlenstoff im Stack kommt. Solche Ablagerungen können im Extremfall zu einem Ausfall des Stacks führen, was die Zuverlässigkeit und Effizienz des gesamten Systems gefährdet. Die Umwandlung der Kohlenwasserstoffe erfolgt durch verschiedene chemische Reaktionen, die im Reformer stattfinden. Diese Reaktionen sind darauf ausgelegt, die Brennstoffe in Wasserstoff und Kohlenmonoxid zu zerlegen, die dann im SOFC-Stack effizient genutzt werden können.

Reformer können in verschiedenen Konfigurationen und Designs realisiert werden. Zu den gängigen Typen gehören Schüttgutkatalysatoren, monolithische Katalysatoren sowie katalytisch beschichtete Wärmetauscher

Schüttgutkatalysatoren nutzen lose Katalysatormaterialien, die in einem Reaktionsbehälter platziert sind. Die Gase strömen durch das Schüttgut, wo die katalytischen Reaktionen stattfinden.

Monolithische Katalysatoren verwenden feste Katalysatorstrukturen, die eine große Oberfläche bieten und eine effiziente Umwandlung der Brennstoffe ermöglichen. Sie sind oft kompakter und können in verschiedenen Formen gestaltet werden, allerdings ist hier die Kontrolle des Temperaturfeldes über den Monolithen komplex.

Katalytisch beschichtete Wärmetauscher kombinieren die Funktionen eines Wärmetauschers und eines Reformers, indem sie die Wärmeübertragung und die katalytische Umwandlung in einem einzigen Bauteil integrieren.

Bei der Auslegung eines Reformers sind neben den bereits bekannten Bewertungsmaßstäben wie Leistungsdichte, Bauraum und Materialeinsatz auch die Auswahl und der Preis des Katalysatormaterials entscheidende Faktoren. Die Wahl des Katalysators beeinflusst nicht nur die Effizienz der Reformierung, sondern auch die Kosten des gesamten Systems. Hochwertige Katalysatoren können zwar teurer sein, bieten jedoch oft eine bessere Leistung und eine längere Lebensdauer, was sich langfristig positiv auf die Wirtschaftlichkeit des Systems auswirken kann. Die Wahl des passenden Reformertyps wird auch durch die Art des Betriebs (z.B. Testbetrieb in Pilotanlagen, mit häufigen Betriebspunktwechseln etc.) bestimmt.

Zusätzlich müssen die thermischen Eigenschaften des Reformers berücksichtigt werden, um sicherzustellen, dass die erforderlichen Temperaturen für die katalytischen Reaktionen erreicht werden.

## 4 Modulares Wärmetauscherdesign

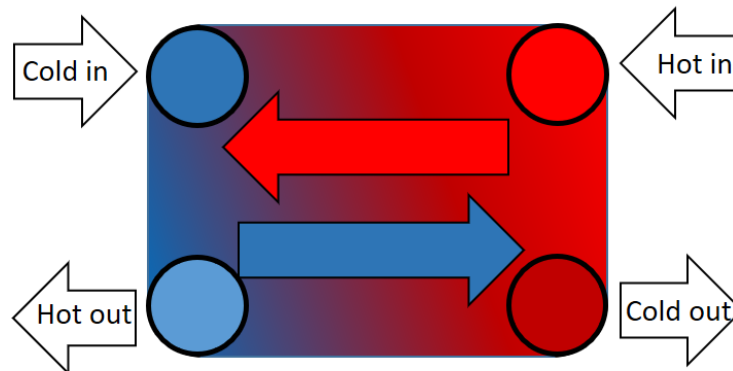
Um die in den vorangegangenen Abschnitten definierten Anforderungen an Wärmetauscher zu erfüllen, ist es notwendig, eine grundlegende Systemauswahl zu treffen. Dabei spielt das thermodynamische Verhalten des Systems eine entscheidende Rolle. Insbesondere ist das Gegenstromprinzip beim Wärmetauscher unerlässlich, um die hohen Effizienzanforderungen, die im Bereich der Festoxidbrennstoffzellen (SOFC) und Festoxid-Elektrolysezellen (SOEC) bestehen, zu erfüllen. Dieses Prinzip ermöglicht eine optimale Wärmeübertragung, da die heißen und kalten Medien in entgegengesetzte Richtungen strömen. Dadurch stellt sich über die gesamte Länge des Wärmetauschers ein gut nutzbares treibendes Temperaturgefälle ein, was zu einer höheren Effizienz führt.

Zusätzlich ergeben sich weitere Anforderungen aus den typischen Betriebspunkten der Wärmetauscher, die einen sehr hohen Temperaturgradienten im Bauteil zur Folge haben. Diese hohen Temperaturgradienten können thermische Spannungen im System verursachen, die potenziell zu Materialversagen oder einer Verringerung der Lebensdauer der Komponenten führen können. Daher ist es von großer Bedeutung, diese Spannungen zu identifizieren und zu optimieren. Hier finden geeignete Simulationstechniken Verwendung, die es ermöglichen, das thermische Verhalten des Wärmetauschers unter verschiedenen Betriebsbedingungen zu analysieren. Durch diese Simulationen können potenzielle Schwachstellen frühzeitig erkannt und entsprechende Maßnahmen zur Optimierung der Konstruktion und Materialauswahl getroffen werden.

Die sorgfältige Auswahl und Auslegung der Wärmetauscher ist entscheidend, um die hohen Effizienz- und Leistungsanforderungen zu erfüllen. Durch die Anwendung des Gegenstromprinzips, die Wahl des Plattenwärmetauschers und die Berücksichtigung der thermischen Spannungen kann ein effektives und zuverlässiges System entwickelt werden, das den Herausforderungen dieser innovativen Technologien gerecht wird.

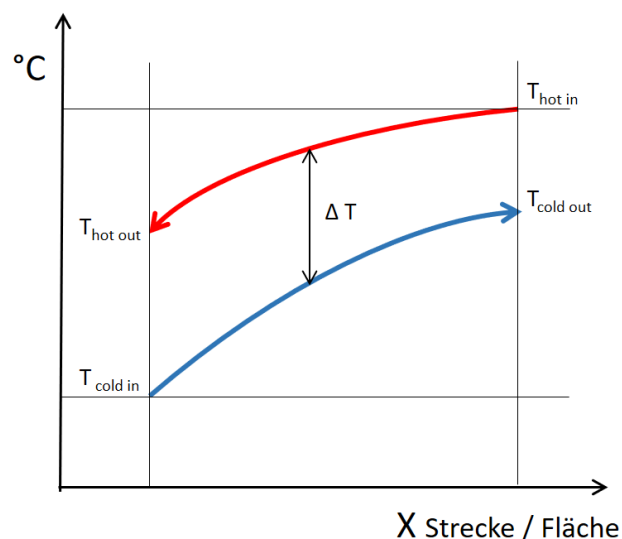
### 4.1 Plattenwärmetauscher in SOC-Systemen

Die Forderung nach einer hohen Leistungsdichte für Wärmetauscher in SOC-Systemen macht den Einsatz eines Plattenwärmetauschers erforderlich. Plattenwärmetauscher zeichnen sich durch ihre kompakte Bauweise bei gleichzeitig großer wärmeübertragender Fläche aus. Wie der Name schon sagt, besteht ein Plattenwärmetauscher aus Platten, die übereinander geschichtet in einem Stapel angeordnet sind. Die Platten sind am Rand zueinander durch spezielle Abstandshalter distanziert. Das Plattenpaket wird in vielen Anwendungen durch Bolzen oder andere Befestigungselemente zusammengehalten. Zumeist werden durch die Bolzen Dichtungselemente zwischen den Platten komprimiert und sorgen so für die Dichtigkeit des Wärmetauschers. Der Abstand zwischen den Platten ist entscheidend, da er den Durchfluss der Medien und die Wärmeübertragung beeinflusst. Je nach Anforderung kann das Plattenpaket in der Anzahl der Platten und der Dicke variiert werden, um die gewünschten thermodynamischen Eigenschaften zu erreichen. Jede der beiden Medien, beispielsweise heißer und kalter Gasstrom, hat separate Einlass- und Auslassanschlüsse. Diese Anschlüsse sind so angeordnet, dass die Medien in entgegengesetzte Richtungen durch den Wärmetauscher strömen können, was zu einem Gegenstromprinzip führt.



*Abbildung 4.1 Betrieb Plattenwärmetauscher im Gegenstromprinzip*

Dieses Prinzip gewährleistet, dass über die gesamte Strömungslänge ein nutzbares treibendes Temperaturgefälle zwischen den Medien besteht, dies verbessert die Effizienz der Wärmeübertragung erheblich.



*Abbildung 4.2 Temperaturgradient im Gegenstromprinzip*

Um den Materialeinsatz gering zu halten und den thermischen Widerstand durch die Platte selbst zu minimieren, ist die Plattenmaterialstärke so dünn wie möglich zu wählen. Um den Wärmeübergang zwischen Plattenmaterial und den Flussmedien zu verbessern, haben die Platten eine konturierte, meist gewellte Oberfläche. Das Muster in den Platten führt dazu, dass in den Flussmedien eine Verwirbelung stattfindet, die den Wärmeübergang positiv beeinflusst. Plattenwärmetauscher, die in SOC-Systemen eingesetzt werden, weisen darüber hinaus einige besondere Merkmale auf, die auf die spezifischen Anforderungen dieser Anwendungen zurückzuführen sind.

Aufgrund der hohen Temperaturen von 600°C-1.000°C, die in SOC-Systemen herrschen, werden diese Wärmetauscher nur aus hochtemperaturbeständigem Stahl oder im Extremfall auch aus Nickelbasislegierungen hergestellt. Diese Materialien sind nicht nur temperaturbeständig, sondern auch chemisch stabil, was sie für den Einsatz in der korrosiven Atmosphäre in SOC-Systemen zusätzlich qualifiziert.



Entgegen der üblichen Bauweise können bei Wärmetauschern in SOC-Systemen keine Dichtungen zwischen den Platten verwendet werden, da Dichtungen bei den extremen Temperaturen versagen oder sich zersetzen können, was zum Ausfall des Wärmetauschers führen würde. Auch darf kein Lot zum Fügen der Platten verwendet werden, da die typischen Lotbestandteile, wie z.B. Kupfer, zu einer Vergiftung des Stacks führen, was die Leistung und Lebensdauer des Systems gefährden würde.

Daher kommen in SOC-Systemen ausschließlich vollverschweißte Wärmetauscher zum Einsatz oder solche, die mit speziellem Edelhlot gefügt wurden.

Bei den von smk entwickelten Wärmetauscherdesigns wird für die wärmeübertragenden Platten Material mit einer Materialstärke von unter 0,5mm verwendet. Diese Materialstärken können nur mit exakten schlanken Schweißnähten sicher gefügt werden. Daher hat sich smk für das Laserschweißen als Fügeverfahren entschieden. Die moderne Laserschweißtechnik mit online Schweißnahtüberwachung ermöglicht es, dünnwandige Komponenten exakt und mit minimalem Wärmeeintrag sicher miteinander zu verbinden. Dies hat den Vorteil, dass der Verzug der Komponenten minimiert wird, was besonders wichtig ist, um die geometrische Integrität der Wärmetauscher zu gewährleisten. Zudem reduziert der geringe Wärmeeintrag den Legierungsabbrand in den zu fügenden Komponenten und beeinflusst somit die Materialeigenschaften kaum.

## 4.2 Entwicklung des modularen Wärmetauscherkonzept

Über die Projektlaufzeit wurde aus zahlreichen Kundenanforderungen ein Katalog an Betriebspunkten aufgebaut. Diese systematische Analyse der Kundenanforderungen ermöglicht es, ein immer genaueres Bild über die Einsatzbereiche und vorteilhaften Betriebscharakteristiken der Wärmetauscher zu erhalten.

Ausgehend von dem Feld an Betriebspunkten wurde ein modulares Wärmetauscherkonzept entwickelt, das durch eine Standardisierung der Untergruppen und der Prozessschritte in der Lage ist, eine schnelle, effiziente Auslegung, Kalkulation und Fertigung von Wärmetauschern zu realisieren. Über die Auswahl der passend dimensionierten Wärmetauscherplatte und der Definition der Plattenanzahl, können auf die Kundenanforderung zugeschnittene Wärmetauscher ausgelegt werden. Die untenstehende Abbildung veranschaulicht dies:

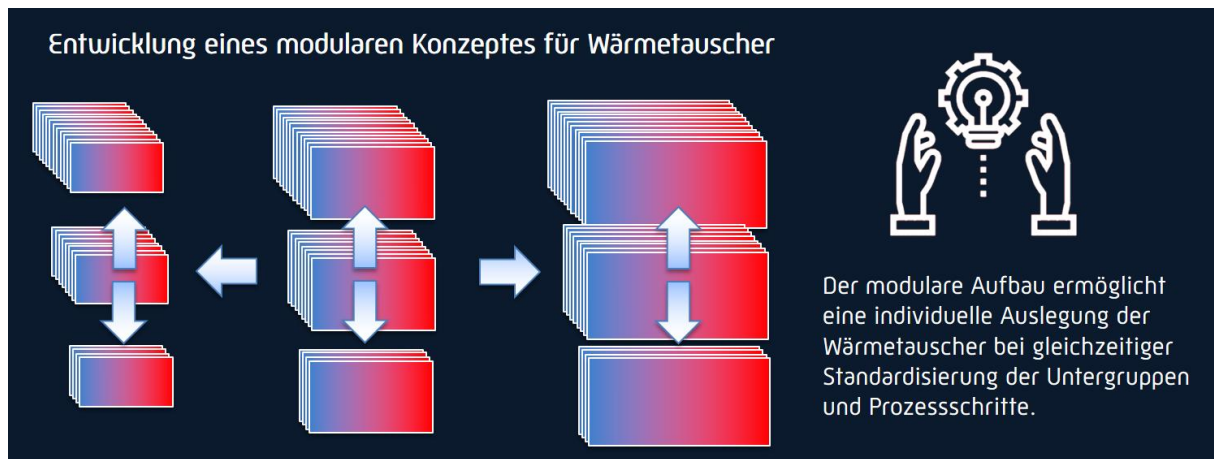


Abbildung 4.3 Modularer Ansatz im HEX Design – Folie aus Projekttreffen

Dies führt nicht nur zu einer verkürzten Entwicklungszeit, sondern auch zu einer höheren Kundenzufriedenheit, da schnell auf unterschiedliche Bedürfnisse und Anforderungen reagiert werden kann.

Da das zugrundeliegende Fertigungskonzept trotz der Fähigkeit zur Automatisierung sehr flexibel gestaltet ist, kann für jedes Projekt eine Vielzahl an Parametern verändert werden:

- Größe der Platte
- Anzahl der Platten
- Geometrie der Diffusoren
- Positionierung und Durchmesser der Anschlüsse innerhalb der Diffusoren
- ...

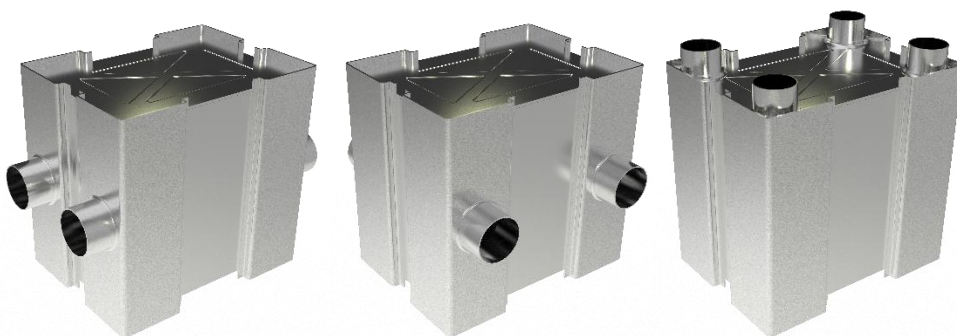


Abbildung 4.4 Variation der Anschlusspositionen im smk HEX-Design

Das gibt smk die Möglichkeit, dem Systemhersteller eine maßgeschneiderte Wärmetauscherlösung mit den positiven Effekten einer Standardisierung zu bieten.

Durch Variation der Plattenanzahl im Wärmetauscher ist die gezielte Steuerung des Druckabfalls möglich. Durch diese Variation der Plattenanzahl kann das Strömungs- und Wärmeübertragungsverhalten stark beeinflusst werden, so dass es zu Überlappungen in den Einsatzbereichen der Wärmetauscher mit unterschiedlichen Plattengrößen kommt. Das führt dazu, dass für bestimmte Betriebsbereiche Wärmetauscher mit unterschiedlichen Plattengrößen verwendet werden können. Diese Flexibilität ermöglicht eine Reaktion auf besondere Bauraumanforderungen des

Kunden und reduziert gleichzeitig die Anzahl der erforderlichen Plattengrößen. Dies ist besonders vorteilhaft, da die Werkzeugkosten für die Platten einen Kostenfaktor darstellen.

Diese Herangehensweise, die direkt auf der Analyse der Marktanforderungen und der Antizipation der Marktentwicklung basiert, ermöglicht es, innovative Wärmetauscherlösungen zu entwickeln und bei Kundenanfragen in den meisten Fällen sehr schnell eine passende Wärmetauscherkonfiguration präsentieren zu können.

### 4.3 Simulation der Betriebspunkte

Im Rahmen der Betriebspunktanalyse wird zunächst mithilfe einer OD Berechnung eine Vorauswahl geeigneter Plattengeometrien für den Wärmetauscher getroffen. Dieses Tool ermöglicht es, sehr schnell verschiedene Plattengrößen zu untersuchen und die vielversprechendsten Optionen zu identifizieren.

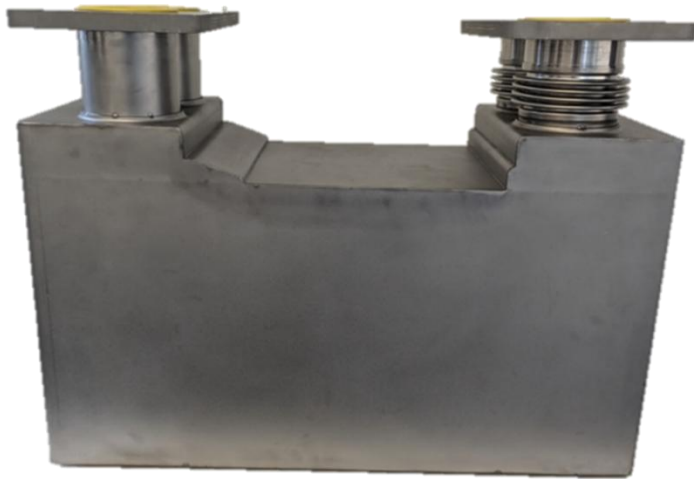
Im Anschluss an diese Vorauswahl erfolgt eine detaillierte 3D-CFD-Simulation der unterschiedlichen Betriebspunkte mit der Simulationssoftware. In dieser Phase wird die notwendige Anzahl an Platten im jeweiligen Wärmetauscher für das System bestimmt. Diese Simulation wird für unterschiedliche, stationäre Betriebspunkte durchgeführt und berücksichtigt dabei typischerweise auch die Veränderungen in der Effizienz im Stack, indem sowohl BOL- als auch EOL-Szenarien untersucht werden. Zudem werden meistens Teillast-, Nennlast- und Überlastbetriebspunkte simuliert. Dadurch ist es möglich, die Leistung des Wärmetauschers in den unterschiedlichen Einsatzbedingungen zu bewerten.

Als Ergebnis liefert diese Simulation eine erste Vorhersage über die zu erwartende Effizienz sowie den Druckverlust im Plattenstapel unter den verschiedenen Betriebsbedingungen. Diese Kennzahlen sind entscheidend, um die Leistungsfähigkeit des Wärmetauschers zu bewerten und gegebenenfalls die geplante Platten anzupassen oder im Extremfall auch eine andere Plattengeometrie zu wählen.

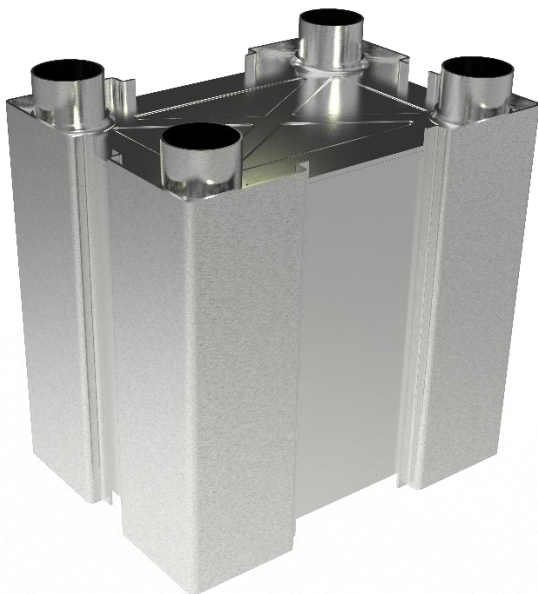
Anschließend wird der Einfluss der systemspezifischen Manifolds auf Strömungsverteilung und Druckverlust untersucht, um eine noch präzisere Aussage über das Verhalten des Wärmeübertragers im Kundensystem zu erhalten.

### 4.4 Entwickelte modulare Designvarianten

Innerhalb der Projektlaufzeit wurden zwei modulare Designvarianten von Wärmetauschern entwickelt, die auch zum Patent angemeldet wurden.



*Abbildung 4.5 Wärmetauscher auf Basis des ersten modularen Designkonzepts*



*Abbildung 4.6 Wärmetauscher auf Basis des zweiten modularen Designkonzepts*

Die beiden Wärmetauscherkonzepte, die im Rahmen des Projektes entwickelt wurden, weisen im Vergleich zum Stand vor Projektbeginn erhebliche Vorteile auf: Effizienz, Leistungsdichte und Druckbeständigkeit konnten deutlich gesteigert werden, bei gleichzeitig reduziertem Materialeinsatz. Durch den modularen Ansatz und das Simulationstool kann nun projektunabhängig rasch eine passende Wärmetauscherlösung für ein breites Feld an Betriebspunkten ausgewählt werden.

Das letzte Wärmetauscherdesign, das in 2024 zum Patent angemeldet wurde, vereinfacht den Fertigungsablauf weiter. Zudem ist es mit dieser Designvariante möglich, noch größere Wärmetauscher auf dem aktuell zur Verfügung stehenden Maschinenpark zu fertigen.

## 4.5 Leistungsmessung und Simulationsabgleich

Es ist von entscheidender Bedeutung, die Simulationsergebnisse von Wärmetauschern mit realen Messungen abzugleichen und zu bestätigen, um die Validität der entwickelten Modelle zu gewährleisten. Im Rahmen des Projekts wurde der smk hausinterne Prüfstand für die Leistungsmessung an Wärmetauschern entsprechend ertüchtigt. Da die Leistung des elektrischen Heizers am internen Prüfstand auf 16kW begrenzt war, wurden für die größeren Wärmetauscher zusätzliche Leistungsmessungen bei externen Partnern durchgeführt.

Die Messungen sowohl auf dem hausinternen Prüfstand und beim externen Dienstleistern wurden mit Luft bzw. mit Abgas aus Erdgasbrenner durchgeführt. Ein besonderes Augenmerk lag dabei auf der korrekten Temperatur- und Druckmessung, da nur durch präzise Messungen auch verlässliche Effizienzen für den Wärmetauscher ermittelt werden können. Um die Wärmeverluste während der Tests möglichst gering zu halten, ist eine effiziente Isolation des Prüflings erforderlich, die Messstellen in den Rohren in den Diffusoren sollten möglichst nah am Wärmetauscher platziert werden.

Die durchgeführten Messungen zeigen, nach einer steilen Lernkurve in der Applikation der Messtechnik, eine gute Übereinstimmung zwischen den Simulationsergebnissen und den realen Messungen. Diese Übereinstimmung ist ein Indikator für die Validität der Simulationen und bestätigt die Richtigkeit der angenommenen Modelle. Die kontinuierliche Verbesserung der Messtechnik und die sorgfältige Durchführung der Tests haben dazu beigetragen, dass die Ergebnisse sowohl für die Entwicklung als auch für die Optimierung der Wärmetauscher von großer Bedeutung sind.



*Abbildung 4.7 Verkabelter Wärmetauscher vor Leistungsmessung*

Auch im Betrieb in realen SOC-Systemen bestätigen sich die Simulationsergebnisse der Wärmetauscher, was die Validität der entwickelten Modelle weiter untermauert. Die Integration der Wärmetauscher in diese Systeme ermöglicht es, die Leistung und Effizienz unter realen Betriebsbedingungen zu evaluieren.

## 4.6 Haltbarkeit und Validierung von Wärmetauschern

Um den hochgesteckten Anforderungen der Systemhersteller an die Haltbarkeit der Wärmetauscher gerecht zu werden (von 20.000h bis 60.000h), ist neben einer geeigneten Konstruktion und stabilen Fertigungsprozessen auch eine umfassende simulative Überprüfung sowie eine Bauteilvalidierung erforderlich.

Die Konstruktion der Wärmetauscher muss so gestaltet sein, dass sie den spezifischen thermischen und mechanischen Belastungen standhält, die im Betrieb auftreten können. Hierbei spielen Materialauswahl und geometrische Gestaltung eine entscheidende Rolle, um eine lange Lebensdauer und Zuverlässigkeit zu gewährleisten. Zusätzlich zu einer soliden Konstruktion ist es unerlässlich, stabile Fertigungsprozesse zu etablieren, die eine gleichbleibend hohe Qualität der verwendeten Einzelteile und der Fügeprozesse sicherstellen.

Die simulative Überprüfung der Wärmetauscher ermöglicht es, potenzielle Schwachstellen bereits in der Entwicklungsphase zu identifizieren. Durch den Einsatz von numerischen Simulationen können verschiedene Betriebsbedingungen und Szenarien durchgespielt werden, um das Verhalten der Wärmetauscher unter extremen Bedingungen zu analysieren. Diese simulationsgestützte Herangehensweise trägt dazu bei, die Konstruktion weiter zu optimieren und die Haltbarkeit zu erhöhen. Die Wärmetauschermodelle wurden mittels thermomechanischer Simulation auf kritische Spannungszustände bei hohen Temperaturen und in Aufheizphasen untersucht, um das Verhalten der Materialien unter dieser besonderen Beanspruchung zu analysieren. Die extremen Temperaturen, die in SOFC- und SOEC-Systemen auftreten, erfordern spezifische Materialeigenschaften, die oft nicht ausreichend dokumentiert oder in der Literatur verfügbar sind. Dies kann dazu führen, dass die Simulationsergebnisse nicht die tatsächlichen Gegebenheiten widerspiegeln, was die Validität der Modelle beeinträchtigt.

Um diese Limitationen zu überwinden, ist es wichtig, gezielte Forschungs- und Entwicklungsarbeiten durchzuführen, um die Materialkennwerte für den breiten Einsatzbereich zu ermitteln. Dies kann durch experimentelle Tests an den verwendeten Materialien bei den relevanten Temperaturen und Belastungen geschehen. Darüber hinaus kann die Zusammenarbeit mit Materialwissenschaftlern und -experten helfen, neue Werkstoffe zu identifizieren oder bestehende Materialien zu optimieren, um deren Leistungsfähigkeit zu verbessern. Eine umfassende Datenbank mit validierten Materialkennwerten ist daher entscheidend für die Weiterentwicklung der Simulationstechnik und für die Optimierung der Wärmetauschermodelle. Dies sind Themen, die auch nach Projektabschluss weiter verfolgt werden.

Schließlich ist die Bauteilvalidierung ein entscheidender Schritt, um sicherzustellen, dass die entwickelten Wärmetauscher die notwendige Robustheit aufweisen. Dies kann nur durch umfassende Tests unter realitätsnahen Bedingungen, bei denen die Leistung, Effizienz und Haltbarkeit der Wärmetauscher überprüft werden, erfolgen. Nur durch diese Kombination aus Konstruktion, Fertigung, Simulation und Validierung kann sichergestellt werden, dass die Wärmetauscher den hohen Anforderungen der Systemhersteller gerecht werden und eine zuverlässige Leistung über die gesamte Lebensdauer bieten.

Die bisher durchgeführten thermomechanischen Tests zeigen vielversprechende Ergebnisse, die darauf hindeuten, dass die entwickelten Wärmetauscher unter den getesteten Bedingungen gut funktionieren. Diese Tests werden auch nach Projektabschluss fortgeführt, um kontinuierlich Daten zu sammeln und die Leistung der Wärmetauscher weiter zu optimieren. Passende Testszenarien sind unter anderem thermozyklische Dauerläufe, Thermoschocktests und Untersuchungen zum Berstdruckverhalten.

Es ist jedoch wichtig zu betonen, dass nur eine Validierung unter realen Bedingungen, in Zusammenarbeit mit dem Systemhersteller, letztlich ein umfassendes und realistisches Bild des Bauteilverhaltens unter den spezifischen Betriebsbedingungen liefern kann. Die Bedingungen in einem tatsächlichen SOFC- oder SOEC-System können sehr komplex sein und beinhalten nicht nur thermische, sondern auch mechanische und chemische Einflüsse, die in den Labortests möglicherweise nicht vollständig abgebildet werden können. Die enge Zusammenarbeit mit dem Systemhersteller ist entscheidend, um die Tests unter realistischen Betriebsbedingungen durchzuführen. Dies ermöglicht es, die Leistung der Wärmetauscher in einem vollständigen Systemkontext zu bewerten und potenzielle Schwachstellen oder Optimierungsmöglichkeiten zu identifizieren.

Durch diese umfassende Validierung kann sichergestellt werden, dass die Wärmetauscher nicht nur in der Theorie, sondern auch in der Praxis zuverlässig und effizient arbeiten. Die gewonnenen Erkenntnisse aus diesen realen Tests werden wertvolle Informationen für zukünftige Entwicklungen und Verbesserungen der Wärmetauscher liefern und tragen dazu bei, die Anforderungen der Systemhersteller an Haltbarkeit und Leistung zu erfüllen.

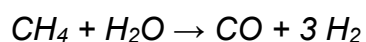
## 5 Reformier in SOFC-Systemen

Wenn SOFC-Systeme mit Erdgas oder Biogas betrieben werden sollen, ist ein Reformier im System erforderlich. Die Hauptaufgabe des Reformiers besteht darin, die Gaskomponenten katalytisch so umzuwandeln, dass sie im Brennstoffzellenstack genutzt werden können und zusätzlich längere Kohlenwasserstoffe vollständig aus dem Gasstrom zu entfernen. Dies ist wichtig, um die Gefahr einer Kohlenstoffdeposition im Stack zu vermeiden. Die Ablagerung von Kohlenstoff in Form von Ruß oder festen Kohlenstoffablagerungen können verschiedene Probleme im Stack verursachen. Kohlenstoffablagerungen können die aktiven Stellen des Katalysators blockieren, was die Reaktionsrate verringert und die Effizienz des Systems beeinträchtigt. Die Ablagerungen können aber auch zu mechanischen Spannungen und Rissen im Stack führen, was die Lebensdauer der Brennstoffzelle verkürzt. Im Wesentlichen findet dazu die Aufspaltung von Kohlenwasserstoffen in Wasserstoff ( $H_2$ ) und Kohlenmonoxid (CO) statt.

### 5.1 Chemische Prozesse bei der Reformierung in SOFC-Systemen

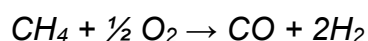
Die Reformierung von Erdgas erfolgt typischerweise durch zwei Hauptprozesse, die Dampfreformierung und die partielle Oxidation.

Die Dampfreformierung erfolgt in Gegenwart von Wasserdampf und führt zur Umwandlung von Methan ( $CH_4$ ) in Wasserstoff und Kohlenmonoxid:



Die Dampfreformierung verläuft endotherm, was bedeutet, dass sie Wärme benötigt, um abzulaufen.

Bei der partiellen Oxidation wird Methan mit einer begrenzten Menge Sauerstoff ( $O_2$ ) umgesetzt, was ebenfalls Wasserstoff und Kohlenmonoxid produziert:



Die partielle Oxidation ist exotherm und liefert Wärme, die zur Aufrechterhaltung der Temperatur im Reformier beitragen kann.

Es ist entscheidend, dass der Katalysator im Reformier im richtigen Temperaturfeld gehalten wird, da die Reaktionskinetik stark temperaturabhängig ist. Zu niedrige Temperaturen können die Reaktionsgeschwindigkeit verringern und die Effizienz der Reformierung beeinträchtigen oder sogar komplett verhindern. Zu hohe Temperaturen können hingegen zu unerwünschten Nebenreaktionen führen, wie z.B. der Kohlenstoffdeposition. Daher ist eine präzise Temperaturkontrolle notwendig, um optimale Bedingungen für die Reformierung zu gewährleisten.

### 5.2 Häufig verwendete Katalysatoren in SOFC-Systemen

Es gibt zwei Haupttypen von Katalysatoren, die in Reformieren von SOFC-Systemen verwendet werden: Nickelbasierte Katalysatoren werden am häufigsten für die Dampfreformierung von Erdgas verwendet. Nickel ist im Vergleich mit anderen



Katalysatoren kostengünstig und hat eine hohe Aktivität. Allerdings kann Nickel bei hohen Temperaturen zur Kohlenstoffdeposition neigen, insbesondere wenn die Reaktionsbedingungen nicht optimal sind.

PGM-basierte Katalysatoren auf Basis von Platin, Palladium oder Rhodium sind wesentlich teurer, bieten jedoch eine höhere Stabilität und Aktivität bei höheren Temperaturen. Sie sind weniger anfällig für Kohlenstoffdeposition und können auch bei variierenden Betriebsbedingungen besser arbeiten.

Bei der Verwendung von Schüttgutkatalysatoren werden Nickel oder PGM-Katalysatoren mittels chemischer oder physikalischer Verfahren auf keramische Trägermaterialien aufgebracht, um eine gleichmäßige Verteilung und eine hohe aktive Oberfläche zu gewährleisten. Als Trägermaterial kommt Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), Siliziumdioxid ( $\text{SiO}_2$ ) oder Zirkoniumdioxid ( $\text{ZrO}_2$ ) in Frage. Diese Trägermaterialien bieten eine große Oberfläche, was die Verteilung des Katalysators verbessert und die Reaktionskinetik optimiert.



*Abbildung 5.1 Schüttgutpellets auf  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Basis*

Zur Beschichtung von metallischen Katalysatoren kommen ganz unterschiedliche Verfahren zum Einsatz, die darauf abzielen, eine gleichmäßige Verteilung des Katalysators auf einem Trägermaterial zu erreichen und die katalytische Aktivität zu maximieren. Wichtig ist bei diesen Verfahren, dass sie sich gut in den Fertigungsprozess integrieren lassen und sich nicht negativ auf Folgeprozesse auswirken. Ein Problem mit vollflächig beschichteten Unterbaugruppen ist z.B., dass die Weiterverarbeitung im Schweißverfahren nicht mit allen Beschichtungen möglich ist. Zudem besteht die Gefahr, dass sich im Betrieb, aufgrund von thermomechanischen Spannungen lokal die Beschichtung löst und Beschichtungspartikel das System verunreinigen. Beim Betrieb von beschichteten Komponenten im System ist teilweise auffällig, dass Beschichtungen zwar initial eine gute Wirksamkeit zeigen, aber im Zeitverlauf eine reduzierte Reformierungsleistung aufweisen.

Diese Erkenntnisse führen dazu, dass für Projekte, in denen eine leistungsfähige und haltbare Reformierungsleistung erforderlich ist, der Einsatz von Schüttgutkatalysatoren die favorisierte Variante darstellt. Die Verwendung von beschichteten Wärmetauschern zur Integration von Reformierleistung in den

Wärmetauschern wird in Pilotanlagen durch geeignete Verschaltung gleichzeitig untersucht werden.

### *5.2.1 Small-Scale-Tests von Katalysatormaterial*

Bei der Auslegung von Reformern gibt es im Vergleich zu Wärmetauschern zusätzliche Freiheitsgrade, die berücksichtigt werden müssen. Im Reformer finden temperaturabhängige chemische Reaktionen statt, die die Temperaturverteilung im Reformer beeinflussen. Um diese Komplexität zu beherrschen und unnötige Entwicklungsschleifen zu vermeiden, wurden im Rahmen des Projekts Small-Scale-Tests mit den Katalysatormaterialien durchgeführt, die für die Verwendung in den Reformern vorgesehen waren.

Ein Small-Scale-Test eines Katalysatormaterials ist ein experimentelles Verfahren, das darauf abzielt, die katalytische Aktivität und die Reaktionskinetik unter kontrollierten Bedingungen zu untersuchen. Dabei wird das Katalysatormaterial in kleinen Mengen in einem Versuchsreaktor untersucht. Der Reaktor wird auf die gewünschten Betriebsbedingungen eingestellt, einschließlich Temperatur, Druck und Gaszusammensetzung. Diese Parameter werden sorgfältig ausgewählt, um realistische Betriebsbedingungen zu simulieren, die im späteren Einsatz des Katalysators auftreten. Bei der Untersuchung wird die Gasmischung, die im späteren Betrieb erwartet wird, zugeführt. Dabei werden auch verschiedene Parameter kontinuierlich überwacht und aufgezeichnet, darunter die Temperatur im Reaktor, der Druck und die Gaszusammensetzung am Ein- und Austritt. Diese Daten sind entscheidend, um die Leistung des Katalysators zu bewerten. Die Produkte der Reaktion werden analysiert, um die Umwandlungsrate und die Selektivität des Katalysators zu bestimmen. Die Messung von Methan, Kohlenstoffdioxid und Kohlenstoffmonoxid erfolgte mittels nichtdispersiver Infrarotspektroskopie (NDIR). Die Wasserstoffkonzentrationen wurden über einen Wärmeleitfähigkeitsdetektor (WLD) gemessen. Zur Messung der höheren Kohlenwasserstoffe (Ethan, Propan und Butan) wurde ein Gaschromatograph genutzt.

Nach Abschluss des Tests kann aus diesen Daten die Umwandlungsrate, die spezifische Aktivität und die Stabilität des Katalysators über die Testdauer bestimmt werden. Falls erforderlich können basierend auf den Ergebnissen des Small-Scale-Tests frühzeitig die nötigen Anpassungen am Katalysatormaterial oder der geplanten Reformergeometrie vorgenommen werden, um die Leistung zu verbessern. Aufgrund des Small-Scale-Tests ist das Verhalten des Katmaterials unter Laborbedingungen bekannt, bei der späteren Analyse des realen Reformers im SOFC-System können somit Messwerte oder Effekte besser analysiert und zugeordnet werden.

Das folgende Bild zeigt den Versuchsaufbau eines Small-Scale-Tests, der bei einem externen Partner durchgeführt wurde:

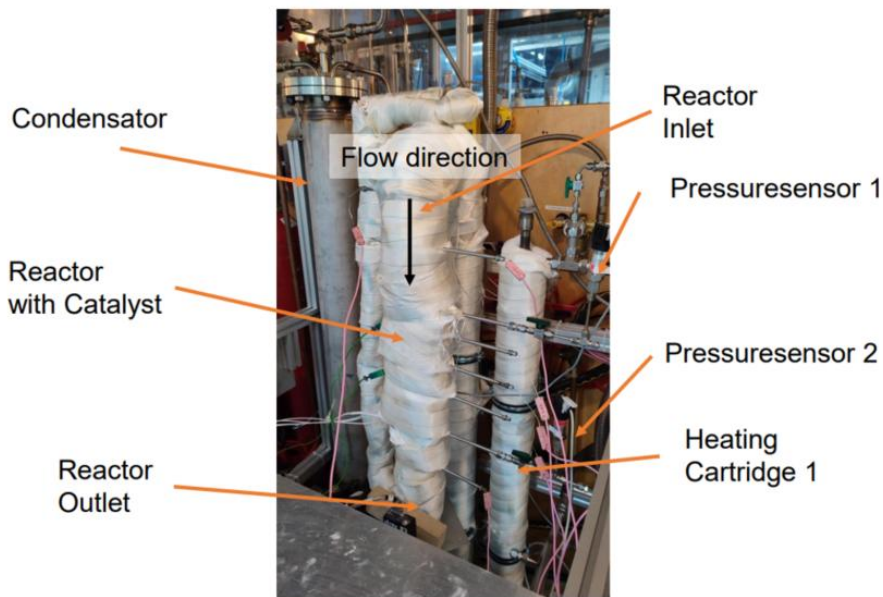


Abbildung 5.2 Versuchsaufbau zum Small-Scale-Test von Katmaterial

Die von smk durchgeführten Tests bestätigen die Erwartungen an das Katalysator Material vollumfänglich. Exemplarisch ist im Folgenden das Diagramm aus dem Laborbericht dargestellt, dass die Konversionsrate über der Temperatur darstellt.

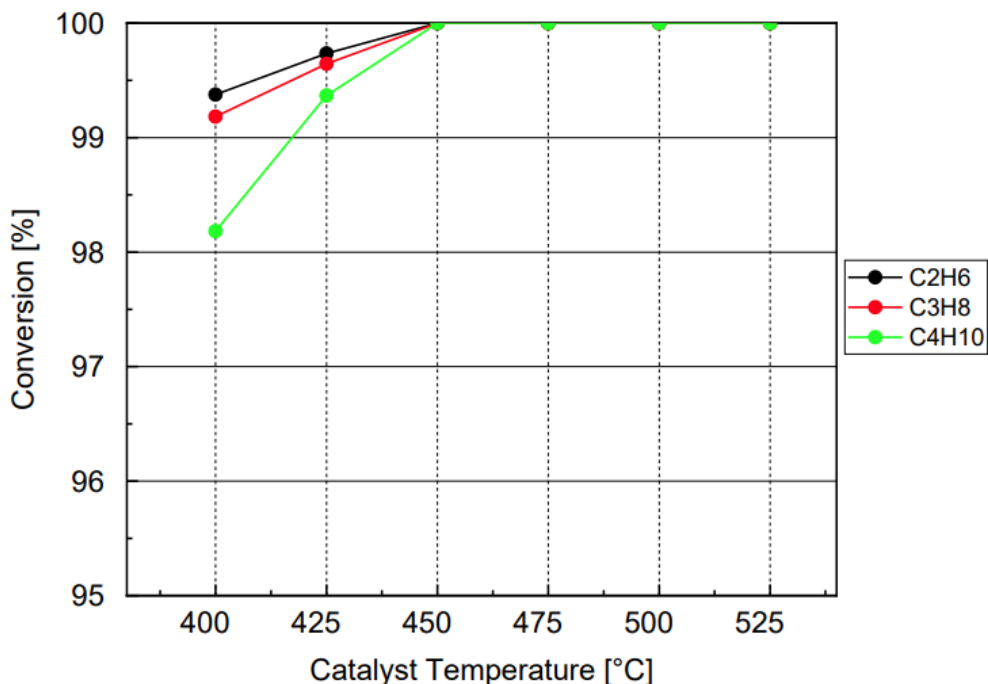


Abbildung 5.3 Konversionsrate  $C_xH_y$  im Reaktor über der Temperatur

Das Diagramm zeigt die Umwandlungsraten von Ethan ( $C_2H_6$ ), Propan ( $C_3H_8$ ) und Butan ( $C_4H_{10}$ ) im Versuchsreaktor über der Temperatur. Es konnte eine vollständige Umwandlung der längeren Kohlenwasserstoffe im relevanten Temperaturfeld nachgewiesen werden.

### 5.3 Entwicklung des modularen Reformerkonzepts

Durch eine katalytische Beschichtung eines Wärmetauschers kann die Funktion der Reformierung in einen Wärmetauscher integriert werden. Dies bietet zwar große Vorteile, jedoch können die am Markt verfügbaren Beschichtungen derzeit noch nicht alle Erwartungen der OEMs, insbesondere hinsichtlich der Haltbarkeit der katalytischen Wirksamkeit, erfüllen. Aus diesem Grund hat sich smk entschieden, ein modulares Reformier-Konzept zu entwickeln, bei dem die Reformierung mittels Schüttgutkatalysatoren stattfindet.

Dieses modulare Konzept ermöglicht eine schnelle und effiziente Auslegung und Gestaltung des Reformers und verwendet in Anlehnung an das Vorgehen beim modularen Wärmetauscher standardisierte Fertigungsverfahren und Fertigungsparameter. Schüttgutkatalysatoren bieten den Vorteil, dass sie einfacher zu handhaben und auszutauschen sind, was die Wartung und den Betrieb des Systems erleichtert.

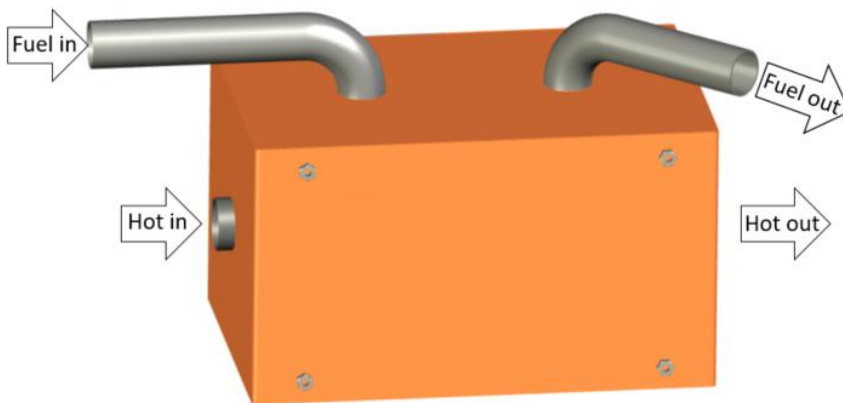


Abbildung 5.4 Modell eines smk Reformers mit Schüttgutkatalysator

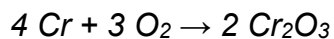
Reformer, die Schüttgutkatalysatoren verwenden, werden von heißem Gas und von dem zu reformierenden Brenngas durchströmt. Der Aufbau entspricht in etwa einem Plattenwärmetauscher. Die Wärmetauscherplatten sind die Trennelemente zwischen den beiden Gaspfaden. Der Bereich, in dem die Schüttung mit dem Katalysatormaterial vorliegt, nimmt ein deutlich größeres Volumen innerhalb des Reformers ein als der Bereich des heißen Gases.

Bei der Verwendung von Schüttgutkatalysatoren kommt es darauf an, ein möglichst gleichmäßiges Temperaturfeld in der Katalysatorschüttung zu erzeugen. Der Wärmeeintrag zur Temperierung des Katalysatormaterials erfolgt durch Wärmeübertrag vom heißen Gas. Da bei der Wasserdampfreformierung eine endotherme Reaktion im Bereich des Katalysatormaterials abläuft, muss diese Energie ebenfalls aus dem heißen Gas übertragen werden, um eine gleichmäßige, stationäre Temperaturverteilung innerhalb des Katalysatormaterials zu erhalten.

## 5.4 Beschichtung zur Reduzierung der Chromevaporation

Alle hochtemperaturbeständigen, korrosionsbeständigen Stähle weisen einen hohen Chromanteil in der Materialzusammensetzung auf. Chrom bildet an der Stahloberfläche eine schützende Passivschicht aus, die entscheidend zur Korrosions- und Temperaturbeständigkeit der Stähle beiträgt.

Bei den in der SOFC/SOEC auftretenden hohen Temperaturen bis zu 1.000°C können die im Stahl enthaltene Chromanteile oxidieren, wobei auch Chrom VI ( $\text{CrO}_3$ ) entstehen kann. Zwei der zugrundeliegenden Reaktionsprozesse werden im Folgenden beschrieben.



Bei der Verbindung  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  handelt es sich um Chrom III. Die Oxidation zu Chrom III findet bei Temperaturen über 400°C statt. Mit steigender Temperatur beschleunigt sich der Oxidationsprozess. Chrom III ist sehr temperaturstabil und geht erst bei sehr hohen Temperaturen um die 2.000°C in die Gasphase über. Aber Chrom III kann nach der folgenden Summenformel weiter oxidieren:



Die Verbindung  $\text{CrO}_3$  wird auch Chrom VI genannt. Die Oxidation zu Chrom VI findet bei Temperaturen um 800°C statt. Durch die Anwesenheit von katalytisch wirksamen Substanzen kann die Reaktion aber auch schon bei niedrigeren Temperaturen stattfinden und der Oxidationsumfang beschleunigt werden. Chrom VI hat seinen Schmelzpunkt bei ca. 200°C, sublimiert bei höheren Temperaturen und geht somit in die in der SOFC/SOEC in die Gasphase über. Wenn Gas mit Chrom VI Bestandteilen abkühlt kondensiert Chrom VI und schlägt sich an angrenzenden Oberflächen nieder.

Chrom VI ist in mehrfacher Hinsicht für den Stack schädlich. Unter anderem schädigen seine stark korrosiven Eigenschaften die Stackmaterialien, die elektrische Leitfähigkeit der Materialien, die mit Chrom VI in Kontakt kommen, werden beeinträchtigt, und die Bildung unerwünschter Phasen im Kontaktmaterial kann zu Problemen führen. Zudem ist Chrom VI stark krebserregend und führt bei seinem Auftreten zu einer unerwünschten Kontamination des SOFC-Systems.

Auch die Haltbarkeit der Wärmetauscher wird direkt durch die Chrom VI Bildung beeinträchtigt. Durch den Übergang des Chroms in die Gasphase kommt es zu einer lokalen Reduzierung der Chromkonzentration an der Oberfläche. Chrom aus tieferen Materialschichten diffundiert an die Oberfläche um eine Gleichverteilung wieder herzustellen. Wenn dieser Prozess über lange Zeit abläuft kann es zu einer Chromverarmung im Material und einer Schwächung der Passivschicht an der Oberfläche kommen, die für die Korrosion und Temperaturbeständigkeit verantwortlich ist. Damit besteht die Gefahr, dass die Stähle ihre Eigenschaften verlieren, den extremen Bedingungen der SOFC/SOEC zu widerstehen.

Daher ist es ein wichtiger Ansatz, durch geeignete Beschichtungen die Bildung von Chrom VI zu vermeiden. Es gibt unterschiedliche Konzepte wie dies erreicht werden kann. Die Schutzschicht soll die Oxidation des Chroms verhindern und damit das Material und das System schützen. smk hat Kontakt zu mehreren externen Partnern, die eine solche Oberflächenbehandlung vornehmen. Nach einer Vorauswahl

geeigneter Verfahren wurden mehrere unterschiedliche Beschichtungsverfahren an Wärmetauschern vorgenommen. Dabei war das Ziel, möglichst die gesamte Oberfläche des Wärmetauschers zu beschichten. Bei einigen Verfahren war das möglich, bei anderen Verfahren mussten bestimmte Bereiche maskiert werden, da sonst eine Weiterverarbeitung der beschichteten Komponenten nicht mehr möglich gewesen wäre. Die Beschichtungsverfahren waren alle erfolgreich und es konnten beschichtete Wärmetauscher aufgebaut werden. Die mögliche Integration der Beschichtungsverfahren in einen späteren Serienfertigungsprozess ist unterschiedlich zu bewerten. Neben der Wirksamkeit zur Vermeidung der Chromevaporation ist die möglichst einfache Integration ein entscheidendes Merkmal, wenn es zu einer finalen Auswahl eines möglichen Beschichtungsverfahrens kommt.

Einige Wärmetauscher werden gerade bei einem externen Partner auf die Wirksamkeit der Beschichtung zur Vermeidung der Chromevaporation untersucht. Die Ergebnisse werden erst nach Abschluss des Projekts vorliegen.

## 6 Klappenventile für Brennstoffzellensysteme

Die bestehenden Automotive-Klappendesigns der Akustikklappen und AGR-Klappen von smk bieten eine solide Basis für die Weiterentwicklung der Klappen in dem Bereich der Brennstoffzellen. Die bestehenden Klappenkonzepte sind intensiv erprobt, validiert und halten Millionen von Schaltungen stand. Im Brennstoffzellenbereich kommen die Ventile im Peripheriebereich zum Einsatz, wo sie Temperaturen unter 130°C ausgesetzt sind. Die zulässigen internen und teilweise auch die externen Leckagen sind im Bereich der Brennstoffzelle niedriger, weshalb die Abdichtungskonzepte überarbeitet werden müssen.

### 6.1 Typische Modifikation des Klappendesigns

Zur Reduzierung der internen Leckage, also dem Leckagestrom in der Strömungsrichtung des Gases bei geschlossener Klappe, muss die Abdichtung zwischen Klappensegel und Gehäuse verbessert werden. Während in der Automotive-Anwendung das Klappensegel und die Klappenanschlüge im Gehäuse aus Metall bestehen, kann im Bereich der Brennstoffzelle ein Dichtungseinsatz mit einem darauf abgestimmten, besser dichtenden Klappensegel aus Kunststoff verwendet werden.

Diese Modifikation ist in der folgenden Darstellung exemplarisch dargestellt.

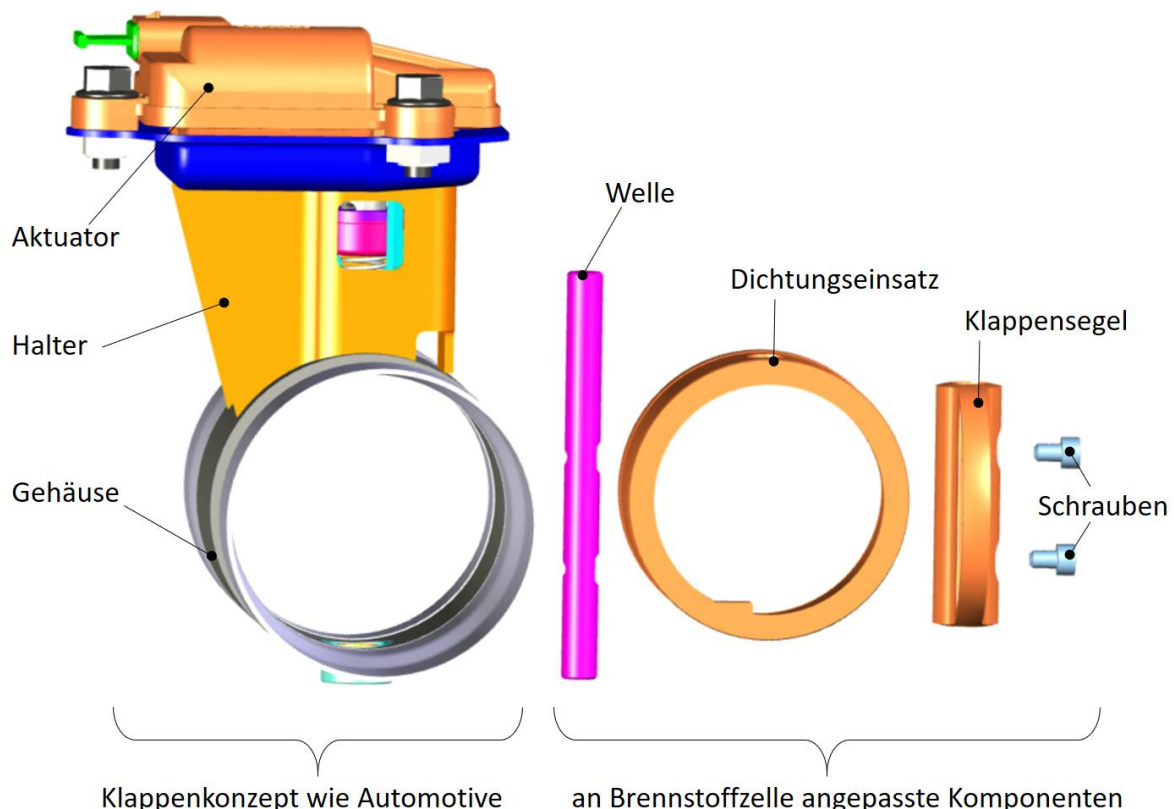


Abbildung 6.1 Klappendesign mit Dichtungseinsatz

Durch diese Modifikation konnte die interne Leckage der Klappe gegenüber der Version mit Metallsegel bei der erforderlichen Druckbeaufschlagung um über 73% reduziert werden.

Zur Reduzierung der externen Leakage, also dem Gasaustritt aus dem Inneren des Ventils in die Umgebung, muss das Dichtungskonzept um die Welle modifiziert werden. Hier bieten sich aufgrund der deutlich geringeren Temperaturen im Vergleich zur Automotive Anwendung eine Vielzahl an möglichen Lösungen, auf die hier nicht näher eingegangen wird.

Teilweise ist eine „gasdichte“ Abdichtung durch das Klappenventil intern wie extern gefordert. Diese gasdichten Klappen eignen sich nicht nur zur Regelung von Luftströmen, bei denen die Leckagen i.d.R. nicht so kritisch sind, sondern können auch im Brenngaskreislauf oder als Absperrventil Verwendung finden. Um im Bereich der internen Leakage eine hohe Dichtigkeit zu realisieren, muss ein exzentrisches Klappenkonzept umgesetzt werden. Bei einer zentrischen Lagerung kommt es immer zu Leckagen im Bereich der Lagerstellen, da hier die Dichtung im Bereich der Welle unterbrochen wird. Durch einen Versatz des Klappensegels im Bezug zur Drehachse der Welle kann eine umlaufende Dichtung in das Design integriert werden. Dies verbessert die Dichtigkeit deutlich. Um den Verschleiß durch Reibung zwischen Klappensegel und Dichtung zu minimieren, kann ein doppelt oder sogar dreifach exzentrisches Design herangezogen werden.

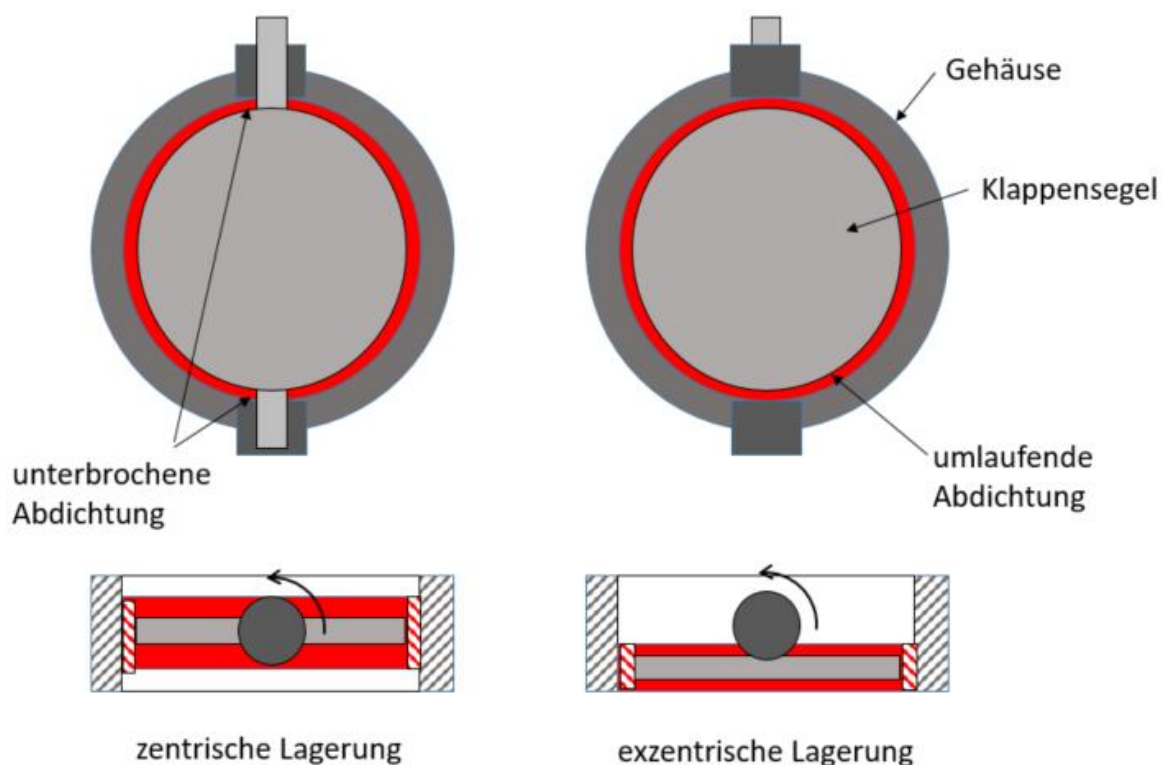


Abbildung 6.2 Unterschiede zwischen zentrischer und exzentrischer Lagerung

Auch hierzu wurde ein Konzept erarbeitet, das aber ggf. patentiert werden soll, daher wird es hier nicht näher ausgeführt.

Diese Modifikationen ermöglichen die Anpassung bewährter Konzepte, sodass sie für die neue Anwendung mit einer im Umfang reduzierten Deltavalidierung qualifiziert werden können. Die Verwendung bestehender Designs reduziert den Materialaufwand



und die Entwicklungsressourcen, was zu einer nachhaltigeren Produktion führt. Zudem verkürzt die Anpassung erprobter Konzepte die Entwicklungszeit und ermöglicht eine schnellere Markteinführung. Die Nutzung bewährter Technologien senkt die Kosten für Forschung und Entwicklung, da weniger Tests erforderlich sind.

Aufgrund der niedrigen Temperaturen ist auch der Einsatz eines Klappenkonzepts komplett aus Kunststoff denkbar. Auch diese Variante wurde im Rahmen des Forschungsprojekts untersucht und bearbeitet.



*Abbildung 6.3 Modell eines EGR-Klappenventils aus Kunststoff*

Da auch dieses Design ggf. geschützt werden soll, wird zur Veranschaulichung eines Klappendesigns aus Kunststoff das früher erarbeitete Konzept einer EGR Klappe aus Kunststoff dargestellt.

## 7 Industrialisierung

Eine sinnvolle spätere Industrialisierung für die technischen Projektinhalte wie Wärmetauscher, Reformier, Klappenventile und Beschichtungsverfahren wurde im Projektverlauf immer berücksichtigt und antizipiert. Dies war erforderlich, da nicht nur innovative Konzepte erarbeitet werden sollten, sondern ganz klar eine spätere Vermarktung und Serienfertigung in höheren Stückzahlen als Zielsetzung definiert wurde. Um dies sicherzustellen, müssen die entwickelten Lösungen nicht nur innovativ und technisch umsetzbar, sondern auch die Kosten und Verfügbarkeit der gewählten Materialien und die prozesssichere Fertigung im industriellen Produktionsumfeld gewährleistet sein. Teilweise wurden im Projektverlauf auch technisch elegante Varianten nicht weiterverfolgt, da Zweifel an der Erfüllung dieser Voraussetzungen bestanden. Im Folgenden wird exemplarisch auf einige Aufgaben in diesem Kontext näher eingegangen.

### 7.1 Aufbau und Qualifizierung eines Lieferantenpools

Der Strategische Einkauf war im Projektverlauf damit beschäftigt, mögliche Lieferanten für die Beschaffung der erforderlichen Komponenten und Materialien für die entwickelten Systeme zu identifizieren und falls erforderlich bereits zu qualifizieren.

Insbesondere die Beschaffung von Spezialwerkstoffen und Subkomponenten in kleineren Chargen zum Aufbau von Musterteilen war extrem herausfordernd und gestaltete sich sehr zeitaufwändig. Die Verwendung der richtigen Werkstoffe ist jedoch Grundvoraussetzung, um in Tests oder Validierungen aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten. Teilweise mussten Erprobungen auch so geplant werden, dass vom Werkstoff nicht dominierte Eigenschaften an einer Komponente erprobt wurden, die aus einem Ersatzwerkstoff aufgebaut wurden, um z.B. einen wichtigen Simulationsabgleich durchzuführen.

Zudem mussten die Lieferanten auch in der Lage sein, den für die Zukunft geplanten Hochlauf der Stückzahlen mit abzubilden. Dies machte den Aufbau eines Lieferantenpools komplex und aufwändig. Die Arbeiten in diesem Bereich gehen auch nach Abschluss des Projekts weiter.

### 7.2 Mögliche Automatisierung der Fertigungsabläufe

Die erarbeiteten technischen Lösungen müssen so gestaltet sein, dass sie mit geeigneten Fertigungsverfahren teil- oder vollautomatisiert ablaufen können. Nur dann ist eine Produktion in der erforderlichen Qualität und in höheren Stückzahlen denkbar. Die Qualität und technische Leistungsfähigkeit der Produkte wird im heutigen industriellen Umfeld bei den Kunden vorausgesetzt. Die Berücksichtigung von Automatisierung und Effizienz in der Fertigung ist daher mitentscheidend, um auch preislich attraktive Produkte anbieten zu können und damit wettbewerbsfähig zu sein.

Im Rahmen der Entwicklung mussten die Entwicklungskonzepte neben der Erfüllung der technischen Anforderungen immer auch gut fertigbar sein. Beispielsweise wurden bei komplexen Montageaufgaben oder diffizilen fertigungsbegleitenden Prüfverfahren externe Partner hinzugezogen, um die Machbarkeit zu bewerten und ggf. auch auf kritische Punkte des Prozesses hinzuweisen. Dies ermöglicht dem Entwicklerteam

eine frühe Anpassung des Designs und stellt sicher, dass eine spätere Skalierung der Fertigungsgröße möglich ist.

### 7.3 Identifikation von alternativen Fertigungsverfahren

Im Rahmen der Projektlaufzeit wurde auch nach neuen Fertigungsverfahren Ausschau gehalten, die für die entwickelten Komponenten genutzt werden können. Es wurden Fertigungsverfahren beleuchtet und untersucht, die bisher nicht zum Einsatz kommen oder typischerweise nur in anderen Produktbereichen genutzt werden. Durch dieses Lösen von bekannten Mustern können Potenziale gehoben werden, die bei einer Konzentration auf Bekanntes und einer Fokussierung und Spezialisierung auf Kernkompetenzen leicht aus dem Blick geraten.

Dazu wurden Workshops abgehalten und in Brainstorming Sitzungen mit einem heterogenen Personenkreis nach alternativen Fertigungsverfahren gesucht. Durch diesen Ansatz konnten im Rahmen der Leckagemessung und der Fügeverfahren Methoden identifiziert werden, die sehr vielversprechend für künftige Anwendungen sind. Dieses Vorgehen war nicht auf die Identifikation von Fertigungsverfahren begrenzt, soll hier aber beispielhaft erwähnt werden.

### 7.4 Innovation bei bestehenden Fertigungsverfahren

Auch die bestehenden Fertigungsverfahren wurden auf Innovationen untersucht, die für die Fertigung der Komponenten Vorteile bieten können.

Exemplarisch wird hier ein Verfahren erwähnt: Aufgrund der Verwendung von sehr dünnwandigen Materialien ist der neueste Stand der Online-Schweißüberwachung für diese Schweißaufgabe prädestiniert. Diese Art der Online-Schweißüberwachung ermöglicht eine aktive Bahnkorrektur auf Basis einer vorlaufenden Nahtverfolgung. Zusätzlich findet eine Schweißbadüberwachung und nachgelagerter Erfassung der Nahtoberfläche statt. Dieser Ansatz bietet viele Vorteile bei der Verarbeitung von dünnwandigen Materialien, bei denen es auf eine besonders exakte Positionierung der Schweißnaht und die Kompensation von thermischen induzierten Bauteilveränderungen während der Schweißung ankommt. Diese Online-Schweißüberwachung wird sehr wahrscheinlich in der Serienfertigung Verwendung finden.

## 8 Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass im Rahmen des Förderprojektes ein umfassender Einblick in den Bereich des SOFC- und SOEC-Marktes gewonnen werden konnte. Die wesentlichen Marktakteure sind identifiziert, und es wurde erfolgreich Kontakt zu zahlreichen Marktteilnehmern aufgebaut.

Dies hat zu einem tiefen Verständnis über den Aufbau und die Funktion der Gaserzeugungseinheit und der Balance-of-Plant Komponenten geführt. Insbesondere für Wärmetauscher und Reformer wurde eine umfangreiche Bibliothek an Betriebspunkten erarbeitet, die als wertvolle Ressource für aktuelle und zukünftige Entwicklungen dient.

Auf dieser Grundlage konnte ein modulares Konzept für Wärmetauscher und Reformersysteme entwickelt werden, das in der Lage ist, eine breite Spanne an Leistungsklassen von SOC-Systeme zu bedienen, von der kleineren SOFC-Pilotanlagen bis hin zum SOEC-System im MW Bereich. Die Flexibilität bei der Gestaltung der Diffusoren sowie die Variation der Blechanzahl innerhalb eines Wärmetauschers ermöglichen es, die Vorteile einer Standardisierung im Wärmetauscherkern mit einer projektspezifischen Auslegung der fertigen Wärmetauscher und Reformer zu kombinieren. Dies führt zu einer höheren Effizienz und Anpassungsfähigkeit der Produkte an die spezifischen Anforderungen der Kunden. Dies ermöglicht es smk, bei Projektanfragen schnell und effizient einen passenden Wärmetauscher oder Reformer auszulegen.

Im Bereich der Klappenventile wurden verschiedene Konzepte entwickelt, um die bewährten Automotive-Klappendesigns für die Verwendung in Brennstoffzellen anzupassen. Ein Projekt zur Entwicklung eines Klappenventils aus Kunststoff wurde angestoßen und befindet sich weiterhin in der Umsetzung.

Im Verlauf des Projekts wurden erhebliche Fortschritte erzielt und neue Wege beschritten. Ohne die Projektzuwendungen wäre dieser Entwicklungssprung nicht möglich gewesen. Die Unterstützung hat es ermöglicht, innovative Lösungen zu entwickeln und die Wettbewerbsfähigkeit von smk im Bereich der Brennstoffzellentechnologie zu stärken.

## 9 Regionale Partner und Verwertung

Der Markt für Hochtemperaturelektrolyse befindet sich im Aufbau, daher ist die Anzahl der Marktakteure noch begrenzt. Da jedoch weltweit Aktivitäten stattfinden, war es wichtig, weltweit Kontakte zu knüpfen, um Einblick in relevante Projekte zu erhalten.

Bei Erprobung und Leistungsmessung wurden bewusst regionale Partner aus Baden-Württemberg und Bayern eingebunden. Die kurzen Wege und ein ähnliches Mindset machten die Zusammenarbeit besonders effizient. Erst wenn regional keine passenden Partner verfügbar waren, wurde der Suchkreis erweitert.

Die enge Zusammenarbeit mit regionalen Partnern trug entscheidend zur Schnelligkeit und Qualität der Untersuchungen bei und ermöglichte es smk, die eigene Expertise im Untersuchungsbereich deutlich zu steigern. Diese Zusammenarbeit förderte nicht nur die Weiterentwicklung bei smk, sondern führte auch zu einem Wissenszuwachs auf regionaler Ebene, sowohl bei smk als auch bei den Partnern

Im Projektverlauf wurde darauf geachtet, dass die entwickelten Komponenten nicht nur im Labormaßstab, sondern später auch unter den industriellen Fertigungsbedingungen der Firma smk effizient und kostengünstig in Serie produziert werden können.

Die Projektumfänge wurden aufgrund der Erkenntnisse im Projektverlauf angepasst. Im Fokus der Entwicklungstätigkeit standen Wärmetauscher, Reformer und Klappenventile für SOFC/SOEC-Applikationen. Die Entwicklungsziele konnten weitestgehend erreicht werden, sodass der Verwertung der Komponenten nichts im Wege steht. Aktuell werden bereits entsprechende Projekte bearbeitet, die sich jedoch vielfach noch in der Musterphase oder vor der Kleinserie befinden.

Derzeit ist am Markt eine gewisse Zurückhaltung bei der Vergabe von Großserienaufträgen zu beobachten. Diese Zurückhaltung könnte durch gezielte Initiativen im politischen Umfeld überwunden werden, was uns hoffen lässt, dass auch große Serienprojekte gestartet werden, von denen smk profitieren kann. Um die Innovationskraft und Wettbewerbsfähigkeit weiter zu stärken, ist es entscheidend, dass die Rahmenbedingungen für die Industrie verbessert werden. Wir sind zuversichtlich, dass mit der richtigen Unterstützung und den passenden Anreizen die Nachfrage nach unseren Produkten steigen wird, und wir in der Lage sind, unsere Entwicklungen erfolgreich in den Markt zu bringen.

## 10 Ausblick

Festoxid-Brennstoffzellen sind eine Technologie, die eine nachhaltige und effiziente Energie- und Wasserstofferzeugung ermöglicht und die zur Reduzierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen beiträgt. Zudem bietet die SOC Technologie eine hohe Flexibilität in der Brennstoffnutzung und kann mit verschiedenen Energiequellen kombiniert werden.

Aufgrund dieser systemtechnischen Vorteile und der vielversprechenden Ergebnisse aus dem Projektverlauf erachtet smk das SOC-Geschäftsfeld als attraktiv und möchte sich als Vorreiter im Bereich der BoP-Komponenten in diesem zukunftssträchtigen Sektor positionieren.

smk hat im Projektverlauf viel Wissen rund um die Hochtemperaturelektrolyse im Bereich seiner Mitarbeiter als auch im Technikbereich aufgebaut. Dieses Wissen wird auch über die Projektlaufzeit hinaus genutzt und weiter ausgebaut. smk engagiert sich weiterhin in diesem Umfeld und plant, daraus einen wachstumsträchtigen Geschäftszweig zu etablieren.

Trotz der positiven Signale ist bei den Marktakteuren derzeit eine gewisse Zurückhaltung zu beobachten. Die Branche erwartet von der Politik und dem Gesetzgeber klare Akzente und Rahmenbedingungen, die die SOFC/SOEC-Systeme für Käufer attraktiver machen und somit zu einer erhöhten Marktnachfrage führen. Erst wenn diese Voraussetzungen geschaffen sind, wird die Industrie bereit sein, ihre aktuelle Zurückhaltung bei den umfangreichen Investitionen in die Serienproduktion aufzugeben.

Förderprogramme wie dieses sind entscheidende Anreize für den Mittelstand, sich weiterhin in diesem innovativen Geschäftsfeld zu engagieren und neue Entwicklungen voranzutreiben. Auch smk erkennt den Bedarf an solchen Programmen und würde sich sehr gerne auf ein Folgeprogramm bewerben, um die eigenen Innovationsprojekte weiter voranzutreiben und zur Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit der Branche in Baden-Württemberg beizutragen.

## Literaturverzeichnis

Hörnig, G. T. (31.01.2012).

Untersuchungen zur Aerosolabscheidung in AGR-Wärmetauschern.  
München: TU München

Köllner, C. (14. 08 2024).

*AVL und Elcogen entwickeln SOEC-Technik im MW-Bereich.*  
Von [www.springerprofessional.de](http://www.springerprofessional.de):  
<https://www.springerprofessional.de/wasserstoff/produktion---produktionstechnik/avl-und-elcogen-entwickeln-soec-technik-im-mw-bereich/27461180>

Kurzweil, P. (2016).

Review of solid oxide fuel cell materials: cathode, anode, and electrolyte.  
In P. Kurzweil, *Brennstoffzellentechnik* (S. 196). Wiesbaden: Springer Vieweg.  
Von <https://doi.org/10.1007/s41825-020-00029-8>

Research and Markets; August 2022

[www.researchandmarkets.com](http://www.researchandmarkets.com).

Von Solide Oxide Fuel Cells Market :

<https://www.researchandmarkets.com/reports/4997306/solid-oxide-fuel-cells-market-growth-trends?srsltid=AfmBOoqte45itwtDd0THNO5Q9HiwVYXebaQHyyIbyAxvKVeIQIKFOg6D>

Robert Bosch GmbH;

[www.bosch-presse.de](http://www.bosch-presse.de).

[https://www.bosch-](https://www.bosch-presse.de)

[presse.de/pressportal/de/media/dam\\_images/pi11237/bz2004-de-s36-37-ig-brennstoffzelle\\_img\\_w386.jpg](https://www.bosch-presse.de/pressportal/de/media/dam_images/pi11237/bz2004-de-s36-37-ig-brennstoffzelle_img_w386.jpg)