



Dominik Dunst, BSc

**Entwicklung eines 4 kW SOEC Elektrolyse Proof of Concept
Systems**

von der Simulation auf den Prüfstand

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Elektrotechnik

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Dipl.-Ing. Dr.techn. Jürgen Fabian

Institut für Fahrzeugtechnik

Dipl.-Ing. (FH) Richard Schauperl

AVL List GmbH

Graz, April 16

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Graz, 07.04.2016

Ort, Datum

Unterschrift

AFFIDAVIT

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis dissertation.

Graz, 07.04.2016

Location, Date

Signature

DANKSAGUNG

Ich nutze hier die Gelegenheit, um mich bei all meinen Unterstützern, Wegbegleitern und Freunden während meiner Studienzeit zu bedanken.

Mein besonderer Dank gilt der AVL List GmbH, die mir durch die Ausschreibung dieser Diplomarbeit einen wunderbaren und lehrreichen Einblick in das wissenschaftliche Berufsleben bereitet hat. Allen voran möchte ich mich beim Herrn Dipl.-Ing. (FH) Richard Schauerl der AVL List GmbH für seine äußerst angenehmen und konstruktiven Gespräche bedanken. Mein weiterer Dank gilt natürlich dem Team der Brennstoffzellenabteilung. Ohne deren fachlicher und kompetenter Unterstützung hätte ich diese Arbeit nicht in der kurzen Zeit bewerkstelligen können.

Als nächstes möchte ich mich bei meinem Betreuer des Instituts für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Graz, Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Jürgen Fabian danken, dass er mir jederzeit mit Rat und Tat zur Seite gestanden ist. Selbst sehr kurzfristige Anfragen und sogar an Wochenenden hat er nicht die Mühe gescheut, mir bei meinen Anliegen so schnell als möglich weiter zu helfen.

An dieser Stelle möchte ich auch ganz besonderes meiner Familie danken. Egal in welcher Form, egal zu welcher Zeit, meine Familie hat mir immer wieder aufs Neue gezeigt, wie sehr sie mich auf meinem Weg unterstützen. Sie haben mich durch mein Leben und meine Studienzeit begleitet und ich konnte mich immer auf sie verlassen. An dieser Stelle einfach: DANKE!

Einen herzlichen Dank auch an meine Freundin Judith für die ermutigenden Worte und das Verständnis für meine teils ausufernden Arbeitszeiten!

Zum Schluss möchte ich mich noch ganz speziell bei meinen Studienkollegen bedanken. Sie haben es immer wieder geschafft, mich durch gemeinsame Aktivitäten zu motivieren und abzulenken. Ohne Euch wäre meine Studienzeit nicht einmal halb so angenehm gewesen!

KURZFASSUNG

Wasserstoff gilt als eine der vielversprechendsten Schlüsseltechnologien, wenn es um großtechnische Energiespeicherung geht. Die Schwierigkeit der Verbreitung von Wasserstoff als Energieträger liegt darin, dass er derzeit zum großen Teil über Kohlenwasserstoffe hergestellt wird. Mit der Hochtemperatur-Elektrolyse (*Solide Oxide Electrolysis Cell – SOEC*) bietet sich eine saubere und erneuerbare Lösung, um Wasserstoff in großen Mengen herzustellen.

Die Arbeit baut auf den voran gegangenen Diplomarbeiten, welche sich mit der Theorie und den Simulationen bezüglich *SOEC* Proof of Concept Systemen befasst haben, auf. Ziel ist es, das simulierte Proof of Concept System am Prüfstand aufzubauen und die Messergebnisse mit der Simulation zu vergleichen. Der Prüfstands Aufbau gliedert sich in zwei unterschiedliche Systemstudien. Die erste Studie befasst sich mit der elektrischen Gasvorheizung und die zweite mit der Gasvorheizung mittels Wärmetauscher und Oxidationskatalysator. Der Rest des Aufbaus bleibt jeweils unangetastet. Das bietet die Möglichkeit, die beiden Varianten hinsichtlich des Stack- und Systemwirkungsgrades zu vergleichen. Die Dokumentation soll verdeutlichen, welches die richtigen und effizientesten Betriebsweisen für solche Aufbauten sind.

Die Systemstudie, welche den besseren Systemwirkungsgrad erzielt, soll für einen 1000 Stunden Dauertest vorbereitet werden, um etwaige Aussagen über Degradation und Langzeitstabilität treffen zu können.

Zum Schluss der Arbeit wird eine grobe Übersicht über die Investitionskosten und Skalierungsszenarien gegeben.

ABSTRACT

Hydrogen is one of the most promising key technologies for storing huge amounts of energy. The fact that hydrogen was produced using natural gas, hydrocarbons or coal as primary energy source was a barrier to use it in large scales. Solid Oxide Electrolysis Cell (SOEC) is a green alternative to produce large quantities of hydrogen. It could be the solution, to bring hydrogen as an energy storage to the next level.

This thesis is based on previous Master Theses which covered the simulation parts. The Proof of Concept simulation reached very high efficiency ratings and is going to be built on a test bench. Two different system setups are going to be implemented. The first is covering a gas heating system based on electricity as power source. The second system is going to use a heat exchanger and an oxidation catalyst to bring the gases up to working temperature. Both system should be compared according their stack efficiency rating and overall efficiency. This Thesis should also act as a guideline, on how to operate such systems correctly and in an efficient manner.

The system with the higher overall efficiency is going to be prepared for a long term test (1000 hours), to gather information's about durability and degradation rates.

The final chapter is going to give an overview about investment costs based on three different scenarios.

INHALT

Kurzfassung	I
Abstract	II
Inhalt	III
1 Einleitung	1
1.1 Wasserstoff als Energieträger.....	1
1.1.1 Eigenschaften von Wasserstoff	1
1.1.2 Vor- und Nachteile von Wasserstoff.....	2
1.1.3 Startprobleme des Wasserstoffs als Treibstoff.....	3
1.1.4 Wasserstoffherstellung und derzeitiger Einsatz	3
1.1.5 Hochtemperatur Elektrolyse (HTEL, SOEC).....	5
1.1.6 Speicherung von Wasserstoff.....	8
2 Systemstudie 1 – elektrischer Gasvorheizer	9
2.1 Simulation	9
2.2 Beschreibung der Komponenten	10
2.3 Mechanischer Aufbau	20
2.4 Elektrischer Aufbau.....	21
2.5 Steuerung.....	22
2.6 Berechnungen.....	23
2.6.1 Messung und Umrechnung des Wasserstoffs.....	23
2.6.2 Steam Conversion	26
2.6.3 Wirkungsgrade	26
2.7 Versuchsbeschreibung.....	28
2.7.1 Betriebsarten.....	28
2.8 Ergebnisse der Systemstudie 1	31
3 Systemstudie 2 – Gasvorheizer mittels Oxi-Kat	38
3.1 Simulation	38
3.2 Beschreibung der Komponenten	40
3.3 Mechanischer Aufbau	41
3.4 Elektrischer Aufbau.....	43
3.5 Steuerung.....	44

3.6	Versuchsbeschreibung.....	45
3.7	Ergebnisse	46
4	Skalierung auf 100 MW	49
5	Zusammenfassung und Ausblick	53
6	Literaturverzeichnis.....	55
7	Abkürzungsverzeichnis.....	57
8	Appendix	58
APPENDIX A	NI CompactRIO Übersicht	58
APPENDIX B	NI CompactRIO Module	59
APPENDIX C	Drucksensoren	64
APPENDIX D	Heizbänder.....	65
APPENDIX E	Thermocouple	66
APPENDIX F	Gaswärmetauscher.....	68
APPENDIX G	Pin-Belegungen Netzteile	69
APPENDIX H	PIN-Belegung Spannungsabgriff SOEC-Stack	71
APPENDIX I	Skalierung auf 100 MW Berechnungen	72

1 EINLEITUNG

In Zeiten der allgegenwärtigen Energiewende wird den chemischen Speichertechnologien eine immer größere Bedeutung zugeschrieben. Es wird somit die Möglichkeit geboten, überschüssigen Wind- und Solarstrom in großen Mengen in Form von Wasserstoff zu speichern. Der durch die Wasserelektrolyse erzeugte Wasserstoff kann mittels Drucktanks, Verflüssigung sowie physikalischer bzw. chemischer Adsorption gespeichert und anschließend wieder rückverstromt werden. In diesem Kapitel wird ein Überblick über den derzeitigen Stand der Wasserelektrolyse geben, die als eine der Schlüsseltechnologien der Energiewende gilt [1].

1.1 WASSERSTOFF ALS ENERGIETRÄGER

Wasserstoff ist das leichteste Gas dieser Welt und steht im Periodensystem der Elemente auf der ersten Stelle. Das häufigste Wasserstoff-Isotop hat ein Proton und ein Elektron. Das chemische Element ist farb- und geruchlos und kommt in der Natur aufgrund seiner hohen Reaktivität nur sehr selten in Reinform vor. Der Wasserstoff kommt in fast allen organischen Verbindungen, in vielen chemischen Verbindungen wie Kohlenwasserstoffen und in Wasser vor. Die Erdkruste unseres Planeten besteht zu ca. 50 % aus Wasserstoff, was das Element somit zum mit Abstand häufigsten der Erde macht [2].

1.1.1 EIGENSCHAFTEN VON WASSERSTOFF

Wasserstoff ist sehr gut brennbar und um einiges leichter als Luft. Dieser hat einen sehr weiten Zündbereich von 4-77 % (Prozentanteil des Wasserstoffes in Luft) bei einer Zündtemperatur von 560 °C und ist damit hochreaktiv und sicherheitstechnisch als gefährlich einzustufen. Wasserstoffflaschen werden mit roten Plaketten gekennzeichnet. Das brennbare Gas kann sich bei hohen Ausströmgeschwindigkeiten selbst entzünden was eine sichere und vorsichtige Handhaben noch mehr verdeutlicht [2].

1.1.2 VOR- UND NACHTEILE VON WASSERSTOFF

Vorteile:

- Keine Knappheit, da es das häufigste Element der Erde ist
- Nachhaltige Gewinnung aus erneuerbarem Strom, Solarthermie und Biomasse ist technisch möglich
- Saubere Verbrennung, da ausschließlich Wasserdampf als Abgas entsteht
- Höchste gravimetrische Energiedichte aller Gase
- Es können hohe Wirkungsgrade über die „kalte“ Verbrennung in Brennstoffzellen ermöglicht werden, da sie nicht den Carnot-Wirkungsgraden unterworfen sind
- Flexibel in vielen Bereichen wie Strom, Wärme und Verkehr einsetzbar

Nachteile:

- H_2 besitzt als kleinstes Atom ein großes Diffusionsvermögen und kann zu Versprödung von Metallen und Dichtungen in Leitungen und Tanks führen. Besondere Materialien zur Handhabung sind notwendig
- Hohe Explosivität aufgrund des sehr weiten Zündbereichs (4-77 %)
- Energiedichte des Wasserstoffs ist höher als bei Batterien oder Pumpspeicherwerken, jedoch geringer als bei Kohlenwasserstoffen
- Da H_2 praktisch nur in gebundener Form vorkommt und nicht wie andere Rohstoffe einfach „abgebaut“ werden können, ist seine Herstellung zum großen Teil energieintensiv

Wasserstoff wird heute überwiegend in der chemischen Industrie für Schweißverfahren oder in Verbindung mit Kohlenstoffen zu Kohlenwasserstoffen umgewandelt (z.B. Diesel, Benzin). Energetisch wird der Wasserstoff in nur sehr geringem Umfang als Raketentreibstoff in der Raumfahrt eingesetzt. Ihm wird ein hohes Potenzial aufgrund seiner unendlichen Verfügbarkeit und sauberen, „kalten“ Verbrennung zum Ersatz fossiler Kraftstoffe beigemessen. Da er aber heute fast ausschließlich aus fossilen Kohlenwasserstoffen gewonnen wird, ist eine Substitution konventioneller Treibstoffe nur dann sinnvoll, wenn der Wasserstoff aus erneuerbaren Energien hergestellt wird [2].

1.1.3 STARTPROBLEME DES WASSERSTOFFS ALS TREIBSTOFF

Die Herausforderung um den Wasserstoff als Energieträger einsetzen zu können besteht heute in der sogenannten „Henne-Ei-Problematik“: Ohne die vorhandene Infrastruktur gibt es nur wenige Abnehmer und umgekehrt. Wenn das Wasserstoff-Tankstellennetz nicht vorhanden ist, werden vom Kunden keine Wasserstofffahrzeuge angeschafft. Die Kosten für reine Wasserstofffahrzeuge sind derzeit bei über 100.000 € pro Fahrzeug, was außerhalb der Reichweite eines durchschnittlichen Kunden ist. Die Kosten würden – technische Probleme unberücksichtigt – nur in einer Serienproduktion auf einen annehmbaren Preis fallen. Fehlen jedoch die Abnehmer, ist auch eine Implementierung einer Wasserstoffinfrastruktur nicht wirtschaftlich. Eine Abhilfe bzw. Übergangslösung kann die angeschlossene Methanisierung von Wasserstoff sein, die zwar zusätzliche Kosten und Wirkungsgradverluste zur Folge hat, jedoch den Wasserstoff der vorhandenen Erdgasinfrastruktur samt Gasanwendungen allen Energiemärkten zugänglich macht [2].

1.1.4 WASSERSTOFFHERSTELLUNG UND DERZEITIGER EINSATZ

Die hohe Energiedichte des Wasserstoffs ist der größte Vorteil gegenüber den anderen bekannten Speichertechnologien. Dieser hohe Anteil an chemischer Energie ist bei der Herstellung von Wasserstoff aus Wasser oder anderen Stoffen entsprechend aufzubringen und an die Gesetze der Thermodynamik gebunden. Die Energiequelle und Effizienz seiner Herstellung spielt also einen entscheidenden Faktor im technischen und energetischen Vergleich mit anderen Technologien.

Wasserstoff wird global gesehen fast ausschließlich über die chemische Verbindung mit fossilen Kohlenwasserstoffen gewonnen. Die folgende Auflistung dient als Überblick über das prozentuale Verhältnis der Herstellungsvarianten:

- Erdgas (48 %)
- flüssige Kohlenwasserstoffe (30 %)
- Kohle (18 %)
- Wasserelektrolyse (4 %)

1) Einleitung

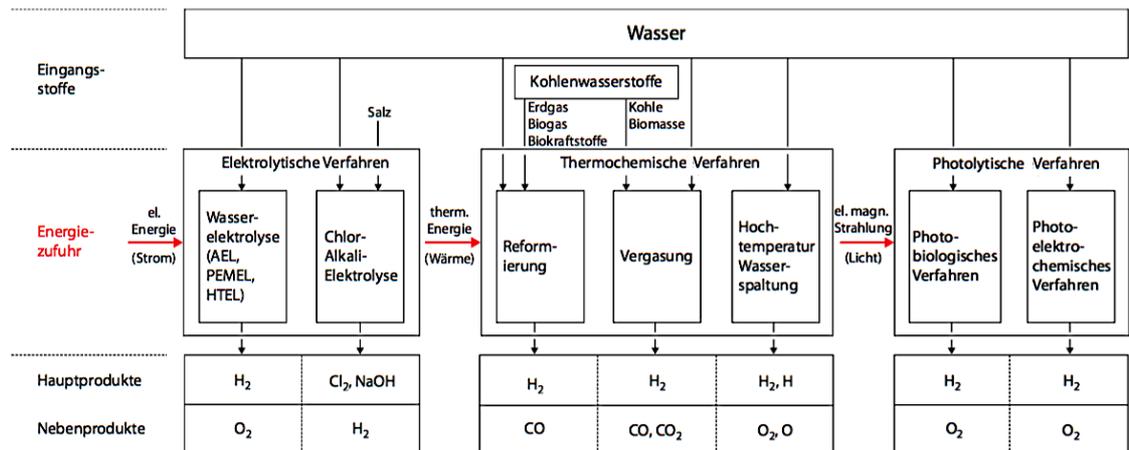


Abbildung 1: Übersicht der Varianten zur Wasserstoffherstellung [2]

In Abbildung 1 ist eine Übersicht der Varianten zur Wasserstoffherstellung zu sehen. Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Wasserstoffherstellung mittels der Wasserelektrolyse. Als Technologie kommt die Hochtemperatur Elektrolyse (HTEL) oder auch *Solide Oxide Electrolysis Cell (SOEC)* zum Einsatz.

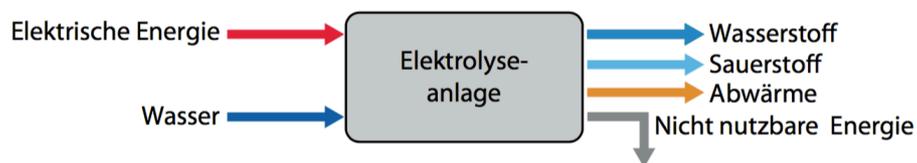


Abbildung 2: Übersicht über den Energie- und Stofffluss in und aus der Elektrolyseanlage [2]

Abbildung 2 gibt einen Überblick über den Gas- und Energiefluss. Als Eingangsmedien dient die elektrische Energie zur Spaltung des zugeführten Wasserdampfes. Als Ausgangsmedien bekommt man den gewünschten Wasserstoff, Sauerstoff und Abwärme. Die eingezeichnete „Nicht nutzbare Energie“ illustriert die unvermeidbaren Verluste. Eine große Herausforderung ist die Nutzung und Rezyklierung der Abwärme, da hier ein großes Potential zur Wirkungsgradsteigerung vorhanden ist.

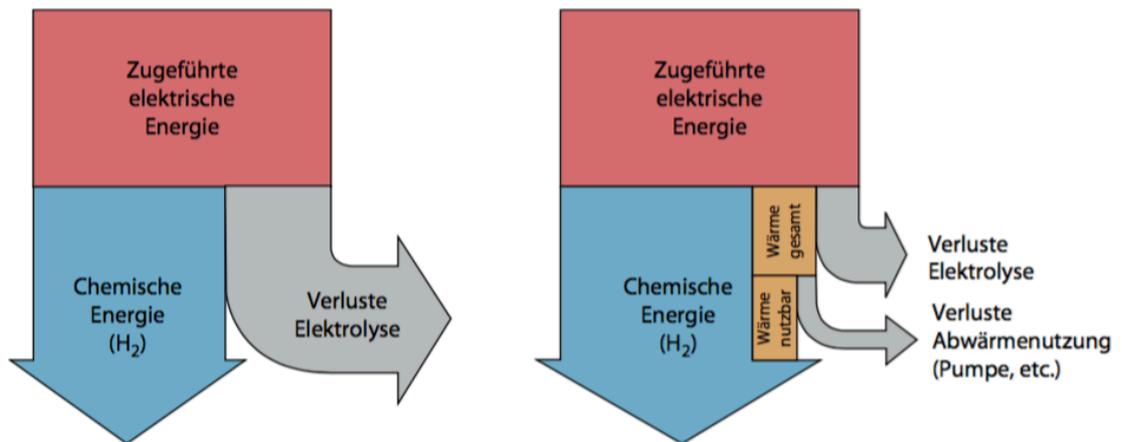


Abbildung 3: Illustrierung der Notwendigkeit zur Nutzung der Abwärme eine Elektrolyseanlage [2]

Das Sankey-Diagramm in Abbildung 3 verdeutlicht, wie wichtig die Abwärmenutzung der Elektrolyseanlage für die Wirkungsgradsteigerung ist.

1.1.5 HOCHTEMPERATUR ELEKTROLYSE (HTEL, SOEC)

Bei der Hochtemperatur-Elektrolyse (*High Temperature Electrolysis of Steam, HTES*) oder auch Dampf-Elektrolyse genannt, wird ein Teil der Spaltungsenergie welche zur Trennung von Sauerstoff und Wasserstoff nötig ist, durch Hochtemperaturwärme bei etwa 750-850 °C bereitgestellt. So kann die Zellspannung im Vergleich zur PEM Elektrolyse (*Polymer Electrolyte Membrane*) und alkalischen Elektrolyse um mehr als 0,5 V auf unter 1 V gesenkt und hohe strombezogene Wirkungsgrade erreicht werden [2].

1) Einleitung

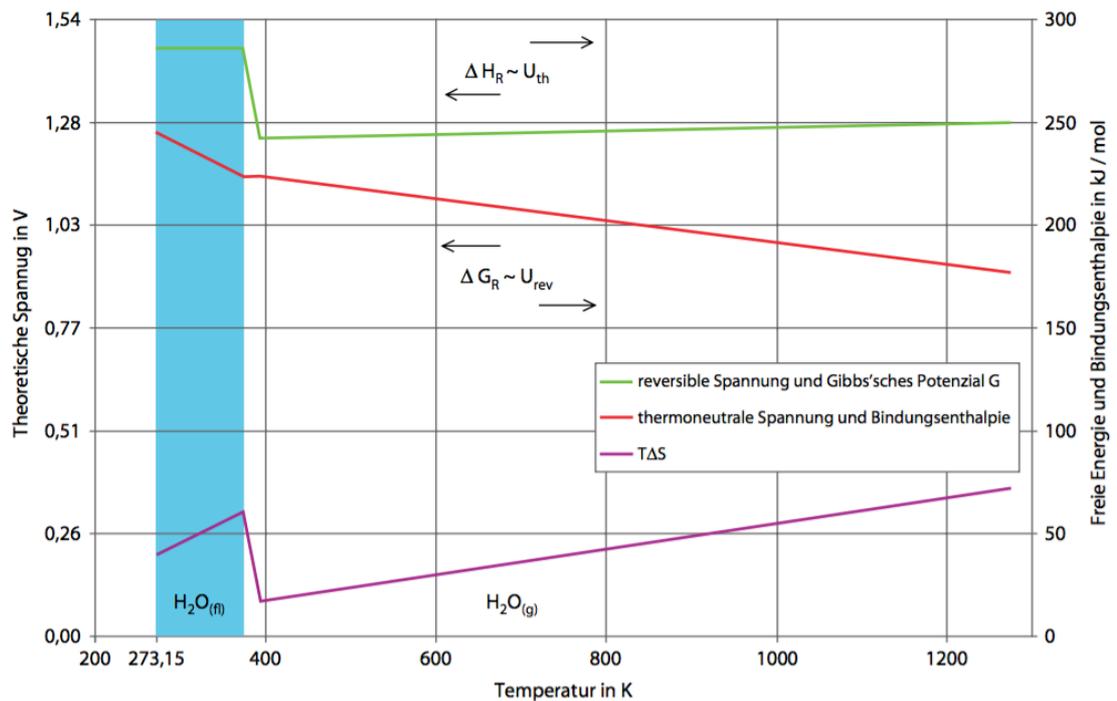


Abbildung 4: Zusammenhang von steigender Temperatur und sinkender Spannung [2]

In Abbildung 4 sieht man, dass mit steigender Temperatur die thermoneutrale Spannung und somit die Bindungsenthalpie sinkt. Es ist somit mit weniger einzusetzender elektrischer Leistung das gleiche Ergebnis erreichbar. Das wiederum bedeutet im Umkehrschluss, dass je höher die Temperatur ist, desto besser ist der Wirkungsgrad der Wasserstoffelektrolyse.

Funktionsweise

Die Funktion der Hochtemperatur-Elektrolyse basiert auf den Umkehrreaktionen der Festoxidbrennstoffzelle (*Solid Oxide Fuel Cell, SOFC*). Beide Halbzellen sind von einem O_2 -Ionen leitenden Festelektrolyten getrennt, an dem beidseitig die Elektroden aufgebracht sind (siehe Abbildung 5).

1) Einleitung

Auf der Brenngasseite wird aufgeheizter Wasserdampf zugeführt, der mit zwei Elektronen zu Wasserstoff und O_2 -Ionen reagiert (Formel (1) Brenngasseite-Reaktion). Der Wasserstoff kann entnommen werden, die O_2 -Ionen diffundieren durch den Feststoffelektrolyten zur Luftseite, wo sie unter Elektronenabgabe zu Sauerstoff reagieren.



In Abbildung 5 ist das Funktionsschema einer SOEC Elektrolyseanlage zu sehen. Auf der linken Hälfte befindet sich die Brenngasseite, auf der rechten die Luftseite. Die Symbole Plus und Minus stellen die Gleichstromquelle dar.

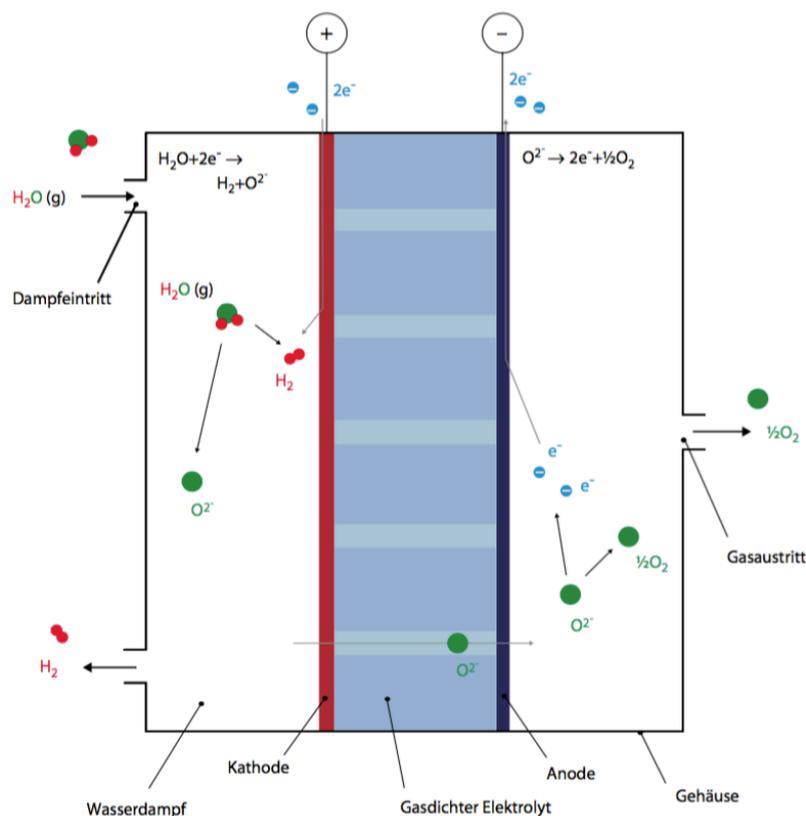


Abbildung 5: Funktionsschema einer SOEC Elektrolyseanlage [2]

1.1.6 SPEICHERUNG VON WASSERSTOFF

Bei der Speicherung von Wasserstoff ist stets das Ziel, die Gasdichte und damit die Energiedichte zu erhöhen. Dieses Kapitel dient nur zum Überblick, da der Fokus der Arbeit auf der Wasserstoffproduktion liegt.

In Abbildung 6 ist ein Überblick über alle bekannten Speichermöglichkeiten für Wasserstoff zu sehen.

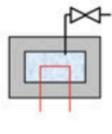
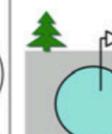
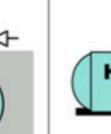
Chemisch		Flüssig		Druck	
Metallhydrid-Speicher	H ₂ -Verbindungen	Tiefkühlspeicher		Gasspeicher	
					
Stationär/ mobil / tragbar	Infrastruktur nutzen / vorhanden	Trailer- Transport	Stationäre Großspeicher	Kavernen	Stationär/ mobil/ portabel Stahl / Verbundmaterial

Abbildung 6: Überblick über die Speichermöglichkeiten von Wasserstoff [3]

Abbildung 6 fasst die Speicherarten zusammen. Im Prinzip handelt es sich um Druckspeicherung, Kryospeicherung des verflüssigten Gases sowie Ein- oder Anlagerung von Wasserstoff in Festkörpern. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, wasserstoffhaltige Verbindungen wie zum Beispiel Ammoniak und Kohlenwasserstoffe auf konventionelle Weise zu speichern und dabei auf die vorhandene Infrastruktur zurückgreifen. Am Ort des Wasserstoffbedarfs muss dann allerdings eine Aufbereitung stattfinden. Ein Beispiel für diese Verfahrensweise sind stationäre und mobile Stromerzeuger mit Wärmeankopplung (KWK-Systeme).

2 SYSTEMSTUDIE 1 – ELEKTRISCHER GASVORHEIZER

Das zweite Kapitel dieser Arbeit beschäftigt sich mit der Portierung der Simulation auf den Prüfstand. Ziel ist es, den Prüfstand aufzubauen und die gewonnenen Messwerte mit den Simulationsergebnissen zu vergleichen.

Die Systemstudie 1 ist mit einem elektrischen Gasheizer ausgestattet, welcher die Eingangsgase der Luft- und Brenngasseite auf Betriebstemperatur (ca. 800 °C) bringen soll.

2.1 SIMULATION

Ausgangspunkt sind die Simulationsergebnisse und das *PoC (Proof of Concept)* System der vorangegangenen Diplomarbeit [4]. In Abbildung 7 ist das Modell der Simulation zu sehen.

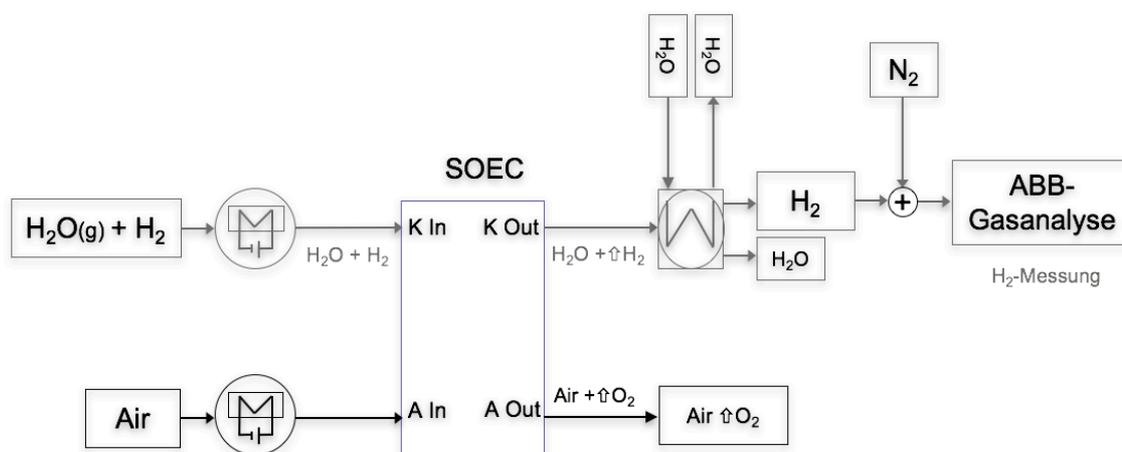


Abbildung 7: Modell PoC System 1 mit elektrischem Gasheizer [5]

Beschreibung der Brenngas- und Luftseite:

- Brenngasseite (oberer Strang): Der Wasserdampf – $\text{H}_2\text{O}_{(\text{gasförmig})}$ – wird mit H_2 vermischt und anschließend mittels des elektrischen Gasheizers auf Betriebstemperatur gebracht. Das heiße Gasmisch durchströmt anschließend den *SOEC*-

Stack. Am Ausgang der Brenngasseite wird das heiße Abgas mittels eines wassergekühlten Kondensators abgekühlt und der Restwasserdampf abgeschieden. Dem nun gekühlten Gas wird mittels einer Stichleitung eine fix vordefinierte Menge N_2 beigefügt um eine prozentuelle H_2 -Messung zu ermöglichen. Direkt danach erfolgt die Gasmessung mittels des *ABB*-Gasanalyse-Gerätes.

- Luftseite (unterer Strang): Die Luft wird mittels des elektrischen Gasheizers auf Betriebstemperatur gebracht und anschließend in den *SOEC*-Stack eingeleitet. Die heiße Abgasluft wird mittels eines Gaskühlers abgekühlt.

Um das Simulationsmodell von Abbildung 7 auf den Prüfstand transferieren zu können, sind weitere Komponenten notwendig. Das Simulationsmodell wird um die fehlenden Komponenten ergänzt und ist in Abbildung 8 ersichtlich.

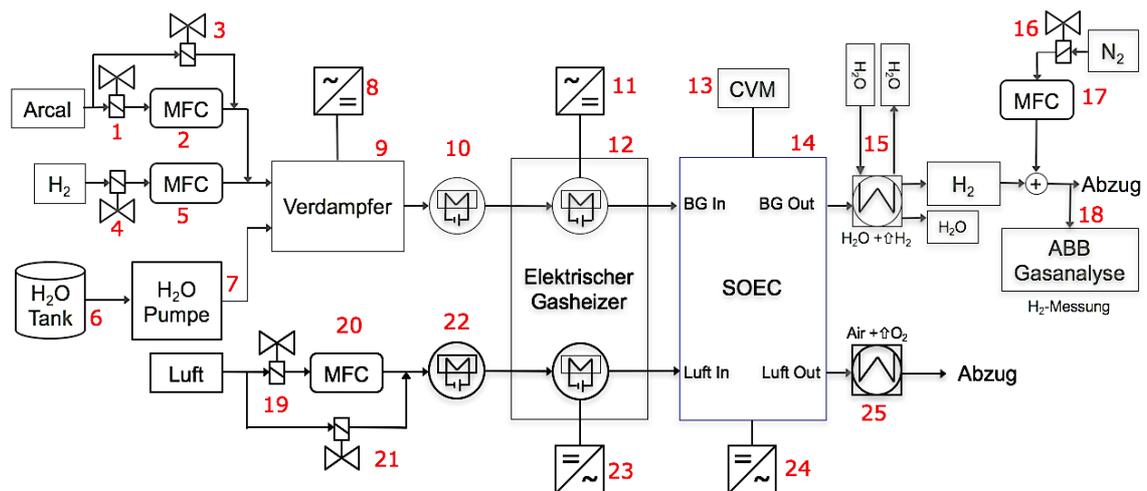


Abbildung 8: PoC System 1 mit allen Komponenten, welche am Prüfstand verbaut sind

2.2 BESCHREIBUNG DER KOMPONENTEN

Magnetventil (1, 4, 16, 19)

Das Magnetventil öffnet bei +24 V, bei 0 V ist es geschlossen. Tritt ein Fehler in der Stromversorgung auf (Fehler im Schaltkasten, Kurzschluss, Stromausfall) so liegt keine Spannung mehr im System an, sodass die Magnetventile schließen und keine Gase mehr fließen können. Es ist somit sichergestellt, dass im Fehlerfall die Gaszufuhr geschlossen ist.

Purge-Magnetventil (3, 21)

Das Magnetventil öffnet bei 0 V und schließt bei +24 V. Die Purge-Leitungen haben die Aufgabe, dass im Fehlerfall (Fehler im Schaltkasten, Kurzschluss, Stromausfall) die Gasstränge für die Brenngas- und Luftseite mit Gas „gespült“ werden. Auf der Brenngasseite wird mit dem Gas Arcal (5 % H₂, 95 % N₂) gespült, auf der Luftseite mit Umgebungsluft. Im laufendem Betrieb liegen +24 V an, sodass die Purge-Leitungen geschlossen sind.

Massflowcontroller (2, 5, 17, 20)

Die *MFCs* (*Massflowcontroller*) erlauben es, die Gasmenge in NI/h (Normliter/Stunde) zu variieren. Die Einheit NI/h kommt aus der Verfahrenstechnik und beschreibt das Gasvolumen bei normierten Bedingungen (25 °C, 1 bar). Als Stellgröße wird eine Spannung von 0 V bis +10 V gewählt. Eine Spannung von +10 V bedeutet, dass der *MFC* vollständig geöffnet ist. Es werden nur *MFCs* der Firma *Vögtlin Instruments AG* eingesetzt.



red-y smart controller GSC

Hochpräziser thermischer Massedurchflussregler (MFC)

Messbereiche bis 60 l/min

Gasanschluss G $\frac{1}{4}$ "

Abbildung in Aluminium eloxiert

Abbildung 9: Symbolbild eines Vögtlin Massflowcontroller des Typs GSC [6]

2) Arcal-MFC
Modell: GSC-D9SA-FF12
Stellbereich: 0-10000 NI/h
Dynamik: 1:500

17) N₂-MFC
Modell: GSC-C9SA-FF26
Stellbereich: 0-3000 NI/h
Dynamik: 1:500

5) H₂-MFC
Modell: GSC-C9SA-FF26
Stellbereich: 0-3000 NI/h
Dynamik: 1:500

20) Luft-MFC
Modell: GSC-D9SA-FF13
Stellbereich: 0-20000 NI/h
Dynamik: 1:500

Purge-Flowmeter (26, 27)

Glass Tube Variable Area Flowmeter, ABB

Modell: D10A11

Gasgemisch: 95 % N₂, 5 % H₂

Q_{max}: 184 l/min (maximaler Durchfluss in Liter/Minute)



Abbildung 10: Glass Tube Variable Area Flowmeter, ABB [7]

Am Purge wird mittels manuellem Handventil die gewünschte Gasmenge in l/min eingestellt. Ist das Purge-Magnetventil offen und ein Gasfluss vorhanden, kann mittels des Indexmarkers, welcher in Abbildung 11 ersichtlich ist, die Gasmenge laut Skala eingestellt werden.

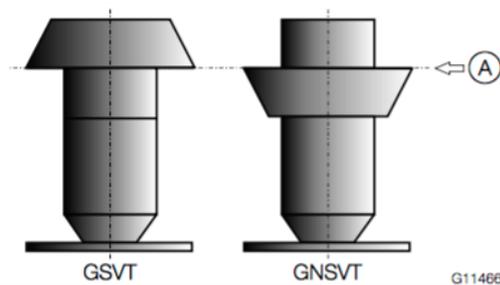


Fig. 2: Float with guide ring
A Index markers

Abbildung 11: Indexmarker der Purge-Leitung [7]

Beim Auftauchen eines Fehlerfalles muss gewährleistet sein, dass die Purge-Leitungen öffnen und ein vordefinierter Gasfluss auf der Brenngas- und Luftseite vorhanden ist. Ist dies nicht der Fall, besteht die Gefahr des thermischen Runaways, welcher in thermischer Zerstörung bzw. Brand endet.

H₂O-Tank

Der H₂O-Tank fasst ca. 15 l destilliertes Wasser. Er muss per Handventil vor der vollständigen Entleerung wieder aufgefüllt werden.

H₂O-Pumpe

Die Wasserpumpe befördert das destillierte Wasser aus dem H₂O-Tank in den Verdampfer.

Membran Dosierpumpe

Modell: STEPDOS 08 RC, KNF Neuberger

Förderleistung: 48- 4800 ml/h (Milliliter/Stunde)



Abbildung 12: STEPDOS 08 RC, Wasser Membran-Dosierpumpe [8]

Um eine gute Stellgenauigkeit zu gewährleisten, muss das Spannungssignal mittels U/I-Wandler in ein Stromsignal umgewandelt werden. Bewerkstelligt wird dies mit der U/I-Messwandlerkarte von *Phoenix Contact*.

In Abbildung 13 ist ein Bild des MCR-3-Wege-Trennverstärkers zu sehen.



Abbildung 13: Phoenix Contact MCR-3-Wege-Trennverstärker (MCR-C-U/I-0-DC) [9]

In der folgenden Abbildung 14 ist das Blockschaltbild ersichtlich.

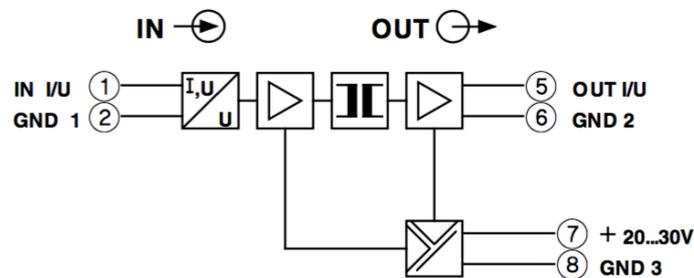


Abbildung 14: Blockschaltbild des U/I-Wandlers (Modulation, galvanischer Entkoppler, Demodulation) [10]

Der Trennverstärker sorgt für eine galvanische Trennung von analogen Normsignalen. Moduleingang und -ausgang werden über integrierte DC/DC-Wandler galvanisch getrennt vom Netz versorgt (3-Wege-Trennung). Die MCR-Module garantieren die sichere Entkopplung des Sensorkreises vom Auswertkreis und vermeidet somit auch die gegenseitige Beeinflussung mehrerer Sensorkreise untereinander [10].

Zur Spannungsversorgung des U/I-Wandlers wird ein 24 V *ABB* Netzgerät verwendet.

Verdampfer (9)

Der Verdampfer wird dazu eingesetzt, um das Trägergas (Arcal oder H₂) mit flüssigem Wasser zu vermischen.

HOVAPOR Verdampfersystem LF 6000

Zu befeuchtender Gasstrom: 120-1800 NI/min

Dosierbereich H₂O: 300-6000 g/h

In Abbildung 15 ist das Blockschaltbild des Verdampfers und in Abbildung 16 das Heizungsmodul des Verdampfers zu sehen.

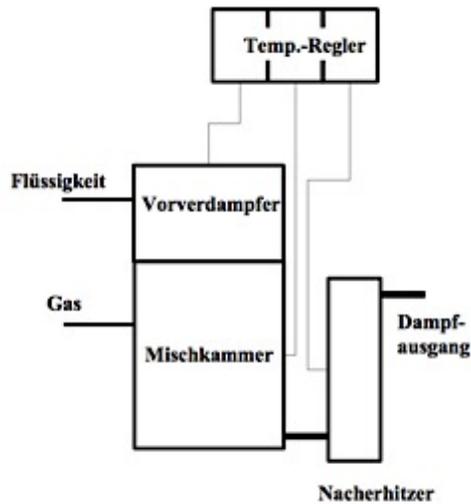


Abbildung 15: Blockschaltbild des HOVAPOR LF 6000 Verdampfers [11]



Abbildung 16: Heizungsmodul des HOVAPOR LF 6000 Verdampfers [11]

Das Wasser wird unter Druck in den Vorverdampfer dosiert und dort teilweise und in der Mischkammer vollständig verdampft. In die Mischkammer kann das Gas zur Befeuchtung eingeleitet werden, es ist aber nicht unbedingt für den Verdampfungsprozess notwendig. Das Gasdampfgemisch wird im direkt angeschlossenen Nacherhitzer auf die gewünschte Ausgangstemperatur geheizt.

Die Temperaturvorgabe am Heizungsmodul des Verdampfers war in den folgenden 3 Stufen fix einzustellen:

- 180 °C Vorverdampfer
- 200 °C Mischkammer
- 200 °C Nacherhitzer

Heizbänder (10, 22)

Die Heizbänder sind notwendig, um eine vorhandene Wärmequelle (Industrieabgaswärme) zu simulieren. Sie heizen die Luft- und Brenngasseite auf jeweils 200 °C vor, bevor die Gase den elektrischen Gasheizer erreichen.

Auf der Brenngasseite wird das Heizband *HORST HBQ 2,0m* ($P = 700 \text{ W}$, $T_{\max} = 900 \text{ °C}$) verwendet und auf der Luftseite das *HORST HBS 1,0m* ($P = 250 \text{ W}$, $T_{\max} = 450 \text{ °C}$).

Netzteile (11, 23, 24)

Um den Prüfstand korrekt betreiben zu können, sind 3 Netzteile notwendig. Zwei idente Netzteile für den elektrischen Gasheizer (Brenngas- und Luftseite) und ein Netzteil für den *SOEC*-Stack.

In Abbildung 17 und Abbildung 18 sind die Netzteile zur Energieversorgung zu sehen.



Abbildung 17: Eines der zwei Netzteile für den elektrischen Gasheizer der Marke "Delta Elektronik SM 15-200 D" [12]



Abbildung 18: Netzteil für den *SOEC*-Stack der Marke "Plating Electronic Power Station pe4606-2" [13]

Unter Volllast benötigen die Netzteile für den Gasheizer jeweils 3 kW und das Netzteil für den *SOEC*-Stack ca. 4,5 kW.

Für die PIN-Belegung der Steckverbindungen der beiden Netzteile siehe APPENDIX G.

Elektrischer Gasheizer (12)

Um die Gase, nachdem sie mittels Verdampfer und Heizbänder auf ca. 200 °C gebracht wurden, auf Betriebstemperatur von ca. 800-950 °C zu bringen, ist der elektrische Gasheizer notwendig. Seine maximal zulässige Arbeitstemperatur liegt bei 1000 °C. Pro Heizstrang ist ein Netzteil notwendig, um eine separate Regelung der Heizkreise gewährleisten zu können.

In Abbildung 19 ist der Prinzip-Aufbau des elektrischen Gasheizers zu sehen.

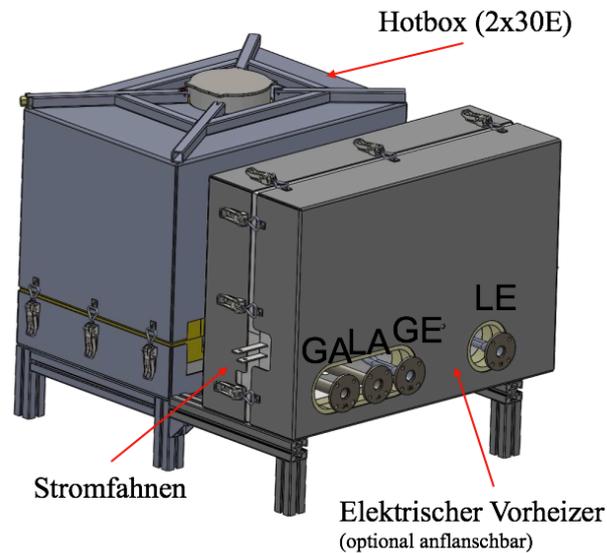


Abbildung 19: Konzeptzeichnung des elektrischen Gasheizers [5]

Die Abkürzungen in Abbildung 19 stehen für die verschiedenen Gaseingänge des elektrischen Gasheizers:

- GA: Gasausgang Brenngas
- LA: Luftausgang
- GE: Gaseingang Brenngas
- LE: Lufteingang

Beim elektrischen Gasheizer ist rigoros darauf zu achten, dass die minimale Gasflussmenge nie weniger als 600 NI/h beträgt. Unterschreitet man diesen Wert besteht die Gefahr, dass die Rohrleitungen innerhalb des elektrischen Gasheizers zu heiß werden und wegschmelzen.

Spannungsmessung mittels CVM (13)

Die Spannungsabgriffe der einzelnen Zellen sind schon fix verdrahtet und mittels eines 15-poligen D-Sub Steckers ausgeführt. Für die Belegung der PINs siehe APPENDIX H.

Der 15-polige D-Sub Stecker wird mit der *CVM* (*Cell Voltage Monitoring*) verbunden. Es werden 10 Spannungssignale erfasst, wobei jedes Spannungssignal für die Summe über 6 Zellen zu sehen ist. Die Einzelzellspannung darf 1,6 V nie überschreiten. 6 Zellen ergeben somit maximal 9,6 V und 10 Spannungssignale in Serie somit maximal 96 V. Die *CVM* kann maximal 100 V erfassen, und ist somit ideal geeignet, um die Spannungsmessung des *SOEC*-Stacks sicher und korrekt auszuführen.

SOEC-Hotbox (14)

Mit der Bezeichnung „Hotbox“ ist das gesamte Gehäuse mit integriertem *SOEC*-Stack, Temperatur- und Drucksensoren, Lufteingang/-ausgang und Brenngaseingang/-ausgang gemeint. In Abbildung 20 ist die *Hotbox* im Querschnitt zu sehen.

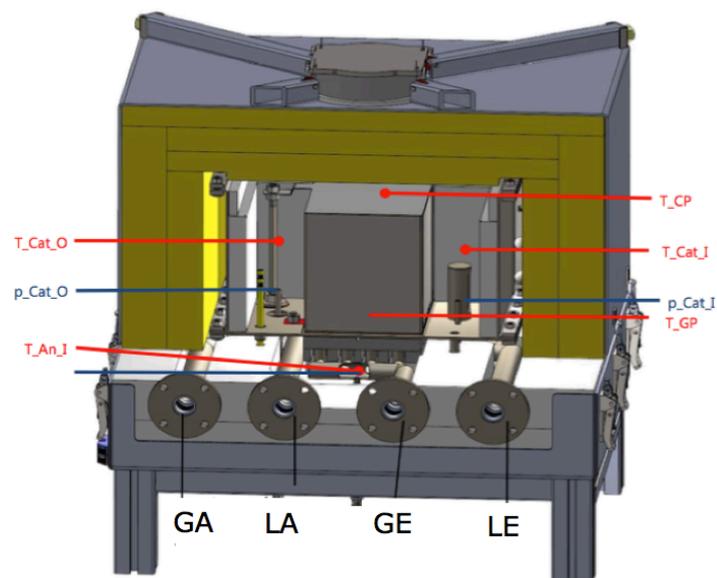


Abbildung 20: Querschnitt der Hotbox mit ersichtlichen Anschlüssen [5]

An der Unterseite der *Hotbox* befinden sich folgende Anschlüsse:

- 2 Stromfahnen für die Gleichstromversorgung des *SOEC*-Stacks
- 4 Anschlüsse für Drucksensoren (Eingang Luft- und Brenngasseite, Ausgang Luft- und Brenngasseite)
- 4 Thermoelemente (Eingang Luft- und Brenngasseite, Ausgang Luft- und Brenngasseite)

Folgende Betriebsgrenzen sind durch den Hersteller der *Hotbox (Fraunhofer IKTS)* vorgegeben [14]:

- T_{\max} : 900 °C
- $\Delta T (T_{\text{input}} - T_{\text{output}})$: < 250 °C
- I_{\max} : 50 A
- Δp : 100 mbar
- U_{\max} : 1,6 V
- dT/dt : 5 °C/min
- dI/dt : 10 A/min

Wassergekühlter Gaskondensator (15, 25)

Um die Abgase von Brenngas- und Luftausgang in den allgemeinen Gasabzug beimengen zu dürfen, müssen diese auf 50 °C abgekühlt werden. Zusätzlich zur Gaskühlung entfernt der Gaskondensator einen im Gasgemisch vorhandenen Restwasserdampf und scheidet diesen in einen Wassertank aus.

ABB-Gasanalyse (18)

Zur Gasmessung wird das Gasanalysegerät *ABB AO2020* verwendet. Vor Inbetriebnahme muss der Gasstrang mit Stickstoff gespült und kalibriert werden. Folgende Gase werden mit dem *ABB-Gasanalyse-Gerät* kontinuierlich gemessen und im Sekundentakt gespeichert:

O₂, CH₄, H₂, CO₂, CO.

2.3 MECHANISCHER AUFBAU

Damit das PoC System 1 realisiert werden kann, werden die Komponenten nun am Prüfstand aufgebaut. In Abbildung 21 ist ein Überblick über den Aufbau im Labor zu sehen.

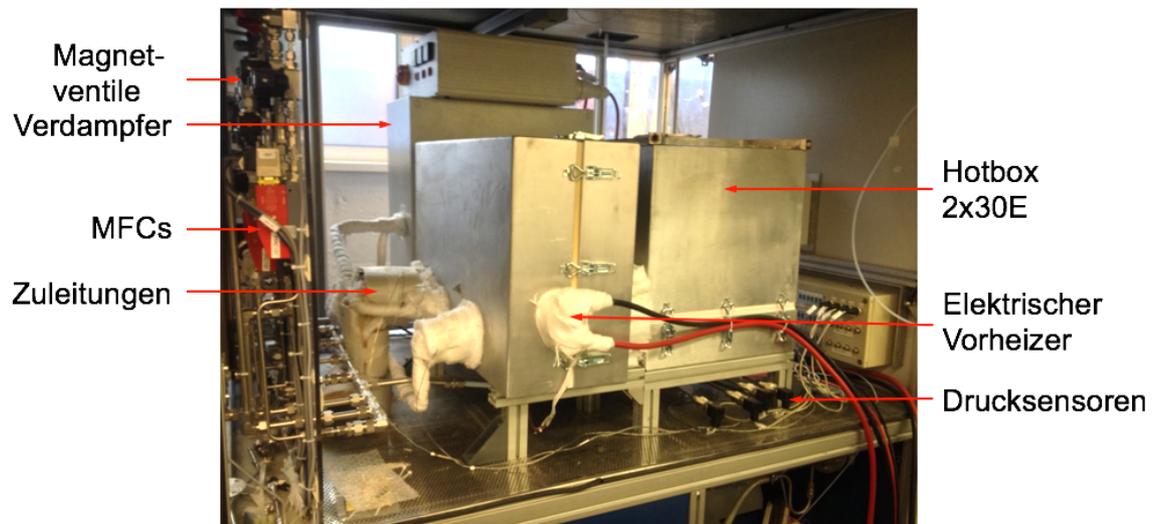


Abbildung 21: PoC System 1 am Prüfstand

Um eine sichere Umgebung und einen sicheren Betrieb zu gewährleisten, werden sämtliche Prototypen (Elektrischer Gasheizter, *SOEC*-Hotbox) in einer Laborbox untergebracht. Diese Laborbox ist mit Plexiglasscheiben verschließbar und besitzt einen kontinuierlichen Gasabzug an der Decke. Dies gewährleistet selbst bei undichten Komponenten einen sicheren Betrieb, weil die austretenden Gase sofort in den Abzug gesaugt werden.

In Abbildung 21 sieht man auf der linken Seite außerhalb der geschützten Laborbox die Gaszuleitungen mit den Magnetventilen und nachgeschalteten *MFCs*. In der geschützten Umgebung ist der Verdampfer, der elektrische Gasheizter und die *SOEC*-Hotbox untergebracht.

2.4 ELEKTRISCHER AUFBAU

Zum Verständnis des elektrischen Aufbaus soll Abbildung 22 eine Übersicht über den elektrischen Prüfstands Aufbau geben.

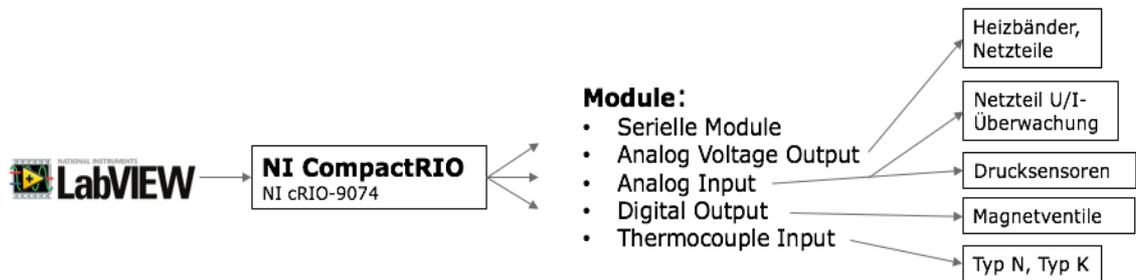


Abbildung 22: Überblick über Informationsfluss von der Steuerung bis hin zu den Magnetventilen [15]

Die Steuerungs- und Bedienoberfläche wird mit dem Programm *LabVIEW* realisiert. Die genauere Beschreibung der Steuerung erfolgt im Kapitel 2.5. Der gesamte Prüfstand muss auch ohne die Regelungs- und Steueroberfläche des Prüfstand-PCs funktionieren. Aus diesem Grund hat man sich für das Produkt „*National Instruments CompactRIO*“ entschieden.

NI CompactRIO

Das Produkt „*NI CompactRIO*“ besteht aus 3 Hardware- und einer Softwarekomponente:

- Controller: Er enthält einen Prozessor und einen konfigurierbaren *FPGA*. Der Prozessor ist zuständig für die Netzwerkkommunikation, Datenprotokollierung, Steuerung, Regelung und Verarbeitung. Der *FPGA* ermöglicht das Implementieren benutzerspezifischer Hardware (Hochgeschwindigkeitssteuerung, komplexe Timing- und Trigger-Routinen, usw.) [16]

- Chassis: Das Chassis ist ein Gehäusemodul, welches die verschiedenen Geräte, Module und Controller via Steckmechanismus kombiniert
- Geräte/Module: folgende Module sind am Prüfstand verbaut
 - NI cRIO-9074
 - NI9871 (4-Port, RS485/RS422 Serial Module)
 - NI9264 (16-Channel, $\pm 10\text{ V}$, 16-Bit Analog Voltage Output Module)
 - NI9205 (32-Channel, $\pm 20\text{ mV}$ to $\pm 10\text{V}$, 16-Bit Analog Input Module)
 - NI9208 (16-Channel, $\pm 20\text{ mA}$, 24-Bit Analog Input Module)
 - NI9474 (8-Channel, Digital Output Module): 3 Stück
 - NI9213 (16-Channel Thermocouple Input Module)
- *LabVIEW*: Bedienoberfläche am Prüfstands-PC um die Steuerung und Regelung anschaulich und einfach zu gestalten

Der Controller übernimmt die gesamte Steuerung und Regelung des Prüfstandes, sollte der Prüfstands-PC mit der Bedienoberfläche ausfallen. Die verschiedenen Module enthalten die Schnittstelle zur Sensorik und den Aktuatoren.

Im APPENDIX A finden sich detailliertere Beschreibungen zwecks Verbindungen zwischen den verschiedenen Schnittstellen/Geräten.

2.5 STEUERUNG

Die Steuerung und Regelung des Prüfstandes wird mittels dem Programm *LabVIEW* aufgebaut. In Abbildung 23 ist das Frontend der Bedienoberfläche für das PoC System 1 zu sehen.

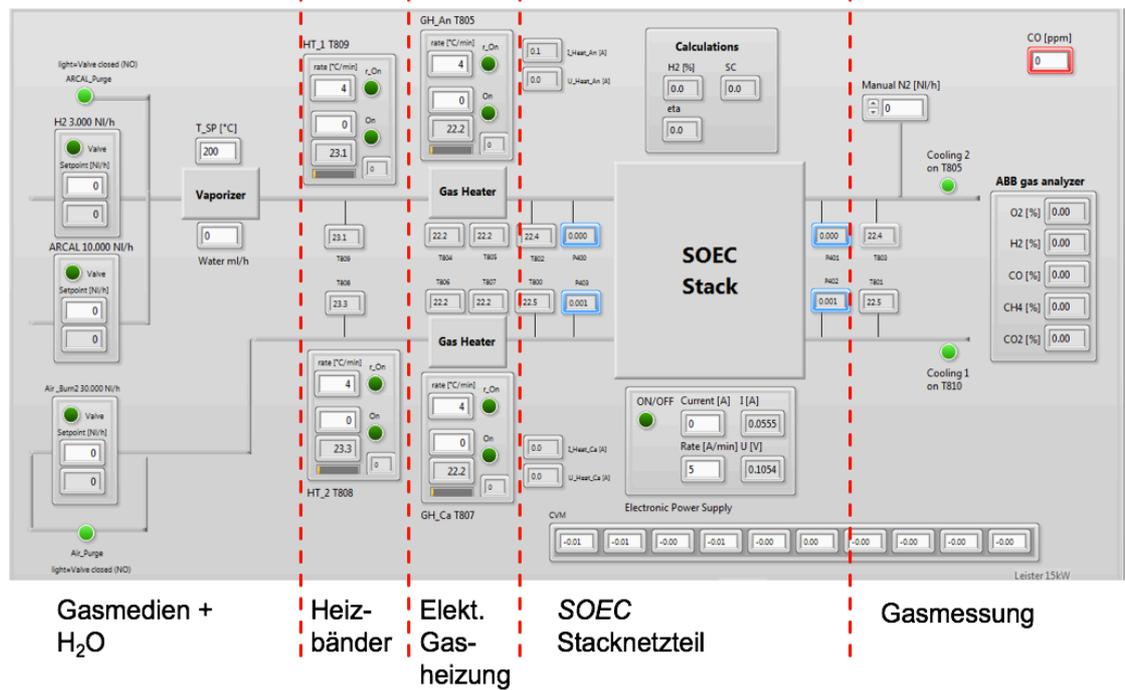


Abbildung 23: Bedienoberfläche zur Steuerung und Regelung des PoC System 1

2.6 BERECHNUNGEN

Die folgenden Berechnungsmethoden werden sowohl im Block „Calculations“ (Abbildung 23 Mitte, oberhalb des Blockes „SOEC Stacknetzteil“) als auch bei der Auswertung gleichermaßen angewandt.

2.6.1 MESSUNG UND UMRECHNUNG DES WASSERSTOFFS

Befindet man sich im Elektrolyse-Betrieb der *SOEC-Hotbox*, so besteht die Gaszusammensetzung am BG-Ausgang (Brenngas) im idealen Fall nur mehr aus Wasserstoff und dem nicht vermeidbaren Restwasserdampf. Durch den Gaskondensator wird der restliche Wasserdampf ausgeschieden und es bleibt der durch den *SOEC*-Stack produzierte Wasserstoff übrig. Das *ABB* Gasanalyse Gerät misst kontinuierlich folgende Gase: O₂, CH₄, H₂, CO₂, CO.

Im Elektrolyse-Betrieb ergibt sich somit ein theoretischer Wert von 100 % H₂. Es kann somit zwar festgestellt werden, dass sich die *Hotbox* im Elektrolyse-Betrieb befindet, jedoch ist eine quantitative Aussage über die produzierte Wasserstoffmenge nicht möglich.

Zur Behebung dieses Problems wird der produzierte Wasserstoff ca. 1 m vor der Stichleitung der *ABB* Gasmessung mit einer fixen Menge Stickstoff ($V_{N_2, zu} = 400 \text{ NI/h}$) vermischt. Die Rohrlänge von 1 Meter verspricht eine ausreichend genaue Vermischung der beiden Gase und der nun gemessene H_2 -Prozentsatz kann durch die fix vorgegebene Stickstoffmenge quantitativ ausgewertet werden.

Um die Berechnungen nachvollziehen zu können dienen folgende Formeln, welche als Herleitung dienen. Das Volumsverhältnis von Wasserstoff zum Stickstoff berechnet sich wie folgt in Formel (4):

$$\%H_2 = \frac{V_{H_2, mess}}{V_{N_2, zu} + V_{H_2, mess}} \cdot 100 \quad (4)$$

$\%H_2$	...	Gemessener H_2 in %
$V_{H_2, mess}$	...	Volumenstrom des Wasserstoffs im Messgas in NI/h
$V_{N_2, zu}$	...	Volumenstrom N_2 im Messgas in NI/h

Durch Umformung der Formel (4) auf $V_{H_2, mess}$ kann auf den produzierten H_2 -Volumenstrom zurückgerechnet werden.

$$V_{H_2, mess} = V_{N_2, zu} \cdot \frac{\%H_2}{1 - \%H_2} = V'_{H_2, erz} \quad (5)$$

$V'_{H_2, erz}$...	Erzeugter Volumenstrom H_2 in NI/h
-----------------	-----	--------------------------------------

Voraussetzung dieser Berechnung ist, dass sich das Messgas gut vermischt hat und die einzelnen Gase dieselbe Temperatur und Druck aufweisen. Befinden sich die Volumenströme unter Normalbedingungen ($1,01325 \cdot 10^5 \text{ Pa}$, 25 °C) so kann mittels folgender Formel (6) auf den Massenstrom umgerechnet werden.

2) Systemstudie 1 – elektrischer Gasvorheizter

$$m'_{H_2,erz} = V'_{H_2,erz} \cdot \frac{M_{H_2}}{V_n} \quad (6)$$

$m'_{H_2,erz}$... Erzeugter Gesamtmassenstrom H_2 in g/h
 M_{H_2} ... Molare Masse H_2 in g/mol
 V_n ... Normvolumen in l/mol

Da eine reduzierte Atmosphäre im *SOEC*-Stack aufrechtgehalten werden muss, muss dem Wasserdampf eine gewisse Menge Wasserstoff beigemischt werden.

$$\frac{H_2O_{mol}}{H_2,mol} = 0,8 \quad (7)$$

H_2O_{mol} ... Molare H_2O -Menge BG Eingang in mol
 H_2,mol ... Molare H_2 -Menge BG Eingang in mol

Um die tatsächliche erzeugte Menge an Wasserstoff zu berechnen, muss der hinzugefügte Wasserstoff vom gesamt erzeugten Wasserstoff abgezogen werden.

$$m_{H_2,erz} = m'_{H_2,erz} - V_{H_2,zu} \cdot \frac{M_{H_2}}{V_n} \quad (8)$$

$m_{H_2,erz}$... Tatsächlich produzierter Massenstrom H_2 in NI/h
 $V_{H_2,zu}$... Zuführter H_2 -Volumenstrom BG-Eingang in NI/h

Als Übersicht über die Berechnungen des erzeugten Wasserstoffes dient Abbildung 24.

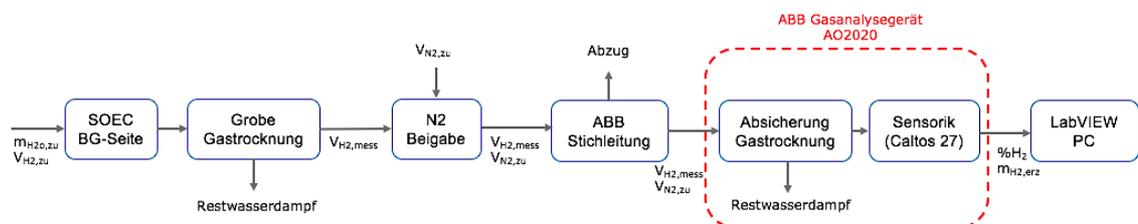


Abbildung 24: Übersicht über die Gasmessung und die Berechnung des Wasserstoffgehaltes

2.6.2 STEAM CONVERSION

Die *SC* (*Steam Conversion*) wird zu deutsch Dampfausnutzungsrate genannt. Die Beschreibung dieses Wertes wird in den folgenden Formeln dieses Kapitels näher gebracht.

Über die Stoffmenge des erzeugten Wasserstoffs lässt sich auf den bei der Elektrolyse entstandenen Wasserumsatz schließen:

$$n_{H_2,erz} = \frac{m_{H_2,erz}}{M_{H_2}} \quad (9)$$

$n_{H_2,erz}$... Stoffmenge H_2 erzeugt in NI/h

Aus der nun errechneten Stoffmenge kann die umgesetzte Wassermasse berechnet werden. Diese dient als Grundlage zur Berechnung der SC.

$$m_{H_2O,Umsatz} = n_{H_2,erz} \cdot M_{H_2O} \quad (10)$$

$m_{H_2O,Umsatz}$... Umgesetzter Wasserdampf in NI/h
 M_{H_2O} ... Molare Masse H_2O in mol

Damit ergibt sich die Steam Conversion zu:

$$SC = \frac{m_{H_2O,Umsatz}}{m_{H_2O,zu}} \quad (11)$$

2.6.3 WIRKUNGSRADE

In dieser Arbeit werden 2 unterschiedliche Wirkungsgrade betrachtet. Der technische Wirkungsgrad bezieht sich nur auf die *Hotbox* selbst und der Systemwirkungsgrad betrachtet zusätzlich zur *Hotbox* noch den elektrischen Gasheizer und integriert diesen in die Wirkungsgradbetrachtung.

2.6.3.1 TECHNISCHER WIRKUNGSGRAD

Der technische Wirkungsgrad betrachtet nur die *SOEC-Hotbox*. Die Berechnungsmethodik ist in Formel (12) zu sehen.

$$\eta_{\text{technisch}} = \frac{\frac{H_{2,\text{erz}}}{1000} \cdot \frac{HW_{H_2}}{1000}}{U_{\text{Stack}} \cdot I_{\text{Stack}}} \quad (12)$$

$\eta_{\text{technisch}}$	...	Technischer Wirkungsgrad in %
$H_{2,\text{erz}}$	...	Produzierter H_2 in g/h
HW_{H_2}	...	Heizwert H_2 in kWh/kg
U_{Stack}	...	Spannung Stack-Netzteil in V
I_{Stack}	...	Strom Stack-Netzteil in A

2.6.3.2 SYSTEMWIRKUNGSGRAD

Zusätzlich dem technischen Wirkungsgrad wird beim Systemwirkungsgrad noch die Leistung des elektrischen Gasheizers miteinbezogen. Der elektrische Gasheizer wird mit zwei Netzteilen versorgt (ein Netzteil für die Luft- und ein Netzteil für die Brenngasseite). Der Systemwirkungsgrad ist in Formel (13) genauer beschrieben.

$$\begin{aligned} \eta_{\text{System}} &= \frac{\frac{H_{2,\text{erz}}}{1000} \cdot \frac{HW_{H_2}}{1000}}{P_{\text{Stack}} + P_{\text{BG,Gasheizer}} + P_{\text{Luft,Gasheizer}}} \\ &= \frac{\frac{H_{2,\text{erz}}}{1000} \cdot \frac{HW_{H_2}}{1000}}{U_{\text{Stack}} \cdot I_{\text{Stack}} + U_{\text{BG}} \cdot I_{\text{BG}} + U_{\text{Luft}} \cdot I_{\text{Luft}}} \end{aligned} \quad (13)$$

η_{System}	...	Systemwirkungsgrad in %
U_{BG}	...	Spannung elekt. Gasheizer Brenngas in V
I_{BG}	...	Strom elekt. Gasheizer Brenngas in A
U_{Luft}	...	Spannung elekt. Gasheizer Luft in V
I_{Luft}	...	Strom elekt. Gasheizer in A

2.7 VERSUCHSBESCHREIBUNG

Damit eine fundierte Leistungsaussage über die *SOEC-Hotbox* und des Prüfaufbaus erstellt werden kann, werden folgende Arbeitspunkte angefahren:

1. Steam Conversion: 70 %, 75 %, 80 %, 95 %
2. Temperatur BG Ausgang: 750 °C, 780 °C, 800 °C, 820 °C
3. *SOEC* Stack Strom: 30 A, 35 A, 40 A, 45 A, 50 A

Damit wird der Prüfstand an 100 verschiedenen Arbeitspunkten betrieben.

Folgende Betriebsparameter werden wie folgt gewählt:

1. N₂-Zufuhr für die Gasanalyse: 400 NI/h
2. Wasserstoffgehalt am BG-Eingang: 20 %
3. Reduktionsgas: Arcal (5 % H₂, 95 % N₂)

2.7.1 BETRIEBSARTEN

Um den Prüfstand richtig und sicher betreiben zu können wird in 5 unterschiedliche Betriebsarten unterschieden. Die genaue Beschreibung der einzelnen Betriebsarten ist in den folgenden Unterkapiteln detailliert ausgeführt.

2.7.1.1 AUFHEIZVORGANG

Betriebsparameter:

- BG: 200 NI/h Arcal
- Luft: 3000 NI/h Luft
- I-Stack: 0 A
- Elektrischer Vorheizer: max. +3 °C/min

Beim Aufheizvorgang ist besonders darauf zu achten, dass der Temperaturgradient nicht mehr als +3 °C/min beträgt. Die thermische Masse der *Hotbox* ist so groß, dass die Wärme nicht schneller in den *SOEC*-Stack gebracht werden kann. Ein höherer Temperaturgradient würde auch die maximale Temperaturdifferenz (zwischen BG Eingang und Ausgang) von 150 °C überschreiten. Eine höhere Temperaturdifferenz führt zu Spannungen in den

SOEC-Materialien und kann den Aufbau durch zum Beispiel Rissbildungen unwiderruflich beschädigen.

2.7.1.2 HOT-STANDBY

Betriebsparameter:

- BG: 800 NI/h Arcal
- Luft: 2000 NI/h Luft
- I-Stack: 0 A bzw. -30 A/min (bei Über-/Unterspannung sofort auf 0 A)

Im Fehlerfall oder bei Über-/Unterspannung an den Zellen wird in den Hot-Standby Modus geschaltet. Der Vorteil von diesem Modus ist, dass der Fehler ohne nennbaren Temperatursturz behoben werden kann. Ein Temperatursturz hat hohe Materialspannungen zur Folge und es müsste die *Hotbox* erneut mit einem Temperaturgradienten von max. +3 °C/min auf Betriebstemperatur gebracht werden.

2.7.1.3 ARBEITSPUNKT

Betriebsparameter:

- BG: 80 % H₂O, 20 % H₂ (auf die Molmenge bezogen)
- Luft: 3000 NI/h Luft
- I-Stack: laut gewünschtem Arbeitspunkt mit max. +5 A/min
- Elektrischer Vorheizer: Temperatur auf BG Ausgang laut gewünschtem Arbeitspunkt regeln

Der Wechsel auf der Brenngasseite von Arcal auf H₂O und H₂ muss langsam erfolgen. Es muss ein ständiger Gasfluss von mindestens 600 NI/h vorhanden sein, da sonst der elektrische Gasheizer durchbrennt, da er die Hitze nicht mehr abtransportieren kann.

Gaswechsel auf der Brenngasseite:

- Arcal in Schritten von 300 NI/h verringern
- H₂O um 300 g/h und H₂ um 100 NI/h erhöhen

Nach dem Erreichen der gewünschten Gaszusammensetzung auf der Brenngasseite muss darauf gewartet werden, dass der thermisch eingeschwungene Zustand (Temperatur

stabil, Spannung stabil) erreicht wird. Danach darf der Stack-Strom eingeschaltet werden. Zu beachten ist jedoch, dass der Strom der den *SOEC*-Stack durchfließt, zusätzlich Wärme abgibt. Die erhöhte Temperatur muss durch eine Temperaturreduktion am elektrischen Gasheizer ausgeglichen werden, sodass man die BG-Ausgangstemperatur laut vorgegebenen Arbeitspunkt erreicht.

2.7.1.4 COOL-DOWN

Betriebsparameter:

- BG: 1500 NI/h Arcal
- Luft: 3000 NI/h Luft
- I-Stack: -5 A/min
- Elektrischer Vorheizer: -2 °C/min

Der Wechsel von der Gaszusammensetzung auf der BG-Seite vom *Arbeitspunkt* in den Modus *Cool-Down* muss wiederum langsam erfolgen. Ein höherer, negativer Temperaturgradient am elektrischen Gasheizer ist nicht möglich, da aufgrund der großen thermischen Masse innerhalb von 5 Minuten eine zu hohe Temperaturdifferenz zwischen BG Eingang und Ausgang erreicht werden würde.

Ist eine BG-Ausgangstemperatur von 100 °C erreicht, schaltet man den elektrischen Gasheizer ab und reduziert die Gasflüsse auf 0 NI/h.

2.7.1.5 PURGE/NOTAUS

Betriebsparameter:

- BG: 2500 NI/h Arcal (ausgelegt auf den maximalen H₂O und H₂ Volumenstrom der bei den Arbeitspunkten erreicht werden kann)
- Luft: 3000 NI/h Luft
- I-Stack: -30 A/min (oder 0 A bei Stromausfall)
- Elektrischer Vorheizer: AUS

- Heizbänder: AUS

Folgende Punkte gelten als Trigger für den Purge/Notaus-Modus aus:

- Temperatur am BG Ausgang $> 870\text{ °C}$
- Temperaturdifferenz zwischen BG Eingang und Ausgang $> 150\text{ °C}$
- Druckdifferenz zwischen BG Eingang und Ausgang $> 70\text{ mbar}$
- Stromausfall

Der Purge/Notaus-Modus hat eine hohe Stresswirkung auf den *SOEC*-Stack zur Folge. Es muss oberste Priorität sein, dass der Modus so gut wie möglich vermieden wird.

2.8 ERGEBNISSE DER SYSTEMSTUDIE 1

In Abbildung 25 ist der technische Wirkungsgrad über die BG-Ausgangstemperatur zu sehen. Der thermoneutrale Punkt, in welchem der *SOEC*-Stack weder exotherm noch endotherm ist, liegt bei einer BG-Ausgangstemperatur von ca. 800 °C und es ist zu überprüfen, ob die Simulationsergebnisse mit den Messergebnissen des Prüfstandes übereinstimmen [4].

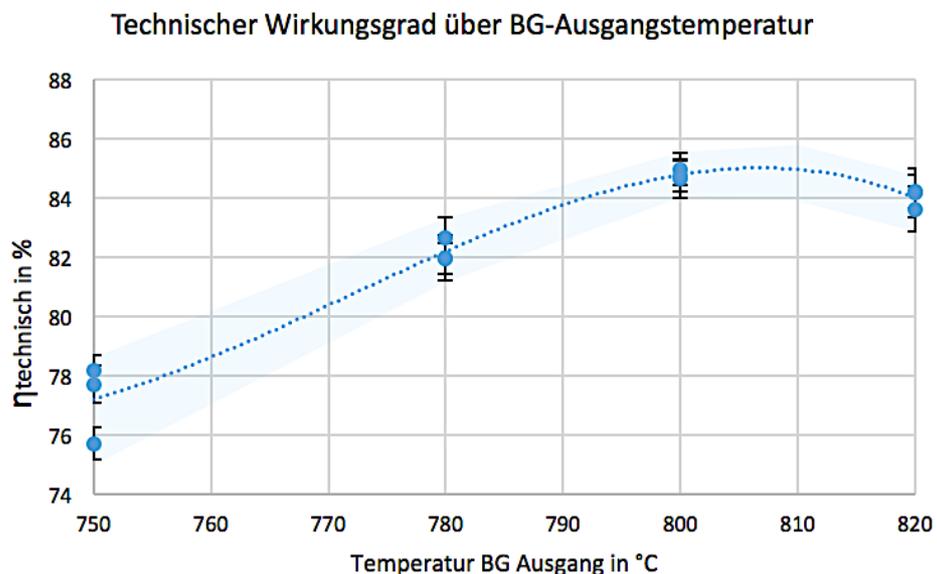


Abbildung 25: Technischer Wirkungsgrad über die BG-Ausgangstemperatur

In Abbildung 25 sieht man, dass der beste Wirkungsgrad bei deiner BG-Ausgangstemperatur von ca. 805 °C erreicht wird. Die Simulationsergebnisse stimmen somit mit den

Ergebnissen des Prüfstandes sehr gut überein. Unter 805 °C ist der *SOEC*-Stack endotherm und benötigt somit mehr Wärmeenergie als er abgibt. Über 805 °C ist der *SOEC*-Stack exotherm. Im optimalen Betriebspunkt von 805 °C erreicht der *SOEC*-Stack einen Wirkungsgrad von 85 %.

Um eine Aussage über die Auswirkung der Brenngaszusammensetzung bzw. -verfügbarkeit auf den Wirkungsgrad machen zu können, ist in Abbildung 26 der technische Wirkungsgrad über die Steam Conversion aufgetragen.

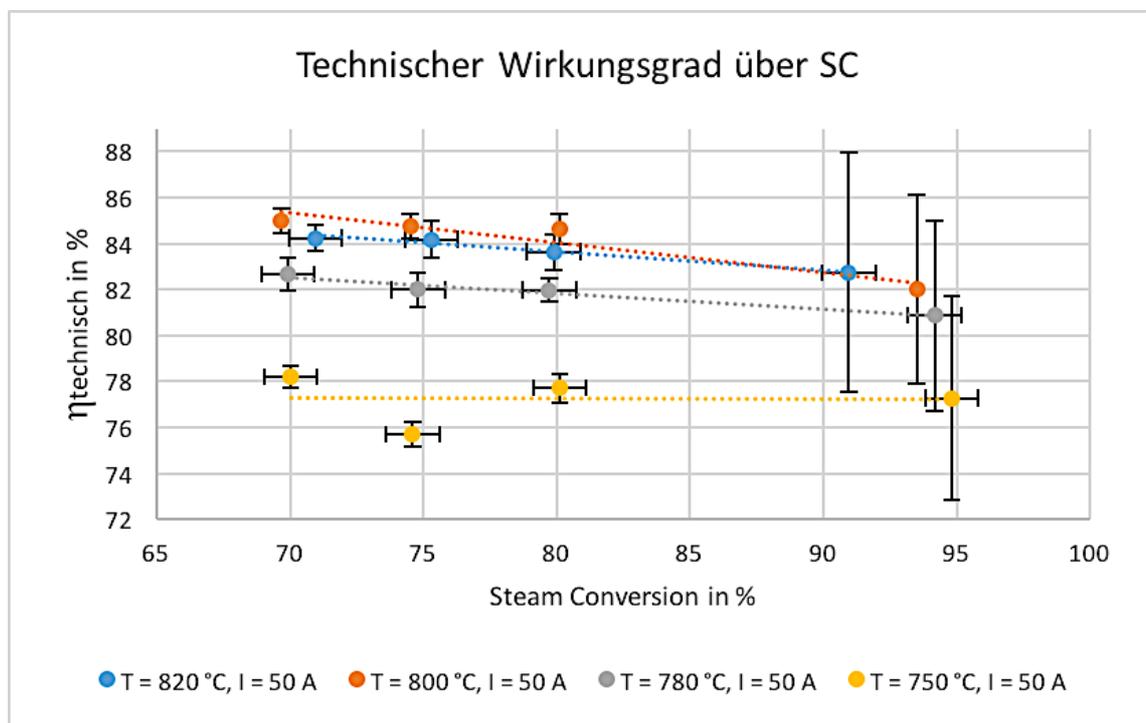


Abbildung 26: Technischer Wirkungsgrad über die Steam Conversion

Je kleiner die Steam Conversion Rate desto mehr Brenngas steht für den *SOEC*-Stack zur Umsetzung zur Verfügung. Laut Theorie muss der Wirkungsgrad mit steigender SC abnehmen, da der *SOEC*-Stack immer weniger BG zur Umwandlung in Wasserstoff zur Verfügung hat. Die Tendenz des Wirkungsgrades ist laut Abbildung 26 mit steigender SC fallend und stimmt somit mit der Theorie überein.

Auffallend ist, dass bei einer SC von ca. 95 % der Fehlerbalken des technische Wirkungsgrades stark schwankt. Bei einer SC von 95 % ist schon so wenig BG zur Umsetzung in

2) Systemstudie 1 – elektrischer Gasvorheizer

Wasserstoff vorhanden, sodass die H_2 -Produktion aufgrund zu wenig verfügbarem Wasserdampf stark schwankt. Dieser Punkt muss im realen Betrieb unbedingt vermieden werden, da der *SOEC*-Stack beschädigt werden kann, wenn zu wenig BG zur Verfügung steht.

Als Systemwirkungsgrad bezeichnet man den technischen Wirkungsgrad inklusive der verbrauchten elektrischen Leistung der Gasheizer. In Abbildung 27 ist der Systemwirkungsgrad über die BG-Ausgangstemperatur aufgetragen. Je höher die Ausgangstemperatur des elektrischen Gasheizers, desto mehr elektrische Leistung wird zum Heizen benötigt. Laut Theorie muss der beste Systemwirkungsgrad bei der niedrigsten Betriebstemperatur vorliegen.

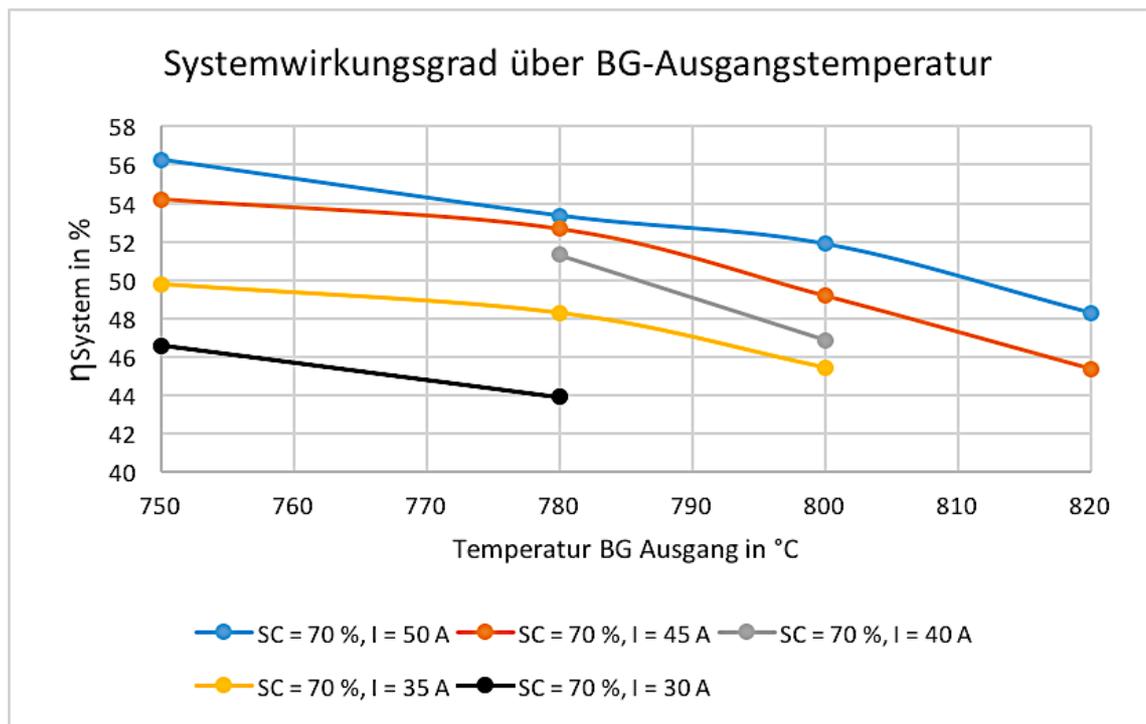


Abbildung 27: Systemwirkungsgrad über die BG-Ausgangstemperatur

In Abbildung 27 sieht man, dass der Systemwirkungsgrad deutlich mit der Betriebstemperatur (BG-Ausgangstemperatur) abnimmt.

Als zweite Auffälligkeit sieht man, dass mit steigendem Stackstrom der Wirkungsgrad zunimmt. Durch den Stackstrom wird der *SOEC*-Stack als Nebeneffekt zusätzlich mitgeheizt. Je höher der Strom desto größer ist dieser Effekt und desto weniger muss das BG durch den elektrischen Gasheizer vorgeheizt werden.

In Abbildung 28 ist die H_2 -Produktionsrate über die BG-Ausgangstemperatur aufgetragen. Laut den *IKTS Fraunhofer* Messdaten (Performance Map) muss der *SOEC*-Stack seinen besten H_2 -Produktionspunkt bei ca. 780-800 °C aufweisen [4].

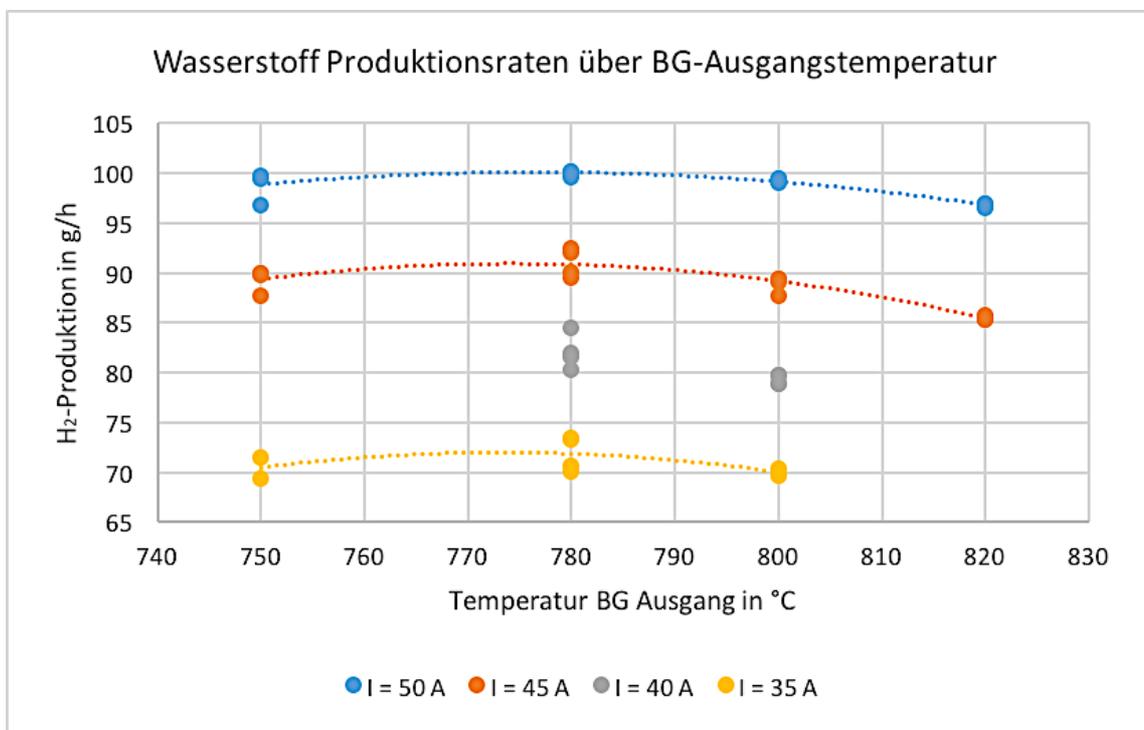


Abbildung 28: H_2 -Produktion über die BG-Ausgangstemperatur

Bei 780 °C ist das Maximum der H_2 -Produktion erreicht und somit ein idealer Betriebspunkt vorhanden.

Deutlich sichtbar ist, dass mit +5 A Stackstrom die H₂-Produktion um 10 g/h ansteigt. Es besteht somit ein wie erwarteter, linearer Zusammenhang zwischen Stromsteigerung und H₂-Produktionsraten.

In Abbildung 29 ist die Leistungsaufnahme des SOEC-Stacks über den Stackstrom und die BG-Ausgangstemperatur aufgetragen. Es ist von Interesse, bei welchem Betriebspunkt der SOEC-Stack für seinen Betrieb am wenigsten Leistung benötigt und somit am effizientesten betrieben werden kann.

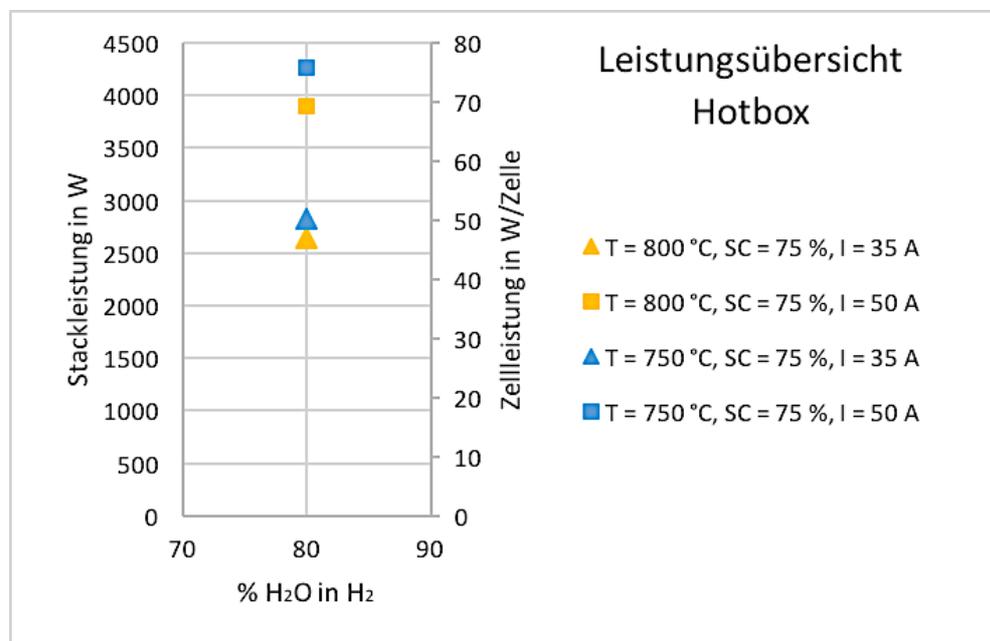


Abbildung 29: Leistungsaufnahme des SOEC-Stacks über den Stackstrom und die BG-Ausgangstemperatur

Ein höherer Stackstrom bedeutet mehr Heizleistung als Nebeneffekt des Stromes. Dadurch sinkt die Leistungsaufnahme des SOEC-Stacks mit steigendem Strom.

Bei steigender Betriebstemperatur sinkt die Zellspannung (Abbildung 30) und somit auch die Leistungsaufnahme. In Abbildung 30 ist die Zellspannung über die Stromdichte bei verschiedenen Temperaturen und Steam Conversions aufgetragen.

2) Systemstudie 1 – elektrischer Gasvorheizer

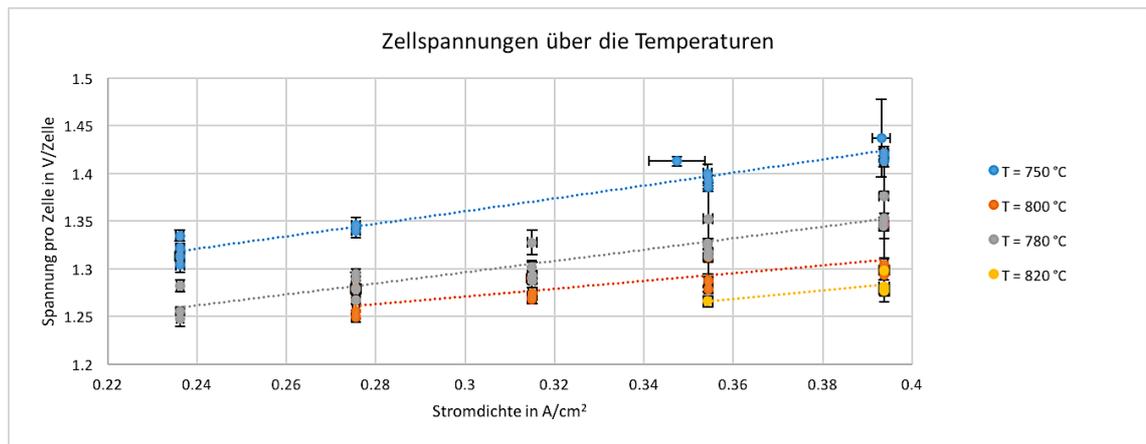


Abbildung 30: Verschiedene Zellspannungen über die Stromdichte

Man sieht, dass die Spannung mit steigender Betriebstemperatur abnimmt.

Abbildung 31 dient zur Übersicht, um die Wirkungsgrade der Simulation mit den Messergebnissen des Prüfstandes vergleichen zu können.

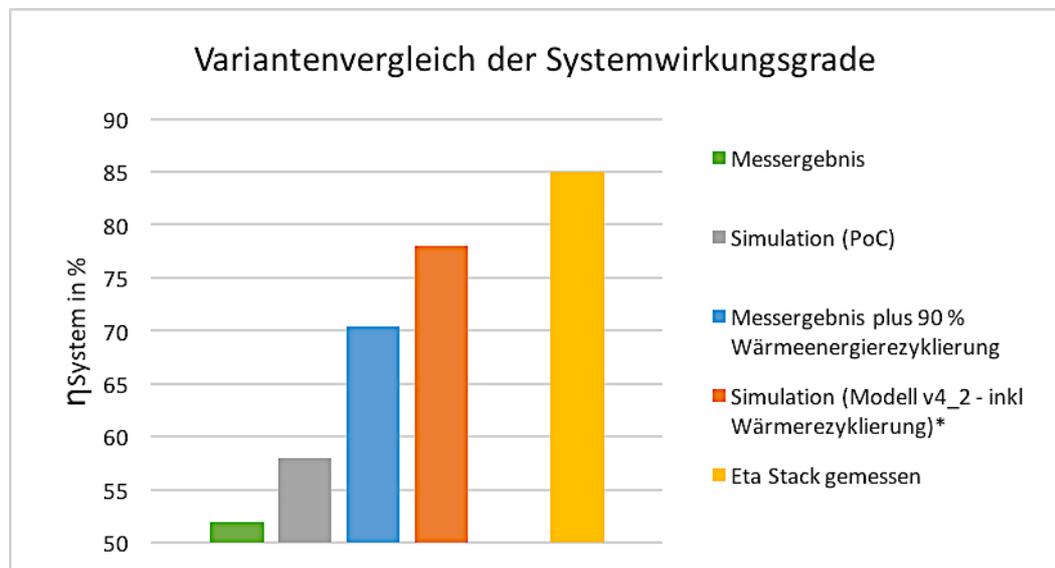


Abbildung 31: Vergleich der Wirkungsgrade der Simulation und des Prüfstandes

Hier werden 2 verschiedene Szenarien basierend auf dem Wirkungsgrad verglichen (als Referenzwirkungsgrad dient der technische Wirkungsgrad mit 85 % gelber, rechter Balken).

1. Systemwirkungsgrad Prüfstand (grün) vs. Simulation (grau)

2. Systemwirkungsgrad Prüfstand (blau) vs. Simulation (orange) inkl. 90 % Wärmerezyklierung

Bei der ersten Variante ohne Wärmerezyklierung erreicht man einen Systemwirkungsgrad von ca. 52 %. Da am *Hotbox*-Ausgang die Gastemperaturen noch ca. 700-820°C (je nach Betriebspunkt) betragen, müssen diese Wärmemengen unbedingt genutzt werden, um zum Beispiel die Gaseingänge zusätzlich vorzuheizen (Rezyklierung ist in Abbildung 32 illustriert). Dadurch würde sich mit einem Abwärmenutzungsgrad von 90 % ein Systemwirkungsgrad am Prüfstand von ca. 71 % erreichen lassen.

Diese Grafik soll verdeutlichen, welches Potential in der optimierten Wärmenutzung liegt und wie stark der Systemwirkungsgrad von diesen Optimierungen abhängt.

In Abbildung 32 ist die mögliche Abgaswärmennutzung und H₂-Rezyklierung eingezeichnet.

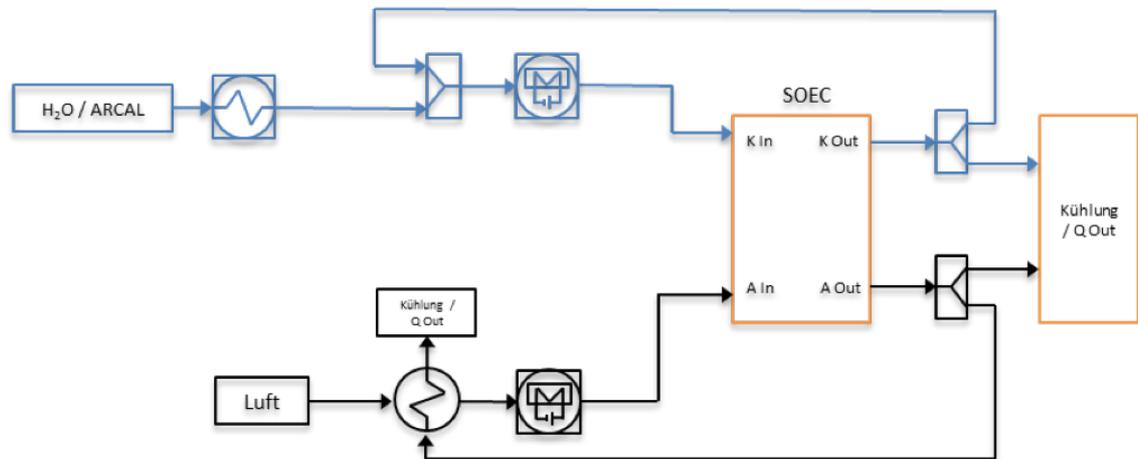


Abbildung 32: Illustrierung der möglichen Abgaswärmerezyklierung

Da am BG-Eingang die Gaszusammensetzung aus Wasserdampf und Wasserstoff besteht ist die Überlegung, ob man vom produzierten Wasserstoff die gewünschte Teilmenge rezykliert, sodass man keinen eigenen Wasserstoff-Tank mehr benötigt.

Auf der Luftseite ist eine einfache Wärmerezyklierung mittels Gaswärmetauscher vor dem elektrischen Gasheizer eingezeichnet.

3 SYSTEMSTUDIE 2 – GASVORHEIZER MITTELS OXI-KAT

Der zweite praktische Teil der Arbeit beschäftigt sich mit einer anderen Variante der Vorheizung der Gase. Die Grundidee ist, dass man einen kleinen Teil des produzierten Wasserstoffs nutzt und rezykliert. Das H_2 -Luft-Gemisch wird mittels Oxidationskatalysator aufgeheizt und die Wärme mittels Gaswärmetauscher an die Eingangsgase des SOEC-Stacks übergeben.

3.1 SIMULATION

In Abbildung 33 ist der Simulationsaufbau für die Variante mit der Gasheizung über Oxi-Kat's und Gaswärmetauscher zu sehen. Das Simulationsmodell stammt aus der vorangegangenen Diplomarbeit [4].

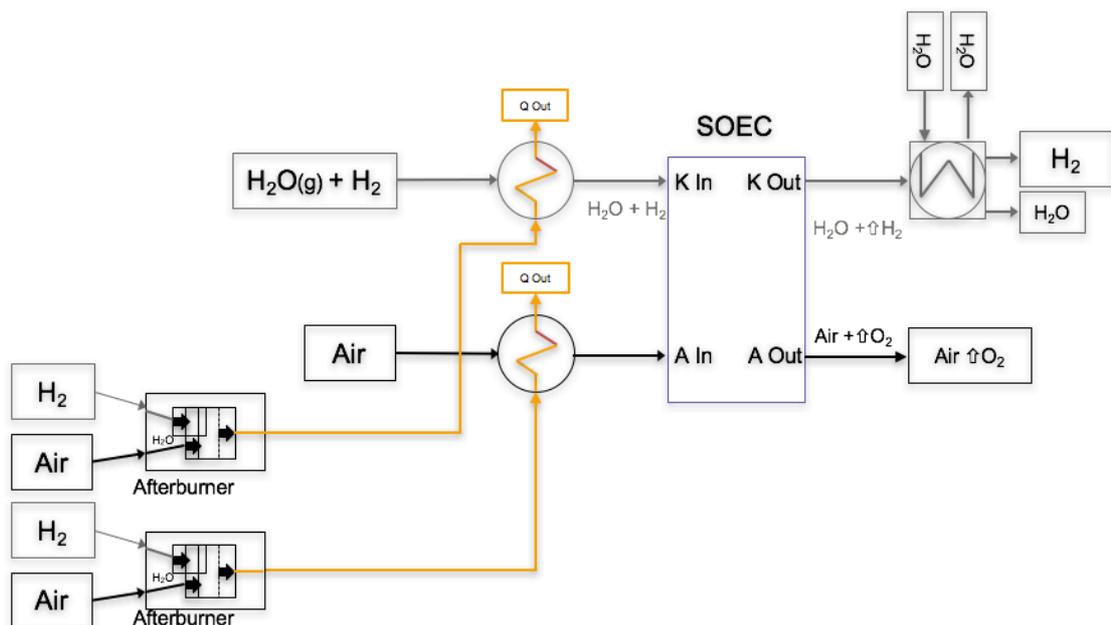


Abbildung 33: Modell PoC System 2 mit Gasheizung über Oxi-Kat und HEX [4]

Um die H_2 -Rezyklierung am Prüfstand zu vereinfachen wird nicht der produzierte Wasserstoff herangezogen. Der technische Aufwand bezüglich des Aufbaus würde zu hoch

3) Systemstudie 2 – Gasvorheizer mittels Oxi-Kat

und komplex sein, um am Prüfstand schnell Ergebnisse zu liefern. Es wird stattdessen der Wasserstoff aus der Versorgungsleitung und *MFCs* bezogen.

In Abbildung 34 ist Aufbau mit den einzelnen Komponenten, welche am Prüfstand verbaut sind, zu sehen. Die Nummerierung der Bauteile ist deckungsgleich mit dem aus PoC System 1, lediglich neue Bauteile haben eine neue Nummer bekommen.

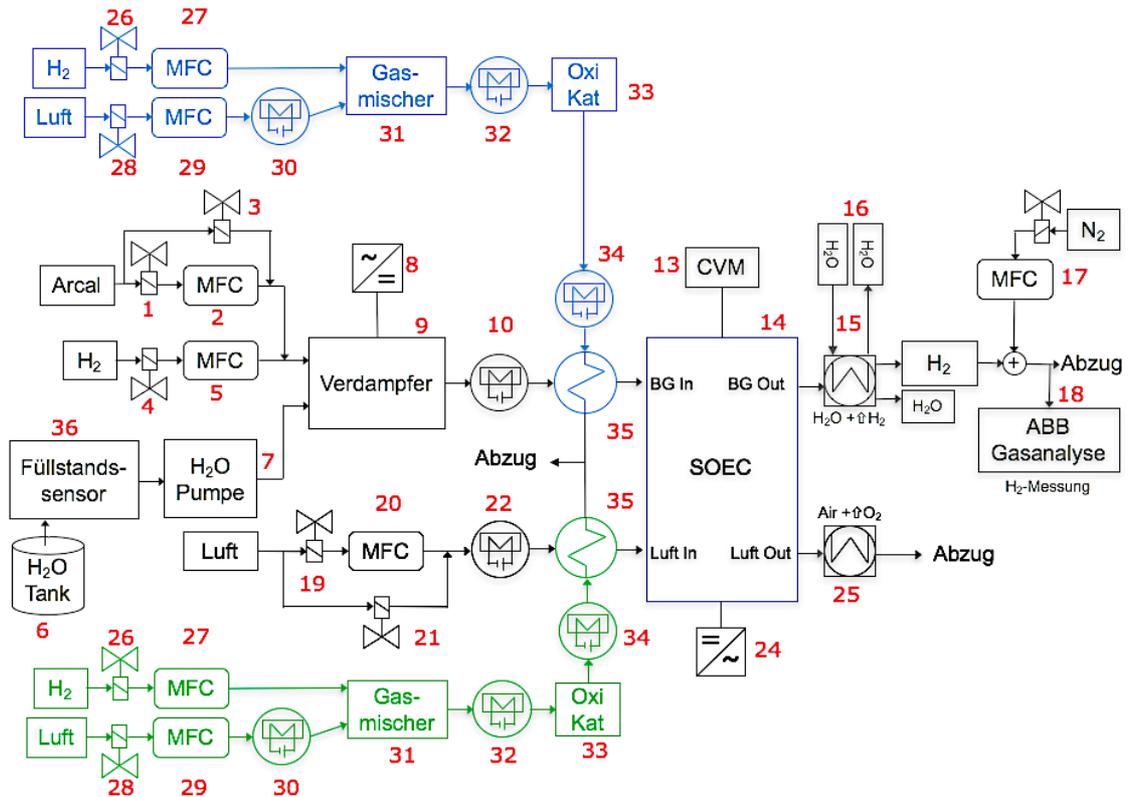


Abbildung 34: PoC System 2 mit allen Komponenten, welche am Prüfstand verbaut sind

Nach genauerer Betrachtung sieht man, dass der blaue Strang (Gasheizung BG-Seite) und der grüne Strang (Gasheizung Luft-Seite) die gleichen Komponenten und Nummerierungen aufweisen. Da der mechanische Aufbau der exakt gleiche für beide Gasseiten ist, ist die Nummerierung bewusst so gewählt um eine redundante Beschreibung zu vermeiden.

3.2 BESCHREIBUNG DER KOMPONENTEN

Um eine doppelte Beschreibung der Komponenten zu vermeiden, sind in diesem Kapitel nur die neu hinzugefügten Komponenten beschrieben.

Oxidationskatalysator – Oxi-Kat

Zum Einsatz kommt ein Oxi-Kat der Firma *Clariant HyProGen CB-104B MH 600cpsl*.

In Abbildung 35 ist ein Schnittbild des verbauten Oxi-Kat's mit Quellmatte zu sehen.

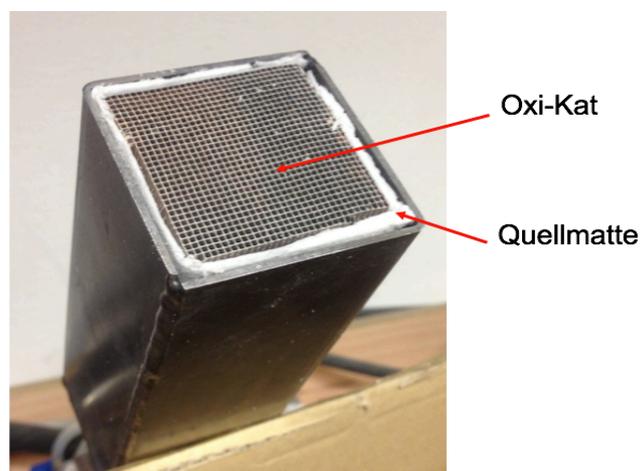


Abbildung 35: Verbauter Oxi-Kat mit Quellmatte

Der Oxi-Kat wird auf das Gehäuse zugeschnitten und um *Slipstreams* (= Gasflüsse nicht durch den Oxi-Kat sondern seitlich vorbei) zu vermeiden, dient die Quellmatte, welche als Dichtung zwischen Gehäuse und Oxi-Kat fungiert.

Die maximale Temperatur der Oxi-Kat's darf 900 °C nicht überschreiten.

Gaswärmetauscher

Zum Einsatz kommt ein Kreuzstrom-Gaswärmetauscher der Firma *Behr*. Das Datenblatt befindet sich im APPENDIX F.

3.3 MECHANISCHER AUFBAU

Der mechanische Aufbau bleibt beim PoC System 2 prinzipiell gleich wie beim PoC System 1, es wird nur der elektrische Gasheizer gegen den Aufbau mit Oxi-Kat's und HEX getauscht.

In Abbildung 36 ist der Aufbau der Einzelkomponenten (Gasmischer, Oxi-Kat und HEX) zu sehen.

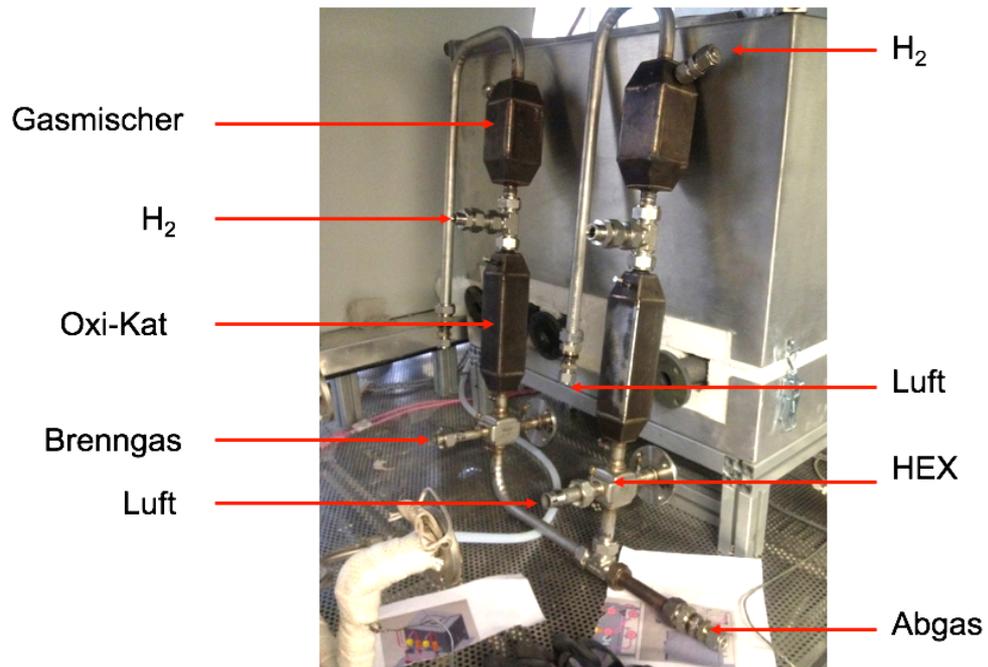


Abbildung 36: Komponentenansicht für die Gasheizung des PoC System 2

Der elektrische Gasheizer wurde schon von der *Hotbox* entkoppelt. In Abbildung 36 sieht man die Anschlüsse der *SOEC-Hotbox* wo der neue Aufbau zur Gasheizung angeschlossen wird.

3) Systemstudie 2 – Gasvorheizer mittels Oxi-Kat

Als Vergleich ist in Abbildung 37 der gesamte Aufbau mit der neuen Gasheizungsvariante am Prüfstand zu sehen.

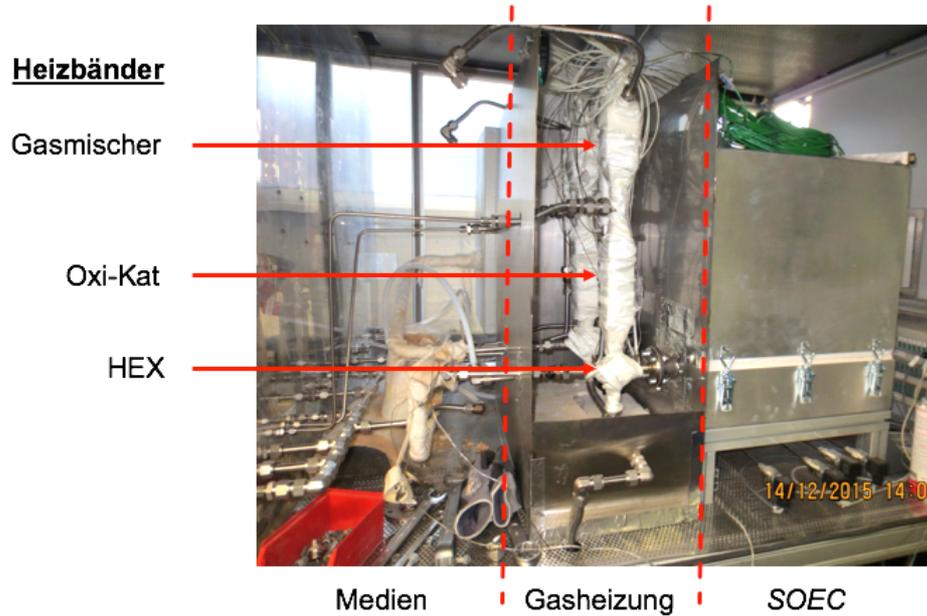


Abbildung 37: Mechanischer Aufbau des PoC System 2 am Prüfstand

Die Katalysatoren benötigen eine Oberflächentemperatur von ca. 400 °C um ein H₂-Luft-Gasgemisch erfolgreich kalt zu verbrennen [17]. Um diese Temperatur zu erreichen, wird der Gasstrang mittels Heizbänder vorgeheizt.

Der Vorgang wird in 3 Stufen unterteilt:

1. Heizband für die Luftzufuhr vor dem Gasmischer
2. Heizband welches über das Gehäuse des Oxi-Kat's gewickelt ist
3. Heizband welches über den HEX gewickelt ist

Alle 3 Heizbänder werden auf 450 °C Solltemperatur eingestellt, sodass das H₂-Luft-Gemisch mit dem Oxi-Kat sicher reagiert und kalt verbrennt.

Ist ein H₂-Prozentsatz von 5 % erreicht, können die Heizbänder aufgrund der laufenden kalten Verbrennung des H₂-Luft-Gemisches am Oxi-Kat abgeschaltet werden. Der Prozess ist von da an selbsterhaltend. Pro 1 % H₂-Gehalt Steigerung im Gasgemisch kann eine Temperatursteigerung von ca. 100°C erwartet werden.

Bei H₂-Luft-Gasgemischen muss man besonders vorsichtig sein da es ein explosives Gemisch ist. Ein Prozentsatz zwischen 4 %Mol und 77 %Mol Wasserstoff in der Luft gilt als explosionsfähiges Gasgemisch [18].

3.4 ELEKTRISCHER AUFBAU

Da der elektrische Gasheizer durch den Aufbau mit den Oxi-Kat's und HEX ersetzt wird, ändert sich diesbezüglich auch der elektrische Aufbau.

Folgende Bauteile werden am Prüfstand entfernt:

- Elektrischer Gasheizer
- 2 Gleichstromnetzteile für den elektrischen Gasheizer
- 4 TC Typ N mit galvanischer Entkopplung

Folgende Bauteile werden am Prüfstand hinzugefügt

- 2 Oxi-Kat's
- 2 HEX
- 2 Gasmischer
- 10 TC Typ N
- 6 Heizbänder
- 2 H₂ MFC (500 l/h)
- 2 Luft MFC (3000 l/h)

Der Rest des elektrischen Aufbaus am Prüfstandes bleibt ident wie im PoC System 1.

3.5 STEUERUNG

Da beim PoC System 2 nur die Art der Gasheizung ausgetauscht wird sollte sich das auch in der Bedienoberfläche widerspiegeln. Der prinzipielle Aufbau soll gleichbleiben und um die neuen Komponenten ergänzt werden.

In Abbildung 38 ist die Bedienoberfläche für den PoC System 2 Aufbau zu sehen.

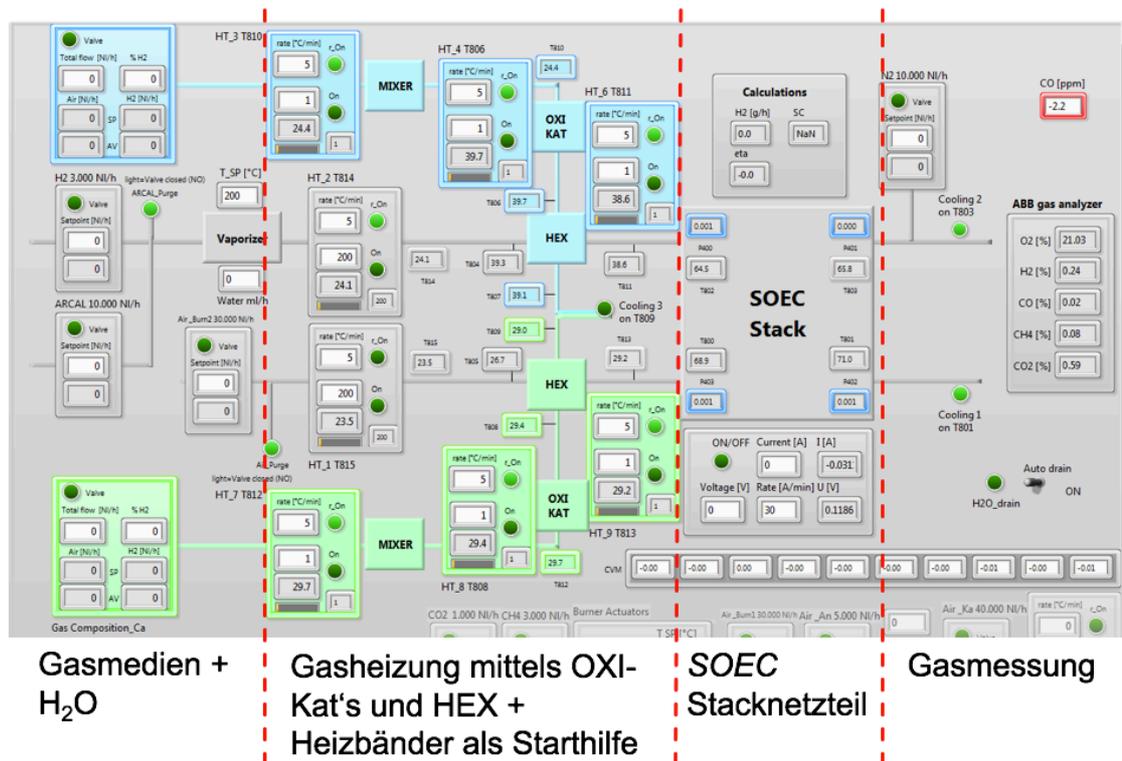


Abbildung 38: Steuerung Frontend des PoC System 2 (blauer Strang = BG-Seite, grüner Strang = Luft-Seite)

Damit die Übersichtlichkeit nicht verloren geht, werden die Heizstränge für die BG- und Luft-Seite blau bzw. grün eingefärbt. Die Funktionen wurden bereits im Kapitel 2.5 erläutert und haben sich nicht geändert.

H2-Luft-Gasgemisch MFC

Um die Bedienung zu vereinfachen und eine einfache Möglichkeit zur Variierung des Wasserstoff-Gehaltes im H₂-Luft-Gasgemisch zu gewährleisten, wurde ein eigenes Bedienelement (siehe Abbildung 39), welches 2 MFCs gleichzeitig ansteuert, angefertigt.

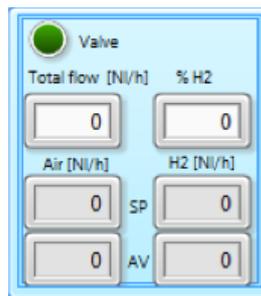


Abbildung 39: MFC Bedienelemente welches das H₂-Luft-Gasgemisch regelt

Das Magnetventil (*Valve*) welches in Abbildung 39 zu sehen ist, steuert das Magnetventil der H₂ Zufuhr und der Luft Zufuhr. Im Feld „*Total flow [Nl/h]*“ stellt man den gewünschten Gesamt-Volumenstrom des Gasgemisches ein. Im Feld „*% H₂*“ stellt man, auf die Mol-Prozent bezogen, den H₂-Gehalt im Gesamt-Volumenstrom ein. Damit hat man eine einfache Möglichkeit, das H₂-Luft-Gasgemisch anzupassen und zu variieren.

3.6 VERSUCHSBESCHREIBUNG

Für den PoC System 2 Aufbau werden folgende Betriebspunkte ausgewählt:

1. Steam Conversion: 70 %, 75 %, 80 %
2. Temperatur BG Ausgang: 750 °C, 800 °C
3. SOEC Stack Strom: 30 A, 35 A, 40 A, 45 A, 50 A

Damit wird der Prüfstand an 30 verschiedenen Arbeitspunkten betrieben.

Folgende Betriebsparameter werden wie folgt gewählt:

1. N₂-Zufuhr für die Gasanalyse: 400 Nl/h
2. Wasserstoffgehalt am BG-Eingang: 20 %
3. Reduktionsgas: Arcal

Aufheizvorgang mit Oxi-Kat's und HEX

Der Aufheizvorgang kann in 5 Schritten beschrieben werden:

1. Heizstränge der Oxi-Kat's mit einem Gesamtvolumenstrom von 2000 NI/h und 0 % H₂ (2000 NI/h Luft, 0 NI/h H₂)
2. Heizbänder auf eine Solltemperatur von 450 °C mit einer Rampe von 5 °C/min bringen
3. Nach dem Erreichen der Solltemperatur den H₂-Gehalt der Heizstränge langsam (in 0,1 % Schritten) erhöhen, bis 5 % H₂ erreicht wird
4. Heizbänder ausschalten, da die Oxi-Kat's ab 5 % H₂ in den selbsterhaltenden Betrieb wechseln
5. H₂-Gehalt weiter langsam steigern, um die gewünschte Solltemperatur am *SOEC*-Stack-Ausgang zu erreichen

Um eine Aussage über die 2 unterschiedlichen Gasheizvarianten treffen zu können, sollten beim PoC System 2 die gleichen Messergebnisse und Berechnungen durchgeführt werden. Ziel ist es, beide Varianten zu vergleichen und mit dem System mit dem besseren Systemwirkungsgrad einen Langzeittest über 1000 Stunden zu starten, sodass eine Aussage über etwaige Degradation und *SOEC*-Stack Langzeitverhalten getroffen werden kann.

3.7 ERGEBNISSE

Die Ansteuerung der Oxi-Kat's stellte sich als problemlos heraus.

Das einzige Problem, welches weitere Tests nicht möglich macht, sind die HEX (*Heat Exchanger*), die eine zu geringe Austauschfläche besitzen, um die Wärme ausreichend an den kalten Gasstrang zu übertragen.

3) Systemstudie 2 – Gasvorheizer mittels Oxi-Kat

Die Oxi-Kat's dürfen eine max. Temperatur von 900 °C erreichen. In Abbildung 40 ist die Temperaturverteilung rund um den HEX kurz vor der Sicherheitsabschaltung zu sehen.

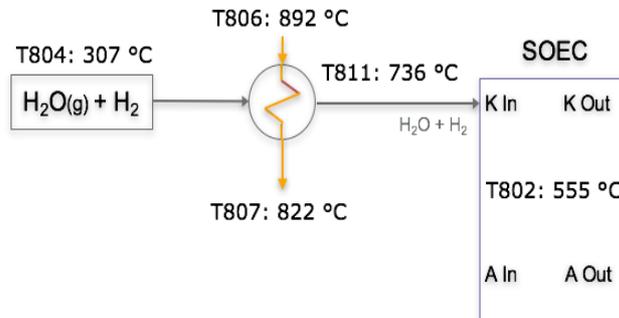


Abbildung 40: Illustrierung des HEX-Problems, welcher zu wenig Austauschfläche besitzt, um die Wärme an den kalten Gasstrang zu übergeben

Am HEX-Eingang des Heizstranges liegen 892 °C an was zu einer Erwärmung des kalten Gasstranges von 307 °C auf 736 °C zur Folge hat. Hier müssten jedoch mindestens 850 °C vorhanden sein, um den SOEC-Stack so weit aufzuheizen, um einen Betriebspunkt anfahren zu können.

In Abbildung 41 ist der Temperaturverlauf zu sehen, welcher den Aufheizvorgang bis zur Sicherheitsabschaltung bei 900 °C und anschließendem Abkühlen zeigt.

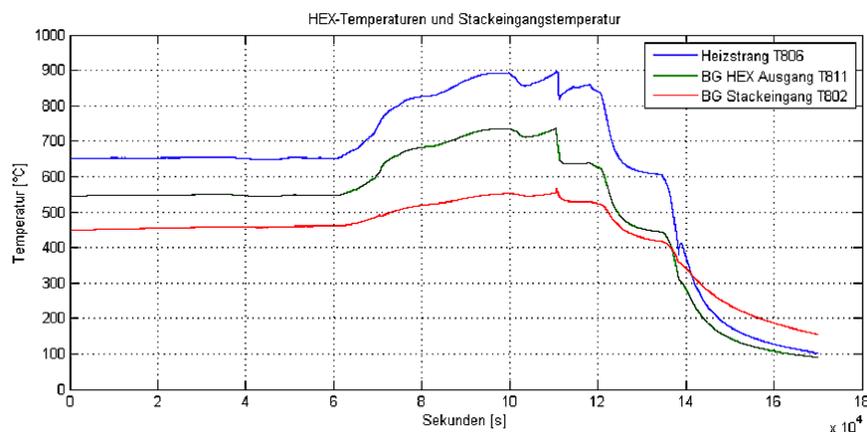


Abbildung 41: Temperaturen am HEX, welche anschaulich zeigen, dass der HEX zu wenig Austauschfläche besitzt. Zu sehen ist ein Aufheizvorgang bis 900°C und anschließender Sicherheitsabschaltung

3) Systemstudie 2 – Gasvorheizer mittels Oxi-Kat

Der *SOEC*-Stack Eingang erreicht nie mehr als ca. 550 °C, was viel zu gering ist, um einen Betriebspunkt von 750 °C erreichen zu können.

4 SKALIERUNG AUF 100 MW

Das Kapitel 4 beschäftigt sich mit der Möglichkeit, die Stack-Technologie auf eine großindustriell relevante Leistungsklasse zu dimensionieren. Als Leistungsklasse werden 100 MW angestrebt.

Als Basis bzw. Ausgangspunkt dient ein 40ft ISO-Industriecontainer mit folgenden Abmessungen:

Tabelle 1: Abmessungen eines 40ft ISO-Industriecontainer [5]



Abbildung 42: 40ft ISO Container [5]

Innenmaß	Länge	12,032 m
	Breite	2,352 m
	Höhe	2,385 m
	Fläche	28,3 m ²
	Volumen	67,5 m ³
Leergewicht	4 t	
Nutzlast	26,48 t	

Der Hintergrund bei der Wahl eines Containers ist die leichte Transportfähigkeit und die Möglichkeit für die Modulbauweise. Die Bauweise des Containers erlaubt es, die SOEC-Technik auf jeden beliebigen Weg zu Luft, Wasser und Land zu transportieren.

4) Skalierung auf 100 MW

Szenarien

Die 3 verschiedenen Szenarien betrachten sowohl technische Weiterentwicklung als auch den Preisverfall aufgrund von Massenproduktion.

Tabelle 2: Darstellung der 3 Skalierungs-Szenarien in der Übersicht

Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
30 Ebenen / Stack	40 Ebenen / Stack	50 Ebenen / Stack
Leistung / Ebene 65 W	Leistung / Ebene 100 W	Leistung / Ebene 200 W
8 Stacks pro Modul	64 Stacks pro Modul	64 Stacks pro Modul

Szenario 1:

Dieses Szenario entspricht dem heutigen Stand der Technik und ist sofort ohne weitere R&D Arbeit realisierbar. Schwerpunkt dieser Variante muss die Implementierung der derzeit verfügbaren SOEC-Technologie in den Container sein.

Szenario 2:

Szenario 2 beinhaltet eine Erhöhung der Ebenen pro Stack und eine signifikante Leistungssteigerung pro Ebene. Des Weiteren sollen 64 Stacks pro Modul verbaut werden, was jedoch noch einiges an R&D Arbeit verlangt. Es muss sichergestellt werden, dass die Temperaturverteilung in der *Hotbox* über die Stacks so homogen und gleichmäßig wie möglich ist, da es sonst zu thermischen Spannung innerhalb der Stacks kommen kann. Bei dieser Variante ist auch eine deutliche Preisdegradation angenommen. Der Realisierungszeitraum wird auf 2 Jahre geschätzt.

Szenario 3:

Hier wird eine Erhöhung der Ebenen pro Stack angenommen. 50 Ebenen pro Stack sind derzeit technisch äußerst schwierig realisierbar, da auf allen Ebenen der gleiche Anpressdruck im gesamten Temperaturbereich gewährleistet sein muss. Da von einem Realisie-

4) Skalierung auf 100 MW

rungszeitraum von 10 Jahren ausgegangen wird, ist in diesem Szenario auch eine signifikante Leistungssteigerung auf 200 Watt / Ebene eingeplant. Es werden wiederum 64 Stacks pro Modul angenommen und zusätzlich mit einer Preisreduktion gerechnet.

Entwicklung der Gesamtkosten

Die genauen Berechnungsvarianten sind im APPENDIX I zu finden. In Abbildung 43 sind die Investitionskosten auf die 3 Szenarien aufgeteilt zu sehen.

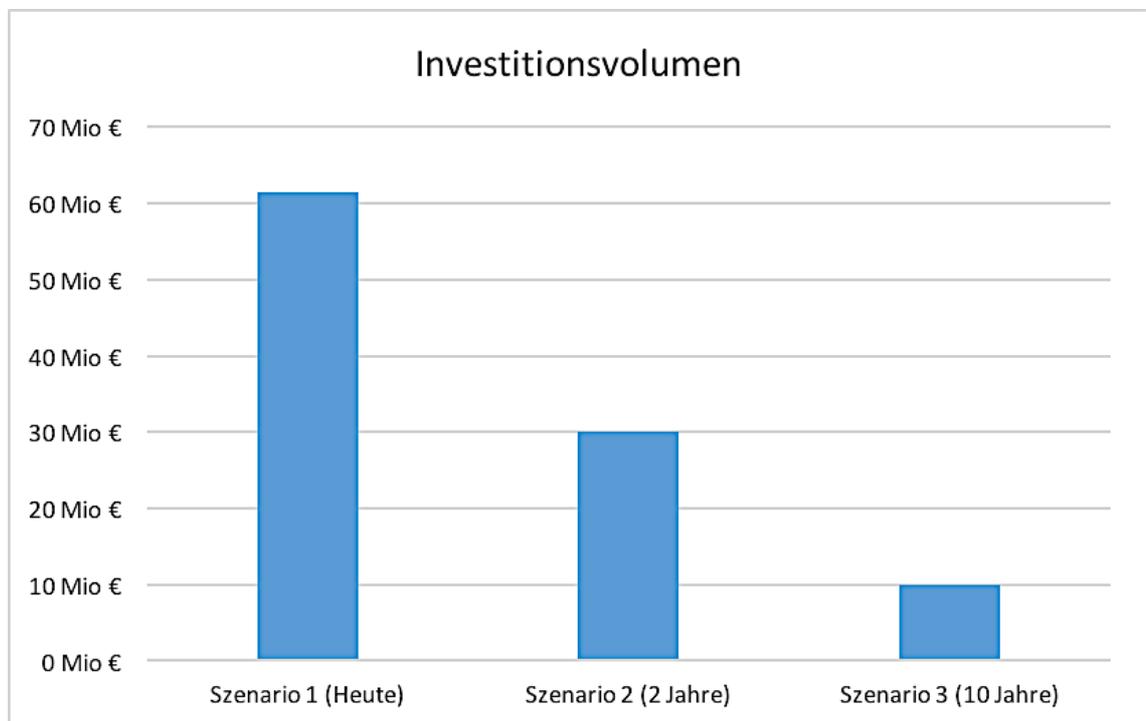


Abbildung 43: Investitionskosten der 3 Szenarien [5]

Durch die Darstellung der Investitionskosten über die verschiedenen Szenarien sieht man sehr deutlich, dass die geforderten Maßnahmen wie höhere Leistung pro Ebene, mehr Ebenen pro Stack und mehr Stacks pro Modul unbedingt erreicht werden müssen, um wettbewerbsfähige Preise zu erreichen.

Um eine Vorstellung zu bekommen, welche Platzansprüche *SOEC* Elektrolyse Anlagen einnehmen wurde die Darstellung mittels 40ft Container gewählt. In Abbildung 44 ist die Anzahl der Container pro Szenario zu sehen.

4) Skalierung auf 100 MW

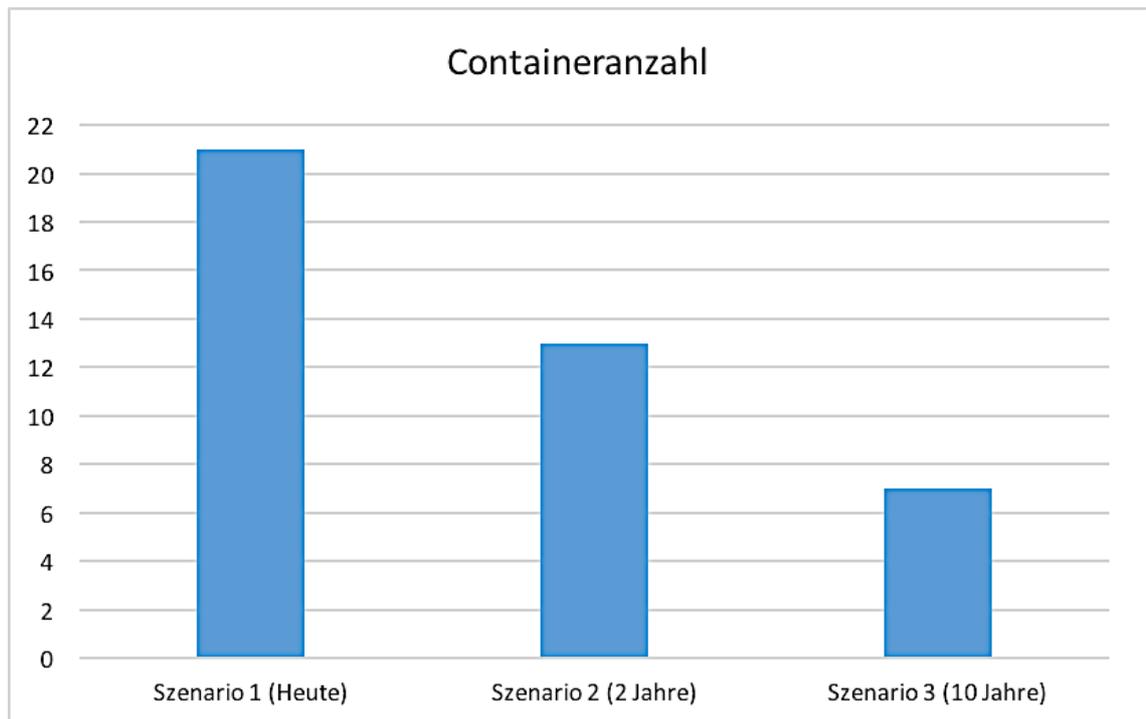


Abbildung 44: Anzahl der benötigten 40ft-Container pro Szenario [5]

Diese Grafik soll primär zur Veranschaulichung der Platzbedürfnisse dienen. Mit einem 40ft-Container hat man somit ein genormtes und international anerkanntes Maß gefunden, welches zusätzlich eine Modulbauweise ermöglicht.

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Systemstudie 1

Das PoC System 1 besteht im Wesentlichen aus dem elektrischen Gasheizer und der *SOEC-Hotbox* + Peripherie. Aufgrund der einfachen Regelung der Temperatur mittels Stromvorgabe am Netzteil des elektrischen Gasheizers ist die Handhabung und Einstellung verschiedener Betriebspunkte sehr einfach.

Der große Nachteil dieses Systemaufbaus ist der geringe Systemwirkungsgrad von maximal 55 %. Beim technischen Wirkungsgrad erreicht man einen Wert von 85 %.

Systemstudie 2

Beim zweiten Aufbau wurde der elektrische Gasheizer durch die Gasheizung mittels Oxi-Kat und HEX getauscht. Laut Simulationsergebnissen muss der Systemwirkungsgrad weit über den erreichbaren Werten des vergleichbaren PoC System 1 liegen.

Der Aufbau ist im Vergleich zum PoC System 1 um einiges komplexer und schwieriger zu steuern. Aufgrund des zu klein dimensionierten HEX war es nicht möglich, einen Betriebspunkt zu erreichen und eine Vergleichsmessung zu starten.

Skalierung auf 100 MW Klasse

Die 3 Szenarien dienen als grober Fahrplan, welcher verdeutlichen soll, welche Parameter sich in welche Richtung verändern müssen, um einen sinkenden Verkaufspreis zu erreichen.

Der Container-Ansatz dient zur Veranschaulichung, welche Dimension eine *SOEC*-Anlage im 100 MW-Bereich beansprucht. Als Vorteil dieses Ansatzes gilt die gute Transportfähigkeit und die Möglichkeit der Modulbauweise.

Ausblick

Um das Projekt weiterzuführen, dienen folgende Punkte als Anregung bzw. als Verbesserungsvorschläge:

- Steigerung der Temperatur am BG-Eingang: Es würde die Nutzung einer höheren Industrieabwärme simuliert werden und es besteht die Möglichkeit, dass mit dem PoC System 2 Aufbau bzw. den bereits verbauten HEX Betriebspunkte angefahren werden können.
- Nutzung der Abgaswärme der *SOEC-Hotbox*: Hier liegt ein großes Potential, da die derzeit verfügbare Abwärme ungenutzt gekühlt wird, um sie dem Gasabzug zuführen zu dürfen.
- Automatisierte Kondenswasser-Entleerung: Der derzeitige Aufbau erfordert es, den Kondenswasser-Behälter pro Tag einmal per Hand zu entleeren. Damit sind keine oder nur eingeschränkte Langzeittests möglich.

6 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] H. Wendt, G. H. Vogel, Die Bedeutung der Wasserelektrolyse in Zeiten der Energiewende, pp. 144-148, Oktober 2013, Chemie Ingenieur Technik 2014, 86, No. 1–2, DOI 10.1002/cite.201300005.
- [2] M. Sterner, I. Stadler, Energiespeicher – Bedarf, Technologien, Integration, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014, ISBN 978-3-642-37380-0 (eBook).
- [3] J. Lehmann und T. Luschtinetz, Wasserstoff und Brennstoffzellen - Unterwegs mit dem saubersten Kraftstoff, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014, ISBN 978-3-642-34668-2 (eBook).
- [4] B. Defner, „Modeling and Simulation of System Concepts for High-Temperature, Solid Oxide Electrolysis“, Diplomarbeit, Institute of Systems Sciences, Innovation and Sustainability Research, University of Graz, 2015.
- [5] D. Dunst, „Präsentation der Ergebnisse zum Projektabschlussmeeting“, AVL List GmbH, Graz, Jänner 2016
- [6] Präzise Massedurchflussmesser und Massedurchflussregler für Gase, www.voegtlin.com, März 2016, [Online]. Available: <https://www.voegtlin.com/massedurchflussmesser-und-massedurchflussregler/red-y-smart-series/#versionen>. [Zugriff am 01.03.2016]
- [7] Glass Tube Variable Area Flowmeters, library.e.abb.com, Februar 2016, [Online]. Available: https://library.e.abb.com/public/e6770718d8814e89ad21f7b982cacef1/DS_FGM1190_EN_F.pdf. [Zugriff am 03.02.2016]
- [8] Membran Dosierpumpen, KNF Neuberger, www.zefa-laborservice.de, Februar 2016, [Online]. Available: http://www.zefa-laborservice.de/pdf/96/d_750_01_001.pdf. [Zugriff am 22.03.2016]
- [9] Trennverstärker - MCR-C-U-I- 0-DC - 2814472, www.phoenixcontact.com, Februar 2016, [Online]. Available: https://www.phoenixcontact.com/assets/images_pr/product_photos/large/25908_1000_int_04.jpg. [Zugriff am 22.03.2016]

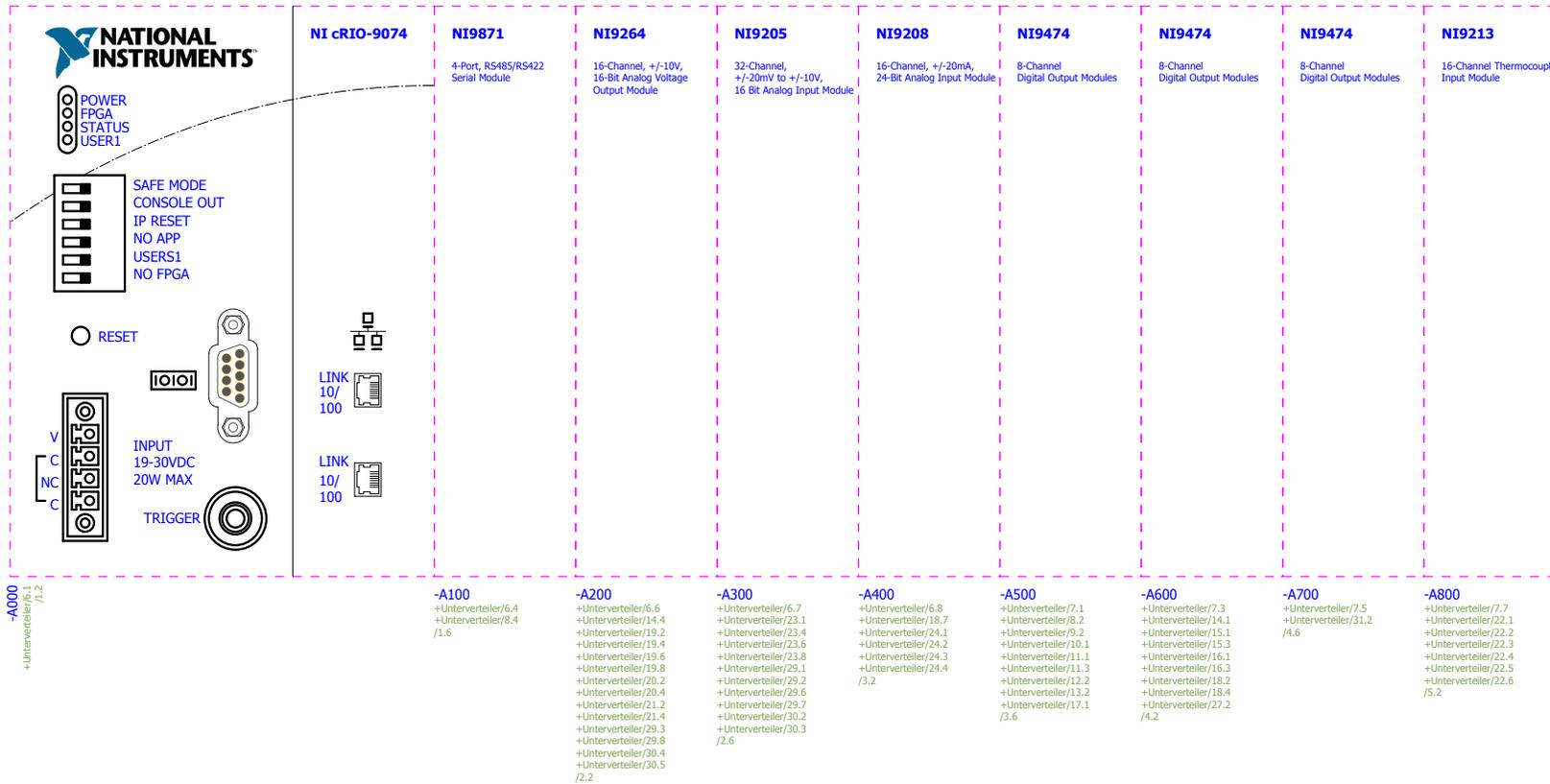
- [10] Trennverstärker - MCR-C-U-I- 0-DC – 2814472 Schaltplan, www.phoenixcontact.com, Februar 2016, [Online]. Available: <https://www.phoenixcontact.com/online/portal/de?uri=pxc-oc-itemdetail:pid=2814472&library=dede&tab=1>. [Zugriff am 01.02.2016]
- [11] HOVAPOR LF 6000 Bedienungsanleitung, IAS GmbH, Frankfurt 2009
- [12] Netzteile - SM3000-Serien, Delta Elektronik, www.delta-elektronika.nl/de, Februar 2016, [Online]. Available: <http://www.delta-elektronika.nl/de/produkte/sm3000-serien.html>. [Zugriff am 13.02.2016]
- [13] DC Stromquellen - Power Station pe4606-2, www.plating.de, Februar 2016, [Online]. Available: <http://www.plating.de/de/produkte/produktliste.html?product=55>. [Zugriff am 13.02.2016]
- [14] Manual for MK351 60-cell stack hotbox“, Fraunhofer IKTS, 2015
- [15] Dienstleistungen / LabVIEW-Programmierung, www.cae-systems.de, Februar 2016, [Online]. Available: <http://www.cae-systems.de/dienstleistungen/labview-programmierung.html>. [Zugriff am 16.02.2016]
- [16] Produkte - Online-Katalog – CompactRIO, www.ni.com, National Instruments, Februar 2016, [Online]. Available: <http://www.ni.com/compactrio/d/>. [Zugriff am 16.02.2016]
- [17] C. Appel, „Katalytisch stabilisierte Verbrennung von Wasserstoff-Luft-Gemischen über Platin in laminaren und turbulenten Kanalströmungen“, Doktorarbeit, ETH Zürich, 2002.
- [18] V. Schröder, www.bam.de, [Online]. Available: http://www.bam.de/de/service/publikationen/publikationen_medien/fb253_vt.pdf. [Zugriff am 23.02.2016]

7 ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

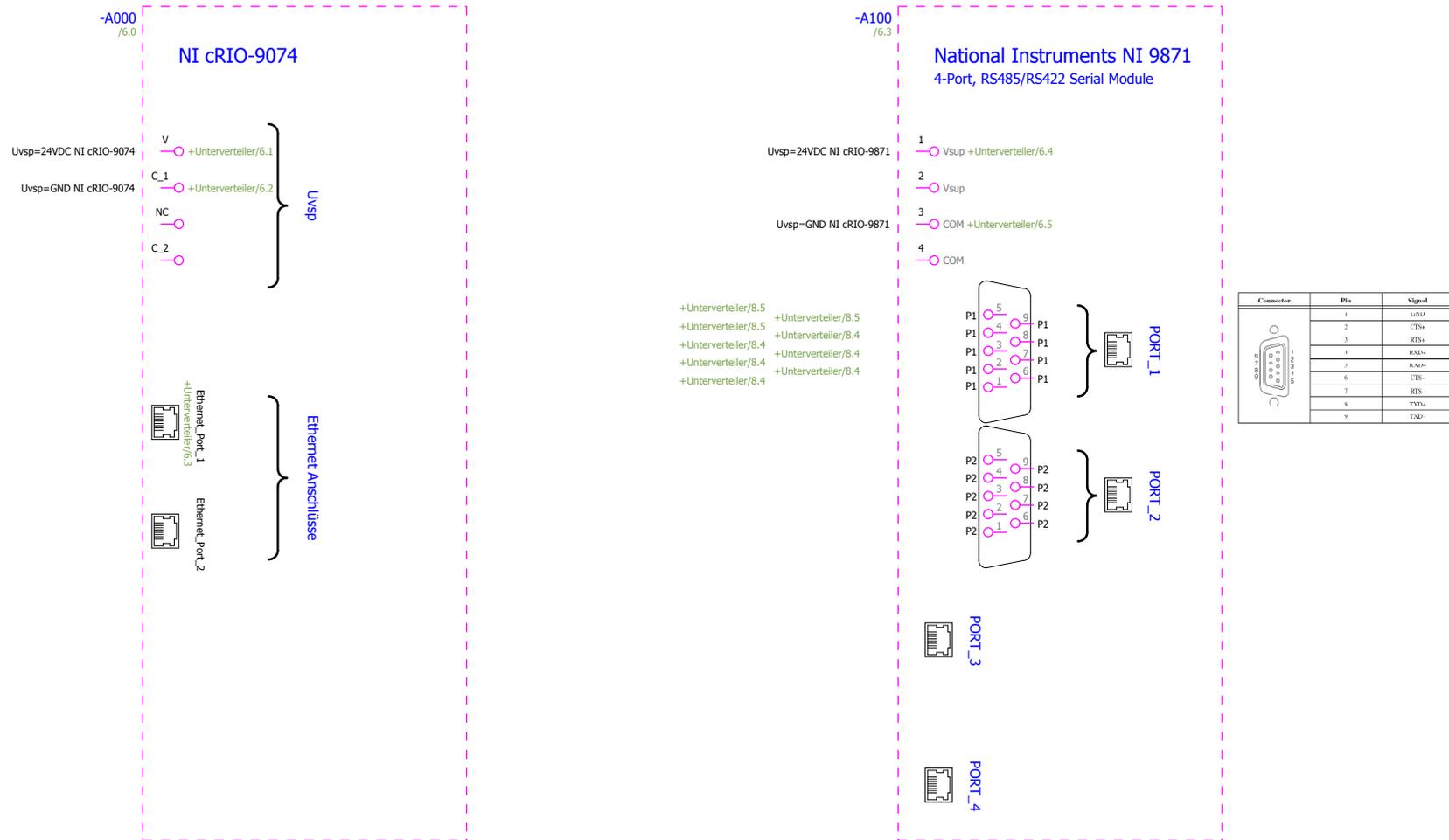
BG	Brenngas
CH ₄	Methan
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CVM	Cell Voltage Monitoring
FPGA	Field Programmable Gate Array
H ₂	Wasserstoff
H ₂ O	Wasser
HEX	Heat Exchanger
HTEL	Hochtemperatur Elektrolyse
N ₂	Stickstoff
O ₂	Sauerstoff
Oxi-Kat	Oxidationskatalysator
PEM	Polymer Electrolyte Membrane, Proton Exchange Membrane
PoC	Proof of Concept
R&D	Research & Development
SC	Steam Conversion
SOEC	Solide Oxide Electrolysis Cell

8 APPENDIX

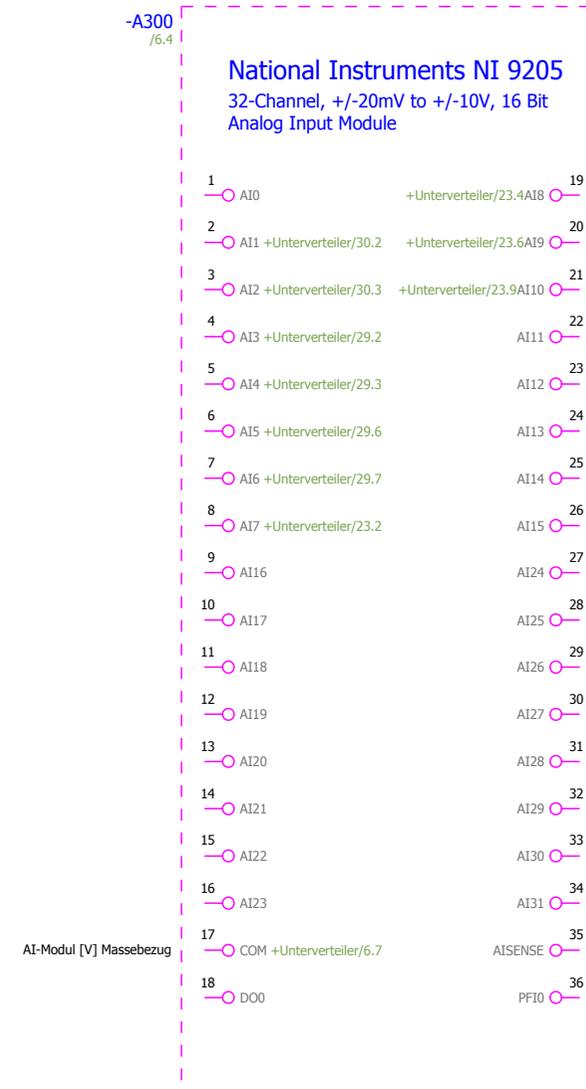
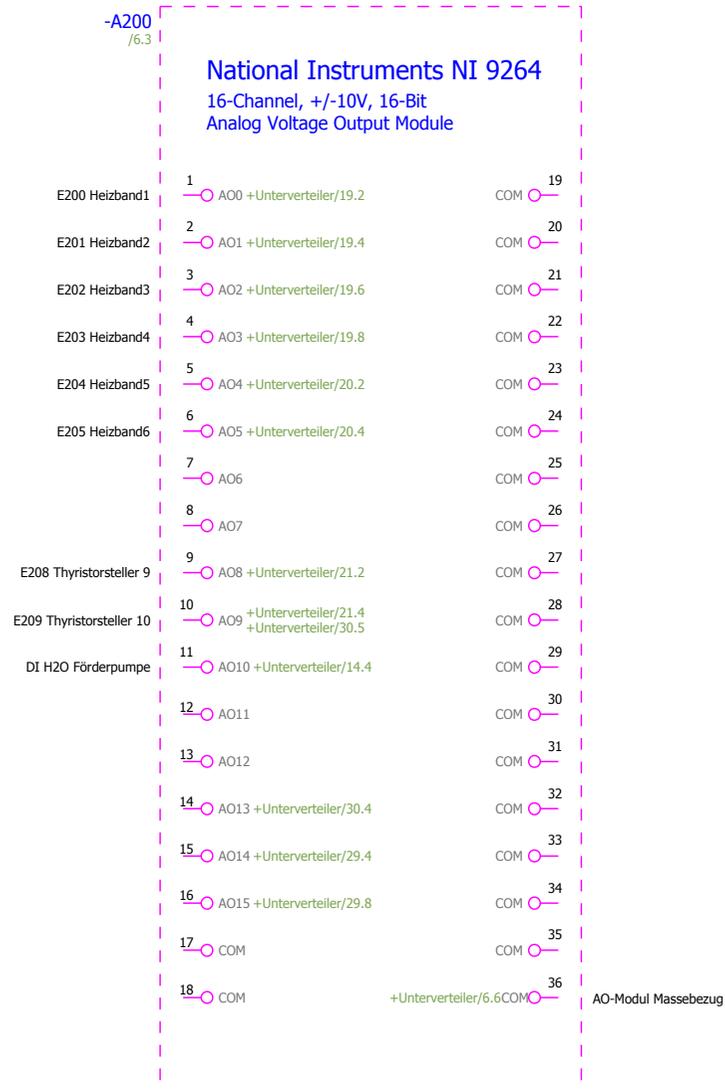
APPENDIX A NI COMPACTRIO ÜBERSICHT



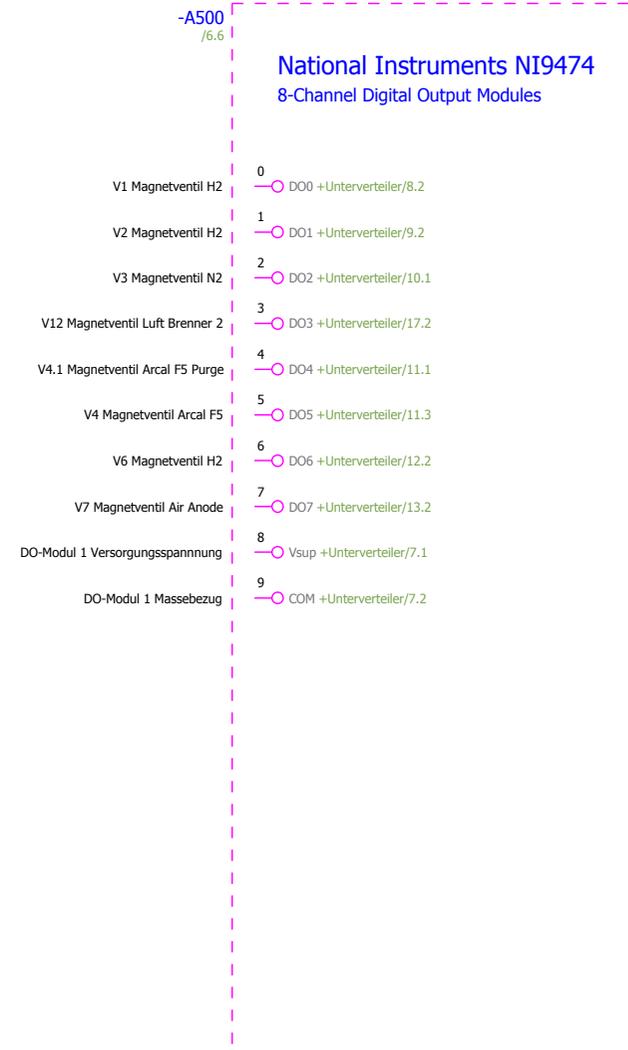
APPENDIX B NI COMPACTRIO MODULE



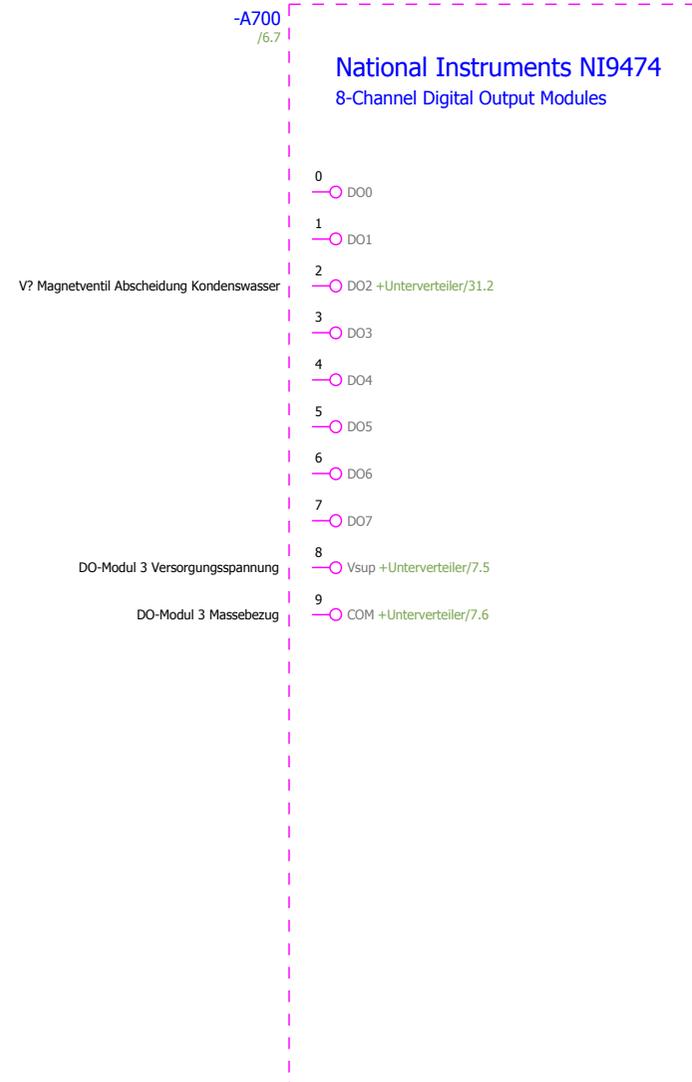
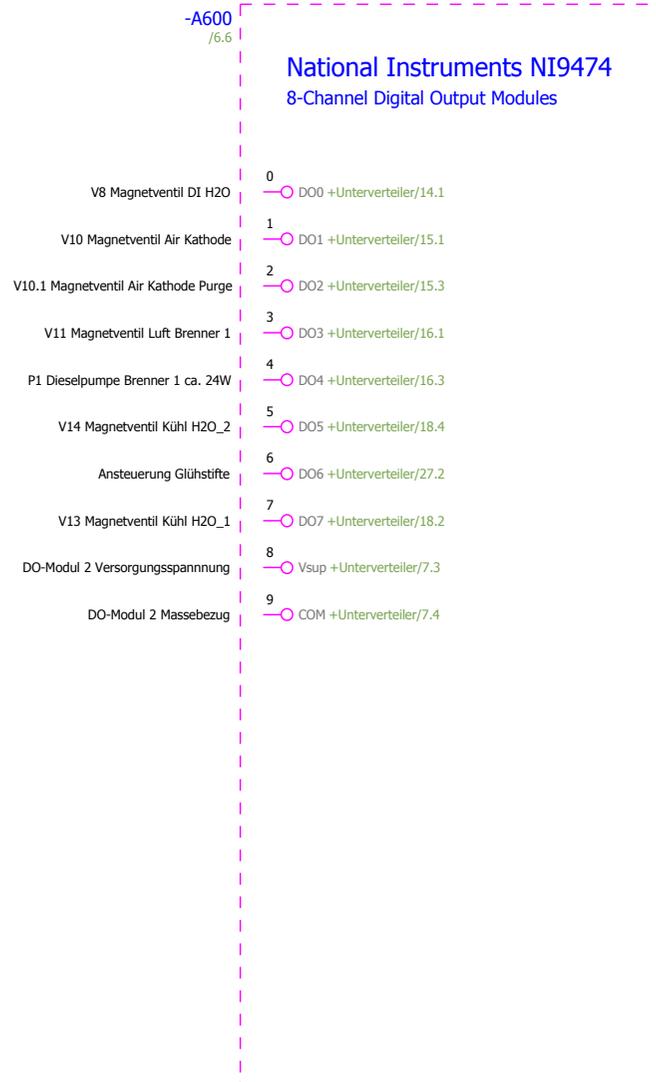
8) Appendix



8) Appendix



8) Appendix



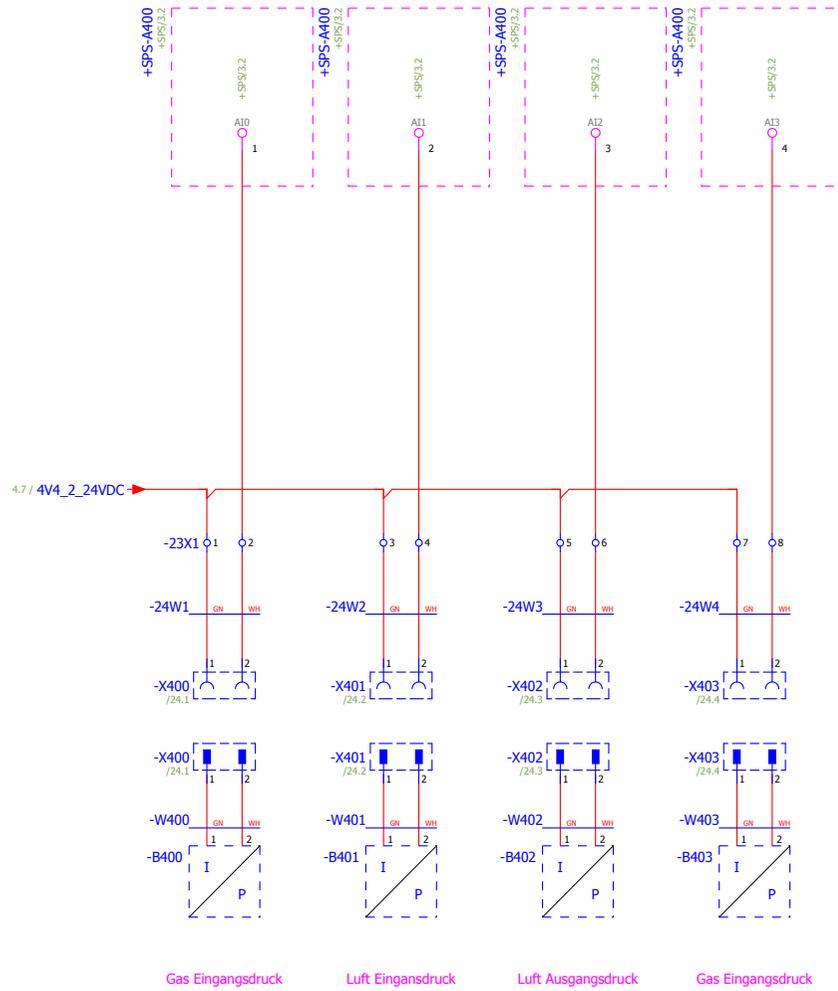
8) Appendix

-A800
/6.8

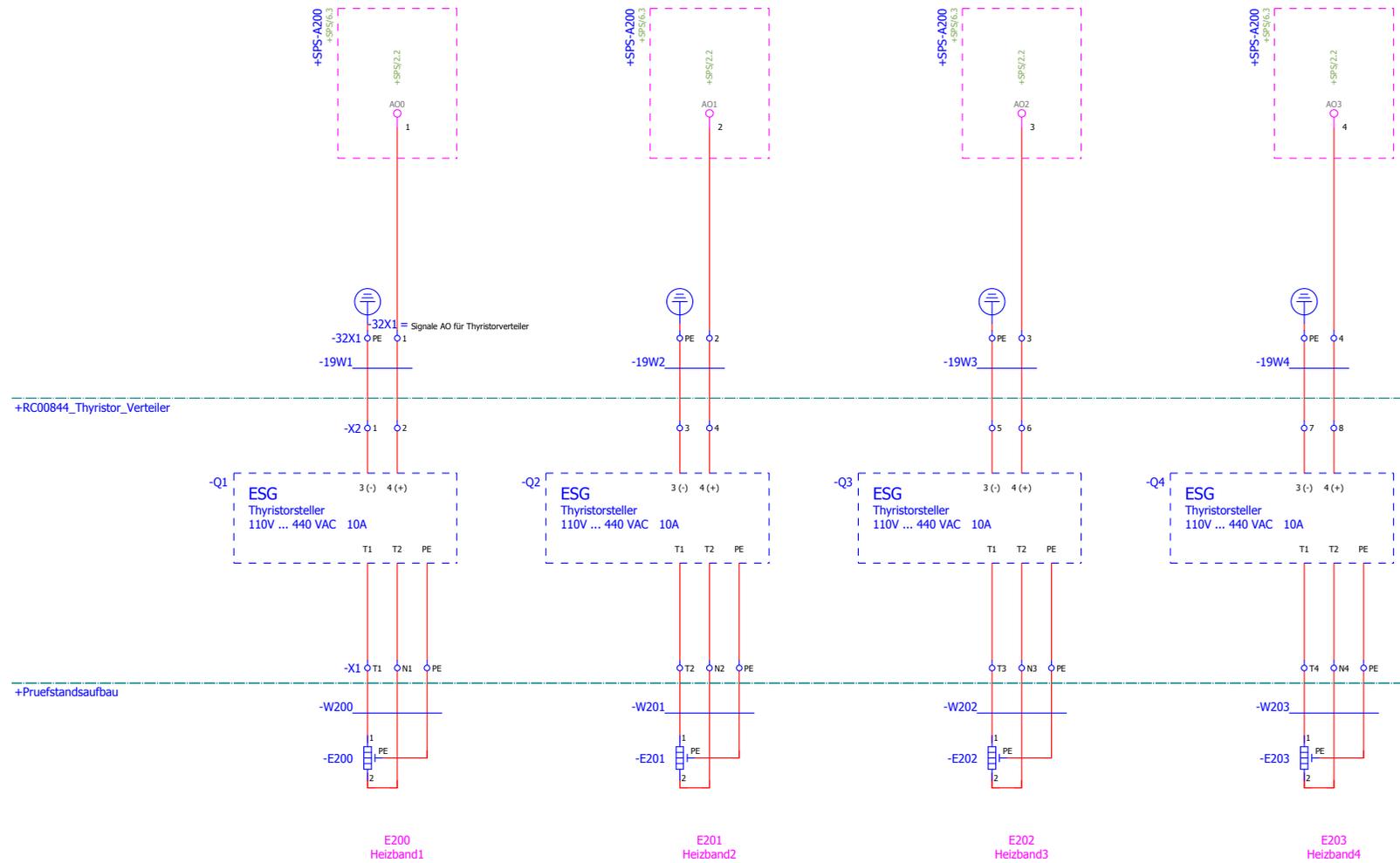
National Instruments NI 9213 16-Channel Thermocouple Input Module



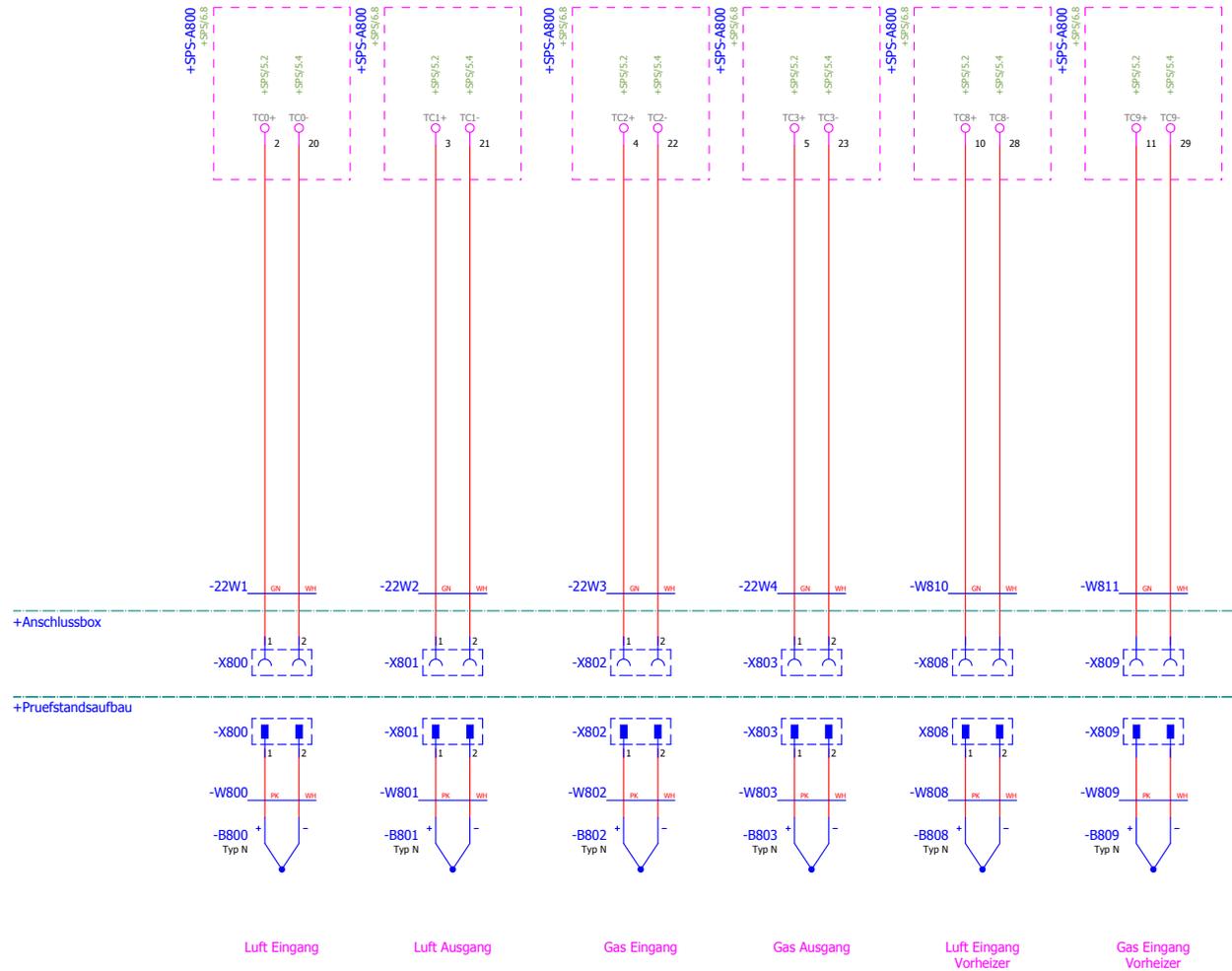
APPENDIX C DRUCKSENSOREN



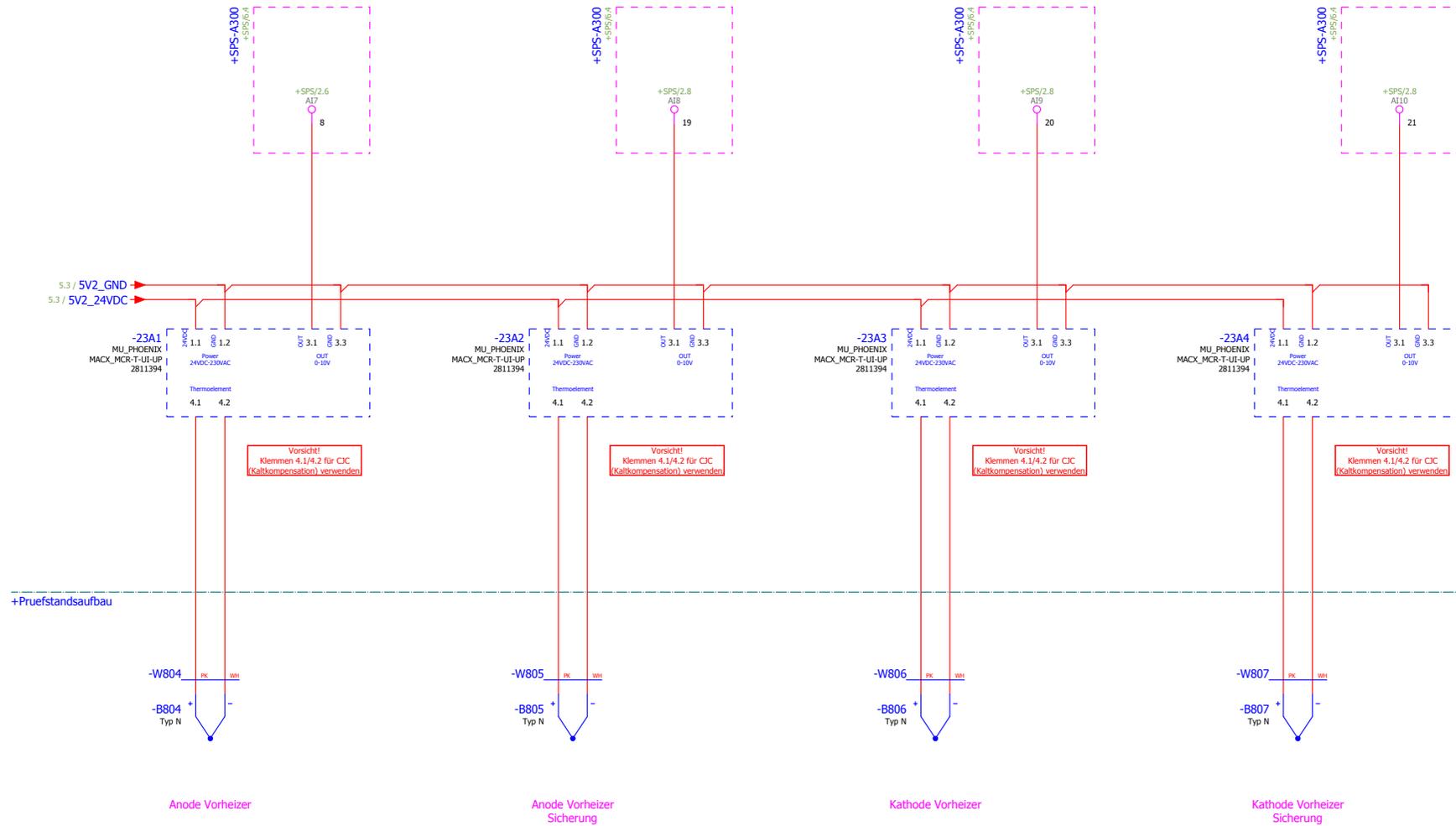
APPENDIX D HEIZBÄNDER



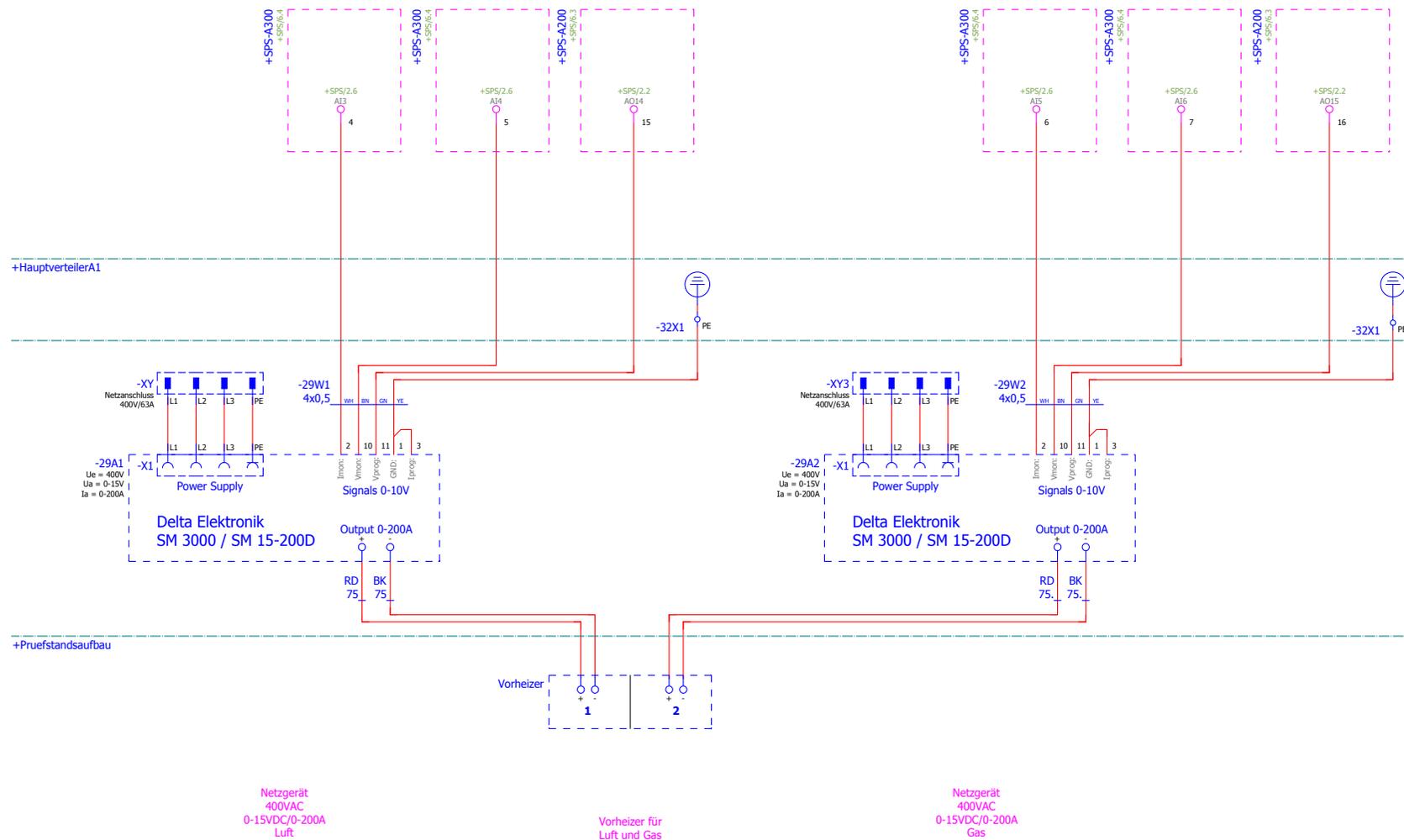
APPENDIX E THERMOCOUPLE



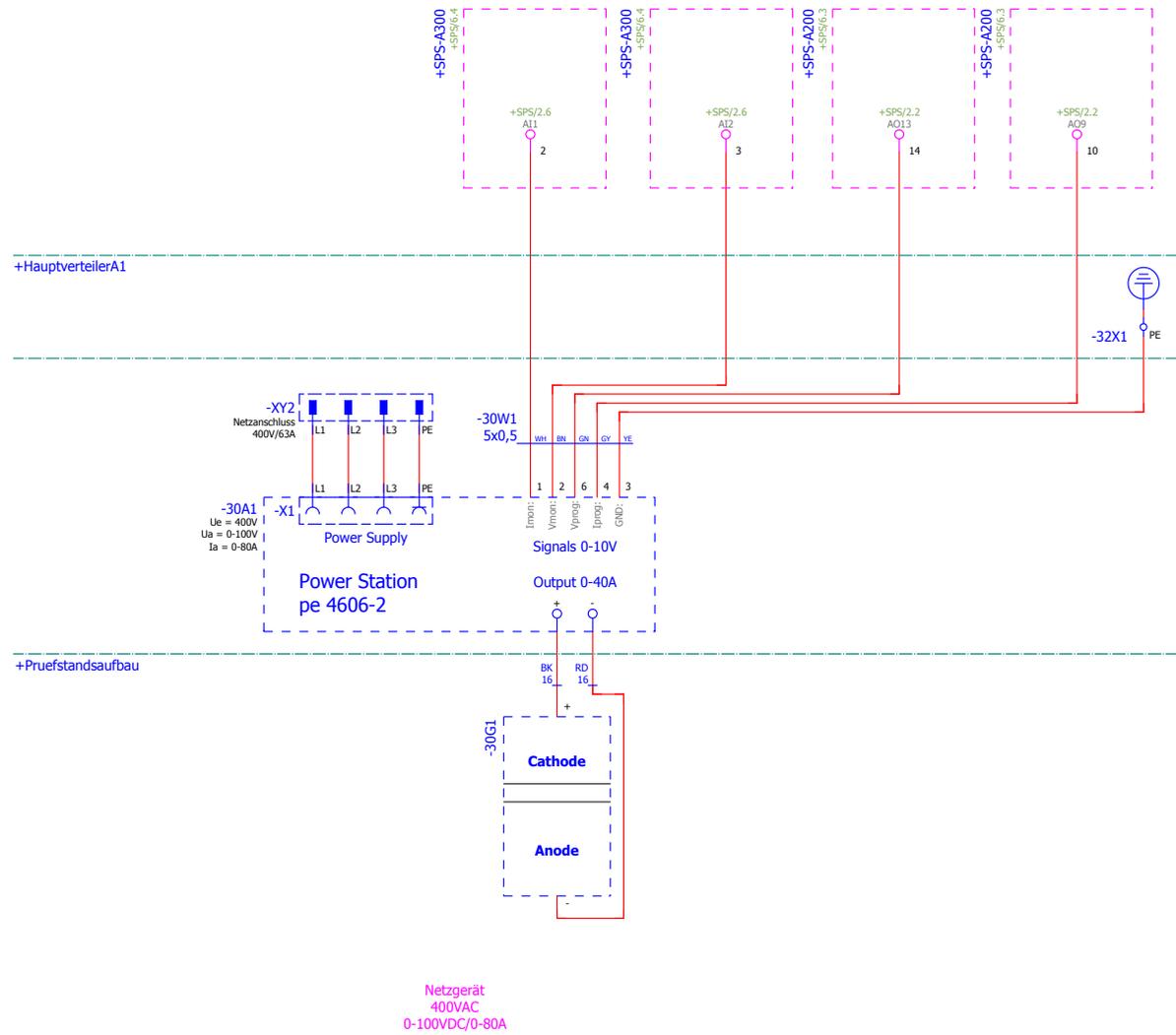
8) Appendix



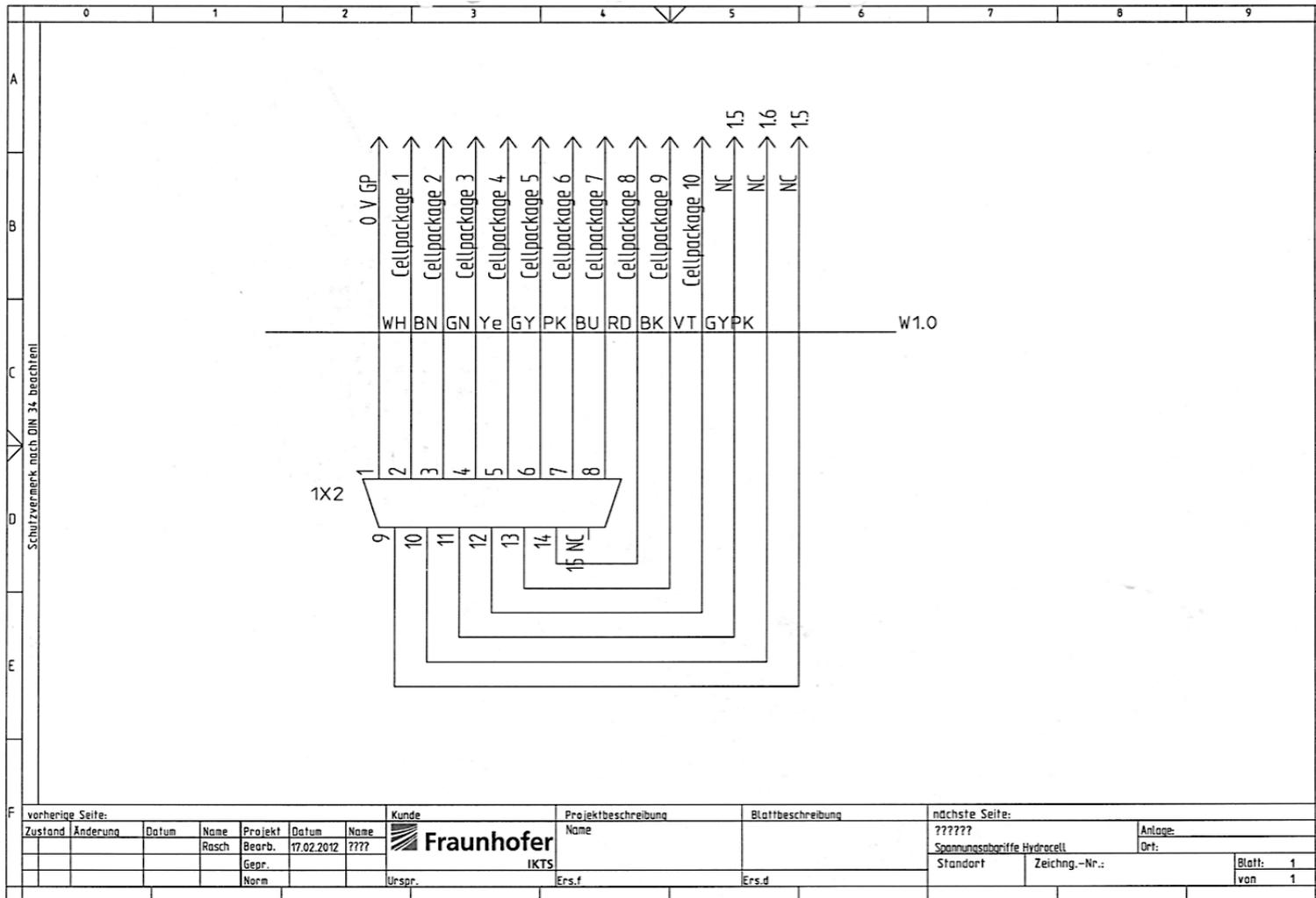
APPENDIX G PIN-BELEGUNGEN NETZTEILE



8) Appendix



APPENDIX H PIN-BELEGUNG SPANNUNGSABGRIFF SOEC-STACK



APPENDIX I SKALIERUNG AUF 100 MW BERECHNUNGEN

		Szenario 1		Szenario 2		Szenario 3	
		8x30 HB Luftbox	8x30 HB mit Iso	64x40 HB Luftbox	64x40 HB mit Iso	64x40 HB Luftbox	64x40 HB mit Iso
Grundfläche	m	0,53	0,74	0,53	0,73	0,78	0,88
	m	0,24	0,48	0,24	2,12	0,78	0,88
Höhe	m	0,53	0,8	0,71	0,91	0,78	0,88
Volumen	m ³	0,07	0,28	0,72	1,40	0,47	0,68
Anzahl Stacks in HB	Stück	8	8	64	64	64	64
Leistung/ E	W	65	65	100	100	200	200
Ebenen/ Stack	Stück	30	30	40	40	50	50
Gewicht/ Ebene	kg	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
HB's / Con	Stück	1483	352	139	71	211	147
W/Con	W	23.139.907	5.489.865	35.599.858	18.244.568	134.864.040	93.914.350
Anz. Con/ 100MW	Stück	4,3	18,2	2,8	5,5	0,7	1,1
Stacks/ Con	Stück	11.867	2.815	8.900	4.561	13.486	9.391
Gesamtmenge Stacks	Stück	51.282	51.282	25.000	25.000	10.000	10.000
Gesamtgewicht Stacks/ Con	kg	118.666	28.153	118.666	60.815	224.773	156.524
Gesamtgewicht Stacks	kg	512.821	512.821	333.333	333.333	166.667	166.667
Zulässige Nutzlast Con	kg	25000					
Anzahl Con unter Beachtung zul. Nutzlast	Stück	21	21	13	13	7	7
Kosten pro Stack (inkl. Preisentwicklung)	€	1.200	1.200	1.200	1.200	1.000	1.000
Gesamtstackkosten	€	61.538.462	61.538.462	30.000.000	30.000.000	10.000.000	10.000.000