

Paul Hassler

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

Diplomarbeit zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom - Ingenieur

Technische Universität Graz

Institut für Leichtbau

Betreuer:

Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christian Moser (TU Graz)

DI (FH) Mario Brunner (AVL List GmbH Graz)

Graz, Jänner 2013

Vorwort

Diese Diplomarbeit wurde in Zusammenarbeit mit der Firma AVL-List GmbH in Graz durchgeführt. Auf diesem Wege möchte ich mich bei Herrn DI (FH) Mario Brunner für die Bereitstellung dieser Diplomarbeit, sowie der notwendigen Ressourcen bedanken. Besonders möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Dr. techn. Esteban Marks, meinem Mentor seitens der Firma, und Herrn Dipl.-Ing. Matej Smolnikar für die ständige, hervorragende fachliche Unterstützung bedanken.

Für die Betreuung seitens der Technischen Universität Graz, am Institut für Leichtbau möchte ich mich besonders bei Herrn Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Christian Moser bedanken.

Für das zur Seite stehen bei sämtlichen Problemstellungen möchte ich mich bei meinen Kollegen in der Abteilung DAM der AVL-List GmbH herzlich bedanken. Weiterer Dank gebührt meinen Studienkollegen Herrn Dipl.-Ing. Bernd Schlegl, Herrn Herbert Schifferl, Herrn Dipl.-Ing. Florian Schönleitner und Herrn Dipl.-Ing. Andreas Klaf, die mir auch bei den alltäglichen Problemen des Studentenlebens immer zur Seite gestanden sind.

Der größte Dank gebührt meiner Familie, insbesondere meinen Eltern und meiner Lebensgefährtin Frau Mag.^a Gabriele Kollmann für die emotionale und finanzielle Unterstützung während des gesamten Studiums. Ohne sie wäre eine akademische Ausbildung in dieser Form nicht möglich gewesen.

Danke.

Paul Hassler

Deutsche Fassung:

Beschluss der Curricula – Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008

Genehmigung des Senates am 1.12.2008

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.

Graz, am

.....

Paul Hassler

Statutory Declaration

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 marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz,

date

.....

Paul Hassler

Kurzbeschreibung

Solid Oxide Fuel Cells sind Hochtemperaturbrennstoffzellen, die bei einer Temperatur von ca. 700°-1000° C betrieben werden und eine feste Keramik als Elektrolyt besitzen. Der Elektrolyt ist in der Lage, Sauerstoff-Ionen zu leiten und für Elektronen isolierend zu wirken. Der Aufbau von SOFC's besteht aus mehreren Materiallagen die zu einer Zelle zusammengefasst sind. Mehrere dieser Zellen werden zu einem Stack in Serie geschaltet um die Leistung zu erhöhen. Der Hauptanwendungsbereich beschränkt sich momentan noch hauptsächlich auf den stationären Bereich. In dieser Arbeit wird für eine thermo-mechanische Analyse eines gesamten Brennstoffzellenstacks eine Methodik entwickelt und durchgeführt.

Die Brennstoffzelle wird durch Luft, welche mit einem Brenner aufgeheizt wird, auf Betriebstemperatur gebracht. Durch Unterschiede im räumlichen Temperaturfeld treten Temperaturgradienten im Bauteil auf. Diese Temperaturgradienten und verschiedene thermische Eigenschaften der verwendeten Materialien rufen Strukturspannungen hervor, welche Schädigungen in der Brennstoffzelle verursachen. Alle Bauteile sind sehr stark miteinander gekoppelt, so dass eine Veränderung in einem Bauteil sich sofort auf das benachbarte Bauteil auswirkt. Somit ist eine thermomechanische FE-Analyse nur im Zuge einer Simulation eines gesamten Stacks sinnvoll. Um in weiterer Folge die Schädigung im Detail zu betrachten, werden Detailmodelle basierend auf dem globalen Modell benötigt.

Es wird zuerst mittels der Software Abaqus/CAE eine FE-Berechnung des räumlichen Temperaturfeldes durchgeführt. Für diese Simulation werden aus Messdaten sämtliche Anfangs- und Randbedingungen festgelegt. Die Ergebnisse des Temperaturfeldes werden anhand von Prüfstandsdaten validiert. Diese Simulation wird in einem weiteren Schritt mit der Spannungssimulation gekoppelt. Auch die FE-Berechnung der Spannungen eines gesamten Stacks wird mittels Abaqus/CAE durchgeführt. Eine detailliertere Betrachtung der Spannungen in den einzelnen Zelllagen wird mit einem speziellen Elementtyp durchgeführt.

Schließlich werden die Ergebnisse zusammengefasst und diskutiert. In einem kurzen Ausblick werden die nächsten notwendigen Schritte angeführt.

Abstract

Solid Oxide Fuel Cells are high temperature fuel cells with a solid ceramic electrolyte, usually operating at temperatures between 700° and 1000° C. The electrolyte is able to conduct oxygen-ions and at the same time insulate electrons. The assembling of SOFC's consists of several material layers which are connected to a cell. Many of these cells are connected to a stack to increase the power. The current main field of application is restricted to stationary devices. In this thesis, a methodology for a thermo-mechanical analysis for a whole fuel cell stack is developed and realized.

The fuel cell is brought to operating temperature by air which is heated with a burner. Due to differences in the three-dimensional temperature field, temperature gradients occur in the part. These temperature gradients and different thermal properties of the used materials produce stresses in the structure which generate damage in the fuel cell. All the parts are strongly coupled, so that a change in one part directly affects the adjoining part. Therefore, a thermo-mechanical analysis is only meaningful for the whole stack. In order to investigate damage in detail, sub models based on the global model are required.

First, a FE-calculation of the three-dimensional temperature field is done with Abaqus/CAE. For that simulation all initial- and boundary conditions are defined by parameters obtained by measurements. The results of the temperature field are validated by test bed measurements. In the next step this simulation is coupled to the simulation of the stresses. Also the FE-calculation of the stresses of the entire stack is done with Abaqus/CAE. A detailed view on the stresses in the single cell layers is done with a special element type.

Finally the results are summarized and discussed. A short outlook shows required future investigations.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Vorgangsweise.....	2
2	Brennstoffzelle.....	3
2.1	Funktion.....	5
2.2	Brennstoffzellen-Typen	7
2.3	Solid Oxid Fuel Cell	7
2.3.1	Funktion der SOFC.....	7
2.3.2	Prinzipieller Aufbau	9
2.3.3	Herstellung und Zusammenbau	12
2.3.4	Schädigungsmechanismen	15
3	Numerische Methoden	15
3.1	Numerische Integration.....	15
3.1.1	Newton-Côtes-Quadratur.....	16
3.1.2	Gauß-Quadratur	19
3.2	Kontinuum-Schalen-Elemente.....	20
4	Workflow.....	22
5	Verwendetes Brennstoffzellen-Modul	24
5.1	Stack	25
5.2	Interkonnektor	28
5.3	Einzelzelle und Nickelschaum.....	28
5.4	Dichtung	30
6	Simulation des Temperaturfeldes.....	30
6.1	Definition des thermischen Zyklus	31
6.1.1	Temperatur Input	32
6.1.2	Massenstrom Input	35
6.2	Simulation der Gleichverteilung der Kathodenluft	36
6.3	Modellierung	39
6.3.1	Bauteilgeometrie und Vernetzung	39

6.3.2	Problem Simulationszeit.....	43
6.3.3	Definition des Massenstroms der Luft in Abaqus	45
6.3.4	Randbedingungen und Vereinfachungen.....	46
6.4	Zwischenergebnis Temperaturfeld.....	48
6.5	Validierung des Temperaturfeldes.....	54
6.6	Koppelung mit der Spannungssimulation	57
7	Simulation der Spannungen	59
7.1	Bauteilgeometrie und Vernetzung.....	59
7.2	Randbedingungen und Einspannbedingung.....	61
7.3	Bereichsergebnisse.....	62
7.3.1	Temperaturbereich.....	63
7.3.2	Spannungsbereich	63
8	Ergebnisse und Diskussion	64
8.1	Globale Betrachtung.....	64
8.1.1	Knotenlinie am mittleren Interkonnektor	66
8.1.2	Knotenlinie an der mittleren Zelle.....	69
8.2	Interkonnektor	72
8.3	Zelle	77
8.3.1	Zeitpunkt der größten maximalen Hauptnormalspannung	77
8.3.2	Ergebnisse im Zellquerschnitt	83
8.4	Dichtung	93
9	Zusammenfassung	97
9.1	Simulation des Temperaturfeldes	97
9.2	Simulation der Spannungen	97
10	Ausblick	98
10.1	Material und Randbedingungen.....	98
10.2	Temperaturfeldberechnung und Elektrochemie.....	99
10.3	Zellschädigung	99
	Abkürzungen	100
	Formelzeichen	100
	Lateinische Formelzeichen	100

Griechische Formelzeichen.....	101
Operatoren und Bezeichnung.....	101
Indizes	102
Abbildungsverzeichnis	102
Tabellenverzeichnis	108
Literaturverzeichnis	108

1 Einleitung

Die Entwicklung der Brennstoffzellentechnik ist seit mehr als zwanzig Jahren in verschiedenen meist nationalen Programmen vorangetrieben worden. Die heutigen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten beziehen sich im Wesentlichen auf die Reduktion der Kosten bei der Herstellung, die Verbesserung der Lebensdauer, den möglichst einfachen Einsatz marktgängiger Brennstoffe und die Systemintegration. Die weltweite Motivation, Brennstoffzellen am Markt einzuführen, ist relativ ähnlich. [Winkler W. 2008, S.15]

„Die aktuelle Debatte zu den besten Wegen zur CO₂ Minderung und zum Klimaschutz sind dabei ein ebenso starkes Motiv, wie die steigenden Energiepreise und die damit verknüpfte Frage der Versorgungssicherheit. Während die Motivation Klimaschutz in Europa besonders betont wird, ist die Versorgungssicherheit in Japan wesentlicher Antrieb.“ [Winkler W. 2008, S.15]

Die AVL-List beteiligt sich ebenfalls an solchen nationalen, aber auch internationalen Forschungsprogrammen mit dem Ziel, die Lebensdauer von Brennstoffzellensystemen zu erhöhen. Dies geschieht einerseits durch Aufklärung der Degradationsmechanismen, andererseits durch Analyse und Simulation der thermomechanischen Schädigung von einzelnen Zellen und gesamten Brennstoffzellenstacks.

Solid Oxide Fuel Cells (SOFCs) sind Festoxidbrennstoffzellen die bei hoher Temperatur betrieben werden. Sie stellen eine Zukunftstechnologie mit enormem Potential zur Umwandlung von chemischer Energie in elektrische Energie mit hohem Wirkungsgrad dar. Nicht nur mit Wasserstoff, sondern auch mit anderen Brennstoffen, wie z.B. Methan und Biogas können SOFCs betrieben werden. Dadurch entsteht die Möglichkeit der Nutzung erneuerbarer Energieträger. Es fallen während des Betriebes von SOFCs nur sehr geringe Emissionen an, sodass ein großflächiger Einsatz sich vorteilhaft auf die Ökosysteme und letztendlich auf die Lebensqualität auswirkt. Die eingeschränkte Lebensdauer ist ein wesentlich limitierender Faktor für den erfolgreichen Einsatz von SOFCs. [AVL List et al. 2012, S.6]

1.1 Problemstellung

Aufgrund der hohen Betriebstemperatur von SOFCs wird ein Aufheizprozess benötigt, wodurch die Zellen wegen der vorherrschenden Temperaturverteilung und der unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten der verwendeten Materialien, mechanisch beansprucht werden. (Abbildung 1-1) Hohe Temperaturgradienten rufen hohe Bauteilspannungen hervor. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die durch Aufheizen und Abkühlen hervorgerufenen Spannungen in globaler als auch in detaillierter Form zu simulieren und zu analysieren. Es ist weiters ein Arbeitsablauf zu definieren, der den Simulationsablauf reproduzierbar macht. Die dadurch gewonnenen Erkenntnisse sollen in weiterer Folge der Erhöhung der Langzeitstabilität dienen. Die elektrochemischen Vorgänge werden nicht mitberücksichtigt, da die höchsten Temperaturgradienten in der Aufheizphase und in der Abkühlphase zu erwarten sind. Das Abkühlen spielt dahingehend eine Rolle, da spätestens bei planmäßiger Wartung das gesamte System heruntergefahren werden muss, um bei Umgebungstemperatur Arbeiten durchführen zu können und die Brennstoffzelle rasch wieder in

1. Einleitung

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

Betrieb zu versetzen. Einzelne Zellen und Komponenten innerhalb eines gesamten Stacks sind stark miteinander gekoppelt, wodurch eine Veränderung in einer Zelle direkte Auswirkungen auf den Rest des Systems hat. Eine Analyse der thermomechanischen Schädigungen ist also nur im Rahmen einer Simulation des gesamten Stacks sinnvoll.

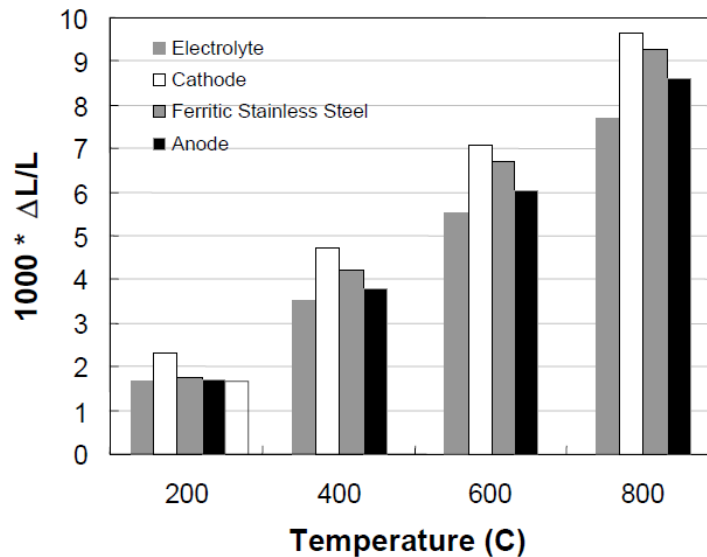


Abbildung 1-1: Ausdehnung typischer Zellkomponenten einer planaren SOFC mit Ni-YSZ Anode, YSZ Elektrolyt, LSM Kathode und ferritischem Stahl-Interconnector [EG&G 2004, S. 7-11]

Vorerst soll eine globale, homogene Spannungs-Dehnungsbetrachtung mit einem globalen Temperaturfeld gemacht werden, wozu eine genaue Implementierung des Heizzyklus erforderlich ist. In einem weiteren Schritt ist auch eine detaillierte Spannungs-Dehnungsbetrachtung für die einzelnen Lagen der Zellmaterialien durchzuführen.

1.2 Vorgangsweise

Zu Beginn werden die Grundlagen der Brennstoffzellentechnik erläutert und im Speziellen wird auf die Festoxidbrennstoffzelle eingegangen. Danach wird kurz auf Herstellverfahren und Schädigungsmechanismen eingegangen. Gleich darauf wird die verwendete numerische Methodik bezüglich eines verwendeten Elementtyps erklärt.

Im praktischen Teil der Arbeit werden zuerst die einzelnen Schritte des für die thermo-mechanische Simulation entwickelten Workflows erklärt. Die Beschreibung des verwendeten Brennstoffzellenmoduls samt Bauteile soll einen Überblick über das betrachtete System geben. Danach wird das Wärmeübertragungs-Simulationsmodell für das räumliche Temperaturfeld betrachtet. Randbedingungen und Eingabedaten werden aufgrund der am Prüfstand vorherrschenden Bedingungen definiert. Als nächster Schritt erfolgt die Betrachtung und Bewertung der Simulationsergebnisse des räumlichen Temperaturfeldes mit den am Prüfstand gemessenen Daten. Auf die Koppelung der Temperaturfeld-Simulation mit der Spannungssimulation wird gleich darauf kurz eingegangen. Nach Darstellung des Aufbaus des Modelles für die Spannungssimulation

2. Brennstoffzelle

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

werden bereits erste Ergebnisse für die Belastung der Struktur erläutert. Im Anschluss werden weitere Simulationsergebnisse auch in Richtung einzelner Zellschichten abgebildet und diskutiert. Am Ende erfolgt nach kurzer Zusammenfassung ein Ausblick hinsichtlich weiterführender Simulationstätigkeiten, welche eine detailliertere Betrachtung dieses Problems ermöglichen.

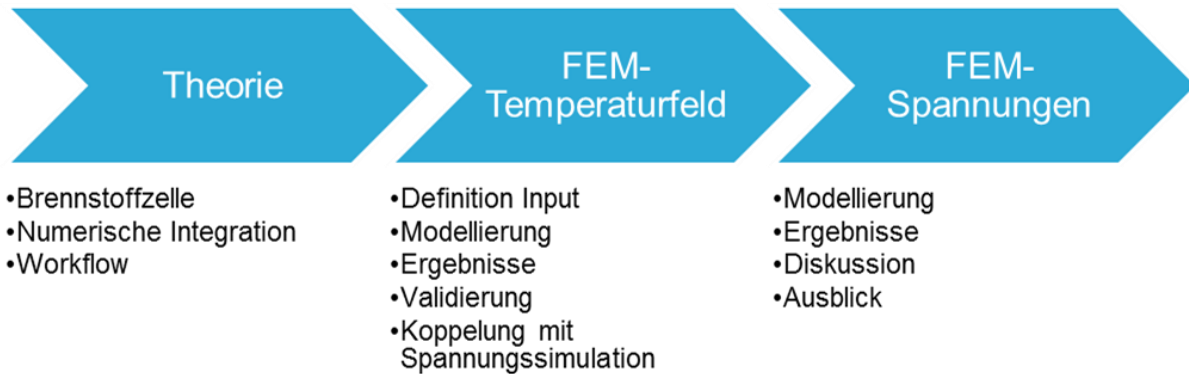


Abbildung 1-2: Vorgehensweise

2 Brennstoffzelle

Um zu zeigen, dass Brennstoffzellen nicht an einen Carnot-Wirkungsgrad gebunden sind, wird im Folgenden der Vergleich zum Verbrennungsmotor herangezogen.

Brennstoffzellen sind elektrochemische Energiewandler, welche die chemische Energie von kontinuierlich zugeführten Brennstoffen **direkt** in elektrische Energie umwandeln und versprechen dabei eine Stromerzeugung mit gutem Wirkungsgrad und geringer Umweltbelastung. Dies geschieht in einem idealerweise isothermen Prozess. [Nguyen-Xuan 2011, S. 7]

Die prinzipielle Funktion der Brennstoffzelle wurde 1938 von Christian Friedrich Schönbein entdeckt und im darauf folgenden Jahr konnte der Physiker und Jurist Sir William Robert Grove auf dieser Basis die erste Brennstoffzelle entwickeln. [Eichseder, Klell 2010, S. 219]

Konventionelle Stromerzeuger benötigen gegenüber der Brennstoffzelle einen dreistufigen Umwandlungsprozess um die chemisch gespeicherte Energie in Strom umzuwandeln. Wird beispielsweise Benzin in einem Verbrennungsmotor eingesetzt, dann muss zuerst die chemische Energie des Kraftstoffes im Brennraum freigesetzt werden. Die dabei abgegebene thermische Energie ruft eine Volumenänderung hervor, die den Kolben durch die erzeugte Bewegungsenergie hinunterdrückt. Kinetische Energie treibt dann eine Welle an, damit mittels eines Generators Strom erzeugt werden kann. Es treten hierbei an mehreren Stellen Verluste auf, die den Gesamtwirkungsgrad bei jeder Umwandlung herabsetzen. Verständlicherweise bedeutet hier in Abbildung 2-1 der kürzere Weg der Brennstoffzelle auch einen höheren Wirkungsgrad. Außerdem besitzt die Brennstoffzelle auch keinerlei bewegliche Teile, wodurch auch keine Reibungsverluste, dadurch auch kein Verschleiß und kaum Geräusche auftreten. [Geitmann S. 2012, S.142]

2. Brennstoffzelle

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

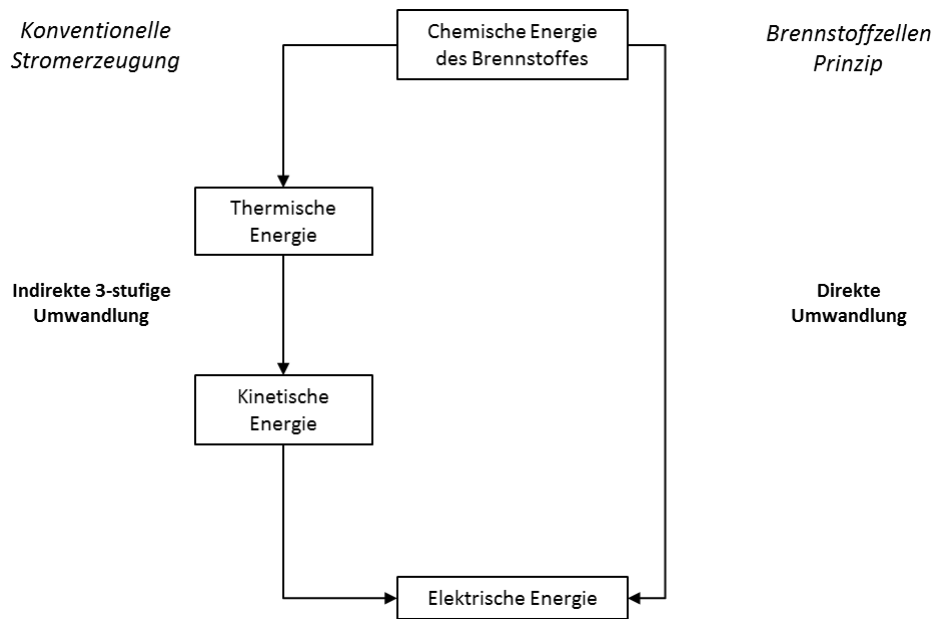


Abbildung 2-1: Dreistufige und einstufige Energieumwandlung [Geitmann S. 2012, S.141]

Der thermodynamische Wirkungsgrad eines Verbrennungsmotors ist somit durch den Carnot-Wirkungsgrad begrenzt, welcher von der mittleren oberen und unteren Temperatur des Prozesses bestimmt wird:

$$\eta_c = 1 - \frac{T_u}{T_o} \quad (2-1)$$

T_o wird durch die mechanische und thermische Belastbarkeit der Bauteile begrenzt und die Absenkung von T_u ist durch die Umgebungstemperatur eingeschränkt. Bei der Brennstoffzelle ist der thermodynamische Wirkungsgrad durch den Quotienten aus der Änderung der freien Enthalpie ΔG (nutzbare stoffgebundene Energie) zur Änderung der Enthalpie ΔH (gesamte stoffgebundene Energie) gegeben:

$$\eta_{th} = \frac{\Delta G}{\Delta H} \quad (2-2)$$

In Abbildung 2-2 ist die Gegenüberstellung des thermodynamischen Wirkungsgrads der Brennstoffzelle und des Carnot-Wirkungsgrads:

2. Brennstoffzelle

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

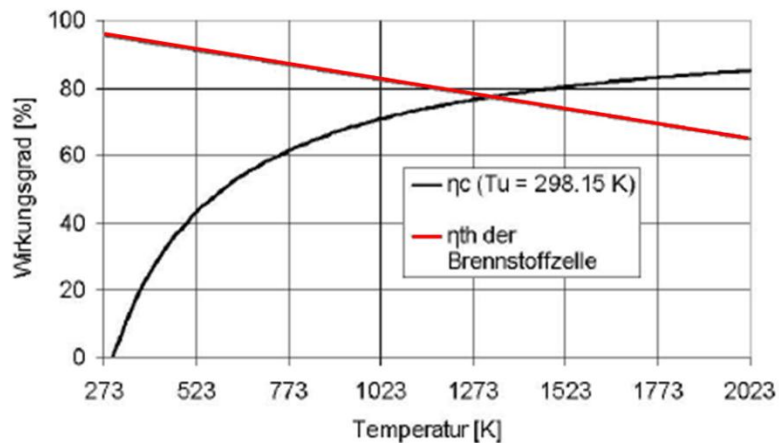


Abbildung 2-2: Gegenüberstellung der temperaturabhängigen idealen thermodynamischen Wirkungsgrade einer Brennstoffzelle und einer Verbrennungskraftmaschine [Eichlseder, Klell 2010, S. 220]

Es ist gut zu erkennen, dass der thermodynamische Wirkungsgrad der Brennstoffzelle bis zu einer Temperatur von ca. 1100°C über dem Carnotschen Wirkungsgrad liegt. Es treten in der Praxis bei der Brennstoffzelle, als auch bei der Verbrennungskraftmaschine Verluste auf, dass die theoretischen möglichen Werte bei weitem nicht erreicht werden. Es lässt sich jedoch sagen, dass die Brennstoffzellen bereits bei niedriger Last gute Wirkungsgrade aufweisen. [Eichlseder, Klell 2010, S. 220]

Verluste in Brennstoffzellensystemen: [Geitmann S. 2012, S.149]

- Elektrischer Widerstand (Ohmsche Verluste)
- Eingeschränkter Grenzflächendurchgang zwischen Elektrolyt und Elektrode (Ladungsverluste)
- Eingeschränkter Stofftransport (Coulombsche Reibung, Diffusionsrate)
- Ungeeignete Materialwahl der Elektroden und Katalysatoren
- Umgebungseinflüsse (zu niedrige Temperatur)
- Eigenenergiebedarf angeschlossener Komponenten (Peripherie)

2.1 Funktion

Die Frage nach der Funktion kann eigentlich ganz knapp beantwortet werden:

„Die Elektrolyse wird umgekehrt.“

Mit Hilfe von Strom wird bei der Elektrolyse Wasser (H_2O) in seine Bestandteile Wasserstoff (H_2) und Sauerstoff (O_2) zerlegt. Kehrt man diesen Vorgang um, erhält man das Arbeitsprinzip der Brennstoffzelle. Bei der Vereinigung von Wasserstoff und Sauerstoff entsteht Strom, Wärme und Wasser. [Geitmann S. 2012, S.142]

Dies soll nun anhand der Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzelle mit alkalischen Elektrolyten (Alkaline Fuel Cell: AFC) erläutert werden, siehe Abbildung 2-3.

2. Brennstoffzelle

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

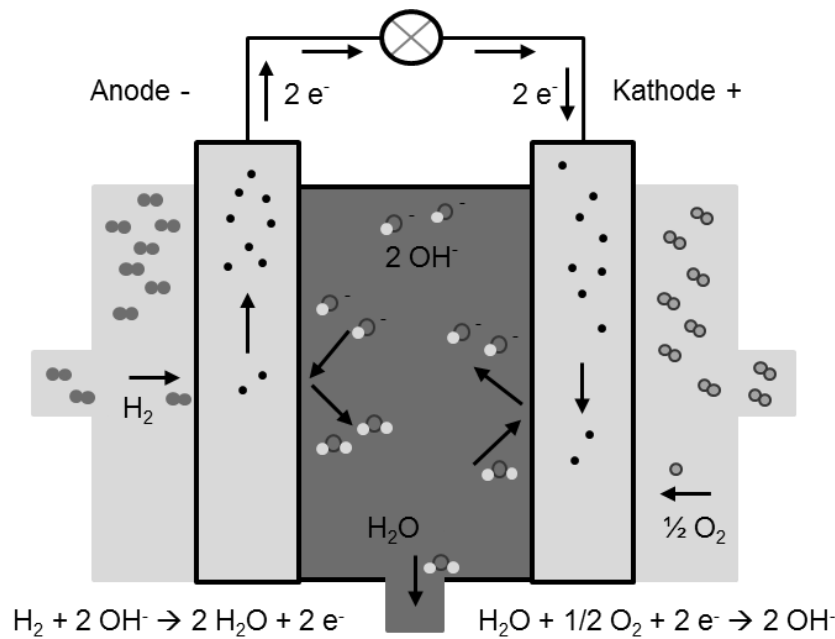


Abbildung 2-3: Prinzip der Brennstoffzelle (AFC) [Eichlseder, Klell 2010, S. 221]

Der Brennstoff Wasserstoff reagiert an der Anode mit negativ geladenen Hydroxid-Ionen (OH^-) zu Wasser, wobei zwei Elektronen abgegeben werden.

Reaktion an der Anode: $H_2 + 2 OH^- \rightarrow 2 H_2O + 2 e^-$

Die Elektronen fließen über den äußeren Stromkreis zur Kathode. Dort reagiert der Sauerstoff mit Wasser durch Aufnahme von Elektronen zu Hydroxid-Ionen.

Reaktion an der Kathode: $H_2O + 0,5 O_2 + 2 e^- \rightarrow 2 OH^-$

Die OH^- -Ionen wandern durch den Elektrolyten und schließen somit den Kreis. Sie stehen dort wieder für die Oxidation von Wasser zur Verfügung. Dies ergibt eine Gesamtreaktion, bei der ein Strom von $2 e^-$ je Molekül H_2 fließt. [Eichlseder, Klell 2010, S. 222]

Gesamtreaktion: $H_2 + 0,5 O_2 \rightarrow H_2O$

Diese Art von Brennstoffzellen ist an hochreine Brennstoffe gebunden, da sie gegenüber CO_2 sehr empfindlich ist. Es kommt zum auskristallisieren der Kalilauge. [Voigt, Höller, Küter 2007, S. 21]

Je nach Bauart erzeugt eine einzelne Brennstoffzelle unter Last ca. 0,7 Volt Gleichspannung. Die maximale Spannung liegt bei etwa 1,2 Volt, dies entspricht einer Leistung von ca. 100 Watt. Erst wenn man viele Einzelzellen in Serie schaltet, erhält man die für den Betrieb ausreichende Leistung. Ein Paket in Reihe geschaltene Zellen nennt man Stack (engl. Stapel). Für Brennstoffzellen gilt: [Geitmann S. 2012, S.147]

- Die Anzahl der Zellen innerhalb des Stacks bestimmt die Spannung.
- Die Größe der aktiven Zellfläche bestimmt die Stromstärke.

2. Brennstoffzelle

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

- Die Größe des Brennstoffzellen-Stacks bestimmt die Leistung.
- Die Größe des Brennstoffreservoirs bestimmt die Betriebsdauer.

2.2 Brennstoffzellen-Typen

Der Aufbau aller Brennstoffzellen besteht aus den zwei Elektroden (Kathode und Anode) und einem Elektrolyten, der die beiden Elektroden trennt. Brennstoffzellen werden nach der Art des Elektrolyten, Arbeitstemperatur, Wirkungsgrad und Anwendungsgebiet klassifiziert. Tabelle 2-1 gibt einen Überblick über gängige Typen von Brennstoffzellen.

Brennstoffzellen	Elektrolyt	Arbeitstemperatur	Elektrischer Wirkungsgrad	Brenngas Oxydant
Alkalische Brennstoffzelle AFC	Kalilauge	Raumtemperatur bis 90°C	60-70%	H ₂ O ₂
Membran-Brennstoffzelle PEMFC	Protonenleitende Membran	Raumtemperatur bis 80°C	40-60%	H ₂ , Kohlenwasserstoffe z.B. Erdgas, O ₂ , Luft
Hochtemperatur-Membran-Brennstoffzelle HT-PEMFC	Protonenleitende Membran	130-200°C	40-60%	Kohlenwasserstoffe, H ₂ , O ₂ , Luft
Direkt-Methanol-Brennstoffzelle DMFC	Protonenleitende Membran	Raumtemperatur bis 200°C	20-30%	CH ₃ OH O ₂ , Luft
Phosphorsäure Brennstoffzelle PAFC	Phosphorsäure	160-220°C	55%	Kohlenwasserstoffe, H ₂ , O ₂ , Luft
Karbonatschmelzen Brennstoffzelle MCFC	Alkalikarbonat-schmelzen	620-660°C	65%	Kohlenwasserstoffe, H ₂ , O ₂ , Luft
Oxidkeramische Brennstoffzelle SOFC	Yttriumstabilisiertes Zirkonoxid	800-1000°C	60-65%	Kohlenwasserstoffe, H ₂ , O ₂ , Luft

Tabelle 2-1: Brennstoffzellen-Typen [Voigt, Höller, Küter 2007, S. 21]

2.3 Solid Oxid Fuel Cell

Die Festoxid-Brennstoffzelle (Solid Oxid Fuel Cell, SOFC) gehört zu den Hochtemperaturbrennstoffzellen. Wegen der hohen Betriebstemperatur können neben Wasserstoff auch Kohlenwasserstoffverbindungen (C_nH_m) als Brennstoff verwendet werden. Solche Brennstoffe können z.B. Erdgas, Biogas, oder Deponiegas sein.

2.3.1 Funktion der SOFC

Bei Verwendung einer Kohlenwasserstoffverbindung als Brennstoff werden durch interne Reformierung die Wasserstoffatome von den Kohlenstoffmolekülen abgespalten, so dass letztlich reiner Wasserstoff der Anode zugeführt wird. Die Elektronen werden katalytisch vom Atomkern abgespalten, so dass sie dem Verbraucher zur Verfügung stehen. Auf der Kathodenseite wird der in

2. Brennstoffzelle

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

der Luft enthaltene Sauerstoff katalytisch abgespalten und reduziert, dass zweifach negativ geladene Sauerstoffionen vorliegen. [Geitmann S. 2012, S.158]

In Abbildung 2-4 ist dieser Vorgang schematisch dargestellt.

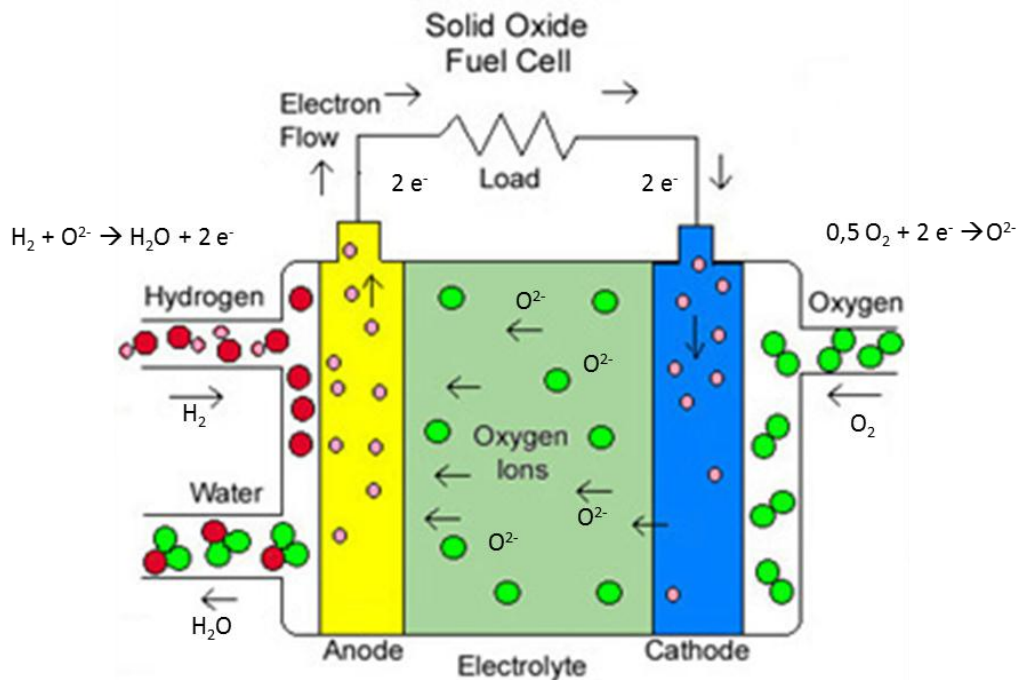


Abbildung 2-4: Prinzip der SOFC [Ogawa-paliwowe 2012]

Die Reaktionen dieses Vorgangs, inklusive der Dampfreformierung von Methan und Wassergas-Shift-Reaktion sind: [EG&G 2004, S. 7-20]

Anode:	$H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^-$	Oxidation/Elektronenabgabe
	$CH_4 + H_2O \rightarrow 3H_2 + CO$	Dampfreformierung von Methan
	$CO + O^{2-} \rightarrow CO_2 + 2e^-$	Wassergas-Shift-Reaktion
Kathode:	$0,5 O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-}$	Reduktion/Elektronenaufnahme
Gesamtreaktion:	$H_2 + 0,5 O_2 \rightarrow H_2O$	Redoxreaktion
	$CO + 0,5 O_2 \rightarrow CO_2$	

Der feste Elektrolyt wird bei Temperaturen von 700-900 °C ionenleitend, so dass die O_2 -Ionen von der Kathode zur Anode wandern. Das Material des Elektrolyten ist üblicherweise Yttrium-stabilisiertes Zirkoniumdioxid und ist elektronisch nicht leitfähig. Aus diesem Grund müssen die Elektronen von der Anodenseite den langen Weg über den Verbraucher zur Kathode nehmen. An der Anode verbinden sich die Sauerstoffionen mit den Wasserstoffprotonen. Wird kathodenseitig Luft

2. Brennstoffzelle

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

zugeführt, fallen dort als Endprodukte Stickstoff (N_2) und unverbrauchter Sauerstoff an. Anodenseitig fallen bei Verwendung von Kohlenwasserstoffen neben Wasserdampf (H_2O) auch Kohlenmonoxid (CO) und Kohlendioxid (CO_2) an. [Geitmann S. 2012, S.158]

2.3.2 Prinzipieller Aufbau

Grundsätzlich besteht eine einzelne Zelle immer aus Anode, Kathode und Elektrolyt. Um die Leistung zu steigern, werden mehrere Zellen in Serie geschaltet. Die Kontaktierung erfolgt dabei über eine Bipolarplatte, oder auch Interkonnektor genannt. (Abbildung 2-5)

Der Aufbau einer SOFC kann planar, aber auch tubulär sein. Vorteil der tubulären Bauweise ist, dass eine wesentlich geringere Anzahl an Dichtflächen erforderlich ist. Die planare Bauweise erreicht hingegen eine höhere Leistungsdichte. [Karl J. 2006, S.235]

In Abbildung 2-5 sind beide Technologien ersichtlich. Für die vorliegende Arbeit wird nur mehr das planare Konzept verfolgt.

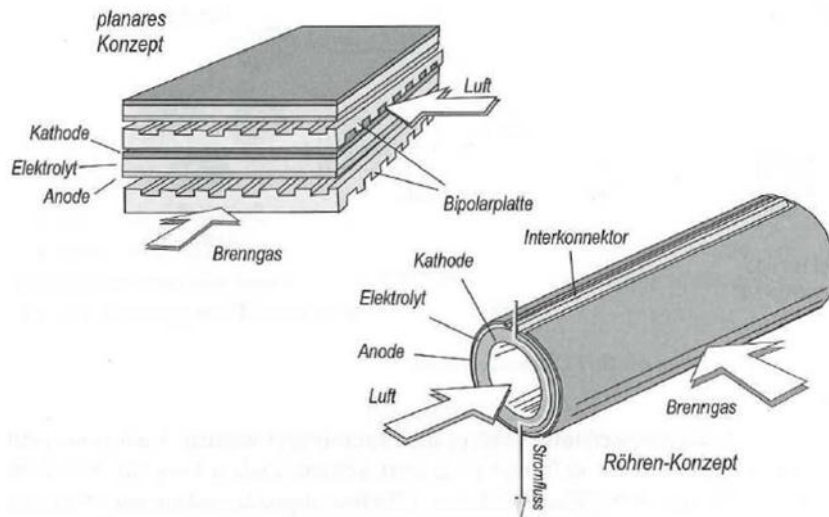


Abbildung 2-5: Aufbau von planaren und tubulären SOFC-Brennstoffzellen [Karl J. 2006, S.236]

Innerhalb der planaren Bauweise kann außerdem hinsichtlich der Gastromführung unterschieden werden.

2. Brennstoffzelle

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

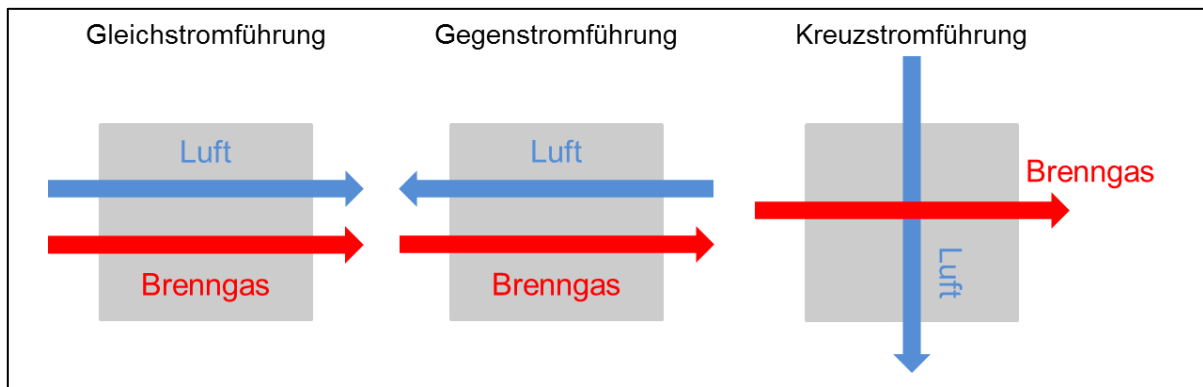


Abbildung 2-6: Verschiedene Gasstromführungen

Die Temperaturverteilung ist bei Kreuzstromführung stark inhomogen, außerdem weist diese Konstellation die höchsten Temperaturgradienten auf, was wiederum thermische Spannungen hervorruft. Bei Gleichstromführung sind die durch Temperaturgradienten hervorgerufenen Spannungen am geringsten und bei Gegenstromführung liegen diese im Mittel. Der höchste elektrische Wirkungsgrad ergibt sich bei Gegenstromführung. [Nguyen-Xuan 2011, S. 12]

Das Zelldesign kann wiederum nach jener Zellschicht unterschieden werden, die die mechanisch tragende Aufgabe übernimmt. Abbildung 2-7 zeigt schematisch die wichtigsten planaren Zelldesigns.

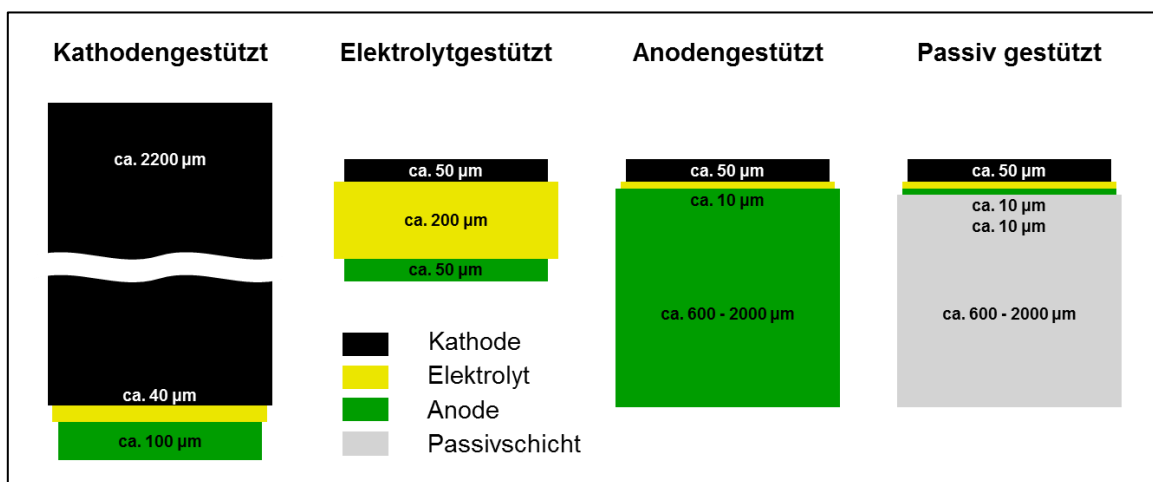


Abbildung 2-7: Unterschiede im Zelldesign [Nagel 2008, S. 53]

In der vorliegenden Arbeit wird vor allem die elektrodengestützte Variante betrachtet.

2.3.2.1 Anode und Anodenfunktionsschicht

Die Anode nimmt von den abreagierenden Stoffen Elektronen auf, das heißt sie bewirkt eine Oxidation (Elektronenabgabe). Da der Elektronenfluss von der Anode zur Kathode verläuft, ist die Anode der elektrisch negative Pol. In oxidkeramischen Brennstoffzellen wird als Anodenmaterial überwiegend ein Verbund aus dem Übergangsmetall Nickel (Ni) und Yttrium-stabilisiertem

2. Brennstoffzelle

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

Zirkoniumdioxid (YSZ) eingesetzt. Ein Verbund aus Keramik und Metall wird auch „Cermet“ (Ceramic metal) genannt. Es hat sich als günstig erwiesen, eine zusätzliche Schicht mittels Vakuumschlickerguss auf die eigentliche Anode aufzubringen. Diese Schicht, auch Anodenfunktionsschicht genannt, hat ein feineres Gefüge und ist somit elektrokatalytisch aktiver. [Nguyen-Xuan 2011, S. 8]

2.3.2.2 Elektrolyt

Der keramische Elektrolyt ist die zentrale Komponente, er ist ionenleitend und gasdicht. Er wird, wie schon oben erwähnt, hauptsächlich aus Yttrium-stabilisiertem Zirkoniumdioxid (YSZ) hergestellt. Die Dotierung von Zirkoniumdioxid (ZrO_2) mit Yttriumoxid (Y_2O_3) ist notwendig, damit ZrO_2 bei den hohen Betriebstemperaturen der SOFC die Kristallstruktur (Fluoritgitter) beibehält. Undotiertes ZrO_2 ändert seine Kristallstruktur von monoklin zu tetragonal bei einer Temperatur von ca. $1170^\circ C$. Dieser Phasenübergang würde sonst eine Volumenänderung hervorrufen, die zu Rissen und Gasleckagen im spröden, keramischen Zirkoniumdioxid führen kann. Durch die Dotierung wird eine stabile kubische Kristallstruktur erreicht, die über den gesamten Temperaturbereich für mechanische Stabilität des Elektrolyten sorgt. Noch wichtiger ist, dass durch die Dotierung mit Y_2O_3 Sauerstofflückenstellen im Kristallgitter von ZrO_2 geschaffen werden, die erst den Sauerstoffionentransport (O^{2-}) ermöglichen. [Nguyen-Xuan 2011, S. 8]

2.3.2.3 Kathode und Kathodenfunktionsschicht

Mehrere Studien haben gezeigt, dass der Spannungsabfall in einer SOFC an der Kathode am größten ist. Daher nimmt die Entwicklung leistungsfähiger Kathodenmaterialien eine Schlüsselstellung ein. Hauptsächlich werden keramische Kathoden mit Perowskit-Kristallstruktur hergestellt und bestehen aus mit Strontium dotiertem Lanthanmanganit $(La_{1-x}Sr_x)MnO_3$, abgekürzt LSM. Den unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Elektrolyt und LSM-Kathode kann man mit einer Mischschicht aus Elektrolyt- und Kathodenmaterial entgegenwirken. Diese Schicht wird auch als Kathodenfunktionsschicht bezeichnet. [Nguyen-Xuan 2011, S. 9]

2.3.2.4 Dichtung

In einer Brennstoffzelle müssen Anodengasraum und Kathodengasraum voneinander gasdicht getrennt sein. Keines der Betriebsgase darf aus dem Brennstoffzellenstack entweichen. Dafür müssen die Gasräume gegen die äußere Atmosphäre abgedichtet werden. Es kommen dafür entweder keramische (starre), oder metallische (kompressible) Dichtungen zum Einsatz. Die am weitesten entwickelten keramischen Dichtungen sind auskristallisierte Glaskeramiken. Glasdichtungen können besser an die Bauteilgeometrie angepasst werden, neigen aber eher zur Rissbildung. Für metallische Dichtungen müssen die Fertigungstoleranzen genau eingehalten werden, um Gasdichtheit zu gewährleisten. Werden kompressible Dichtungen verwendet, ist der ganze Stack kein starrer Körper mehr und die thermischen Spannungen werden reduziert. Außerdem besteht die Möglichkeit defekte Zellen auszutauschen. [Nguyen-Xuan 2011, S. 9]

2.3.2.5 Interkonnektor (Bipolarplatten)

Die Konstruktion der Interkonnektoren stellt eine große Herausforderung dar. Sie haben im Wesentlichen drei große Aufgaben. Sie stellen die elektrische Verbindung zwischen benachbarter Zellen dar, trennen die verschiedenen Gasräume voneinander und sind für die gleichmäßige Verteilung der Betriebsgase über die aktive Zellfläche verantwortlich. Abhängig von der Betriebstemperatur werden verschiedene Materialien verwendet. Für Temperaturen von 800°C bis 1000°C werden keramische Interkonnektoren, basierend auf Lanthan- oder Yttriumchromat verwendet. Für geringere Temperaturen von etwa 600°C bis 800 °C werden metallische Interkonnektoren basierend auf Chrom- und Eisenlegierungen eingesetzt. [Nguyen-Xuan 2011, S. 10]

2.3.3 Herstellung und Zusammenbau

Es gibt eine Reihe von Herstellungsverfahren für die Produktion von SOFCs [Fz-Juelich 2012]:

- Foliengießen
- Vakuumschlickerguss
- Siebdruck
- Nasspulverspritzen
- Warmpressen

Beim Foliengießen wird der sogenannte Schlicker vergossen. Dieser ist ein Gemisch aus den Ausgangspulvern, organischem Bindemittel, Lösungsmittel und weiteren Additiven. Dabei läuft der Schlicker aus einem Vorratsbehälter auf eine Kunststoffolie, die mit konstanter Geschwindigkeit unter dem Behälter vorbeifährt. Auf dieser Folie bildet sich die Schlickerschicht, deren Dicke mittels höhenverstellbarem Gießrakel bestimmt werden kann. Nach dem Vergießen durchläuft die Keramikfolie einen Trockentunnel, in dem die Folie gezielt getrocknet werden kann. Dadurch entsteht eine selbsttragende Keramikfolie, die gestanzt oder gesägt werden kann und bei Temperaturen > 1000°C gesintert und anschließend beschichtet wird.

Beim Vakuumschlickerguss werden ähnliche Ausgangsmaterialien wie beim Foliengießen in eine poröse Form gefüllt und das Lösungsmittel abgesaugt. Das Anlegen des Unterdrucks beschleunigt den Vorgang sehr. Eine Modifikation dieses Verfahrens wird beispielsweise zur Herstellung der Anodenschicht verwendet.

Der Siebdruck ist ein mechanisches Druckverfahren und wird unter anderem zur Aufbringung beider Elektrodenschichten verwendet. Es wird eine Paste durch durchlässige Bereiche eines Siebs gedrückt und haftet an einem unter dem Sieb liegenden Objekt, welches bedruckt werden soll. Das Schema des Vorganges ist in Abbildung 2-8 ersichtlich. Die Paste ist eine hochviskose Masse, die im wesentlichen aus Feststoffpartikeln, Binder und Lösungsmittel besteht. Beim anschließenden Trocknen verdampft das Lösungsmittel und die Schicht haftet auf dem Objekt. Dieses Verfahren ist aus dem Bereich der Polygrafie z.B. zur Herstellung von Plakaten und Bildern bekannt. [Fz-Juelich 2012]

2. Brennstoffzelle

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

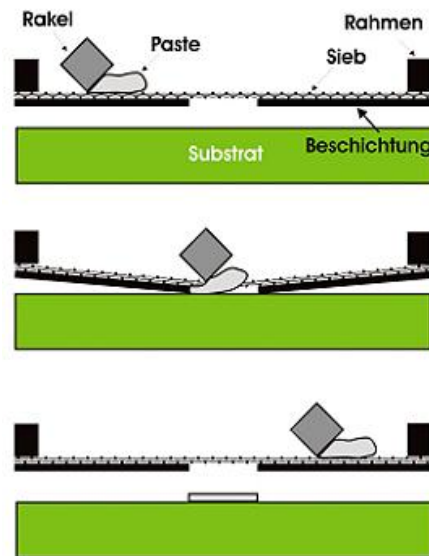


Abbildung 2-8: Schema des Siebdruckverfahrens [Fz-Jülich 2012]

Die Abbildung 2-9 zeigt eine durch eine elektrolytgestützte SOFC, bei der die Elektrodenschichten durch Siebdruck aufgebracht wurden.

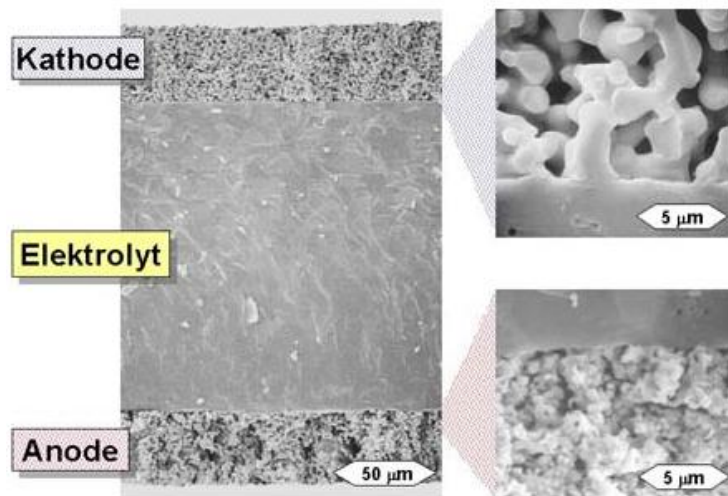


Abbildung 2-9: Durch Siebdruck hergestellte elektrolytgestützte Zelle [KIT 2012]

Das in Abbildung 2-10 dargestellte Nasspulverspritz-Verfahren ist ein einfaches und kostengünstiges Verfahren zum Beschichten von Oberflächen. Eine Suspension wird mittels einer Lackierpistole definiert auf die zu beschichtende Fläche aufgebracht. Die Suspension enthält das Beschichtungsmaterial in feinkörniger Pulverform. Ein Vorteil dieses Verfahrens ist die Flexibilität hinsichtlich zu besprühender Geometrien. [Fz-Juelich 2012]

2. Brennstoffzelle

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

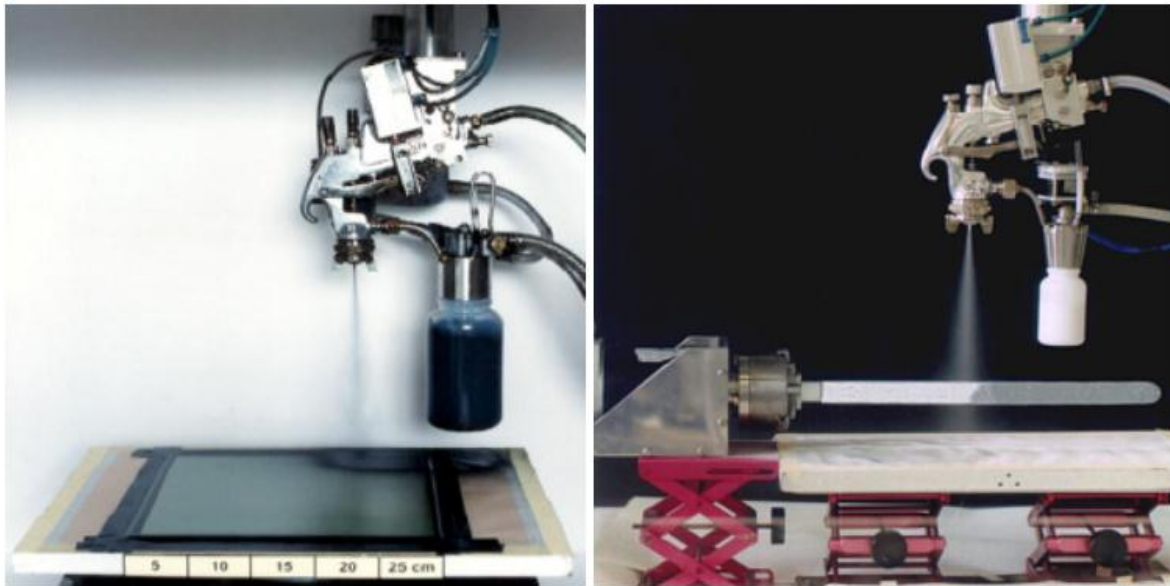


Abbildung 2-10: Nasspulverspritz-Verfahren für planare (links) und für tubulare (rechts) [Fz-Juelich 2012]

Das Warmpressen soll in Abbildung 2-11 anhand eines vom Jülicher-Forschungszentrum patentierten Verfahrens erläutert werden. Es wird hier schematisch die Herstellung des Anodensubstrates dargestellt.

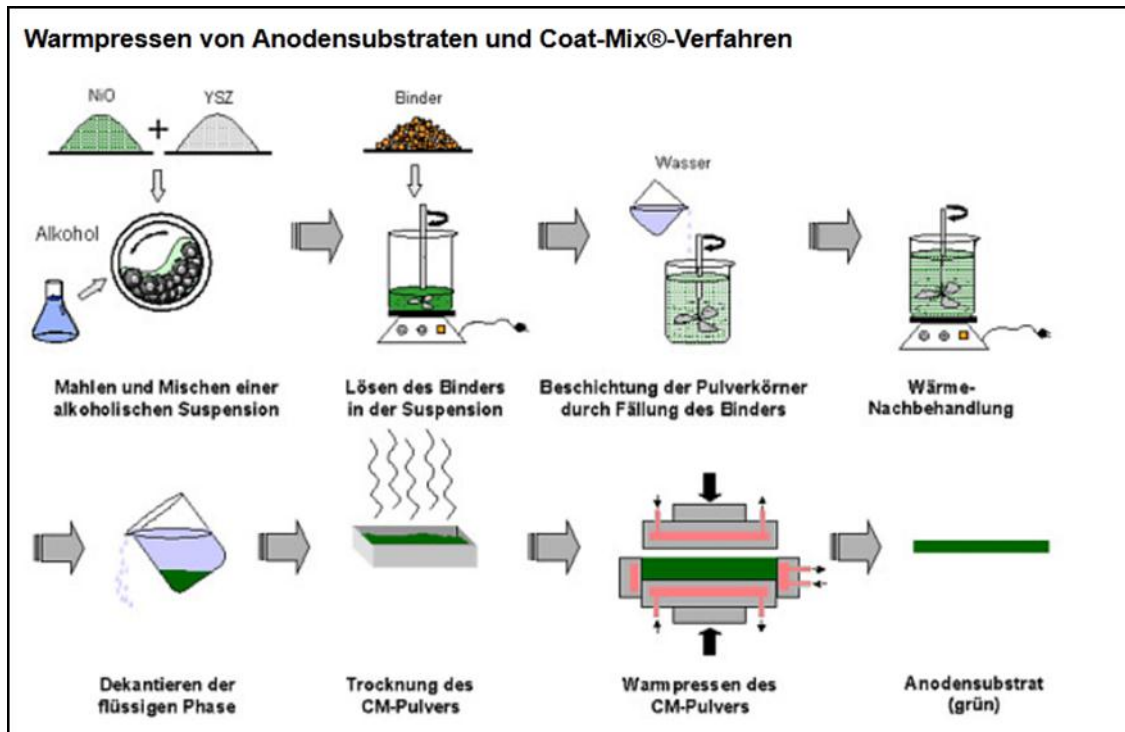


Abbildung 2-11: Warmpressen nach Coat-Mix-Verfahren® [Fz-Juelich 2012]

2.3.4 Schädigungsmechanismen

Die thermomechanischen Schädigungen sind zum einen stark von lokalen Effekten abhängig, wie Temperaturgradienten, Hot-spots oder lokalen Materialeigenschaften. Des Weiteren sind die einzelnen Zellen und Komponenten, wie oben bereits beschrieben, innerhalb eines Stacks stark miteinander gekoppelt. Das heißt, dass Veränderungen in einer Zelle direkte Auswirkungen auf den Rest des Systems haben. Mögliche lokale Schädigungen sind in Abbildung 2-12 ersichtlich.

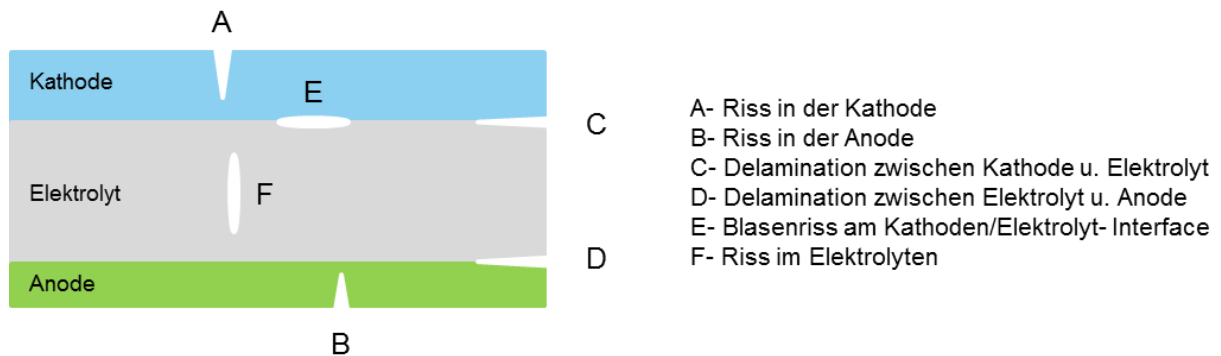


Abbildung 2-12: Mögliche Schädigungen in der Zelle [Qu J. et al. 2006, S.65]

Spannungen im Zellverbund rufen Risse hervor, die zu Leistungseinbußen und sogar zum vollständigen Versagen führen können. Durch die starke Koppelung können Veränderungen in den Elektroden-schichten z.B. Schädigungen in der Elektrolytschicht hervorrufen. Risse im Elektrolyten führen langfristig zwangsläufig zum Versagen der Zelle. [Ettler M. 2009, S.5-35]

3 Numerische Methoden

In diesem Kapitel soll ein kurzer, allgemeiner Überblick über das verwendete numerische Verfahren bezüglich eines speziellen Elementtyps gegeben werden.

3.1 Numerische Integration

Ein wesentlicher Schritt zur Bestimmung, beispielsweise der Steifigkeitsmatrix ist die Integration der verschiedenen Größen über das Elementvolumen. Die Integration kann nur in Ausnahmefällen analytisch durchgeführt werden, normalerweise muss man auf numerische Verfahren zurückgreifen. Es wird in solchen Fällen der Integralausdruck angenähert ausgewertet. Zur Erklärung wird hier im weiteren nur auf die Eindimensionale Integration eingegangen. Eine beliebige Funktion $F(x)$ wird durch die Integration

$$\int_a^b F(x)dx = \sum_i \alpha_i F(x_i) + R_n \quad (3-1)$$

numerisch ausgewertet. α_i sind Gewichte, die mit den Werten der Funktion $F(x_i)$ an den Stützstellen x_i multipliziert werden. Vernachlässigt man das Restglied kann als Näherung

$$\int_a^b F(x) dx \approx \sum_i \alpha_i F(x_i) \quad (3-2)$$

geschrieben werden. [Celigoj C. 1998, S 4.1]

3.1.1 Newton-Côtes-Quadratur

Hier wird der Integrationsbereich in n gleiche Intervalle unterteilt. Also werden nicht nur die Anzahl $n + 1$ der Stützstellen, sondern auch ihre Positionen $x_i (i = 0, 1, \dots, n)$ a priori festgelegt. ($(n + 1)$ äquidistante Stützstellen: x_i bekannt) [Celigoj C. 1998, S 4.2]

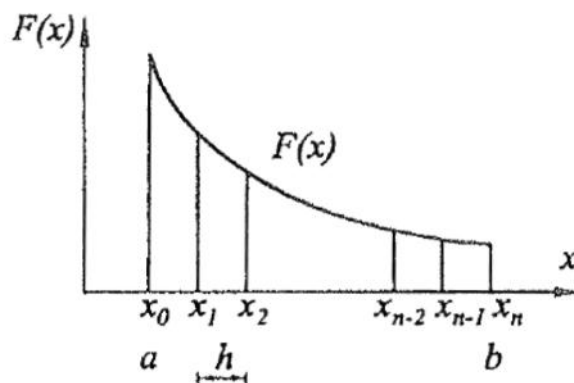


Abbildung 3-1: Newton-Côtes-Quadratur [Celigoj C. 1998, S 4.2]

$$x_0 = a; \quad x_1 = a + h; \quad x_2 = a + 2h; \quad \dots \quad x_n = b; \quad h = \frac{b - a}{n} \quad (3-3)$$

Interpolationspolynome wie das Lagrangesche Interpolationspolynom lassen sich gut integrieren und tauchen deshalb in der numerischen Integration an vielen Stellen auf. Nimmt man das Lagrangesche Interpolationspolynom n -ter Ordnung

$$l_i^n(x) = \frac{(x - x_0)(x - x_1) \dots (x - x_{i-1})(x - x_{i+1}) \dots (x - x_n)}{(x_i - x_0)(x_i - x_1) \dots (x_i - x_{i-1})(x_i - x_{i+1}) \dots (x_i - x_n)} \quad (3-4)$$

kann man als Näherung für $F(x)$

$$F(x) \approx \psi(x) = \sum_{i=0}^n l_i^n(x) F(x_i) \quad (3-5)$$

schreiben. [Celigoj C. 1998, S 4.2]

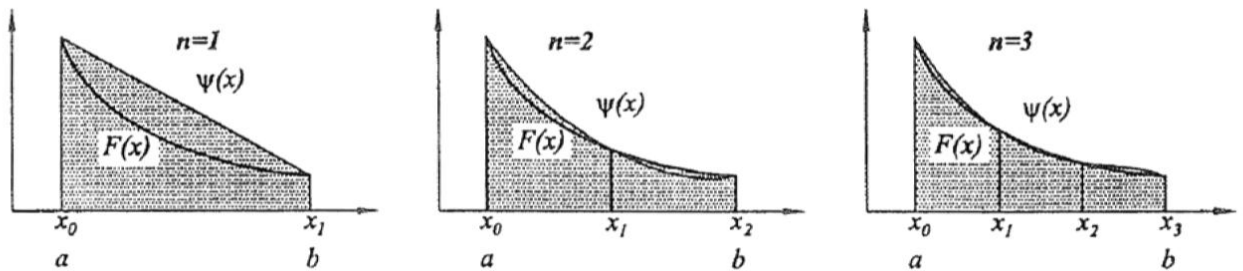


Abbildung 3-2: Näherungen $\psi(x)$ für $n=1$, $n=2$ und $n=3$ [Celigoj C. 1998, S.4.2]

Daraus ergibt sich das Integral:

$$\int_a^b F(x) dx \approx \int_a^b \psi(x) dx = \sum_{i=0}^n \underbrace{\int_a^b l_i^n(x) dx}_{\alpha_i} F(x_i) = \sum_{i=0}^n \alpha_i F(x_i) \quad (3-6)$$

Das Integral $\int_a^b F(x) dx$ wird also näherungsweise ausgewertet, dass anstelle von $F(x)$ ein Polynom $\psi(x)$ integriert wird. Mittels Koordinatentransformation werden die Gewichte α_i vom Integrationsbereich unabhängig gemacht. Dadurch erhält man die in der Literatur tabellierten *Newton-Côtes-Gewichte* C_i^n :

$$C_i^n = \frac{\alpha_i}{b-a} = \frac{1}{b-a} \int_a^b l_i^n(x) dx, \quad \sum C_i^n = 1 \quad (3-7)$$

Damit ergibt sich die Näherungsformel zu:

3. Numerische Methoden

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

$$\int_a^b F(x)dx \approx (b-a) \sum_{i=0}^n C_i^n F(x_i) \quad (3-8)$$

Intervallzahl n	C_0^n	C_1^n	C_2^n	C_3^n	C_4^n	C_5^n	C_6^n	Obere Grenze für den Fehler R_n als Funktion der Ableitung von F
1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$						$10^{-1}(b-a)^3 F''(x)$
2	$\frac{1}{6}$	$\frac{4}{6}$	$\frac{1}{6}$					$10^{-3}(b-a)^5 F^{IV}(x)$
3	$\frac{1}{8}$	$\frac{3}{8}$	$\frac{3}{8}$	$\frac{1}{8}$				$10^{-3}(b-a)^5 F^{IV}(x)$
4	$\frac{7}{90}$	$\frac{32}{90}$	$\frac{12}{90}$	$\frac{32}{90}$	$\frac{7}{90}$			$10^{-6}(b-a)^7 F^{VI}(x)$
5	$\frac{19}{288}$	$\frac{75}{288}$	$\frac{50}{288}$	$\frac{50}{288}$	$\frac{75}{288}$	$\frac{19}{288}$		$10^{-6}(b-a)^7 F^{VI}(x)$
6	$\frac{41}{840}$	$\frac{216}{840}$	$\frac{27}{840}$	$\frac{272}{840}$	$\frac{27}{840}$	$\frac{216}{840}$	$\frac{41}{840}$	$10^{-9}(b-a)^7 F^{VIII}(x)$

Tabelle 3-1: Newton-Côtes-Gewichte [Celigoj C. 1998, S. 4.3]

Mit $n = 1$ ergibt sich daraus die bekannte Trapezregel:

$$\int_a^b F(x)dx \approx (b-a) \left[\frac{1}{6}F(a) + \frac{1}{2}F(b) \right] \quad (3-9)$$

Mit $n = 2$ ergibt sich die Simpson-Formel:

$$\int_a^b F(x)dx \approx (b-a) \left[\frac{1}{6}F(a) + \frac{4}{6}F\left(\frac{a+b}{2}\right) + \frac{1}{6}F(b) \right] \quad (3-10)$$

Die Methode der *Newton-Côtes-Regeln* ist nur für kleine Werte von n stabil. Soll die Genauigkeit erhöht werden, so werden diese einfachen Näherungsformeln mehrfach aneinandergesetzt. [Celigoj C. 1998, S 4.3]

3.1.2 Gauß-Quadratur

Es werden n Stützstellen gewählt, wobei die Positionen x_j ($j = 1, \dots, n$) aber zunächst unbekannt sind. Jedoch liegen alle innerhalb des Bereichs $[a, b]$.

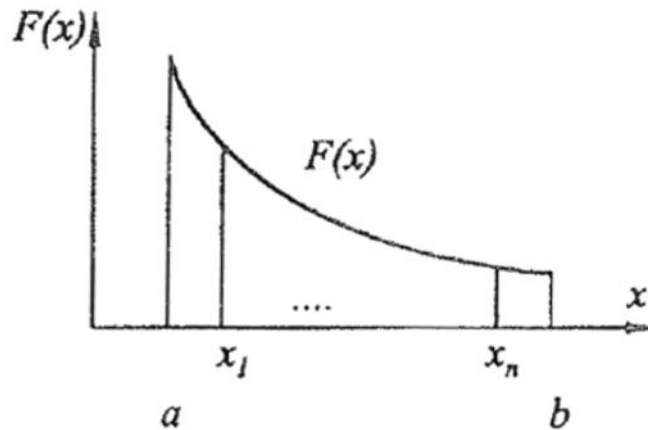


Abbildung 3-3: Gauß-Quadratur [Celigoj C. 1998, S. 4.4]

Wie bei der Newton-Côtes-Quadratur werden auch hier Lagrange'sche Interpolationspolynome definiert, aber mit der Ordnung $n - 1$:

$$l_j^{n-1}(x) = \frac{(x - x_1)(x - x_2) \dots (x - x_{j-1})(x - x_{j+1}) \dots (x - x_n)}{(x_j - x_1)(x_j - x_2) \dots (x_j - x_{j-1})(x_j - x_{j+1}) \dots (x_j - x_n)} \quad (3-11)$$

und eine Funktion $\psi(x)$ aufgestellt:

$$\psi(x) = \sum_{j=0}^n l_j^{n-1}(x) F(x_j) \quad (3-12)$$

Außerdem wird ein Polynom n-ter Ordnung

$$P(x) = (x - x_1)(x - x_2) \dots (x - x_n) \quad (3-13)$$

eingeführt, das an jeder Stützstelle $x_j (j = 1, \dots, n)$ „verschwindet“.

Für die Näherung von $F(x)$ wird nun ein Polynom vom Grad $(2n - 1)$ angegeben:

$$F(x) \approx \underbrace{\psi(x)}_{(n-1)} + \underbrace{P(x)}_n \underbrace{(\beta_0 + \beta_1 x + \dots + \beta_{n-1} x^{n-1})}_{(n-1)} \quad (3-14)$$

Grad $(2n - 1)$ bei n Stützstellen

Dieses wird über das Intervall $[a, b]$ integriert:

$$\int_a^b F(x) dx \approx \sum_{j=1}^n \int_a^b l_j^{n-1}(x) dx F(x_j) + \sum_{k=0}^{n-1} \int_a^b P(x) x^k dx \beta_k \quad (3-15)$$

Es werden zuerst jene unbekanntenen Stellen gewählt, dass die Integrale

$$\int_a^b P(x) x^k dx = 0, \quad (k = 0, 1, \dots, n - 1) \quad (3-16)$$

„verschwinden“. Das ergibt n Gleichungen für die n Positionen x_j . [Celigoj C. 1998, S 4.3-4.5]

Die Bestimmung der Positionen x_j und der Gewichte $\alpha_j (j = 1, \dots, n)$ hängt hier auch vom Intervall $[a, b]$ ab, auf das hier an dieser Stelle nicht näher eingegangen wird.

3.2 Kontinuum-Schalen-Elemente

Aus der Sicht der Modellierung sehen Kontinuum-Schalenelemente aus wie dreidimensionale Kontinuumelemente, aber ihr kinematisches Verhalten ist ähnlich wie bei konventionellen Schalenelementen. Zum Beispiel haben konventionelle Schalenelemente translatorische und rotatorische Freiheitsgrade, während Kontinuum-Schalenelemente nur die translatorischen Freiheitsgrade besitzen. [Abaqus 2010]

3. Numerische Methoden

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

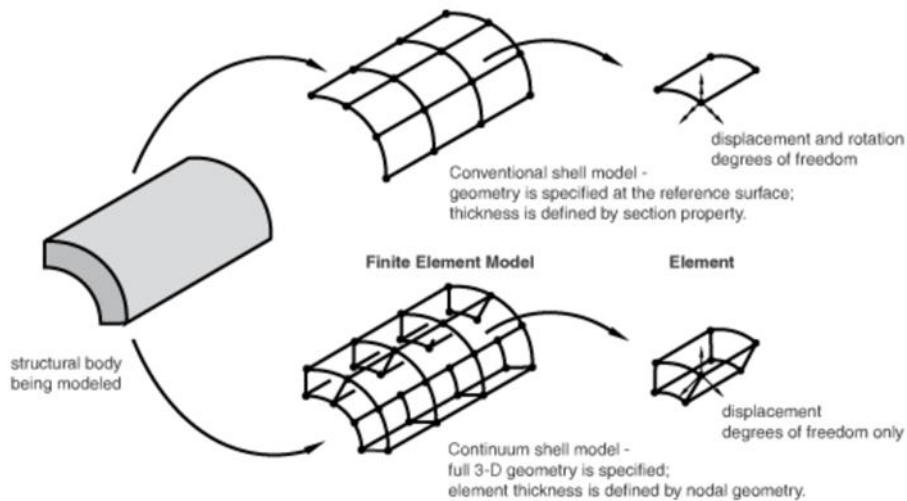


Abbildung 3-4: Konventionelles Schalenelement versus Kontinuum-Schalenelement [Abaqus 2010]

Der größte Vorteil besteht aber darin, dass das Verhalten über den Querschnitt mittels der zuvor beschriebenen numerischen Integration über die Schalendicke berechnet werden kann. In Abbildung 3-5 sind drei Schichten mit verschiedenem Material dargestellt (layer 1 bis 3). Je Materialschicht sind drei Integrationspunkte festgelegt (1 bis 9), an denen dann auch Ergebnisse ausgegeben werden. [Abaqus 2010]

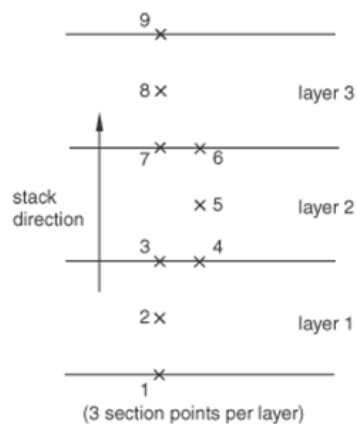


Abbildung 3-5: Integrationspunkte über Materialdicke [Abaqus 2010]

Es ist auch möglich innerhalb dieses Verbunds den einzelnen Materialien unterschiedliche Ausrichtungen zu geben. Sehr wichtig ist auch, dass innerhalb des gesamten Bauteils die Stapelrichtung (engl.: stacking direction) konsistent ist. Da man nun aus numerischer Integration Ergebnisse über die Materialdicke hat, kann man diese auch plotten. Ein Beispiel dafür ist in Abbildung 3-6 dargestellt. Es ist hier die Dehnung über der Schichtdicke dargestellt, wobei jede Schicht 0,1 mm dick ist.

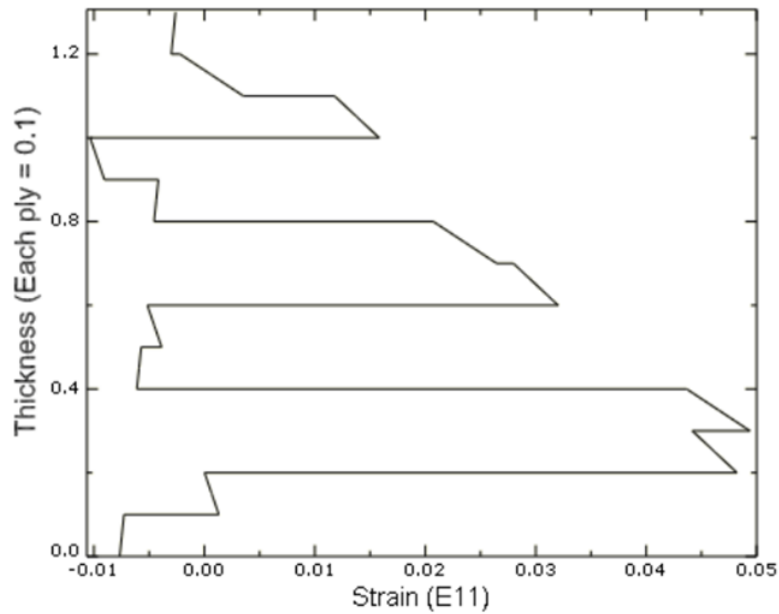


Abbildung 3-6: Ergebnis-Plot über Materialdicke [Abaqus 2010]

4 Workflow

Die Entwicklung eines Ablaufplans für einen gesamten Simulationsdurchgang war ebenfalls Teil der Arbeit, um unter anderem die zukünftige Anwendung verständlicher zu gestalten. Der Workflow spiegelt die momentane Situation, aus welchen Eingabedaten und mit welchen Randbedingungen eine globale Simulation des Brennstoffzellenstacks durchgeführt wird, wider. In Abbildung 4-1 ist die Übersicht der Vorgehensweise eines kompletten Durchlaufs dargestellt. Grün hinterlegte Sechsecke stehen für den Start- bzw. Endpunkt. Weiß hinterlegte Rechtecke bezeichnen eine Tätigkeit, oder einen Prozess. Grau hinterlegte Rechtecke mit abgerundeten Ecken bedeuten dabei Ereignisse oder Ergebnisse. Das Flussdiagramm wurde in nummerierte Ebenen unterteilt, um die späteren Erläuterungen zu erleichtern.

4. Workflow

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

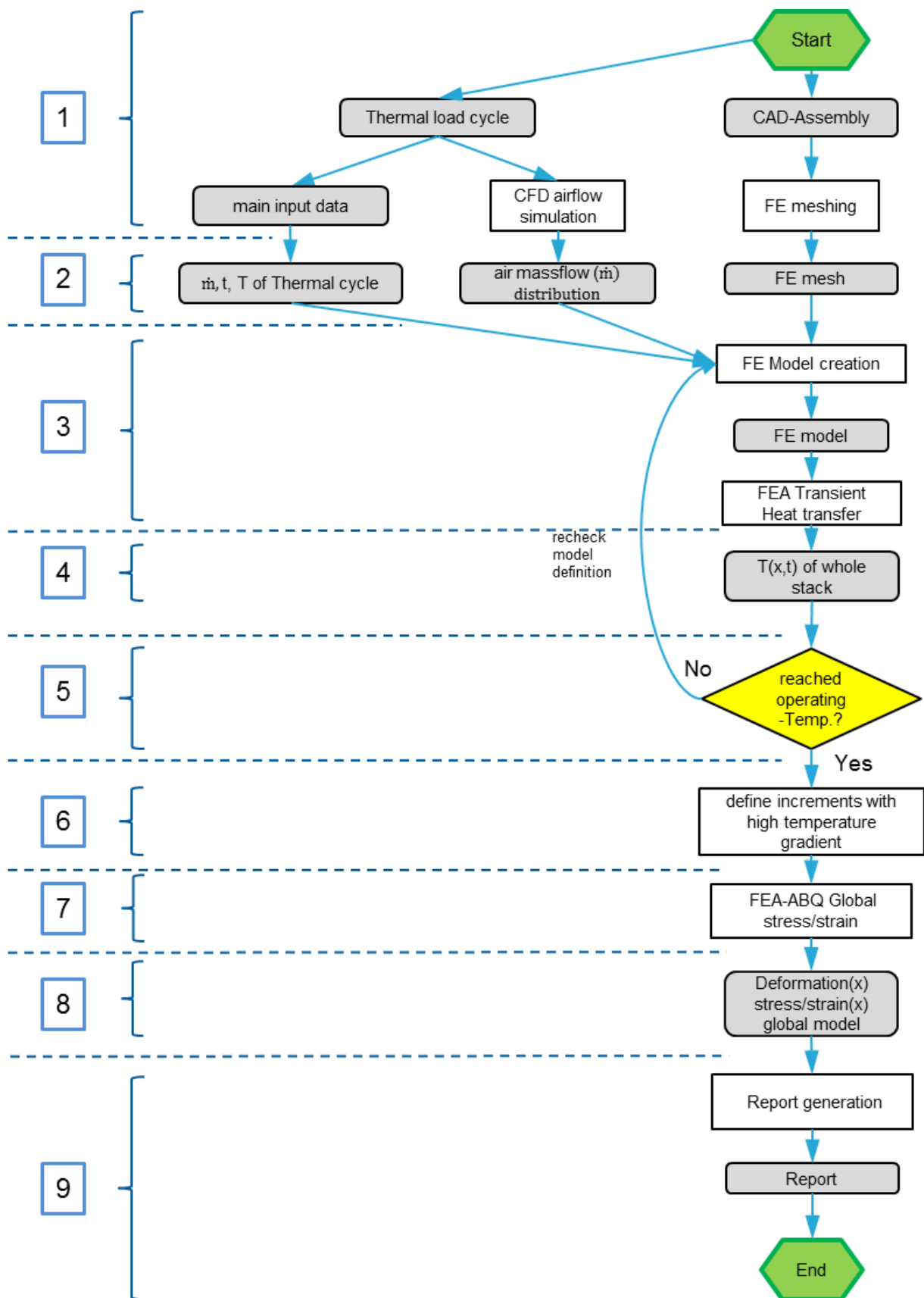


Abbildung 4-1: Flussdiagramm eines gesamten Simulationsdurchgangs

Die nummerierten Ebenen von Abbildung 4-1 werden im Folgenden näher erläutert:

1. Zu Beginn werden parallel Daten aus Konstruktion, Strömungssimulation und Prüfstand gesammelt. Die Bauteilgeometrie wird in Form einer dreidimensionalen CAD-Baugruppe (Computer-Aided Design) von der Konstruktion bereitgestellt, die nach Überprüfen mittels der Finite-Elemente-Software Abaqus/CAE (Computer-Aided Engineering) vernetzt wird.
2. Zur Definition des thermischen Lastzyklus werden Messungen wie Heizzeiten, Temperaturen und Massenstrom vom Prüfstand bereitgestellt, sowie Ergebnisse aus der CFD-Simulation (Computational Fluid Dynamics) bezüglich der Gleichverteilung des Luftstromes benötigt.
3. Mit den im vorigen Schritt erhaltenen Input-Daten wird nun das globale Finite-Elemente-Modell aufgesetzt, an dieser Stelle mit Elementtyp und Randbedingungen für die transiente Wärmeübertragung.
4. Das Ergebnis der globalen transienten Wärmeübertragungssimulation ist das dreidimensionale Temperaturfeld, welches in weiterer Folge dem Spannungsmodell aufgeprägt wird.
5. An dieser Stelle lautet die logische Abfrage: "Wurde an den Zellen die Betriebstemperatur erreicht, damit die chemischen Reaktionen anlaufen können und passen die Temperaturgradienten mit den Messungen zusammen?" Wenn dies nicht der Fall ist, dann muss die Modellierung des Globalmodelles hinsichtlich Fehler untersucht werden.
6. Wird die Betriebstemperatur erreicht und der Vergleich der Messung zur Simulation ist ebenfalls in Ordnung, müssen einzelne Inkremente aus der Wärmeübertragung ausgewählt werden um als Belastungsfälle in der Spannungsanalyse zu dienen. Es sind dabei jene Inkremente auszuwählen, bei denen ein größerer Temperaturunterschied besteht.
7. Mit dem räumlichen Temperaturfeld, der Einspannbedingung des Brennstoffzellenstacks und dem Elementtypen für Spannungen kann das globale Spannungs-Dehnungsmodell gestartet werden.
8. Das Ergebnis stellt das globale Spannungs- und Dehnungsverhalten sowie die Verformungen dar, um kritische Regionen zu detektieren, beziehungsweise das globale Verhalten des Stacks während eines thermischen Zyklus besser zu verstehen.

5 Verwendetes Brennstoffzellen-Modul

Das im Zuge dieser Arbeit verwendete Brennstoffzellen-Modul entstammt einem stationären, modularen Gesamtkonzept, das auf verschiedene Leistungsanforderungen abgestimmt werden kann. Beispielsweise wie in Abbildung 5-1 als Konzept mit 8 Stacks mit je ~ 800 W Leistung. Die Stacks werden über die Grund- und Deckplatten mittels Federn eingespannt. Ein Modul kann einen oder mehrere Stacks beinhalten, es können aber auch mehrere Module miteinander kombiniert werden um die Leistung zu steigern. Dieses modulare System hat je nach Konstellation einen Leistungsbereich von 5-50 kW. Das gesamte Modul, auch HotBox genannt, wird mit einem Brenner, der die zugeführte Luft über einen Wärmetauscher erhitzt, auf Betriebstemperatur gebracht.

5. Verwendetes Brennstoffzellen-Modul

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

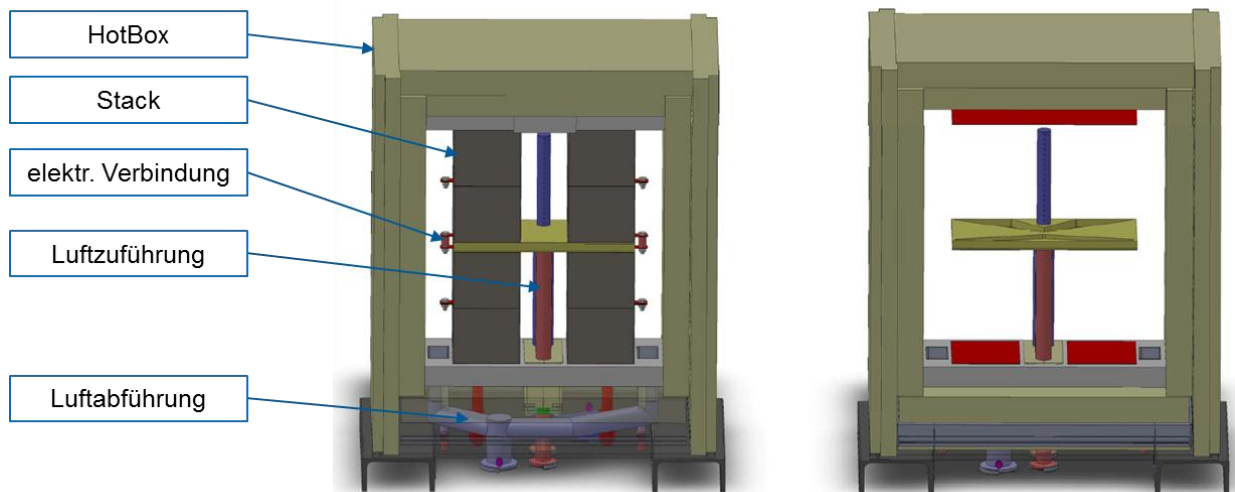


Abbildung 5-1: Modulare Bauweise der stationären Einheit (HotBox) [Kusnezoff M. 2011, S. 17]

Abbildung 5-2 zeigt ein Foto des Modules während des Aufbaus am Prüfstand. Es befinden sich zahlreiche Messstellen an jedem einzelnen Stack.

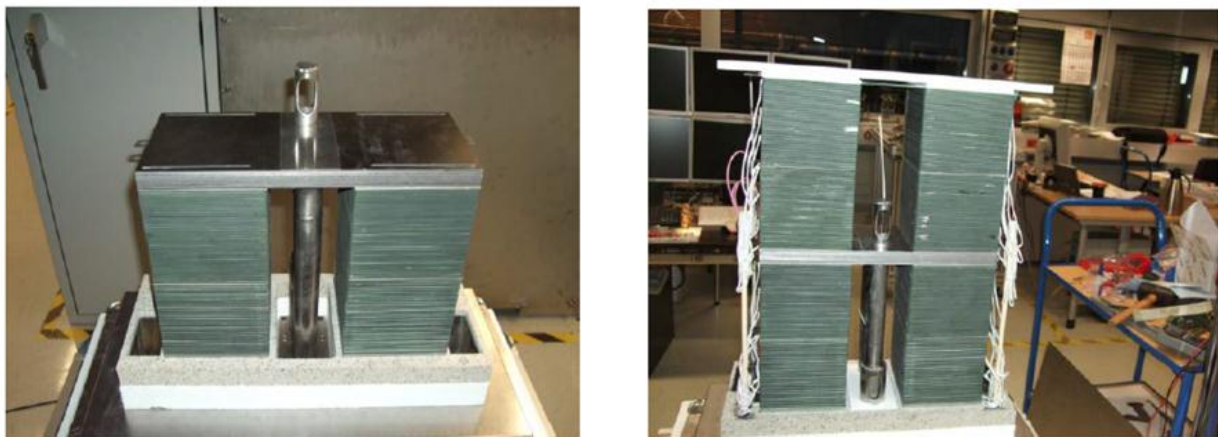


Abbildung 5-2: Modul im Aufbau [Kusnezoff M. 2011, S.18]

5.1 Stack

Für die Simulation wurde der in Abbildung 5-3 vergrößert dargestellte Stack verwendet. Es wurde der rechte obere Stack gewählt, auch bezüglich den später folgenden Vergleichen zwischen Messung und Simulation. Er besteht aus 30 in Reihe geschalteten Einzelzellen, die mittels Interconnectoren verbunden sind. Das Gewicht so eines keramischen Stacks beträgt 10,75 kg und seine Abmessungen sind 150 mm x 130 mm x 115 mm. Seine spezifische Leistung beträgt 75 W/kg das ergibt eine volumetrische Leistung von 357 W/l.

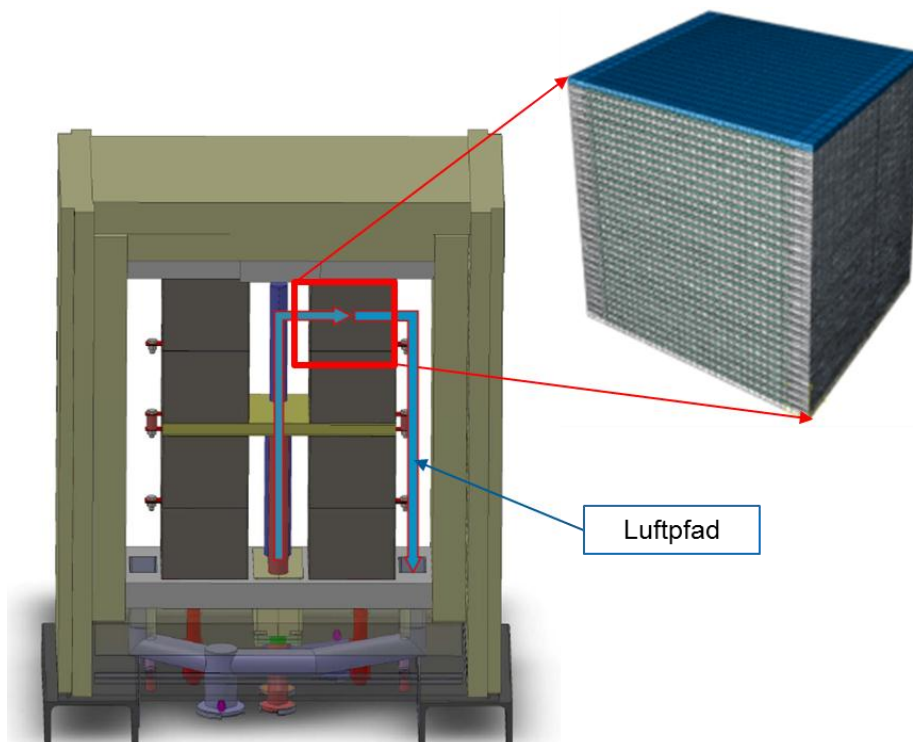


Abbildung 5-3: Verwendeter Stack [Kusnezoff M. 2011, S.17]

Die in Abbildung 5-4 dargestellten Explosionszeichnungen sollen näheren Aufschluss über die Konstellation eines solchen Stacks geben. Die Explosionszeichnungen zeigen jedoch nur vier, bzw. zwei der dreißig Zellen. Es ist gut zu erkennen, dass es sich hierbei um die bereits im Kapitel Brennstoffzelle erwähnte Kreuzstrom- Bauweise handelt. Das heißt, dass im Stack die Luft und der Brennstoff im rechten Winkel zueinander strömen. Der Stack wird innerhalb der HotBox stirnseitig von der Luft angeströmt. Die Luftkanäle führen kathodenseitig geradlinig durch den Stack, wo der Luftsauerstoff für die Reaktionen bereitsteht. Auf der gegenüberliegenden Seite wird die Luft abgeführt und während des Aufheizens teilweise über einen Bypass, erneut durch den Wärmetauscher, wieder zugeführt. Damit hat die zugeführte Luft zwei Aufgaben, einerseits das System zu heizen, und andererseits den Sauerstoff für die chemische Reaktion bereit zu stellen.

Der Brennstoff wird seitlich am Stack entlang, durch die länglichen Ausnehmungen der Interconnectoren gleichmäßig verteilt. Die Brennstoffkanäle führen anodenseitig geradlinig durch den Stack. Bevor der Brennstoff auf die Anode trifft, wird er von einem porösen Nickelschaum gleichmäßig verteilt. Der überschüssige Brennstoff und andere Reaktionsprodukte werden wiederum an der gegenüberliegenden Seite abgeführt. Hier wird der überschüssige Brennstoff aufgefangen, abgetrennt und erneut dem Kreislauf zugeführt.

5. Verwendetes Brennstoffzellen-Modul

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

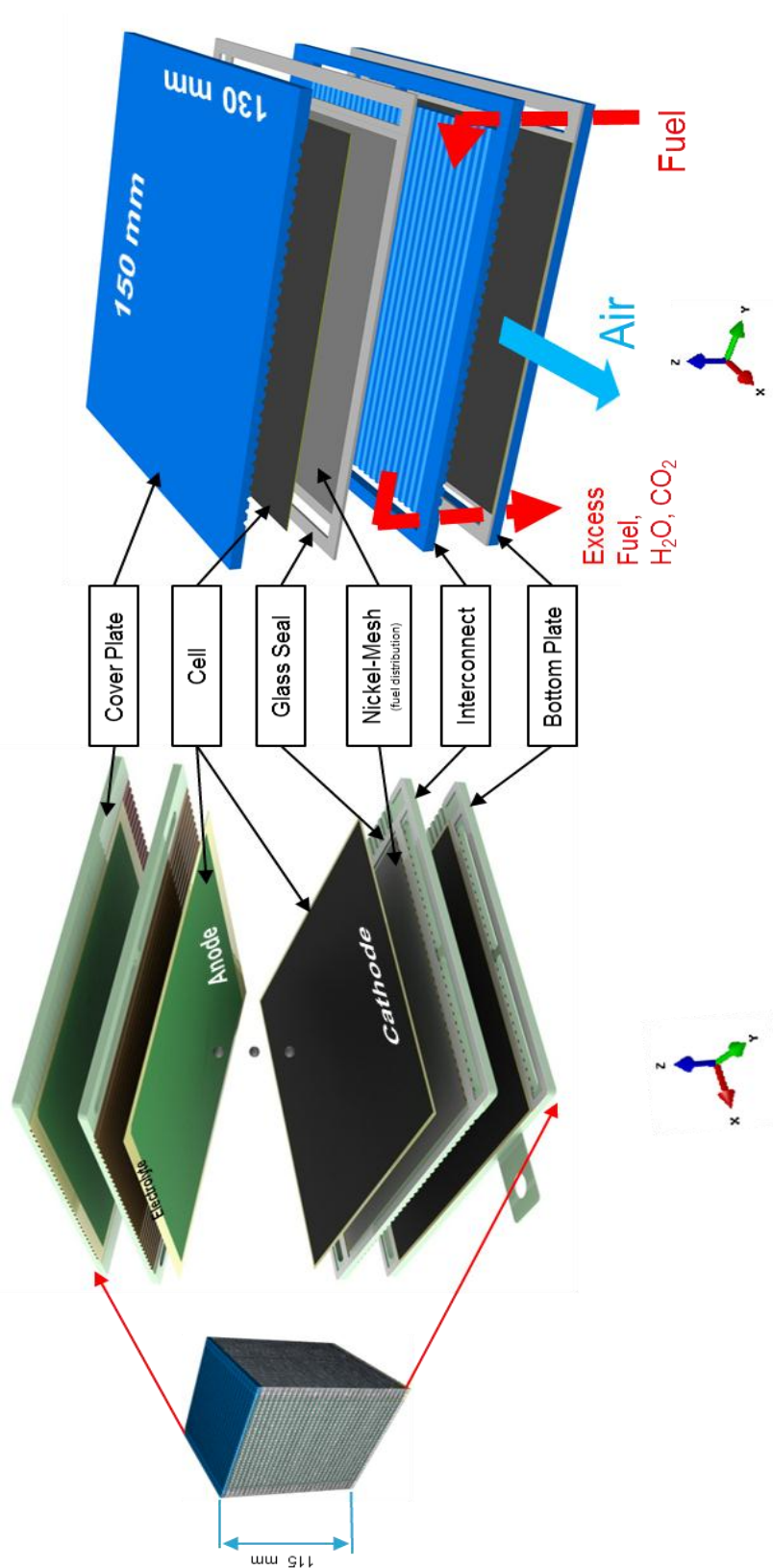


Abbildung 5-4: Stackaufbau [Plansee 2012, Kiesling C. 2012, S. 42]

5.2 Interkonnektor

Der für die Simulation verwendete Interkonnektor besteht aus Crofer, einem ferritischen Hochtemperatur Edelstahl, der speziell für den Einsatz in Brennstoffzellen konzipiert wurde. Der Wärmeausdehnungskoeffizient von Crofer wurde über den gesamten Temperaturbereich an diejenigen typischerweise in Hochtemperaturbrennstoffzellen eingesetzten Keramiken angepasst. [ThyssenKrupp 2010]

Es wurde das in Abbildung 5-5 ersichtliche, von Plansee produzierte MK351 Design gewählt. Man kann am unteren und oberen Interkonnektor die Luftkanäle gut erkennen (Draufsicht). Am mittleren Interkonnektor sind die Brennstoffkanäle gut zu sehen (Untersicht). Außerdem sind die länglichen Ausnehmungen für die Brennstoffzuleitung gut ersichtlich.

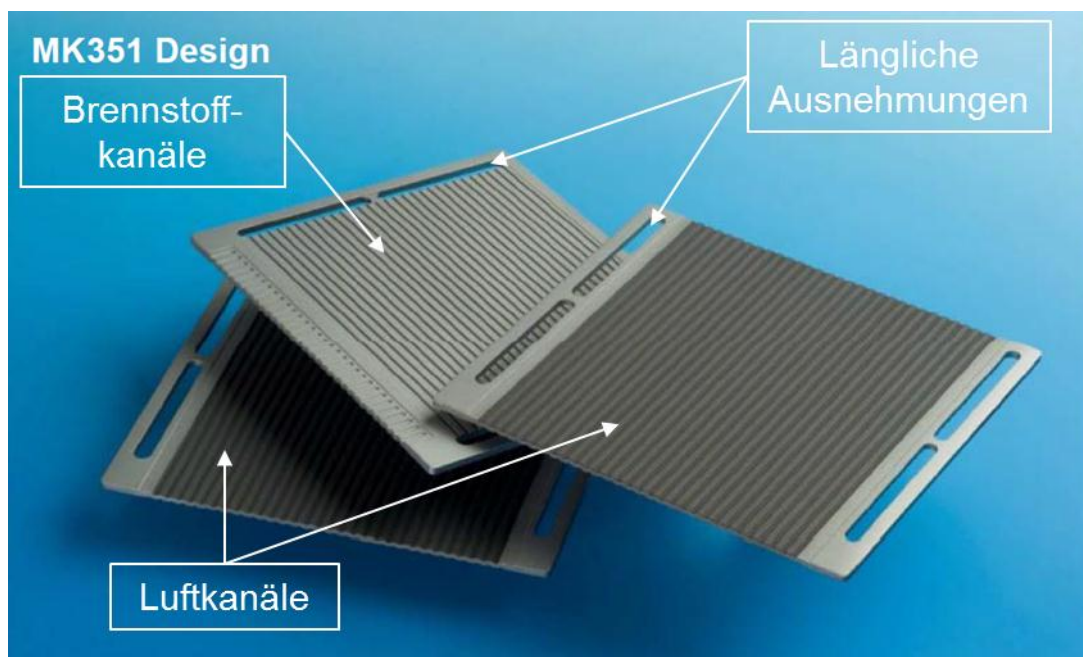


Abbildung 5-5: Interkonnektor Design [Kusnezoff M. 2011, S. 9]

Für die Simulation wurden der Einfachheit halber die Rundungen an den länglichen Ausnehmungen eckig ausgeführt, um ein leichteres Vernetzen der Bauteile zu ermöglichen.

5.3 Einzelzelle und Nickelschaum

Die Einzelzelle ist elektrolytgestützt und hat eine aktive Zellfläche von $\sim 127 \text{ cm}^2$. Das bedeutet, wie schon im Kapitel Brennstoffzelle erläutert, dass die Elektrolytschicht die am stärksten ausgeführte ist und somit die mechanisch tragende Rolle übernimmt. In Abbildung 5-6 ist eine einzelne Zelle mit ihren drei Schichten dargestellt. Die Kathodenschicht (blau) ist porös und besteht aus Lanthan-Strontium-Manganoxid ($\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$). Das Material der Elektrolytschicht (gelb) ist gasdicht und besteht aus teilstabilisiertem Zirkoniumdioxid (8YSZ). Der Werkstoff der Anodenschicht (grün) ist ein Verbund aus Nickel und teilstabilisiertem Zirkoniumdioxid ($\text{Ni}8\text{YSZ}$), sie ist ebenfalls porös.

5. Verwendetes Brennstoffzellen-Modul

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

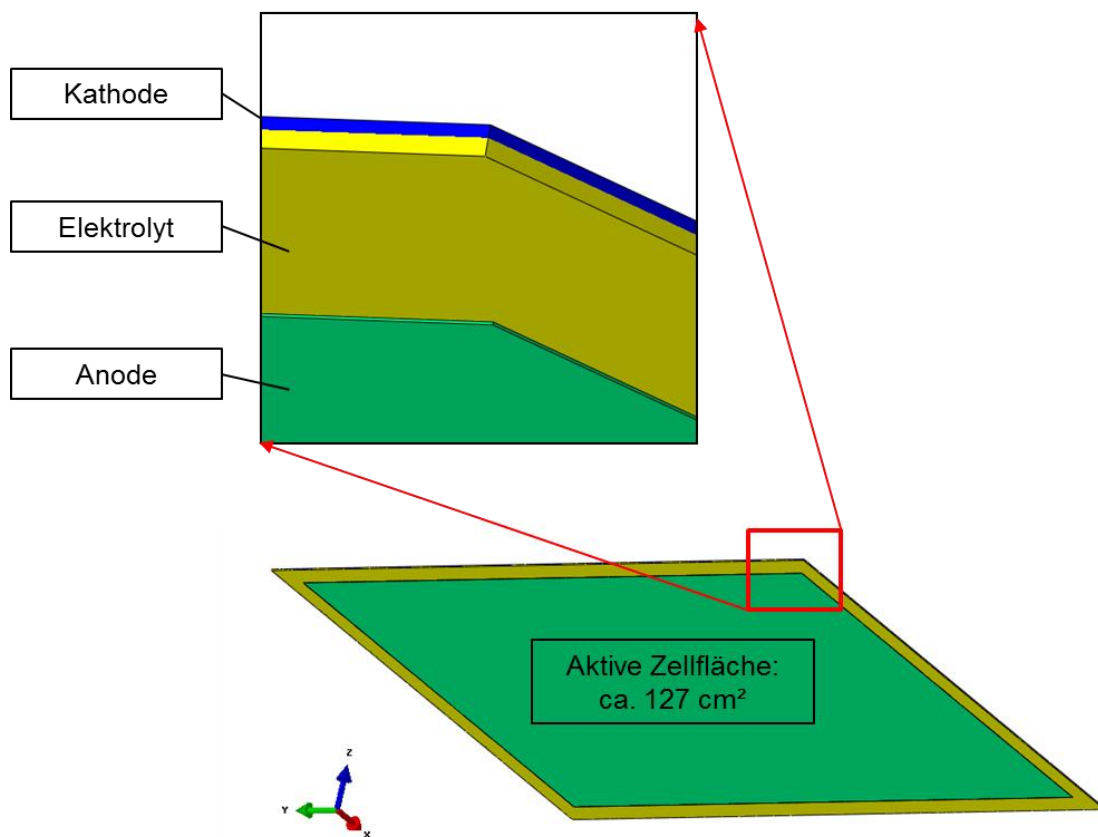


Abbildung 5-6: Einzelzelle

Um ein besseres Gefühl für die Proportionen der Schichtdicken der einzelnen Layer zu bekommen, ist in Abbildung 5-7 ein Ausschnitt einer Zelle inklusive Ni-Schaum und Interkonnektor im richtigen Verhältnis dargestellt. Man kann gut erkennen, dass die Schichtdicken der Zellschichten sehr gering im Vergleich zu anderen Bauteilen sind.

Der Nickelschaum ist für die Gleichverteilung des Brennstoffes an der Anodenseite verantwortlich.

6. Simulation des Temperaturfeldes

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

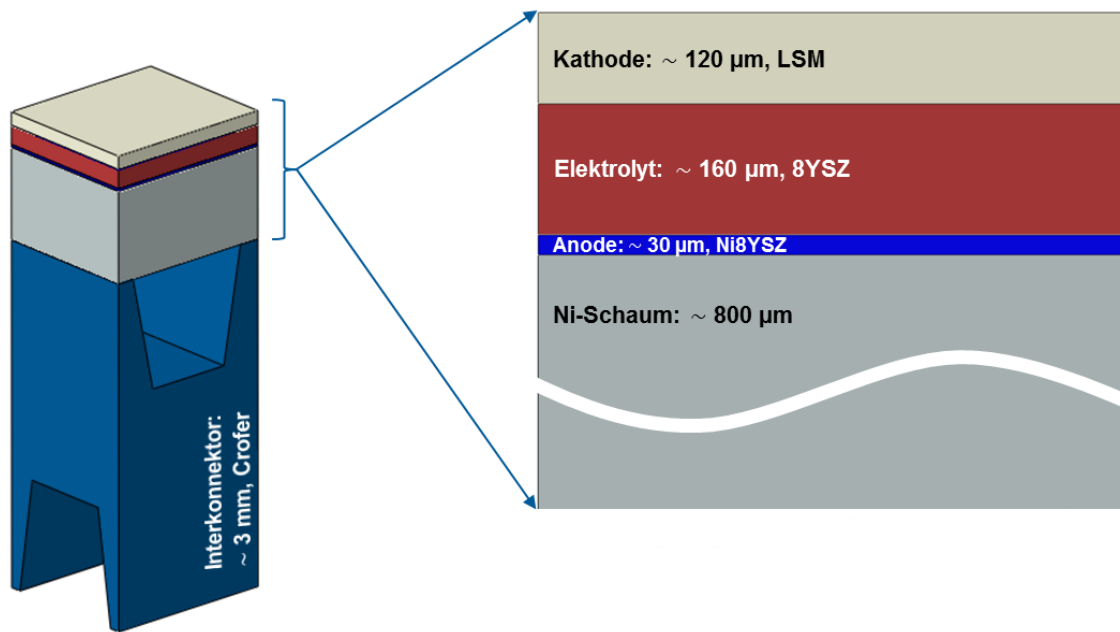


Abbildung 5-7: Schichtdicken

5.4 Dichtung

Als Dichtung und zur Fügung des gesamten Stacks wird ein teilkristallisierendes Glas verwendet. Dieses Glas besitzt einen angepassten Temperatenausdehnungskoeffizienten und hohe chemische Beständigkeit gegenüber den Interkonnektor- und Elektrolytmaterialien und aggressiven Atmosphären. Abbildung 5-8 zeigt zwei mittels Glaslot gefügte Interconnectoren.

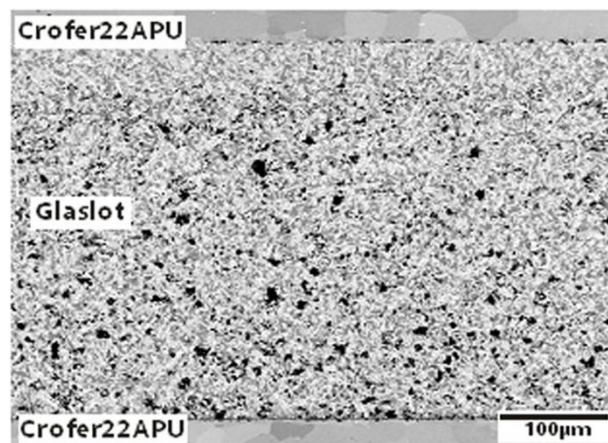


Abbildung 5-8: Glaslot [IKTS Fraunhofer 2012]

6 Simulation des Temperaturfeldes

In diesem Kapitel werden die Simulation des räumlichen Temperaturfeldes und die Modellierung des Finite-Elemente Modells für die Wärmeübertragung anhand des im Kapitel Workflow definierten

Flussdiagramms erklärt. Hierfür ist es notwendig die einzelnen Schritte und angenommenen Vereinfachungen zu betrachten. Es wird außerdem kurz auf die Koppelung von Wärmeübertragungsrechnung und Spannungsanalyse eingegangen. Um einen besseren Überblick zu bewahren, wird von nun an der aktuelle Fortschritt, anhand des hervorgehobenen Pfades des Flussdiagramms, am rechten Rand eingeblendet.

6.1 Definition des thermischen Zyklus

Grundsätzlich sei an dieser Stelle noch einmal zu erwähnen, dass die gesamte Einheit mit heißer Luft geheizt wird, die in das System eingebracht, durch den Stack durchströmt und wieder aus dem System abgeführt wird. Thermischer Zyklus heißt in diesem Fall, dass das System von Raumtemperatur auf Betriebstemperatur gebracht wird, bei Betriebstemperatur betrieben wird und danach wieder abgekühlt wird. Wie schon in den Einführungskapiteln mehrfach erwähnt, ist für uns nur die Aufheizphase und die Abkühlphase von Interesse, da wir uns hier die größten Temperaturgradienten und folglich die größten mechanischen Spannungen erwarten. Somit besteht unser thermischer Zyklus nur aus Aufheizen und Abkühlen. Es werden alle Eingabedaten wie Temperatur, Massenfluss und Zeit am Prüfstand erfasst und bearbeitet. In Abbildung 6-2 ist ein typischer thermischer Zyklus ersichtlich. Die dargestellten Temperaturen sind simulierte Bauteiltemperaturen. Es ist ersichtlich, dass das Kühlen im Vergleich zum Heizen viel länger dauert. Beim Abkühlen wird der Brenner abgeschaltet und es läuft nur ein Gebläse weiter, das einfach

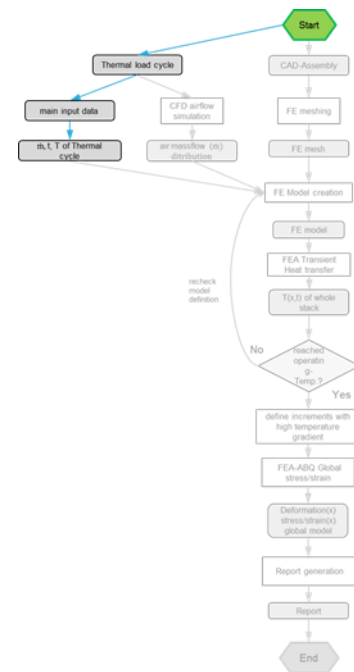


Abbildung 6-1: Defintion des thermischen Zyklus

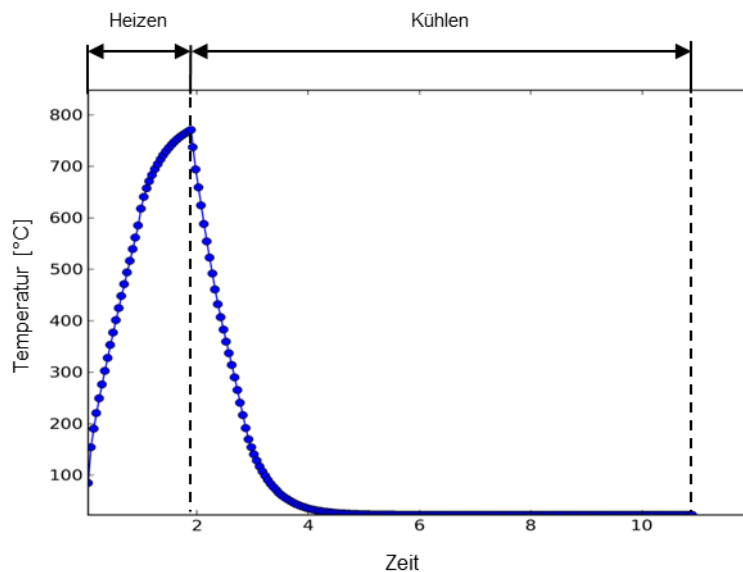


Abbildung 6-2: Typischer thermischer Zyklus

6. Simulation des Temperaturfeldes

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

6.1.1 Temperatur Input

Wie in Abbildung 6-3 anhand des rechten Bildes zu erkennen ist, werden am Prüfstand zahlreiche Messpunkte definiert. Bei den rot geschriebenen Messpunkten handelt es sich um Temperaturen. Diese Temperaturen sind nicht am Bauteil gemessen, sondern dies sind Lufttemperaturen. Da wir, wie im vorherigen Kapitel erwähnt, den rechten oberen Stack des Modules für die Simulation verwenden, ist für uns die rot eingekreiste Temperatur interessant. Anhand des hellblauen Pfeiles in der linken Darstellung, ist der Pfad der Luft vom Eintrittsrohr bis zum Eintritt in die einzelnen Kathodenkanäle des Stacks ersichtlich.

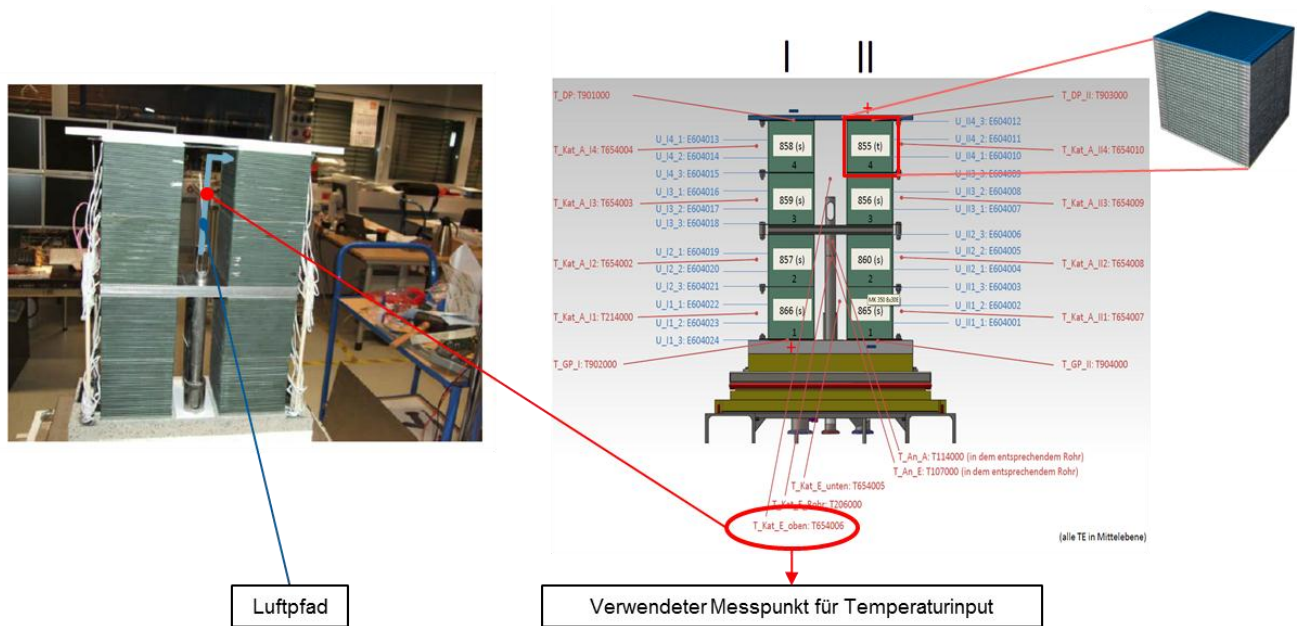


Abbildung 6-3: Messpunkt für die Eingangstemperatur [links: Kusnezoff M. 2011, S. 18]

Abbildung 6-4 zeigt die gemessenen Temperaturen des vorhin erwähnten Messpunktes. Die gesamte Aufheizprozedur dauert ungefähr acht Stunden. Man sieht, dass die Messungen nicht exakt bei Raumtemperatur starten. Außerdem kann man erkennen, dass ganz zu Beginn, nach kurzer Betriebsphase und am Ende der Aufheizphase der Brenner ausgefallen ist.

6. Simulation des Temperaturfeldes

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

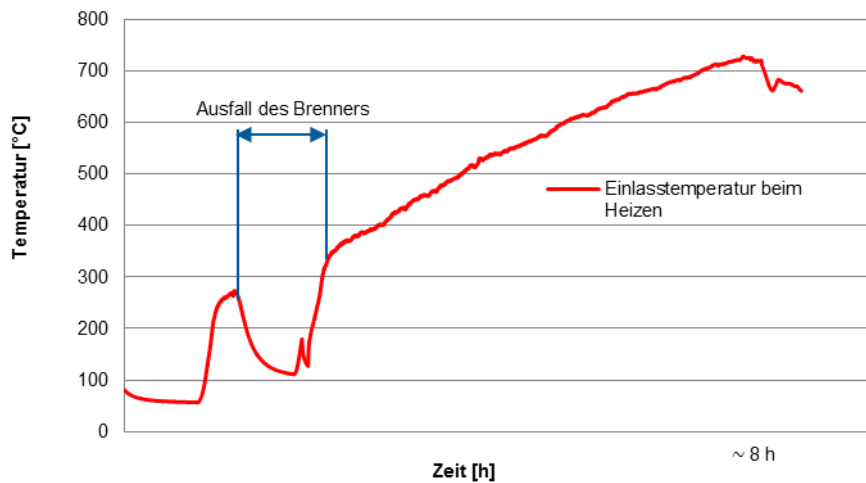


Abbildung 6-4: Gemessene Temperaturen am Einlass beim Heizen

Für die Simulation wurden die Temperaturen, die während dieses Ausfalls gemessen wurden herausgeschnitten. Somit erhalten wir die in Abbildung 6-5 dargestellten Temperaturen. Das Aufheizen hat sich somit von ungefähr acht auf circa fünf Stunden reduziert. Die markierten, nummerierten Punkte stellen die gewählten Eckpunkte für die Simulations-Eingabedaten dar. Es wird dabei von linearer Steigung der Temperatur zwischen den hervorgehobenen Punkten ausgegangen.

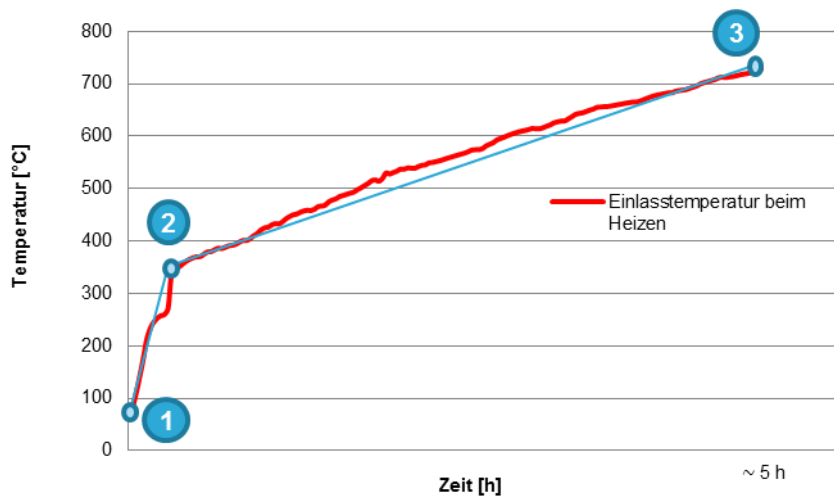


Abbildung 6-5: Korrigierte Einlasstemperaturen beim Heizen

Abbildung 6-6 zeigt ebenfalls die gemessenen Temperaturen am selben Messpunkt wie vorhin, jedoch während der Abkühlphase. Hier ist der Verlauf nicht mehr so linear wie beim Heizen, weshalb hier sieben Punkte als Eingabedaten für die Simulation gewählt wurden. Für die Simulation ist auch

6. Simulation des Temperaturfeldes

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

beim Kühlen die Verbindung von Punkt zu Punkt als linear angenommen. Die gesamte Dauer ist mit ungefähr 18 Stunden deutlich länger als beim Aufheizen. Die Kurve reicht bis zu einer Temperatur von circa 150 °C, denn für darunter liegende Werte liegen keine Messergebnisse vor. Wie zu Beginn dieses Kapitels erwähnt, wird auch das Gebläse der Luft hier abgestellt.

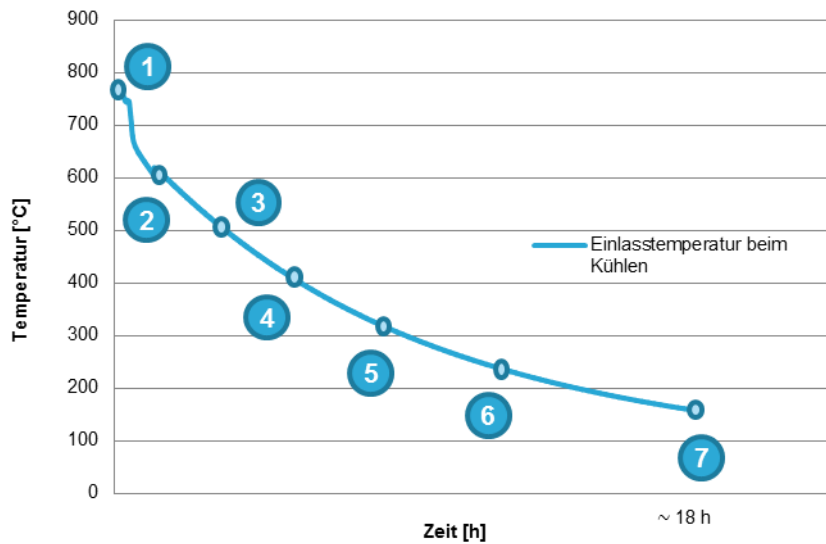


Abbildung 6-6: Gemessene Temperaturen am Einlass beim Kühlen

Fügt man die Messdaten von Aufheizphase und die Abkühlphase zusammen, so ergibt sich die in Abbildung 6-7 dargestellte Kurve mit Temperaturen für einen gesamten thermischen Zyklus. Es sei an dieser Stelle noch erwähnt, dass für sämtliche gemessene Größen Messwerte für jede einzelne Sekunde vorliegen. Aus Gründen der Handhabung und Dateigrößen, wurde für jede verwendete Messgröße aus jeweils 100 Werten der Durchschnitt gebildet.

6. Simulation des Temperaturfeldes

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

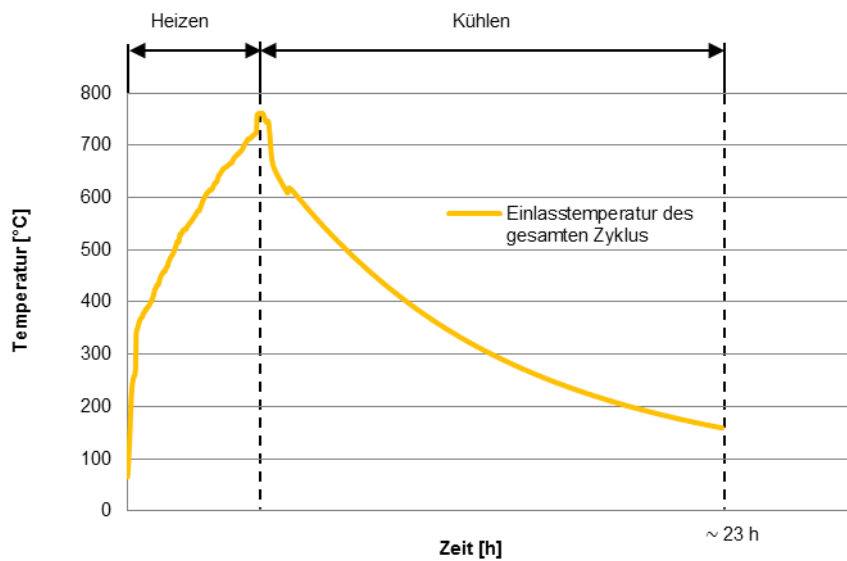


Abbildung 6-7: Einlasstemperaturen des gesamten Zyklus

6.1.2 Massenstrom Input

Der Massenstrom der Luft wird nur an einer Stelle im Eingangsrohr gemessen. Folglich ist dies der Massenstrom des gesamten Moduls und wird durch die Anzahl der Stacks im Modul dividiert. In Abbildung 6-8 ist der Massenstrom des gesamten Moduls während der Aufheizphase dargestellt. Wie man erkennen kann, variiert der Massenstrom ziemlich stark. Der Grund dafür liegt darin, dass die Leistung des Brenners mittels des Luftverhältnisses λ geregelt wird. Prinzipiell wird dabei das Gemisch des Brenners fetter oder mager gestellt.

Auch hier haben wir wiederum drei Punkte ausgewählt und als Eingabeparameter für die Simulation genommen. Von Punkt 1 zu Punkt 2 erhalten wir somit einen linearen Anstieg und von Punkt 2 zu Punkt 3 wird ein konstanter Massenstrom beibehalten.

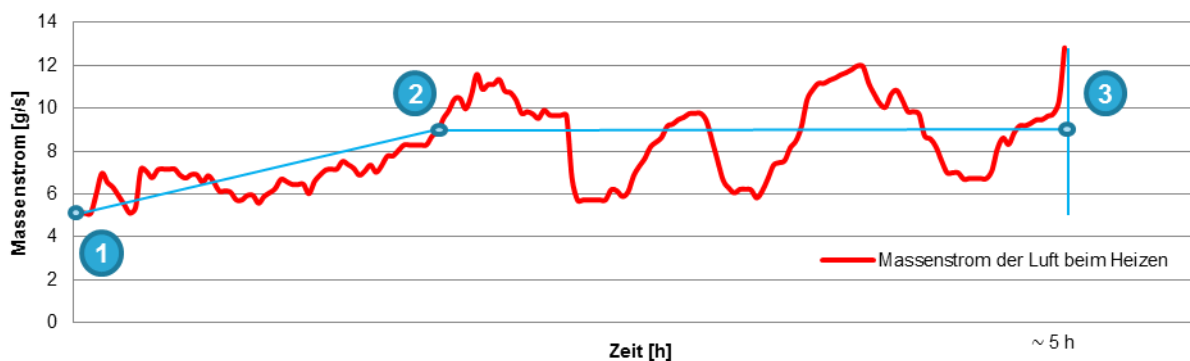


Abbildung 6-8: Massenstromverlauf beim Heizen

Der Verlauf des Massenstroms der Luft während des Abkühlens ist in Abbildung 6-9 zu sehen. Dieser variiert nicht so stark, da der Brenner abgeschaltet wird und nur mehr das Gebläse Luft durch die

6. Simulation des Temperaturfeldes

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

Stacks bläst. Hier werden aufgrund des Anstiegs zu Beginn 4 Punkte ausgewählt um als Eingabeparameter für die Simulation zu dienen. Ab Punkt 3 wird der Massenstrom abermals als konstant gewählt.

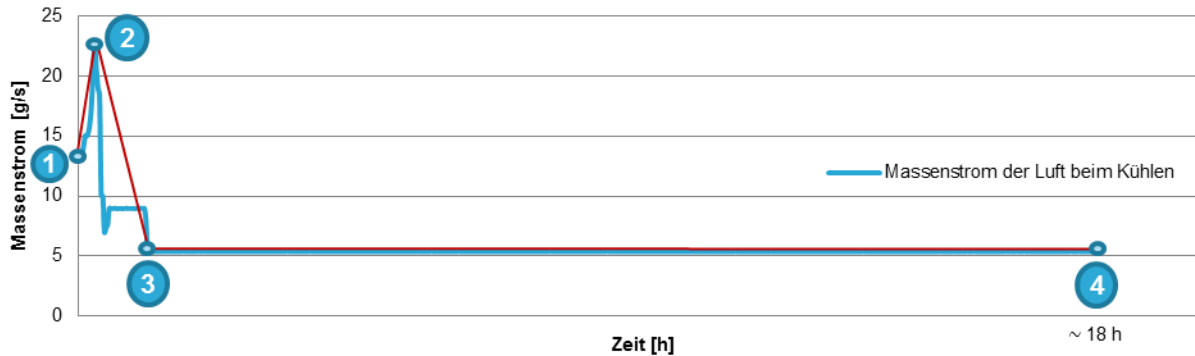


Abbildung 6-9: Massenstromverlauf beim Kühlen

6.2 Simulation der Gleichverteilung der Kathodenluft

Ein weiterer wichtiger Aspekt bezüglich des Aufheiz- und Abkühlprozesses ist die Gleichverteilung der Luft über alle Kathodenkanäle eines Stacks. Ist die Luft auf alle Kanäle gleichverteilt, so erleichtert dies die Simulation immens, da für jeden der Kanäle derselbe Massenstrom bzw. dieselbe Eingangstemperatur gewählt werden kann. Diese Untersuchungen wurden bereits von C. Kiesling im Zuge einer Diplomarbeit getätigt. Es soll an dieser Stelle kurz darauf eingegangen werden, da dies für die späteren Simulationen als Randbedingung dient und somit von großer Bedeutung ist.

Entwickler von Brennstoffzellen streben immer die Gleichverteilung der Luft an, damit auf der gesamten aktiven Zellfläche dasselbe Luftverhältnis erreicht wird. Die Werkzeuge der Entwickler sind hierbei der unvermeidbare Systemgedröck und konstruktive Maßnahmen an der Zulaufgeometrie. [Kiesling C. 2012, S. 47]

In Abbildung 6-11 ist jener Ausschnitt des gesamten Moduls hervorgehoben, der für die CFD-Simulation herangezogen wurde.

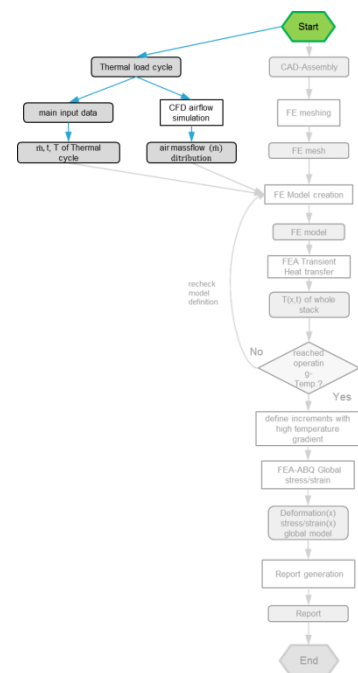


Abbildung 6-10: Simulation der Gleichverteilung der Kathodenluft

6. Simulation des Temperaturfeldes

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

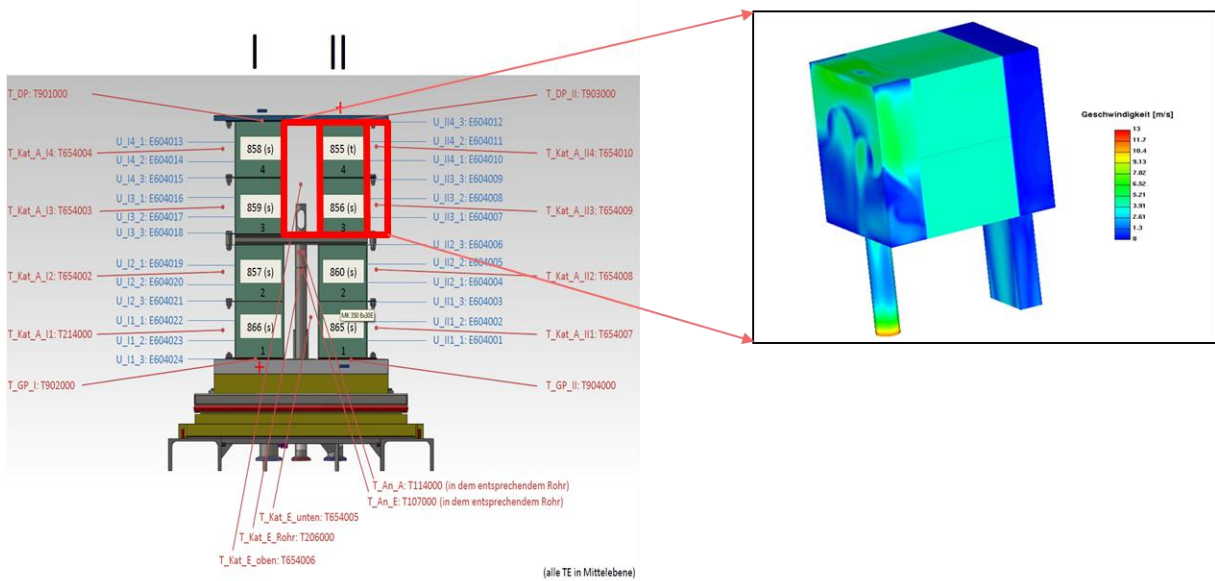


Abbildung 6-11: Position des CFD-Modelles im Gesamtmodul [rechtes Bild: Kiesling C. 2012, S. 52]

Bei der Simulation der Gleichverteilung der Luft werden zwei Stacks mittels der kommerziellen CFD-Software AVL-FIRE als poröse Medien modelliert. Die Software greift dabei auf ein Porositätsmodell mit „gerichteter Porosität“ nach Forchheimer zurück. Dies hat den Vorteil, dass nicht die gesamten Kanäle detailgenau aufgelöst werden müssen. Dieselbe Methode wird auch für Abgaskatalysatoren von Kraftfahrzeugen angewandt. [Kiesling C. 2012, S. 50]

Abbildung 6-12 zeigt das vernetzte Simulationsmodell für die Gleichverteilung der Kathodenluft. Die beiden Stacks werden wie schon erwähnt als „poröser Ziegel“ modelliert. Das Netz muss im Bereich der Porosität absolut fluchtend und ausgerichtet sein. [Kiesling C. 2012, S. 50]

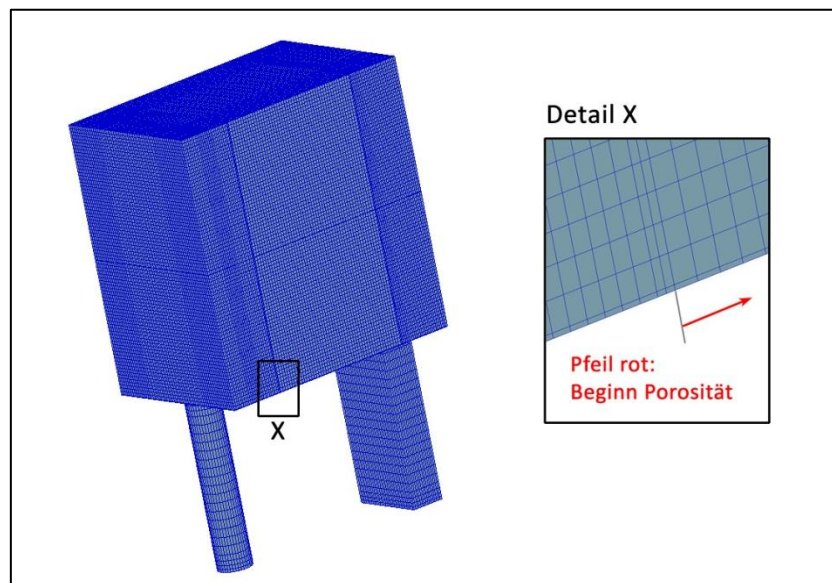


Abbildung 6-12: Simulationsmodell für die Gleichverteilung der Luft [Kiesling C. 2012, S. 51]

6. Simulation des Temperaturfeldes

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

Es wurden dabei 2 Simulationen durchgeführt, einmal bei einer konstanten Temperatur der Wand und der Luft von 300 °C und eine weitere bei einer konstanten Temperatur von 800 °C. Die restlichen Randbedingungen wie z.B. Massenstrom und Umgebungsdruck bleiben bei beiden Simulationen gleich. Am Einlass wurde ein relativ hoher Nennmassenstrom von 5 g/s (d.h. 2,5 g/s pro Stack) aufgebracht. [Kiesling C. 2012, S. 51]

Die Ergebnisdarstellung in Abbildung 6-13 zeigt links einen Längsschnitt durch das Bauteil und rechts einen Querschnitt durch das Bauteil. Der Querschnitt wurde 15 mm von der Eintrittsfläche der beiden Stacks entfernt dargestellt und bleibt über die restliche Kanallänge unverändert.

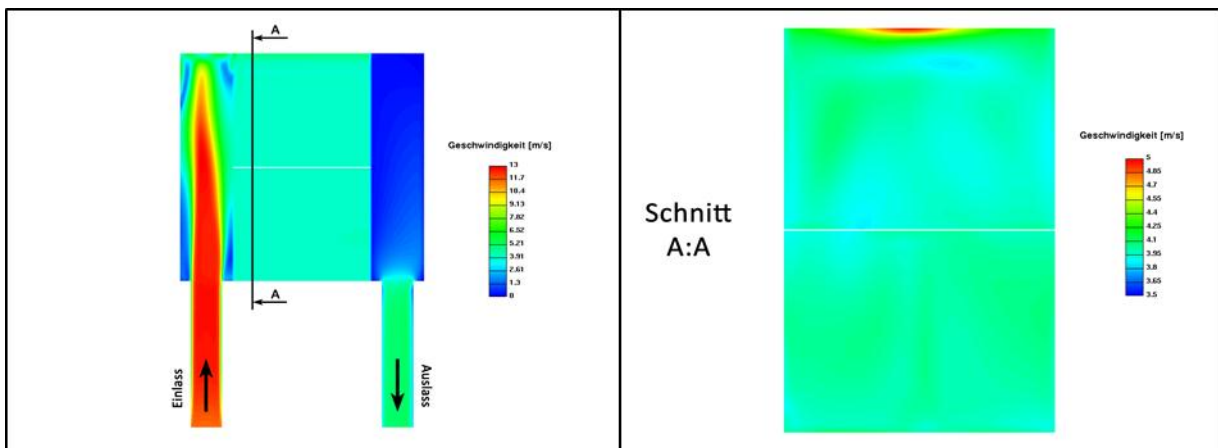


Abbildung 6-13: Ergebnis der Gleichverteilung der Luft bei 300 °C [Kiesling C. 2012, S.52-53]

Man kann im linken Bild die Vergleichmäßigung der Strömung an der Eintrittsfläche der beiden Stacks gut erkennen. Im rechten Bild sieht man, dass sich an der Oberkante des oberen Stacks die Luft mit höherer Geschwindigkeit fortbewegt. Das ist auf den Staudruck in der Zulaufbox zurückzuführen. Die maximale Geschwindigkeit liegt bei etwa 5 m/s und die durchschnittliche Geschwindigkeit liegt bei circa 4 m/s.

Abbildung 6-14 zeigt die Simulationsergebnisse bei 800 °C. Auch hier wird auf der linken Seite der Längsschnitt und rechts der Querschnitt dargestellt. Der Querschnitt befindet sich ebenfalls 15 mm von der Eintrittsfläche entfernt.

6. Simulation des Temperaturfeldes

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

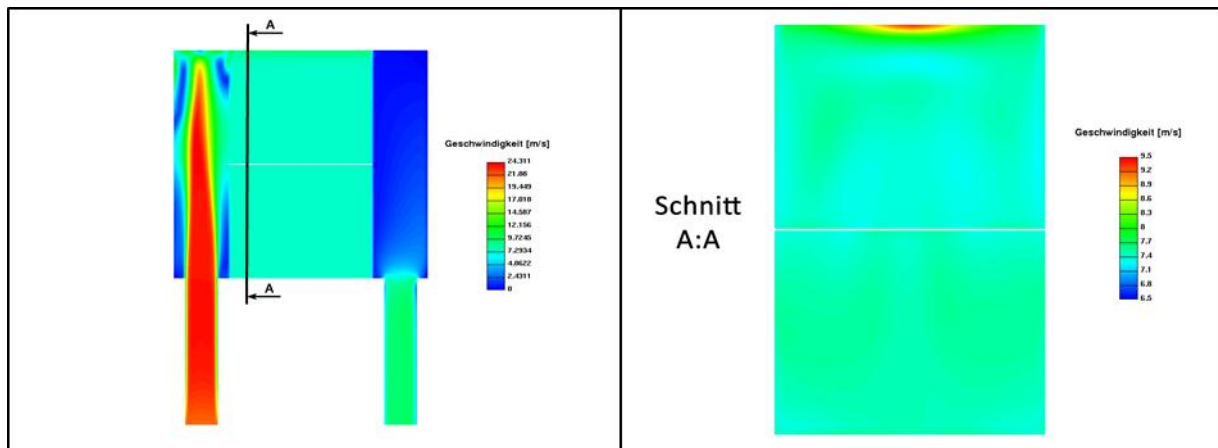


Abbildung 6-14: Ergebnis der Gleichverteilung der Luft bei 800 °C [Kiesling C. 2012, S.54]

Die Geschwindigkeiten sind bei 800 °C etwas höher als bei 300 °C. Die maximale Geschwindigkeit liegt in diesem Fall bei etwa 9 m/s und die durchschnittliche Geschwindigkeit liegt bei circa 7,5 m/s. Grundsätzlich kann zu den Ergebnissen gesagt werden, dass sich die Luft relativ gut auf die beiden Stacks aufteilt. Jedoch lässt sich nicht eindeutig feststellen, ob und welchen Einfluss der Bereich mit höherer Geschwindigkeit wirklich hat, da die Einströmfläche in Realität nicht kontinuierlich porös ist. [Kiesling C. 2012, S. 54]

Es wird für die folgenden Simulationen angenommen, dass sich die Luft ideal auf die Kathodenkanäle aufteilt. Das heißt, dass Massenstrom und Eintrittstemperaturen für alle Kanäle des betrachteten Stacks ident definiert sind.

6.3 Modellierung

Da nun die wichtigsten Eingabedaten definiert wurden, wird an dieser Stelle etwas näher auf die Bildung des FE-Modells eingegangen. Dazu gehört die Bauteilgeometrie, das Vernetzen, Materialdaten und weitere Randbedingungen, die zur Wärmeübertragung notwendig sind. Zur Simulation des Temperaturfeldes wurde die Finite-Elemente-Software Abaqus/CAE herangezogen, die üblicherweise nicht für Strömungsprobleme verwendet wird.

6.3.1 Bauteilgeometrie und Vernetzung

Die einzelnen Bauteile wurden grundsätzlich bereits in Kapitel 5 „Verwendetes Brennstoffzellen-Modul“ genauer erläutert, jedoch ergibt sich bei der Modellierung ein gesonderter Fall für die durchströmende Luft. Abbildung 6-16 zeigt das Modell des gesamten Stacks mit 30 Zellen. Um etwas mehr ins Detail zu gehen, soll ein Längsschnitt (Schnittebene A-A) durch den Stack dienen.

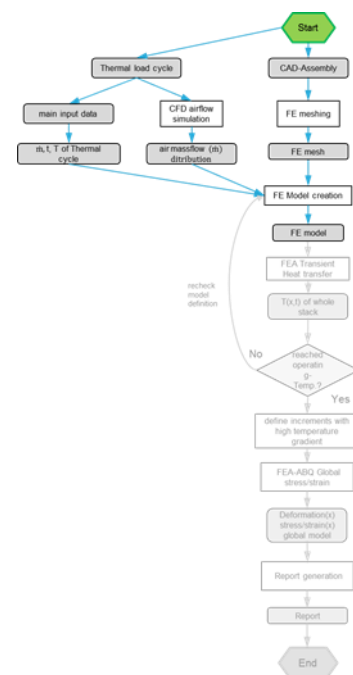


Abbildung 6-15: Modellierung

6. Simulation des Temperaturfeldes

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

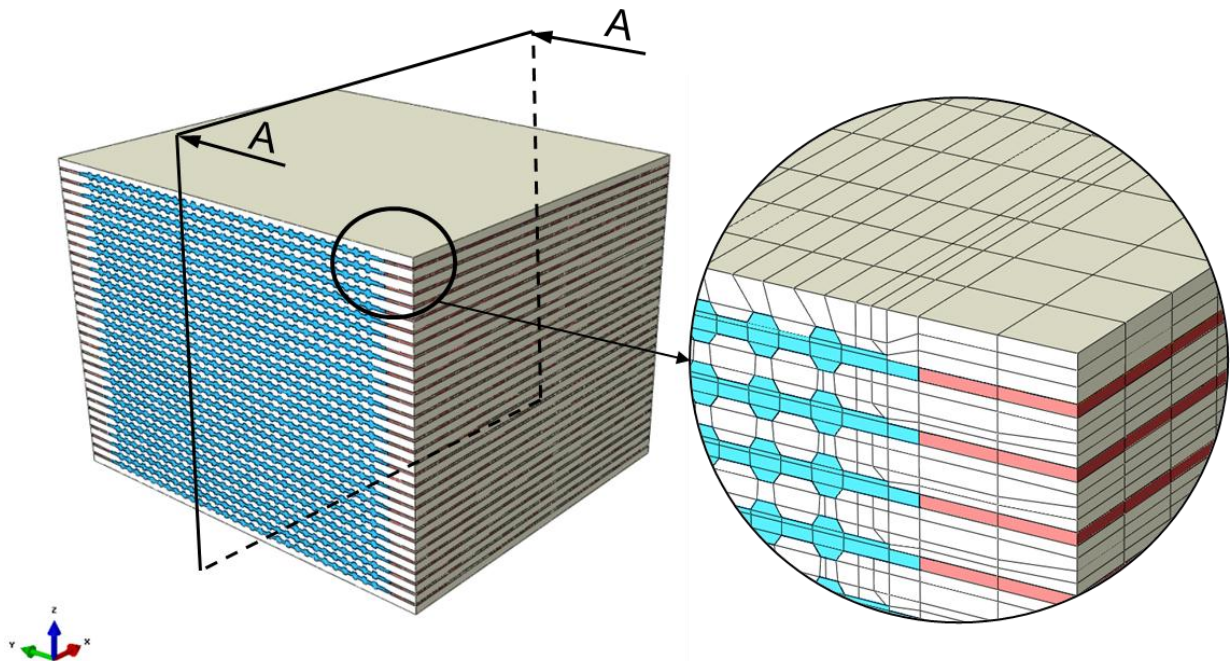


Abbildung 6-16: Modell des Stacks mit 30 Zellen

Der Schnitt A-A in Abbildung 6-17 stellt eine detailliertere Ansicht über die Stack-Modellierung dar. Man kann gut erkennen, dass die Luft nach Eintritt in den Stack direkt auf die Stirnfläche der Dichtung und der Zelle trifft. Danach strömt sie, wie schon besprochen, geradlinig auf der Kathodenseite bis an das andere Ende des Stacks. Es wurden alle drei, sehr dünnen Materialsichten der Zelle modelliert um in weiterer Folge auch Ergebnisse aufgrund der verschiedenen Materialeigenschaften der Schichten zu erhalten und auf interlaminare Vorgänge schließen zu können.

6. Simulation des Temperaturfeldes

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

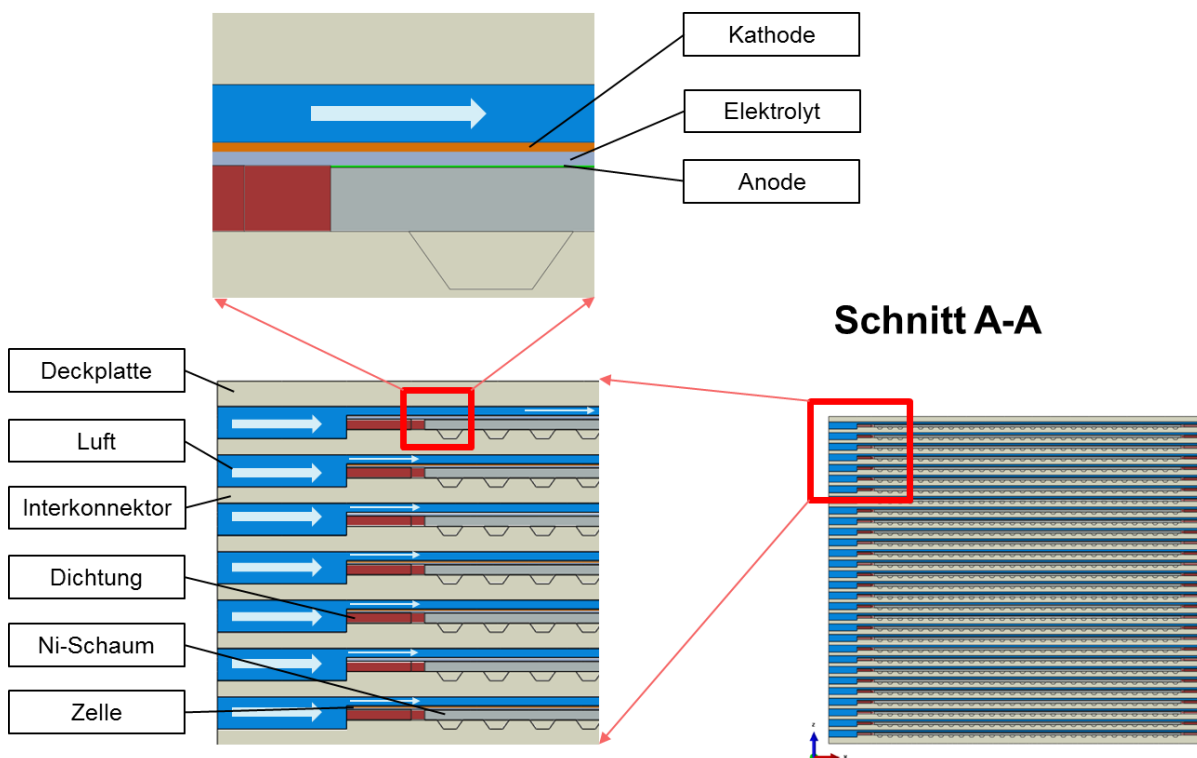


Abbildung 6-17: Längsschnitt durch den Stack

Abbildung 6-18 zeigt das Netz einer sich wiederholenden Einheit. Das heißt, dass bei einem Stack mit 30 Einzelzellen die abgebildeten Bauteile 30-mal verbaut sind.

Man kann erkennen, dass die Luft als eigener Teil modelliert und vernetzt ist. Die Luft wird also als eigener Festkörper mit temperaturabhängigen Werkstoffeigenschaften betrachtet. Dies ist notwendig, damit der Wärmeübergang zwischen Luft und Zelle, bzw. Luft und Interkonnektor simuliert werden kann. In Abaqus ist es außerdem möglich, dem Netz einen Massenstrom aufzuprägen um den Strom der Luft durch die Kanäle darzustellen. Es kann dadurch am Kanaleintritt eine Eingangstemperatur definiert werden, die dann durch den angegebenen Massenstrom weitertransportiert wird. [Kiesling C. 2012, S. 76]

Der kleine Quader zwischen Luft und Dichtung wurde bewusst leer gelassen. Denn die Dichtung hat bauteilbedingt diese Ausnehmung und würde man diese Stelle auch mit Luft füllen, so würde das eine zusätzliche Reihe an Elementen ergeben. Dies würde sich wiederum negativ auf die Zeitschrittweite auswirken, was im folgenden Kapitel näher erläutert wird. Eine Möglichkeit wäre die Geometrie der Dichtung für Simulationszwecke anzupassen, das wurde im vorliegenden Fall jedoch nicht gemacht.

6. Simulation des Temperaturfeldes

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

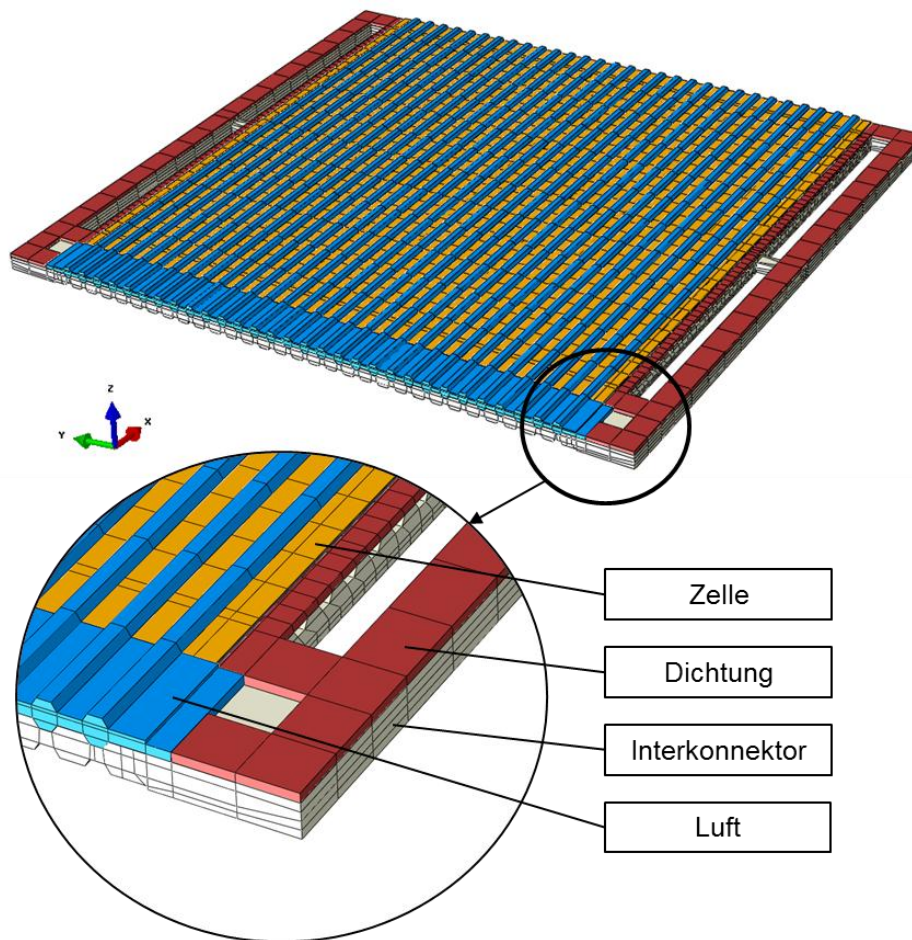


Abbildung 6-18: Bauteile mit Netz einer Brennstoffzelleneinheit

Die länglichen Ausnehmungen seitlich am Interkonnektor wurden an den Enden eckig ausgeführt um die Qualität des Berechnungsnetzes zu erhöhen.

Als Elementtyp für die Luft wurden Solid Elemente, hexagonal, 8-knotig, linear verwendet. Die Kurzbezeichnung in Abaqus lautet: DCC3D8D. Dieser spezielle Elementtyp erlaubt neben Wärmeleitung und Wärmespeicherung die Konvektion und Diffusion von Fluiden. Außerdem beinhaltet dieser Elementtyp eine Kontrolle der Zeitschrittweite, damit die Courant-Friedrich-Lewy-Zahl kleiner eins bleibt. (siehe Kapitel 6.3.2)

Für alle anderen Bauteile wurden ebenfalls Solid Elemente, hexagonal, 8-knotig, linear aber mit der Kurzbezeichnung DC3D8 verwendet. Dies sind allgemeine Wärmeübertragungs-Elemente, bei denen eine freistehende Fläche automatisch als adiabat angesehen wird. Sie erlauben nur Wärmespeicherung und Wärmeleitung.

Der gesamte Stack umfasst über eine Million Elementknoten bzw. circa 540000 Elemente, dies schlägt sich wiederum negativ auf die Simulationszeit nieder. Aber Geometriebedingt lässt sich die Anzahl der Elemente nicht verringern, da die Kanäle im Vergleich zur restlichen Bauteilgeometrie sehr klein sind.

6.3.2 Problem Simulationszeit

Man kann in der vergrößerten Detailansicht in Abbildung 6-18 erkennen, dass die Luft im Vergleich zu anderen Bauteilen eher grob vernetzt wurde. Dies hängt mit der maximalen Zeitschrittweite zusammen, die hier sehr begrenzt ist. Eine Aussage darüber macht die sogenannte Courant-Friedrich-Levy-Zahl, diese darf nicht größer als eins sein: [Kiesling C. 2012, S. 63]

$$c = \frac{u \cdot \Delta t}{\Delta x} \leq 1 \quad (6-1)$$

Wird eins überschritten, dann würde die heiße Luft in einem Zeitschritt weiter als nur durch eine Zelle transportiert werden und somit wären die Ergebnisse physikalisch unbrauchbar. Durch die eingeschränkte Zeitschrittweite ergeben sich sehr lange Rechenzeiten, deshalb wird ein Beschleunigungsfaktor eingeführt, der die Simulation beschleunigt. Die Ausbreitung der Temperatur im Bauteil wird unter anderem von der Fourier-Zahl bestimmt. Sie ist dimensionslos und gibt das Verhältnis von geleiteter zu gespeicherter Wärme an: [Kiesling C. 2012, S. 64]

$$Fo = \frac{\lambda t}{c_p \rho l^2} \quad (6-2)$$

Es wird nun ein Beschleunigungsfaktor f definiert, der die reale Zeit t in Relation mit der Simulationszeit t^* setzt: [Kiesling C. 2012, S. 64]

$$t = f \cdot t^* \quad (6-3)$$

Außerdem steht dieser Faktor auch für das Verhältnis der realen spezifischen Wärmekapazität c_p und der spezifischen Wärmekapazität c_p^* in der Simulation: [Kiesling C. 2012, S. 64]

$$f = \frac{c_p}{c_p^*} \quad (6-4)$$

Es kann nun gezeigt werden, dass sich die reale Fourier-Zahl nicht von der in der Simulation unterscheidet: [Kiesling C. 2012, S. 64]

$$Fo^* = \frac{\lambda t^*}{c_p^* \rho l^2} = \frac{\lambda}{c_p^* \rho l^2} \cdot \frac{t}{f} = \frac{\lambda}{c_p^* \rho l^2} \cdot \frac{c_p^* t}{c_p} = \frac{\lambda t}{c_p \rho l^2} = Fo \quad (6-5)$$

Es kann also die Simulation durch Herabsetzen der Zeit und der spezifischen Wärmekapazitäten beschleunigt werden. Dies muss jedoch bei der Auswertung der Ergebnisse berücksichtigt werden.

6.3.2.1 Einfluss der Beschleunigung

Der Beschleunigungsfaktor f wirkt so, als ob die Luft in einem Zeitschritt der Simulation die f -fache Energie an den Festkörper abgäbe. Eine Möglichkeit zur Plausibilisierung ist eine Energiebilanz mittels des ersten Hauptsatzes der Thermodynamik aufzustellen: [Kiesling C. 2012, S. 73]

$$\frac{dU}{dt} = \sum_i \dot{Q}_i + \sum_e \dot{m}_e h_e - \sum_a \dot{m}_a h_a \quad (6-6)$$

Werden alle ein- und austretenden Energien über alle Zeitschritte aufsummiert, so erhält man die gesamten während des jeweiligen Prozesses ein- bzw. austretenden Energien. Die Differenz zwischen gesamter ein- und ausgetretener Energie stellt jenen Energiebetrag dar, der dem Festkörper zu- oder abgeführt wurde (rechte Seite der Gleichung). Dieser muss wiederum gleich der Differenz der im Festkörper zu Beginn und zu Ende des Prozesses enthaltenen Energie sein (linke Seite der Gleichung). Der Unterschied zwischen linker und rechter Seite der Gleichung ergibt den Fehler. [Kiesling C. 2012, S. 74]

In der vorliegenden Arbeit wurde mit einem Beschleunigungsfaktor von 10000 gerechnet, die Simulation eines so großen globalen Modelles mit einer Million Knoten würde sonst zu lange dauern. Die in Tabelle 6-1 gezeigte Fehlerabschätzung wurde anhand eines vereinfachten Modelles eines kreisrunden Rohres mit dem hydraulischen Durchmesser der Kanalgeometrie gerechnet. Somit wurde der größere durchgängige Eintrittsbereich der Luft vernachlässigt (siehe Abbildung 6-19).

	f	$\frac{dU}{dt}$	$\sum_i \dot{Q}_i + \sum_e \dot{m}_e h_e - \sum_a \dot{m}_a h_a$	ΔE
	Beschleunigungs- faktor	Änderung der Energie im Festkörper [J]	Summe zu- und abge- führter Energien [J]	Differenz [J]
Heizen	10000	4097	4379	282
Kühlen	10000	4013	4236	223

Tabelle 6-1: Fehlerabschätzung

6. Simulation des Temperaturfeldes

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

Während des Heizens ergibt sich somit ein Unterschied von 282 Joule, was einen Fehler von 6 % bedeutet. Beim Kühlen ist der Fehler etwas geringer. Er liegt bei 223 Joule, das sind etwa 5 %. Aufgrund der hohen Temperaturspannen und der deutlich reduzierten Simulationszeit (Faktor 10000) ist ein Fehler von 6 % akzeptabel. Außerdem wurde in der Fehlerabschätzung jeweils nur mit zwei gemittelten Eingangstemperaturen gerechnet und in der Simulation ändert sich die Eingangstemperatur linear zwischen mehreren Stützstellen. Somit sollte der Fehler tatsächlich noch geringer sein.

6.3.3 Definition des Massenstroms der Luft in Abaqus

Die durch die Kanäle strömende Luft wurde wie oben bereits besprochen als Festkörper modelliert und vernetzt. In Abbildung 6-19 ist der „Bauteil Luft“ dargestellt. Es ist gut erkennbar, dass die Luft im Einlassbereich eine größere Querschnittsfläche als im Kanalbereich hat. In der Software Abaqus ist der Massenstrom eines Fluids in Abhängigkeit des durchströmten Querschnitts anzugeben. Somit ist ausgehend vom absoluten gemessenen Massenstrom jeweils ein eigener Massenstrom für den Eintrittsbereich der Luft und den Kanalbereich der Luft zu definieren.

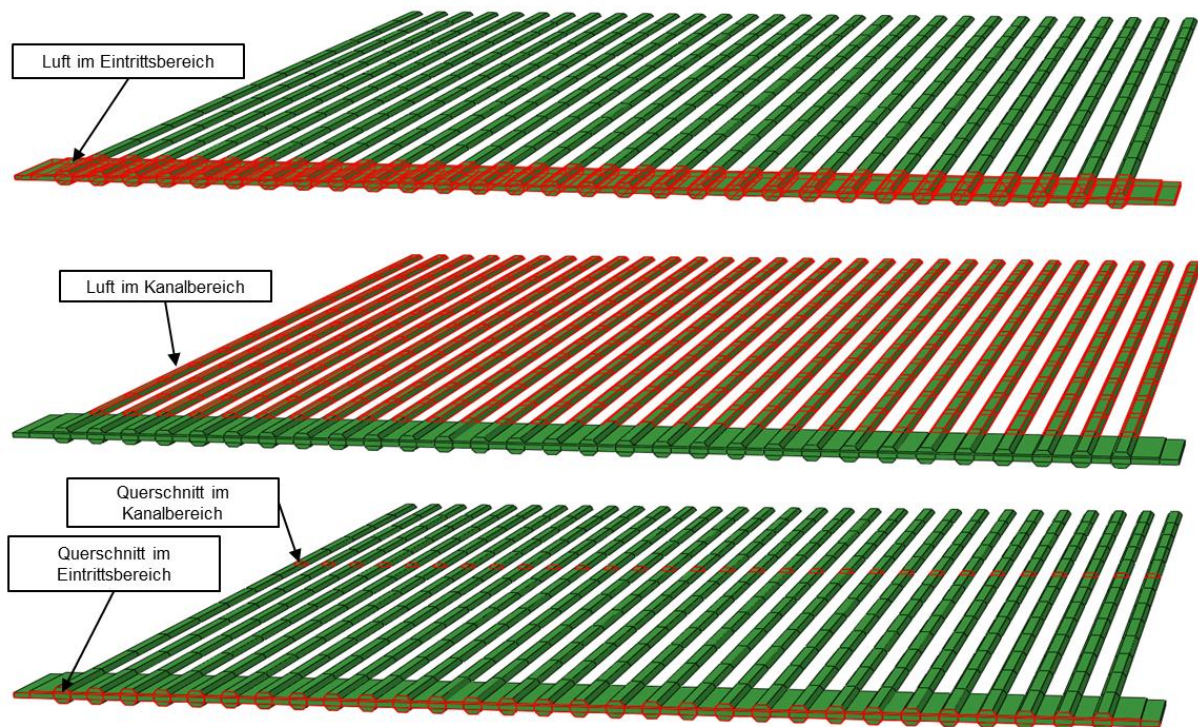


Abbildung 6-19: Massenstromdefinition der Luft

An den Knoten des Netzes, die beiden Querschnitten angehören, also genau am Übergang von Einlass zu Kanal liegen, wählt Abaqus den mittleren Massenstrom aus den zwei Werten. Würde man beispielsweise nur den Massenstrom des Eintritts für den gesamten Bauteil definieren, dann wäre die Strömungsgeschwindigkeit im Kanalbereich so hoch, dass für den Energieübertrag nicht genügend Zeit bliebe und somit die Ergebnisse falsch wären.

6.3.4 Randbedingungen und Vereinfachungen

Bei der Modellierung in Abaqus wurden einige Vereinfachungen gemacht und Randbedingungen festgelegt. Manches davon wurde bereits in früheren Kapiteln näher besprochen.

- Am Übergang zwischen Luft und Festkörper wird eine Kontaktbedingung mit einem räumlich und zeitlich gemittelten Wärmeübergangskoeffizienten definiert. Der Wärmeübergangskoeffizient beträgt $\alpha = 200 \text{ W/m}^2\text{K}$. Eine Sensitivitätsanalyse in der Arbeit von Kiesling hat gezeigt, dass diesbezüglich die Variation des Temperaturfeldes nicht sehr groß ist. Das rot hervorgehobene Trapez in Abbildung 6-20 symbolisiert die Grenzflächen zwischen Luft und Stack. Das heißt, es findet sowohl Interaktion zwischen Luft und Interkonnektor, sowie zwischen Luft und Zelle statt. [Kiesling C. 2012, S. 71, 80]

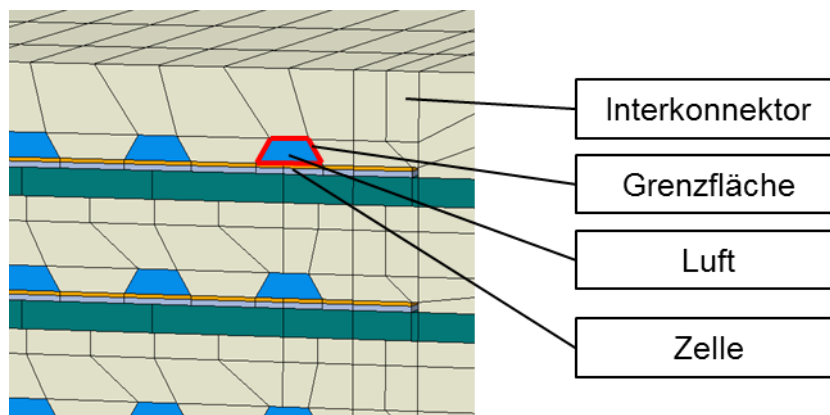


Abbildung 6-20: Grenzflächen Luft-Kanalwand

- Die Luft staut sich an der Stirnfläche des Stacks und somit entsteht auch hier ein Wärmeübergang von der anströmenden Luft an die Frontfläche des Stacks. Es ist in Abaqus möglich, mittels einer Kontaktbedingung das Verhalten einer dünnen Oberflächenschicht mittels Wärmeübergangskoeffizient und Gastemperatur festzulegen. Hier wurde ein Wärmeübergangskoeffizient von $\alpha = 15 \text{ W/m}^2\text{K}$ gewählt. Der Einfluss des Koeffizienten an der Stirnfläche wurde ebenfalls von Kiesling als gering eingestuft. [Kiesling C. 2012, S. 70] Abbildung 6-21 zeigt jene Fläche rot hervorgehoben.

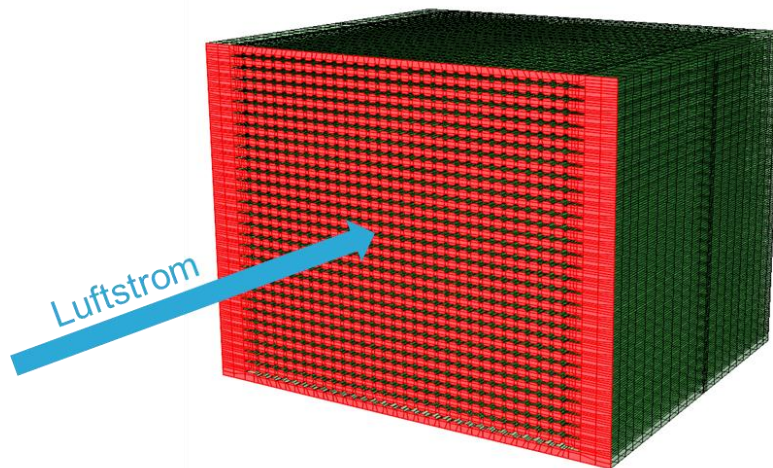


Abbildung 6-21: Stirnfläche mit Wärmeübergang

- Dem Bauteil Luft wird der in Kapitel 6.1.2 definierte Massenstrom für den entsprechenden Zeitpunkt aufgeprägt, um den konvektiven Energietransport abzubilden.
- Die Eingangstemperatur wird an der Stirnfläche des Stacks, als auch an der Stirnfläche des Bauteils Luft mit den in Kapitel 6.1.1 bestimmten Werten zum jeweiligen Zeitpunkt festgelegt.
- Die Außenflächen des Stacks sind innerhalb des verwendeten Moduls sehr gut isoliert, damit dem Prozess so wenig wie möglich Wärme verloren geht. Eine Isolationschicht aus sechs Zentimeter dickem, wärmedämmendem Material sorgt in der Realität dafür, aber in der Simulation werden diese Flächen als adiabat angenommen.
- Die Brennstoffkanäle werden während des Aufheizens und Abkühlens nicht durchströmt, somit geschieht dort auch kein konvektiver Wärmetransport. Die spezifische Wärmekapazität des stillstehenden Gases ist sehr klein, deshalb wird der Wärmeübergang zwischen den Bauteilen und dem Brennstoff vernachlässigt. [Kiesling C. 2012, S. 81]
- Die Verteilung der Luft auf die Kathodenkanäle wird als ideal gleichverteilt angenommen. Wie schon in Kapitel 6.2 gezeigt ist dies durchaus realistisch.
- Es werden in der Simulation keine Porositäten berücksichtigt. Alle Bauteile werden als undurchlässig betrachtet.
- Hinsichtlich der Materialdaten wurden ebenfalls einige Annahmen getroffen. Es werden für diese Simulation temperaturabhängige Materialdaten für den gesamten Einsatzbereich benötigt, da aber in der Literatur und aus Messungen relativ wenig bekannt ist wurden dafür Annahmen benötigt.

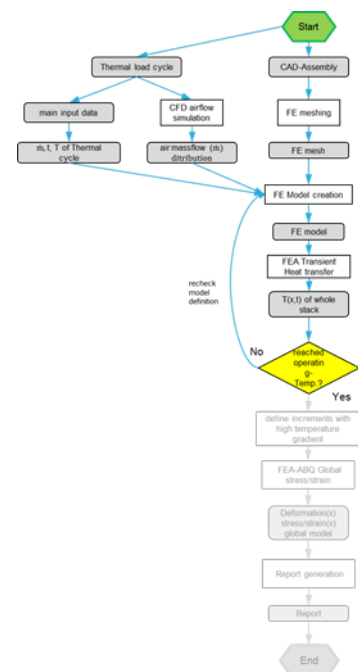


Abbildung 6-22: Zwischenergebnis Temperaturfeld

6.4 Zwischenergebnis Temperaturfeld

Es wird an dieser Stelle das Simulationsergebnis für die Berechnung des Temperaturfeldes aus Abaqus für einen gesamten Aufheiz- und Abkühlprozess betrachtet. Die folgenden Bilder sollen ein Gefühl für das bisher besprochene vermitteln. Dabei ist zu beachten, dass sich der Minimalwert der Temperaturskalen verändert, um die Temperaturunterschiede im Bauteil sichtbar zu machen. Zur besseren Orientierung ist in der rechten Bildhälfte das Diagramm des Temperaturzyklus der Einlasstemperaturen aus Kapitel 6.1.1 dargestellt. Der schwarze Punkt symbolisiert den aktuellen Zeitpunkt. Die angegebenen Zeiten sind als Bruchteile der Gesamtzeit angegeben. Abbildung 6-23 zeigt den Beginn des Aufheizvorganges. Gut sichtbar ist dabei die noch sehr kühle Struktur und die bereits circa 350 °C heiße Luft am Eintritt.

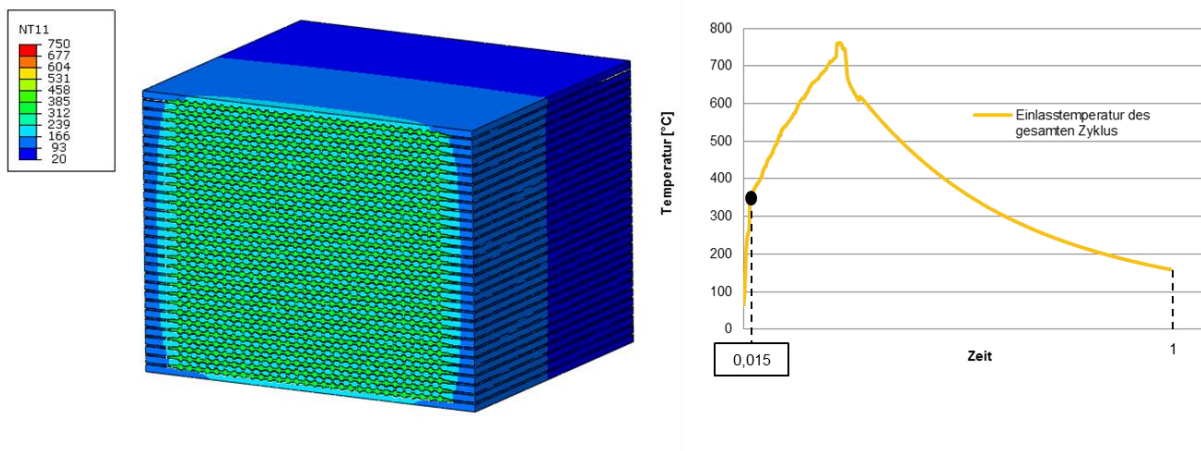


Abbildung 6-23: Temperaturfeld des Stacks nach 1,5% der Gesamtzeit

In Abbildung 6-24 hat der gesamte Stack bereits eine Temperatur von etwa 500 °C und wir nähern uns der Betriebstemperatur.

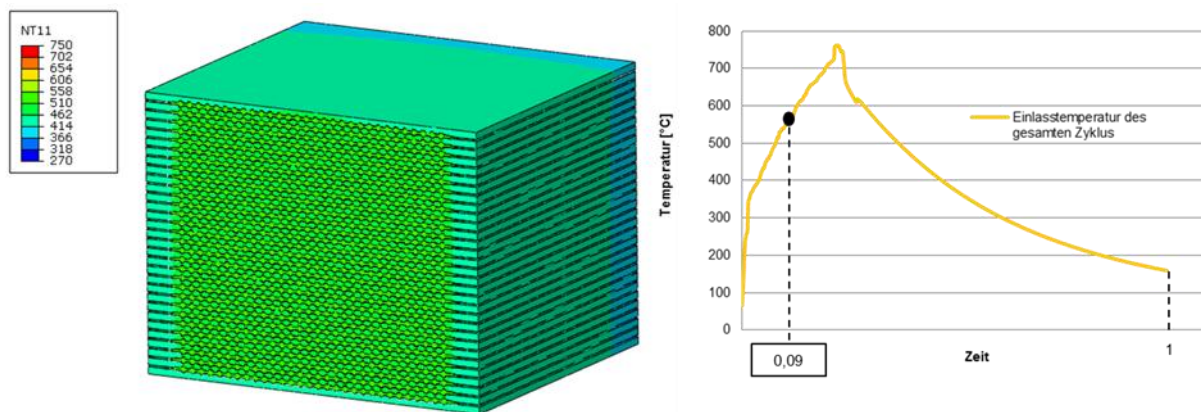


Abbildung 6-24: Temperaturfeld des Stacks nach 9% der Gesamtzeit

6. Simulation des Temperaturfeldes

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

In Abbildung 6-25 ist das Ende des Aufheizvorganges erreicht. Man kann aber erkennen, dass sich ein deutlicher Temperaturgradient zwischen der Frontfläche und der Rückfläche des Stack besteht.

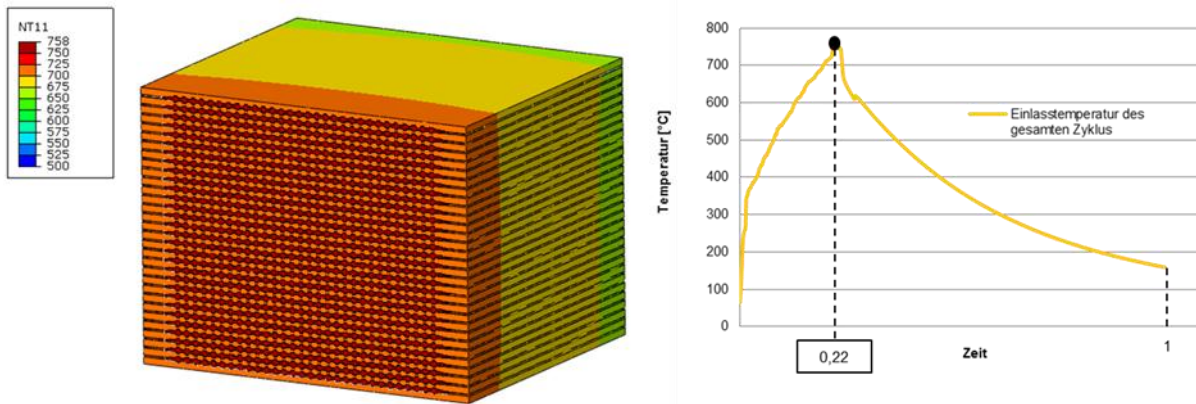


Abbildung 6-25: Temperaturfeld des Stacks nach 22% der Gesamtzeit

In der Realität würden an dieser Stelle die chemischen Reaktionen starten und die dabei entstehende Wärme würde den Stack mit konstanter Temperatur weiter heizen. Dies würde den Effekt haben, dass sich das gesamte Temperaturfeld homogenisiert, also annähernd der gesamte Stack auf Betriebstemperatur gebracht wird. Natürlich gibt es dann noch immer lokale Temperaturunterschiede, die Schädigungen in den Zellschichten hervorrufen, aber darauf wird an dieser Stelle nicht näher eingegangen. Aber aus dem beschriebenen Grund wurde der in Abbildung 6-26 ersichtliche Stabilisierungszeitpunkt eingeführt. Es werden dabei nach dem Heizen bzw. vor dem Kühlen alle Bauteile auf eine Betriebstemperatur von ungefähr 750 °C gebracht. Das heißt, zu diesem Zeitpunkt existieren in der Simulation keine Temperaturgradienten, um für den Start des Kühlvorgangs möglich realistische Randbedingungen zu schaffen.

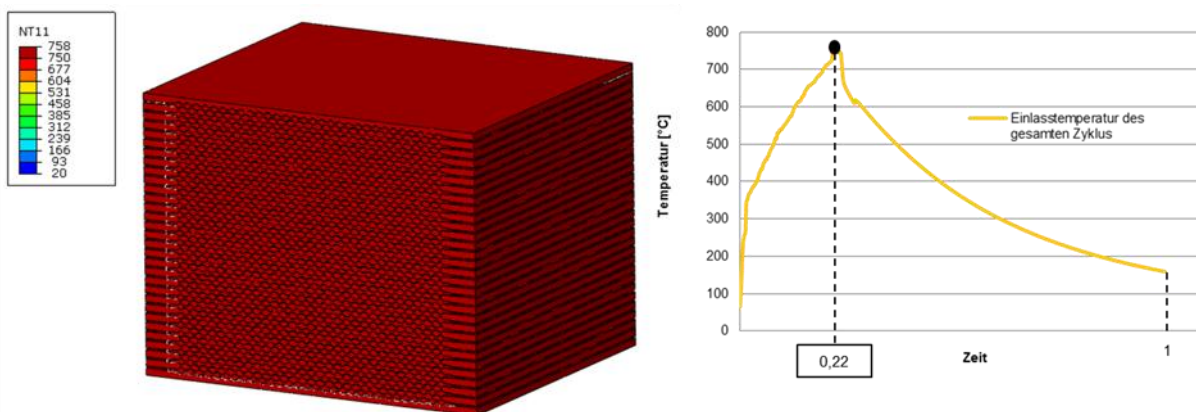


Abbildung 6-26: Stabilisierungszeitpunkt des Temperaturfeldes

Abbildung 6-27 zeigt den Beginn des Kühlens und bereits wieder einen deutlichen Temperaturgradienten zwischen Vorder- und Rückseite des Stacks.

6. Simulation des Temperaturfeldes

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

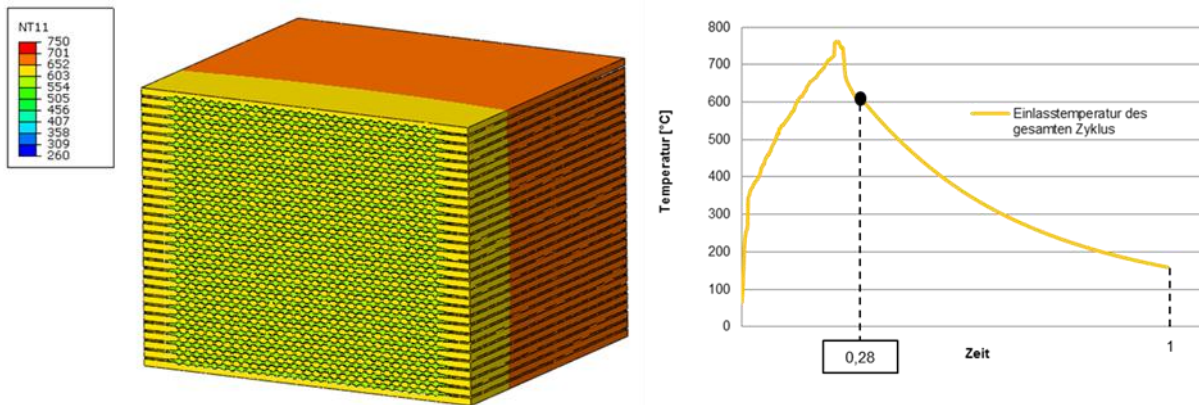


Abbildung 6-27: Temperaturfeld des Stacks nach 28% der Gesamtzeit

Dass nach 60 % der Gesamtzeit die großen Temperaturgradienten bereits verschwunden sind, zeigt Abbildung 6-28. Der Stack hat hier schon eine Temperatur von circa 300 °C und die Luft strömt mit etwa 230 °C.

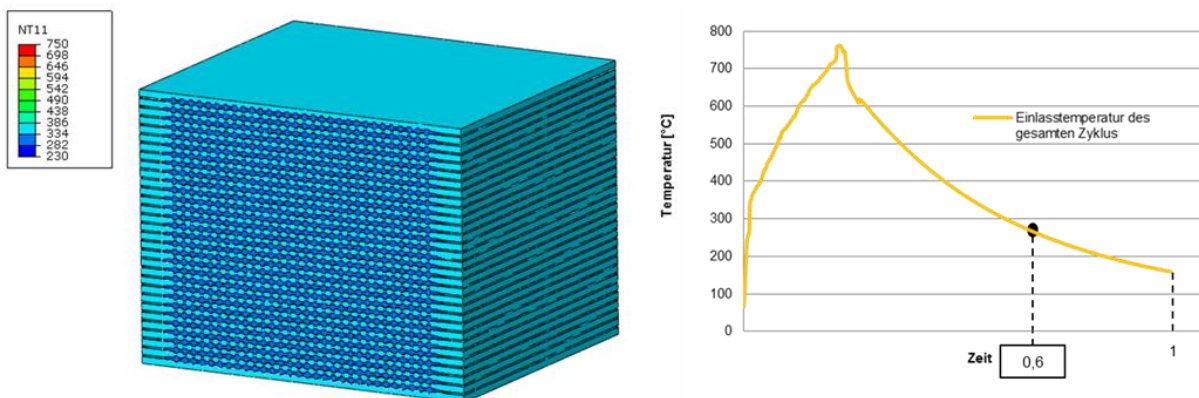


Abbildung 6-28: Temperaturfeld des Stacks nach 60% der Gesamtzeit

Die Darstellung in Abbildung 6-29 zeigt das Ende des Temperaturzyklus in der Simulation. Hier strömt die Luft mit etwa 150 °C und auch die Bauteile des Stacks haben hier diese Temperatur schon erreicht. In der Realität ist dies der Zeitpunkt, wo das Gebläse der Luft abgestellt wird und die restliche Prozesswärme rein über Wärmeleitung bis zur Raumtemperatur abkühlen würde. In der thermo-mechanischen Simulation sind diese Bereiche der Wärmeleitung jedoch uninteressant, da wie schon mehrfach erwähnt, hier keine nennenswerten Temperaturgradienten und folglich keine großen mechanischen Spannungen zu erwarten sind. Außerdem würde sich die Simulationszeit erneut zu einem großen Problem entwickeln.

6. Simulation des Temperaturfeldes

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

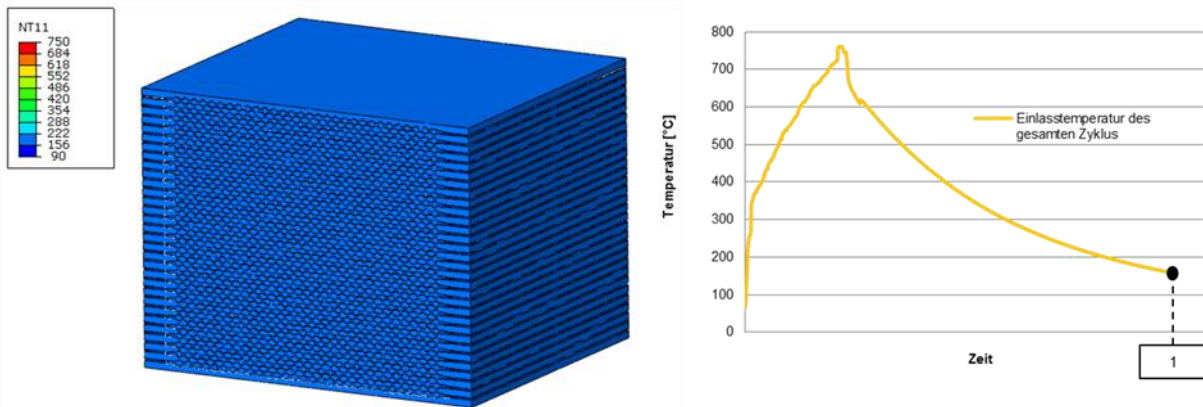


Abbildung 6-29: Temperaturfeld des Stacks nach 100% der Gesamtzeit

Um einen etwas detaillierteren Einblick in die Entwicklung des Temperaturfeldes zu bekommen, sind in den nächsten beiden Bildern Längsschnitte durch den Stack mit einem vergrößerten Detail dargestellt. Es ist hier wieder besonders auf die Skala der dargestellten Farben Acht zu nehmen, da diese so eingestellt sind, um möglichst viel Veränderung im Temperaturverlauf zu sehen. Abbildung 6-30 zeigt den Schnitt des Stacks während des Aufheizens nach 9 % der Gesamtzeit. Im vergrößerten Detail ist gut zu erkennen, wie die Luft, beginnend mit einer Temperatur von etwa 500 °C, allmählich dieselbe Temperatur erreicht wie die umliegenden Bauteile, bzw. ihre Wärme an die umliegenden Bauteile abgibt. Bei genauem Hinsehen kann man erkennen, wie sich die Luft an der Stelle der Querschnittsverengung staut und somit der Wärmeübergang dadurch eingeschränkt ist.

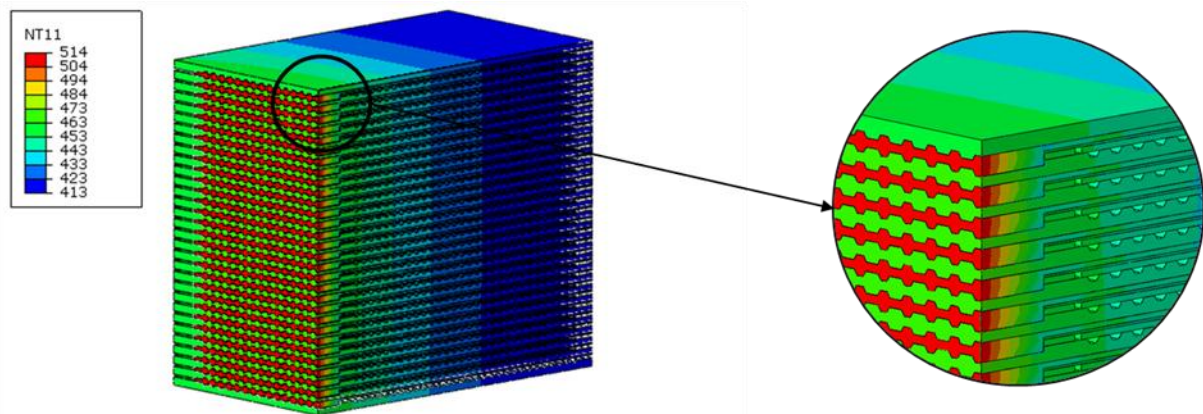


Abbildung 6-30: Längsschnitt durch den Stack nach 9% der Gesamtzeit

Denselben Längsschnitt, nur nach 28 % der Gesamtzeit zeigt Abbildung 6-31. Hier befindet sich das System bereits im Kühlvorgang. Auch in dieser Darstellung kann man den Temperaturverlauf der Luft gut erkennen, nur wird diesmal die kalte einströmende Luft von den umliegenden Bauteilen erwärmt. Der Staupunkt an der Querschnittsänderung ist hier ebenfalls zu erkennen.

6. Simulation des Temperaturfeldes

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

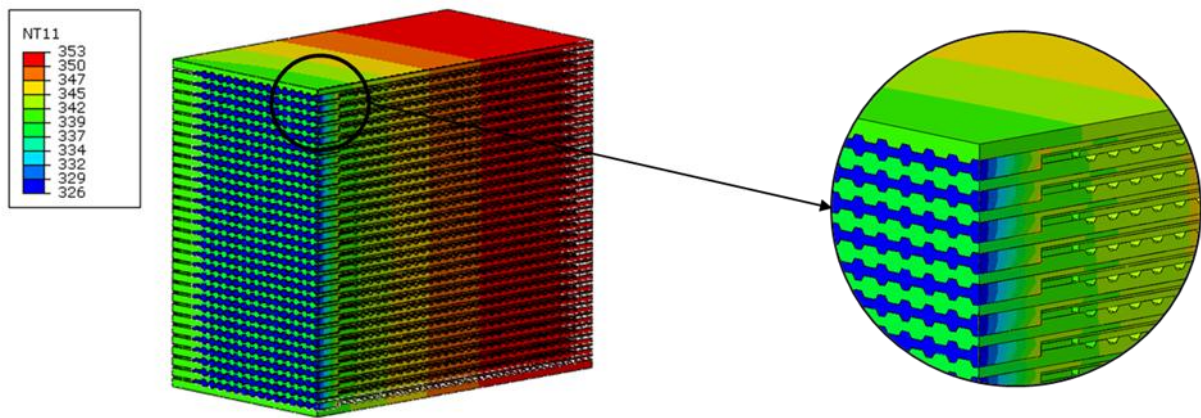


Abbildung 6-31: Längsschnitt durch den Stack nach 28% der Gesamtzeit

Einen Überblick über die Ausbreitung der Temperatur über alle Zellen des Stacks sollen die nächsten beiden Bilder geben. Es wurde hier wieder je ein Zeitpunkt beim Heizen und beim Kühlen dargestellt. Es ist dabei wiederum auf die Farbskala zu achten.

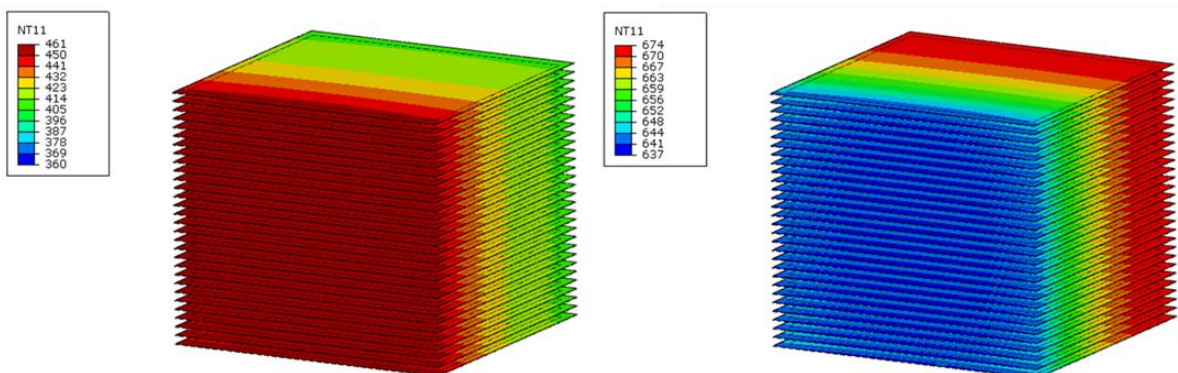


Abbildung 6-32 (links): Temperaturfeld der Zellen nach 9% der Gesamtzeit
Abbildung 6-33 (rechts): Temperaturfeld der Zellen nach 28% der Gesamtzeit

Für die nächste Betrachtung der Entwicklung des Temperaturfeldes wurde der mittlere Interkonnektor herangezogen (siehe Abbildung 6-34). Wie in Abbildung 6-35 hervorgehoben dargestellt, werden je ein Punkt auf der Einlassseite und auf der Auslassseite des mittleren Interkonnektors ausgewählt. Die Temperaturverläufe über die Zeit dieser beiden Punkte sollen zeigen, in welchen Bereichen mit hohen Temperaturgradienten zu rechnen ist.

6. Simulation des Temperaturfeldes

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

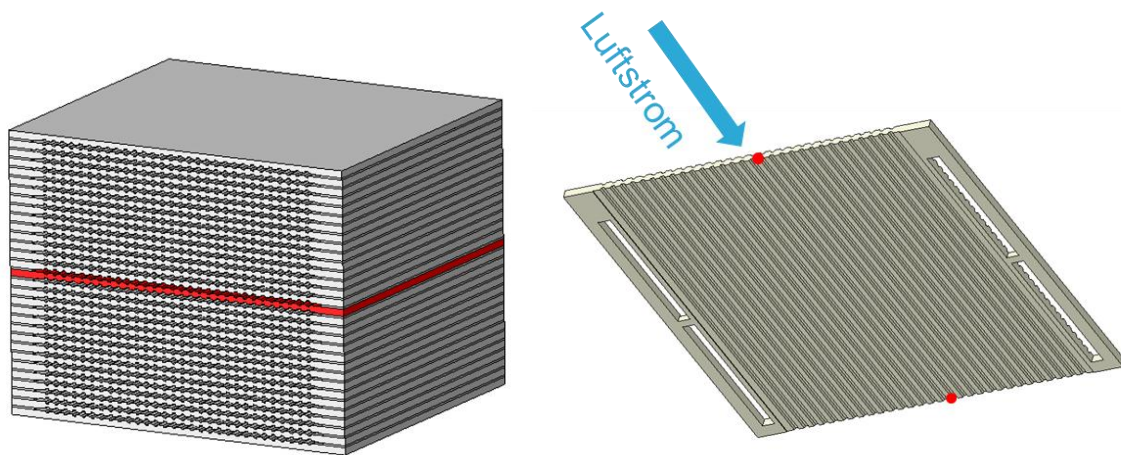


Abbildung 6-34 (links): Der mittlere Interkonnektor (rot) innerhalb des Stacks
Abbildung 6-35 (rechts): Gewählte Punkte am mittleren Interkonnektor

Abbildung 6-36 zeigt nun die zeitliche Entwicklung der beiden Punkte beim Heizvorgang. Gut sichtbar ist, dass zu Beginn im Bereich um 2 % der Zyklus-Gesamtzeit die höchsten Gradienten auftreten. Danach ist die Aufheizstrategie so, dass der Gradient bis zum Erreichen der Betriebstemperatur annähernd konstant bleibt. Man kann auch erkennen, dass am Ende der Aufheizphase beide Kurven einen Knick machen. Dies geschieht wegen des Stabilisierungszeitpunktes, in dem alle Bauteile auf dieselbe Temperatur gebracht werden.

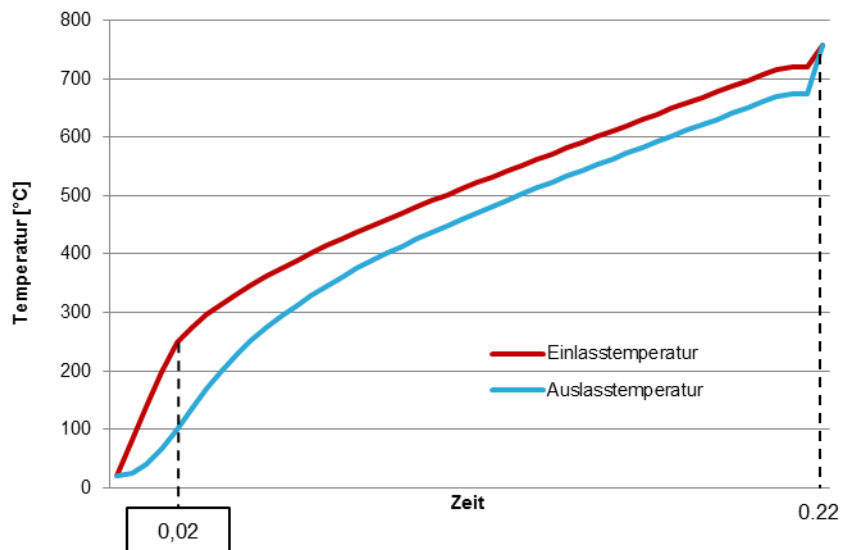


Abbildung 6-36: Zeitliche Entwicklung der Wandtemperaturen des mittleren Interkonnektors beim Heizen

Abbildung 6-37 zeigt noch das Abkühlen der beiden Punkte am mittleren Interkonnektor. Das Abkühlen startet hier bei der stabilisierten Temperatur. Auch hier sind wiederum am Beginn die

6. Simulation des Temperaturfeldes

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

größten Temperaturgradienten, im Bereich um nach 27 % der Gesamtzeit. Es fällt auf, dass in der Abkühlphase die Gradienten bei weitem geringer sind als beim Aufheizen. Dies hängt mit der viel längeren Zeitdauer und der sehr langsam gesenkten Einlasstemperatur zusammen. Außerdem ist der Gradient am Ende des Temperaturzyklus beinahe Null und somit das Temperaturfeld beinahe homogen.

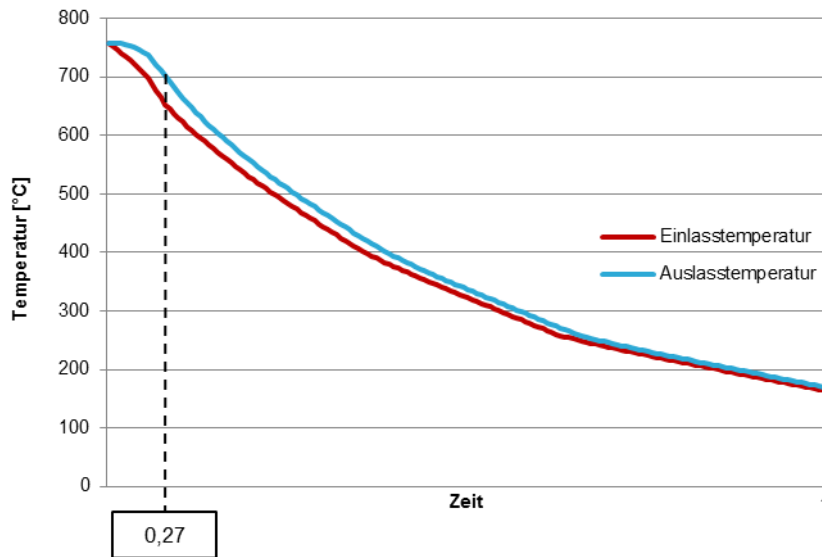


Abbildung 6-37: Zeitliche Entwicklung der Wandtemperaturen des mittleren Interkonnektors beim Abkühlen

6.5 Validierung des Temperaturfeldes

Zur Validierung des Temperaturfeldes werden die am Prüfstand gemessenen Daten verwendet. Die Abbildung 6-38 zeigt wieder den zur Simulation verwendeten Stack innerhalb des gesamten Moduls mit allen Messpunkten, die am Prüfstand installiert sind. Im rechten Bild ist der Stack mit dem Temperaturmesspunkt hervorgehoben, der für die Validierung verwendet wird. Im linken Bild ist ersichtlich, wie der Prüfstand in der Realität aussieht. Der Messpunkt befindet sich mittig des Stacks an der Austrittsseite der Luft.

6. Simulation des Temperaturfeldes

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

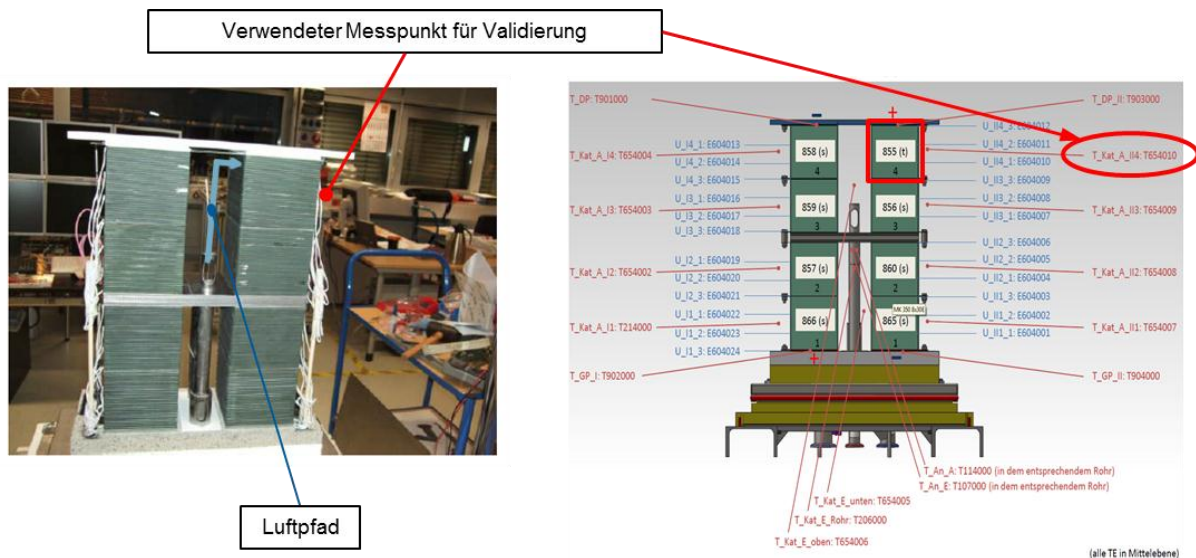


Abbildung 6-38: Verwendeter Messpunkt für Validierung der Simulation [links: Kusnezoff M. 2011, S. 18]

Es ist hierbei wieder zu beachten, dass die hier gemessenen Temperaturen Lufttemperaturen sind. Aus diesem Grund wird aus der Simulation der in der Mitte des betrachteten Stacks liegende Bauteil „Luft“ verwendet (in Abbildung 6-39 rot hervorgehoben). Abbildung 6-40 zeigt den eben genannten Bauteil und die Strömungsrichtung der Luft. Es ist an der Auslassseite jener Punkt hervorgehoben, der mit den Messungen verglichen wird.

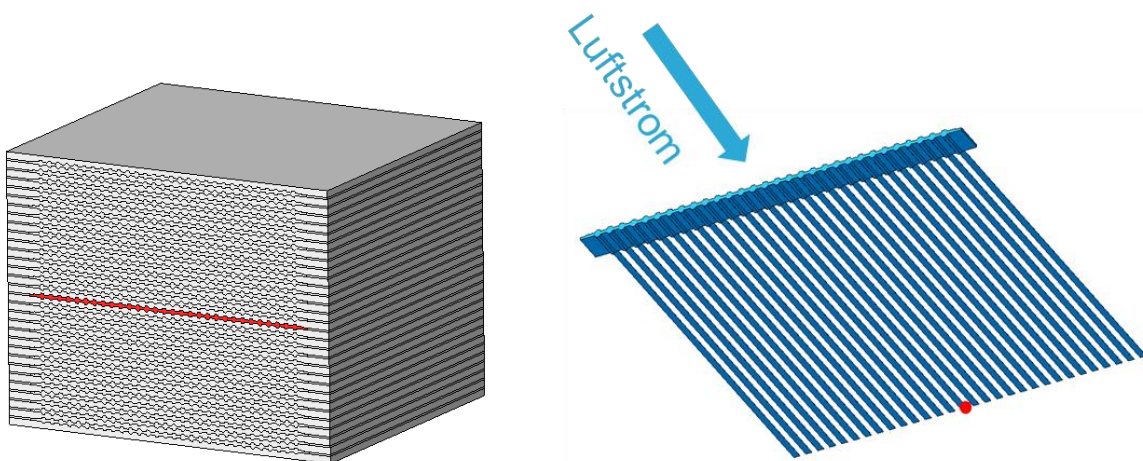


Abbildung 6-39 (links): Zur Validierung verwendeter Bauteil „Luft“
 Abbildung 6-40 (rechts): Zur Validierung verwendeter Knoten am Bauteil „Luft“

Der direkte Vergleich der Messung mit der Simulation während des Heizvorgangs ist in Abbildung 6-41 ersichtlich. Zu Beginn ist der größte Unterschied erkennbar. Dies kommt daher, da für die Simulation andere Anfangsbedingungen gewählt wurden. Denn in der Simulation hat am Start jedes Bauteil, auch die Luft, eine Temperatur von 20 °C.

6. Simulation des Temperaturfeldes

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

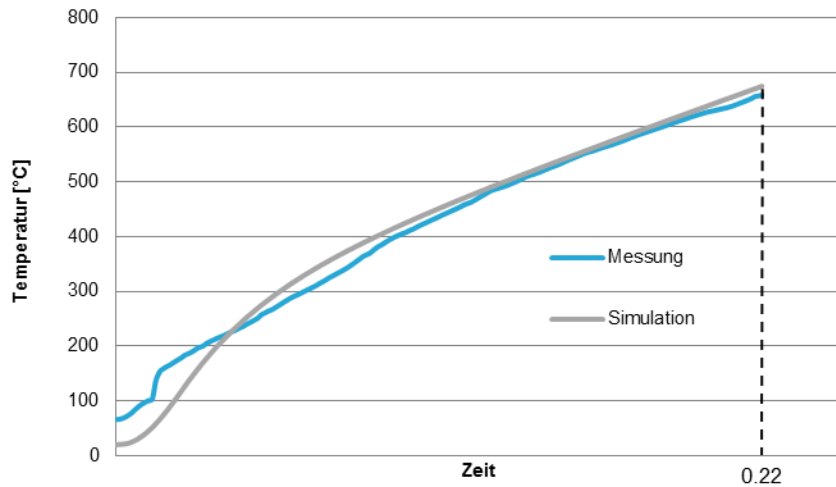


Abbildung 6-41: Vergleich von Messung mit Simulation beim Heizen

In Abbildung 6-42 ist der direkte Vergleich von Messung und Simulation für das Abkühlen dargestellt. Die beiden Kurven zeigen über den gesamten Verlauf keine großen Abweichungen.

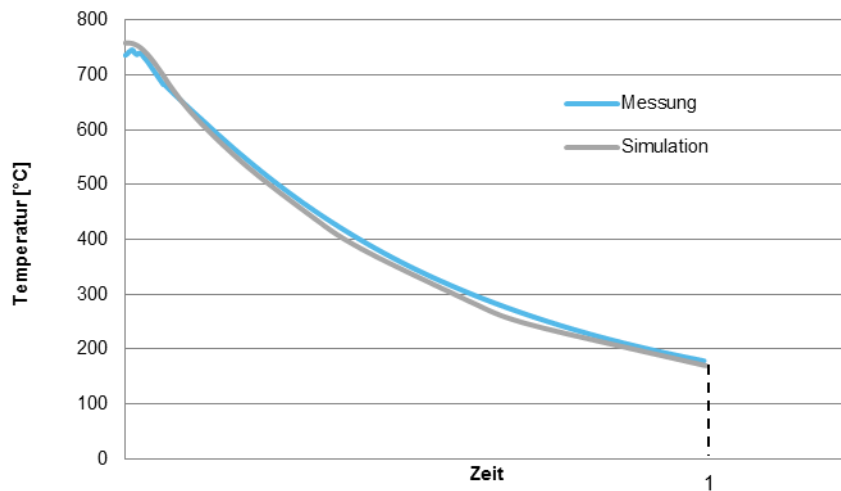


Abbildung 6-42: Vergleich von Messung mit Simulation beim Abkühlen

Es konnte somit gezeigt werden, dass die Ergebnisse der Simulation mit jenen der Messung akzeptabel übereinstimmen. Also kann die logische Abfrage im Workflow mit „ja“ beantwortet werden und der nächste Schritt verfolgt werden.

6.6 Koppelung mit der Spannungssimulation

Nach eingehender Betrachtung der Ergebnisse des Temperaturfeldes war eine weitere Herausforderung die Koppelung der Simulation des Temperaturfeldes mit der Simulation für die Spannungsanalyse. Zu diesem Zweck wurde vorerst der gesamte Stack, wie in Abbildung 6-44, in eine Matrix von 27 Knoten unterteilt. Das heißt, dass die ursprüngliche Vernetzung erhalten bleibt und lediglich 27 Knoten des vorhandenen Netzes werden ausgewählt um die verschiedenen Bereiche des Stacks zu evaluieren. Diese 27 Knoten des Berechnungsnetzes wurden am Bauteil Zelle ausgewählt, da dies üblicherweise der Teil mit der größten Schädigung ist und dort in weiterer Folge detaillierte Betrachtungen notwendig sind.

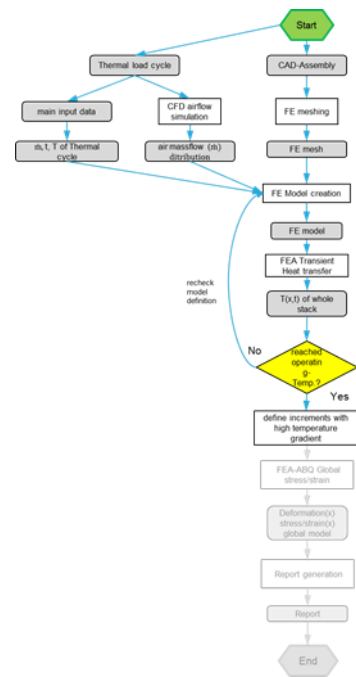


Abbildung 6-43: Koppelung mit der Spannungssimulation

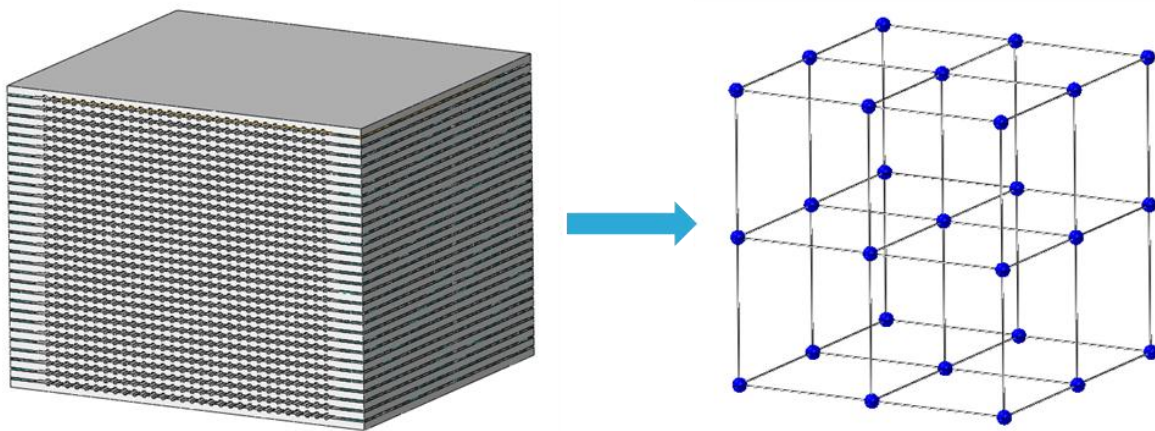


Abbildung 6-44: Knotenmatrix

Für die ausgewählten Knoten werden nun über die gesamte Zykluszeit die Bauteiltemperaturen aus den Ergebnissen in eine Report-Datei ausgegeben.

Die nachfolgenden Schritte wurden mittels programmierten Skripts in Python automatisiert:

1. Aus den 27 gewählten Knoten wird mit dem ersten Skript der Knoten mit der größten Temperaturdifferenz ΔT zwischen zwei Zeitschritten gesucht. Dieser Knoten hat ein bestimmtes Temperaturprofil über die Zykluszeit:

6. Simulation des Temperaturfeldes

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

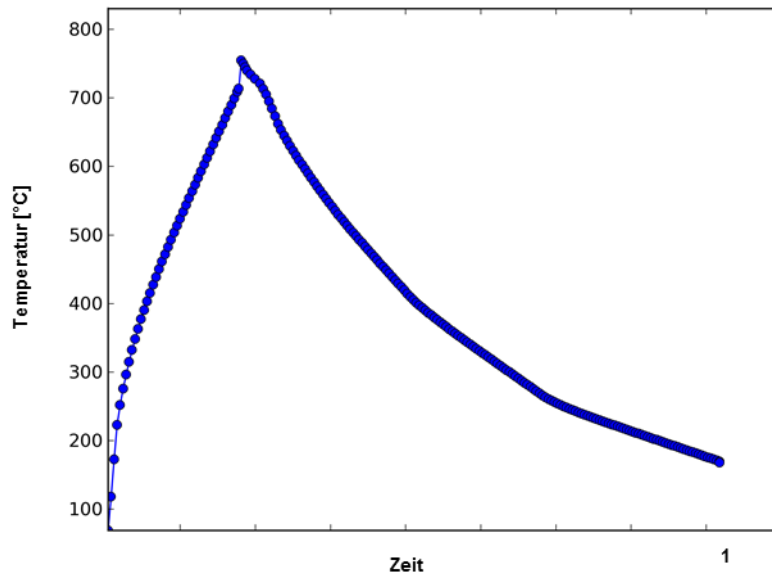


Abbildung 6-45: Knoten mit größter Temperaturdifferenz

Jeder Blaue Punkt steht für einen Zeitschritt, der in die Ergebnisdatei geschrieben wurde. Aufgrund der kleinen Zeitschrittweite gibt es für die Simulation des Temperaturfeldes mehrere tausend Zeitschritte, aber nicht für jeden einzelnen wird ein Ergebnis ausgegeben, denn das würde die Dateigröße der Ergebnisdatei erheblich in die Höhe treiben. Der große Unterschied an der Spitze entsteht durch den Stabilisierungsschritt, der alle Bauteile auf dieselbe Temperatur bringt. Man kann in der Abkühlkurve leichte Ecken erkennen, das ist ein Anzeichen, dass der Knoten nahe der Frontfläche des Stacks ist. Dadurch wird das Umschalten von einer Eingangstemperatur auf die nächste sichtbar. Üblicherweise erfahren die Knoten nahe der Frontfläche die größte Temperaturdifferenz.

2. An dieser Stelle werden aus all den Zeitschritten jene ausgewählt, die in etwa eine Temperaturdifferenz von 50 °C aufweisen. Diese sind in folgender Darstellung rot markiert:

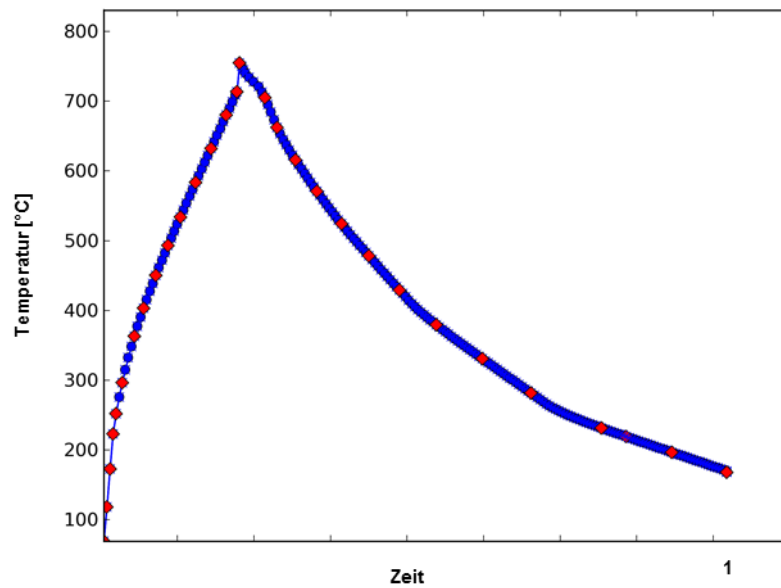


Abbildung 6-46: Selektion der Zeitschritte

- Das letzte Skript erstellt eine Eingabedatei für die Spannungssimulation. Für jeden zuvor ausgewählten Zeitschritt der Temperaturfeld-Simulation wird ein Lastfall für die Spannungssimulation erstellt. Die Dauer eines Lastfalls entspricht der Differenz vom entsprechenden gewählten Zeitschritt zum nächsten gewählten Zeitschritt. In jedem Lastfall wird auf die Ergebnisdatei der Temperaturfeld-Simulation referenziert.

Es muss nun lediglich noch eine Eingabedatei aus Abaqus mit all den generellen Anfangsbedingungen erstellt werden. Diese wird mit der Eingabedatei der Lastfälle verbunden und die Spannungssimulation kann gestartet werden. Auf allgemeine Anfangs- und Randbedingungen wird im folgenden Kapitel näher eingegangen.

7 Simulation der Spannungen

Dieses Kapitel soll einen Überblick über die verwendeten Bauteile, Randbedingungen und Einspannbedingung bei der Spannungssimulation geben. Es werden auch kurz die verwendeten Elementtypen dargestellt.

7.1 Bauteilgeometrie und Vernetzung

Grundsätzlich wird bei der Simulation der Spannungen dasselbe Berechnungsnetz wie bei Simulation des Temperaturfeldes verwendet. Die beiden Netze müssen auch übereinstimmend sein, um an jedem Knoten in der Spannungssimulation die Temperatur richtig aufzubringen. Lediglich der Elementtyp wird verändert, da die

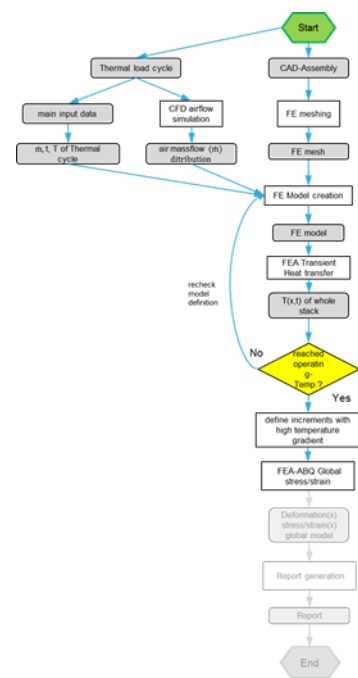


Abbildung 7-1: Simulation der Spannungen

7. Simulation der Spannungen

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

Freiheitsgrade an den Elementknoten in dieser Simulation andere sind. Außerdem wird für die Berechnung der Bauteil „Luft“ aus der Baugruppe entfernt. Die Luft besitzt keine Steifigkeit und wurde nur zum konvektiven Wärmetransport benötigt. Abbildung 7-2 zeigt den Stack wie er für die Spannungssimulation verwendet wurde mit dem Detail der Vernetzung.

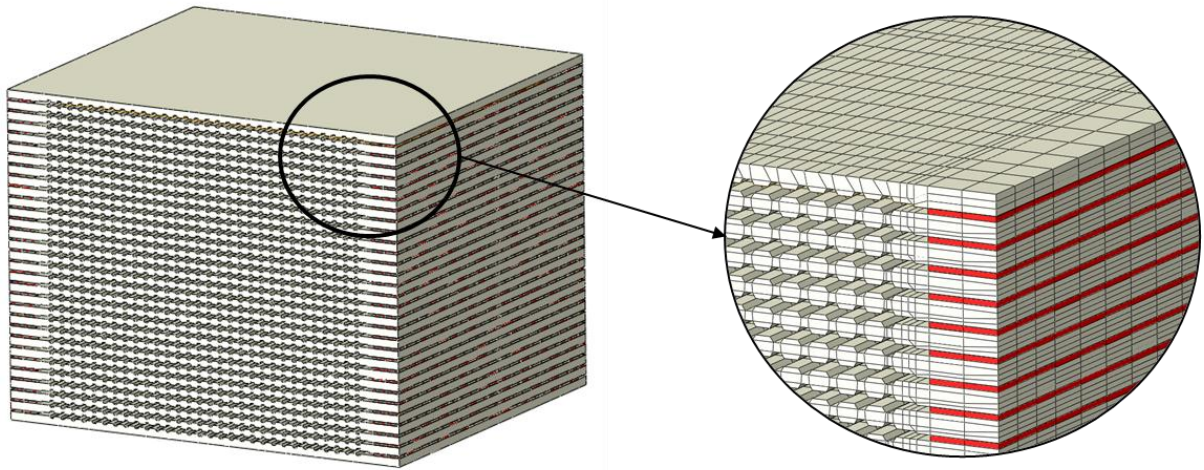


Abbildung 7-2: Modell des Stacks mit 30 Zellen für die Spannungssimulation

In Abbildung 7-3 soll noch einmal die innerhalb eines Stacks sich 30-mal wiederholende Einheit gezeigt werden. Es ist gut sichtbar, dass dies dasselbe Berechnungsnetz wie bei der Temperaturfeldsimulation ist, jedoch ohne Luft.

Als Elementtyp für alle Bauteile des ersten Berechnungsdurchgangs wurden Solid Elemente, hexagonal, 8-knotig, linear mit reduzierter Integration verwendet. Die Kurzbezeichnung in Abaqus lautet: C3D8R. Diese Elemente haben eine reduzierte Integration und eine sogenannte „hourglass-control“. Dies bedeutet, dass es durch die reduzierte Integration auf einen Integrationspunkt zu Verformungen des Netzes kommen kann, bei der die Steifigkeit null ist. Dies ist physikalisch nicht korrekt, somit wird dem Elementtyp durch diese Kontrollfunktion eine problemabhängige Steifigkeit aufgeprägt.

Bei einem weiteren Berechnungsdurchlauf wurden für das Netz der Zellen die in Kapitel 3.2 beschriebenen Kontinuum-Schalen-Elemente verwendet, um Ergebnisse über die Bauteildicke betrachten zu können. Die Kurzbezeichnung in Abaqus lautet: SC8R. Diese Elemente sind 8-knotig, hexagonal, haben ebenfalls reduzierte Integration und „hourglass-control“. Es kann zwischen Gauß-Quadratur und Simpson-Regel gewählt werden. Um am Elementrand einen Integrationspunkt definieren zu können, wurde die Simpson-Regel gewählt. Die Orientierung und die Stapelrichtung dieser Elemente müssen exakt definiert sein, damit die Ergebnisse korrekt geplottet werden können.

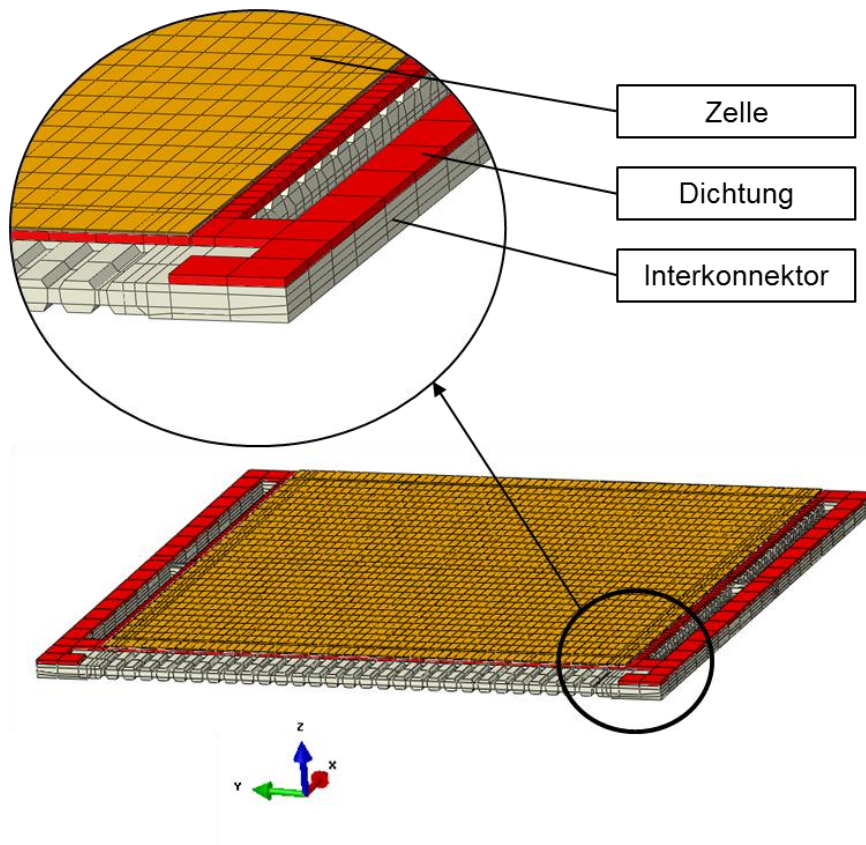


Abbildung 7-3: Eine Brennstoffzelleneinheit in der Spannungssimulation

Es wurden für die Spannungssimulation zwei neue Bauteile eingeführt, um die Einspannsituation zu modellieren. Diese Bauteile sind zwei starre Platten und wurden auch als solche in Abaqus modelliert. Starre Bauteile benötigen kein Berechnungsnetz, so dass keine zusätzlichen Elemente und Knoten auftreten, die die Simulationszeit negativ beeinflussen.

7.2 Randbedingungen und Einspannbedingung

An dieser Stelle wird näher auf die Rahmenbedingungen und Vereinfachungen, die innerhalb der Software Abaqus bezüglich des globalen Spannungsmodelles gemacht wurden, eingegangen.

- Es wurden zwei starre Platten für die Fixierung des Brennstoffzellenstacks eingefügt. Diese beiden neuen Bauteile mit symbolischer Einspannbedingung ist in Abbildung 7-4 dargestellt. In der Realität ist der Stack mit einer Kraft von 450-600 Newton zwischen zwei Platten eingespannt. Diese Einspannkraft wurde auch in der Simulation an der oberen starren Platte aufgebracht. Die obere Platte kann in Z-Richtung bewegt werden. In X- und Y-Richtung ist die Bewegung gesperrt. Die untere Platte wird in alle drei Koordinatenrichtungen festgehalten.

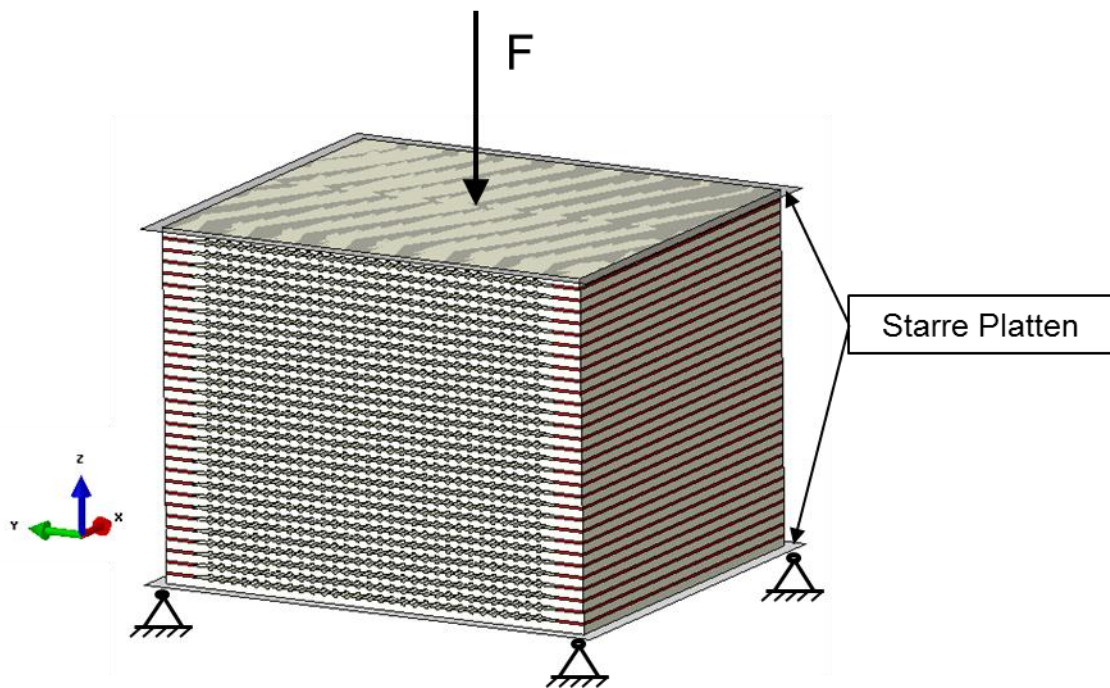


Abbildung 7-4: Fixierung des Stacks

- Zwischen Stack und den beiden Platten wird eine Kontaktbedingung mit einem relativ hohen Reibungskoeffizienten von $\mu = 0.5$ angenommen, da durch Oxidschichten an den Werkstoffoberflächen der Reibkoeffizient erheblich steigen kann. [Czichos, Habig 2010, S. 586]
- Der Bauteil Luft aus der Temperaturfeldsimulation wurde entfernt, da Luft keine Steifigkeit besitzt und somit für die entstehenden Temperaturspannungen nicht relevant ist.
- Das dreidimensionale Temperaturfeld wird als Belastung auf das Berechnungsnetz der Spannungssimulation aufgebracht.
- Es werden in der Simulation keine Porositäten berücksichtigt. Alle Bauteile werden als undurchlässig betrachtet. Porositäten würden die Festigkeit der Bauteile durch die Materialdefinition herabsetzen.
- Hinsichtlich der Materialdaten wurden ebenfalls einige Annahmen getroffen. Es werden für diese Simulation temperaturabhängige Materialdaten für den gesamten Einsatzbereich benötigt, da aber in der Literatur und aus Messungen relativ wenig bekannt ist, wurden dafür Annahmen herangezogen.

7.3 Bereichsergebnisse

Um anschauliche Ergebnisse der Temperatur und der von Mises-Spannungen für die größte Differenz über den gesamten thermischen Zyklus zu erhalten, werden sogenannte Bereichsergebnisse (engl.: range results) mit einem weiteren Python-Skript erzeugt. Es wird damit eine neue Ergebnisdatei erstellt, wodurch farbskalierte Bilder der gewählten Bauteile dargestellt werden können. Die Bilder zeigen an jeder Stelle die maximale Differenz der jeweiligen Größe über alle Belastungsschritte.

7.3.1 Temperaturbereich

Für das Temperaturbereichsergebnis wird T_{max} und T_{min} für jeden Knoten des ausgewählten Bauteils über alle Lastfälle berechnet. Aus diesen beiden Werten wird in weiterer Folge ΔT_{max} ausgerechnet und als Ergebnis geplottet.

7.3.2 Spannungsbereich

Die Berechnung des Spannungsbereichs-Ergebnisses beginnt mit der Auswertung aller Komponenten des Spannungstensors: [Celigoj C. 2004, S. 5]

$$S = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{xy} \\ \tau_{zx} & \tau_{yx} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (7-1)$$

Wegen Dualität der Schubspannungen

$$\begin{aligned} \tau_{zy} &= \tau_{yz} \\ \tau_{xz} &= \tau_{zx} \\ \tau_{yx} &= \tau_{xy} \end{aligned} \quad (7-2)$$

beschränkt sich die Auswertung auf sechs Werte. [Celigoj C. 2004, S. 7]

Für die einzelnen Spannungsvektoren aller Knoten wird die Differenz von einem Belastungsfall zu allen anderen gebildet ($\Delta\sigma_{xx}, \Delta\sigma_{yy}, \dots$). Daraus wird jeweils die von Mises Spannung berechnet: [Klein B. 2012, S. 255]

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2} [(\Delta\sigma_{xx} - \Delta\sigma_{yy})^2 + (\Delta\sigma_{yy} - \Delta\sigma_{zz})^2 + (\Delta\sigma_{zz} - \Delta\sigma_{xx})^2 + 6(\Delta\tau_{xy}^2 + \Delta\tau_{yz}^2 + \Delta\tau_{zx}^2)]} \quad (7-3)$$

Die maximale von Mises Spannung $\sigma_{v,max}$ über alle Belastungsschritte jedes Knotens wird zum Abschluss als Ergebnis geplottet. Da die Anstrengungshypothese nach von Mises eher zur Bestimmung des Fließeintritts bei zähplastischen Werkstoffen gedacht ist, wird diese Betrachtungsweise im Folgenden nur für den ferritischen Interkonnektor verwendet.

8 Ergebnisse und Diskussion

In diesem Kapitel werden nun die Ergebnisse der globalen Spannungssimulation aus Abaqus dargestellt. Es werden dabei sämtliche Bauteile betrachtet, wobei das Hauptaugenmerk auf der Begutachtung der Zelle mit ihren drei Layern liegt, da dies in der Realität der meist geschädigte Bauteil ist.

8.1 Globale Betrachtung

Für die globale Betrachtung soll vorerst ein Knoten an der Frontfläche des Stacks, in diesem Fall am Interkonnektor, gewählt und der Spannungsverlauf über den gesamten thermischen Zyklus anhand der ausgewählten Zeitschritte in Abbildung 8-2 dargestellt werden. Es sind dabei drei Spannungsspitzen gut zu erkennen.

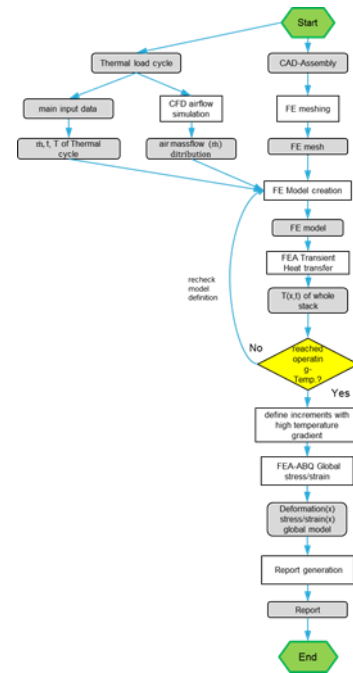


Abbildung 8-1: Ergebnisse und Diskussion

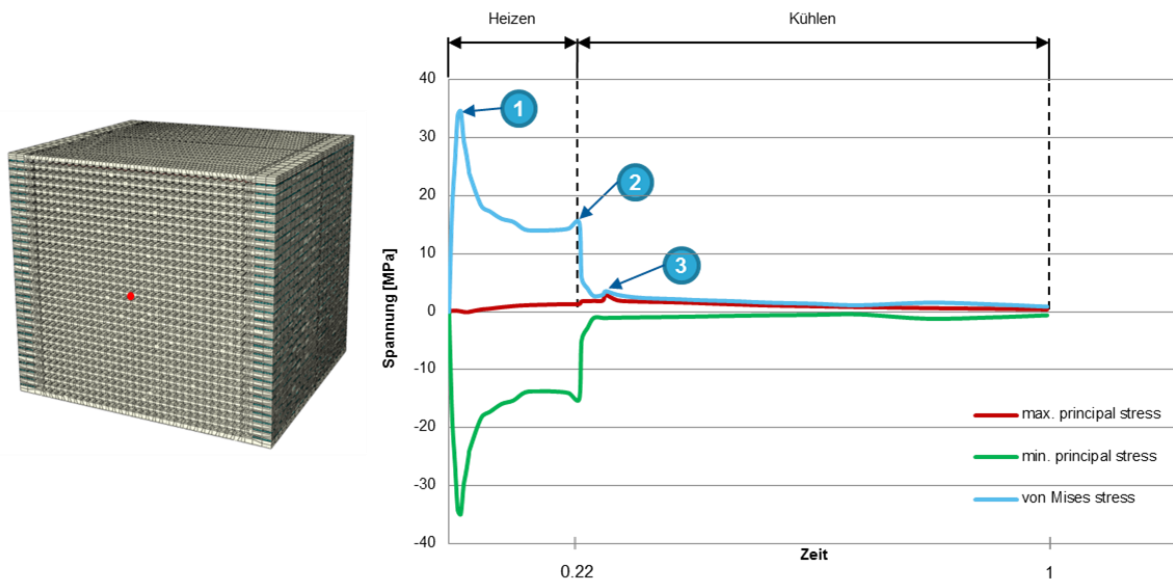


Abbildung 8-2: Spannungsverlauf für gewählten Knoten am Interkonnektor

Um ein Gefühl für das globale Verhalten des gesamten Stacks zu vermitteln, werden im Folgenden Bilder des Stacks zum Zeitpunkt dieser drei hervorgehobenen Spannungsspitzen gezeigt. Abbildung 8-3 zeigt die von Mises Vergleichsspannung bei der größten Spannungsspitze während des Aufheizens. Die Darstellung der Verformung ist hierbei um das 100-fache vergrößert. Deshalb ist gut ersichtlich wie sich der gesamte Stack an der Vorderseite durch die Temperaturdehnung aufweitet.

8. Ergebnisse und Diskussion

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

Dies führt außerdem hauptsächlich zu den aus dem Diagramm ersichtlichen Druckspannungen bei Punkt 1 (minimale Hauptnormalspannung).

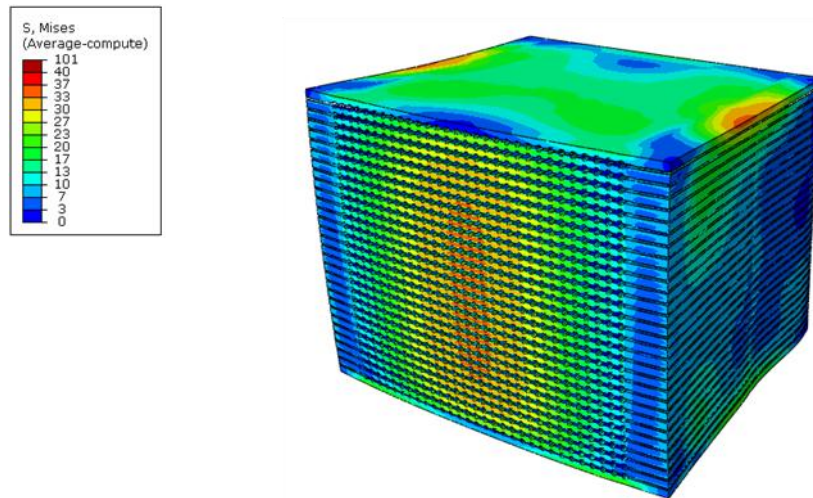


Abbildung 8-3: Vergleichsspannung des Stacks bei Punkt 1

Die Vergleichsspannung am Ende der Aufheizphase bei Punkt 2 zeigt Abbildung 8-4. Die Verformung des Stacks hat sich bereits beinahe über das gesamte Bauteil ausgeglichen. Das heißt, dass die Temperaturgradienten im Stack bereits wieder abgeflacht sind und die vorhandenen Strukturspannungen durch die Unterschiede in den thermischen Ausdehnungskoeffizienten entstehen.

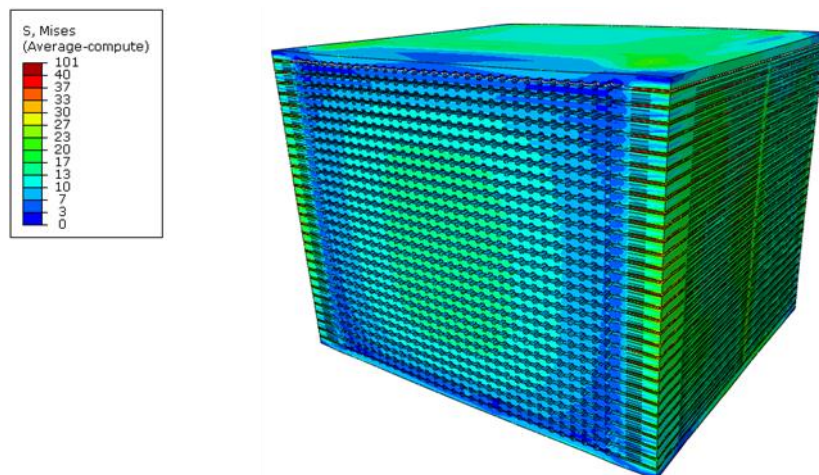


Abbildung 8-4: Vergleichsspannung des Stacks bei Punkt 2

Punkt 3 zeigt die Spannungsspitze während des Abkühlens, die bedeutend niedriger liegt als jene beim Aufheizen. Die Vergleichsspannungen dieses Punktes werden in Abbildung 8-5 gezeigt. Bei genauer Betrachtung sieht man, dass sich der Stack im vorderen Bereich durch das Anströmen mit kühlerer Luft zusammenzieht. Im Diagramm in Abbildung 8-2 sieht man deshalb auch, dass diese

8. Ergebnisse und Diskussion

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

Spannungsspitze von der maximalen Hauptnormalspannung bestimmt wird, also der betrachtete Netzknoten unter Zug steht.

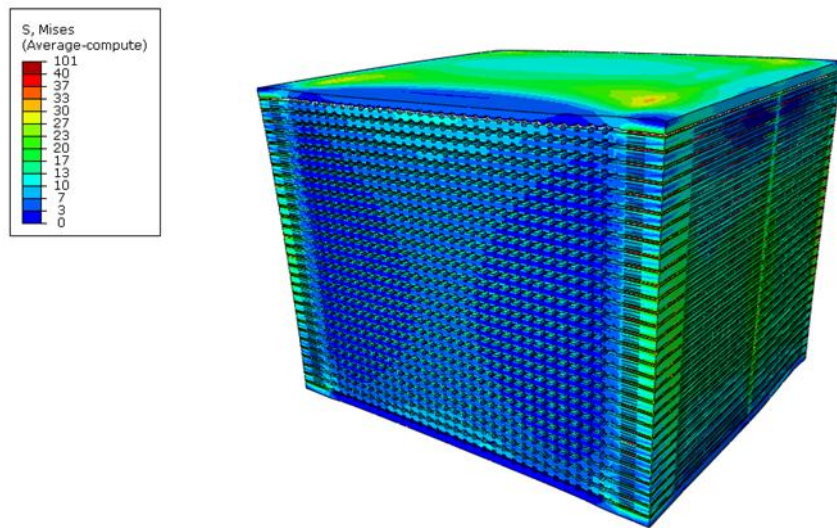


Abbildung 8-5: Vergleichsspannung des Stacks bei Punkt 3

8.1.1 Knotenlinie am mittleren Interkonnektor

Für die weitere globale Betrachtung wird von der in Kapitel 6.6 angesprochenen Knotenmatrix eine Knotenlinie von drei Knoten mitten durch den Stack verglichen. Diese Knoten wurden wiederum am Interkonnektor ausgewählt. Abbildung 8-6 zeigt die von Mises Vergleichsspannung an den drei Knoten. Man sieht, dass Knoten 1759 im vorderen Bereich des Stacks gleich zu Beginn eine Spannungsspitze aufweist, da er direkt mit der heißen Luft beaufschlagt wird.

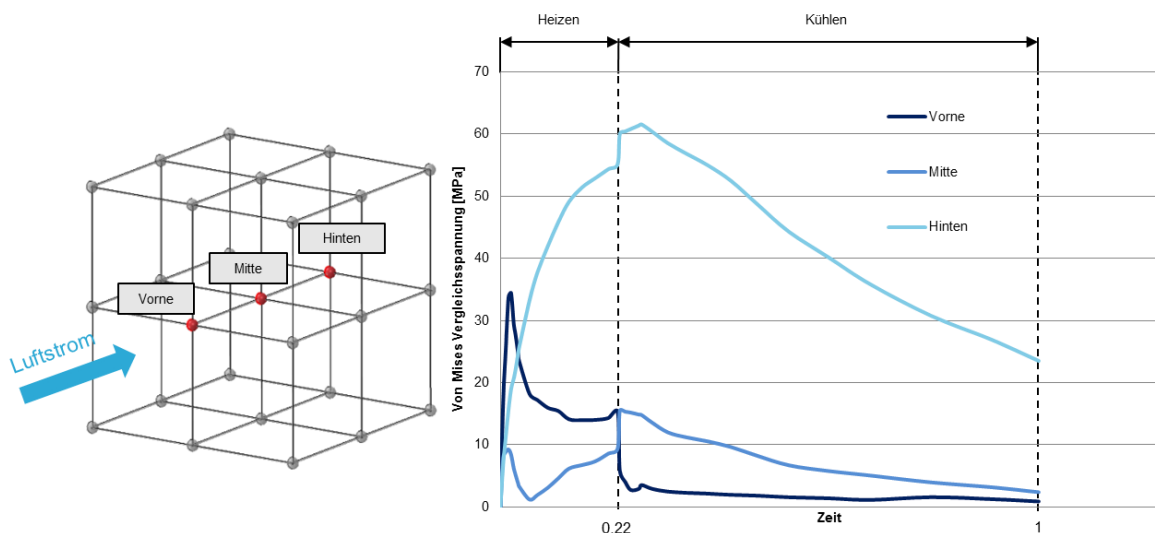


Abbildung 8-6: Vergleichsspannung an 3 Interkonnektor-Knoten

8. Ergebnisse und Diskussion

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

Knoten 16309 in der Mitte des Stacks erfährt naturgemäß die niedrigsten Strukturspannungen. Es fällt auf, dass Knoten 1250 im hinteren Bereich die höchste Vergleichsspannung aufweist. Betrachtet man Abbildung 8-7 kann man erkennen, dass dies hauptsächlich der Zug der maximalen Hauptnormalspannung ist. Dieser baut sich kontinuierlich während des Heizvorgangs auf. Dies ist einerseits auf die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten zurückzuführen. Andererseits befindet sich der hintere Teil des Interkonnektors im direkten Verbund mit Zelle und Dichtung, dies ruft wiederum Strukturspannungen hervor. Im vorderen Teil des Interkonnektors sind die Stege der Luft-Einlasskanäle freistehend. Der Knoten 16309 erfährt ganz zu Beginn des Aufheizens eine kleine Spannungsspitze, der Grund dafür liegt in der anfänglichen Aufweitung des gesamten Stacks.

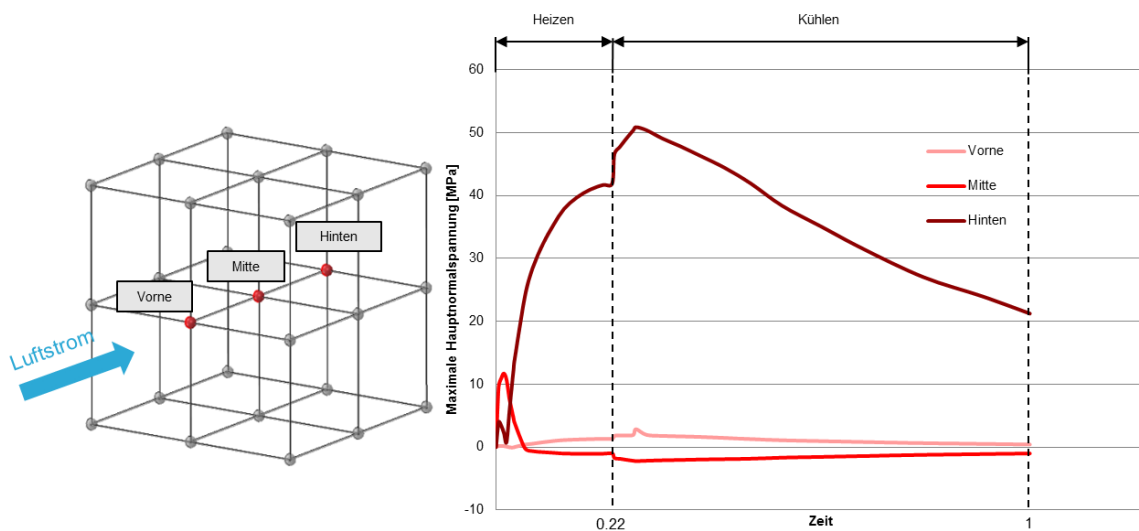


Abbildung 8-7: Maximale Hauptnormalspannung an 3 Interkonnektor-Knoten

Der Sprung in den Verläufen am Übergang von Aufheizphase zu Abkühlphase ist auf den Temperatur-Stabilisierungszeitpunkt zurückzuführen. In Abbildung 8-8 ist ersichtlich, dass wiederum der Knoten im vorderen Bereich gleich zu Beginn des Aufheizens eine Druckspitze aufweist. Dies ist auf starke Ausdehnung im vorderen Bereich des Stacks zu Beginn der Aufheizphase zurückzuführen. Hier ist ein eindeutiger Trend sichtbar. Der Knoten im vorderen Bereich wird am meisten auf Druck beansprucht, gefolgt vom Knoten im hinteren Bereich und schlussendlich dem mittleren Bereich.

8. Ergebnisse und Diskussion

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

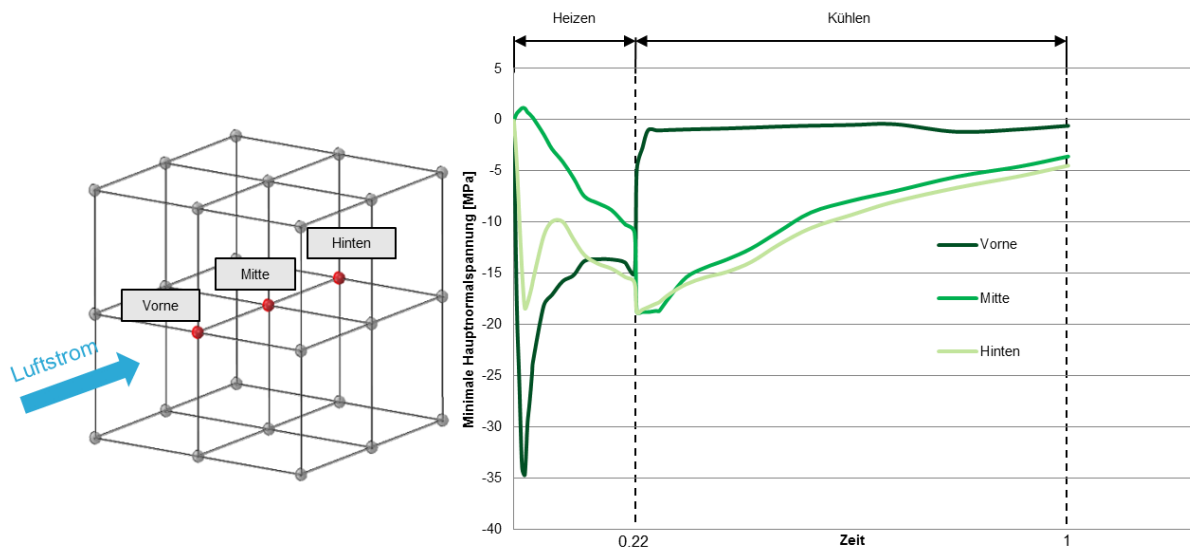


Abbildung 8-8: Minimale Hauptnormalspannung an 3 Interkonnector-Knoten

Abbildung 8-9 stellt die Temperaturverläufe der drei Knoten dar. Man kann bei genauem Hinsehen erkennen, dass Knoten 1759 den steilsten Anstieg der Temperatur hat und Knoten 1250 den flachsten. Dies liegt wiederum daran, dass Knoten 1759 im vorderen Bereich des Stacks nahezu direkt die heiße Luft abbekommt. Die Wärmeausdehnung wird behindert, daraus entsteht der Druck im vorderen Bereich. Schon in Kapitel 6.4 wurden diese Verläufe mit detaillierten Diagrammen gezeigt.

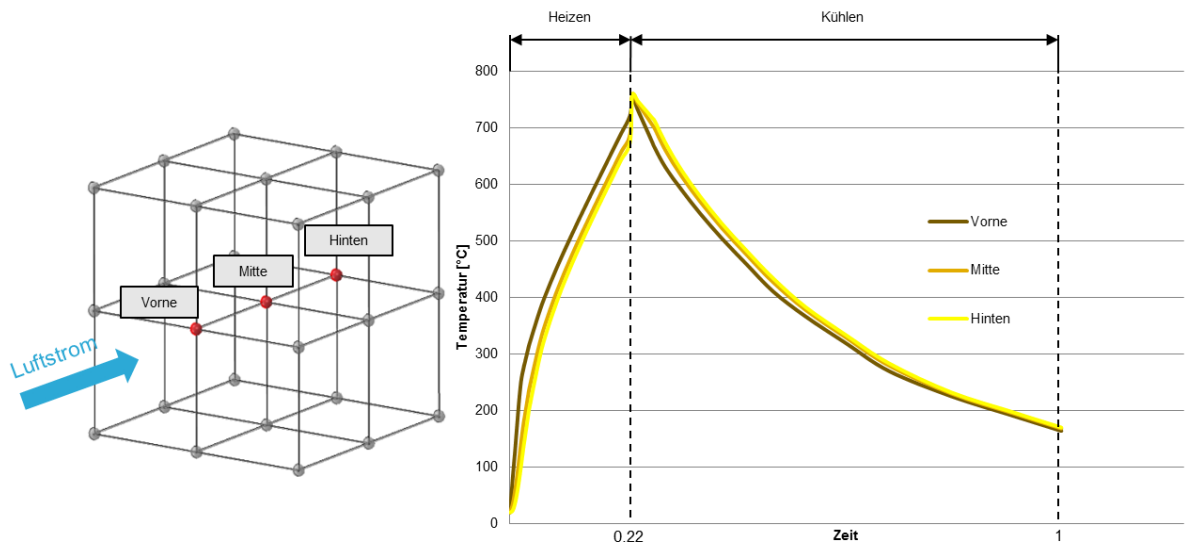


Abbildung 8-9: Temperaturverlauf von 3 Interkonnector-Knoten

Der Betrag der Verschiebung dieser drei Knoten wird in Abbildung 8-10 dargestellt. Der Knoten im hinteren Bereich erfährt die größte Änderung im Betrag der Verschiebung, gefolgt vom Knoten im vorderen Bereich und dem mittleren Knoten.

8. Ergebnisse und Diskussion

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

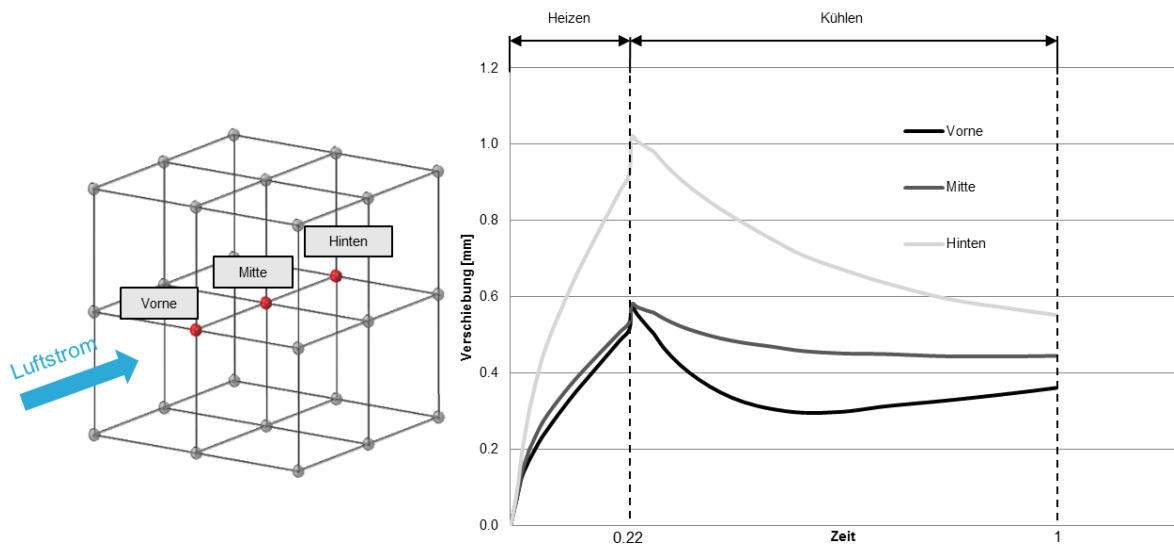


Abbildung 8-10: Verschiebungen von 3 Interkonnektor-Knoten

8.1.2 Knotenlinie an der mittleren Zelle

An dieser Stelle werden ebenfalls drei Knoten an einer Linie mitten durch den Stack gewählt um die Ergebnisse darzustellen, hier jedoch am Bauteil „Zelle“. Abbildung 8-12 zeigt wieder die von Mises Vergleichsspannung an den drei Knoten. Im Vergleich zu Abbildung 8-6 fällt sofort auf, dass sich nun der Verlauf des Knotens im vorderen Bereich des Stacks, an jenen im hinteren Bereich angeglichen hat. Das hat den Grund, dass sich hier der Knoten 1368 im vorderen Bereich der Zelle bereits im Verbund mit dem Interkonnektor und der Dichtung befindet (siehe Abbildung 8-11). Somit entstehen durch die Koppelung Strukturspannungen.

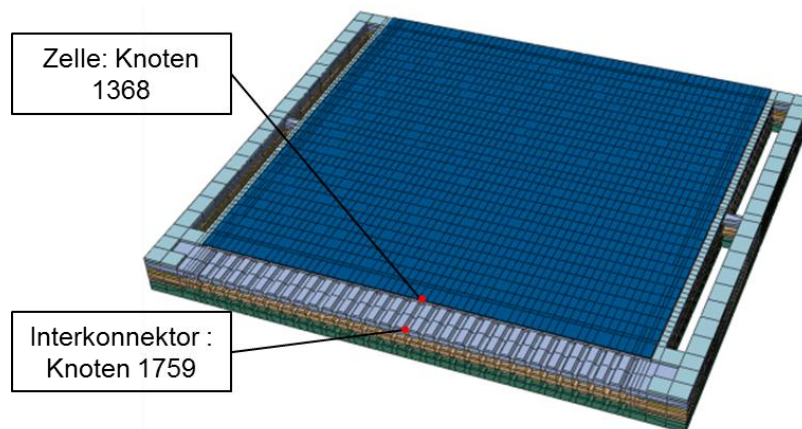


Abbildung 8-11: Vergleich vorderer Knoten an Interkonnektor und Zelle

Die Spannungen in der Bauteilmitte sind auch hier wieder am geringsten.

8. Ergebnisse und Diskussion

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

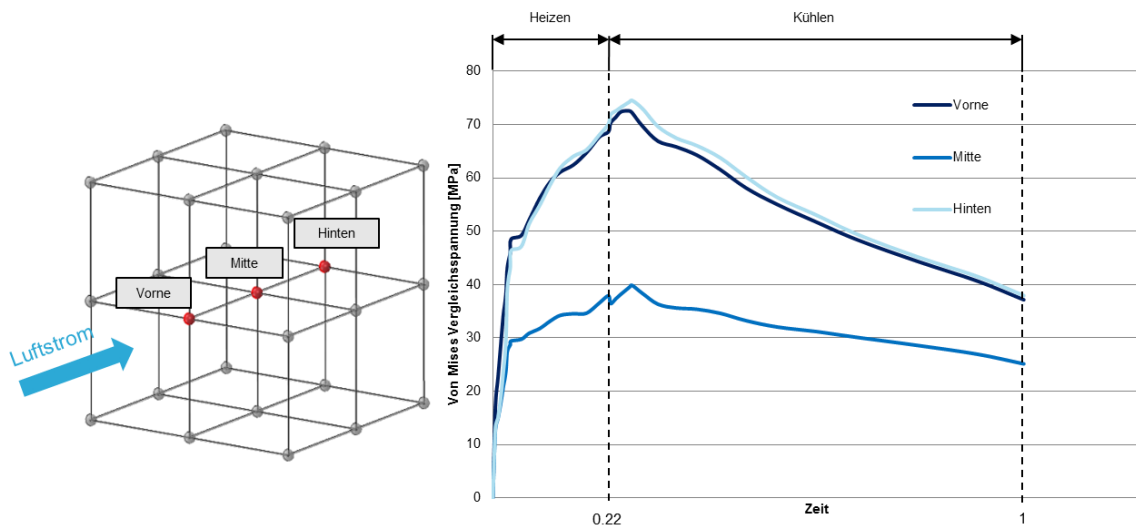


Abbildung 8-12: Vergleichsspannung an 3 Zell-Knoten

In Abbildung 8-13 sind die maximalen Hauptnormalspannungen dargestellt. Ganz zu Beginn des Temperaturzyklus gibt es an den Randknoten aufgrund der Temperaturdehnung keinen Zug. Der kleine Knick im Verlauf des Heizens entsteht einerseits durch die momentane Änderung der Verschiebung in Luftstromrichtung, da sich nun auch der hintere Teil des Stacks aufweitet. Andererseits entsteht er durch den für die Koppelung der beiden Simulationen ausgewählten Knoten aus Kapitel 6.6. Denn der Knoten, der für die Koppelung gewählt wurde, weist an jener Stelle eine Temperaturdifferenz von circa 50 °C auf. Aber der Knoten an der eben betrachteten Knotenlinie auf der Zelle weist für diesen Zeitschritt nur eine sehr kleine Temperaturdifferenz auf. Das kann man auch anhand des Temperaturverlaufs in Abbildung 8-15 gut erkennen.

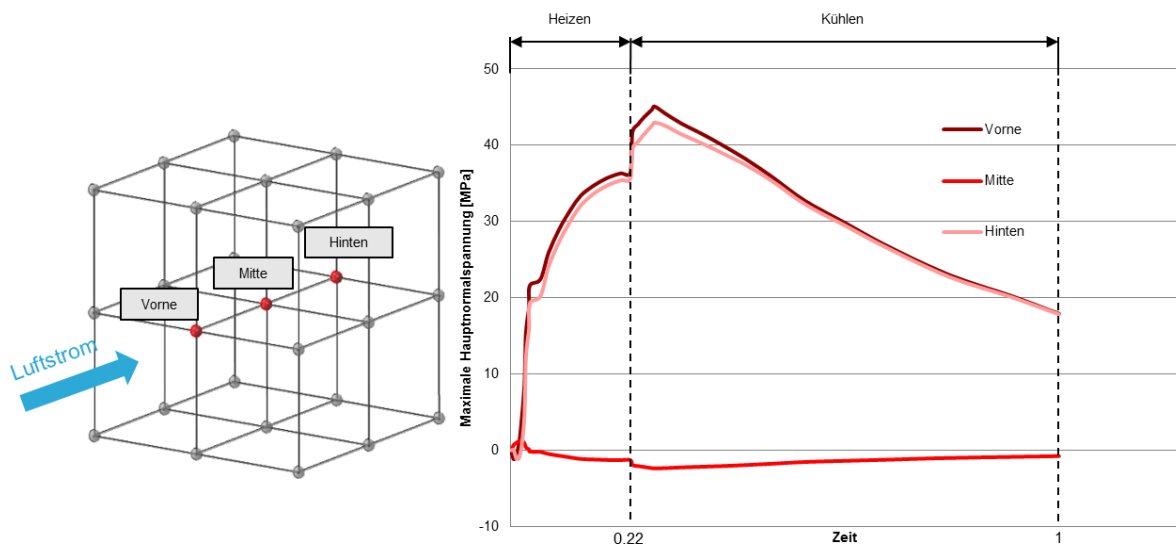


Abbildung 8-13: Maximale Hauptnormalspannung an 3 Zell-Knoten

8. Ergebnisse und Diskussion

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

Abbildung 8-14 zeigt die bereits bekannte Druckspitze zu Beginn der Aufheizphase, die wieder im vorderen Bereich des Stacks am höchsten ist. Der mittlere Knoten erreicht ein Maximum kurz nach Beginn der Abkühlphase. Aber die Druckfestigkeit beispielsweise von Zirkondioxid ist deutlich höher als seine Bruchfestigkeit.

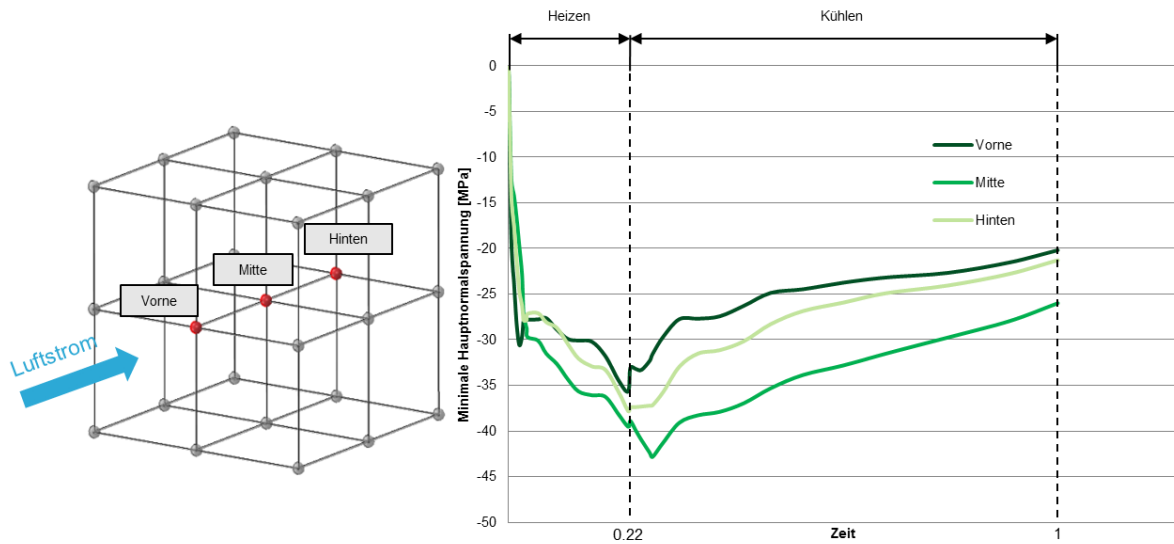


Abbildung 8-14: Minimale Hauptnormalspannung an 3 Zell-Knoten

Abbildung 8-15 stellt den vorhin schon kurz erwähnten Temperaturverlauf dar. Dieser folgt ebenso dem Trend, dass der steilste Temperaturgradient zum vordersten Knoten gehört.

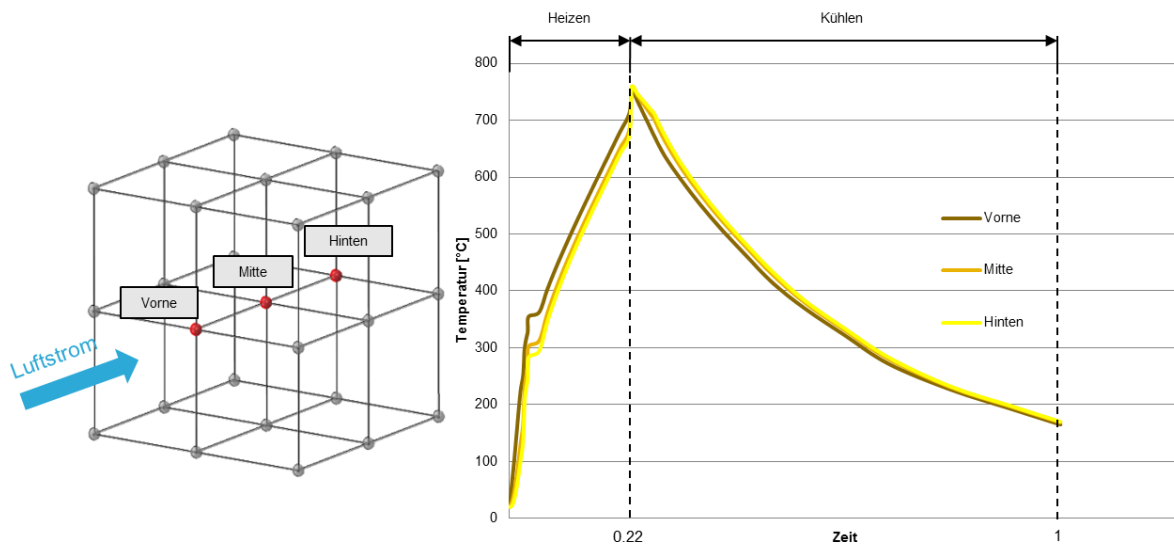


Abbildung 8-15: Temperaturverlauf von 3 Zell-Knoten

8. Ergebnisse und Diskussion

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

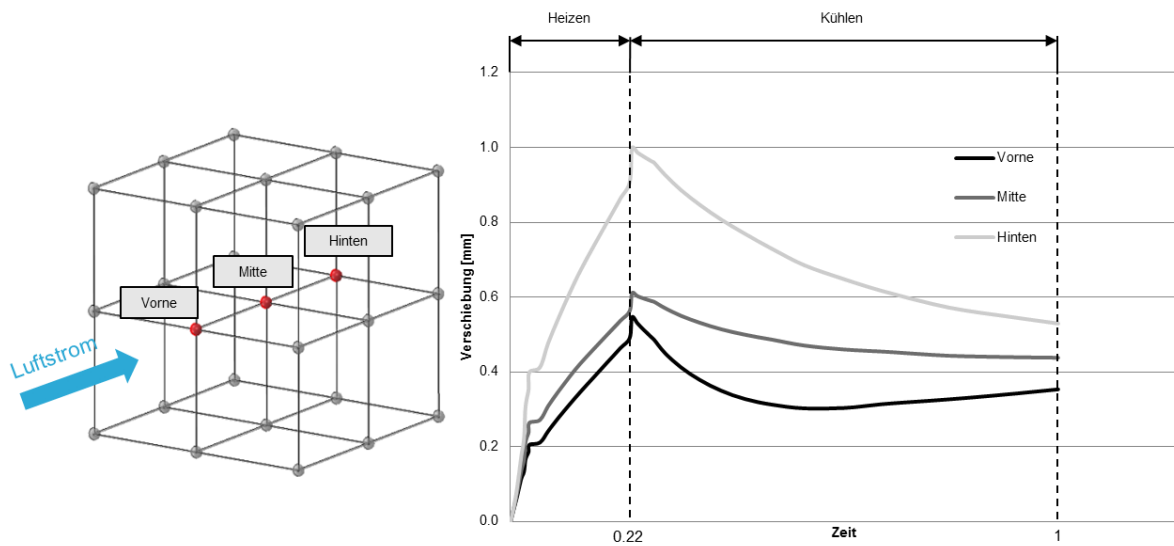


Abbildung 8-16: Verschiebungen von 3 Zell-Knoten

Die Verschiebungen der drei Knoten an der Zelle zeigen dasselbe Verhalten wie die Knoten am Interkonnektor. Den größten Betrag der Verschiebung zeigt der hintere Knoten 1385, gefolgt vom vorderen Knoten 1368 und schließlich Knoten 1370 in der Mitte.

8.2 Interkonnektor

Der Interkonnektor besteht aus einem ferritischen Chromstahl, dessen 0,2%-Streckgrenze bei Raumtemperatur circa bei 250 MPa liegt. Die Interkonnectoren werden an dieser Stelle mit in Kapitel 7.3 besprochenen Bereichsergebnissen betrachtet. Einen Überblick über die Spannungsbereichsergebnisse aller Interkonnectoren gibt Abbildung 8-17. Somit kann jener Bereich identifiziert werden, der die größte Änderung der von Mises Vergleichsspannung über den gesamten Zyklus aufweist. Das linke Bild zeigt die Einlassseite und das rechte Bild die Auslassseite.

8. Ergebnisse und Diskussion

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

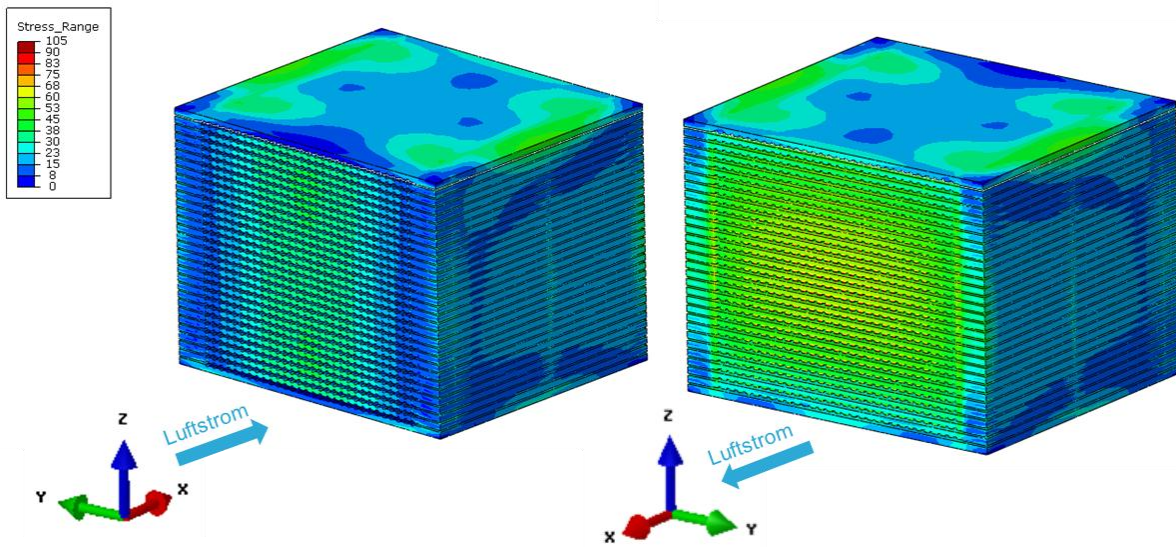


Abbildung 8-17: Spannungsbereichsergebnisse aller Interkonnektoren

In Abbildung 8-18 werden zwei Knoten mit den höchsten Spannungswerten als Detail hervorgehoben. Für diese beiden Knoten werden im Folgenden die Spannungsverläufe gezeigt.

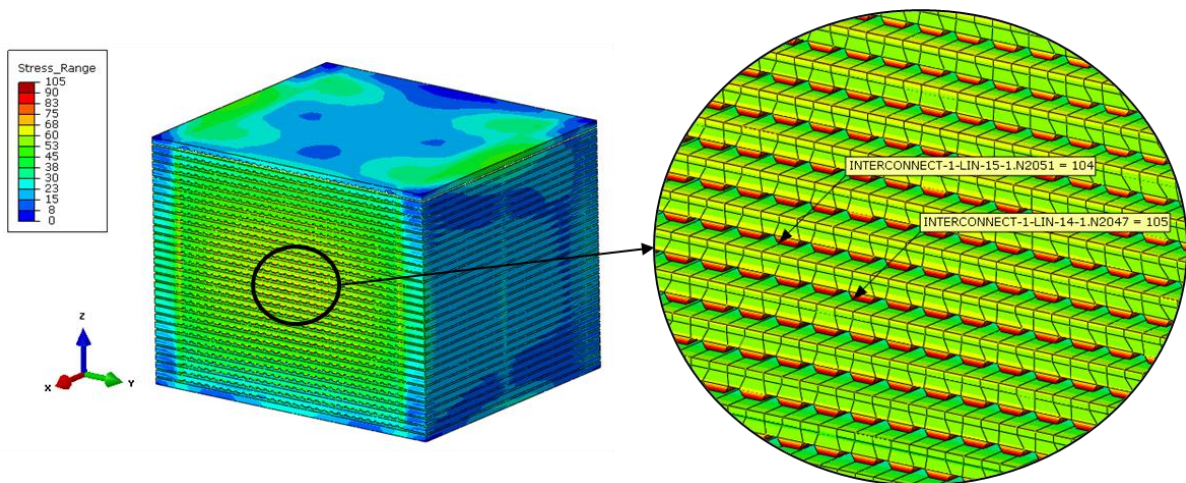


Abbildung 8-18: Spannungsbereichsergebnis zweier Knoten an der Auslassseite

Die Spannungsverläufe in Abbildung 8-19 zeigen, dass der Zug am Beginn des Kühlens auf etwa 70 MPa ansteigt. Dies ginge schon in die Nähe der Streckgrenze des Materials, die bei einer Temperatur von 700 °C etwa bei 75 MPa liegt. [ThyssenKrupp 2010, S.4]

8. Ergebnisse und Diskussion

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

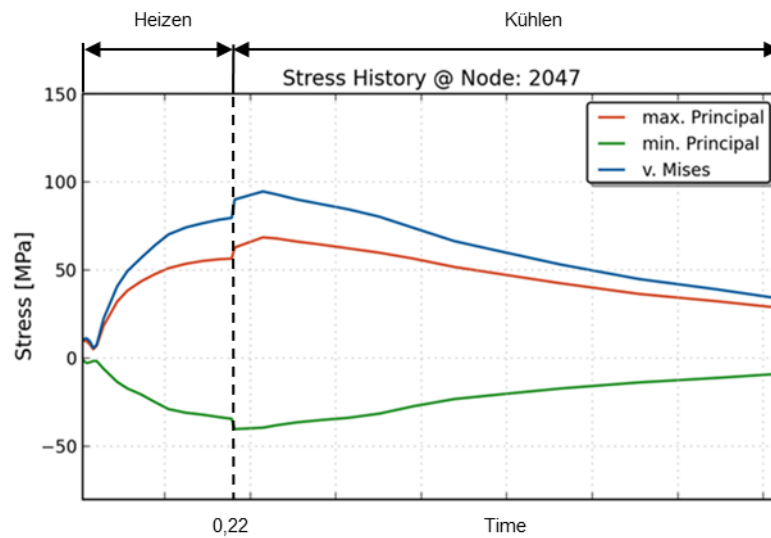


Abbildung 8-19: Spannungsverläufe von Knoten 2047

Die Verläufe des Knotens 2051 zeigen annähernd das selbe Verhalten wie die Verläufe von Knoten 2047. Diese beiden Knoten liegen auch sehr nahe aneinander.

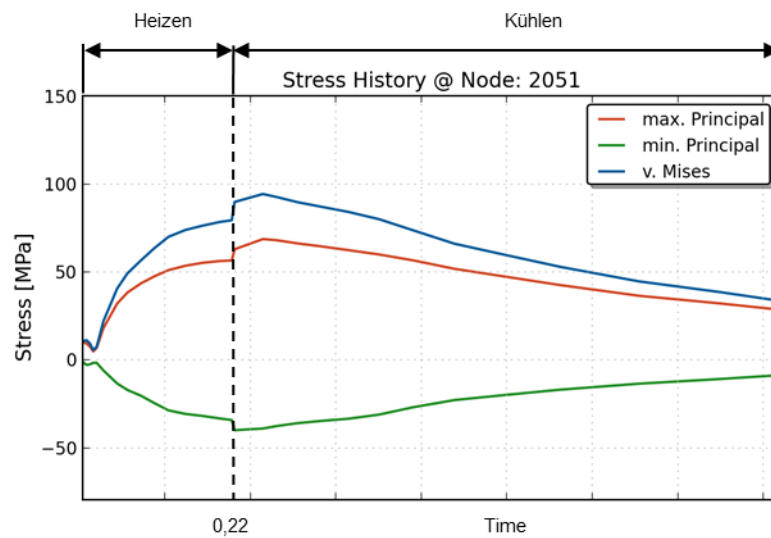


Abbildung 8-20: Spannungsverläufe von Knoten 2051

Der Interkonnektor mit den höchsten Spannungsbereichen wird in Abbildung 8-21 extra dargestellt. Die beiden Knoten mit den höchsten Spannungsbeträgen werden im Detail in Abbildung 8-22 gezeigt.

8. Ergebnisse und Diskussion

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

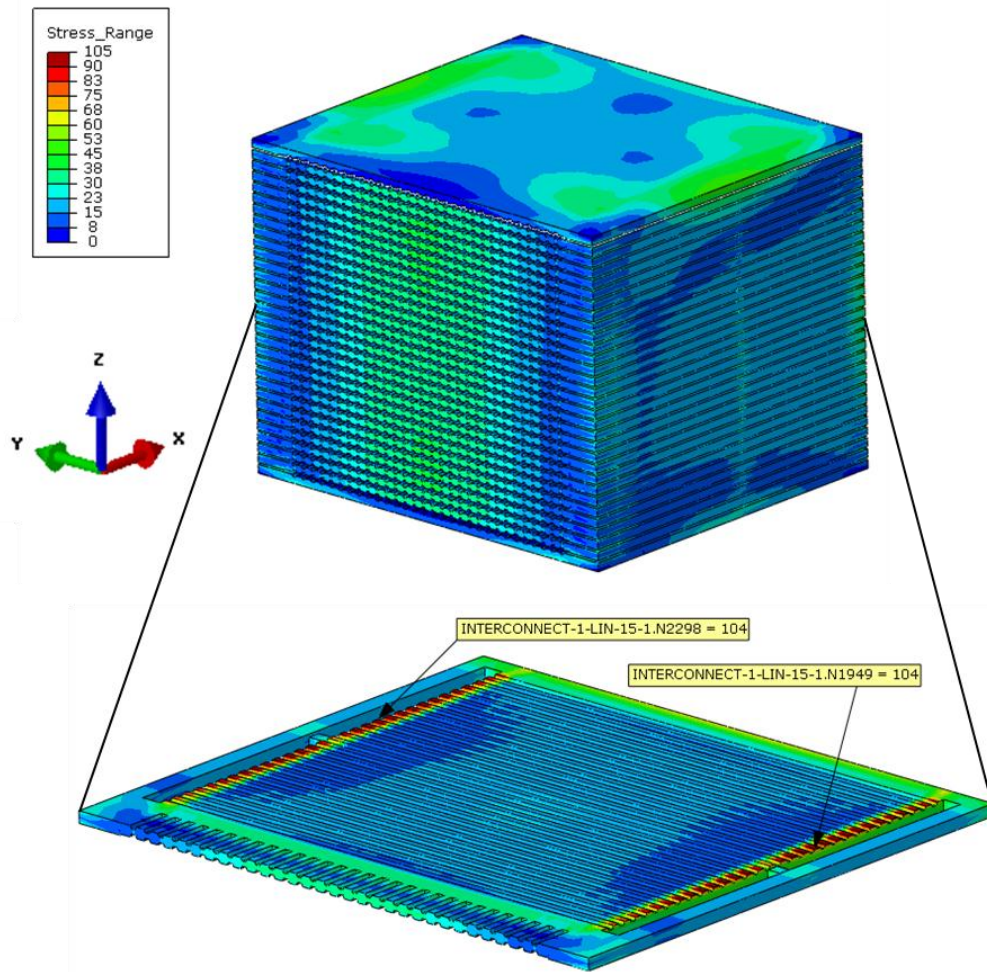


Abbildung 8-21: Interkonnektor mit höchsten Bereichsergebnissen

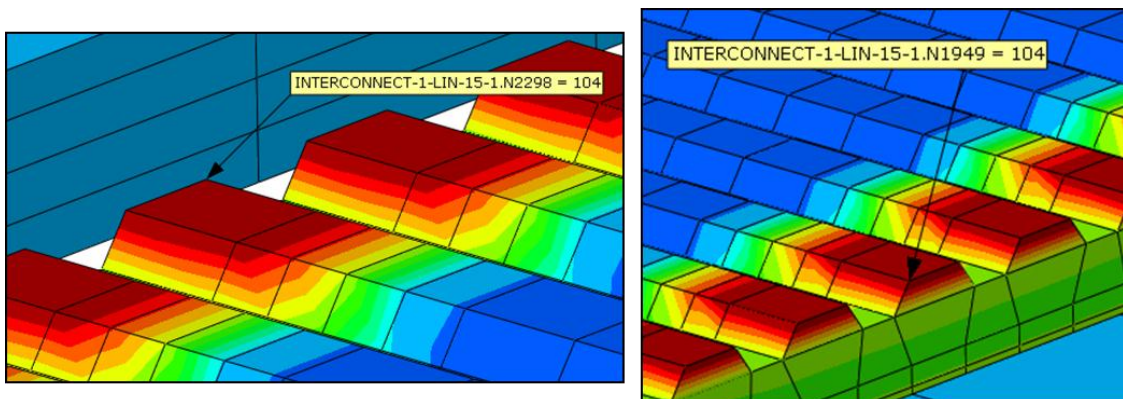


Abbildung 8-22: Detail der Knoten am Interkonnektor

Im Randbereich sind die auftretenden Spannungen hauptsächlich von den vorherrschenden Verformungen und unterschiedlichen Temperaturexpansionskoeffizienten der einzelnen Materialien bestimmt. An den rotgefärbten Stellen ist der Interkonnektor mit der Dichtung direkt

8. Ergebnisse und Diskussion

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

verschmolzen. Auch hier gelangt das Material mit Spannungen über 90 MPa in die Nähe der Streckgrenze.

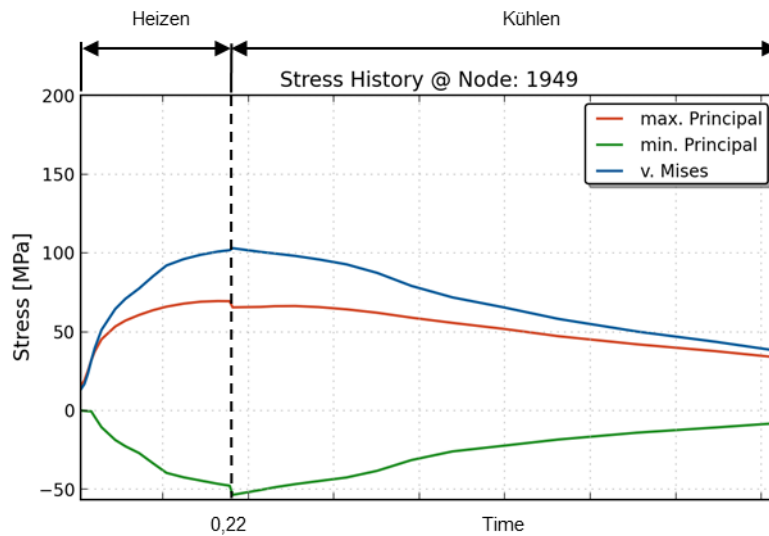


Abbildung 8-23: Spannungsverlauf von Knoten 1949 am rechten Rand

Die beiden Darstellungen sind wegen der Symmetrie der Bauteile und Belastung beinahe ident. Aufgrund der Entfernung zum Einlass der einströmenden heißen Luft ist hier keine anfängliche Spannungsspitze während der Aufheizphase sichtbar.

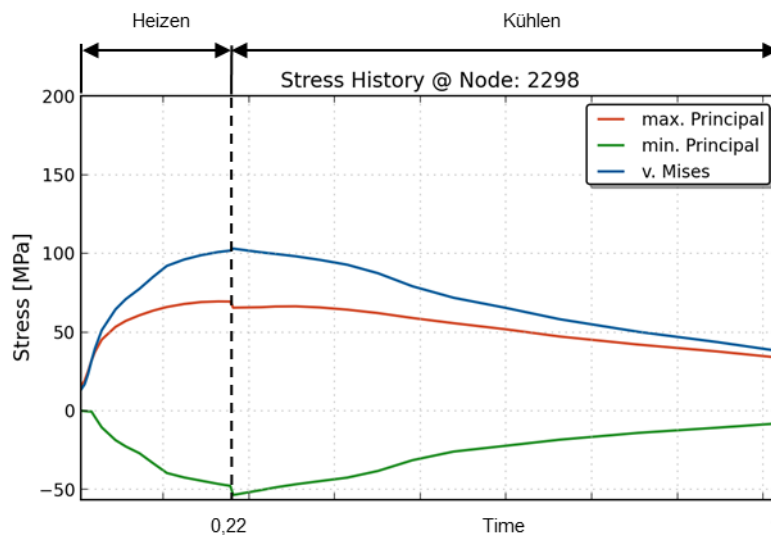


Abbildung 8-24: Spannungsverlauf von Knoten 2298 am linken Rand

8.3 Zelle

Die Ergebnisse der Zellen werden an dieser Stelle etwas genauer betrachtet, da wie anfänglich erwähnt die meisten Schädigungen an der Zelle passieren.

8.3.1 Zeitpunkt der größten maximalen Hauptnormalspannung

In den nächsten drei Abbildungen ist eine Übersicht von jenem Zeitpunkt des gesamten Zyklus dargestellt, bei dem die größten maximalen Hauptnormalspannungen auftreten. Dies ist am Ende der Aufheizphase, wo die temperaturbedingten Ausdehnungen am größten sind. Zuerst wird in Abbildung 8-25 die von Mises Vergleichsspannung über alle Zellen gezeigt, obwohl diese Anstrengungshypothese für die verwendeten keramischen Materialien nicht sehr aussagekräftig ist. Trotzdem ist auch hier wieder ein Trend erkennbar. Die Spannungen steigen nach oben hin an (siehe auch Abbildung 8-26). Dies liegt daran, dass die Abdeckplatte keine länglichen Ausnehmungen für die Brennstoffführung besitzt und somit der Randbereich viel steifer ist, als jener von den Interkonnektoren. Außerdem kann sich der Stack nicht nach unten ausdehnen, weil die Fixierung der Grundplatte dies nicht zulässt. Somit kann sich der Stack in z-Richtung nur nach oben ausdehnen. Bei genauem Hinsehen kann man erkennen, dass im rechten Bild der Übergang von Anode zum Elektrolyten (rot-orange) der Bereich mit den größten Spannungen ist. Hingegen sieht man in der Draufsicht, im linken Bild, die Kathode (blau) mit relativ geringen Spannungen.

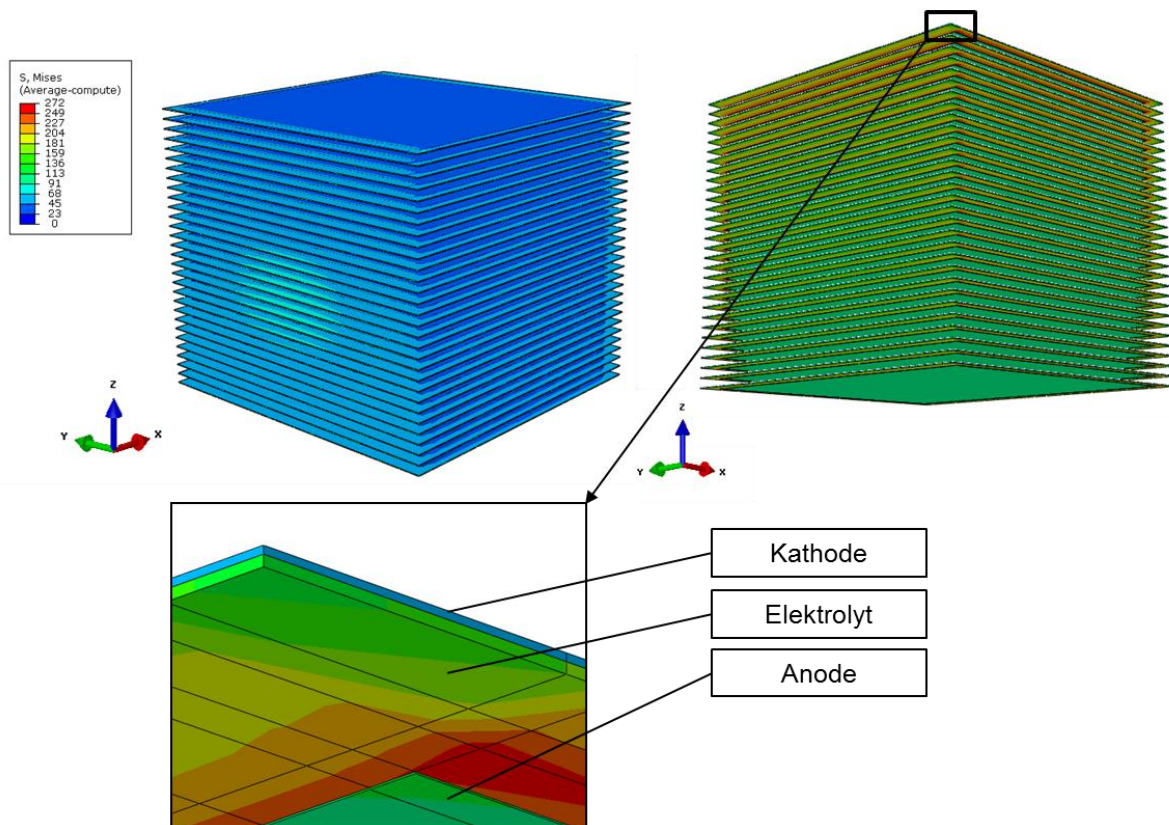


Abbildung 8-25: Von Mises Vergleichsspannung über alle Zellen

8. Ergebnisse und Diskussion

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

Abbildung 8-26 macht die maximalen Hauptnormalspannungen über alle Zellen sichtbar. Auch hier kann man den Trend der vorigen Abbildung beobachten. Außerdem sieht man im linken oberen Bild, dass die Kathode (blau-grau) keinem Zug unterworfen ist. Hingegen zeigt das rechte Bild eine Detailansicht von unten, in der man gut erkennen kann, dass der Elektrolyt (rot-gelb) sehr wohl unter Zug steht. Im unteren linken Bild erkennt man auch, dass die Anode (blau-grau) keinerlei Zug erfährt. Die Spannungsunterschiede in den drei Zellschichten entstehen durch die unterschiedlichen Materialkennwerte bei gleicher Bauteildehnung. Nach dem Hook'schen Gesetz $\sigma = E \cdot \varepsilon$ ändert sich die Spannung (σ) bei gleicher Dehnung (ε) durch unterschiedliche E-Module (E). Das Diagramm soll nochmals den vorhin erwähnten Trend der Spannungen verdeutlichen, wobei man sieht, dass die Spannung an der obersten Zelle wieder leicht zurückgeht. Das kann man auf den Kontakt mit der Deckplatte zurückführen.

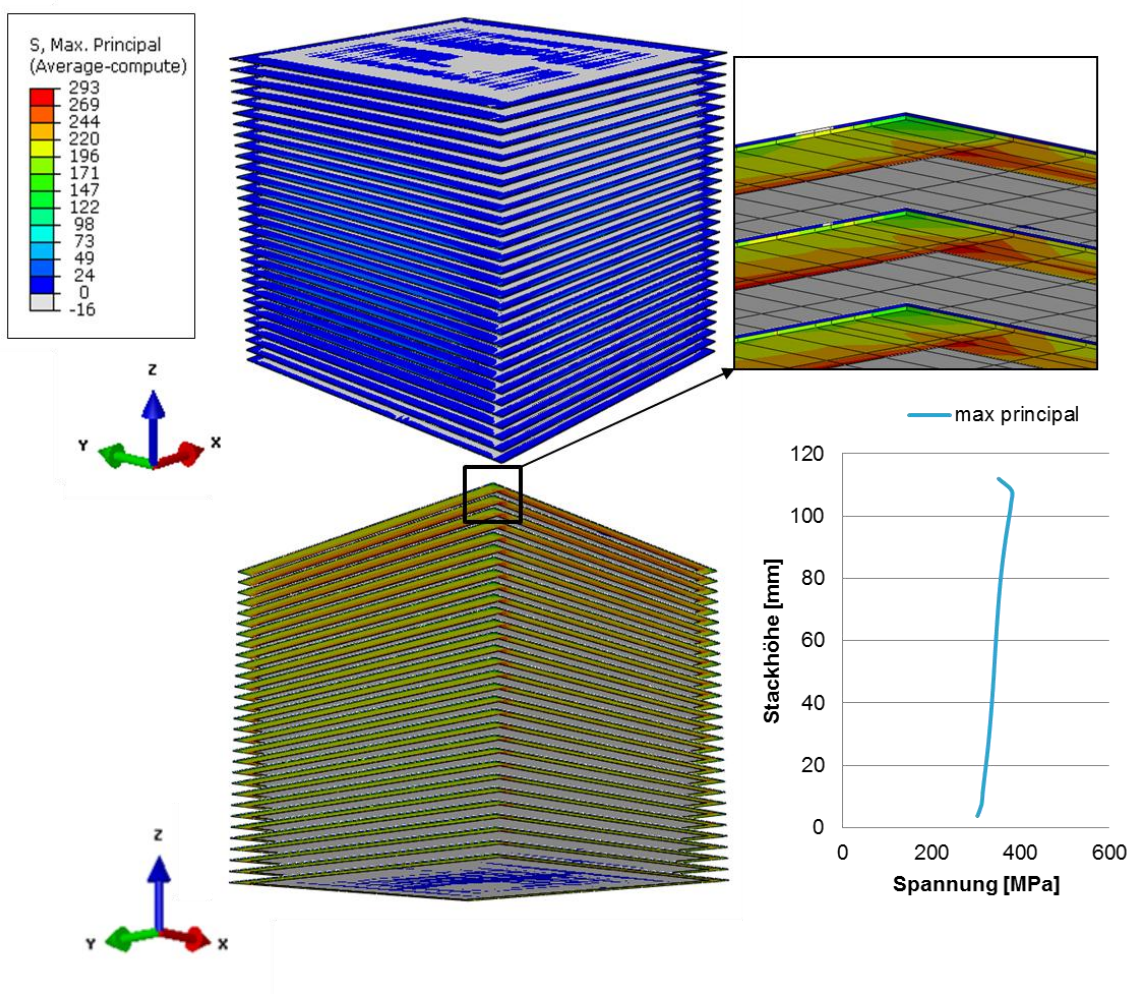


Abbildung 8-26: Maximale Hauptnormalspannung über alle Zellen

Die Bilder in Abbildung 8-27 zeigen die minimale Hauptnormalspannung aller Zellen zum Zeitpunkt der größten auftretenden maximalen Hauptnormalspannung. Man sieht im linken Bild, dass die Kathode (blau-grün) in diesem Zeitpunkt unter Druck steht. Im rechten Bild erkennt man, dass die

8. Ergebnisse und Diskussion

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

Anode (grün) dem höchsten Druck ausgesetzt ist. Der Elektrolyt (grau) hingegen ist keinerlei Druck ausgesetzt.

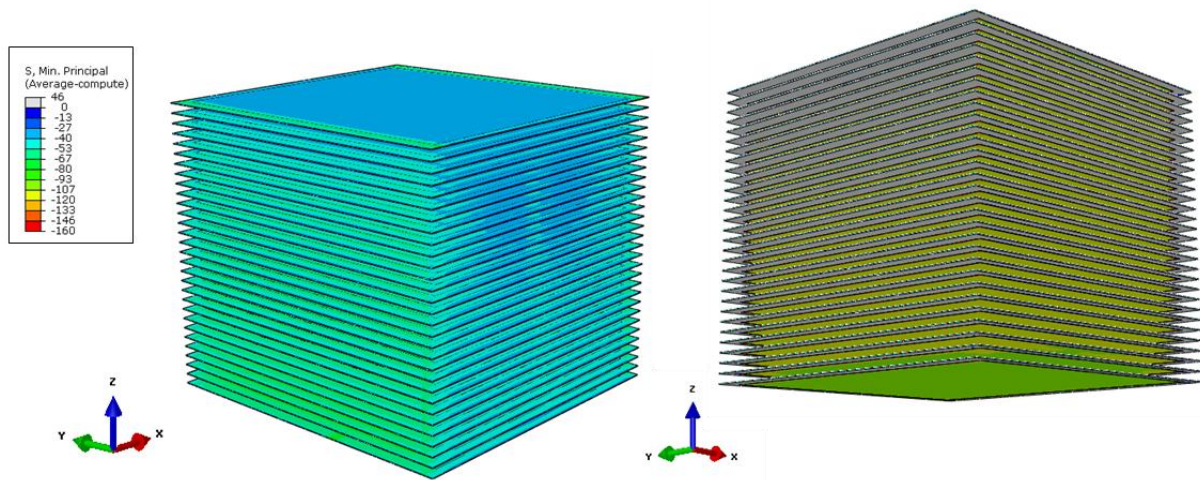


Abbildung 8-27: Minimale Hauptnormalspannung über alle Zellen

8.3.1.1 Höchstbelastete Einzelzelle

An dieser Stelle wird jene Einzelzelle behandelt, an der die maximalen Hauptnormalspannungen auftreten. Es ist darauf Rücksicht zu nehmen, dass teilweise leicht überhöhte Spannungswerte auftreten. Der Grund dafür liegt in den vorhandenen Materialdaten. Beispielsweise liegen für Crofer-APU alle Materialdaten für den gesamten Temperaturbereich vor, jedoch für die Metall-Keramiken der Zelle ist teilweise nur ein Wert bei Raumtemperatur vorhanden. Ein weiterer Grund ist, dass herstellungsbedingte Eigenspannungen in dieser Arbeit nicht berücksichtigt werden. Dies würde bedeuten dass durch den Sinterprozess die Bauteilspannungen durch die Annäherung an die Herstellungstemperatur zurückgehen würden. Aber durch die Verwendung von rein elastischen Materialdaten würde dies lediglich nur einen Offset von den gezeigten Spannungen erzeugen.

Die folgenden Ergebnisse der Zelle sind mit Kontinuumschalen-Elementen gerechnet, welche in Kapitel 3.2 schon genauer erläutert wurden.

Abbildung 8-28 stellt die Zelle mit der größten auftretenden maximalen Hauptnormalspannung dar. Durch die Funktion „Envelope“ werden die Ergebnisse der Kontinuum-Schalen elementumhüllend mit ihren absoluten Maximalwerten angezeigt. Das obere Bild zeigt die Untersicht und das untere Bild die Draufsicht. Der Knoten mit dem höchsten Spannungswert ist hervorgehoben. Es ist ersichtlich, dass der Elektrolyt an der Vorderkante beim Übergang auf das Anodenmaterial stark unter Zug steht. Der Spannungsverlauf dieses Knotens ist in Abbildung 8-29 dargestellt. Lediglich ganz zu Beginn der Aufheizphase ist eine kleine Druckspitze erkennbar, aber danach baut sich der Zug bis zum Ende des Aufheizens auf und erfährt eine Zugspitze ganz zu Beginn des Abkühlvorganges.

8. Ergebnisse und Diskussion

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

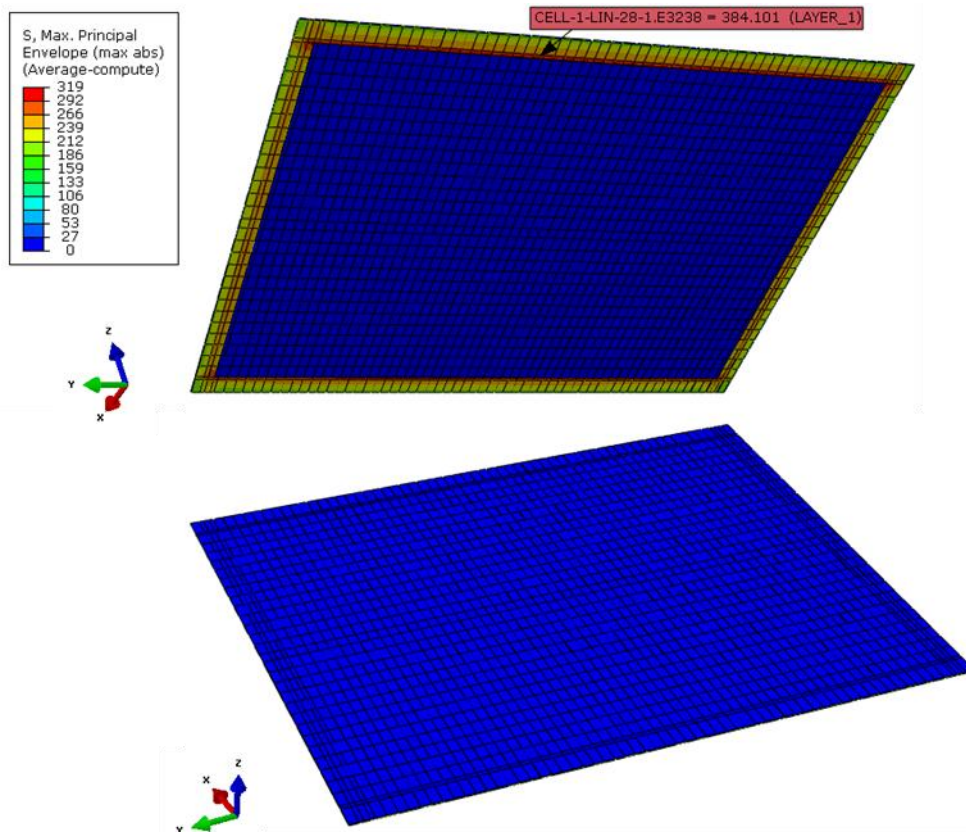


Abbildung 8-28: Zelle mit größter maximalen Hauptnormalspannung

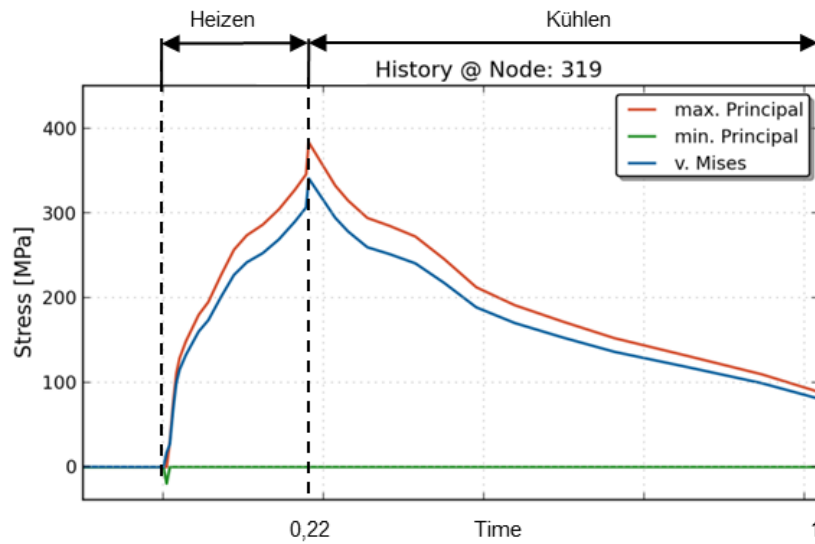


Abbildung 8-29: Spannungsverlauf des Knotens mit größtem Zug

8. Ergebnisse und Diskussion

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

Die maximalen Hauptnormalspannungen in der Zellebene angezeigt, sind prinzipiell dieselben Ergebnisse wie im vorherigen Bild. Der besprochene Elementtyp berechnet Ergebnisse in der definierten Zellebene an jedem Integrationspunkt.

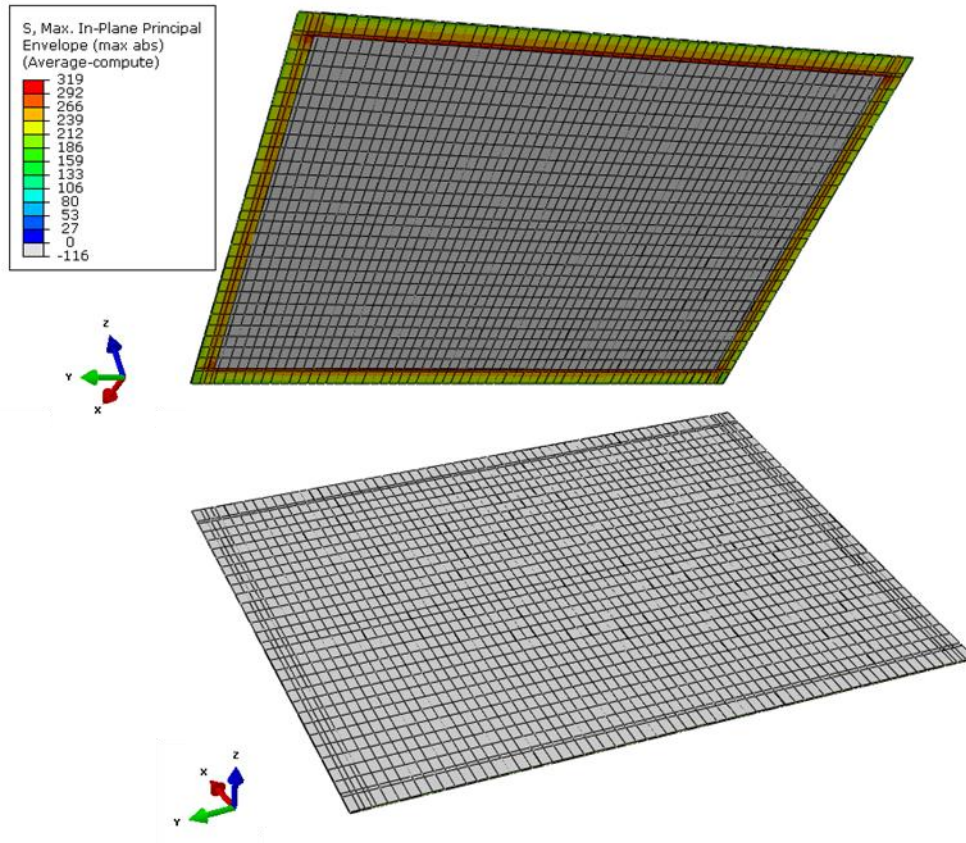


Abbildung 8-30: Maximale Hauptnormalspannung in der Zellebene

Das Gegenteil zeigt Abbildung 8-31, in der die minimalen Hauptnormalspannungen abgebildet werden. Im oberen Bild (Untersicht) ist die unter Druck stehende Anodenschicht gut ersichtlich. Im unteren Bild (Draufsicht) sieht man die unter Druck stehende Kathode. Der Elektrolyt (grau) weist zu diesem Zeitpunkt keinerlei Druck auf. Der Knoten mit dem größten Spannungswert ist auch hier wieder hervorgehoben und der Spannungsverlauf dieses Knotens wird in Abbildung 8-32 gezeigt. Man kann sehen, dass dieser Knoten über den gesamten Zyklus keinerlei Zug erfährt. Der Aufbau des Drucks zeigt wiederum zu Beginn des Heizens einen starken Gradienten und danach geht der Verlauf eher flach Richtung Maximum. Dieser Knoten liegt im hinteren Bereich des Stacks, hier hat die heiße Luft schon sehr viel Energie abgegeben, bevor sie diese Stelle erreicht.

8. Ergebnisse und Diskussion

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

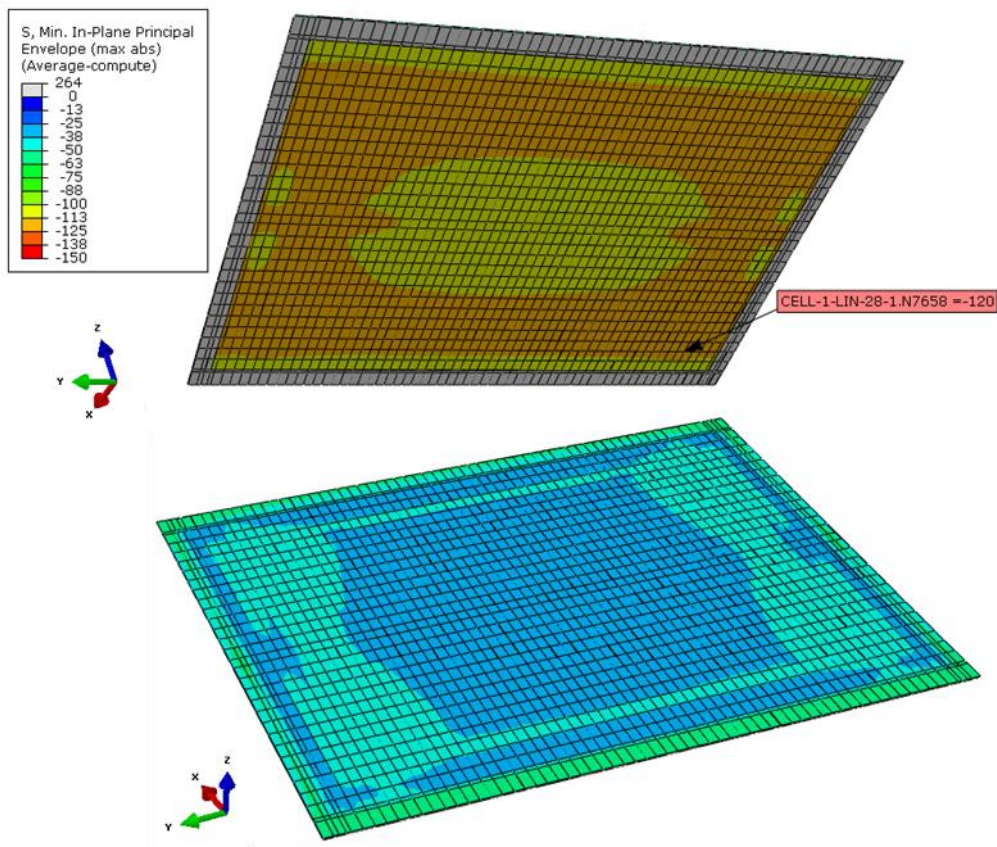


Abbildung 8-31: Größte minimale Hauptnormalspannung

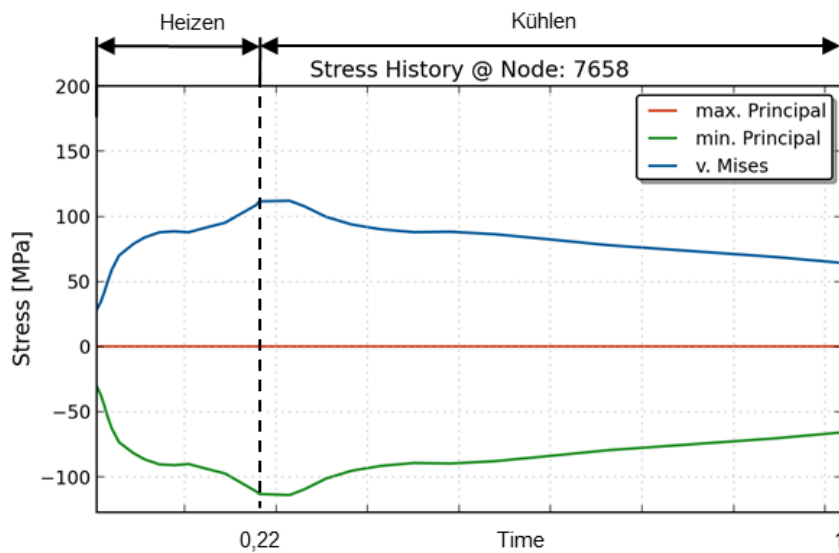


Abbildung 8-32: Spannungsverlauf des Knotens mit größtem Druck

8.3.2 Ergebnisse im Zellquerschnitt

Für die Darstellung im Zellquerschnitt werden die Querschubspannungen über die einzelnen Materialschichten betrachtet. Vorerst werden alle Zellen mit diesem Ergebnis in der xz-Richtung angezeigt. In Abbildung 8-33 sieht man links oben eine Draufsicht aller Zellen mit hervorgehobenem Detail, das den meistbelasteten Bereich anzeigt. In der linken, unteren Darstellung ist die Untersicht der Zellen und einem vergrößerten Detail dargestellt. Das kleine Diagramm rechts in der Mitte zeigt den Verlauf der Spannungen im vorderen Bereich des Stacks über der gesamten Stackhöhe. Die Querschubspannungen steigen mit der Stackhöhe an und gehen aufgrund der Einspannung ganz oben wieder zurück.

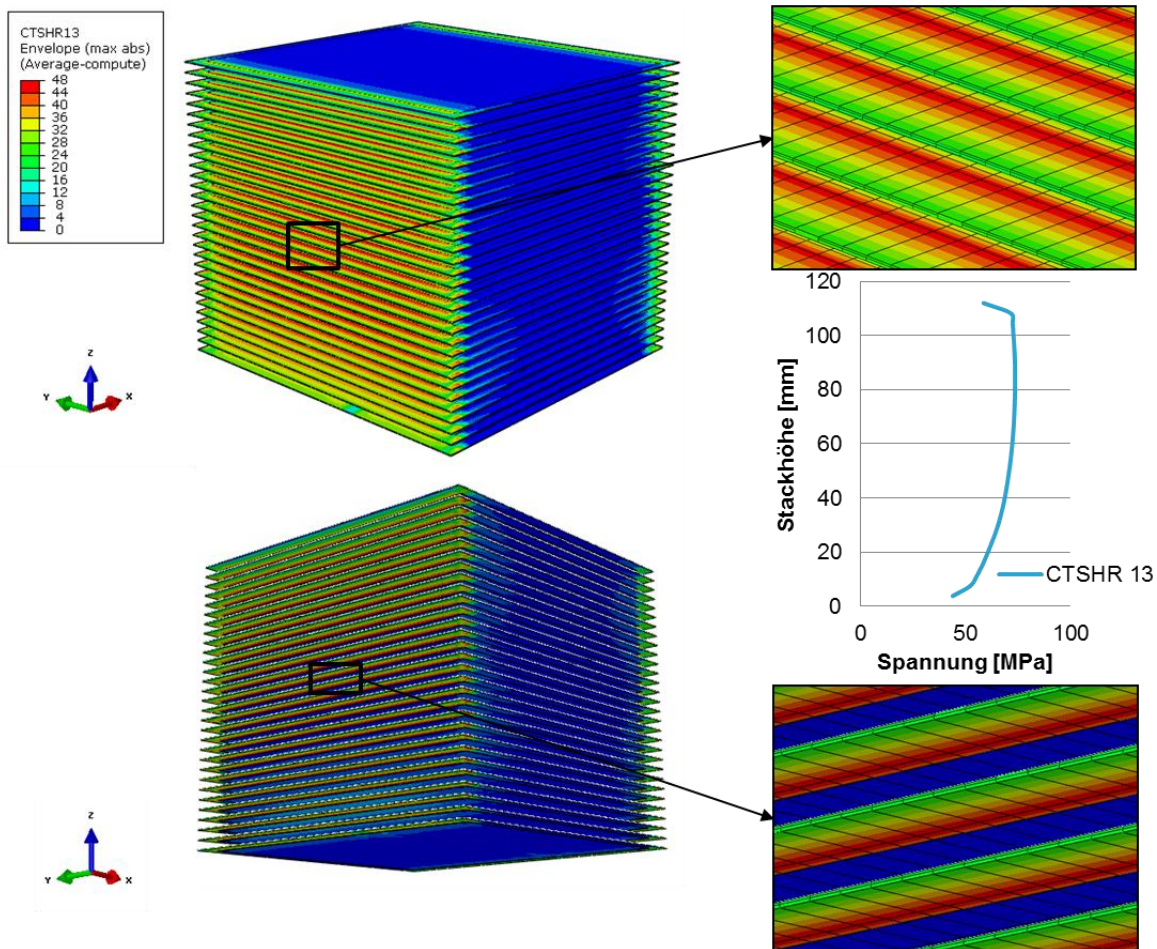


Abbildung 8-33: Querschubspannungen in XZ-Richtung aller Zellen

In Abbildung 8-34 sind die Querschubspannungen in YZ-Richtung dargestellt. Man erkennt, dass hier die Spannungen in der Stackhöhe zunehmen und wiederum erst ganz oben etwas zurückgehen. Dies ist abermals auf die Einspannbedingung und die Steifigkeit im oberen Bereich zurückzuführen, weil die Ausnehmungen der Brennstoffkanäle diese Ebene beeinflussen. Ein ähnlicher Trend war schon bei den maximalen Hauptnormalspannungen sichtbar. Die maximalen Spannungen befinden sich im oberen Bereich des Stacks.

8. Ergebnisse und Diskussion

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

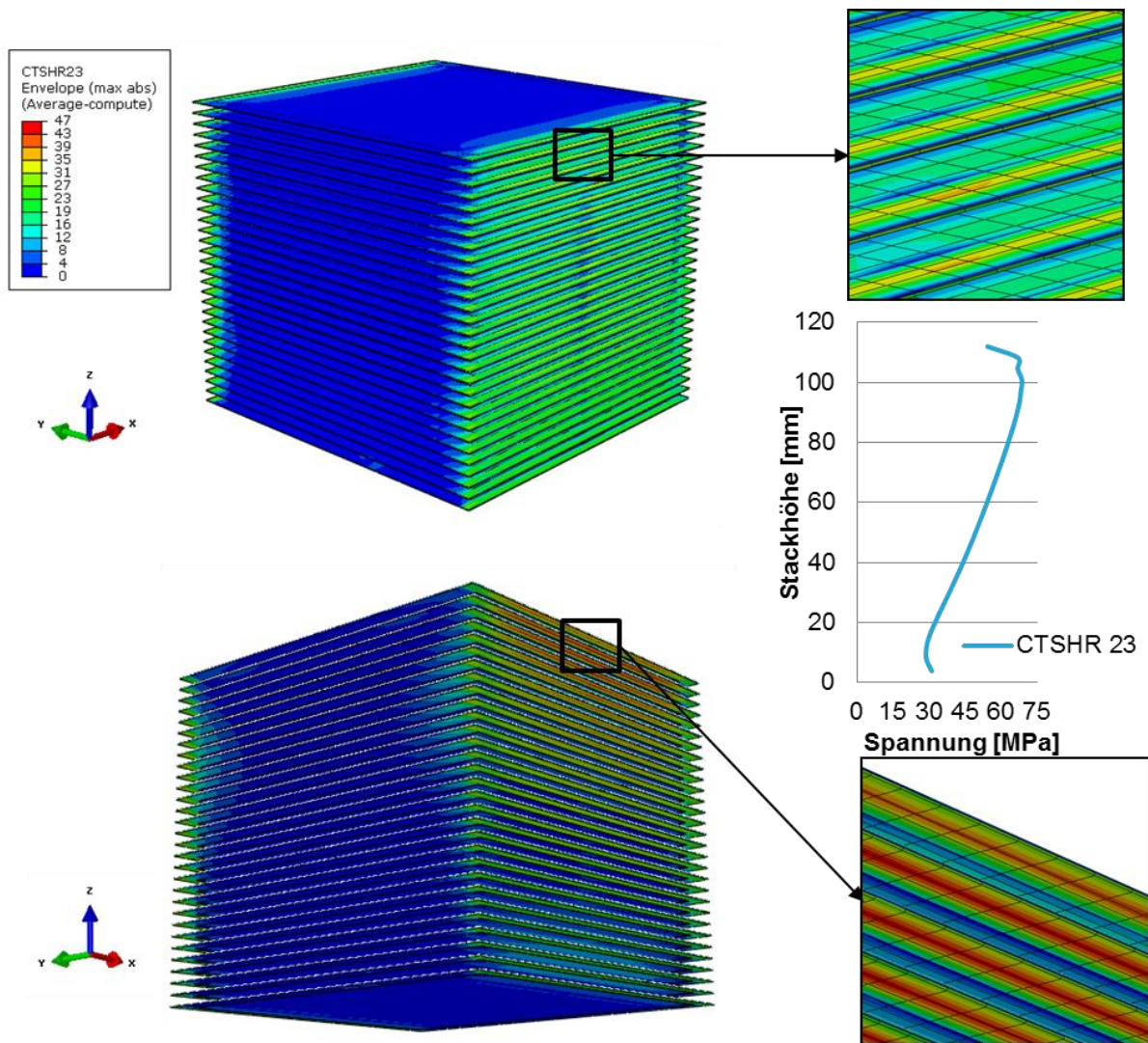


Abbildung 8-34: Querschubspannungen in YZ-Richtung aller Zellen

8.3.2.1 Querschnitt-Plot

An dieser Stelle werden die gerade gefundenen meistbelasteten Zellen zur weiteren detaillierteren Betrachtung herangezogen. Abbildung 8-35 stellt die Zelle mit den größten Querschubspannungen in XZ-Richtung dar, das meistbelastete Element liegt im vorderen Bereich der Zelle und ist in der Darstellung vergrößert abgebildet. Man kann erkennen, dass an dieser Stelle nur zwei Materialschichten vorhanden sind. Im Diagramm sind die Spannungen für diese zwei Schichten, Elektrolyt und Kathode, über der Schichtdicke geplottet. Aufgrund der bereits besprochenen numerischen Integration sind die Ergebnisse an den offenen Enden null und an den Übergängen haben die Schichten den selben Ergebniswert.

8. Ergebnisse und Diskussion

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

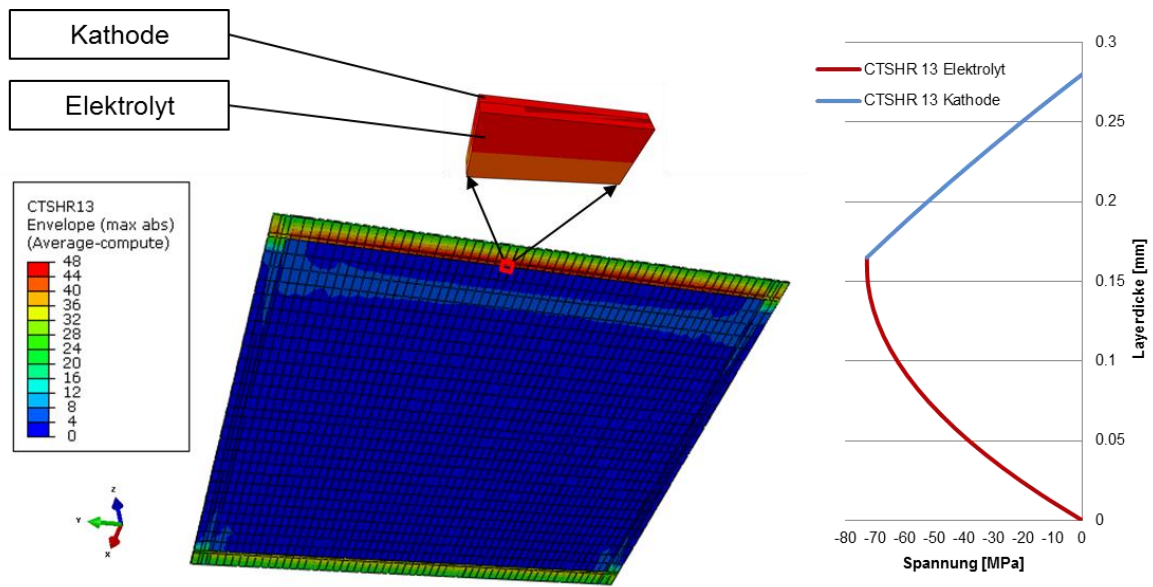


Abbildung 8-35: Querschubspannungen in XZ-Richtung über Elementdicke in der Zelle mit den maximalen Querschubspannungen in XZ-Richtung (2 Layer)

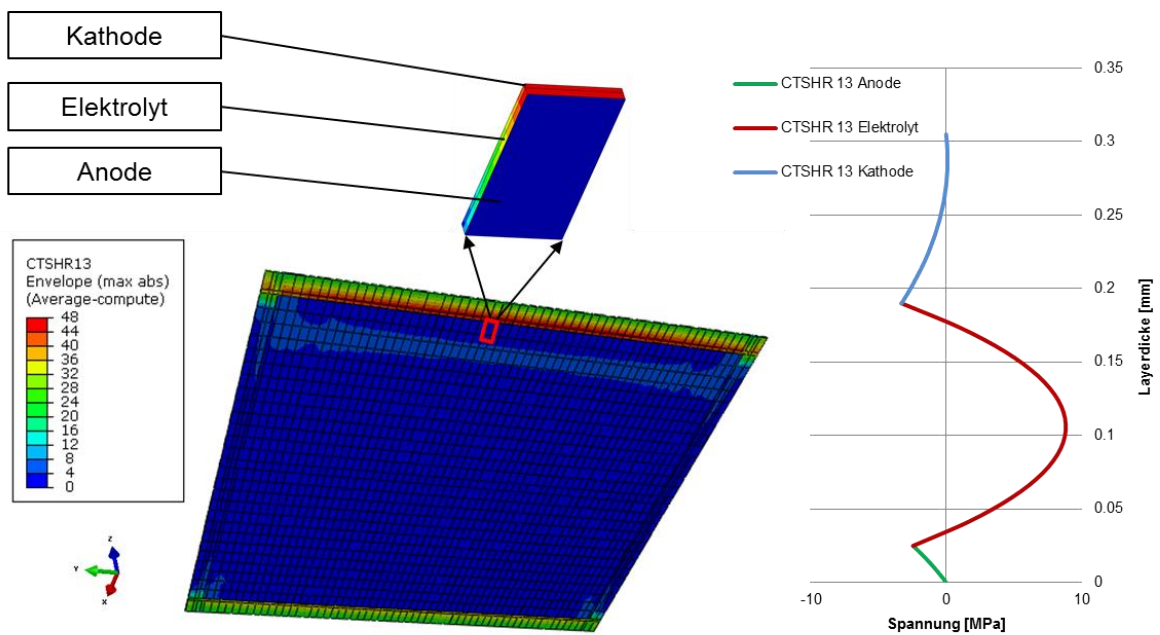


Abbildung 8-36: Querschubspannungen in XZ-Richtung über Elementdicke in der Zelle mit den maximalen Querschubspannungen in XZ-Richtung (3 Layer)

Abbildung 8-36 zeigt vom eben besprochenen Element das nächst gelegene Element mit drei Materialschichten. In der Darstellung erkennt man, dass an dieser Stelle die Anodenschicht hinzugekommen ist. Diese Stelle ist bereits etwas von der maximalbelasteten Stelle entfernt und die Querschubspannungen sind schon deutlich zurückgegangen. Das Diagramm zeigt, dass die Schicht mit der größten Spannungsänderung der Elektrolyt ist.

8. Ergebnisse und Diskussion

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

Abbildung 8-37 stellt die Ergebnisse für die Zelle mit den größten Querschubspannungen in YZ-Richtung dar. Hier ist der Bereich mit den höchsten Spannungen am seitlichen Rand der Zelle. Vergrößert abgebildet ist das Element mit dem maximalen Spannungswert. Dies ist wie vorhin der Randbereich wo lediglich zwei Materialschichten vorhanden sind. Die Änderung der Spannungen in dieser Ebene ist etwas größer als zuvor.

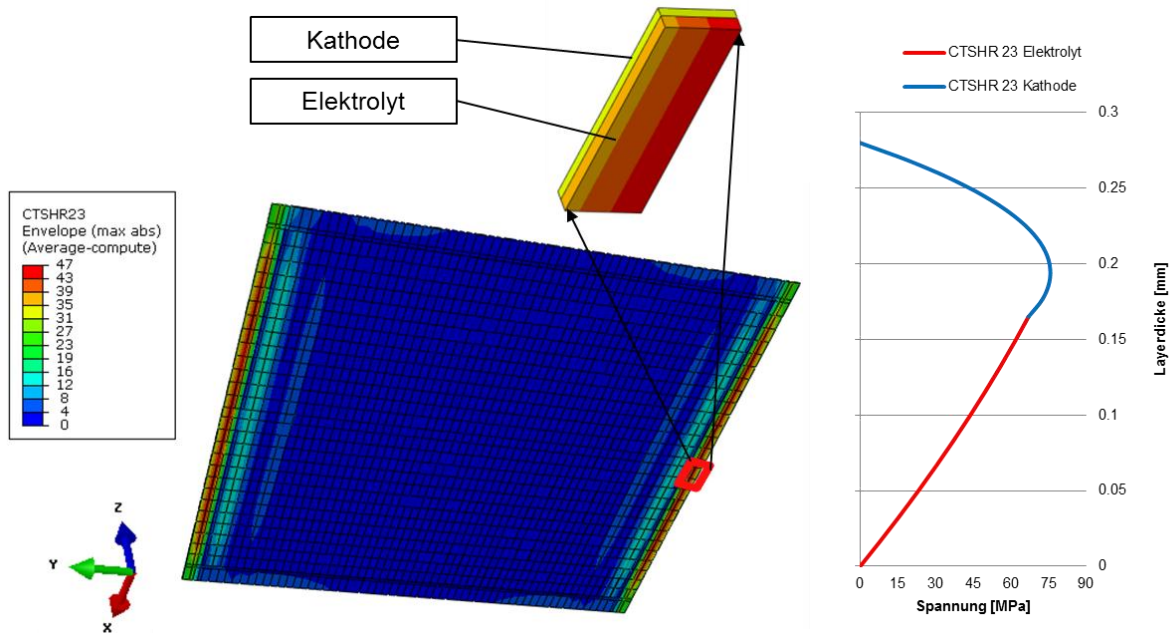


Abbildung 8-37: Querschubspannungen in YZ-Richtung über Elementdicke in der Zelle mit den maximalen Querschubspannungen in YZ-Richtung (2 Layer)

Das nächstgelegene Element mit allen drei Zellschichten wird in Abbildung 8-38 gezeigt. Hier ist der Layer mit der größten Spannungsänderung die Kathodenschicht. Es geschieht auch kein Vorzeichenwechsel wie in der vorigen Betrachtung. Der seitliche Randbereich ist von dieser Betrachtungsweise ausgehend der kritischste.

8. Ergebnisse und Diskussion

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

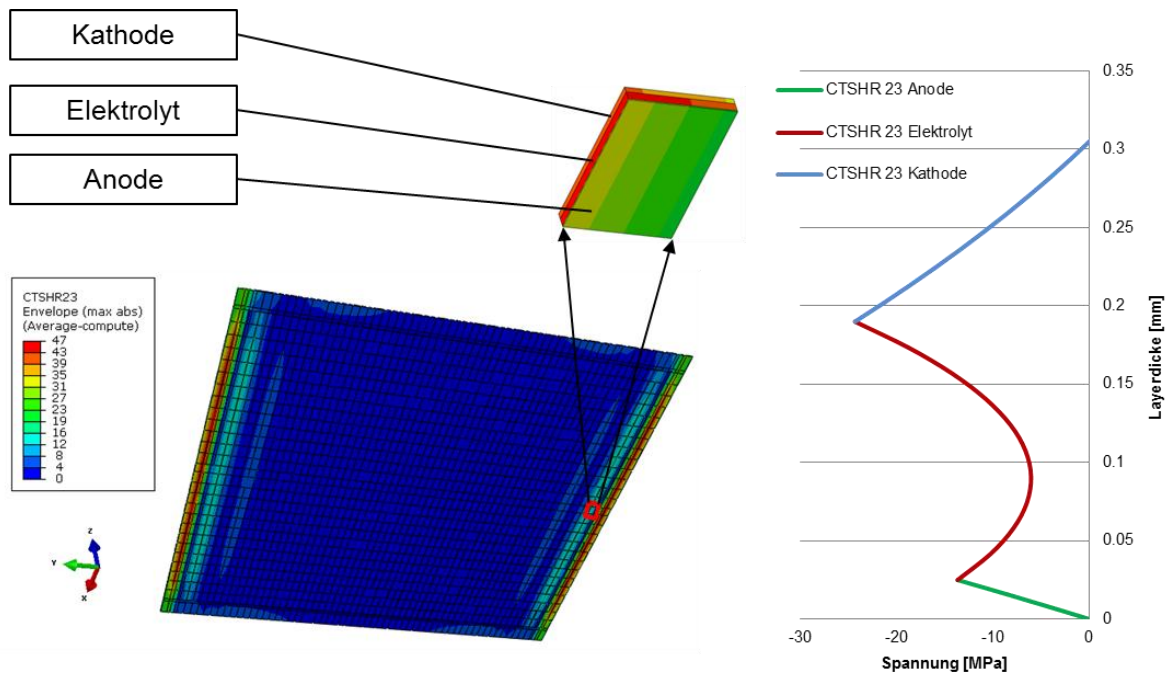


Abbildung 8-38: Querschubspannungen in YZ-Richtung über Elementdicke in der Zelle mit den maximalen Querschubspannungen in YZ-Richtung (3 Layer)

8.3.2.2 Betrachtung einzelner Layer

Dieses Kapitel soll noch kurz die Möglichkeit der Darstellung einzelner Zellschichten zeigen. Der abgebildete Zeitpunkt ist auch hier wieder jener am Ende der Aufheizphase. Es wird für jede Zellschicht die maximale- und minimale Hauptnormalspannung, sowie der Querschub in XZ- und YZ-Richtung dargestellt.

Dass zu diesem Zeitpunkt in der Anode kein Zug vorhanden ist, zeigt Abbildung 8-39. Hingegen ist in Abbildung 8-40 der Druck in der Anode zu sehen. Der im vorigen Kapitel besprochene Querschub ist für den Anoden-Layer in Abbildung 8-41 und Abbildung 8-42 dargestellt. Der maximale Querschub im seitlichen Bereich bleibt auch hier erhalten.

8. Ergebnisse und Diskussion

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

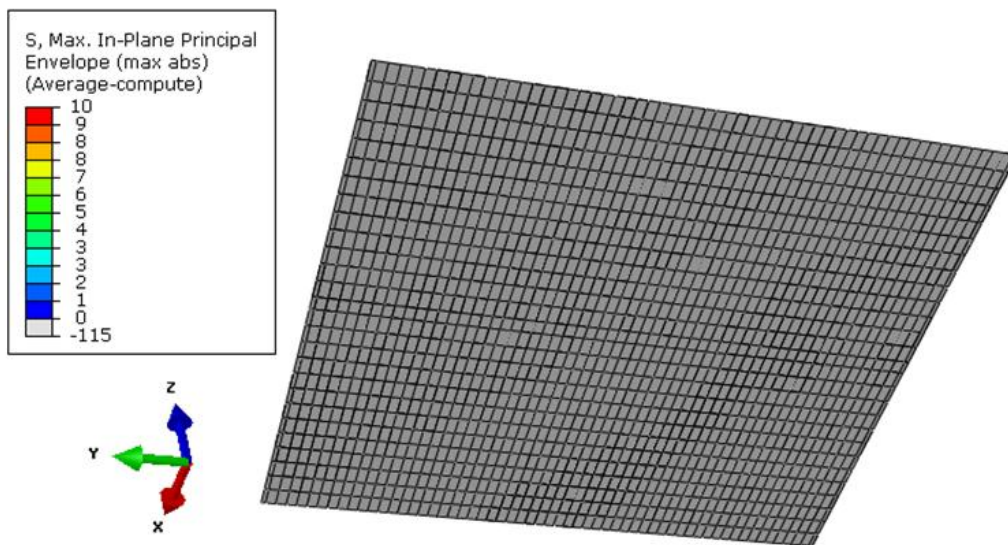


Abbildung 8-39: Maximale Hauptnormalspannung in der Anodenschicht

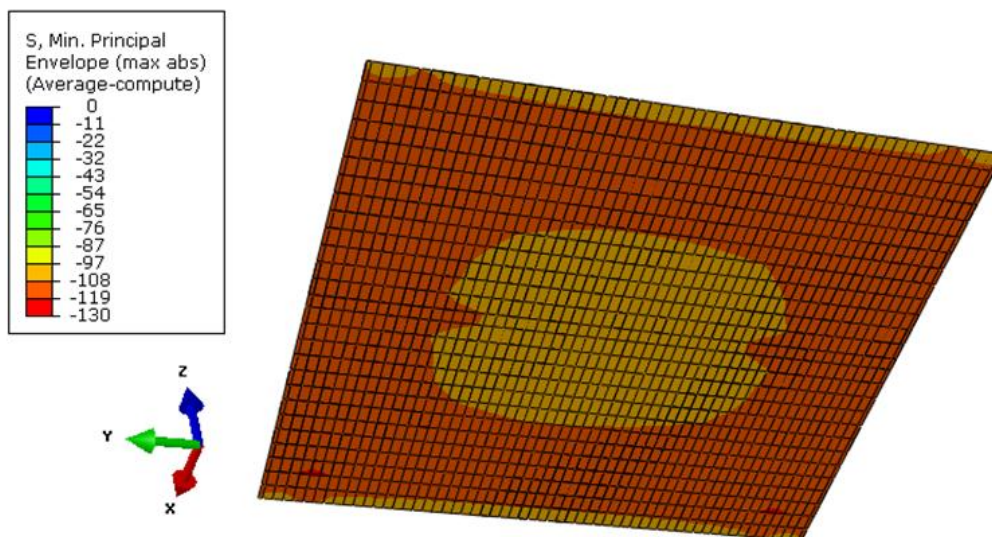


Abbildung 8-40: Minimale Hauptnormalspannung in der Anodenschicht

8. Ergebnisse und Diskussion

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

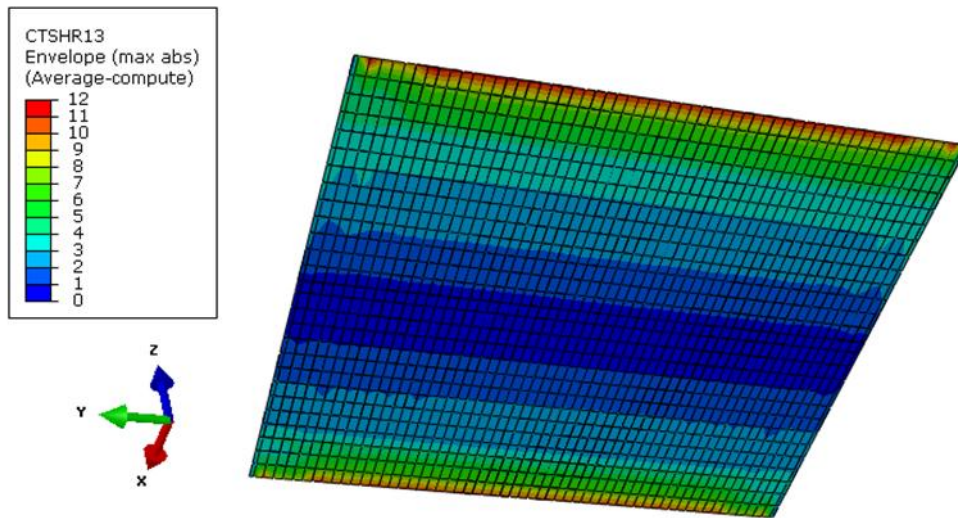


Abbildung 8-41: Querschubspannung in XZ-Richtung in der Anodenschicht

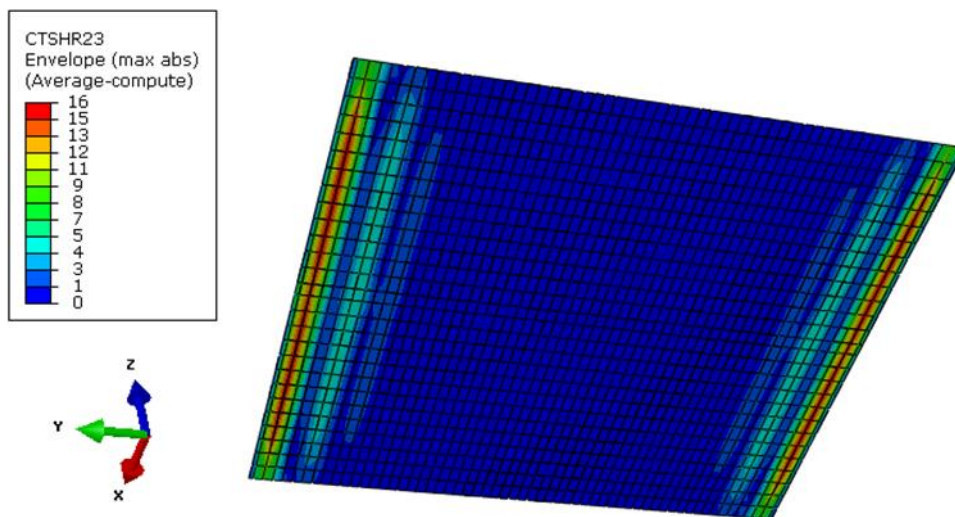


Abbildung 8-42: Querschubspannung in YZ-Richtung in der Anodenschicht

Die Abbildung 8-43 und Abbildung 8-44 zeigen, dass im Elektrolyten nur Zug vorhanden ist und der schon besprochene Randbereich am Übergang zur Anode der Bereich mit den größten Spannungswerten ist. Der Elektrolyt liegt mit der äußersten Elementreihe im Randbereich auf der Dichtung auf.

8. Ergebnisse und Diskussion

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

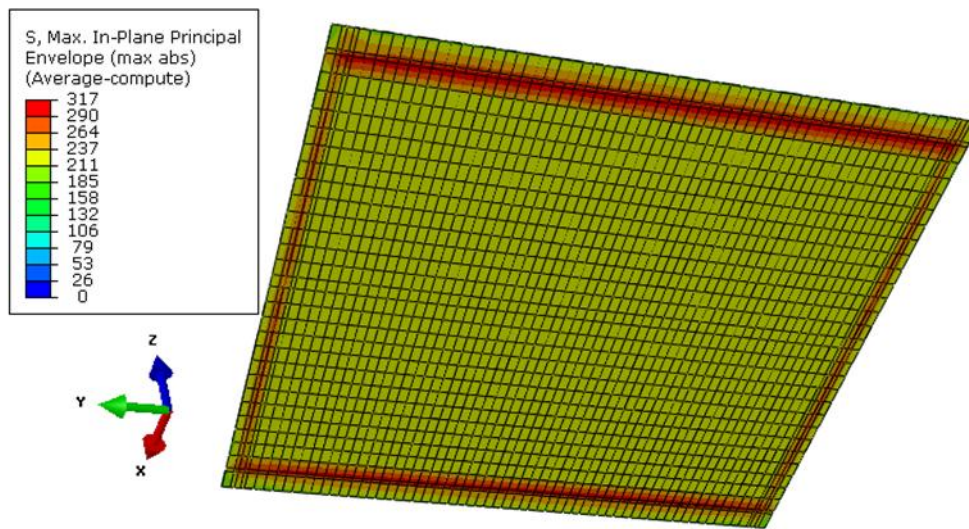


Abbildung 8-43: Maximale Hauptnormalspannung in der Elektrolytschicht

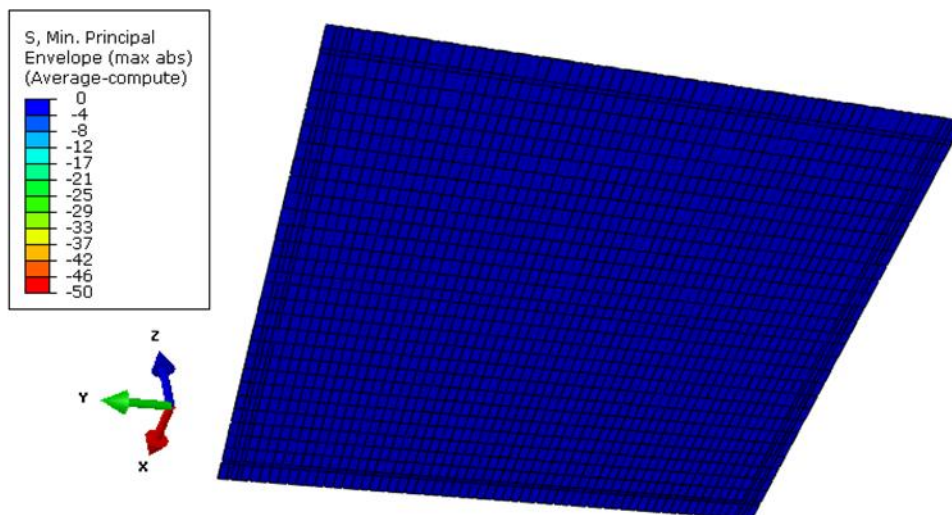


Abbildung 8-44: Minimale Hauptnormalspannung in der Elektrolytschicht

Abbildung 8-45 und Abbildung 8-46 zeigen den Querschub des Elektrolyten. Im Vergleich zur Anode sind die Spannungen hier deutlich höher und man kann gut erkennen, dass der Übergang zur Anode im Lufteinlassbereich deutlich mehr unter Spannung steht, als der Luftauslassbereich.

8. Ergebnisse und Diskussion

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

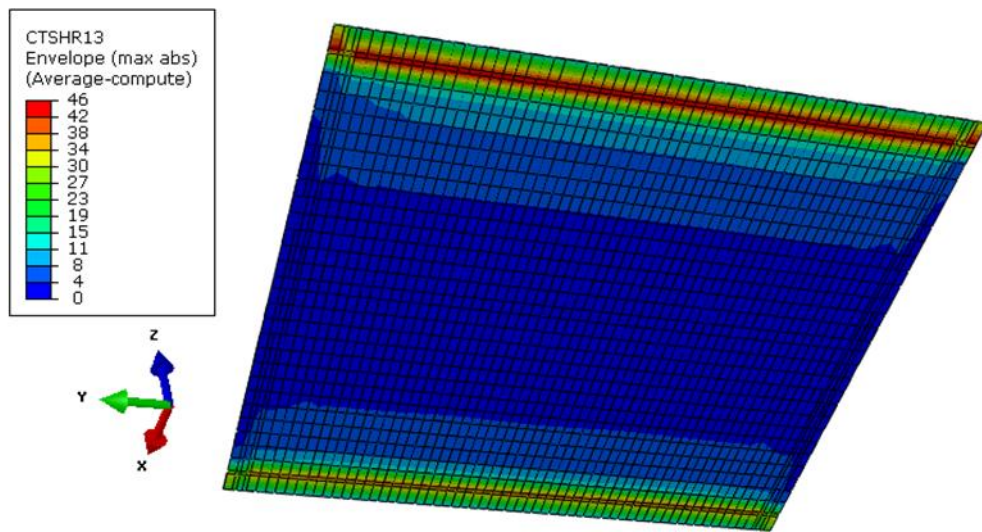


Abbildung 8-45: Querschubspannung in XZ-Richtung in der Elektrolytschicht

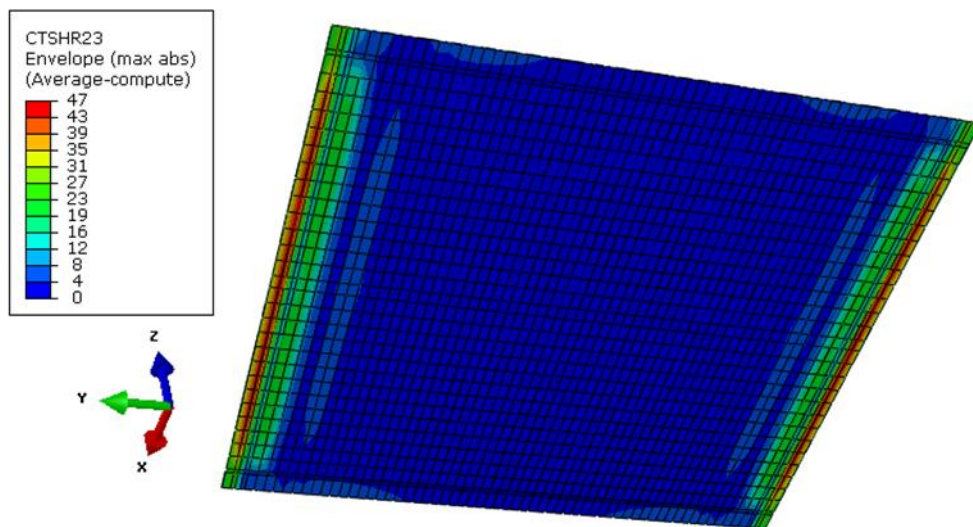


Abbildung 8-46: Querschubspannung in YZ-Richtung in der Elektrolytschicht

Die Kathodenschicht in Abbildung 8-47 ist am Ende des Aufheizens keinerlei Zug ausgesetzt. Der Druck in Abbildung 8-48 zeigt in der äußersten Elementreihe erhöhte Spannungswerte und in der Mitte in der Größe der Anode geringere.

8. Ergebnisse und Diskussion

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

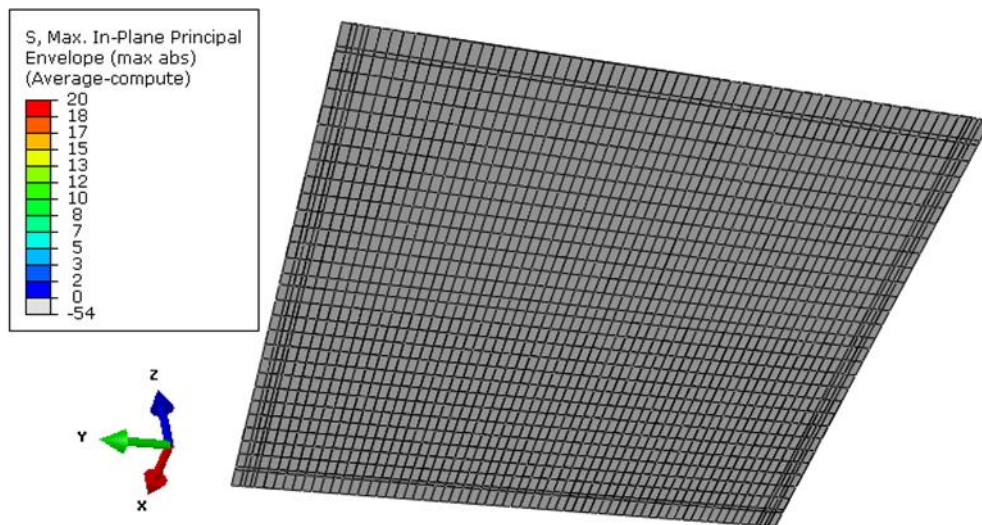


Abbildung 8-47: Maximale Hauptnormalspannung in der Kathodenschicht

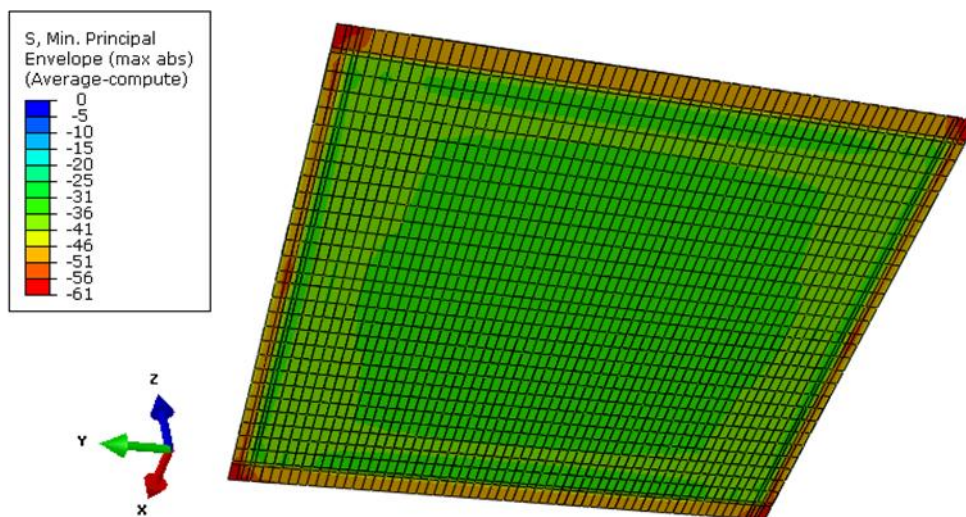


Abbildung 8-48: Minimale Hauptnormalspannung in der Kathodenschicht

Schlussendlich werden die Querschubspannungen der Kathode in Abbildung 8-49 und Abbildung 8-50 gezeigt. Diese sind jenen des Elektrolyten sehr ähnlich, auch die höheren Spannungen im Lufteinlassbereich sind erkennbar.

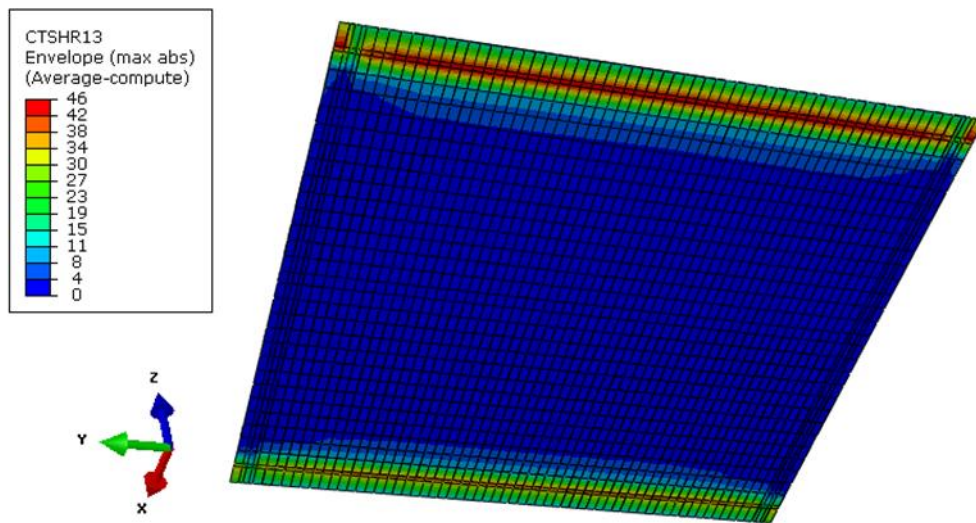


Abbildung 8-49: Querschubspannung in XZ-Richtung in der Kathodenschicht

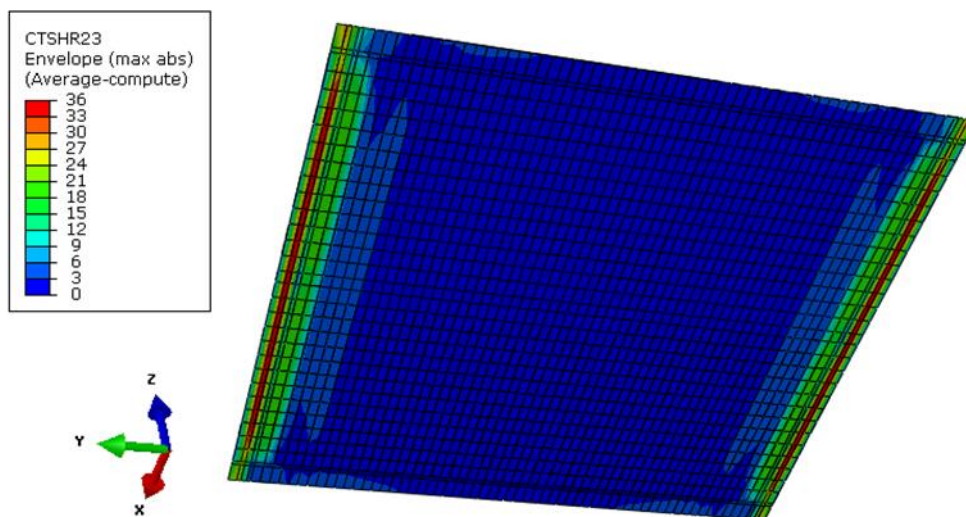


Abbildung 8-50: Querschubspannung in YZ-Richtung in der Kathodenschicht

8.4 Dichtung

Zur Bewertung der Dichtung wird die maximale Hauptnormalspannung herangezogen, da für Glas der Zug deutlich schädlicher als der Druck ist. Hier ist wiederum zu beachten, dass die Spannungswerte aufgrund von Nichtbeachtung der Spannungen durch den Herstellungsprozess und dem Verwenden von rein elastischen Materialdaten, sowie mangelnden Materialdaten zum Teil deutlich erhöht sind. Abbildung 8-51 zeigt eine Ansicht aller verwendeten Dichtungen mit dem Detail des Knotens, der den größten Zug aufweist.

8. Ergebnisse und Diskussion

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

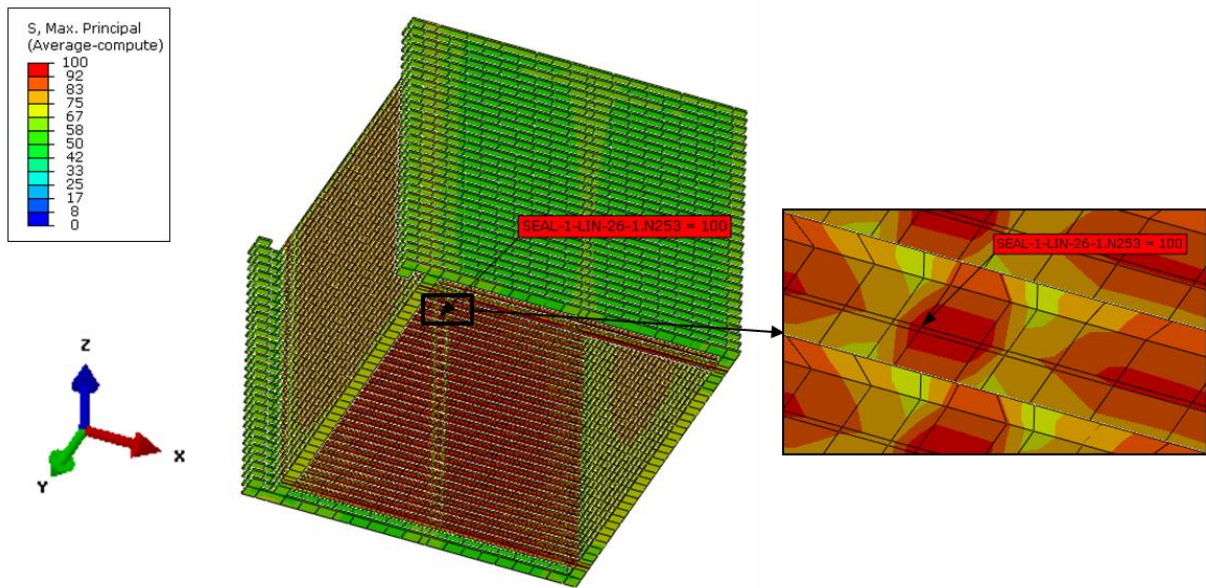


Abbildung 8-51: Maximale Hauptnormalspannung mit Detail des meistbelasteten Knotens

Der Spannungsverlauf dieses Knotens zeigt in Abbildung 8-52 den Maximalwert am Beginn der Abkühlphase. Der Grund ist, dass nach dem Stabilisieren der Stack mit kühlerer Luft angeströmt wird und sich in diesem Bereich zusammenzieht. Betrachtet man Abbildung 8-23 des Interkonnektors zum Vergleich, sieht man, dass dieser an derselben Stelle eine Druckspitze aufweist. Aufgrund der Bauteilgröße beeinflusst dies direkt die hier dargestellte Dichtung.

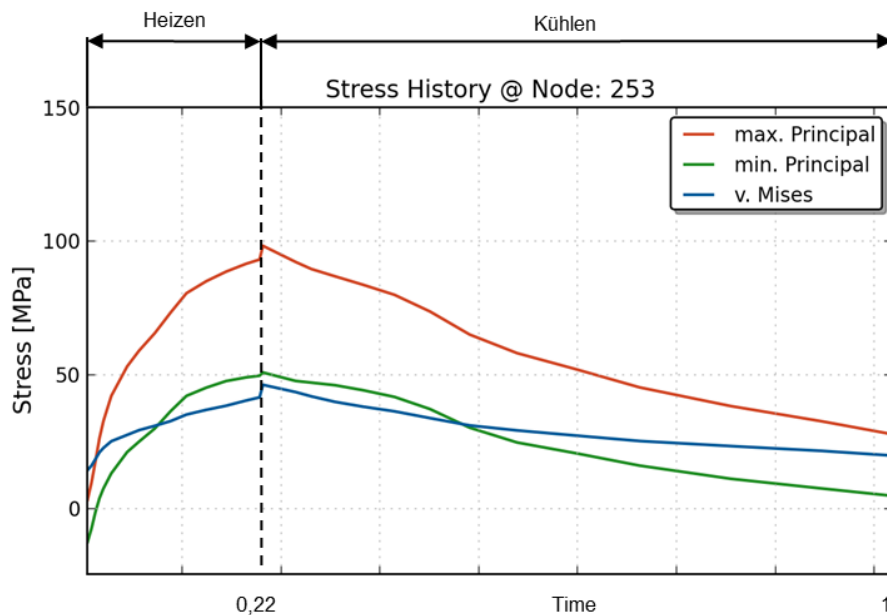


Abbildung 8-52: Spannungsverlauf des meistbelasteten Knotens

8. Ergebnisse und Diskussion

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

An der Stelle der Dichtung mit maximalem Zug weist der Interkonnektor eine Versteifungsrippe im Brennstoffzulauf auf, dies wirkt sich wiederum direkt auf die Dichtung aus und ergibt die kleine Stelle mit erhöhter Spannung.

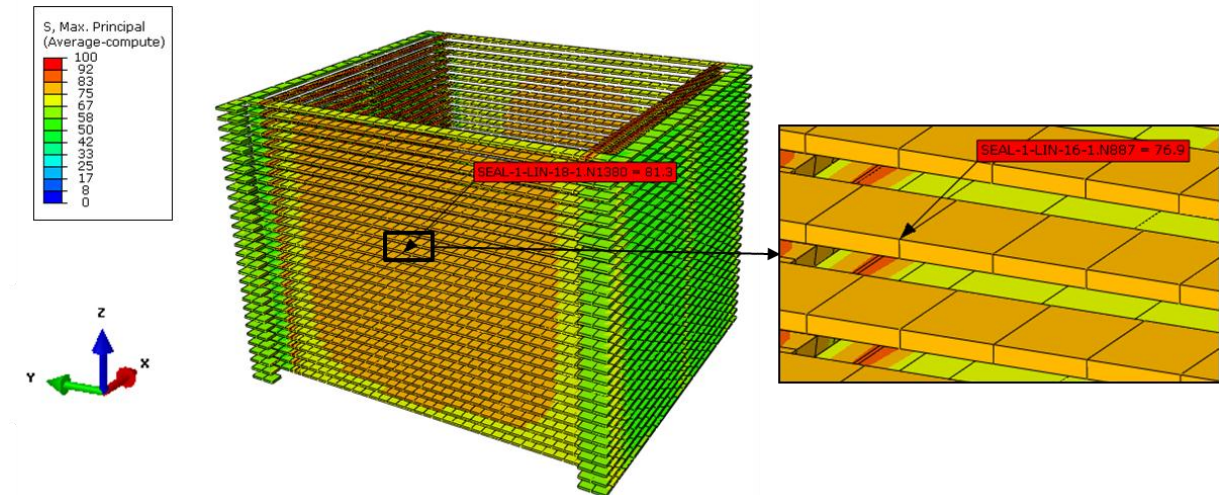


Abbildung 8-53: Maximale Hauptnormalspannung mit Detail des Knotens an der Einlassseite

In Abbildung 8-53 wurde ein Knoten an der Luftenlassseite ausgewählt und in Abbildung 8-54 der Spannungsverlauf dieses Knotens geplottet. Bei genauem Hinsehen ist die kleine Druckspitze zu Beginn des Zyklus ersichtlich, die im vorderen Bereich durch die anfängliche Ausdehnung entsteht.

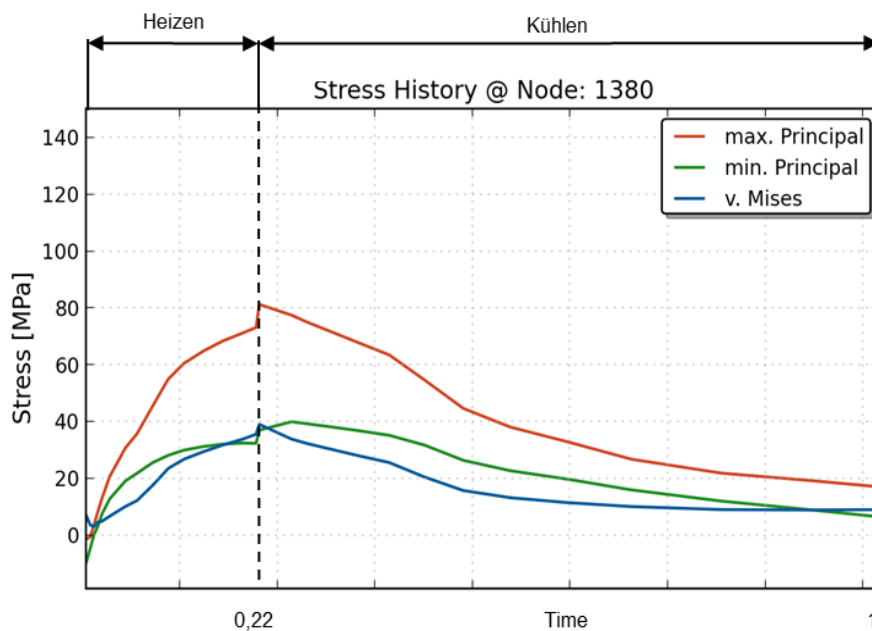


Abbildung 8-54: Spannungsverlauf des Knotens an der Einlassseite

8. Ergebnisse und Diskussion

Thermo-mechanische FE-Analyse des Aufheizprozesses einer SOFC

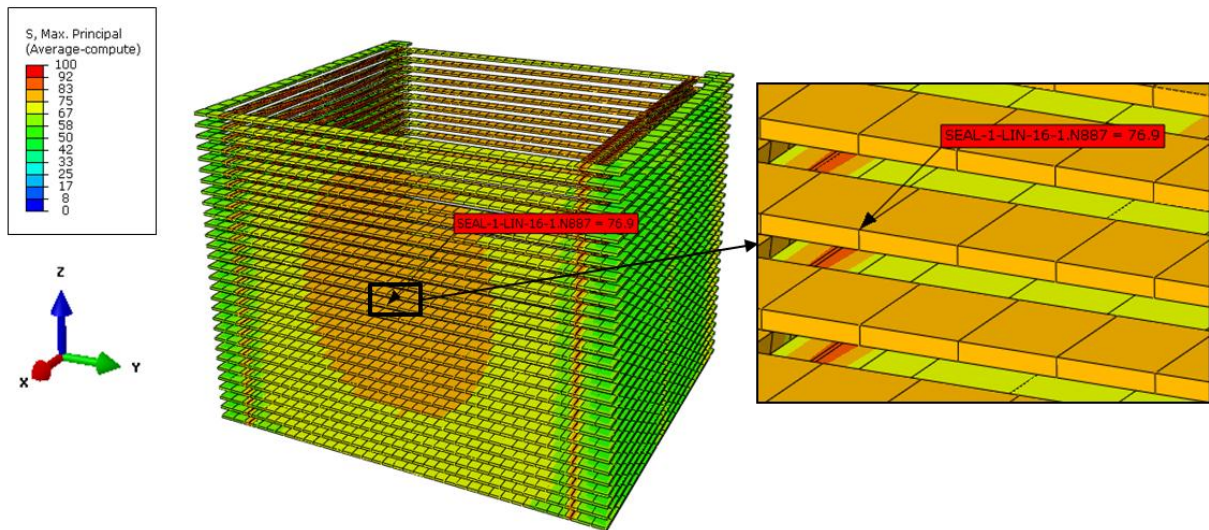


Abbildung 8-55: Maximale Hauptnormalspannung mit Detail des Knotens an der Auslassseite

An der Luftauslassseite wurde der Knoten in Abbildung 8-55 gewählt. Der zugehörige Spannungsverlauf ist in Abbildung 8-56 dargestellt. Auch hier ist eine kleine Druckspitze durch anfängliche Ausdehnung ersichtlich.

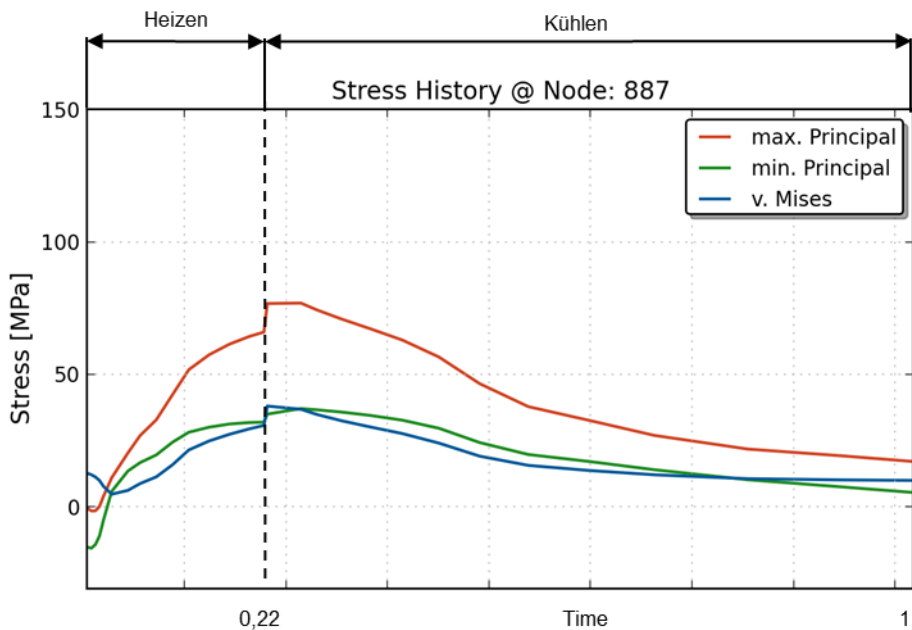


Abbildung 8-56: Spannungsverlauf des Knotens an der Auslassseite

Bei allen drei gewählten Knoten ist das Maximum des Zugs am Beginn der Abkühlphase.

9 Zusammenfassung

Dieses Kapitel soll die wichtigsten Erkenntnisse der vorliegenden Arbeit wiedergeben und zusammenfassen.

9.1 Simulation des Temperaturfeldes

Die Simulation des räumlichen Temperaturfeldes wird in Kapitel 6 ausführlich behandelt. Diese Thematik stellte im Zuge dieser Arbeit ein großes Problem dar. Bis zum Erhalt der am Prüfstand gemessenen Daten waren die Annahmen bezüglich Massenstrom viel zu hoch. Dies ergab bei einem Beschleunigungsfaktor von 10000 einen viel zu großen Fehler der Wärmeübertragung. Ein Beschleunigungsfaktor von 1000 wäre wegen viel zu langer Simulationszeiten unmöglich gewesen. Erst die Messungen vom Prüfstand haben gezeigt, dass der Massenstrom deutlich niedriger ist als vorher angenommen und somit war der entstandene Fehler in einem akzeptablen Bereich.

Die Untersuchung der Gleichverteilung der Kathodenluft in der Arbeit von Kiesling hat gezeigt, dass abgesehen vom oberen Bereich der Zulauf-Box, die Luft für die Simulation als gleichverteilt angenommen werden kann.

Die Auswertung der Ergebnisse in Kapitel 6.4 hat gezeigt, dass die größten Temperaturgradienten jeweils zu Beginn der Aufheiz- und Abkühlphase auftreten. Bei der Validierung der Ergebnisse in Kapitel 6.5 hat sich herausgestellt, dass abgesehen von leichten Abweichungen zu Beginn des Aufheizens wegen unterschiedlicher Anfangsbedingungen, Messung und Simulation gut übereinstimmen.

Die Koppelung zur Simulation der Spannungen wurde durch die Auswahl von Inkrementen mit einer Differenztemperatur von etwa 50 °C in Kapitel 6.6 durchgeführt.

9.2 Simulation der Spannungen

Die Simulation der Spannungen wurde mit demselben Berechnungsnetz wie bei der Temperaturfeldsimulation durchgeführt. Es wurden lediglich der Bauteil „Luft“ entfernt und andere Elementtypen verwendet. Mit den Einspann- und Randbedingungen des Prüfstands wurde ein gesamter thermischer Zyklus durchgerechnet. Um das Ergebnis so wenig wie möglich zu beeinflussen, wurde der Stack an keiner weiteren Stelle fixiert. Er wurde lediglich mittels definiertem Reibkontakt zwischen zwei Platten gespannt.

Um das globale Verhalten der Struktur besser zu verstehen, wurde ein Knoten an der Frontfläche ausgewählt und zu jeder Spannungsspitze der verformte Stack abgebildet. Diese Darstellungen haben die Verformungen des Stacks sehr gut dargestellt, dass man auf den Plot des gezeigten Spannungsverlaufs sehr gut schließen kann. Die Auswahl einer Knotenlinie durch den Stack hat einen etwas genaueren Einblick in das globale Verhalten gegeben. Durch die Darstellung der Knotenlinie an Interkonnektor und Zelle konnte der Einfluss des Lufteinlassbereiches des Stacks gezeigt werden.

Die Ergebnisdarstellungen des Interkonnektors haben gezeigt, dass die höchsten Belastungen in den Kontaktbereichen mit der Dichtung und der Zelle sind. Dies ist einerseits auf die Materialpaarung und

andererseits auf die wenig vorhandenen Materialdaten zurückzuführen. Trotzdem halten sich die Spannungswerte stets unter der Streckgrenze von Crofer-APU.

Der Bauteil Zelle wurde etwas detaillierter betrachtet, da die meisten Schädigungen hier zu erwarten sind. In der globalen Betrachtung wurde hauptsächlich auf Zugspannungen geachtet. Der Verlauf der Spannungen über der Stackhöhe vermittelt ein Gefühl für den Moment der größten Ausdehnung. Es konnte hiermit der erste Trend im Verhalten der Spannungen identifiziert werden. Die Betrachtung der meistbelasteten Einzelzelle hat enorme Zugspannungen im Elektrolyten gezeigt. Dies ist wiederum auf das Fehlen sämtlicher temperaturabhängiger Materialparameter zurückzuführen und durch die starke Koppelung der Bauteile macht sich dies in den Spannungen sofort bemerkbar. Trotzdem zeigt sich, dass der Elektrolyt unter Zug und die Anode, sowie die Kathode unter Druck stehen. Außerdem zeigt sich der Bereich am Übergang von Anode zum Elektrolyten als meist belastet.

Die Darstellungen der Querschubspannungen über der Zellschichtdicke geben ein gutes Anzeichen für das Auftreten von interlaminaeren Schädigungen in der Zelle. Nach globalem Lokalisieren der meistbelasteten Zelle wurde für das meistbelastete Element der Querschub über der Layerdicke geplottet. Es konnte gezeigt werden, dass die größte Spannungsänderung über den Querschnitt der XZ-Ebene im Elektrolyten passiert. In der YZ-Ebene passiert dies allerdings in der Kathode.

Die Betrachtung einzelner Zellschichten hat noch einmal den Zug in Elektrolyt und den Druck in Anode, sowie Kathode gezeigt. Dabei sind erhöhte Spannungen im Einlassbereich der Anode und der Kathode aufgefallen. Der gesamte Übergangsbereich von Anode auf Elektrolyt zeigt ebenfalls erhöhte Spannungen, sowie der seitliche Randbereich aller Layer.

Die abschließende Betrachtung der verwendeten Dichtungen aus Glas zeigt wiederum typisches globales Verhalten mit erhöhten Spannungen an den Übergängen zu anderen Bauteilen. Auch hier sind die hohen Werte der Spannungen zum Teil der mangelnden Materialkennwerte und der fehlenden Beachtung der Eigenspannungen durch den Herstellungsprozess zuzuschreiben.

10 Ausblick

Dieses Kapitel zeigt einen kurzen Einblick in zukünftige Maßnahmen um diese thermo-mechanische Analyse zu optimieren bzw. fortzuführen.

10.1 Material und Randbedingungen

Der wichtigste Punkt der zukünftigen Maßnahmen sind bessere Werkstoffkennwerte. Die Qualität der Simulation vor allem im Bereich der Spannungen hängt sehr von den temperaturabhängigen Daten ab. Da Kenndaten für diese Materialien in der Literatur sehr rar gesät sind, besteht die Notwendigkeit von Materialmessungen bzw. Tests. Auch die Definition von einem Testprozedere ist notwendig, da beim Fügen der dünnen Materialschicht die Materialparameter verschwimmen. Ein weiterer Schritt wäre die Implementierung von plastischen Materialdaten und Kriechen.

Die Zellmaterialien sind allesamt einem Sinterprozess unterworfen, das heißt, die Temperatur, bei der einzelne Bauteile spannungsfrei sind, ist ihre Sintertemperatur. Durch das Abkühlen auf Raumtemperatur entstehen Eigenspannungen, die in der jetzigen Simulation nicht enthalten sind. Doch bei Verwendung rein elastischer Materialdaten würde dies lediglich einen Offset von den erhaltenen Spannungswerten bedeuten.

Die Spannungssimulation könnte bei Bedarf mit der Fixierung des am wenigsten bewegten Knoten beschleunigt werden, da die alleinige Klemmung zwischen zwei Platten relativ viele Iterationen hervorruft. Außerdem könnte man die Bauteilsymmetrie bei der Simulation ausnutzen.

10.2 Temperaturfeldberechnung und Elektrochemie

Das Temperaturfeld sollte trotz guter Ergebnisse mittels CFD-Simulation berechnet werden. Dabei würden Luftströmungen und Wärmeübergangskoeffizienten detailaufgelöst werden.

Die Betriebszustände sollten mit elektrochemischer Simulation abgebildet werden, da diese ebenfalls sehr großen Einfluss auf das Temperaturfeld haben und lokale Gradienten hervorrufen.

10.3 Zellschädigung

Der nächste logische Schritt wäre trotz allem eine detaillierte Schädigungsrechnung, spezialisiert auf die drei Zelllayer, zu implementieren, die als Randbedingung mit Belastungen des globalen Modells beaufschlagt wird. Über Energiegleichungen und der Verwendung spezieller Elementtypen könnte Delamination und Rissbildung simuliert werden. Außerdem liefert die lokale feine Vernetzung deutlich genauere Ergebnisse.

Abkürzungen

AFC	Alkaline Fuel Cell
APU	Auxiliary Power Unit
AVL	Anstalt für Verbrennungskraftmaschinen List
CAE	Computer-Aided-Engineering
CFD	Computational Fluid Dynamics
FE	Finite Elemente
LGS	Lineares Gleichungssystem
SOFC	Solid Oxid Fuel Cell

Formelzeichen

Lateinische Formelzeichen

a	Untere Integrationsgrenze
b	Obere Integrationsgrenze
C	Newton-Côtes-Gewichte
c_p	Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck, $J/(kg \cdot K)$
E	Energie, J
F	Funktion; Polynom
Fo	Fourier-Zahl
f	Wichtungsfaktor
G	Freie Enthalpie, J
H	Enthalpie, J
h	Spezifische Enthalpie, J/kg ; Stützstellenabstand
l	Länge, m ; Lagrangesche's Interpolationspolynom

m	Masse, kg
\dot{m}	Massenstrom, kg/s
n	Laufvariable
\dot{Q}	Wärmestrom, W
R	Restglied
S	Spannungstensor, MPa
T	Temperatur, K
t	Zeit, s
U	Innere Energie, J
u	Geschwindigkeitskomponenten in x-Richtung, m/s
x, y, z	Kartesische Koordinaten, m

Griechische Formelzeichen

α	Wärmeübergangskoeffizient, $W/(m^2 \cdot K)$; Integrationsgewicht
η_c	Wirkungsgrad des Carnot-Prozesses
η_{th}	Thermodynamischer Wirkungsgrad
λ	Wärmeleitfähigkeit, $W/(m \cdot K)$
ρ	Dichte, kg/m^3
σ	Mechanische Spannung, MPa
τ	Schubspannung, MPa
ψ	Integrationspolynom

Operatoren und Bezeichnung

*	Angenommener Wert
Δ	Differenz zweier Größen
d	Vollständiges Differential

Σ	Summe
\cdot	Zeitliche Ableitung

Indizes

a	Aus, austretend
e	Ein, eintretend
i	Laufvariable
j	Laufvariable
o	obere
u	untere
v	Vergleich

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Ausdehnung typischer Zellkomponenten einer planaren SOFC mit Ni-YSZ Anode, YSZ Elektrolyt, LSM Kathode und ferritischem Stahl-Interconnector [EG&G 2004, S. 7-11].....	2
Abbildung 1-2: Vorgehensweise.....	3
Abbildung 2-1: Dreistufige und einstufige Energieumwandlung [Geitmann S. 2012, S.141]	4
Abbildung 2-2: Gegenüberstellung der temperaturabhängigen idealen thermodynamischen Wirkungsgrade einer Brennstoffzelle und einer Verbrennungskraftmaschine [Eichseder, Klell 2010, S. 220].....	5
Abbildung 2-3: Prinzip der Brennstoffzelle (AFC) [Eichseder, Klell 2010, S. 221].....	6
Abbildung 2-4: Prinzip der SOFC [Ogniwa-paliwowe 2012].....	8
Abbildung 2-5: Aufbau von planaren und tubulären SOFC-Brennstoffzellen [Karl J. 2006, S.236].....	9
Abbildung 2-6: Verschiedene Gasstromführungen.....	10
Abbildung 2-7: Unterschiede im Zelldesign [Nagel 2008, S. 53]	10
Abbildung 2-8: Schema des Siebdruckverfahrens [Fz-Jülich 2012].....	13
Abbildung 2-9: Durch Siebdruck hergestellte elektrolytgestützte Zelle [KIT 2012]	13
Abbildung 2-10: Nasspulverspritz-Verfahren für planare (links) und für tubulare (rechts) [Fz-Juelich 2012].....	14

Abbildung 2-11: Warmpressen nach Coat-Mix-Verfahren® [Fz-Juelich 2012].....	14
Abbildung 2-12: Mögliche Schädigungen in der Zelle [Qu J. et al. 2006, S.65]	15
Abbildung 3-1: Newton-Côtes-Quadratur [Celigoj C. 1998, S 4.2]	16
Abbildung 3-2: Näherungen $\psi(x)$ für $n=1$, $n=2$ und $n=3$ [Celigoj C. 1998, S.4.2].....	17
Abbildung 3-3: Gauß-Quadratur [Celigoj C. 1998, S. 4.4].....	19
Abbildung 3-4: Konventionelles Schalenelement versus Kontinuum-Schalenelement [Abaqus 2010]	21
Abbildung 3-5: Integrationspunkte über Materialdicke [Abaqus 2010]	21
Abbildung 3-6: Ergebnis-Plot über Materialdicke [Abaqus 2010].....	22
Abbildung 4-1: Flussdiagramm eines gesamten Simulationsdurchgangs	23
Abbildung 5-1: Modulare Bauweise der stationären Einheit (HotBox) [Kusnezoff M. 2011, S. 17]	25
Abbildung 5-2: Modul im Aufbau [Kusnezoff M. 2011, S.18].....	25
Abbildung 5-3: Verwendeter Stack [Kusnezoff M. 2011, S.17]	26
Abbildung 5-4: Stackaufbau [Plansee 2012, Kiesling C. 2012, S. 42].....	27
Abbildung 5-5: Interkonnektor Design [Kusnezoff M. 2011, S. 9].....	28
Abbildung 5-6: Einzelzelle	29
Abbildung 5-7: Schichtdicken	30
Abbildung 5-8: Glaslot [IKTS Fraunhofer 2012].....	30
Abbildung 6-1: Definition des thermischen Zyklus	31
Abbildung 6-2: Typischer thermischer Zyklus	31
Abbildung 6-3: Messpunkt für die Eingangstemperatur [links: Kusnezoff M. 2011, S. 18]	32
Abbildung 6-4: Gemessene Temperaturen am Einlass beim Heizen	33
Abbildung 6-5: Korrigierte Einlasstemperaturen beim Heizen	33
Abbildung 6-6: Gemessene Temperaturen am Einlass beim Kühlen	34
Abbildung 6-7: Einlasstemperaturen des gesamten Zyklus	35
Abbildung 6-8: Massenstromverlauf beim Heizen.....	35
Abbildung 6-9: Massenstromverlauf beim Kühlen.....	36

Abbildung 6-10: Simulation der Gleichverteilung der Kathodenluft.....	36
Abbildung 6-11: Position des CFD-Modelles im Gesamtmodul [rechtes Bild: Kiesling C. 2012, S. 52].	37
Abbildung 6-12: Simulationsmodell für die Gleichverteilung der Luft [Kiesling C. 2012, S. 51]	37
Abbildung 6-13: Ergebnis der Gleichverteilung der Luft bei 300 °C [Kiesling C. 2012, S.52-53]	38
Abbildung 6-14: Ergebnis der Gleichverteilung der Luft bei 800 °C [Kiesling C. 2012, S.54]	39
Abbildung 6-15: Modellierung	39
Abbildung 6-16: Modell des Stacks mit 30 Zellen	40
Abbildung 6-17: Längsschnitt durch den Stack	41
Abbildung 6-18: Bauteile mit Netz einer Brennstoffzelleneinheit	42
Abbildung 6-19: Massenstromdefinition der Luft	45
Abbildung 6-20: Grenzflächen Luft-Kanalwand	46
Abbildung 6-21: Stirnfläche mit Wärmeübergang	47
Abbildung 6-22: Zwischenergebnis Temperaturfeld.....	47
Abbildung 6-23: Temperaturfeld des Stacks nach 1,5% der Gesamtzeit	48
Abbildung 6-24: Temperaturfeld des Stacks nach 9% der Gesamtzeit	48
Abbildung 6-25: Temperaturfeld des Stacks nach 22% der Gesamtzeit	49
Abbildung 6-26: Stabilisierungszeitpunkt des Temperaturfeldes	49
Abbildung 6-27: Temperaturfeld des Stacks nach 28% der Gesamtzeit	50
Abbildung 6-28: Temperaturfeld des Stacks nach 60% der Gesamtzeit	50
Abbildung 6-29: Temperaturfeld des Stacks nach 100% der Gesamtzeit	51
Abbildung 6-30: Längsschnitt durch den Stack nach 9% der Gesamtzeit	51
Abbildung 6-31: Längsschnitt durch den Stack nach 28% der Gesamtzeit	52
Abbildung 6-32 (links): Temperaturfeld der Zellen nach 9% der Gesamtzeit	52
Abbildung 6-33 (rechts): Temperaturfeld der Zellen nach 28% der Gesamtzeit	52
Abbildung 6-34 (links): Der mittlere Interkonnektor (rot) innerhalb des Stacks	53
Abbildung 6-35 (rechts): Gewählte Punkte am mittleren Interkonnektor.....	53

Abbildung 6-36: Zeitliche Entwicklung der Wandtemperaturen des mittleren Interkonnektors beim Heizen.....	53
Abbildung 6-37: Zeitliche Entwicklung der Wandtemperaturen des mittleren Interkonnektors beim Abkühlen	54
Abbildung 6-38: Verwendeter Messpunkt für Validierung der Simulation [links: Kusnezoff M. 2011, S. 18].....	55
Abbildung 6-39 (links): Zur Validierung verwendeter Bauteil „Luft“	55
Abbildung 6-40 (rechts): Zur Validierung verwendeter Knoten am Bauteil „Luft“	55
Abbildung 6-41: Vergleich von Messung mit Simulation beim Heizen	56
Abbildung 6-42: Vergleich von Messung mit Simulation beim Abkühlen.....	56
Abbildung 6-43: Koppelung mit der Spannungssimulation.....	57
Abbildung 6-44: Knotenmatrix	57
Abbildung 6-45: Knoten mit größter Temperaturdifferenz	58
Abbildung 6-46: Selektion der Zeitschritte.....	59
Abbildung 7-1: Simulation der Spannungen	59
Abbildung 7-2: Modell des Stacks mit 30 Zellen für die Spannungssimulation	60
Abbildung 7-3: Eine Brennstoffzelleneinheit in der Spannungssimulation.....	61
Abbildung 7-4: Fixierung des Stacks.....	62
Abbildung 8-1: Ergebnisse und Diskussion.....	64
Abbildung 8-2:Spannungsverlauf für gewählten Knoten am Interkonnektor.....	64
Abbildung 8-3: Vergleichsspannung des Stacks bei Punkt 1	65
Abbildung 8-4: Vergleichsspannung des Stacks bei Punkt 2	65
Abbildung 8-5: Vergleichsspannung des Stacks bei Punkt 3	66
Abbildung 8-6: Vergleichsspannung an 3 Interkonnektor-Knoten.....	66
Abbildung 8-7: Maximale Hauptnormalspannung an 3 Interkonnektor-Knoten.....	67
Abbildung 8-8: Minimale Hauptnormalspannung an 3 Interkonnektor-Knoten.....	68
Abbildung 8-9: Temperaturverlauf von 3 Interkonnektor-Knoten	68

Abbildung 8-10: Verschiebungen von 3 Interkonnektor-Knoten	69
Abbildung 8-11: Vergleich vorderer Knoten an Interkonnektor und Zelle	69
Abbildung 8-12: Vergleichsspannung an 3 Zell-Knoten	70
Abbildung 8-13: Maximale Hauptnormalspannung an 3 Zell-Knoten.....	70
Abbildung 8-14: Minimale Hauptnormalspannung an 3 Zell-Knoten	71
Abbildung 8-15: Temperaturverlauf von 3 Zell-Knoten	71
Abbildung 8-16: Verschiebungen von 3 Zell-Knoten.....	72
Abbildung 8-17: Spannungsbereichsergebnisse aller Interkonnektoren.....	73
Abbildung 8-18: Spannungsbereichsergebnis zweier Knoten an der Auslassseite	73
Abbildung 8-19: Spannungsverläufe von Knoten 2047	74
Abbildung 8-20: Spannungsverläufe von Knoten 2051	74
Abbildung 8-21: Interkonnektor mit höchsten Bereichsergebnissen	75
Abbildung 8-22: Detail der Knoten am Interkonnektor	75
Abbildung 8-23: Spannungsverlauf von Knoten 1949 am rechten Rand	76
Abbildung 8-24: Spannungsverlauf von Knoten 2298 am linken Rand	76
Abbildung 8-25: Von Mises Vergleichsspannung über alle Zellen	77
Abbildung 8-26: Maximale Hauptnormalspannung über alle Zellen	78
Abbildung 8-27: Minimale Hauptnormalspannung über alle Zellen.....	79
Abbildung 8-28: Zelle mit größter maximalen Hauptnormalspannung	80
Abbildung 8-29: Spannungsverlauf des Knotens mit größtem Zug.....	80
Abbildung 8-30: Maximale Hauptnormalspannung in der Zellebene	81
Abbildung 8-31: Größte minimale Hauptnormalspannung.....	82
Abbildung 8-32: Spannungsverlauf des Knotens mit größtem Druck	82
Abbildung 8-33: Querschubspannungen in XZ-Richtung aller Zellen.....	83
Abbildung 8-34: Querschubspannungen in YZ-Richtung aller Zellen.....	84

Abbildung 8-35: Querschubspannungen in XZ-Richtung über Elementdicke in der Zelle mit den maximalen Querschubspannungen in XZ-Richtung (2 Layer)	85
Abbildung 8-36: Querschubspannungen in XZ-Richtung über Elementdicke in der Zelle mit den maximalen Querschubspannungen in XZ-Richtung (3 Layer)	85
Abbildung 8-37: Querschubspannungen in YZ-Richtung über Elementdicke in der Zelle mit den maximalen Querschubspannungen in YZ-Richtung (2 Layer)	86
Abbildung 8-38: Querschubspannungen in YZ-Richtung über Elementdicke in der Zelle mit den maximalen Querschubspannungen in YZ-Richtung (3 Layer)	87
Abbildung 8-39: Maximale Hauptnormalspannung in der Anodenschicht	88
Abbildung 8-40: Minimale Hauptnormalspannung in der Anodenschicht	88
Abbildung 8-41: Querschubspannung in XZ-Richtung in der Anodenschicht	89
Abbildung 8-42: Querschubspannung in YZ-Richtung in der Anodenschicht	89
Abbildung 8-43: Maximale Hauptnormalspannung in der Elektrolytschicht	90
Abbildung 8-44: Minimale Hauptnormalspannung in der Elektrolytschicht.....	90
Abbildung 8-45: Querschubspannung in XZ-Richtung in der Elektrolytschicht	91
Abbildung 8-46: Querschubspannung in YZ-Richtung in der Elektrolytschicht.....	91
Abbildung 8-47: Maximale Hauptnormalspannung in der Kathodenschicht.....	92
Abbildung 8-48: Minimale Hauptnormalspannung in der Kathodenschicht	92
Abbildung 8-49: Querschubspannung in XZ-Richtung in der Kathodenschicht	93
Abbildung 8-50: Querschubspannung in YZ-Richtung in der Kathodenschicht	93
Abbildung 8-51: Maximale Hauptnormalspannung mit Detail des meistbelasteten Knotens.....	94
Abbildung 8-52: Spannungsverlauf des meistbelasteten Knotens.....	94
Abbildung 8-53: Maximale Hauptnormalspannung mit Detail des Knotens an der Einlasseite.....	95
Abbildung 8-54: Spannungsverlauf des Knotens an der Einlasseite.....	95
Abbildung 8-55: Maximale Hauptnormalspannung mit Detail des Knotens an der Auslasseite.....	96
Abbildung 8-56: Spannungsverlauf des Knotens an der Auslasseite.....	96

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Brennstoffzellen-Typen [Voigt, Höller, Küter 2007, S. 21]	7
Tabelle 3-1: Newton-Côtes-Gewichte [Celigoj C. 1998, S. 4.3]	18
Tabelle 6-1: Fehlerabschätzung.....	44

Literaturverzeichnis

Abaqus 2010: *Abaqus 6.10 Online Documentation*, Dassault Systèmes Simulia

AVL List et al. 2012: *FFG Projektproposal*, Graz

Celigoj C. 1998: *Methode der Finiten Elemente*, Vorlesungsskript, Version 2.1, Technische Universität Graz

Celigoj C. 2004: *Festigkeitslehre*, Vorlesungsskript, Version 4.1, Technische Universität Graz

Czichos H., Habig K.H. 2010: *Tribologie-Handbuch*, 3. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden

EG&G 2004: *Fuel Cell Handbook*, 7. Edition, U.S. Department of Energy, Office of Fossil Energy, West Virginia/USA

Ettler M. 2009: *Einfluss von Reoxidationszyklen auf die Betriebsfestigkeit von anodengestützten Festoxid-Brennstoffzellen*, Band 36, Forschungszentrum Jülich GmbH, Jülich

Fz-juelich 2012: <http://www2.fz-juelich.de/ief/ief-1/index.php?index=38>, 13.12.2012

Geitmann Sven 2012: *Energiewende 3.0 Mit Wasserstoff und Brennstoffzellen*, 3. Auflage, Hydrogeit Verlag, Germany

IKTS Fraunhofer 2012: <http://www.ikts.fraunhofer.de>, 27.12.2012

Karl J. 2006: *Dezentrale Energiesysteme*, 2. Auflage, Oldenbourg Verlag, München

Kiesling C. 2012: *Aufwärmprozess einer Brennstoffzelle*, Diplomarbeit, AVL-List, Graz

KIT (Karlsruher Institut für Technologie) 2012: http://www.iwe.kit.edu/mitarbeiter_softc.php, 13.12.2012

Klein B. 2012: *FEM Grundlagen und Anwendung der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau*, 9. Auflage, Springer Vieweg Verlag, Wiesbaden

Kusnezoff M. 2011: *SOFC20: CFY-Stack und modulares Konzept für Leistungsklasse > 10 kW*, Fraunhofer IKTS Mikro- und Energiesysteme, Berlin

Nagel F-P. 2008: *Electricity from wood through the combination of gasification and solid oxide fuel cells*, Dissertation (ETH Zürich, no. 17856), Zürich

Nguyen-Xuan Thinh 2011: *Optimierung eines Leichtbaudesigns für ein SOFC-Brennstoffzellenstack*, Reihe Energie und Umwelt, Band 118, Forschungszentrum Jülich GmbH, Jülich

Ogniwa-paliwowe 2012: <http://ogniwa-paliwowe.info/sofc.php>, 11.12.2012

Plansee 2012: http://www.plansee.com/en/News-Archive-204_1069.htm, 28.Nov.2012

Qu J. et al. 2006: *An integrated approach to modeling and mitigating SOFC failure*, Georgia Tech, Atlanta

ThyssenKrupp 2010: *Crofer® 22 APU*, Werkstoffdatenblatt Nr. 4146, ThyssenKrupp VDM GmbH, Werdohl

Voigt C., Höller S., Küter U. 2007: *Brennstoffzellen im Unterricht*, 2. Auflage, Hydrogeit Verlag, Kremmen

Winkler W. 2008: *Internationale Entwicklungen und Perspektiven von Brennstoffzellen*, in: VDI Wissensforum GmbH (Hrsg): *Brennstoffzelle*, VDI-Berichte 2036, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, S. 15-33