



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Masterarbeit

Jakob Büsch

Modellbasierte Entwicklung von Modulen für Stacks tubulärer Redox-Flow-Batteriezellen

*Fakultät Technik und Informatik
Department Maschinenbau und Produktion*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Mechanical Engineering and
Production Management*

Jakob Büsch

**Modellbasierte Entwicklung von
Modulen für Stacks
tubulärer Redox-Flow-Batteriezellen**

Masterarbeit eingereicht im Rahmen der Masterprüfung

im Studiengang Nachhaltige Energiesysteme im Maschinenbau
am Department Maschinenbau und Produktion
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Erstprüfer: Prof. Dr. Thorsten Struckmann
Zweitprüfer: Prof. Dr. Achim Schmidt

Abgabedatum: 10.11.2023

Zusammenfassung

Jakob Büsch

Thema der Arbeit

Modellbasierte Entwicklung von Modulen für Stacks tubulärer Redox-Flow-Batteriezellen

Stichworte

Redox-Flow-Batterie, RFB, VRFB, RFB Stack, hydraulische Modellierung, tubuläre Zellen, Entwurf Stack

Kurzzusammenfassung

In dieser Arbeit wird die Entwicklung eines Stacks aus 50 tubulären Vanadium-Redox-Flow-Batteriezellen beschrieben. Der Stack erfüllt einen Kompromiss aus Montage- und Verschaltungsfreundlichkeit gegen Bauraum- und Materialeffizienz. Die Komponenten der Versorgungsmodule werden in einer geometrisch flexiblen, materialeffizienten und mittels Spritzguss fertigmachen Sandwichbauweise ausgearbeitet. Zum Prototypen-Stack wird der Bauraumbedarf pro Zelle um 87% und der Materialeinsatz pro Zelle um 94% reduziert. Mit der Einbeziehung des hydraulischen Modells in die Entwicklung wird eine Versorgungsabweichung von 0,9% und ein Druckverlustanteil von 1,8% realisiert.

Jakob Büsch

Title of the paper

Model-Based Development of Modules for Stacks of Tubular Redox Flow Battery Cells

Keywords

redox flow battery, RFB, VRFB, RFB stack, hydraulic modeling, tubular cell, stack design, fluid dynamic

Abstract

In this work, the development of a stack consisting of 50 tubular vanadium redox flow battery cells is described. The stack achieves a compromise between ease of assembly and interconnection, and space and material efficiency. The components of the electrolyte supply modules are designed in a geometrically flexible, material-efficient, and injection-moldable sandwich construction. Against the prototype stack, the space requirement per cell is reduced by 87%, and the material usage per cell is reduced by 94%. By integrating the hydraulic model into the development, a supply deviation of 0.9% and a pressure loss fraction of 1.8% are achieved.

Inhalt

| | |
|--|-----|
| Symbolverzeichnis | III |
| Abkürzungsverzeichnis | IV |
| Tabellenverzeichnis..... | IV |
| Abbildungsverzeichnis | V |
| 1 Einleitung..... | 1 |
| 2 Grundlagen | 3 |
| 2.1 Redox-Flow Batterien | 3 |
| 2.2 Strömungsmechanik - Hydraulische Grundlagen in RFB | 7 |
| 3 Stand der Technik | 10 |
| 3.1 Aufbau der tubulären Zellen | 10 |
| 3.2 Aufbau und Funktion des Basis-Moduls | 11 |
| 4 Experimentelle Erstellung einer Datenbasis als Grundlage des hydraulischen Modells | 13 |
| 4.1 Grundlagen und Ablauf der Versuche | 13 |
| 4.2 Vorbereitung der Versuche | 16 |
| 4.2.1 Kalibrierung der Drucksensoren | 16 |
| 4.2.2 Überprüfung der Pumpleistung..... | 20 |
| 4.2.3 Bestimmung der Viskosität des Elektrolyten | 20 |
| 4.2.4 Entwicklung eines Moduls für eine Zelle | 23 |
| 4.3 Ermittlung der hydraulischen Widerstände der Basis-Module | 25 |
| 4.3.1 Modul TXM1 – hydraulischer Widerstand mit Wasser und V3,5..... | 25 |
| 4.3.2 Modul TXM3 - hydraulischer Widerstand mit V3,5 und SoC50 | 28 |
| 4.3.3 Modul TXM2 - hydraulischer Widerstand bei SoC50..... | 30 |
| 4.4 Einzelzellen - Ermittlung des hydraulischen Widerstands | 31 |
| 4.5 Einfluss der Köpfe auf hydraulischen Widerstand der Zellen..... | 35 |
| 4.6 Ermittlung hydraulischer Widerstand der Modulplatten | 39 |
| 5 Entwicklung der hydraulischen Stack-Modelle..... | 42 |
| 5.1 Modellierung der Zelle | 42 |
| 5.2 Modellierung von Dummy-Zellen..... | 46 |
| 5.3 Modellierung der Zellköpfe | 48 |
| 5.4 Modellierung der Modulplatten..... | 50 |
| 5.5 Modellierung des Basis-Moduls | 51 |
| 6 Entwicklung des Stacks tubulärer Redox-Flow-Batteriezellen | 54 |
| 6.1 Ziele der Stack-Entwicklung..... | 54 |
| 6.2 Entwicklungsprozess..... | 56 |

| | | |
|----------|--|----|
| 6.2.1 | Lösungsansätze für Teilprobleme | 56 |
| 6.2.2 | Erstellung und Evaluierung von Konzeptideen | 58 |
| 6.2.3 | Betrachtung der Anordnung der Zellen im Stack..... | 64 |
| 6.2.4 | Modellierung und Auslegung der Hydraulik..... | 68 |
| 6.3 | Entwurfsbeschreibung Ziel-Stack TXS50..... | 71 |
| 6.3.1 | Geometrische Ausgestaltung..... | 71 |
| 6.3.2 | Hydraulische Modellierung des Gesamtsystems | 74 |
| 6.3.3 | Konzept der Montage | 77 |
| 6.3.4 | Vergleich mit Zielvorgabe | 78 |
| 6.3.5 | Kritische Bewertung und Verbesserungsansätze..... | 79 |
| 7 | Zusammenfassung und Fazit | 80 |
| 8 | Literatur- und Quellenverzeichnis | 82 |
| Anhang A | | 84 |
| Anhang B | | 91 |
| Anhang C | | 97 |

Symbolverzeichnis

| | |
|-----------------------|---|
| A | Fläche; durchströmte Fläche |
| b | Breite rechteckiger Strömungskanal |
| d | Durchmesser |
| d_f | Faserdurchmesser eines Filzes |
| f_L | Faktor der Längenskalierung der Zell-Modellierung |
| f_{Sym} | Faktor der Kreissymmetrie der Zell-Modellierung |
| g | Gravitation |
| Δh | Höhendifferenz |
| h | Höhe rechteckiger Strömungskanal |
| K | Korrekturfaktor Hagen-Poiseuille für rechteckige Rohrquerschnitte |
| L | Länge Strömungskanal |
| Δp | Druckdifferenz |
| p_{corr} | Korrigierter Messwert des Drucksensors |
| r | Radius |
| R_{ges} | Gesamtwiderstand im elektrischen Ersatzschaltbild |
| R_I | Einzelwiderstand im elektrischen Ersatzschaltbild |
| Re | Reynoldszahl |
| s_{hPa} | Messwerte Drucksensor ausgegeben in hPa |
| s_{mA} | Messsignal Drucksensor ausgegeben in mA |
| t_{fifc} | Eindringtiefe des Filz in den Flow Channel |
| \dot{V} | Volumenstrom |
| x_0 | Statischer Regressionsparameter |
| x_1 | Linearer Regressionsparameter |
| x_2 | Quadratischer Regressionsparameter |
| Z | Komponentenspezifischer hydraulischer Widerstand |
| Z_{lin} | Linearer Komponentenfaktor des hydraulischen Widerstands |
| Z_{qu} | quadratischer Komponentenfaktor des hydraulischen Widerstands |
| $Z(t_{fifc})$ | Hyd. Widerstands des Zell-Modells in Abhängigkeit der Eindringtiefe |
| $Z_{zelle}(t_{fifc})$ | Hyd. Widerstand einer Zelle in Abhängigkeit der Eindringtiefe |
| ρ | Dichte des Fluids |
| ϵ | Porosität |
| ζ | Widerstandsbeiwert bei Umlenkung von Fluiden |
| η | dynamische Viskosität |
| κ | Permeabilität |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|--------|--|
| DAZ | Druckabfallzelle |
| FC | Flow Channel |
| IDC | Dummy der inneren Halbzelle (Inner Dummy Cell) |
| IHC | Innere Halbzelle (inner half cell) |
| OCV | Open Circuit Voltage |
| ODC | Dummy der äußeren Halbzelle (Outer Dummy Cell) |
| OHC | Äußere Halbzelle (outer half cell) |
| P# | Drucksensor mit der Nr.# |
| PP | Polypropylen |
| RFB | Redox-Flow Batterie |
| SoC50 | State of Charge 50% |
| t_fifc | Eindringtiefe des Filz in den Flow Channel |
| V3,5 | Unformierter Vanadium-Elektrolyt |

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| Tabelle 1: Überprüfung der Pumpleistung - Messwerte und Korrekturparameter..... | 20 |
| Tabelle 2: Dynamische Viskositäten von V3,5 und Permeabilität des verwendeten Filzes aus Viskositätsabgleich mit der Druckabfallzelle..... | 22 |
| Tabelle 3: Anschlussbelegung der Einzelmodule | 24 |
| Tabelle 4: Ergebnisse der Untersuchung von TXM1 mit Wasser und V3,5 | 28 |
| Tabelle 5: Ergebnisse der Untersuchung von TXM3 mit V3,5 und bei SoC50 | 29 |
| Tabelle 6: Vergleich der hydraulischen Widerstände der Halbzellzeiten der Basis-Module | 31 |
| Tabelle 7: Hydraulische Widerstände der Einzelzellen zusammengefasst..... | 35 |
| Tabelle 8: Regressionsparameter und hydraulischer Einfluss der Köpfe | 38 |
| Tabelle 9: Regressionsparameter der Messung des hydraulischen Widerstands der Modulplatten | 40 |
| Tabelle 10: Berechnete lineare und quadratische Einflussfaktoren des hydraulischen Widerstands der Modulplatten | 40 |
| Tabelle 11: Min-, Max- und Mittelwerte der hyd. Widerstände und Parameter der Permeabilität der Dummy-Zellen | 47 |
| Tabelle 12: Volumenströme und Abweichungen der Halbzellen des Basis-Moduls TXM1 ermittelt aus dem hydraulischen Modell | 53 |
| Tabelle 13: Abgeleiteten Kennzahlen des Basis-Moduls..... | 55 |
| Tabelle 14: Zielwerte der abgeleiteten Kennzahlen für die Entwicklung des Stacks..... | 55 |
| Tabelle 15: Auslegung Branch: Anteile Druckverlust Branch in Abhängigkeit der Maße | 70 |
| Tabelle 16: Comsol Modell TXS50 - Analyse der Druckverlustanteile..... | 75 |
| Tabelle 17: Abgeleitete Kennzahlen des Ziel-Stacks TXS50..... | 78 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 1: Schematischer Aufbau einer All-Vanadium RFB [18] | 3 |
| Abbildung 2: Aufbau einer planaren Zelle mit Flow Channel für flow-by-Versorgung [1]..... | 5 |
| Abbildung 3: Schematische Darstellung einer planaren multi-Stack RFB mit Bezeichnung der Versorgungsleitungen [24]..... | 6 |
| Abbildung 4: Aufbau der tubulären Zelle: 1. Äußerer Stromsammler; 2. Äußere Grafitfilz-Elektrode; 3. Membran; 4. Innere Grafitfilz-Elektrode; 5. Innerer Stromsammler..... | 10 |
| Abbildung 5: Darstellung der tubulären Zelle mit Zellköpfen bestehend aus: 1. innerer Kopf; 2. äußerer Kopf; 3. Membran-Einsatz; 4. O-Ring; 5. Vergussstellen | 11 |
| Abbildung 6: "Basis-Modul" – Prototypen-Stack fünf tubulärer Zellen aus Forschungsprojekt StaTuR. | 12 |
| Abbildung 7: Aufbau des Prüfstands mit: 1. Testobjekt; 2. Drucksensoren am Inlet; 3. Drucksensoren am Outlet; 4. Tanks; 5. Schlauchpumpe; 6 Position Fluidtemperatur-Messung; 7 Position Umgebungstemperatur-Messung..... | 14 |
| Abbildung 8: Darstellung der Messwerte des Drucksensors P1 und Differenzen gegen den Referenzwert | 17 |
| Abbildung 9: Darstellung der Messwerte des Drucksensors P1 und Differenzen gegen den Referenzwert mit korrigierter Messwertauswertung | 17 |
| Abbildung 10: Darstellung der Messwerte der Drucksensoren P1 bis P4 der zweiten Kalibrierung | 18 |
| Abbildung 11: Darstellung der Messwerte der Drucksensoren P1 bis P4 der zweiten Kalibrierung mit Korrektur..... | 19 |
| Abbildung 12: Darstellung der Abweichungen der korrigierten Messwerte der Drucksensoren vom Referenzwert | 19 |
| Abbildung 13: Druckdifferenzen über Volumenstrom in der Druckabfallzelle mit Wasser und V3,5 | 22 |
| Abbildung 14: Technische Zeichnung zur Bearbeitung der Modulplatten des Basis-Moduls zur Erstellung des Einzelmoduls | 23 |
| Abbildung 15: Einzelmodul mit Zelle in Stützkonstruktion | 24 |
| Abbildung 16: Basis-Modul TXM1 im Prüfstand während der Untersuchung mit V3,5 | 25 |
| Abbildung 17: Untersuchung TXM1 mit Wasser - Plot der Messwerte und Druckdifferenzen | 26 |
| Abbildung 18: Untersuchung TXM1 mit V3,5 - Plot der Messwerte und Druckdifferenzen..... | 27 |
| Abbildung 19: Untersuchung TXM3 mit V3,5 und SoC50 - Plot Messwerte und Druckdifferenzen..... | 29 |
| Abbildung 20: Untersuchung TXM2 bei SoC50 -Plot der Messwerte und Druckdifferenzen | 30 |
| Abbildung 21: Einzelzelle mit Einzelmodul eingebaut im Prüfstand | 32 |
| Abbildung 22: Untersuchung Einzelzelle SC1 - Plot der Messdaten und Druckdifferenzen der ersten Messung mit Fehler von P3 | 33 |
| Abbildung 23: Untersuchung Einzelzelle SC1 - Plot der Messdaten und Druckdifferenzen der zweiten Messung mit Systemdruck..... | 33 |
| Abbildung 24: Visualisierung der Ergebnisse des hydraulischen Widerstandes der Einzelzellen..... | 34 |
| Abbildung 25: Skizze zur Ausführung der Kopfzellen | 36 |
| Abbildung 26: Kopfzelle HC3 nach Beschädigung | 36 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 27: Untersuchung Einfluss Köpfe - Plot der Messwerte aus zweiter Messung mit Systemdruck | 37 |
| Abbildung 28: Untersuchung Einfluss Köpfe - Plot der Druckdifferenzen und Regression über die Messwerte | 37 |
| Abbildung 29: Aufbau zur Untersuchung des hydraulischen Widerstands der Modulplatten im Prüfstand | 39 |
| Abbildung 30: Hydraulischer Widerstand der Modulplatten - Plot der Druckdifferenzen und Regressionen der Messwerte | 40 |
| Abbildung 31: Vernetzte Modelle der Halbzellen bestehend aus einem Flow Channel und ein Kreissegment Filz mit Eindringung in Flow Channel: links IHC; rechts OHC | 43 |
| Abbildung 32: Kennlinien des hyd. Widerstands und des Volumenstromanteils im Filz der Halbzellen in Abhängigkeit der Eindringtiefe des Filzes aus Comsol-Modell..... | 44 |
| Abbildung 33: Strömungsgeschwindigkeiten im Querschnitt des IHC-Modells bei einer Eindringtiefe des Filzes von 0,3 mm und 0,45 mm..... | 45 |
| Abbildung 34: Strömungsgeschwindigkeiten im Querschnitt des OHC-Modells bei einer Eindringtiefe des Filzes von 0,35 mm und 0,45 mm..... | 46 |
| Abbildung 35: Dummy der inneren Halbzelle mit Vernetzung | 47 |
| Abbildung 36: Dummy der äußeren Halbzelle mit Vernetzung | 47 |
| Abbildung 37: Parametrisierung IHC-Dummy - Graph des hyd. Widerstands in Abhängigkeit der Permeabilität | 48 |
| Abbildung 38: Parametrisierung OHC-Dummy - Graph des hyd. Widerstands in Abhängigkeit der Permeabilität | 48 |
| Abbildung 39: Hydraulisches Modell Kopf OHC mit Peripherie | 49 |
| Abbildung 40: Vernetztes Model Kopf OHC mit Peripherie | 49 |
| Abbildung 41: Modell Zellkopf - Kennlinie der Druckdifferenz über den Volumenstrom | 49 |
| Abbildung 42: Hydraulisches Modell der Modulplatten | 50 |
| Abbildung 43: Vernetztes hydraulisches Modell der Modulplatten..... | 50 |
| Abbildung 44: Modell Modulplatten - Kennlinie der Druckdifferenz über den Volumenstrom..... | 51 |
| Abbildung 45: Vernetztes hydraulisches Modell der äußeren Halbzellseite des Basismoduls..... | 52 |
| Abbildung 46: Design-Ebenen der Entwicklung des Stacks mit markierten Lösungspfaden..... | 57 |
| Abbildung 47: Design-Tree zur strukturierten Entwicklung von Konzeptideen | 59 |
| Abbildung 48: Konzeptstudie "Konzept DS" - demontierbare Sandwichbauweise | 60 |
| Abbildung 49: Konzeptstudie "Konzept DV" - demontierbare vertikale Trennung | 60 |
| Abbildung 50: Konzeptstudie "Konzept Simon" - vereinigte Mischbauweise | 61 |
| Abbildung 51: Konzeptstudie "Konzept VS" - vereinigte Sandwichbauweise | 62 |
| Abbildung 52: Konzeptstudie "Konzept VV" - vereinigte vertikale Trennung | 63 |
| Abbildung 53: Studien zum Grundflächenbedarf von versetzten Zellanordnungen | 65 |
| Abbildung 54: Konzept zur Anordnung und Versorgung der Zellen im Stack TXS50 reduziert auf einen Elektrolytfluss in der Draufsicht | 67 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 55: Comsol-Modell zur hydraulischen Auslegung des Branchs..... | 68 |
| Abbildung 56: Vernetztes Comsol-Modell zur hydraulischen Auslegung des Branchs | 68 |
| Abbildung 57: Comsol-Modell hydraulische Auslegung des TXS50-Branchs..... | 69 |
| Abbildung 58: Vernetztes Comsol-Modell hydraulische Auslegung des TXS50-Branchs | 69 |
| Abbildung 59: Auslegung Branch TXS50 - Unterschiede der Strömungsgeschwindigkeit in den Manifolds der Varianten Branch d10 und Branch d8..... | 70 |
| Abbildung 60: CAD-Modell Ziel-Stack TXS50..... | 71 |
| Abbildung 61: CAD-Modell TXS50 – Schnitt durch einen Manifold: 1 Äußere Verteilerplatte; 2 Trennplatte; 3 Innere Verteilerplatte; 4 OHC-Kopf; 5 Membran-Kopf; 6 IHC-Kopf..... | 72 |
| Abbildung 62: Comsol-Modell Hydraulik der inneren Halbzellseite des TXS50 | 74 |
| Abbildung 63: Vernetzung des Comsol-Modells Hydraulik der inneren Halbzellseite des TXS50 | 74 |
| Abbildung 64: Graphische Darstellung der Strömungsgeschwindigkeiten im Modell TXS50 x/y..... | 76 |
| Abbildung 65: Graphische Darstellung der Strömungsgeschwindigkeiten im Modell TXS50 y/z..... | 76 |

1 Einleitung

Am 20. März 2023 wurde der Synthesebericht zum sechsten IPCC-Sachstandsbericht veröffentlicht. Darin wird der aktuelle Stand der Klimaforschung zusammengefasst und bewertet. Der Bericht fordert eine Halbierung der Globalen Treibhausgasemissionen bis 2030 und das Erreichen der globalen netto Null CO₂-Emission bis 2050, um das 1,5-Grad Ziel einzuhalten [14]. Der Anteil fossiler Energieträger an der globalen Energieerzeugung lag im Jahr 2022 bei 80% [20]. Der Umstieg auf erneuerbare Energien wie Wind- und Solarenergie ist mit der Herausforderung der volatilen Energieerzeugung verbunden. Für eine stabile und ausreichende Energieversorgung durch erneuerbare Energien werden Speichersysteme benötigt, um Residuallasten zu nutzen und Dunkelflauten sowie Lastspitzen zu kompensieren. Die erforderlichen Speichersysteme müssen nach [16] die folgenden Eigenschaften erfüllen:

1. Skalierbarkeit und Lastüberbrückung: Bereitstellung von Leistungen von über 100 MW über Zeiträume von mehreren Stunden bis Tagen
2. Kurze Reaktionszeiten: Sicherung der Netzstabilität und Stromqualität durch Lastmanagement
3. Hohe Langzeitspeicherkapazität: Geringe Selbstentladung und damit hohe Effizienz der Langzeitspeicherung
4. Geringe Kosten: Wettbewerbsfähigkeit auch gegenüber fossilen Technologien, um mit großen Marktanteilen Skaleneffekte zu nutzen
5. Hohe Systemeffizienz
6. Hohe Lebensdauer und Zuverlässigkeit: Lange Nutzungszeiträume und geringe Ausfallzeiten wirken sich positiv auf die Kosten aus
7. Geringe Umweltauswirkung: Nachhaltigkeit, Verfügbarkeit und Recyclebarkeit über den gesamten Produktlebenszyklus

Redox-Flow-Batterien haben als elektrochemische Energiespeicher das Potential die oben genannten Anforderungen zu erfüllen, damit einen signifikanten Beitrag zum Gelingen des Umstiegs auf erneuerbare Energien zu leisten und langfristig zur Eindämmung des Klimawandels und den damit verbundenen Folgen für die Menschheit beizutragen.

Das Forschungsprojekt X-Energy der HAW Hamburg ist ein Verbund aus Wissenschaft und Wirtschaft, bestehend aus 22 Teilprojekten, mit dem Ziel Lösungen für ein Energiesystem mit 100% erneuerbarer Energie zu entwickeln [11]. Das Teilprojekt TuRoX, in dem diese Masterarbeit eingegliedert ist, befasst sich mit der Etablierung tubulärer Redox-Flow-Batteriesysteme [10]. Tubuläre Zellen bieten im Vergleich mit der herkömmlichen planaren Bauweise das Potential, sowohl Fertigungskosten als auch Materialaufwand zu verringern. Damit ist der tubuläre Aufbau der elektrochemischen Zelle ein vielversprechender Ansatz zur Verbesserung und Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit von Redox-Flow-Batteriesystemen [18].

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung im industriellen Maßstab fertiger Stacks tubulärer Redox-Flow-Batteriezellen. Der Stack ist material- und bauraumeffizient zu gestalten und die kostengünstige Spritzgussfertigung zu gewährleisten. Die Entwicklung des Ziel-Stacks mit 50 tubulären Zellen und einer Leistung von 100 W basiert auf dem Prototypen-Stack des

Vorgängerprojekts StaTuR. Die Aufgabenstellung besteht aus drei Unterzielen. Mittels experimenteller Untersuchungen ist eine Datenbasis der hydraulischen Kennwerte des Prototypen-Stacks und dessen Komponenten zu erstellen. Darauf aufbauend sind Fluid-Flow-Simulationsmodelle zu modellieren und mit der erstellten Datenbasis zu kalibrieren und zu validieren. Es sind mehrere Konzepte zum konstruktiven Design des Stacks zu erstellen, technisch-wirtschaftlich zu bewerten und daraus das am besten geeignete Konzept auszuwählen. Das ausgewählte Konzept ist anschließend bis zur Funktionsfähigkeit und Fertigbarkeit auszuarbeiten und das hydraulische Modell auf das Konzept zu übertragen, um einen minimierten Druckverlust und eine gleichmäßige Versorgung der Zellen sicherzustellen.

Die Arbeit beginnt mit der Darlegung der benötigten Grundlagen zu Redox-Flow-Batterien mit Schwerpunkt auf Vanadium-Redox-Flow-Batterien sowie der Hydraulik des Versorgungssystems (Kapitel 2). Anschließend wird der aktuelle technische Stand, sprich der Aufbau der tubulären Zelle und des Prototypen-Stacks beschrieben (Kapitel 3) und die experimentelle Erstellung der hydraulischen Datenbasis dargelegt (Kapitel 4). Darauf aufbauend wird die Erstellung der hydraulischen Modelle des Prototypen-Stacks und deren Kalibrierung und Validierung beschrieben (Kapitel 5). Weiterführend werden die Entwicklung und der Entwurf des Ziel-Stacks dargestellt (Kapitel 6). Abschließend werden die wichtigsten Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und bewertet (Kapitel 7).

2 Grundlagen

Als Einführung ins Thema werden in diesem Kapitel die Grundlagen der Redox-Flow Batterie (RFB) dargestellt. Es wird auf den grundlegenden Aufbau und Funktionsweise von RFB eingegangen und die Vor- und Nachteile dieser Technologie diskutiert. Im speziellen werden All-Vanadium Redox-Flow Batterien (VRFB) behandelt, da es sich bei dem zu entwickelnden Batterie-Stack um eine VRFB handelt. Weiterhin wird auf die herkömmliche planare Stack-Bauweise eingegangen. Im zweiten Abschnitt werden die hydraulischen Grundlagen der RFB dargelegt. Dabei wird auf die verwendeten Ansätze der Strömungsmechanik und Einflüsse auf Druckverluste eingegangen, wie sie in dieser Arbeit angewendet werden.

2.1 Redox-Flow Batterien

RFB sind elektrochemische Energiespeicher. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass die elektrochemischen Komponenten der Redox-Reaktion in Elektrolyten gelöst sind. Anders als bei herkömmlichen Batteriespeichern ist es somit möglich, den Ort der reversiblen Redox-Reaktion, die elektrochemische Zelle, und den Speicher der nicht unmittelbar beteiligten Reaktionspartner zu trennen. Die Elektrolyten, die nach Halbzelleseite als Anolyt und Katholyt bezeichnet werden, werden in Tanks gelagert und während des Betriebs von Pumpen durch die Zellen gefördert. Der schematische Aufbau einer VRFB ist in Abbildung 1 dargestellt.

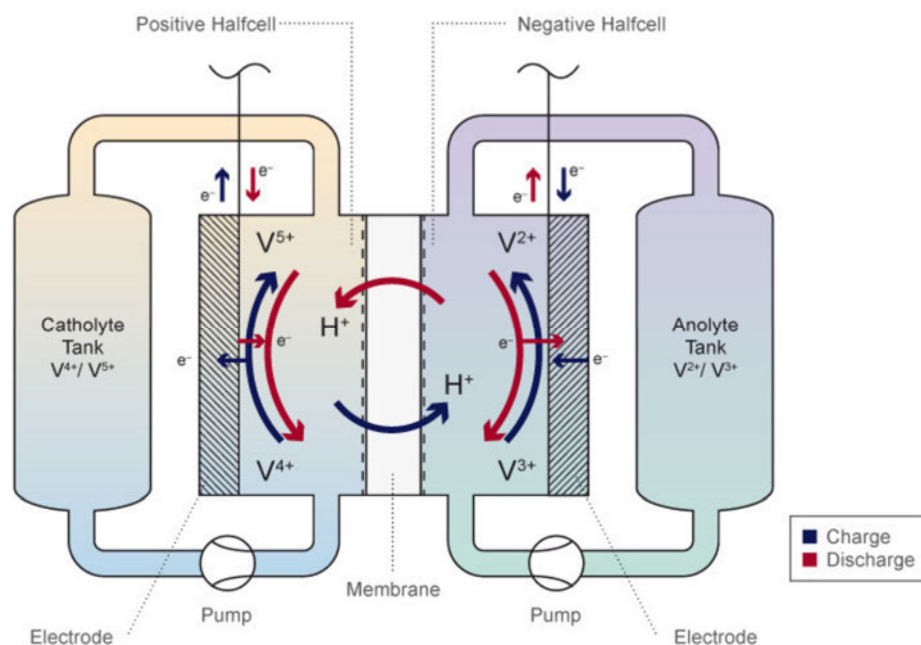


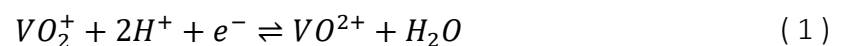
Abbildung 1: Schematischer Aufbau einer All-Vanadium RFB [18]

Aus diesen Systemeigenschaften ergeben sich einige Vorteile für dieses System. Die Kapazität und Leistung der Batterie lassen sich unabhängig voneinander skalieren und den Anforderungen anpassen. Durch die Nutzung herkömmlicher Tanks als Elektrolytspeicher lassen sich auch große Speicher günstig realisieren. Damit zeigt sich ein Vorteil gegenüber

Wasserstoff, da für dessen Speicherung spezielle Tanks benötigt werden. Zudem werden in der Wasserstoff-Technologie mit dem Elektrolyseur und der Brennstoffzelle zwei Systeme für die Speicherung die Bereitstellung des Stroms benötigt. RFB schaffen dies in einem System. Die Leistung lässt sich unabhängig davon über die Anzahl der Zellen skalieren. Die örtliche Trennung der Reaktionspartner sorgt dafür, dass keine Selbstentladung der Batterie stattfindet, was eine Langzeitspeicherung ermöglicht. Die Entladungsvorgänge in der Zelle ohne Betrieb der Pumpen sind vernachlässigbar. Zudem besteht dadurch keine Gefahr eines Thermal Runaway wie bei herkömmlichen Batteriespeichern. Durch sehr kurze Reaktionszeiten des Systems, können RFB sowohl für Lastmanagement als auch Netzstabilität sorgen. Darüber hinaus weisen RFB eine hohe Zyklenzahl und Lebensdauer auf. Diese Systemeigenschaften führen dazu, dass bei RFB mit geringen Investitions- und Betriebskosten zu rechnen ist [16]. Das bisher größte Projekt einer RFB ist eine VRFB mit 100MW/400MWh und Kosten von 298 Millionen US\$ [6]. Ein Vergleich der Kennzahlen unterschiedlicher Speichersysteme wird in [1] vorgenommen. Nachteile von RFB sind geringe Energiedichten, wodurch sie für mobile Anwendungen ungeeignet sind und zusätzliche Verluste durch den Betrieb der Pumpen. Dennoch erreichen RFB Effizienzwerte von 70-90% [16]. Ein weiterer Nachteil der VRFB ist der eingeschränkte Temperaturbereich von 15 – 35 °C [1].

Eine Klassifizierung von RFB ist anhand des Phasenwechsels der Elektrolyten möglich. Bei klassischen RFB findet kein Phasenwechsel der Elektrolyten statt. Bei Typ 1 hybriden RFB findet bei einer Halbzellreaktion ein Phasenwechsel statt, bei Typ 2 hybriden RFB bei beiden [2]. Als Elektrolyten lassen sich eine Vielzahl an Kombinationen von anorganischen und organischen Stoffen verwenden. Die meist untersuchten und erfolgreich in die Praxis überführten RFB basieren auf Vanadium-Elektrolyten. Gegenstand dieser Arbeit ist eine VRFB. Die folgenden Ausführungen sind deshalb auf diesen Elektrolyten beschränkt.

Abbildung 1 zeigt neben dem Aufbau auch die Lade- und Entladeprozesse einer VRFB. Das mit Schwefelsäure gelöste Schwermetall Vanadium zeichnet sich dadurch aus, dass es vier Oxidationsstufen einnehmen kann und somit der gleiche Elektrolyt in einer Batterie sowohl den Anolyt als auch den Katholyt bilden kann. Die vier Oxidationsstufen sind V^{2+} , V^{3+} , VO^{2+} (bzw. V^{4+}) und VO_2^+ (bzw. V^{5+}). Dabei sind V^{2+}/V^{3+} das Redox-Paar der negativen Halbzelle und V^{4+}/V^{5+} das Redox-Paar der positiven Halbzelle. Die positive Halbzellreaktionen lautet:



Die negative Halbzellreaktion lautet:



Mit dem Halbzellpotential von 1,0 V der Kathodenseite und -0,26 V der Anodenseite hat die Zelle eine Standard-OCV von 1,26 V. In der Praxis beläuft sich diese auf 1,4 V [1].

In der unbehandelten Grundform des Elektrolyten liegt das gelöste Vanadium in VO^{2+} bzw. V^{4+} vor. Durch einen Aufbereitungsprozess werden daraus der Anolyt und der Katholyt erzeugt. In einem möglichen Prozess der Aufbereitung wird V^{3+} zu zwei Teilen in die positive Halbzelle und zu einem Teil in die negative Halbzelle gefüllt. Durch den Ladeprozess der Batterie bilden sich entsprechend zwei Teile V^{5+} auf der positiven Seite und ein Teil V^{2+} auf der negativen Seite.

Weitere Möglichkeiten der Aufbereitung sind in [16] skizziert. Für die Anwendung im Projekt TuRoX wird bereits aufbereiteter Elektrolyt mit einer Vanadiumkonzentration von 1,6 mol/l bezogen. In diesem unformierten Elektrolyten liegen zu gleichen Anteilen V^{3+} und V^{4+} vor. Der unformierte Elektrolyt wird in dieser Arbeit als V3,5 bezeichnet. In dem Prozess der Formierung wird V3,5 zu gleichen Anteilen in die Halbzellen gefüllt und durch den Ladeprozess werden V^{3+} und V^{4+} separiert. Dadurch, dass beide Halbzellseiten die gleichen Komponenten enthalten, ergibt sich ein großer Vorteil der VRFB: Der Crossover-Effekt durch die Membran führt zu keiner Kontaminierung und damit irreversibler Alterung der Elektrolyten oder Zelle.

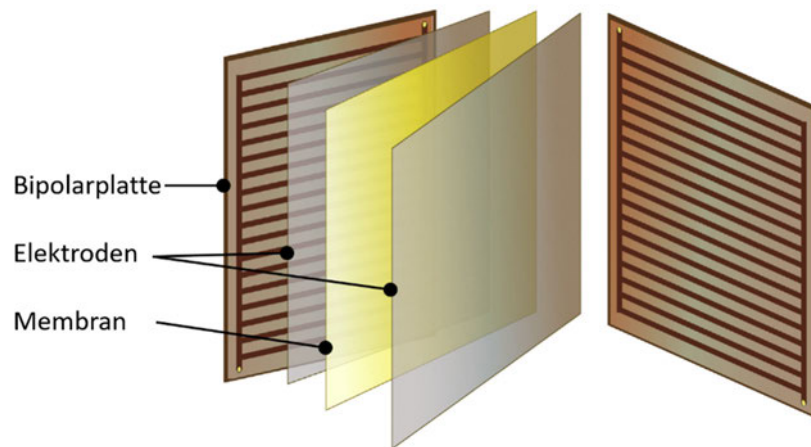


Abbildung 2: Aufbau einer planaren Zelle mit Flow Channel für flow-by-Versorgung [1]

Der herkömmliche planare Aufbau der elektrochemischen Zelle einer RFB, ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Halbzellseiten der RFB sind durch eine semipermeable Membran voneinander getrennt, welche in der Theorie nur den Ladungsaustausch mit H^+ -Ionen gestattet. In der Praxis finden aber Crossover-Effekte statt, bei der in Abhängigkeit der verwendeten Elektrolyten eine fortschreitende Vermischung bzw. Kontaminierung auftritt. Die elektrochemischen Reaktionen beider Halbzellen finden an der Oberfläche der Elektroden statt. Poröse Elektroden sorgen für eine große Reaktionsfläche, müssen aber dennoch eine gute elektrische Leitfähigkeit aufweisen und einen guten Stofftransport ermöglichen. Weiter werden Bipolarplatten als Stromsammler verbaut, welche den elektrischen Kontakt zwischen den porösen Elektroden und dem äußeren Stromkreis bzw. der nächsten Zelle herstellen. Da die meisten RFB mit stark sauren oder alkalischen Elektrolyten betrieben werden, stellen sich entsprechende Anforderungen an die Materialauswahl der Zelle. Daher werden oft Graphit-Polymer Platten und Filze verwendet [2]. Um eine hohe Leistung der Zelle zu erhalten, muss die Elektrode kontinuierlich mit neuen Elektrolyten versorgt werden. Möglich ist eine flow-through-Versorgung, bei der die Elektrolyten durch den Filz hindurch gepumpt werden. Etabliert hat sich jedoch die flow-by-Versorgung, wie sie in Abbildung 2 dargestellt ist. In die Bipolarplatten sind Flow Channel eingelassen durch die die Elektrolyten gepumpt werden. Damit kann eine gleichmäßige Versorgung des Filzes bei geringem Druckverlust und damit geringerer Pumpleistung erzielt werden.

Ein weiteres Versorgungskonzept, welches in dieser Arbeit betrachtet wird, ist der Interdigitated Flow. Bei diesem Konzept sind ebenfalls Flow Channel vorgesehen, welche jedoch nicht durchgängig sind. Stattdessen sind diese abwechselnd nur auf der Einfluss- oder Ausflusseite geöffnet. Damit wird ein Durchströmen des Filzes erzwungen. Die Flow Channels sorgen für eine gleichmäßige, verlustarme Verteilung des Elektrolyten über den Filz.

Um RFB-Stacks zu bilden, werden die planaren Zellen in Reihe hintereinandergeschaltet. Dabei dienen die Bipolarplatten als elektrische Verbindung zwischen der negativen Halbzelle einer Zelle und der positiven Halbzelle der nächsten Zelle. Eine schematische Darstellung einer RFB mit mehreren planaren Stacks ist in Abbildung 3 dargestellt.

Eine Herausforderung dieses Systems ist die in Teilen komplexe und notwendigerweise gleichmäßige Versorgung der Halbzellen mit Elektrolyten. Zudem weist diese Bauweise große Dichtflächen auf. Zudem treten durch die Reihenschaltung Shunt Currents auf. Shunt Currents sind Verlustströme durch den Elektrolyten, welche sich durch den in Reihenschaltung auftretenden Spannungsunterschied der Zellen bilden.

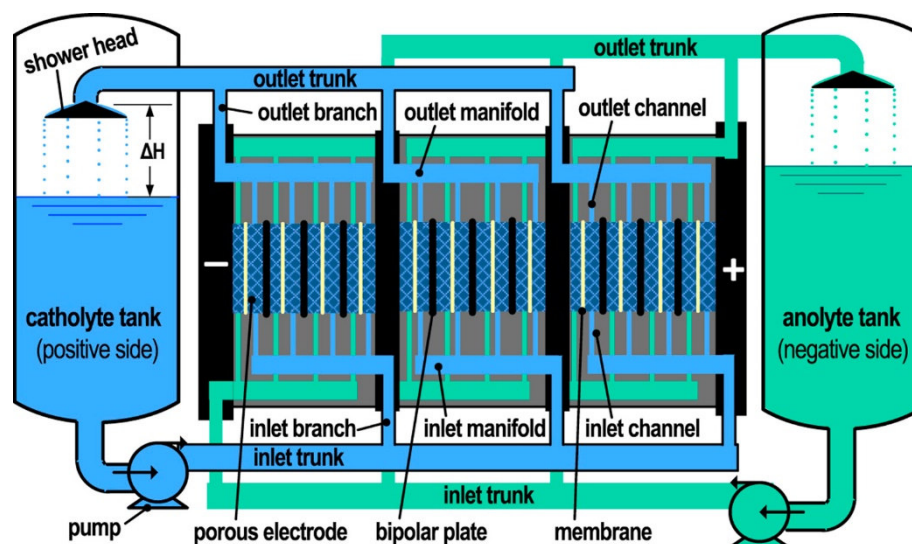


Abbildung 3: Schematische Darstellung einer planaren multi-Stack RFB mit Bezeichnung der Versorgungsleitungen [24]

Da in dieser Arbeit speziell die Hydraulik der RFB behandelt wird, wird an dieser Stelle besonders auf die Bezeichnungen der Versorgungsleitungen eingegangen, wie sie in Abbildung 3 dargestellt sind und in dieser Arbeit verwendet werden. Alle Leitungen, die vom Tank zur Zelle führen, werden als Inlet und entsprechend andersherum als Outlet bezeichnet. Der Trunk ist die Hauptleitung zu den Tanks, von dem die einzelnen Stacks über den Branch versorgt werden. Innerhalb des Stacks befindet sich der Manifold, welcher über den Channel die Zellen einzeln versorgt. Im Versorgungssystem erhöhen kleine Leitungsdurchmesser, lange Strecken und viele Umlenkungen den hydraulischen Widerstand. Große Leitungsdurchmesser und kurze Strecken zwischen den Zellen erhöhen jedoch den Verlust durch Shunt Currents. Die Höhe der Shunt Currents ist zudem abhängig von der elektrischen Leitfähigkeit des Elektrolyten und dem auftretenden Spannungsgefälle. Dadurch tritt ein exponentielles Wachstum der Shunt Currents mit der Anzahl der Zellen in Reihenschaltung auf [7]. Die Verluste durch die erforderliche Pumpleistung und die auftretenden Shunt Currents betragen zusammen 3-5% [16].

2.2 Strömungsmechanik- Hydraulische Grundlagen in RFB

Die Hydraulik von RFB beeinflusst nicht nur die Verlustleistung durch die benötigten Pumpen und auftretende shunt currents, sondern auch die elektrochemische Performance der Zellen. Die Versorgungsleitungen haben Einfluss auf die erforderliche Pumpleistung und große Durchmesser minimieren diese Verlustleistung. Jedoch bilden sich durch größere Leitungsdurchmesser wiederum stärkere Shunt Currents als gegensätzliche Verlustleistung aus. In den Zellen werden die porösen Elektroden, als Beispiel Grafitfilze, mit Elektrolyt versorgt. Dabei ist eine gute und gleichmäßige Durchflutung des Filzes notwendig, um hohe Stromdichten zu erreichen. Entgegengesetzt dazu stellen Grafitfilze hohe hydraulische Widerstände dar, sodass ein Optimum zwischen ausreichender Versorgung der Zelle mit Elektrolyten und möglichst geringem Druckabfall über die Zelle angestrebt werden muss. Darüber hinaus muss in einem Stack die gleichmäßige Versorgung von allen Zellen gewährleistet werden.

In dieser Arbeit wird sich speziell mit der hydraulischen Seite der RFB beschäftigt. Daher werden folgend die strömungsmechanischen Ansätze mit Fokus auf die Druckdifferenz dargestellt und wie sie als Grundlagen weiterer Betrachtungen dienen. Zudem wird als Bedingung eine stets stationäre laminare Strömung im System angenommen. Um diese Bedingung abschätzen zu können werden auch die Ansätze zur Berechnung der Reynoldszahlen dargelegt.

Statischer Druck

Die einfachste Ursache einer Druckdifferenz Δp in einer Leitung ist der statische Druck resultierend aus der Höhendifferenz Δh , der Dichte des Fluids ρ und der Gravitation g . Es gilt der Zusammenhang nach Gleichung 3.

$$\Delta p = \rho \cdot g \cdot \Delta h \quad (3)$$

Gerade Rohrströmung nach Hagen-Poiseuille

Eine weitere Ursache für Druckdifferenzen über Leitungen sind Reibungseffekte mit der Wand. Um diesen Einfluss abzubilden, wird für freie Rohrströmungen das Gesetz von Hagen-Poiseuille angewandt. Dabei gilt für gerade Leitungen mit kreisförmigen Rohrquerschnitt Gleichung 4 [8].

$$\Delta p = \frac{\eta \cdot 8L}{\pi \cdot r^4} \cdot \dot{V} \quad (4)$$

Dabei ist η die dynamische Viskosität des Fluids, L die Länge des Strömungskanals, r der Radius des Strömungsquerschnitts und \dot{V} der Volumenstrom. Abweichend dazu gilt für rechteckige Rohrquerschnitte Gleichung 5:

$$\Delta p = \frac{\eta \cdot 12L}{K \cdot h^3 \cdot b} \cdot \dot{V} \quad (5)$$

h ist die Höhe des Strömungskanals, b die Breite und K ein Korrekturfaktor, der sich aus diesen berechnet. Die Reynoldszahl Re für die freie Rohrströmung wird mit Gleichung 6 berechnet. Als Richtwert für laminare Strömung gilt [8]:

$$Re = \frac{\rho \cdot d}{\eta} \cdot \frac{\dot{V}}{A} < 2300 \quad (6)$$

Hier ist d der charakteristische Durchmesser und A die durchströmte Fläche. Es ist in den Gleichungen 4 und 5 ein linearer Zusammenhang des Druckverlusts abhängig von der dynamischen Viskosität, geometrischer Größen und des Volumenstroms zu erkennen.

Strömungsverluste durch Umlenkung

Neben Reibung sorgen auch Umlenkungen des Fluids zu Strömungsverlusten. Dabei ist die Trägheit des Fluids die Ursache der Verluste. Es gilt nach [4]:

$$\Delta p = \rho \cdot \zeta \cdot \frac{\dot{V}^2}{2} \quad (7)$$

Der Widerstandsbeiwert ζ ist ein von Geometrie und Umlenkungswinkel abhängiger Wert, der beispielweise für spezielle Rohrleitungssegmente aus Tabellenwerten entnommen werden kann [4]. Im Gegensatz zum Einfluss der Rohreibung, sind Umlenkungsverluste quadratisch vom Volumenstrom und linear von der Dichte abhängig.

Strömung in der porösen Elektrode

Die Strömung durch poröse Medien wie den Elektroden aus Grafitfilz, lässt sich für geringe Reynoldszahlen mit dem Gesetz nach Darcy darstellen. Laminare Strömung herrscht in porösen Medien bei Reynoldszahlen zwischen 1 bis 10, teilweise 100. Bei $Re < 1$ herrscht Kriechströmung. Das Gesetz nach Darcy gilt für Kriechströme und laminare Strömung mit geringen Reynoldszahlen [18]. Gesetz nach Darcy lautet:

$$\Delta p = \eta \cdot \frac{L}{\kappa \cdot A} \cdot \dot{V} \quad (8)$$

Hier wird die Permeabilität κ des porösen Mediums eingeführt. Diese Größe beschreibt die Durchlässigkeit eines Mediums und liegt für Grafitfilze von RFB bei Werten von $1e-10 \text{ m}^2$ bis $10e-10 \text{ m}^2$ [24]. Für den Druckverlust ist hier wieder ein linearer Zusammenhang mit der Materialgröße der Viskosität, geometrischen Größen und dem Volumenstrom zu erkennen. Die Reynoldszahl der Strömung in einem Filz berechnet sich nach [18] mit folgender Gleichung:

$$Re = \frac{\dot{V} \cdot \rho \cdot d_f}{\eta (1 - \epsilon) A} \quad (9)$$

Eine weitere Kenngröße von porösen Medien ist die Porosität ϵ , welche das Verhältnis von offenem Volumen zu geschlossenem Volumen angibt. Der Faserdurchmesser d_f ist eine Kenngröße für Filze und wird für das verwendete Grafitfilz mit $9 \mu\text{m}$ angenommen [19].

Flow-by-Elektrode

Wie im vorangegangenen Kapitel erwähnt, ist die flow-by-Versorgung für RFB üblich. Dabei sind in die an den Elektroden anliegenden Bipolarplatten Flow Channel eingelassen, sodass eine gleichmäßige Versorgung der Elektroden bei geringem Druckverlust erzielt wird (siehe

Abbildung 2). Da sich der Volumenstrom zwischen dem Flow Channel und dem Filz aufteilt, tritt in den Zellen eine gemischte Strömung auf. Es wird angenommen, dass der Großteil des Volumenstroms durch den Flow Channel fließt, sodass die poröse Strömung für eine Betrachtung der Strömungseigenschaften über die Reynoldszahl vernachlässigt werden kann. Für eine genaue Betrachtung und Koppelung der elektrochemischen Eigenschaften an die Hydraulik des Systems ist die Durchströmung des Filzes jedoch von besonderer Bedeutung.

3 Stand der Technik

Das Forschungsprojekt TuRoX, in dem diese Masterarbeit eingegliedert ist, beschäftigt sich mit der Weiterentwicklung von tubulären Redox-Flow-Batterien. Grundsätzlich ist der tubuläre Aufbau von elektrochemischen und chemischen Reaktoren ein vielversprechender Ansatz zur Verbesserung bestehender planarer Systeme da tubuläre Strukturen sich durch ein höheres Verhältnis von Oberfläche zu Volumen auszeichnen. Zudem sind günstige Fertigungsverfahren, wie beispielsweise das Strangpressen; anwendbar und Dichtlängen können reduziert werden [18]. Damit bieten tubuläre Zellen das Potential sowohl Fertigungskosten als auch Materialaufwand zu verringern.

Im Forschungsprojekt StaTuR (2018-2022) wurde ein Prototyp eines Stacks aus tubulären Zellen für Redox-Flow-Batterien entwickelt. Das darauf aufbauende Forschungsprojekt TuRoX hat das Ziel den Reifegrad dieser Technologie zu erhöhen. Diese Masterarbeit beschäftigt sich mit dem Teilvorhaben der hydraulischen Weiterentwicklung des Prototypen-Stacks aus StaTuR, welcher im Folgenden als Basis-Modul bezeichnet wird.

In diesem Kapitel werden zunächst die tubulären Zellen in ihrem Aufbau vergleichend zu einer planaren Zelle beschrieben. Anschließend werden der Aufbau und die Funktionsweise des Basis-Moduls dargelegt, um daraus die Ziele der Weiterentwicklung abzuleiten.

3.1 Aufbau der tubulären Zellen

Das Kernstück des zu entwickelnden RFB-Stacks sind die tubulären Zellen. Abbildung 4 zeigt das obere Ende einer solchen Zelle. Von außen nach innen sind zu sehen: der äußere Stromsammler mit acht Flow Channels aus einem PP-Grafit-Gemisch (1), die äußere Elektrode aus Grafitfilz (2), die Ionen-Austausch-Membran (3), die innere Elektrode aus Grafitfilz (4) und der innere Stromsammler aus einem PP-Grafit Gemisch, mit ebenfalls acht Flow Channel und eingelassenem Kupferdraht (5).

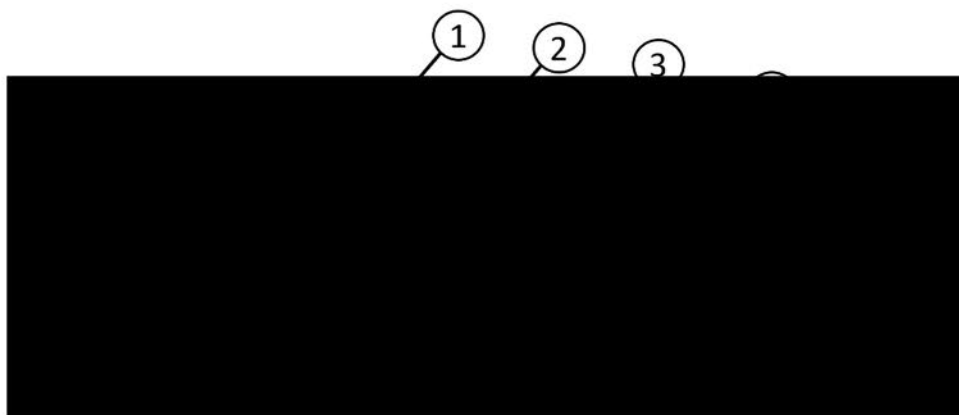


Abbildung 4: Aufbau der tubulären Zelle: 1. Äußerer Stromsammler; 2. Äußere Grafitfilz-Elektrode; 3. Membran; 4. Innere Grafitfilz-Elektrode; 5. Innerer Stromsammler

Der Kupferdraht des inneren Stromsammlers ragt nur am oberen Ende der Zelle Heraus und dient zur Kontaktierung der inneren Halbzelle. Abgesehen davon ist die Zelle symmetrisch

aufgebaut. Auf dem äußeren Stromsammelr wird zur Kontaktierung eine Kupferfolie über leitfähigen Kleber aufgebracht. Die geraden Flow Channel der Stromsammelr ermöglichen die flow-by-Versorgung der Elektroden. Der äußere Stromsammelr hat eine Länge von [REDACTED] und einen Außendurchmesser von [REDACTED] der innere hat eine Länge von [REDACTED] und einen Außendurchmesser von [REDACTED]. Die Membran hat eine Länge von [REDACTED] und schließt mit der inneren Elektrode ab. Die tubuläre weist damit die gleichen Bestandteile einer planaren Zelle auf, siehe Abbildung 2, und auch die Funktionen der Komponenten sind gleich. Die tubuläre Zelle ist über die gesamte Länge dicht, sodass sie nur an den Kopfenden abgedichtet werden muss. Es wird für jede Halbzelle je einseitig ein Einlass und ein Auslass benötigt, sodass sich drei Dichtstellen ergeben: die äußere Halbzelle (OHC) zur Umgebung, innere Halbzelle (IHC) zur Umgebung und OHC zur IHC. Die Dichtung und Versorgung mehrerer tubulärer Zellen werden in dem zu entwickelnden Stack realisiert. Als Grundlage dieser Entwicklung dient das Basis-Modul, welches im folgenden Kapitel erklärt wird.

3.2 Aufbau und Funktion des Basis-Moduls

Das im Vorprojekt StaTuR entwickelte Basis-Modul bildet ein Stack aus fünf tubulären Zellen. Zur Integration der Zellen in den Stack werden diese mit Köpfen versehen und diese dann in die Verteilerplatten, genannt Modulplatten, eingepresst.

Zellköpfe

In Abbildung 5 ist eine tubuläre Zelle mit Zellköpfen dargestellt. In der Außenansicht sind der innere Kopf (1), der äußere Kopf (2) und die O-Ringe (4) dargestellt. Im Schnitt erkennt man den Membran-Einsatz (3) und die Stellen, an denen die Kopfelemente und die Zelle vergossen werden (5).



Abbildung 5: Darstellung der tubulären Zelle mit Zellköpfen bestehend aus: 1. innerer Kopf; 2. äußerer Kopf; 3. Membran-Einsatz; 4. O-Ring; 5. Vergussstellen

Die OHC wird durch den inneren Kopf mit Elektrolyten versorgt und am äußeren Stromsammelr durch Verguss gegen die Umgebung abgedichtet. Die IHC wird durch den äußeren Kopf mit Elektrolyten versorgt und am Durchstoß der Zelle durch den Kopf ebenfalls durch Verguss gegen die Umgebung abgedichtet. Der Membran-Einsatz erzeugt ein Reservoir im Inneren des Kopfes, sodass die Halbzellseiten an dieser Stelle durch Verguss gegeneinander abgedichtet werden können. Die drei O-Ringe pro Zellkopf dienen im Verbund mit der Modulplatte als dichtendes Element.

Basis-Modul

Im Basis-Modul sind fünf tubuläre Zellen mit Köpfen als Stack vereinigt, wie in Abbildung 6 dargestellt. Dazu werden die fünf Zellen in die Modulplatten eingepresst, damit eine dichtende Pressung zwischen den O-Ringen und den Modulplatten entsteht. In die Modulplatten sind für jede Halbzellenseite Manifolds und Channel eingelassen, sodass die Zellen zwischen den O-Ringen mit Elektrolyten versorgt werden. Für das Einpressen müssen die Channel geschlossen werden, um eine Beschädigung der O-Ringe zu vermeiden. Deshalb sind von außen Gewindelöcher für entsprechende Einschraubstopfen vorgesehen. Nach Montage werden diese entfernt und durch die in Abbildung 6 dargestellten Stopfen ersetzt.

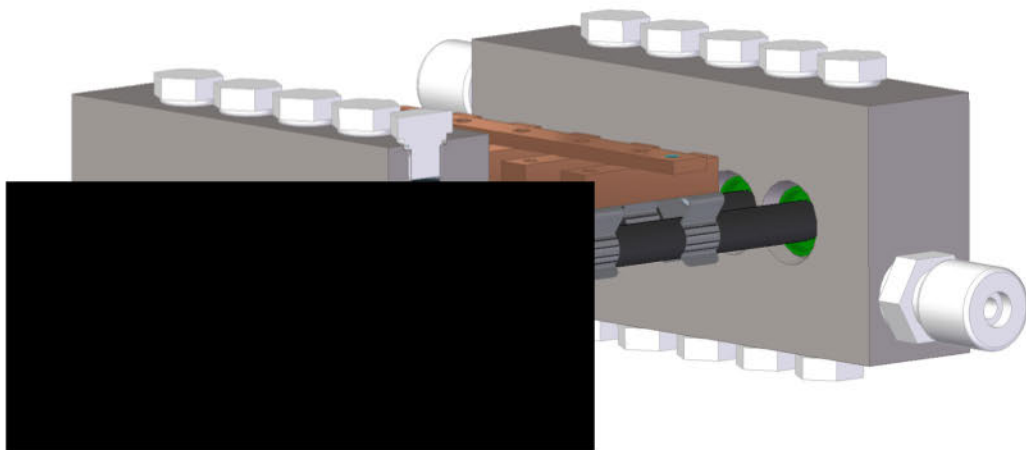


Abbildung 6: "Basis-Modul" – Prototypen-Stack fünf tubulärer Zellen aus Forschungsprojekt StaTuR

Durch die Anordnung der Ein- und Auslässe werden die Zellen mit einer Z-Durchströmung versorgt. Das heißt, dass die Zelle, welche am nächsten am Einlass sitzt, am weitesten vom Auslass entfernt ist und umgekehrt. Damit soll eine gleichmäßige Versorgung der Zellen gewährleistet werden. Als Gegensatz dazu sei hier die U-Durchströmung erwähnt. Bei dieser sind Ein- und Auslass auf einer Seite, sodass die Zellen unterschiedlich lange Leitungswege haben und durch die Leitungsverluste unterschiedlich versorgt werden.

Die elektrische Verschaltung der Zellen ist durch einzelne Stromklemmen an den äußeren Stromsammlern und einer Stromschiene an den inneren Stromsammlern realisiert, wodurch die fünf Zellen in Parallelschaltung betreiben werden. Mit einer Leistung von 2 W pro Zelle erreicht das Basis-Modul eine Leistung von 10 W. Andere Verschaltungen sind durch die Schraubverbindungen ebenfalls möglich. Die Parallelschaltung der Zellen hat den Vorteil, dass durch den gleichen Spannungsabfall über alle Zellen keine Shunt Currents auftreten.

4 Experimentelle Erstellung einer Datenbasis als Grundlage des hydraulischen Modells

Mit dem Ziel der Entwicklung eines Stacks tubulärer RFB-Zellen basierend auf einem hydraulischen Modell, wird zunächst experimentell eine Datenbasis mit hydraulischen Kennwerten der Basis-Module und Komponenten erstellt. Mit der Datenbasis werden spätere Modelle kalibriert und die Ergebnisse validiert. Das Ziel aller Messungen ist es Kennwerte des hydraulischen Widerstandes des Systems und der einzelnen Komponenten zu ermitteln und die Anteile abzuschätzen. Die Versuche werden mit Wasser durchgeführt, da für Wasser die dynamische Viskosität in Abhängigkeit der Temperatur bekannt ist. Weiter soll auch die Übertragbarkeit von Wasser auf den Elektrolyten untersucht werden. In diesem Kapitel werden das Vorgehen und die Ergebnisse der durchgeführten Versuche beschrieben.

Als Erstes werden die methodischen Ansätze, der Aufbau des Prüfstands und das allgemeine Vorgehen in den Versuchen zur Bestimmung der hydraulischen Kennwerte beschrieben. Des Weiteren werden die vorbereitenden Arbeiten behandelt und anschließend die Messungen des Druckabfalls der Module, der Einzelzellen, Kopfzellen und Modulplatten mit den Ergebnissen dargestellt.

4.1 Grundlagen und Ablauf der Versuche

In den nachfolgenden Versuchen in Kapitel 4.3 bis 4.6 werden die hydraulischen Widerstände von Modulen und Komponenten bestimmt. Dazu wird der Druck jeweils vor und hinter dem Testobjekt bei verschiedenen Volumenströmen gemessen und daraus die Druckdifferenz in Abhängigkeit zum Volumenstrom ermittelt.

In den angenommenen laminaren Strömungsbedingungen können Verluste durch Reibung und Trägheit entstehen. Bei Reibungsverlusten in einer Komponente ist der Druckabfall Δp immer abhängig von dem Volumenstrom \dot{V} , der dynamischen Viskosität η und von Komponenteneigenschaften wie durchströmte Fläche A , Länge L und Permeabilität κ . Es gilt ein linearer Zusammenhang. Da sich Komponenteneigenschaften wie der durchströmte Durchmesser innerhalb einer Komponente ändern können, werden diese zu einem komponentenspezifischen hydraulischen Widerstand Z zusammengefasst. Damit lässt sich Gleichung 8 nach Darcy vereinfacht darstellen als:

$$\Delta p = \eta \cdot \frac{L}{\kappa \cdot A} \cdot \dot{V} = \eta \cdot Z \cdot \dot{V} \quad (10)$$

Der hydraulische Widerstand Z hat die Einheit m^{-3} . Neben der Strömung durch poröse Medien lässt sich auch die freie Rohrströmung nach Hagen-Poiseuille gleichermaßen zusammenfassen und mit Z darstellen:

$$\Delta p = \eta \cdot \frac{8L}{\pi \cdot r^4} \cdot \dot{V} = \eta \cdot Z \cdot \dot{V} \quad (11)$$

Die Versuche werden mit Wasser durchgeführt. Die dynamische Viskosität von Wasser lässt sich in Abhängigkeit der Temperatur aus dem VDI-Wärmeatlas [21] als Tabellenwert ermitteln. Ist der Volumenstrom vorgegeben, die Viskosität bekannt und die Druckdifferenz gemessen, lässt sich Z bestimmen. Mit Z lässt sich somit der hydraulische Widerstand von Komponenten vergleichen, ohne dass die genauen Effekte im Inneren der Komponente bekannt sein müssen. Neben den Verlusten durch Reibung können auch Verluste durch Trägheit bei Umlenkungen entstehen. Einflussfaktoren sind hier die Dichte ρ , der Widerstandsbeiwert der Umlenkung ζ und der quadrierte Volumenstrom. Gleichung 7 lässt sich vereinfachen zu:

$$\Delta p = \rho \cdot \zeta \cdot \frac{\dot{V}^2}{2} = \rho \cdot Z_{qu} \cdot \dot{V}^2 \quad (12)$$

Auch hier lässt sich der Druckabfall in Abhängigkeit einer Fluideigenschaft, hier der Dichte, dem Volumenstrom und einer vergleichbaren Geometriekonstante Z_{qu} darstellen. Folgend wird sobald notwendig zwischen Z_{qu} als Einflussfaktor der quadratischen Abhängigkeit vom Volumenstrom und Z_{in} als Einflussfaktor der linearen Abhängigkeit vom Volumenstrom unterschieden.

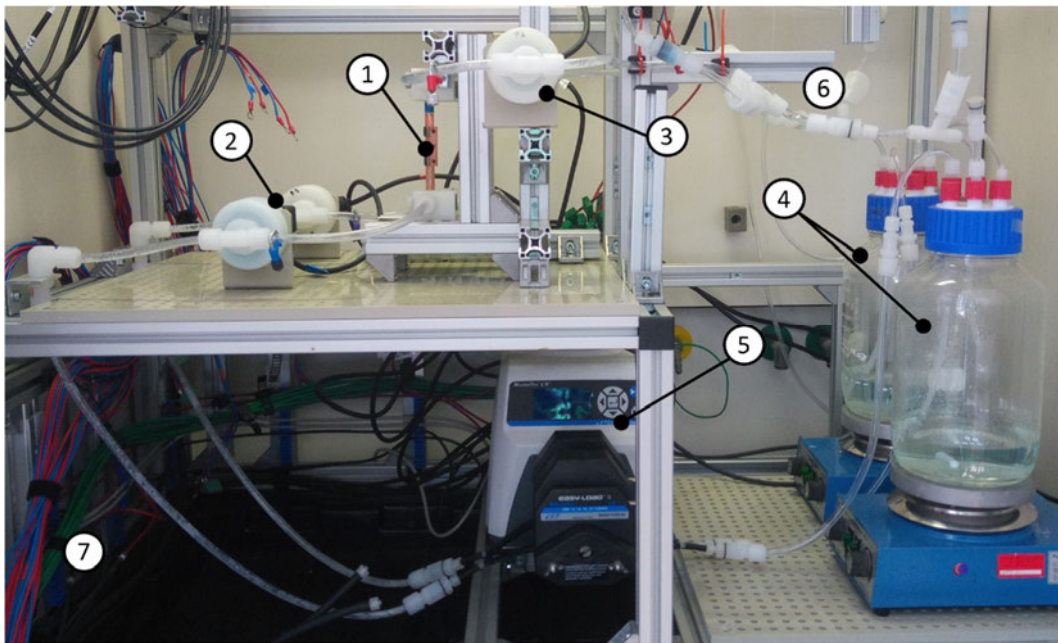


Abbildung 7: Aufbau des Prüfstands mit: 1. Testobjekt; 2. Drucksensoren am Inlet; 3. Drucksensoren am Outlet; 4. Tanks; 5. Schlauchpumpe; 6 Position Fluidtemperatur-Messung; 7 Position Umgebungstemperatur-Messung

In Abbildung 7 ist der Aufbau des Prüfstands zu erkennen. Wie für eine RFB üblich gibt es zwei Fluidkreisläufe. Diese werden parallel mit einer Schlauchpumpe von Masterflex (5) betrieben. Die Pumpe saugt das Fluid aus den Tanks (4) und pumpt es durch die Schläuche zum Testobjekt (1). Vor dem Testobjekt sind die Inlet-Drucksensoren (2) und dahinter die Outlet-Drucksensoren (3) installiert. Temperatursensoren messen die Fluidtemperatur (6) (in Abbildung 7 nicht eingebaut) und die Umgebungstemperatur (7).

Zur Bestimmung der geometrieabhängigen Größen der Komponenten werden in den folgenden Versuchen die abfallende Druckdifferenz bei der Durchströmung der Komponenten bei

unterschiedlichen Volumenströmen gemessen. Dazu wird der Volumenstrom über die Pumpe vorgegeben. Der Relativdruck in der Leitung wird direkt vor und hinter der Komponente mit zwei Drucksensoren gemessen. Die Messwerte werden sekundlich über einen Zeitraum von je 120-180 Sekunden pro Messpunkt aufgenommen. Um Ein- und Auslaufeffekte nicht einzubeziehen, werden die ersten 10% und letzten 5% der Messabschnitte verworfen. Die übrigen Messwerte werden über Korrekturfaktoren aufbereitet, welche systematische Messfehler der Drucksensoren korrigieren. Die Korrekturwerte werden in Kapitel 4.2.1 ermittelt. Über die korrigierten Messwerte des Messabschnitts wird der Mittelwert gebildet, um Druckstöße der Pumpe auszumitteln. Aus den beiden so entstehenden Werten für den Relativdruck vor und hinter der Komponente wird für jeden Messabschnitt und zugehörigen Volumenstrom die Differenz gebildet:

$$\Delta p = p_{in} - p_{out} \quad (13)$$

Da teilweise zwei Seiten einer Komponente gleichzeitig gemessen werden, werden vier Drucksensoren verwendet. Die Drucksensoren hinter der Komponente werden als P1 und P2 benannt, die vor der Komponente als P3 und P4. Es gilt:

$$\Delta p_1 = P4 - P1 \quad (14)$$

$$\Delta p_2 = P3 - P2 \quad (15)$$

Somit erhält man einen Betrag des Druckabfalls der Komponente bei zugehörigem Volumenstrom. Anschließend wird eine Regression der Druckdifferenzen über den Volumenstrom durchgeführt, um die Abhängigkeit als Funktion darzustellen und die Regressionsparameter x_i zu bestimmen. Für eine lineare Regression gilt:

$$\Delta p = x_1 \dot{V} + x_0 \quad (16)$$

Für eine Regression mit Polynom 2. Grades gilt äquivalent:

$$\Delta p = x_2 \dot{V}^2 + x_1 \dot{V} + x_0 \quad (17)$$

Der Funktionsparameter x_0 stellt dabei den statischen Druck im System dar. Aus dem Funktionsparameter x_1 wird mit Hilfe der dynamischen Viskosität der hydraulische Widerstand Z bzw. Z_{lin} berechnet. Aus dem Funktionsparameter x_2 wird mit der Dichte die geometrische Widerstandskonstante Z_{qu} berechnet (Siehe Gleichung 10 – 12).

Die Versuche werden mit Wasser als Fluid oder zum Teil mit Wasser als Referenz durchgeführt. Die dynamische Viskosität und die Dichte des bidestillierten Wassers lassen sich in Abhängigkeit der Temperatur aus Tabellenwerten ermitteln. Verwendet wird dazu der VDI-Wärmeatlas [21] und eine lineare Approximation zwischen den Tabellenwerten. Zur Bestimmung der Temperatur wird bei allen Versuchen die Umgebungstemperatur im unteren Innenraum des Prüfstandes mit PT-100 Temperaturfühlern gemessen. Zusätzlich wird bei einigen Messungen die Temperatur des Fluids hinter der Komponente und den Drucksensoren ebenfalls mit PT-100 Temperaturfühlern gemessen. Die Temperaturmesswerte werden sekundlich aufgenommen. Da über die Messungen keine Temperaturveränderungen von mehr als 1°C

gemessen werden, wird für die Ermittlung der Fluideigenschaften über die gesamte Messung der Mittelwert der Temperatur angenommen.

Die Bearbeitung und Analyse der Messdaten erfolgen mit dafür erstellten MATLAB-Programmen. Diese geben die Ergebniswerte in Tabellen bzw. Matrizen aus und stellen sie aufbereitet in Ergebnisplots dar.

4.2 Vorbereitung der Versuche

Vor den Messungen und Auswertungen der Module und Komponenten werden einige Voruntersuchungen vorgenommen. Die Vorbereitungen enthalten die Kalibrierung der Drucksensoren, die Überprüfung der Leistung der Pumpe und die Ermittlung der Viskosität des unformierten Elektrolyten (V3,5) mit Hilfe der Druckabfallzelle. Darüber hinaus wird das Einzelmodul entwickelt, mit dem die Zellen einzeln untersucht werden können.

4.2.1 Kalibrierung der Drucksensoren

Zielsetzung

Zur Bestimmung der hydraulischen Widerstände der Module und Komponenten wird der Relativdruck jeweils vor und hinter dem Testobjekt bei verschiedenen Volumenströmen gemessen und damit die Druckdifferenz in Abhängigkeit vom Volumenstrom ermittelt. Als Sensoren werden Druckmessumformer „Jumo Midas C08“ zusammen mit Membrandruckmittlern verwendet. Die Druckmessumformer haben einen Messbereich von 0 – 2500 hPa relativ. Im Datenblatt wird für diesen Sensor bei 20°C eine Messgenauigkeit von 0,5% der Messspanne angegeben. Siehe dazu Anhang A-1. Dies entspricht 12,5 hPa und wird als Referenz für die Überprüfung und Kalibrierung der Drucksensoren verwendet. Ziel der Kalibrierung ist es, die Messgenauigkeit der Drucksensoren zu überprüfen und Korrekturfaktoren zu ermitteln.

Durchführung

Die Sensoren geben ein lineares Stromsignal von 4-20 mA aus. Dieses Stromsignal wird vom Prüfstands-PC mit der vorhandenen für den Prüfstand angefertigten Software in den Messwert umgerechnet und ausgegeben. Es werden die vier Drucksensoren P1 bis P4 verwendet. Die Drucksensoren werden über eine Gasleitung an den Anschlussblock des Kalibrierungsgenerators „HovaCAL D3214-SP“ und ein manuell einstellbares Ventil angeschlossen. Der Kalibrierungsgenerator speist einen konstant geregelten Volumenstrom Stickstoffgas in die Leitung ein und misst den Absolut-Druck im Anschlussblock mit einer Messgenauigkeit von 2 hPa [13]. Über das Ventil wird der Druck variiert und somit die Messpunkte eingestellt.

Zur Auswertung wird die Differenz des jeweiligen Messwerts des Drucksensors zu dem Referenzwert des Kalibrierungsgenerators ermittelt. Da die Genauigkeit der Drucksensoren mit 12,5 hPa angegeben wird, wird dieser Betrag auch als Grenzwert für die akzeptable Abweichung der Drucksensoren gewählt.

Für die Kalibrierung werden die Messwerte des Drucksensors s_{hPa} auf die Stromsignale s_{mA} zurück gerechnet (siehe Gleichung 18). Anschließend wird eine lineare Regression des Referenzwerts über das Stromsignal des Sensors durchgeführt. Dabei erhält man die Regressionsparameter der Steigung x_1 und des Stützwerts x_0 . Mit Verwendung dieser

Regressionsparameter zur Umrechnung des Messsignals zum Messwert wird die Genauigkeit des Messwerts zu p_{corr} verbessert, wie in Gleichung 19 dargestellt.

$$s_{mA} = s_{hPa} \cdot \frac{16 \text{ mA}}{2500 \text{ hPa}} + 4 \text{ mA} \quad (18)$$

$$p_{corr} = s_{mA} \cdot x_1 + x_0 \quad (19)$$

In einer ersten Prüfung und Kalibrierung der Sensoren wurden Messwerte im Bereich bis 950 hPa aufgenommen. Die Obergrenze ist durch den Maximalmesswert des Kalibriergasgenerators bestimmt. Es werden die sechs Messpunkte 0, 50, 350, 650, 950 und 0 hPa gewählt. Siehe für die Messroutine Anhang A-2. In Abbildung 8 ist exemplarisch das Messergebnis von P1 dargestellt.

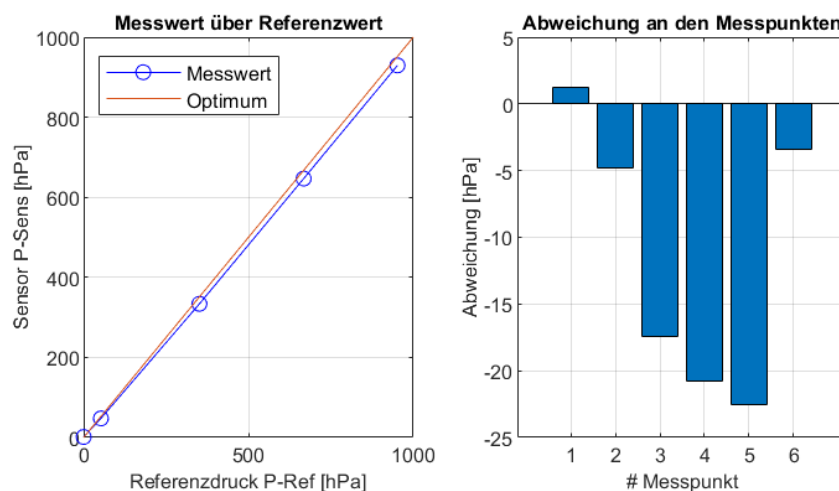


Abbildung 8: Darstellung der Messwerte des Drucksensors P1 und Differenzen gegen den Referenzwert

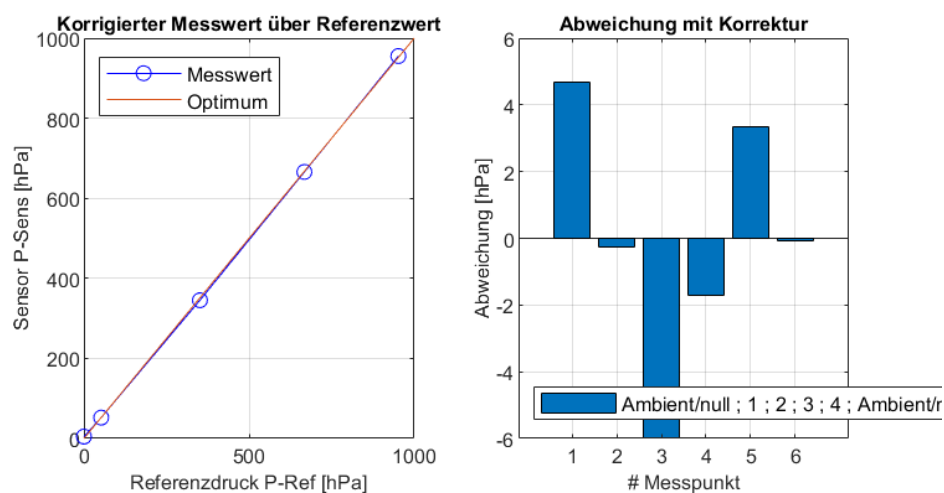


Abbildung 9: Darstellung der Messwerte des Drucksensors P1 und Differenzen gegen den Referenzwert mit korrigierter Messwertauswertung

In Abbildung 8 sind links die Messwerte von P1 über dem Referenzwert dargestellt. Die Diagonale zeigt als Optimum ein Zusammenfallen von Mess- und Referenzwert an. Rechts sind die Differenzen zwischen dem Mess- und Referenzwert aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass

P1 den Druck unterschätzt und bei 350, 650 und 950 hPa Referenzdruck eine Abweichung größer als die zulässigen 12,5 hPa aufweist.

In Abbildung 9 sind Messwerte mit den Parametern der linearen Regression korrigiert. Wie in Abbildung 8 sind in Abbildung 9 links die Messwerte über den Referenzwerten aufgetragen. Es lässt sich im Vergleich qualitativ erkennen, dass die Messwertgerade deutlich enger über dem Optimum liegt. Mit der rechten Darstellung in Abbildung 9 wird dies quantitativ bestätigt. Die Messwertabweichungen sind somit geringer als 12,5 hPa, sodass die Kalibrierung des Drucksensors über eine Nachbearbeitung der Messergebnisse erfolgreich ist.

Während der ersten Messungen wird beim Sensor P3 ein fehlerhaftes, nicht lineares Verhalten beobachtet, sodass die Messwerte dieser Messungen unbrauchbar sind. Zur Analyse des Fehlers wird eine zweite Überprüfung und Kalibrierung der Drucksensoren vorgenommen. Diese wird für den Messbereich von 0 – 200 hPa mit einer kleineren Schrittweite und wiederholten Messungen, sowie mit einer Vergleichsmessung bei 350 hPa durchgeführt.

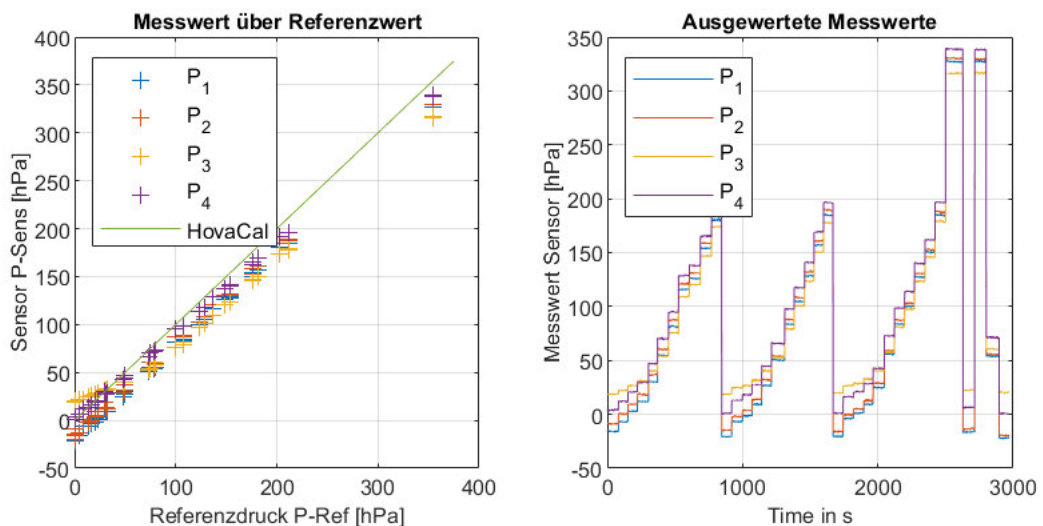


Abbildung 10: Darstellung der Messwerte der Drucksensoren P1 bis P4 der zweiten Kalibrierung

In Abbildung 10 sind rechts die bereinigten Messwerte der vier Drucksensoren aufgetragen. Aus den zu erkennenden Abschnitten werden die Mittelwerte gebildet und über dem Referenzwert des Kalibriergasgenerators aufgetragen. Die grüne Diagonale zeigt das Optimum an und dient als Orientierung. Es ist zu erkennen, dass die Sensoren unterschiedlich stark abweichen. Besonders das Verhalten von P3 ist auffällig, da dieser bei einem Druck kleiner als 50 hPa überschätzt und ab 100 hPa am stärksten unterschätzt. Anders als P3 zeigen die anderen Sensoren ein Verhalten, welches sich gut über eine Gerade annähern lässt. P3 zeigt nur bei Messwerten über 50 hPa ein lineares Verhalten. Führt man einen linearen Fit der Sensoren im Bereich 50-200 hPa durch erhält man die angepassten Messwerte in Abbildung 11.

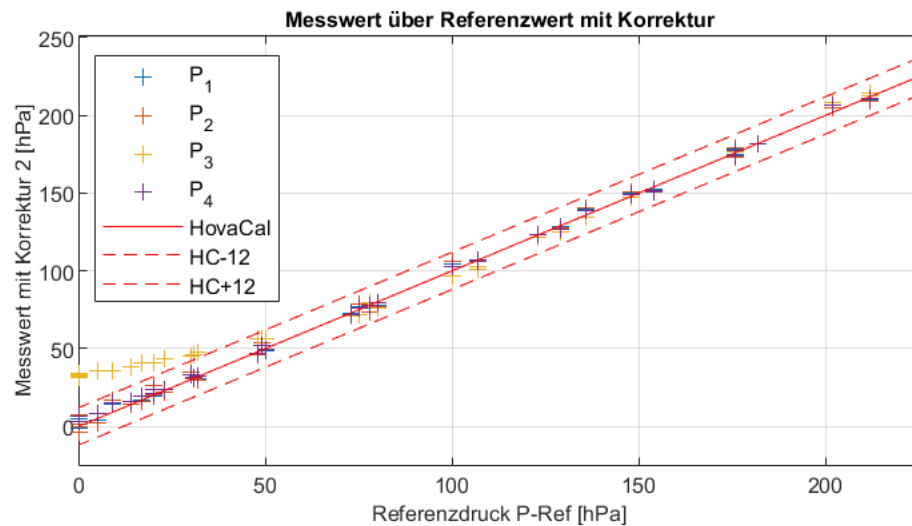


Abbildung 11: Darstellung der Messwerte der Drucksensoren P1 bis P4 der zweiten Kalibrierung mit Korrektur

In Abbildung 11 sind die korrigierten Messwerte der Drucksensoren aufgetragen. Zudem sind neben dem Optimum auch die obere und untere Toleranzgrenze dargestellt. Es ist zu erkennen, dass P1, P2 und P4 innerhalb des Toleranzbereichs liegen und ein lineares Verhalten zeigen. Nur P3 ist unterhalb von 50 hPa nicht linear und außerhalb des Toleranzbereichs.

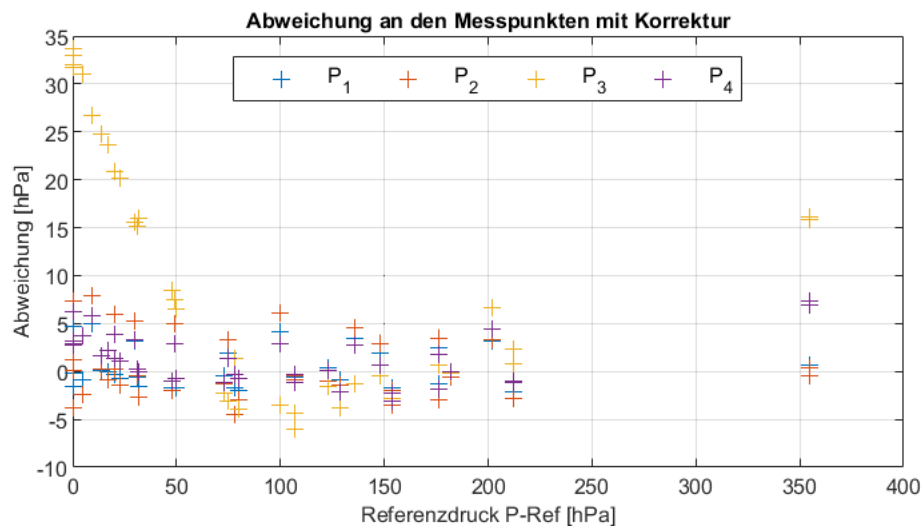


Abbildung 12: Darstellung der Abweichungen der korrigierten Messwerte der Drucksensoren vom Referenzwert

In Abbildung 12 sind die Abweichungen der Messpunkte vom Referenzwert aufgezeichnet. Hier ist quantitativ zu erkennen, dass die Sensoren P1, P2 und P4 mit der Korrektur Abweichungen von -5 bis +10 hPa aufweisen und damit erfolgreich kalibriert sind. Um eine Verwendung von P3 dennoch zu ermöglichen, wird der Arbeitsbereich von P3 auf den Bereich von 50 bis 250 hPa beschränkt. Der Minimaldruck wird in den Versuchen dadurch gewährleistet, dass ein Systemdruck von mehr als 50 hPa aufgebracht wird. Die Korrekturparameter der zweiten Kalibrierung sind im Anhang A-3 angegeben.

4.2.2 Überprüfung der Pumpleistung

In den Versuchen werden verschiedene Volumenströme vorgegeben. Dabei erfolgt die Eingabe in ml/min über die Maske des Prüfstands-Software. Die Eingabe wird in Abhängigkeit des verwendeten Schlauchdurchmessers als Drehzahl an die Masterflex Schlauchpumpe weitergegeben.

Die tatsächliche Pumpleistung wird mit Wasser für die vorgegebenen Pumpleistungen von 10 ml/min und 60 ml/min und mit V3,5 für 10 ml/min überprüft. Dazu wird die Pumpe mit der entsprechenden Vorgabe für einen gemessenen Zeitraum betrieben und das gepumpte Volumen aufgefangen. Das Volumen des aufgefangenen Fluids wird anschließend mittels eines Messzylinders mit einer Messgenauigkeit von 0,375 ml gemessen. Das gemessene Volumen wird mit dem Volumen verglichen, welches rechnerisch über den Zeitraum zu erwarten ist. Aus dem Vergleich der tatsächlichen und vorgegebenen Pumpleistung ergibt sich der Korrekturfaktor des Volumenstroms. Für Wasser wird ermittelt, dass dieser bei 1,12 liegt. Für V3,5 liegt dieser bei 1,05. Diese Faktoren werden verwendet, um in der Auswertung den Volumenstrom auf den tatsächlichen Wert zu korrigieren.

Tabelle 1: Überprüfung der Pumpleistung - Messwerte und Korrekturparameter

| Messung | 1 | | 2 | | 3 | 4 | |
|--------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Fluid | Wasser | Wasser | Wasser | Wasser | Wasser | V3,5 | V3,5 |
| Halbzelle | Positiv | Negativ | Positiv | Negativ | Positiv | Positiv | Negativ |
| Vorgegebene Flow-Rate [ml/min] | 10 | 10 | 60 | 60 | 10 | 10 | 10 |
| Zeitdauer [s] | 621 | 621 | 247 | 247 | 485 | 483 | 485 |
| Zeitdauer [min] | 10,35 | 10,35 | 4,12 | 4,12 | 8,08 | 8,05 | 8,08 |
| Erwartetes Volumen [ml] | 103,5 | 103,5 | 247 | 247 | 80,8 | 80,5 | 80,8 |
| Gemessenes Volumen [ml] | 115 | 117 | 275 | 278 | 89 | 84 | 85 |
| Faktor | 1,11 | 1,13 | 1,11 | 1,13 | 1,10 | 1,04 | 1,05 |
| Mittelwert | 1,12 | | | | | 1,05 | |

4.2.3 Bestimmung der Viskosität des Elektrolyten

Zielsetzung

In den Versuchen werden die Fluide bidestilliertes Wasser und V3,5 verwendet. Da zu dem verwendeten Elektrolyten keine Daten zur dynamischen Viskosität gegeben sind, wird diese experimentell ermittelt.

Durchführung

Mit den Ansätzen nach Darcy und Hagen-Poiseuille ist der Druckabfall von strömenden Fluiden durch poröse Medien und Rohre beschrieben. In Kapitel 4.1 ist dargestellt, wie der hydraulische Widerstand Z gebildet wird. Damit ergibt sich für beide Ansätze eine Abhängigkeit des Druckverlusts von Z , dem Volumenstrom und der Viskosität. Wird der gleiche hydraulische

Widerstand von zwei Fluiden mit gleichem Volumenstrom und unterschiedlicher Viskosität durchströmt, stellen sich zwei unterschiedliche Druckabfälle ein. Daraus lassen sich Gleichung 10 und 11 ableiten:

$$\frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{\Delta p_1}{\Delta p_2} \quad (20)$$

Als Randbedingung ist die Reynoldszahl zu beachten, welche sich ebenfalls mit der dynamischen Viskosität ändert und die Gültigkeitsbereiche der Ansätze eingrenzt.

Wird der Volumenstrom variiert, ergeben sich für den Druckabfall über dem Volumenstrom zwei Geraden unterschiedlicher Steigung $x1_i$. Das Verhältnis der Druckabfälle in Gleichung 20 wird mit dem Verhältnis der Steigung der Geraden gleichgesetzt. Ist die Viskosität des einen Fluids bekannt, lässt sich die Viskosität des zweiten Fluids wie folgt bestimmen:

$$\eta_2 = \eta_1 \frac{\Delta p_2}{\Delta p_1} = \eta_1 \frac{x1_2}{x1_1} \quad (21)$$

Zur Bestimmung der dynamischen Viskosität von V3,5 wird dieser Zusammenhang genutzt, indem reproduzierbare hydraulische Widerstände zunächst mit Wasser und dann mit V3,5 vermessen werden. Als Widerstände werden Druckabfallzellen (DAZ) verwendet. Die DAZ bestehen aus einem hohlzylindrischen Zellkörper, einem Filzring mit fester Länge und einem inneren Glaszylinder, der eine definierte Kompression von 27,9% auf den Filz aufbringt und den Querschnitt des ringförmigen Strömungskanals bestimmt.

Es werden Versuche mit zwei DAZ mit einer Filzlänge von 30 mm und ein Versuch mit einer Filzlänge von 20 mm durchgeführt. Dabei werden für jede DAZ die Druckabfälle an einer Reihe von Messpunkten mit 6,4 bis 120 ml/min vorgegebenen Volumenstrom-Wasser und 6,4 bis 96 ml/min vorgegebenen Volumenstrom-V3,5 ermittelt. Siehe Report Anhang A-4. Die Temperatur des Fluids wird hinter der DAZ gemessen.

Ergebnis

Abbildung 13 zeigt den Ergebnisplot der Messung mit DAZ1. Die blauen Datenpunkte stellen die ermittelten Druckdifferenzen mit Wasser dar, die roten die Druckdifferenzen mit V3,5. Es ist die veränderte Steigung der Druckdifferenz in Abhängigkeit vom Volumenstrom zu erkennen. Es sei darauf hingewiesen, dass die Datenpunkte, die bei Wasser und V3,5 mit gleichem vorgegebenen Volumenstrom aufgenommen wurden, in der Auswertung nicht übereinander liegen, da die tatsächlichen Volumenströme mit unterschiedlichen Faktoren berechnet wurden. Diese Volumenstromfaktoren wurden im Kapitel 4.2.2 ermittelt. Es wird ein konservativer Gültigkeitsbereich für den Ansatz nach Darcy mit zulässigen Reynoldszahlen bis 1 und ein weiterer Gültigkeitsbereich mit zulässigen Reynoldszahlen bis 10 betrachtet. Für die Berechnung der Reynoldszahlen nach Gleichung 9 werden die Stoffwerte von Wasser bei einer Temperatur von 26°C angenommen. Die Stoffwerte von V3,5 werden nach [3] abgeschätzt. Alle Parameter der Berechnung und die Ergebnisse sind im Anhang A-5 dargestellt.

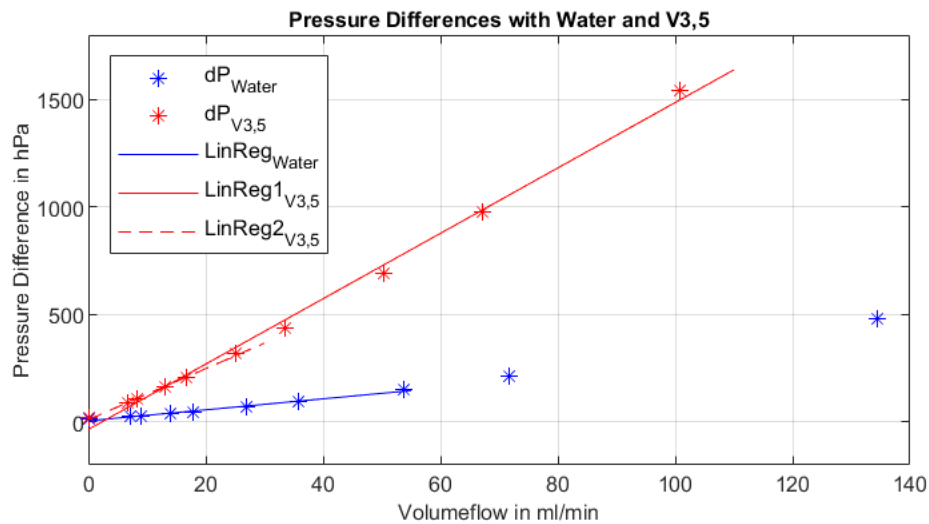


Abbildung 13: Druckdifferenzen über Volumenstrom in der Druckabfallzelle mit Wasser und V3,5

In Abbildung 13 sind die linearen Regressionen zur Ermittlung der Steigungen dargestellt. Die durchgezogenen Linien bilden die ermittelten Ausgleichsgeraden nach der weiteren Abgrenzung durch die Reynoldszahlen an, die gestrichelte Linie die Regression über die konservative Eingrenzung. Mit den Steigungen dieser Regressionen wird, ausgehend von der mit der Temperatur bekannten dynamischen Viskosität des Wassers, die dynamische Viskosität von V3,5 mit Gleichung 21 berechnet.

In Kapitel 4.1 wird gezeigt, wie die Geometrie Größen der Gleichung nach Darcy in der Konstante Z zusammengefasst werden. Aus der Regression der Messung mit Wasser lässt sich diese Konstante Z bestimmen. Zudem sind die Geometrie Größen der durchströmten Länge L als Länge des Filzes und der Fläche A als Kreisring bekannt, sodass zusätzlich die Permeabilität κ des Filzes nach Gleichung 22 berechnet wird:

$$\kappa = \frac{L}{Z \cdot A} \quad (22)$$

Tabelle 2: Dynamische Viskositäten von V3,5 und Permeabilität des verwendeten Filzes aus Viskositätsabgleich mit der Druckabfallzelle

| | DAZ1 – 30mm | DAZ2 – 30mm | DAZ4 – 20mm |
|-----------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| Viskosität V3,5 [mPas] Re < 10 | 5,087 | 5,042 | 4,527 |
| Viskosität V3,5 [mPas] Re < 1 | 3,968 | 4,014 | 3,505 |
| Kappa Filz [m ²] | 1,16E-10 | 1,36E-10 | 1,60E-10 |
| Temperatur V3,5 [°C] | 26,7 | 27,3 | 29,1 |

Bei der Betrachtung der Ergebnisse in Tabelle 2 erkennt man Unterschiede der Viskosität von 20 – 30% in Abhängigkeit der Abgrenzung der Reynoldszahlen und einen Unterschied von 10 bzw. 12,5% in Abhängigkeit der Länge des Filzes. Die nach [3] gemittelte Viskosität von 5,3 mPas

liegt über den hier ermittelten Ergebnissen, aber als Abschätzung gut in der Größenordnung. Die Ermittlung der Viskosität des V3,5 aus dem Vergleich mit Wasser nach dem hier dargestellten Ansatz wird mit dem Modul TXM1 wiederholt und in Kapitel 4.3.1 dargestellt. Dort wird eine Viskosität des V3,5 von 3,909 mPas ermittelt.

Für V3,5 wird folgend die Viskosität mit 4,0 mPas angenommen. Die Permeabilität des Filzes wird für die Parametrisierung der hydraulischen Modelle als Mittelwert $\kappa = 1,37 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2$ angenommen.

4.2.4 Entwicklung eines Moduls für eine Zelle

Im dem vorangegangenen Projekt StaTuR, auf dem das Projekt TuRoX aufbaut, wurde das Basis-Modul für fünf tubuläre Zellen entwickelt. Dieses Modul ermöglicht nur den parallelen hydraulischen Betrieb von fünf Zellen, wodurch die erforderliche Einzeluntersuchung der hydraulischen Eigenschaften der Zellen nicht möglich ist. Zur Durchführung der Einzeluntersuchungen wird daher das „Einzelmodul“ basierend auf dem Basis-Modul gefertigt. Siehe Abbildung 14.

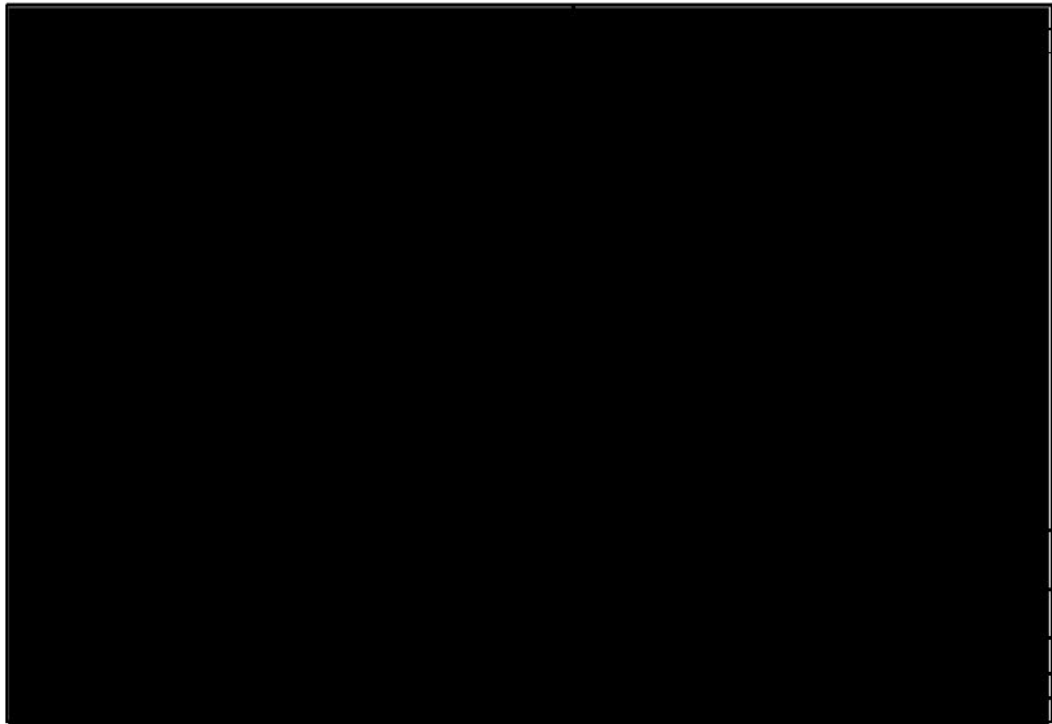


Abbildung 14: Technische Zeichnung zur Bearbeitung der Modulplatten des Basis-Moduls zur Erstellung des Einzelmoduls

Von zwei Modulplatten des Basis-Moduls werden die äußeren Zellsteckplätze abgetrennt, sodass diese genutzt werden können. Anschließend werden in den Manifold G1/8 Gewinde eingebracht, damit diese an der Schnittfläche mit Stopfen verschlossen werden können. Genauso wird der Anschluss des Manyfolds mit G1/4 Gewinde mit einem entsprechenden Stopfen verschlossen. Die Versorgung der Zelle mit Fluid erfolgt über Anschlüsse mit G1/4 Gewinde an den Seiten, welche im Basis-Modul mit Stopfen verschlossen wurden. Es werden so zwei gespiegelte Einzelmodule gefertigt.

Um eine Beschädigung der Zellen bei der Handhabung zu vermeiden, wird das Modul in eine Stützkonstruktion eingesetzt. Dies ist notwendig, da die Stabilität der einzelnen Zelle geringer ist als der Verbund aus fünf Zellen im Basis-Modul.

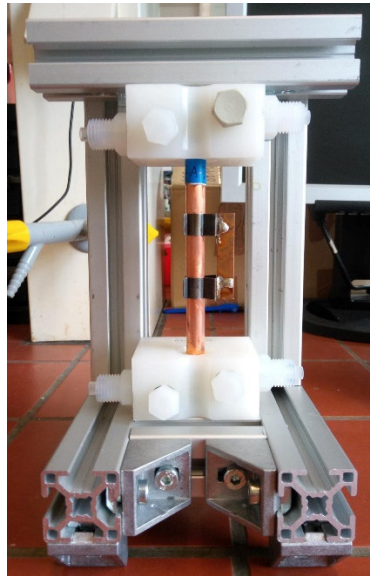


Abbildung 15: Einzelmodul mit Zelle in Stützkonstruktion

Mit dem Einzelmodul ist es möglich, die Zellen einzeln in der aktuellen Bauweise und mit der gleichen Anschlussgeometrie im Prüfstand zu testen. Zudem lassen sich die Zellen ohne Beschädigung wieder ausbauen, sodass sie nach der Einzelprüfung weiterhin in den Basis-Modulen nutzbar sind.

Die beiden Einzelmodule sind spiegelverkehrt. Dadurch wechseln die Anschlüsse für die innere und äußere Halbzelle je nach Modul die Seiten. Damit wechselt auch, welches Paar der Drucksensoren die entsprechende Halbzelle misst. Diese Eigenschaft wird in den Einzelmessungen genutzt, um die mit Unsicherheiten behafteten Messergebnisse von Drucksensor P3 zu bestätigen.

Tabelle 3: Anschlussbelegung der Einzelmodule

| | Outlet OHC | Inlet OHC | Outlet IHC | Inlet IHC |
|---------------|------------|-----------|------------|-----------|
| Einzelmodul 1 | P1 | P4 | P2 | P3 |
| Einzelmodul 2 | P2 | P3 | P1 | P4 |

4.3 Ermittlung der hydraulischen Widerstände der Basis-Module

Im Rahmen der Arbeit stehen drei Basis-Module mit aktuellen Zellen zur Verfügung. Diese werden als TXM1, TXM2 und TXM3 bezeichnet. Das Modul TXM1 dient als Versuchsobjekt. Aus diesem werden ebenfalls die fünf Zellen entnommen und einzeln getestet. Siehe dazu Kapitel 4.4. Die Messdaten der Versuche mit TXM2 und TXM3 wurden zur Verfügung gestellt.

4.3.1 Modul TXM1 – hydraulischer Widerstand mit Wasser und V3,5

Zielsetzung

Das hydraulische Verhalten des Moduls TXM1 wird mit Wasser und V3,5 untersucht. Zum einen wird der hydraulische Widerstand des gesamten Moduls mit Wasser ermittelt, um die Anteile des Druckverlustes der einzelnen Komponenten abzuschätzen und gleichzeitig den Einfluss der hydraulischen Parallelschaltung der fünf Zellen zu untersuchen. Darüber hinaus wird eine Untersuchung mit V3,5 durchgeführt, um einen Viskositätsabgleich zwischen Wasser und V3,5 durchzuführen, wie es in Kapitel 4.2.3 mit Verwendung der DAZ beschrieben wird.

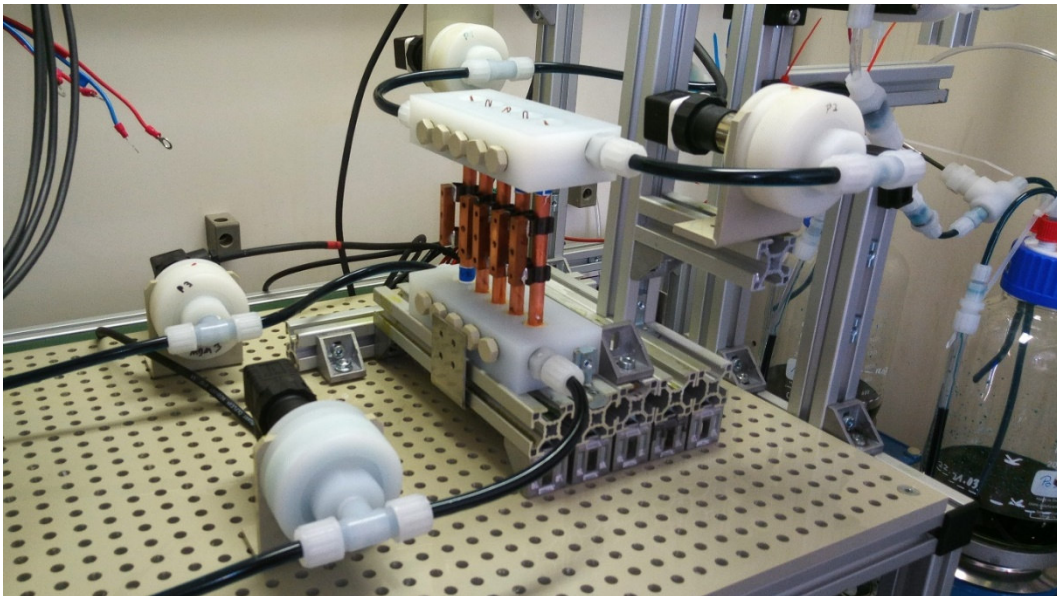


Abbildung 16: Basis-Modul TXM1 im Prüfstand während der Untersuchung mit V3,5

Durchführung

In der Abbildung 16 ist das Basis-Modul TXM1 eingebaut im Prüfstand zu sehen. Es sind die vier Drucksensoren P1-P4, sowie die Tanks im hinteren Bildbereich zu erkennen.

Es werden an dem Modul zwei Versuche zur Ermittlung des Druckabfalls in Abhängigkeit des Volumenstroms der jeweiligen Halbzellenseite durchgeführt. Diese unterscheiden sich dadurch, dass einmal Wasser und einmal V3,5 verwendet wird. Für beide Untersuchungen werden Messwerte bei vorgegebenen Volumenströmen von 8 ml/min bis 160 ml/min aufgenommen. Die Messroutinen sind im Anhang A-6 und A-7 abgebildet.

Ergebnis

Aus der Untersuchung mit Wasser ergibt sich der Ergebnisplot in Abbildung 17. Die mit der Kalibrierung korrigierten und über den Messabschnitt gemittelten Messwerte der

Drucksensoren sind in dem oberen Plot dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Messwerte der Outlets nur geringfügig ansteigen. Dies ist plausibel, da sich hinter den Drucksensoren mit der Temperaturmessung und dem Rückfluss in den Tank keine großen hydraulischen Widerstände mehr befinden. Die Messwerte der Inlets steigen mit höherem Volumenstrom an, sodass die Druckdifferenz steigt. Der gemessene Druck an der negativen Halbzellenseite ist dabei höher. Diese Beobachtung deckt sich mit den Erfahrungswerten, dass der Strömungswiderstand der negativ definierten äußeren Halbzellen höher ist als der der positiv definierten inneren Halbzellen.

Auffällig ist der Verlauf von P3, welcher bis zu einem korrigierten Volumenstrom von ca. 90 ml/min und einem Messwert von ca. 100 hPa einen fast statischen und zu hohen Wert anzeigt. Dieser Verlauf ist nicht plausibel und gleicht dem bei der Kalibrierung festgestellten Fehler. Da die Messung von TXM1 chronologisch als Letztes durchgeführt wurde und der Fehler zuvor nur bis zu einem Messwert von 50 hPa festzustellen war, ist von einem fortschreitenden Schaden des Drucksensors P3 auszugehen. Daher werden die Messwerte von P3 bei Volumenströmen unter 80 ml/min für diesen Versuch als nicht verwertbar betrachtet.

Aus den beschriebenen Messwerten wird jeweils die Druckdifferenz der Halbzellen gebildet und über den Volumenstrom in der unteren Grafik dargestellt. Zur Bestimmung des hydraulischen Widerstands Z werden lineare Regressionen der Druckdifferenz über den Volumenstrom durchgeführt. Für diese werden aufgrund von P3 für die negative Halbzellenseite alle und für die positive Halbzellenseite die letzten vier Druckdifferenzwerte einbezogen.

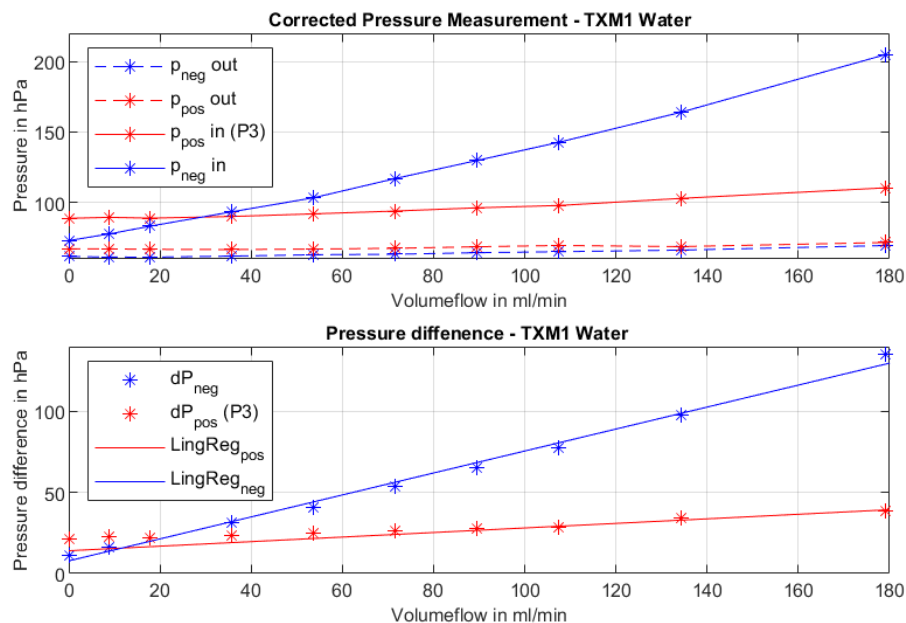


Abbildung 17: Untersuchung TXM1 mit Wasser - Plot der Messwerte und Druckdifferenzen

Die Ergebnisse des Versuchs mit V3,5 als Fluid sind in Abbildung 18 dargestellt. Bei den gemittelten Druckmesswerten der Sensoren in der oberen Grafik ist ebenfalls das erwartbare Verhalten zu erkennen: Die Drucksensoren der Outlets zeigen kaum eine Veränderung,

während die Drücke an den Inlets linear steigen. Es ist wieder zu erkennen, dass der Druck der negativen Halbzellenseite stärker steigt. Auch ist an den ersten drei Druckwerten von P3, welche unter 100 hPa liegen, der Defekt des Sensors zu erahnen. Für die lineare Regression der Druckdifferenz der Halbzellenseite über den Volumenstrom werden aufgrund von P3 die ersten drei Werte der positiven Halbzellenseite nicht einbezogen.

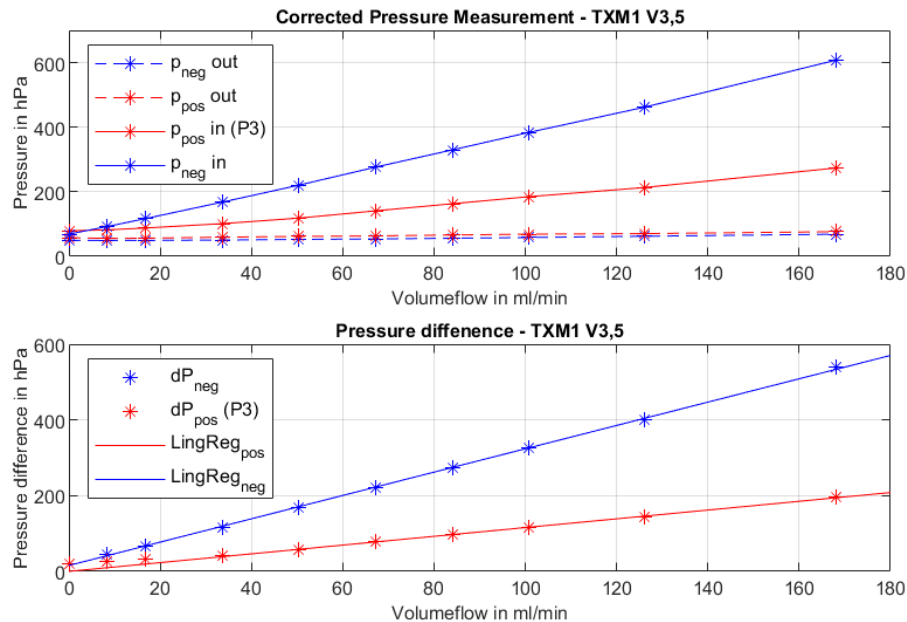


Abbildung 18: Untersuchung TXM1 mit V3,5 - Plot der Messwerte und Druckdifferenzen

Die Parameter nach Gleichung 16, x_1 und x_0 , der vier Regressionen sind in Tabelle 4 dargestellt. Die dynamische Viskosität des Wassers wird mit Hilfe der Temperatur aus dem VDI-Wärmeatlas [21] bestimmt. Mit dieser und der Steigung x_1 wird, wie in Kapitel 4.1 beschrieben, der hydraulische Widerstand Z der Halbzellenseiten berechnet. Für die negative Halbzellenseite berechnet sich Z zu $4,730E+12 \text{ m}^{-3}$. Dieser Wert deckt sich mit dem rechnerischen Wert der Parallelschaltung der Einzelwiderstände der Zellen von $4,731E+12 \text{ m}^{-3}$. Für die positive Halbzellenseite liegt der berechnete Wert deutlich unterhalb des rechnerischen Werts der Parallelschaltung der Einzelwiderstände der Zellen von $1,29E+12 \text{ m}^{-3}$.

Es wird angenommen, dass sich Z in der negativen Halbzellenseite nicht ändert und diese auch für V3,5 gilt. Mit Gleichung 21 und dem Ergebnis der negativen Halbzellenseite wird die dynamische Viskosität von V3,5 berechnet und für beide Halbzellenseiten als gleich angenommen. Die so ermittelte dynamische Viskosität von V3,5 passt mit den Werten der Viskositätsermittlung mit Hilfe der DAZ in Kapitel 4.2.3 überein. Mit der dynamischen Viskosität wird Z der positiven Halbzellenseite mit V3,5 berechnet. Der Wert von $1,78E+12 \text{ m}^{-3}$ liegt deutlich oberhalb des rechnerischen Werts der Parallelschaltung der Einzelwiderstände der Zellen von $1,29E+12 \text{ m}^{-3}$. Durch den Defekt von Drucksensor P3 kann für keine Untersuchung der positiven Halbzellenseite als verlässlich angenommen werden, sodass für diese Halbzellenseite nur die Annahme getroffen werden kann, dass eine Übertragung der Einzelwiderstände der Zellen möglich ist.

Tabelle 4: Ergebnisse der Untersuchung von TXM1 mit Wasser und V3,5

| Halbzellseite Fluid | x_1 [hPa/ml*min] | x_0 [hPa] | R^2 | T [°C] | Dyn. Viskosität [mPas] | Hyd-W. Z [m ⁻³] |
|------------------------|-----------------------|----------------|-------|-----------|---------------------------|--------------------------------|
| Positiv Wasser | 0,141 | 14,045 | 0,956 | 26,71 | 0,857 | 9,85E+11 |
| Negativ Wasser | 0,678 | 7,795 | 0,993 | 26,53 | 0,860 | 4,73E+12 |
| Positiv V3,5 | 1,157 | 0,050 | 0,998 | 26,78 | 3,909 | 1,78E+12 |
| Negativ V3,5 | 3,081 | 15,662 | 1,00 | 26,69 | 3,909 | 4,73E+12 |

4.3.2 Modul TXM3- hydraulischer Widerstand mit V3,5 und SoC50

Zielsetzung

Vanadium-Redox-Flow-Batterien zeichnen sich dadurch aus, dass auf beiden Halbzellenseiten ein Vanadium-Elektrolyt verwendet wird: V^{2+}/V^{3+} und V^{4+}/V^{5+} . Diese können aus dem unformierten Elektrolyten V3,5 erzeugt werden. Siehe Kapitel 2.1. Ziel ist die Veränderung der dynamischen Viskositäten durch einen Vergleich der Druckdifferenzen mit V3,5 und den Elektrolyten bei einem Ladezustand von 50% (SoC50) abzuschätzen.

Durchführung

Mit dem Basis-Modul TMX3 wird die Formierung von V3,5 vorgenommen. Dabei werden Druckdifferenzdaten mit V3,5 und den formierten Elektrolyten mit einem SoC50 bei Volumenströmen von 0 – 120 ml/min aufgenommen. Die Messroutinen sind im Anhang A-8 abgebildet. Aus den Untersuchungen ergibt sich der Ergebnisplot in Abbildung 19. Die mit der Kalibrierung korrigierten und über die Messabschnitte gemittelten Messwerte der Drucksensoren sind in den oberen beiden Plots dargestellt. Die aus diesen Druckwerten gebildeten Druckdifferenzen der Halbzellenseiten sind im unteren Plot der Abbildung 19 dargestellt.

Ergebnis

Abbildung 19 zeigt, dass die Messwerte der Outlets konstant bleiben. Dies ist plausibel, da sich hinter den Drucksensoren mit der Temperaturmessung und dem Rückfluss in den Tank keine signifikanten hydraulischen Widerstände befinden. Die Messwerte der Inlets steigen mit höherem Volumenstrom an, sodass die Druckdifferenz steigt. Der gemessene Druck an der negativen Halbzellenseite ist dabei höher, was sich mit den Erfahrungswerten deckt, dass der Strömungswiderstand der negativ definierten äußeren Halbzellen höher ist als der der positiv definierten inneren Halbzellen.

Im Plot der Druckdifferenzen ist ein linearer Anstieg der Druckdifferenzen über den Volumenstrom zu erkennen. In der negativen Halbzellenseite ist die Steigung der Druckdifferenz mit SoC50 höher als mit V3,5. In der positiven Halbzellenseite ist dieses umgekehrt. Dies spricht für einen Anstieg der dynamischen Viskosität des negativen

Elektrolyten und einen Abfall der dynamischen Viskosität des positiven Elektrolyten. Die Steigungen der Druckdifferenzkennlinien werden mit einer linearen Regression ermittelt. Die Regressionsparameter nach Gleichung 16 sind in Tabelle 5 aufgeführt.

Für die Messung mit V3,5 wird die dynamische Viskosität angenommen, welche in der Messung von TXM1 ermittelt wird. Dabei wird der Temperatureinfluss auf die Viskosität vernachlässigt. Damit wird der hydraulische Widerstand Z der Halbzellenseiten berechnet, wie in Kapitel 4.1 beschrieben. Außerdem wird mit dem Ansatz Gleichung 21 die dynamische Viskosität des positiven und negativen Elektrolyten bei SoC50 berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5 aufgeführt.

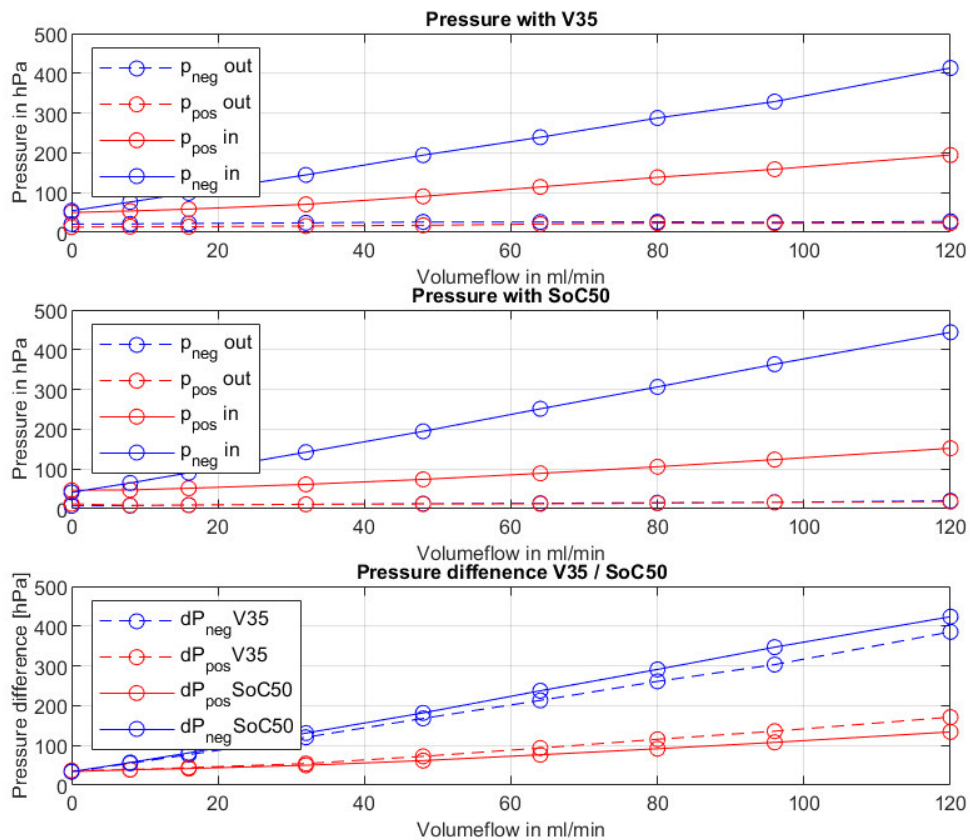


Abbildung 19: Untersuchung TXM3 mit V3,5 und SoC50 - Plot Messwerte und Druckdifferenzen

Tabelle 5: Ergebnisse der Untersuchung von TXM3 mit V3,5 und bei SoC50

| Halbzellseite & Fluid | x_1 [hPa/ml*min] | x_0 [hPa] | R^2 | T [°C] | Dyn. Visko. [mPas] | Hyd.-W. Z [m ⁻³] |
|-----------------------|-----------------------|----------------|-------|-----------|-----------------------|---------------------------------|
| pos V3,5 | 1,134 | 26,315 | 0,980 | 22,56 | 3,909 | 1,74E+12 |
| neg V3,5 | 2,900 | 30,204 | 0,999 | 22,46 | 3,909 | 4,45E+12 |
| pos Soc50 | 0,821 | 28,410 | 0,990 | 21,97 | 2,831 | 1,74E+12 |
| neg SoC50 | 3,276 | 29,347 | 0,999 | 22,04 | 4,416 | 4,45E+12 |

4.3.3 Modul TXM2- hydraulischer Widerstand bei SoC50

Zielsetzung

Es stehen die Basis-Module TXM1, TXM2 und TXM3 zur Verfügung. TXM1 wurde mit Wasser und V3,5 vermessen. TXM3 mit V3,5 und bei SoC50. Die Untersuchung von TXM2 wird zur Vervollständigung der hydraulischen Datenbasis zur Erstellung des Modells mit aufgenommen. Ziel ist es die hydraulischen Widerstände der Halbzellenseiten zu ermitteln und einen Vergleich der Basis-Module anzustellen, um den Wertebereich der hydraulischen Widerstände abzuschätzen.

Durchführung

Die hydraulischen Widerstände der Module TXM1 und TXM3 werden in den beiden vorherigen Kapiteln ermittelt. Für das Modul TXM2 stehen die Druckmesswerte bei SoC50 und Volumenströmen von 0 – 120 ml/min zur Verfügung. Die Messroutine ist die Gleiche wie in der Untersuchung von TXM3 und ist im Anhang A-8 abgebildet. Aus den Untersuchungen ergibt sich der Ergebnisplot in Abbildung 20. Die mit der Kalibrierung korrigierten und über die Messabschnitte gemittelten Messwerte der Drucksensoren sind in dem oberen Plot dargestellt. Die aus diesen Druckwerten gebildeten Druckdifferenzen der Halbzellenseiten sind im unteren Plot der Abbildung 20 dargestellt.

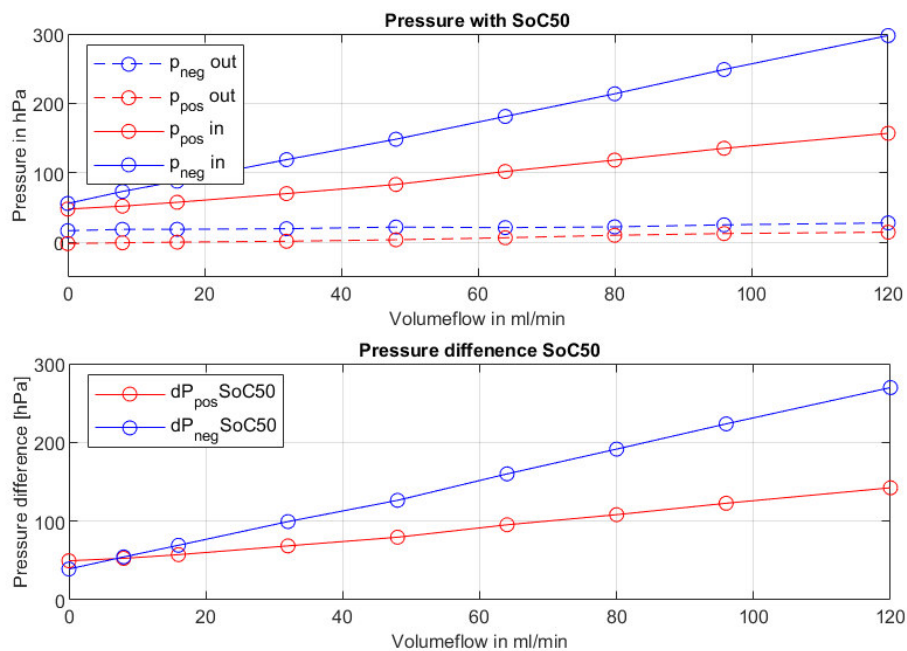


Abbildung 20: Untersuchung TXM2 bei SoC50 -Plot der Messwerte und Druckdifferenzen

Ergebnis

Im oberen Plot der Abbildung 20 ist zu erkennen, dass die Messwerte der Outlets konstant bleiben. Dies ist plausibel, da sich hinter den Drucksensoren mit der Temperaturmessung und dem Rückfluss in den Tank keine signifikanten hydraulischen Widerstände befinden. Die Messwerte der Inlets steigen mit höherem Volumenstrom an, sodass die Druckdifferenz steigt. Im Plot der Druckdifferenzen ist ein linearer Anstieg der Druckdifferenzen über den

Volumenstrom zu erkennen. Die Steigung in der negativen Halbzellenseite ist dabei höher, was sich mit den Ergebnissen aus den vorherigen Kapiteln deckt, dass der Strömungswiderstand der negativ definierten äußeren Halbzellen höher ist als der der positiv definierten inneren Halbzellen. Die Steigungen der Druckdifferenzkennlinien werden mit einer linearen Regression ermittelt. Die Regressionsparameter nach Gleichung 16 sind im Anhang A-9 aufgeführt.

Für die Messung mit V3,5 wird die dynamische Viskosität angenommen, welche in der Messung von TXM1 ermittelt wird. Dabei wird der Temperatureinfluss auf die Viskosität vernachlässigt. Aus der Steigung und der angenommenen dynamischen Viskosität wird der hydraulische Widerstand Z der Halbzellenseiten berechnet, wie in Kapitel 4.1 beschrieben. Die Ergebnisse sind zusammen mit den Werten der Module TXM1 und TXM3 sowie den berechneten Parallelwiderständen der Einzelzellen von TXM1 in Tabelle 6 aufgeführt.

Tabelle 6: Vergleich der hydraulischen Widerstände der Halbzellenseiten der Basis-Module

| Basis-Modul | Perm. Z der Halbzellenseiten [m^{-3}] | |
|--------------------------------|--|----------|
| | Positiv | Negativ |
| TXM1 | 0,99E+12 / 1,78E+12 | 4,73E+12 |
| TXM2 | 1,21E+12 | 2,95E+12 |
| TXM3 | 1,74E+12 | 4,45E+12 |
| TXM1 - rechn. aus Einzelzellen | 1,29E+12 | 4,73E+12 |

In Tabelle 6 sind für TXM1 der positiven Halbzellenseite zwei Werte eingetragen. Diese stammen aus der Untersuchung mit Wasser und V3,5 und sind durch den Defekt von Drucksensor P3 nicht belastbar. Der ermittelte Wert der positiven Seite von TXM2 liegt innerhalb des erwartbaren Bereichs von $1,04\text{E}+12$ bis $1,56\text{E}+12 \text{ m}^{-3}$ aus den Einzelzellmessungen, während das Ergebnis von TXM3 außerhalb liegt. Für die negative Seite ergibt sich ein Erwartungswert von $3,05\text{E}+12$ bis $6,74\text{E}+12 \text{ m}^{-3}$. Es fällt auf, dass das Ergebnis der negativen Seite von TXM2 leicht unterhalb des Erwartungswerts liegt, während die Ergebnisse von TXM1 und TXM3 innerhalb liegen.

Aufgrund der Stichprobengröße und den Unterschieden der Ergebnisse, lässt sich eine starke Schwankungsbreite der hydraulischen Widerstände der Module ablesen. Daraus wird geschlussfolgert, dass die Stichprobe der fünf Zellen nicht den gesamten Bereich der Zellwerte abdecken.

4.4 Einzelzellen- Ermittlung des hydraulischen Widerstands

Zielsetzung

In den Basis-Modulen lassen sich immer nur fünf Zellen gemeinsam in der Parallelschaltung untersuchen. Mit dem dafür entwickelten Einzelmodul (siehe Kapitel 5.2.4) ist es möglich, die Zellen, sowohl im 5er Basis-Modul, als auch einzeln zu vermessen. Ziel ist es die hydraulischen Widerstände der Zellen einzeln zu ermitteln, um einen Wertebereich für das hydraulische

Modell einzugrenzen und Produktionsschwankungen, die sich im hydraulischen Verhalten niederschlagen, zu betrachten.

Durchführung

Zur Durchführung der Einzeluntersuchung werden die Zellen aus dem Basis-Modul TXM1 ausgebaut und nach der Reihenfolge im Modul als Single Cell 1 – 5 (SC1 bis SC5) benannt. Die Zellen werden in das Einzelmodul eingesetzt und in den unveränderten Teststand eingebaut. In Abbildung 21 ist eine Einzelzelle in dem Einzelmodul 1 mit Stützkonstruktion im Prüfstand eingebaut zu sehen.

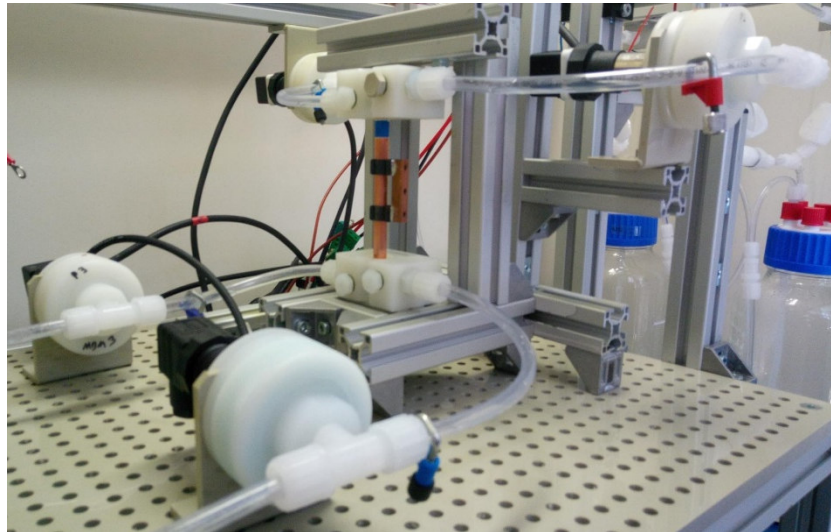


Abbildung 21: Einzelzelle mit Einzelmodul eingebaut im Prüfstand

Die Drucksensoren sind so angeschlossen, dass P4 zu P1 die äußere negativ definierte Halbzelle (OHC) und P3 zu P4 die innere positiv definierte Halbzelle (IHC) messen. Im Einzelmodul 2 tauscht diese Belegung.

Die Zellen werden mit 0 bis 32 ml/min vorgegebenen Volumenstrom Wasser durchströmt. Dabei werden die Drücke an den Inlets und Outlets gemessen. Die Messroutinen sind im Anhang

A-10 und A-11 zu sehen. In den Messroutinen ist die Modulwahl und entsprechende Belegung der Anschlüsse vermerkt. Die Untersuchung wird einmal ohne Systemdruck und anschließend mit einem Systemdruck von ~ 75 hPa durchgeführt, da bei der ersten Untersuchung der Defekt von Drucksensor P3 auftritt, sodass die Messwerte bis 50 hPa nicht verwertbar sind. Zudem messen die Drucksensoren an den Outlets negative Messwerte, welche nicht im angegebenen Messbereich der Drucksensoren liegen. Dies ist im Ergebnisplot von SC-1-M!1 in Abbildung 22, dargestellt. Die negativen Messwerte an den Outlets der ersten Untersuchungsreihe lassen sich durch die Wassersäule im Rücklaufschlauch in den Tank des Systems erklären, welche sich unterhalb der Drucksensoren befinden und so eine Sogwirkung entwickeln. Um den Defekt von P3 und die negativen Messwerte zu umgehen, wird ein Systemdruck aufgebracht. Der Systemdruck wird durch Argon-Gas, welches im Betrieb als Schutzatmosphäre für die Elektrolyten dient, realisiert. Zudem werden die Module, mit denen die Zellen vermessen werden, zwischen der ersten und zweiten Messung getauscht, sodass systematische

Messfehler durch den Wechsel des Moduls und der Sensoren festgestellt werden können. Das Ergebnis der zweiten Messung von SC1 wird als Vergleich in der unteren Abbildung 23 dargestellt.

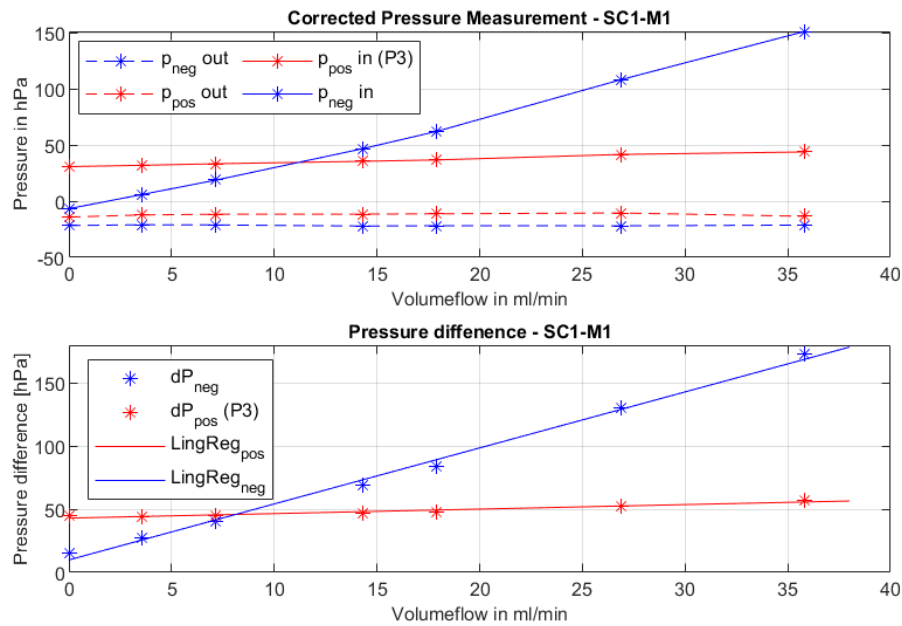


Abbildung 22: Untersuchung Einzelzelle SC1 - Plot der Messdaten und Druckdifferenzen der ersten Messung mit Fehler von P3

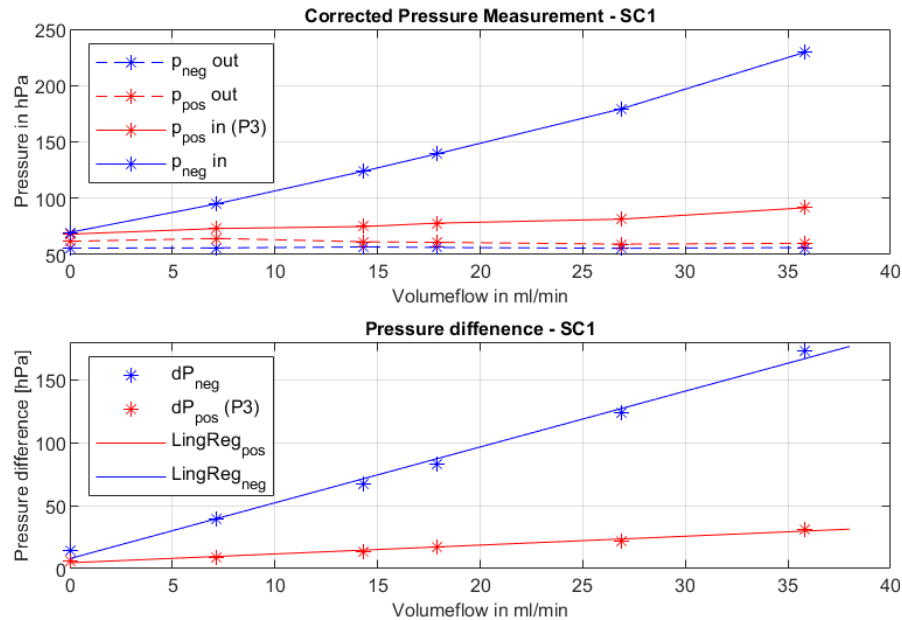


Abbildung 23: Untersuchung Einzelzelle SC1 - Plot der Messdaten und Druckdifferenzen der zweiten Messung mit Systemdruck

Ergebnis

In den oberen Abbildungen 22 und 23 sind jeweils im oberen Plot die mit der Kalibrierung korrigierten und über die Messabschnitte gemittelten Messwerte der Drucksensoren dargestellt. Die daraus gebildeten Druckdifferenzen der Halbzellen sind jeweils im unteren Plot

als Punkte eingetragen. Zudem ist im unteren Plot die lineare Regression der Druckdifferenzen über den korrigierten Volumenstrom dargestellt. Beim Vergleichen der Abbildungen ist zu erkennen, dass die Ergebnisse der negativen Halbzelle in beiden Messungen ähnlich sind, während auf der positiven Seite nur das Ergebnis der zweiten Messung plausibel und verwertbar ist. Dieses beispielhaft dargestellte Verhalten zeigt sich in allen Messungen, sodass zur Ermittlung des hydraulischen Widerstands der Zellen nur die zweite Messung verwendet wird. Aus der ersten Messung werden die Ergebnisse der Seite P4 nach P1 betrachtet und zum qualitativen Abgleich mit der zweiten Messung verwendet. Aus den Steigungen der Druckdifferenzen über den Volumenströmen wird mit der Viskosität des Wassers der halbzellspezifische hydraulische Widerstand Z berechnet, wie in Kapitel 4.1 erläutert. Die Ergebnisse sind in den unteren Graphen in Abbildung 24 dargestellt.

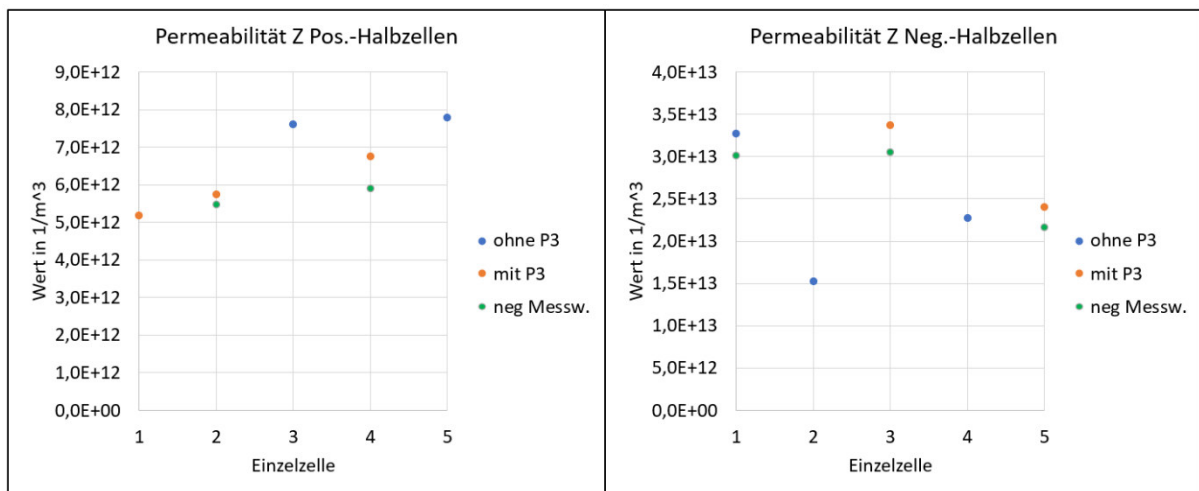


Abbildung 24: Visualisierung der Ergebnisse des hydraulischen Widerstandes der Einzelzellen

In den oberen Graphen sind in blau jeweils die Ergebnisse eingetragen, welche aus der zweiten Messung und den Sensoren P4 nach P1 stammen. Die Ergebnisse in orange stammen aus der zweiten Messung und den Sensoren P2 nach P4. Die Ergebnisse, welche in grün dargestellt sind, eignen sich durch den Einbezug negativer Messwerte nur als qualitativer Vergleich. Es lässt sich erkennen, dass letztere durchgehend unterhalb des ersten Messwerts liegen. Da sich dieses Muster auch bei dem Ergebnis der negativen Halbzelle von SC1 zeigt, welche mit den gleichen Sensoren gemessen wurde, ist nicht davon auszugehen, dass dieses Verhalten auf einen systematischen Fehler durch den Wechsel der Sensoren hinweist. Es lässt sich im Vergleich zu den anderen Ergebnissen kein solcher Fehler erkennen.

Alle Regressionsparameter, Temperaturen und Ergebniswerte sind in der Tabelle im Anhang A-12 dargestellt. In den Graphen ist zu erkennen, dass die hydraulischen Widerstände der IHC um den Faktor 4 geringer sind als die der OHC. Aus den Ergebnissen der zweiten Messung wird für jede Halbzelle der Mittelwert und die Standardabweichung berechnet. Für die IHC ergibt der Mittelwert des Hydraulischen Widerstands zu $\overline{Z_{IHC}} = 6,35 \cdot 10^{12} \text{ m}^{-3}$ mit einer Standardabweichung von $1,05 \cdot 10^{12} \text{ m}^{-3}$. Für die OHC ergeben sich ein mittlerer hydraulischer Widerstand von $\overline{Z_{OHC}} = 2,64 \cdot 10^{13} \text{ m}^{-3}$ mit einer Standardabweichung von $6,44 \cdot 10^{12} \text{ m}^{-3}$. Aus den Graphen in Abbildung 24 und der Standardabweichung ist zu

erkennen, dass der hydraulische Widerstand der OHC 6-mal stärker schwankt als der der IHC. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7 eingetragen.

Weiterführend wird aus den Widerstandswerten der erwartete hydraulische Widerstand der Parallelschaltung der fünf Zellen mit Gleichung 23 berechnet.

$$\frac{1}{R_{ges}} = \sum \frac{1}{R_i} \quad (23)$$

Gleichung 23 bedient sich eines elektrischen Ersatzschaltbildes, bei dem die hydraulischen Widerstände Z als ohmsche Widerstände R in einer Parallelschaltung betrachtet und die Leitungsverluste zwischen den Zellen als vernachlässigbar angenommen werden. Mit diesem Ansatz wird die Übertragbarkeit der hydraulischen Einzelwiderstände der Zellen auf den Gesamtwiderstand des Moduls TXM1 überprüft. Es ergibt sich für den parallelen hydraulischen Widerstand der IHC $Z_{parallel} = 1,29E+12 \text{ m}^{-3}$. Dieser Wert passt qualitativ zu den Ergebnissen der Module in Kapitel 5.3. Dennoch ist ein direkter Vergleich mit TXM1 nicht möglich, da die Ergebnisse dieser Halbzelleseite aufgrund des Defekts von Drucksensor P3 nicht belastbar sind. Für die OHC ergibt sich mit $Z_{parallel} = 4,731E+12 \text{ m}^{-3}$ ein Ergebnis, das mit dem Ergebnis des Moduls von $4,730E+12 \text{ m}^{-3}$ übereinstimmt und nahe an dem Ergebnis von Modul TXM3 liegt. Die Ergebnisse bestätigen die Annahme, dass der hydraulische Widerstand mehrerer Zellen mithilfe eines elektrischen Ersatzschaltbildes und der Gleichsetzung von hydraulischen und elektrischen Widerständen berechnen lässt.

Zur Abschätzung des Schwankungsbereichs des hydraulischen Widerstands der Basis-Module wird ein Maximal- und Minimalwert für die Parallelschaltung mit jeweils dem Maximal- bzw. Minimalwert der Einzelzellen berechnet. Die Ergebniswerte sind in Tabelle 7 aufgeführt. Diese Extremwerte für den Gesamt-Widerstand der Basis-Module decken nicht den Widerstandsbereich der untersuchten Basis-Module ab. Daraus wird geschlossen, dass die Stichprobe der fünf Zellen nicht den gesamten Bereich der Zellwerte abdecken.

Tabelle 7: Hydraulische Widerstände der Einzelzellen zusammengefasst

| | Z IHC [m^{-3}] | Z OHC [m^{-3}] |
|-----------------------|---------------------------|---------------------------|
| Mittelwert | 6,35E+12 | 2,64E+13 |
| Stand.abw. | 1,05E+12 | 6,44E+12 |
| Z parallel | 1,29E+12 | 4,73E+12 |
| Z parallel max | 1,56E+12 | 6,74E+12 |
| Z parallel min | 1,04E+12 | 3,05E+12 |

4.5 Einfluss der Köpfe auf hydraulischen Widerstand der Zellen

Zielsetzung

Zielsetzung dieses Versuchs ist es experimentell den Anteil des aktuellen Kopfdesigns an dem hydraulischen Widerstand der Zelle zu ermitteln.

Durchführung

Um eine Untersuchung der Köpfe getrennt von den Zellen zu ermöglichen, werden fünf Kopfzellen (HC1 – HC5) aufgebaut. Für die Kopfzellen werden der innere Stromsampler, die Membran und die Filze weggelassen, sodass diese nur aus dem äußeren Stromsampler und Köpfen mit einer Membran-Attrappe bestehen. In der Skizze Abbildung 25 ist zu erkennen, wie die Einsatzmembran mit der Membran-Attrappe präpariert wird und der Durchstoß im äußeren Kopf versiegelt wird. Die Untersuchungen der HC werden im Einzelmodul im gleichen Aufbau wie die Einzelzellen durchgeführt.

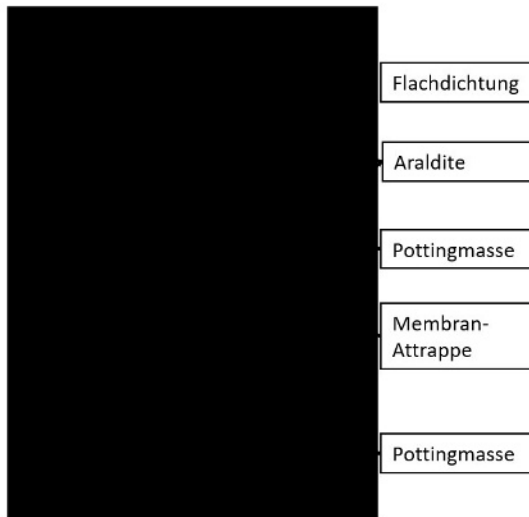


Abbildung 25: Skizze zur Ausführung der Kopfzellen



Abbildung 26: Kopfzelle HC3 nach Beschädigung

Es zeigt sich jedoch, dass diese beim Ein- und Ausbau aus dem Einzelmodul leicht auseinanderfallen, wie in Abbildung 26 zu sehen. Daher bleiben für die erste Messung nur vier HC übrig. Darüber hinaus tritt beim ersten Messdurchlauf ebenfalls der Defekt von Drucksensor P3 auf, sodass ein Teil der Messwerte nicht verwendbar ist. Für die zweite Messung mit Systemdruck wird durchgeführt, um den Defekt von P3 zu umgehen. Durch Beschädigungen beim Ein- und Ausbau steht nur noch HC1 für die zweite Messung zur Verfügung. Dadurch ergeben sich sechs verwertbare Messungen. Die Druckmessungen werden mit Volumenströmen von 0 – 480 ml/min durchgeführt. Die Messroutine ist im Anhang A-13 dargestellt. Es wird eine minimale Schrittweite von 60 ml/min gewählt, da 60 ml/min der geringste Volumenstrom ist, bei dem ein konstanter Druck an den Sensoren messbar ist. Bei geringeren Volumenströmen füllt sich die Zelle zunächst und läuft in unregelmäßigen Zeitabständen durch die Sogwirkung des Rückführschlauches in den Tank wieder leer. Durch diesen Effekt des Leerlaufens sind auch die Messwerte bei 0 ml/min nicht brauchbar, da sich kein statischer Druck einstellt, wie beispielhaft in den Druckmesswerten der Messung in Abbildung 27 zu erkennen. In Abbildung 27 sind die mit der Kalibrierung korrigierten und über die Messabschnitte gemittelten Messwerte der Drucksensoren dargestellt. Es ist ein nichtlinearer Verlauf der Druckdifferenz über den Volumenstrom zu erkennen.

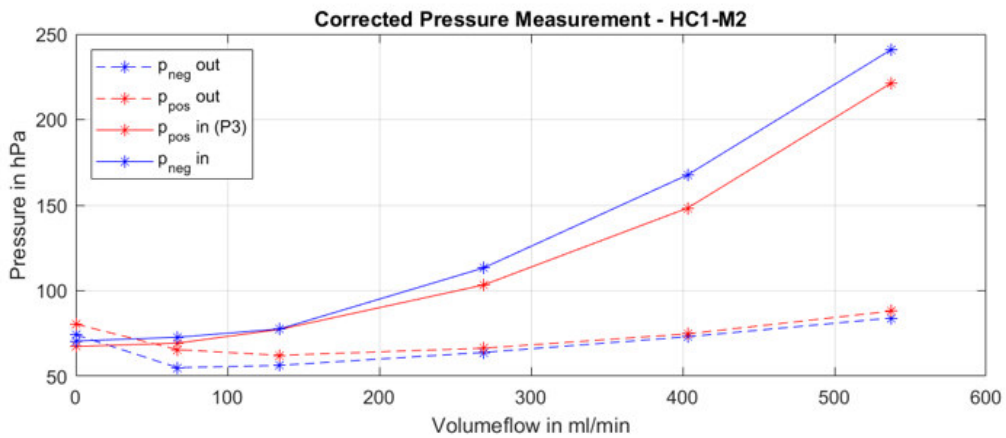


Abbildung 27: Untersuchung Einfluss Köpfe - Plot der Messwerte aus zweiter Messung mit Systemdruck

Es wird angenommen, dass die vielen Umlenkungen der Strömung in den Köpfen einen signifikanten quadratischen Anteil im hydraulischen Widerstands erzeugen. Daher wird zur Ermittlung der Parameter eine Regression mit einem Polynom 2. Grades durchgeführt. Aufgrund der hohen Volumenströme muss der Geltungsbereich für freie laminare Strömung eingegrenzt werden. Dazu wird die Reynoldszahl im Durchgangsloch des Kopfes mit 2mm Durchmesser abgeschätzt. Für den Volumenstrom von 240 ml/min wird die Reynoldszahl 1634 und für 360 ml/min die Reynoldszahl 2451 berechnet, sodass eine laminare Strömung nur bis zum Messpunkt von 240 ml/min angenommen wird. Ebenfalls wird angenommen, dass kein signifikanter hydraulischer Unterschied zwischen dem inneren und äußeren Kopf besteht. Die Regression der Druckdifferenzen über dem korrigierten Volumenstrom wird über alle im Abgrenzungsbereich liegenden Werte mit Ausnahme von Messung HC1-M2_{pos} gemeinsam durchgeführt. Es wird entschieden die Messung HC1-M2_{pos} nicht einzubeziehen, da die Druckdifferenzen deutlich unterhalb Druckdifferenzen der anderen Messungen liegen und hier von einem Messfehler ausgegangen wird. Dies ist in Abbildung 28 mit dem Plot der Druckdifferenzen über dem korrigierten Volumenstrom der Messungen zu erkennen.

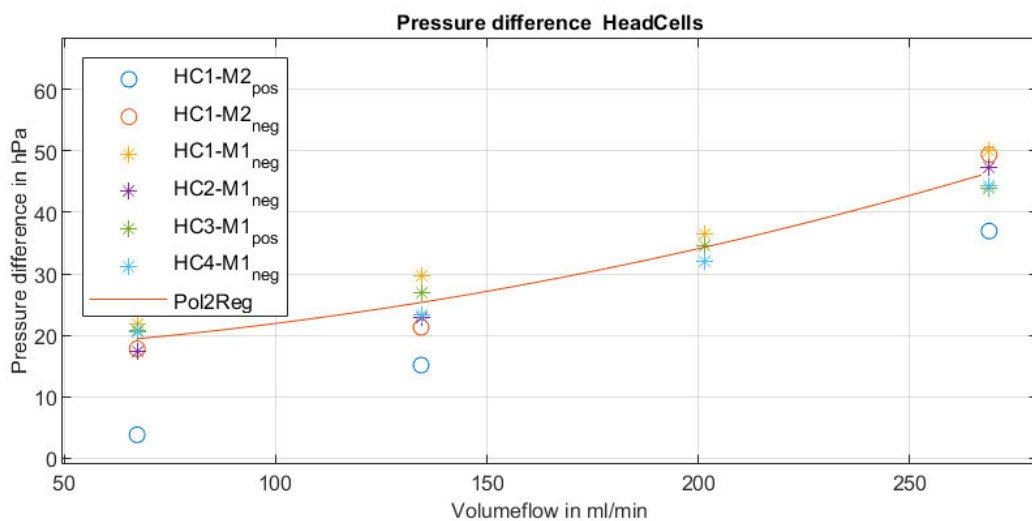


Abbildung 28: Untersuchung Einfluss Köpfe - Plot der Druckdifferenzen und Regression über die Messwerte

Ergebnis

In Abbildung 28 ist neben den Ergebniswerten der Druckdifferenzen auch die Regression mit der Ansatzfunktion des Polynoms 2. Grades eingezeichnet. Die ermittelten Regressionsparameter x_2 , x_1 und x_0 sind in Tabelle 8 eingetragen. Mit der Durchschnittstemperatur der Messreihen wird die dynamische Viskosität und die Dichte des Wassers bestimmt und daraus die geometrischen Einflussfaktoren auf den hydraulischen Widerstand bestimmt. Aus x_2 und der Dichte wird der quadratische Anteil Z_{qu} und aus x_1 und der Viskosität wird Z_{lin} berechnet, wie in Kapitel 4.1 erläutert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8 eingetragen.

Tabelle 8: Regressionsparameter und hydraulischer Einfluss der Köpfe

| x_2 [hPa/(ml/min) ²] | x_1 [hPa/ml*min] | x_0 [hPa] | R^2 | Visko. [mPas] | Dichte [kg/m ³] | Z_{qu} [m ⁻⁴] | Z_{lin} [m ⁻³] |
|---------------------------------------|-----------------------|----------------|-------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| 0,0003 | 0,0187 | 16,6 | 0,964 | 0,869 | 996 | 1,08E+11 | 1,29E+11 |

In dem Volumenstrombereich, in dem die Versuche durchgeführt wurden, ist der quadratische Anteil am hydraulischen Widerstand deutlich erkennbar, jedoch sind die Volumenströme im Betrieb mit 24 ml/min um ein Vielfaches geringer. Mit Hilfe der Regressionsparameter wird berechnet, dass der quadratische Anteil bei diesem Volumenstrom 28% beträgt und somit nicht vernachlässigbar ist.

Ebenfalls wird der Anteil der Köpfe am hydraulischen Widerstand der Zelle berechnet. Dazu werden die Druckverluste der Köpfe mit den Druckverlusten einer Zelle mit den Mittelwerten von Z aus den Zellmessungen in Kapitel 4.4 bei Betriebsvolumenstrom ins Verhältnis gesetzt. Da das Z der Zelle für die IHC und OHC unterschiedlich ist, berechnen sich unterschiedliche Anteile für die Halbzellen. Die Berechnung wird mit Stoffwerten für Wasser und V3,5 durchgeführt. Mit Wasser als Fluid wird ein Anteil der Köpfe von 0,7% der OHC und 2,7% der IHC berechnet. Für V3,5 ergibt sich 0,5% an der OHC und 2,3% an der IHC. Die Berechnungs- und Ergebnistabelle ist im Anhang A-14 zu finden.

Zur Einordnung der Ergebnisse ist der Messbereich 17 bis 50 hPa zu betrachten, in dem sich die Druckdifferenzen bewegen. Aus dem Vergleich dieser Werte mit der Messgenauigkeit der Drucksensoren von 12,5 hPa und der Tatsache, dass die Messungen nicht bei dem Vergleichsvolumenstrom aufgenommen wurden, ist festzustellen, dass die Ergebnisse plausibel sind, aber durchaus von der Realität abweichen können. Als Ergebnis lässt sich festhalten, dass die Köpfe keinen signifikanten Einfluss auf den hydraulischen Widerstand der Zellen haben.

4.6 Ermittlung hydraulischer Widerstand der Modulplatten

Zielsetzung

Zielsetzung dieses Versuchs ist es, experimentell den Anteil der Modulplatten an dem hydraulischen Widerstand des Basis-Moduls zu ermitteln.

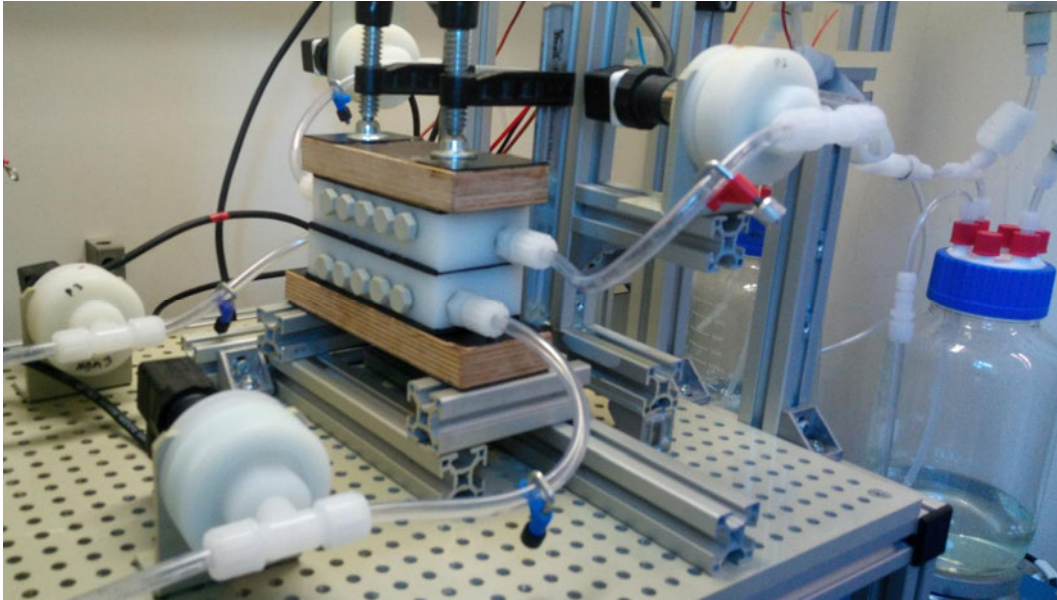


Abbildung 29: Aufbau zur Untersuchung des hydraulischen Widerstands der Modulplatten im Prüfstand

Durchführung

Um eine gesonderte Messung des hydraulischen Widerstands der Modulplatten zu ermöglichen, wird der in Abbildung 29 dargestellte Versuchsaufbau verwendet. Die Modulplatten sind oben und unten mit Flachdichtungen versehen. Die Flachdichtung zwischen den Modulplatten ist an den Positionen der Zellköpfe mit Durchgangslöchern von 16 mm Durchmesser versehen. Der Versuchsstand bleibt ansonsten unverändert. Damit sollen bei der Ermittlung der Druckdifferenz nur die Leitungsverluste innerhalb der Modulplatten zum Tragen kommen. Wie in den Untersuchungen der Einzelzellen und der Köpfe tritt bei einem ersten Versuch ohne zusätzlichen Systemdruck ein Defekt am Drucksensor P3 auf, sodass eine Hälfte der Messwerte nicht verwertbar ist. Es wird ebenfalls eine zweite Untersuchung mit Systemdruck durchgeführt. Die Versuche werden mit Volumenströmen von 60 – 480 ml/min durchgeführt. Siehe Anhang A-15. Die Untergrenze befindet sich bei 60 ml/min, da bei geringeren Volumenströmen ein unregelmäßiges Leerlaufen des Systems durch die Sogwirkung der Wassersäule im Rückführschlauch in den Tank zu keinen konstanten Messwerten führt. Zur Überprüfung des Vorherrschens einer laminaren Strömung und damit der Gültigkeit der Ansätze, wird die Reynoldszahl für eine freie Rohrströmung berechnet. Im Manifold mit 8 mm Durchmesser wird eine maximale Reynoldszahl von 1634 berechnet. Somit wird der gesamte Messbereich als geeignet eingestuft. Weiterhin wird angenommen, dass kein signifikanter hydraulischer Unterschied zwischen den Halbzellweiten der Modulplatten besteht.

Aus den Messwerten lässt sich ein nichtlinearer Verlauf vermuten. Zur Ermittlung der Einflussparameter auf den hydraulischen Widerstand wird daher eine lineare Regression und

eine Regression mit einem Polynom 2. Grades der Druckdifferenzen über den korrigierten Volumenstrom der drei Messungen vorgenommen.

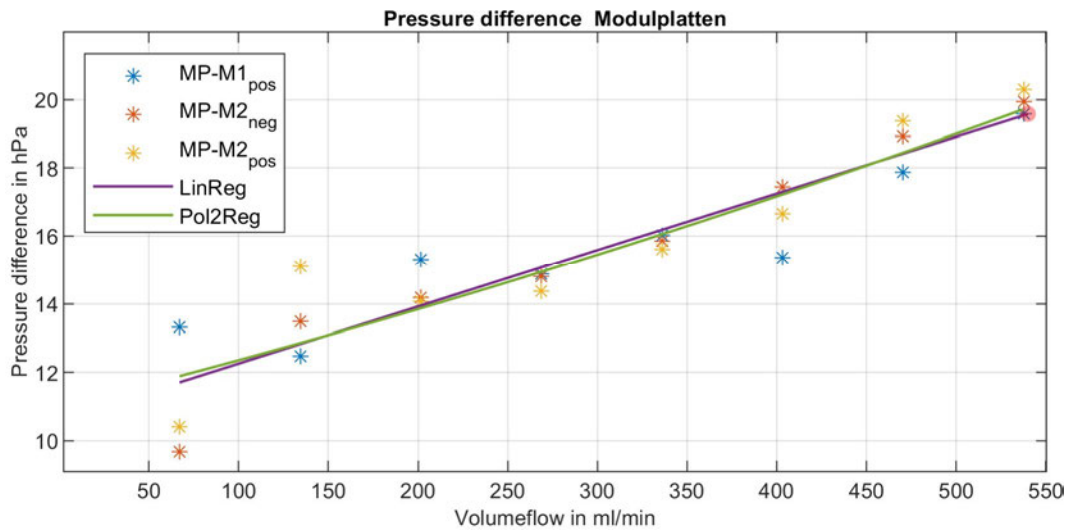


Abbildung 30: Hydraulischer Widerstand der Modulplatten - Plot der Druckdifferenzen und Regressionen der Messwerte

Ergebnis

In Abbildung 30 sind die Druckdifferenzen der drei Messungen über dem korrigierten Volumenstrom aufgetragen. Zudem ist die lineare Regression LinReg und die Regression mit der Ansatzfunktion des Polynoms 2. Grades Pol2Reg dargestellt. Die ermittelten Regressionsparameter sind in Tabelle 9 aufgeführt. Wie in Abbildung 30 zu vermuten und an dem geringen Regressionsparameter x_2 der Ploy2Reg zu erkennen, ist der quadratische Einfluss in diesem Messbereich nicht signifikant. Beide Regressionen bilden die Messwerte in etwa gleichwertig ab, wie an dem R^2 Wert zu sehen. Trotz des Unterschieds der x_1 Parameter, ist der Unterschied des statischen x_0 Parameters vernachlässigbar.

Tabelle 9: Regressionsparameter der Messung des hydraulischen Widerstands der Modulplatten

| Regression | x_2 [hPa/(ml/min) ²] | x_1 [hPa/ml*min] | x_0 [hPa] | R^2 |
|------------|---------------------------------------|-----------------------|----------------|-------|
| LinReg | 0 | 0,0166 | 10,6 | 0,870 |
| Poly2Reg | 5,73E-06 | 0,0132 | 11,0 | 0,872 |

Tabelle 10: Berechnete lineare und quadratische Einflussfaktoren des hydraulischen Widerstands der Modulplatten

| Regression | Z_{qu} [m ⁻⁴] | Z_{lin} [m ⁻³] | Visko. [mPas] | Dichte [kg/m ³] |
|------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------|--------------------------------|
| LinReg | 0 | 1,12E+11 | 0,889 | 997 |
| Poly2Reg | 2,07E+09 | 8,89E+10 | 0,889 | 997 |

Mit der gemittelten Umgebungstemperatur der Messungen werden die Stoffwerte Dichte und dynamische Viskosität bestimmt. Aus diesen und dem Regressionsparametern werden die

Einflussfaktoren des hydraulischen Widerstands Z_{qu} und Z_{lin} berechnet, wie in Kapitel 4.1 erläutert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 10 dargestellt.

Für die Abschätzung des Anteils der Modulplatten am hydraulischen Widerstand des Moduls wird die Berechnung mit dem linearen Ansatz als ausreichend genau betrachtet. Um den Anteil zu berechnen, werden die Druckverluste der Modulplatten mit denen des Moduls TXM1 ins Verhältnis gesetzt. Da beide Komponenten nur lineare Anteile betrachten, lässt sich dies durch das Verhältnis des komponentenspezifischen hydraulischen Widerstandes Z darstellen. Weiter bleiben auch bei unterschiedlichen Fluiden die Anteile gleich, da sich die Viskositätsänderung auf beide Komponenten gleich auswirkt. Es ergibt sich für die negative Halbzellseite ein Anteil von 2,4 % und für die positive Halbzellseite ein Anteil von 8,7%.

Zur Einordnung der Ergebnisse ist der Messbereich 10 bis 20 hPa zu betrachten, in dem sich die Druckdifferenzen bewegen. Aus dem Vergleich dieser Werte mit der Messgenauigkeit der Drucksensoren von 12,5 hPa und der Tatsache, dass die Messungen nicht bei dem Vergleichsvolumenstrom aufgenommen wurden, ist anzunehmen, dass die Ergebnisse keine hohe Verlässlichkeit aufweisen.

Als Ergebnis lässt sich festhalten, dass die Modulplatten keinen signifikanten Einfluss auf den hydraulischen Widerstand der Basis-Module haben.

5 Entwicklung der hydraulischen Stack-Modelle

Die hydraulische Systemkomponente der RFB hat die Aufgabe, eine verlustarme und gleichmäßige Versorgung der Zellen mit Elektrolyten zu gewährleisten. Wie in [24] dargestellt, muss dabei ein Optimum aus Systemeffizienz und Materialeinsatz gefunden werden.

Um die Hydraulik detailliert zu berücksichtigen und Voraussagen zu Systemeigenschaften treffen zu können, sind Simulationsmodelle in der Entwicklung der Versorgungsmodule des Stacks von zentraler Bedeutung. Darüber hinaus können Modelle damit einen Einblick in komplexe Prozesse gewähren. Dieses Kapitel widmet sich der Erstellung dieser Modelle mit der multiphysikalischen FEM-Berechnungs-Software COMSOL und insbesondere der Kalibrierung und Validierung der Modelle mit der Datenbasis aus den Laborversuchen.

Um die Übertragbarkeit des hydraulischen Modells in die Praxis zu prüfen, werden Modelle der Ist-Geometrien des Basis-Moduls erstellt und das modellierte Verhalten mit den Realergebnissen der Datenbasis verglichen. Die Übertragung der Modelle in die Entwicklung des Stacks wird in Kapitel 6 dargestellt.

5.1 Modellierung der Zelle

Zielsetzung

In der Zelle herrscht durch die flow-by-Versorgung eine Mischströmung aus Strömung im Flow Channel (FC) und Strömung im Filz. Zudem ist der Filz in den Halbzellen durch ein Übermaß komprimiert und ragt in die FC der Stromsammler hinein, sodass der Strömungsquerschnitt verengt wird. Im momentanen Produktionsprozess der Zellen kann keine konstante Kompression des Filzes gewährleistet werden. Es wird angenommen, dass eine variierende Verengung der FC durch unterschiedliche Eindringtiefen des Filzes die Ursache der Schwankungen des hydraulischen Widerstands der Zellen ist. Zudem führen unterschiedliche Druckabfälle der Zellen zu unterschiedlichen Volumenströmen im Filz, welche signifikant für die elektrochemische Performance der Zelle ist. Die Zielsetzung ist, ein Modell zu entwickeln, welches durch variierende Eindringtiefen die hydraulischen Widerstände der Zellen nachbildet, um diese Annahme zu validieren und zu quantifizieren. Darüber hinaus wird eine rudimentäre Betrachtung des Strömungsanteils im Filz durchgeführt.

Umsetzung

Aus den experimentellen Untersuchungen der Einzelzellen in Kapitel 4.4 sind die hydraulischen Widerstände der IHC und OHC der Zellen bekannt. Für die kreissymmetrischen Halbzellen wird angenommen, dass in jedem der acht FC die gleiche Eindringtiefe vorliegt und sich der Volumenstrom und Druckabfall gleichmäßig verteilen. Da die hydraulischen Zusammenhänge linear sind, wird das Modell reduziert, indem nur eine Teillänge der Geometrie modelliert wird und die Ergebnisse entsprechend skaliert werden. Mit diesen Annahmen werden die Modelle auf ein Achtel der Kreissymmetrie und ein Zentel der Länge reduziert.

Für die IHC wird das Modell entsprechend der Querschnittsgeometrie in Abbildung 31-links mit einer Länge von 12,5 mm erstellt. Die OHC wird mit der Querschnittsgeometrie entsprechend Abbildung 31-rechts mit einer Länge von 10 mm modelliert.

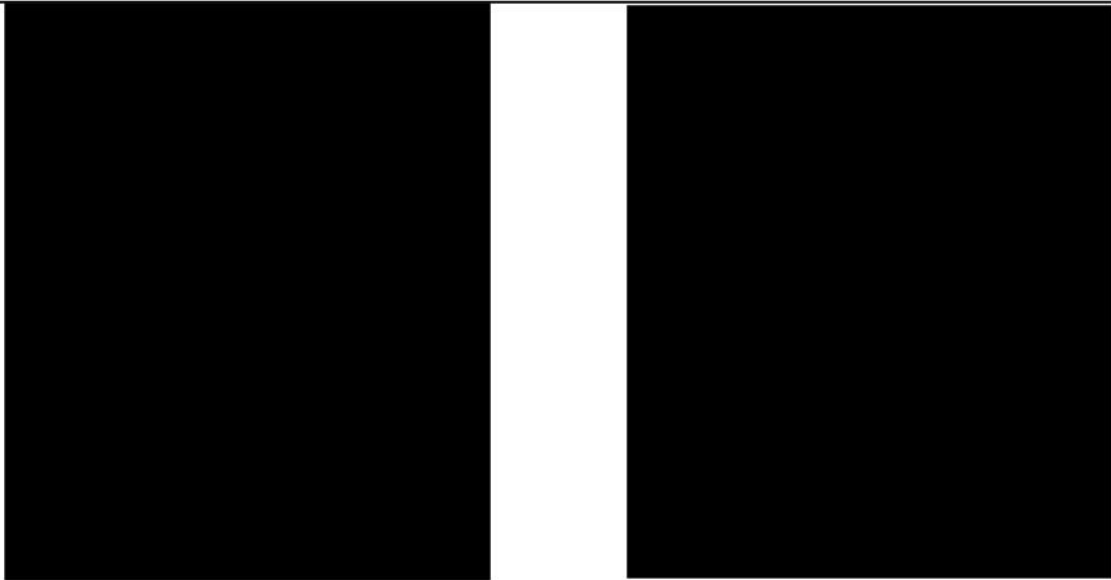


Abbildung 31: Vernetzte Modelle der Halbzellen bestehend aus einem Flow Channel und ein Kreissegment Filz mit Eindringung in Flow Channel: links IHC; rechts OHC

Die Eindringtiefe des Filzes in den FC wird mit einem Spline über die Eckpunkte des FC und dem Parameter t_{ffc} modelliert, wie im Anhang B-1 zu erkennen. Weiter werden die scharfen Kanten der entstehenden FC-Geometrie, wo diese auf das Ringsegment stößt, radial um 0,05 mm eingekürzt. Damit werden Vernetzungsprobleme reduziert. Das Netz wird als freies Tetraeder-Netz der Größeneinstellung „fein“ mit fünfzähliger Randschichtenverfeinerung im Bereich des FC erstellt, wie in Abbildung 31 zu erkennen. Zusätzlich wird einseitig ein Fortsatz der Geometrie modelliert, um die Einlassbedingung des Volumenstroms nicht direkt auf die Stirnseite und nicht allein auf den FC aufzubringen. Diese sind in der Modellansicht im Anhang B-2 am unteren Ende des Modells zu erkennen.

Es wird die Physik „Strömung frei und durch poröse Medien“ in Comsol gewählt. Der Volumenstrom wird auf 3 ml/min festgesetzt, was dem Standard von 24 ml/min einer Zelle entspricht. Ausgangsbedingung ist ein Druck von null. Als Fluid wird Wasser mit einer Temperatur von 20°C verwendet. Die Volumenkörper des Filzes werden als poröse Matrix definiert. Für diese sind die Parameter der Porosität ϵ und der Permeabilität κ zu definieren. Dafür werden die Daten des in Kapitel 4.2.3 verwendeten Filzes herangezogen. Für die Halbzellen wird angenommen, dass der Filz eine Kompression hat von 63,3% und damit $\epsilon = 0,838$ ist. Diese Annahme entstammt einer Geometriebetrachtung der momentan vorhandenen Zellbauteile der OHC und wird vereinfacht für beide Halbzellen angenommen. Die Permeabilität wird vereinfacht gleichbleibend als $\kappa = 1,38 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2$ angenommen. Dies entspricht dem Mittelwert der in Kapitel 4.2.3 ermittelten Permeabilität. An den Schnittkanten des Ringsegments wird die Symmetriebedingung aufgebracht.

Es wird für beide Modelle ein Parameter-Sweep mit t_{ffc} durchgeführt. An den Eintrittsflächen in den FC und Filz werden die Oberflächenmittelwerte des Drucks Δp abgeleitet. Die dynamische Viskosität η und der Volumenstrom \dot{V} sind konstant vorgegebenen. Damit ergibt sich für den hydraulischen Widerstand des Modells in Abhängigkeit der Eindringtiefe $Z(t_{\text{ffc}})$ aus den Gleichungen 10 und 11 der Zusammenhang in Gleichung 24:

$$Z(t_{\text{fifc}}) = \frac{\Delta p(t_{\text{fifc}})}{\eta \cdot \dot{V}} \quad (24)$$

Weiter folgt für die Berechnung des hydraulischen Widerstands der gesamten Zelle Z_{Zelle} aus dem Ergebnis des Modells mit den Bedingungen der Modelreduzierungen aus Kreissymmetrie und Längenskalierung Gleichung 25:

$$Z_{\text{Zelle}}(t_{\text{fifc}}) = Z(t_{\text{fifc}}) \cdot f_L \cdot f_{\text{Sym}} \quad (25)$$

Dabei ist $f_L = 10$ der Faktor aus der Längenskalierung und $f_{\text{Sym}} = 1/8$ der Faktor aus der Kreissymmetrie. Darüber hinaus werden an den Austrittsflächen der FC und des Filzes jeweils das Oberflächenintegral der Strömungsgeschwindigkeit abgeleitet, um die Anteile der Volumenströme zu berechnen.

Ergebnisse

Abbildung 32 stellt die Ergebnisse der Auswertung der Zellmodelle dar. In den Ergebnistabellen im Anhang B-3 und B-4 sind die abgeleiteten und berechneten Werte eingetragen, auf die sich die Graphen beziehen. Mit steigender Eindringtiefe des Filzes steigen der hydraulische Widerstand der Halbzellen und der Anteil des Volumenstroms im Filz. Die Abbildungen 33 und 34 zeigen die Strömungsgeschwindigkeiten im Querschnitt der Zellmodelle bei den Eindringtiefen 0,3 mm und 0,45 mm bzw. 0,35 mm und 4,5 mm. Es ist zu erkennen, dass der Bereich der freien Strömung geringer wird und die Geschwindigkeiten steigen.

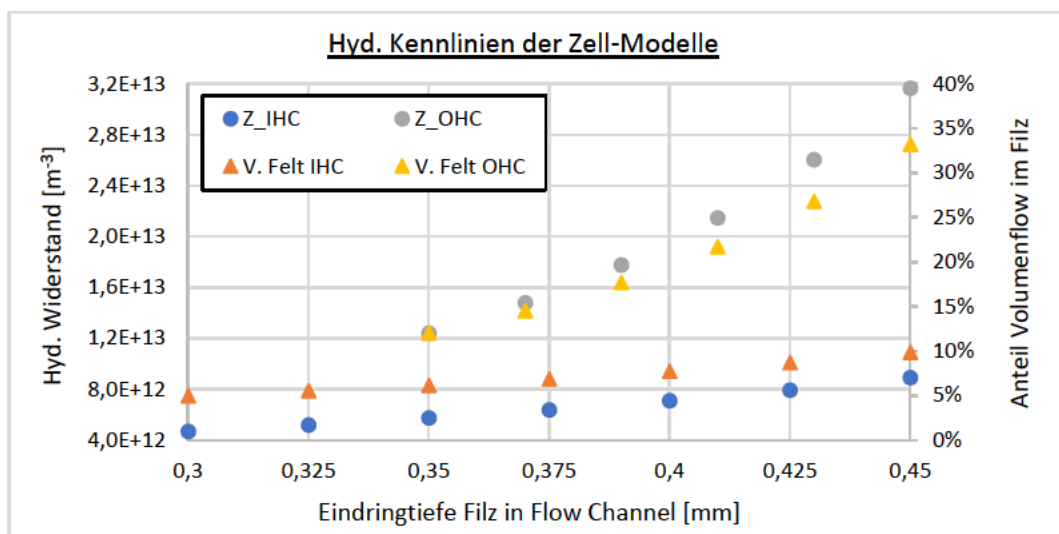


Abbildung 32: Kennlinien des hyd. Widerstands und des Volumenstromanteils im Filz der Halbzellen in Abhängigkeit der Eindringtiefe des Filzes aus Comsol-Modell

Gleichzeitig steigt der Einfluss der Wände, da sich das Verhältnis von durchströmter Fläche zu Umfang verkleinert. Infolgedessen steigt nach Gleichung 4 bzw. 5 der Druckabfall über den FC. Da über den Filz der gleiche Druck abfällt, wie über den FC, folgt aus Gleichung 8, dass der Volumenstrom durch den Filz steigt. Damit sind die Ergebnisse in Abbildung 32 plausibel und erfüllen die Annahme. Darüber hinaus ist zu erkennen, dass unterschiedliche Eindringtiefen einen signifikant größeren Einfluss auf den hydraulischen Widerstand der OHC hat als auf die

IHC. Damit lassen sich die Schwankungsbereiche der Widerstandswerte der Messung in Kapitel 4.4 erklären. Um dies zu quantifizieren werden die Steigungen über eine lineare Regression angenähert. Für die IHC wird die Steigung $2,78E+13 \text{ m}^{-3}/\text{mm}$ und für die OHC die Steigung $1,91E+14 \text{ m}^{-3}/\text{mm}$ ermittelt. Damit ist der Einfluss auf die OHC in etwa 6,8-mal höher als auf die IHC. Das Verhältnis der Standardabweichungen der Messergebnisse aus Kapitel 4.4 liegt bei 6,2. In Abbildung 32 ist zu erkennen, dass der Zusammenhang nicht linear ist, sich aber als solche annähern lassen. Die Bestimmtheitsmaße R^2 der Approximationen von 0,99 und 0,98 bestätigen dies. Weiter wurden mit den Regressionsparametern die Bereiche der Eindringtiefen in den Halbzellen abgeschätzt. Für die IHC ergibt sich $t_{\text{fifc}} = 0,326 \dots 0,420 \text{ mm}$ und für die OHC $t_{\text{fifc}} = 0,371 \dots 0,468 \text{ mm}$.

Die Volumenströme im Filz sind von den Filzparametern abhängig. Diese wurden in den Modellen stark vereinfacht: Die Kompression des Filzes beeinflusst die Porosität und damit auch Permeabilität des Filzes. Dass die Kompression zwischen den Halbzellen und auch innerhalb der Halbzellen unterschiedlich ist, wurde in diesem Modell nicht betrachtet. Für eine belastbare Betrachtung der Durchströmung des Filzes ist die durchgeführte Modellierung nicht ausreichend.

Die Ergebnisse der Modellierung der Halbzellen bestätigen die Annahme, dass die hydraulischen Widerstände der Zellen von der Eindringtiefe des Filzes in die FC beeinflusst werden. Für eine aussagekräftige Abschätzung der Durchströmung des Filzes sind die Annahmen, die für die Permeabilität und die Porosität des Filzes getroffen wurden, zu stark vereinfacht.

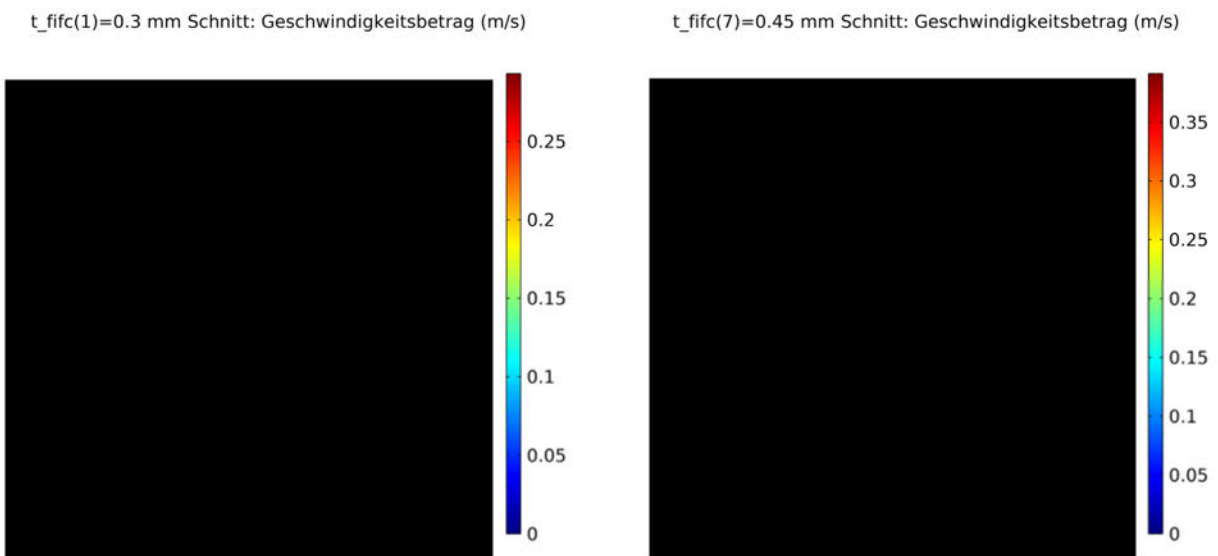


Abbildung 33: Strömungsgeschwindigkeiten im Querschnitt des IHC-Modells bei einer Eindringtiefe des Filzes von 0,3 mm und 0,45 mm

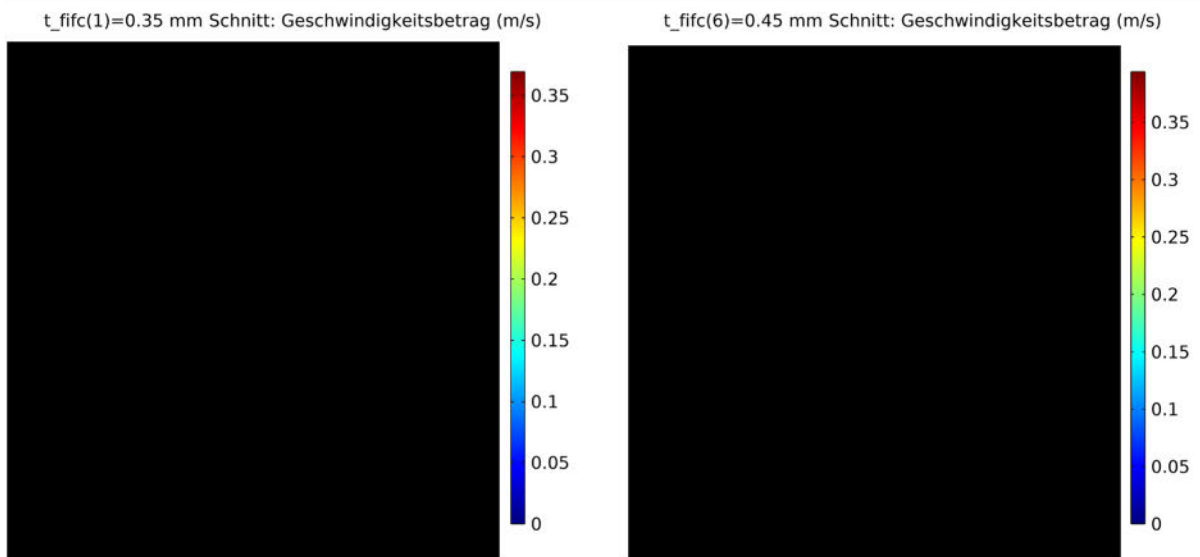


Abbildung 34: Strömungsgeschwindigkeiten im Querschnitt des OHC-Modells bei einer Eindringtiefe des Filzes von 0,35 mm und 0,45 mm

5.2 Modellierung von Dummy-Zellen

Zielsetzung

In Kapitel 5.1 werden die tubulären Zellen in ihrer Geometrie modelliert und über den Parameter der Eindringtiefe des Filzes in die FC so parametrisiert, dass die gemessenen hydraulischen Widerstände realen Zellen nachgebildet werden können. Der Fokus dieser Arbeit liegt jedoch nicht auf den Zellen, sondern auf der Entwicklung von Stacks mit mehreren Zellen. Zur Reduzierung des Rechenaufwands von Stack-Modellen, ist das Ziel dieses Abschnitts Dummy-Zellen zu entwickeln, welche effizient den hydraulischen Widerstand der Zellen nachbilden.

Umsetzung

Es wird für jede Halbzelle eine Dummy-Zelle entwickelt. Diese werden als Volumenkörper modelliert, welche die Geometrie der Zelle nachahmen und über die Permeabilität so parametrisiert werden, dass sie den gewünschten hydraulischen Widerstand darstellen. Die Geometrie der Dummy-Zellen wird entsprechend der Außengeometrie der Stromsammler mit Filz der Halbzellen modelliert. Für den Dummy der IHC, folgend als IDC bezeichnet, wird ein Zylinder mit 125 mm Länge und [redacted] Durchmesser erstellt. Für den Dummy der OHC, folgend als ODC bezeichnet, wird ein Hohlzylinder mit 100 mm Länge und [redacted] Innendurchmesser und [redacted] Außendurchmesser erstellt. In Abbildung 35 und 36 sind die Modelle der IDC und ODC mit den vernetzten Stirnseiten mit Randverfeinerung und dem über die Länge extrudierten Netz dargestellt. Eine Ansicht der gesamten Geometrie beider Dummies ist im Anhang B-5 zu finden. Die Dummy-Zellen als poröse Matrizen mit der $\epsilon = 1$ und der Permeabilität κ als Parameter definiert. Um den erforderlichen Parameterwert von κ zum Erreichen des angestrebten hydraulischen Widerstands zu ermitteln, wird ein Parameter-Sweep mit κ durchgeführt. Als Einlassbedingung wird ein Volumenstrom von 24 ml/min und als Ausgangsbedingung ein Druck von null gewählt. Als Fluid wird Wasser mit einer Temperatur von

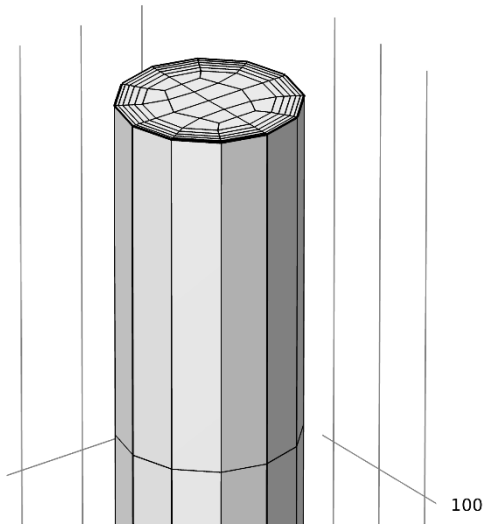


Abbildung 35: Dummy der inneren Halbzelle mit Vernetzung

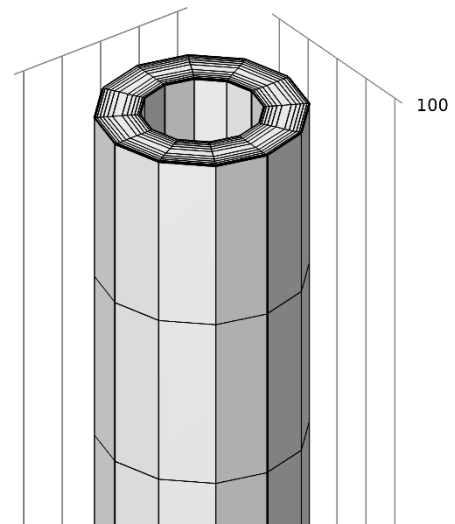


Abbildung 36: Dummy der äußeren Halbzelle mit Vernetzung

20°C verwendet. Analog zu Gleichung 25 und mit Berücksichtigung des Gesetzes nach Darcy (siehe Gleichung 10) wird der hydraulische Widerstand in Abhängigkeit zu $1/\kappa$ bestimmt.

Ergebnisse

Die als Mittelwert über die Einlassfläche abgeleiteten Ergebniswerte des Modells und die nach Gleichung 24 berechneten hydraulischen Widerstände sind in den Tabellen im Anhang B-6 und B-7 dargestellt. In Abbildung 37 ist die Abhängigkeit von hydraulischem Widerstand der IDC zum Parameter κ als Graph dargestellt. Es ist eine reziproke Proportionalität zu erkennen. Gleiches gilt für die in Abbildung 38 dargestellte Parametrisierung der ODC.

Die Parameter der linearen Zusammenhänge werden mittels der linearen Regression in Microsoft Excel ermittelt und sind ebenfalls in den Abbildungen 37 und 38 dargestellt. Daraus ergeben sich die Zusammenhänge der Gleichungen 26 und 27, mit denen die Dummy-Zellen parametrisiert werden können. Die berechneten Parameter der Dummy-Zellen zur Abbildung der Minimal-, Maximal- und Mittelwerte der Zellen im Modell sind in Tabelle 11 abzulesen. Die Parameter der Einzelzellen der Datenbasis aus Kapitel 4.4 sind im Anhang B-8 zu finden.

Mithilfe dieser Dummy-Zellen ist erfolgreich die Möglichkeit geschaffen, Stack-Modelle mit einfach und einzeln parametrisierbaren Zellen zu bestücken, ohne mit großem Rechenaufwand.

Tabelle 11: Min-, Max- und Mittelwerte der hyd. Widerstände und Parameter der Permeabilität der Dummy-Zellen

| | Minimum | Mittelwert | Maximum |
|--|----------|------------|----------|
| hyd. Widerstand IHC [m ⁻³] | 5,19E+12 | 6,35E+12 | 7,79E+12 |
| Permeabilität IDC [m ²] | 1,31E-09 | 1,06E-09 | 8,65E-10 |
| hyd. Widerstand OHC [m ⁻³] | 1,52E+13 | 2,64E+13 | 3,37E+13 |
| Permeabilität ODC [m ²] | 1,62E-10 | 9,39E-11 | 7,34E-11 |

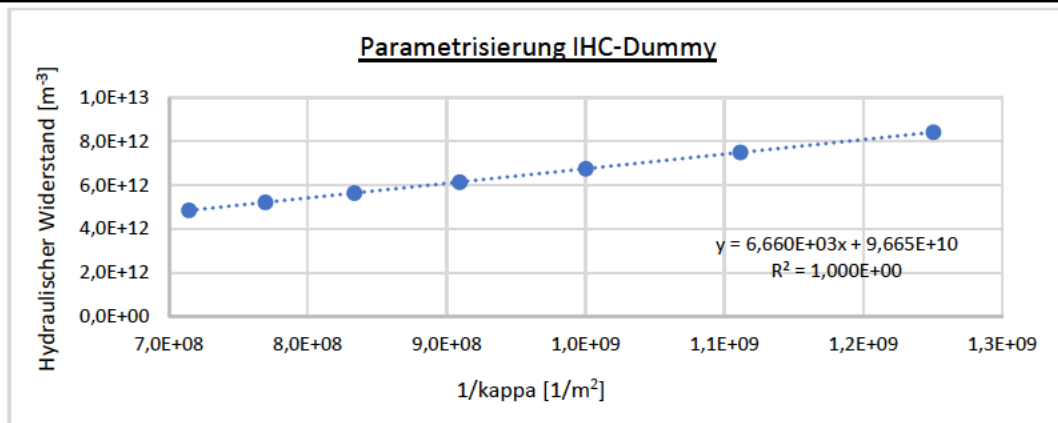


Abbildung 37: Parametrisierung IHC-Dummy - Graph des hyd. Widerstands in Abhängigkeit der Permeabilität

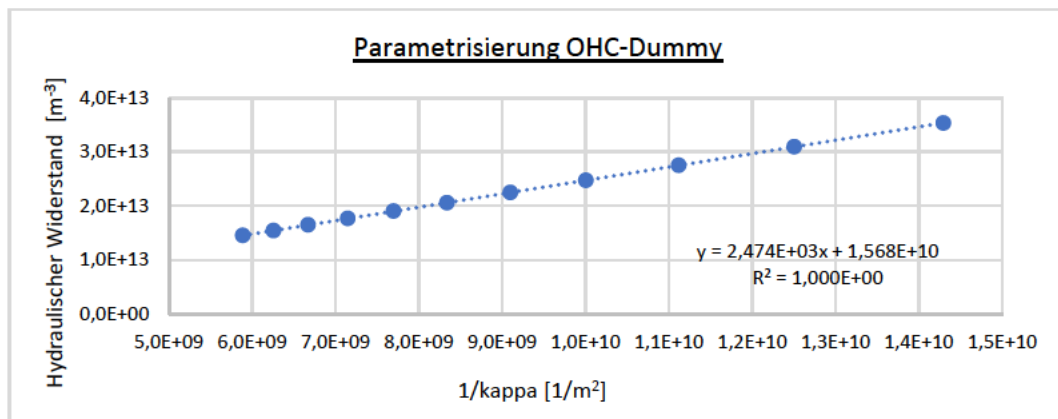


Abbildung 38: Parametrisierung OHC-Dummy - Graph des hyd. Widerstands in Abhängigkeit der Permeabilität

$$\kappa_{IDC} = \frac{6,66 \cdot 10^3 \text{ m}^{-1}}{Z_{IDC} - 9,67 \cdot 10^{10} \text{ m}^{-3}} \quad (26)$$

$$\kappa_{ODC} = \frac{2,47 \cdot 10^3 \text{ m}^{-1}}{Z_{ODC} - 1,57 \cdot 10^{10} \text{ m}^{-3}} \quad (27)$$

5.3 Modellierung der Zellköpfe

Zielsetzung

Die Messung des hydraulischen Widerstands der Köpfe hat ergeben, dass die Köpfe keinen signifikanten Anteil an dem hydraulischen Widerstand der Zellen haben. In den Versuchen ist es jedoch nicht möglich, die Köpfe mit im Betrieb auftretenden Volumenströmen zu untersuchen. Zudem wird angenommen, dass die Messgenauigkeit der Drucksensoren aufgrund der geringen Druckdifferenzen eine große Ungenauigkeit dieses Ergebnisses zur Folge hat. Ziel dieses Abschnitts ist es, das Ergebnis der Messung und die Annahme, dass der quadratische Anteil des hydraulischen Widerstands signifikant ist, zu evaluieren.

Umsetzung

In Abbildung 40 ist das in Comsol verwendete Model des Kopfes der OHC abgebildet. Die



Abbildung 39: Hydraulisches Modell Kopf OHC mit Peripherie

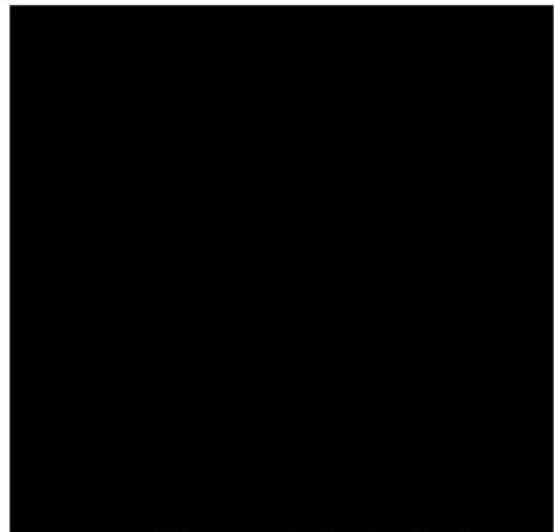


Abbildung 40: Vernetztes Model Kopf OHC mit Peripherie

Geometrie des äußeren Stromsammlers, der in der Kopfzelle als Verbindung zwischen den Köpfen dient wird vernachlässigt. Berücksichtigt wird die Peripherie bestehend aus Manifold und Schlauchanschlüssen des Einzelmoduls. Abbildung 39 zeigt die Vernetzung des Modells. Durch die Symmetrie ist hier die Randschichtverfeinerung zu erkennen. Als Physik wird freie laminare Strömung verwendet.

Die Einlassbedingung ist ein parametrisierter Volumenstrom. Auslassbedingung ist ein Druck von null. Als Fluid wird Wasser mit einer Temperatur von 20°C verwendet. Es wird ein Parameter-Sweep mit \dot{V} im Wertebereich von 12 bis 120 ml/min durchgeführt. An der Einlassfläche wird der Oberflächenmittelwert des Drucks Δp abgeleitet.

Ergebnisse

Die Ergebniswerte des Parameter-Sweeps sind in der Tabelle im Anhang B-9 dargestellt. In Abbildung 41 ist die Druckdifferenz über dem Volumenstrom als Graph abgebildet. Wie in Kapitel 4.5 lässt sich ein quadratischer Anteil des hydraulischen Widerstands erkennen. Das Ergebnis der mit Microsoft Excel durchgeführten Regression mit Polynom 2. Grades, deren Bestimmtheitsmaß die Annahme bestätigt, ist in Abbildung 41 abgebildet.

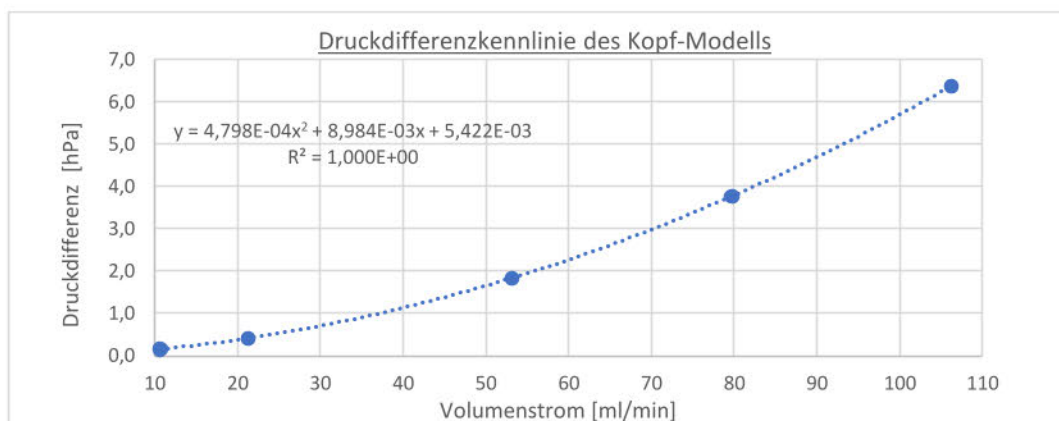


Abbildung 41: Modell Zellkopf - Kennlinie der Druckdifferenz über den Volumenstrom

Aus den Regressionsparametern werden mit Gleichungen 17 und der Fluideigenschaften der quadratische Anteil $Z_{qu} = 1,73 \cdot 10^{11} m^{-4}$ und der lineare Anteil $Z_{lin} = 5,34 \cdot 10^{10} m^{-3}$ des hydraulischen Widerstands der Zellköpfe berechnet. Mit diesen Werten wird der Anteil der Köpfe am Druckverlust der Zellen abgeschätzt. Dazu wird der Druckverlust der Köpfe mit dem Druckverlust einer Durchschnittszelle ins Verhältnis gesetzt. Siehe dazu Berechnungstabelle im Anhang B-10. Mit Wasser als Fluid ergibt sich für die IHC ein Anteil von 1,9% und für die OHC ein Anteil von 0,5%. Mit Stoffwerten für V3,5 ergibt sich für die IHC ein Anteil von 1,2% und für die OHC ein Anteil von 0,3%. Diese Anteile sind 30-50% geringer als die Werte der Berechnung mit den Parametern der Messung in Kapitel 4.5. Da die absoluten Werte jedoch nur ein Zentel der Messgenauigkeit betragen, sind die Ergebnisse plausibel. Damit bestätigt sich die Annahme, dass der Anteil der Zellköpfe am hydraulischen Widerstand der Zellen zu vernachlässigen ist.

5.4 Modellierung der Modulplatten

Zielsetzung

Die Messung des hydraulischen Widerstands der Modulplatten hat ergeben, dass diese keinen signifikanten Anteil an dem hydraulischen Widerstand der Basis-Module haben. In den Versuchen ist es jedoch nicht möglich, die Modulplatten mit im Betrieb auftretenden Volumenströmen zu untersuchen. Zudem kann die Messgenauigkeit der Drucksensoren aufgrund der geringen Druckdifferenzen einen großen Einfluss auf dieses Ergebnis haben. Siehe dazu Kapitel 4.6. Ziel dieses Abschnitts ist es, das Ergebnis der Messung zu evaluieren.

Umsetzung

Das hydraulische Modell der Modulplatten, dargestellt in Abbildung 42, ist dem Messaufbau in Abbildung 26 nachempfunden. Die Manifolds der Modulplatten ist mit den Schlauchanschlüssen modelliert. Abbildung 43 zeigt das vernetzte Modell. Im Bereich des Manifolds und der Channel wurden Randschichtverfeinerungen angewendet.

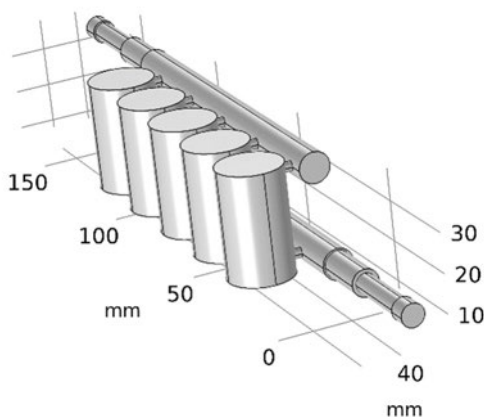


Abbildung 42: Hydraulisches Modell der Modulplatten

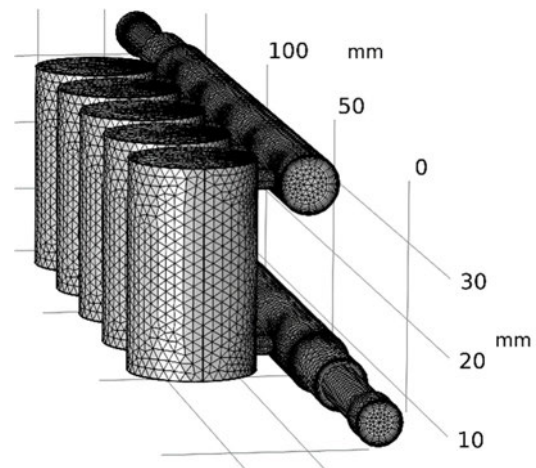


Abbildung 43: Vernetztes hydraulisches Modell der Modulplatten

Die Einlassbedingung ist ein parametrisierter Volumenstrom. Die Auslassbedingung ist ein Druck von null. Als Fluid wird Wasser mit einer Temperatur von 20°C verwendet. Es wird ein

Parameter-Sweep mit \dot{V} im Wertebereich von 12 bis 120 ml/min durchgeführt. An der Einlassfläche wird der Oberflächenmittelwert des Drucks Δp abgeleitet.

Ergebnisse

Die Ergebniswerte des Parameter-Sweeps sind in der Tabelle im Anhang B-11 dargestellt. In Abbildung 44 ist die Druckdifferenz über dem Volumenstrom als Graph abgebildet. Entgegen der Analyse in Kapitel 4.6, in der eine lineare Approximation durchgeführt wurde, lässt sich ein quadratischer Anteil des hydraulischen Widerstands erkennen. Das Ergebnis der mit Microsoft Excel durchgeführten Regression mit Polynom 2. Grades ist in Abbildung 44 abgebildet. Der Bestimmtheitsmaß der Regression bestätigt diese Annahme.

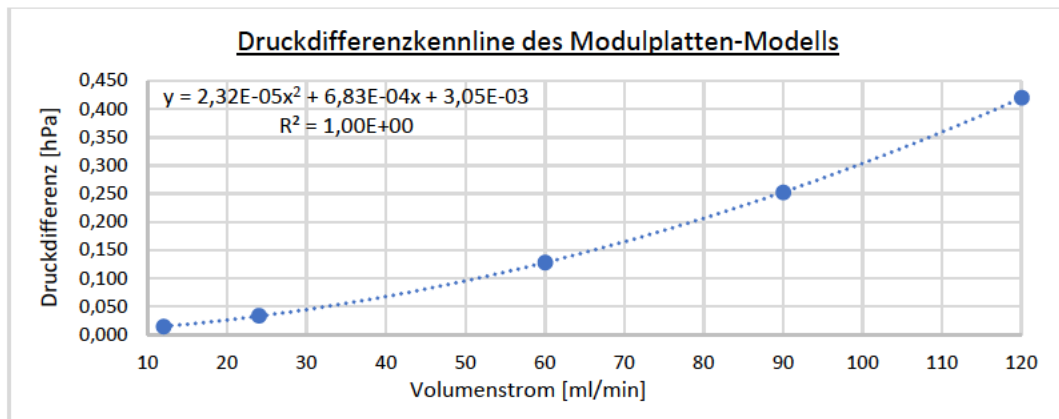


Abbildung 44: Modell Modulplatten - Kennlinie der Druckdifferenz über den Volumenstrom

Aus den Regressionsparametern werden mit Gleichung 17 und den Fluideigenschaften der quadratische Anteil $Z_{qu} = 8,38 \cdot 10^9 \text{ m}^{-4}$ und der lineare Anteil $Z_{lin} = 4,06 \cdot 10^9 \text{ m}^{-3}$ des hydraulischen Widerstands der Modulplatten berechnet. Mit diesen Werten wird weiter der Anteil der Modulplatten am Druckverlust des Basis-Moduls abgeschätzt. Dazu wird der rechnerische Druckverlust der Modulplatten mit dem Druckverlust des TXM1 Moduls bei 24 ml/min ins Verhältnis gesetzt. Siehe dazu Berechnungstabelle im Anhang B-12. Mit Wasser als Fluid ergibt sich für die IHC ein Anteil von 1,6% und für die OHC ein Anteil von 0,4%. Mit Stoffwerten für V3,5 ergibt sich für die IHC ein Anteil von 0,8% und für die OHC ein Anteil von 0,2%. Diese Anteile sind für Wasser um den Faktor 5,5 bzw. Für V3,5 um den Faktor 11,3 geringer als die Werte der Berechnung mit den Parametern der Messung in Kapitel 4.6. Da nach dem Modell bei 120 ml/min der Druckabfall der Modulplatten unter 0,5 hPa liegt, ist dieser mit der Messgenauigkeit von 12,5 hPa eigentlich nicht zu messen. Da der Wertebereich der Messung ebenfalls im Bereich der Messgenauigkeit liegt, wird das Ergebnis des Modells als belastbarer angenommen. Unabhängig davon bestätigt sich die Annahme, dass der Anteil der Modulplatten am hydraulischen Widerstand der Basis-Module vernachlässigbar ist.

5.5 Modellierung des Basis-Moduls

Zielsetzung

In Kapitel 4.4 wird die Annahme getroffen, dass sich aus den hydraulischen Widerständen der Einzelzellen unter Zuhilfenahme eines elektrischen Ersatzschaltbildes der hydraulische

Widerstand des Basis-Modul berechnen lässt. Die Messwerte aus Kapitel 4.3.1 und 4.4 bestätigen diese Annahme. Zielsetzung dieses Abschnitts ist es mit den in Kapitel 5.2 entwickelten Dummy-Zellen ein Modell des Basis-Moduls zu erstellen und den hydraulischen Widerstand aus der Messung und gleichzeitig die Anwendbarkeit des elektrischen Ersatzschaltbildes zu evaluieren. Darüber hinaus wird der Einfluss der unterschiedlichen hydraulischen Widerstände auf die Verteilung des Volumenstroms untersucht.

Umsetzung

Das vernetzte hydraulische Modell OHC-Seite des Basismoduls ist in Abbildung 43 dargestellt. Beide Modelle in der Gesamtansicht sind im Anhang B-13 abgebildet. Die Dummy-Zellen sind mit den Permeabilitäten belegt, wie sie in Kapitel 5.2 ermittelt werden, um den hydraulischen Widerstand der Einzelzellen zu modellieren.

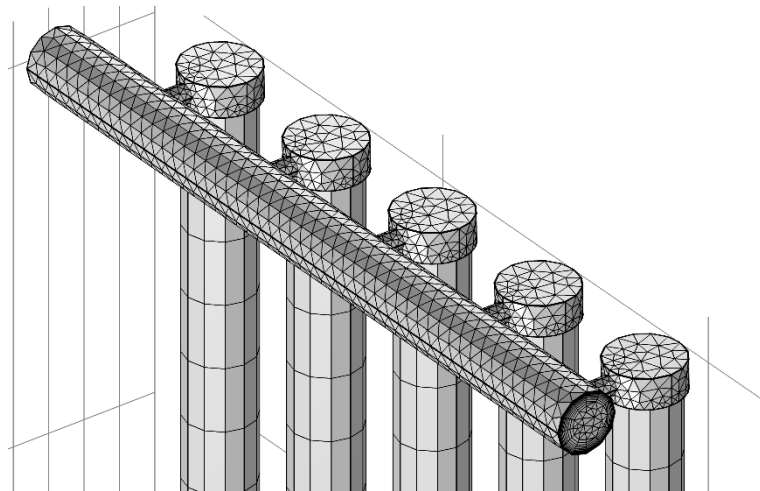


Abbildung 45: Vernetztes hydraulisches Modell der äußeren Halbzelleseite des Basismoduls

Für beide Modelle wird als Eingangsbedingung der Volumenstrom von 120 ml/min gewählt, als Ausgangsbedingung der Druck null gesetzt und als Fluid wird Wasser mit einer Temperatur von 20°C verwendet. An der Eintrittsfläche werden die Oberflächenmittelwerte des Drucks Δp abgeleitet. Die dynamische Viskosität η und der Volumenstrom \dot{V} sind konstant vorgegebenen. Der hydraulische Widerstand des Modells wird mit Anwendung von Gleichung 24 bestimmt. Zudem wird an den Austrittsflächen der Dummy-Zellen das Flächenintegral der Strömungsgeschwindigkeit abgeleitet, um den Volumenstrom durch jede Zelle zu ermitteln.

Ergebnisse

Im Modell der IHC-Seite wird ein Druck $\Delta p = 264 \text{ Pa}$ ermittelt und daraus der hydraulische Widerstand $1,31\text{E}+12 \text{ m}^{-3}$ berechnet. In Kapitel 4.4 wird der parallele Widerstand mit dem elektrischen Ersatzschaltbild der IHC der Zellen zu $1,29\text{E}+12 \text{ m}^{-3}$ berechnet. Äquivalent dazu wird in dem Modell OHC-Seite $\Delta p = 957 \text{ Pa}$ ermittelt und der hydraulische Widerstand $4,74\text{E}+13 \text{ m}^{-3}$ berechnet. Die Berechnung in Kapitel 4.4 ergab $4,73\text{E}+13 \text{ m}^{-3}$. Dieses Ergebnis bestätigt die Anwendung des elektrischen Schaltbildes, das Zusammenwirken der Einzelzellen im Modul und die Anwendbarkeit der Dummy-Zellen.

Die in dem Modell ermittelten Volumenströme der Halbzellen sind mit den hydraulischen Widerständen in Tabelle 12 angegeben. Zudem ist jeweils die Abweichung vom Mittel des

Volumenstroms der Halbzellenseite angegeben. Es zeigen sich große Unterschiede zwischen den Zellen. Besonders herausstechend ist die OHC von SC2 mit einer Abweichung von 54% vom Mittel. Gleichzeitig zeigen die OHC von SC1 und SC3 eine Abweichung von knapp -30%. Doch auch auf der IHC-Seite, auf der die Schwankungen der hydraulischen Widerstände um ein Sechstel geringer sind, schwanken die Volumenströme im Mittel mit $\pm 15\%$. Der hydraulische Widerstand hat folglich einen sehr großen Einfluss auf die Strömungsverteilung zwischen den Zellen und damit auch im System.

Tabelle 12: Volumenströme und Abweichungen der Halbzellen des Basis-Moduls TXM1 ermittelt aus dem hydraulischen Modell

| Zelle | SC1 | SC2 | SC3 | SC4 | SC5 |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|
| Hyd. Widerstand IHC [m^{-3}] | 5,19E+12 | 5,74E+12 | 7,62E+12 | 6,77E+12 | 7,79E+12 |
| Volumenstrom IHC [m^3/s] | 4,88E-07 | 4,41E-07 | 3,33E-07 | 3,75E-07 | 3,26E-07 |
| Abweichung IHC vom Mittel | 24,2% | 12,3% | -15,1% | -4,5% | -16,9% |
| Hyd. Widerstand OHC [m^{-3}] | 3,27E+13 | 1,52E+13 | 3,37E+13 | 2,28E+13 | 2,40E+13 |
| Volumenstrom OHC [m^3/s] | 2,80E-07 | 5,97E-07 | 2,72E-07 | 4,03E-07 | 3,81E-07 |
| Abweichung OHC vom Mittel | -27,6% | 54,4% | -29,6% | 4,3% | -1,4% |

6 Entwicklung des Stacks tubulärer Redox-Flow-Batteriezellen

Zu Beginn dieser Arbeit wird eine Einführung in das Thema der RFB gegeben und weiter auf den Aufbau von Stacks aus in Reihe geschalteten planarer Zellen eingegangen. Die Herausforderung der Hydraulik der RFB eine gleichmäßige Versorgung der Zellen zu gewährleisten und gleichzeitig die Systemverluste durch Pumpleistung und Shunt Currents gering zu halten, wird eingehend beschrieben. Darauf aufbauend wird dargestellt, dass tubuläre Zellen das Potential haben, Material- und Fertigungskosten zu senken. In Kapitel 2 Stand der Technik werden die tubulären Zellen und das Basis-Modul, bestehend aus fünf tubulären Zellen, beschrieben. Es wird gezeigt, dass die tubulären Zellen eine flexible Verschaltung ermöglichen und dass durch eine Parallelschaltung Shunt Currents vermieden werden können.

In Kapitel 4 wird eine Datenbasis der hydraulischen Eigenschaften der Basis-Module, der Einzelzellen und der Komponenten erstellt. Die hydraulischen Modelle werden mit dieser Datenbasis kalibriert und validiert. Darauf aufbauend dienen diese Modelle und die entwickelten Dummy-Zellen als Grundlage für die modellbasierte Entwicklung des Stacks tubulärer VRFB-Zellen.

Die Entwicklung des Stacks mit der Bezeichnung „TXS50“ wird in diesem Kapitel dargestellt. Zunächst werden die Zielsetzung der Entwicklung konkretisiert und quantifizierbare Kennzahlen ausgearbeitet. Daran anschließend werden Schritte des Entwicklungsprozesses beschrieben. Abschließend wird der Stack TXS50 vorgestellt und kritisch bewertet.

6.1 Ziele der Stack-Entwicklung

Ziel ist die Weiterentwicklung des 5er-Basis-Moduls tubulärer Redox-Flow-Batteriezellen. Dabei soll die Anzahl der Zellen pro Stack auf 50 erhöht werden. Die zu entwickelnden Konzepte sollen im Hinblick auf Materialeinsatz, Bauraumausnutzung, Fertigungskosten und Montierbarkeit verbessert werden. Zudem sollen dabei keine höheren hydraulischen Verluste oder unflexible elektrische Verschaltungsmöglichkeiten entstehen. Die Entwicklung umfasst die Verteilergeometrie (Modulplatten) und die Köpfe der Zelle, jedoch nicht die Zellen selbst, die elektrische Verschaltung oder Zuleitung zu dem Stack.

Der Aufbau und die Funktion des Basis-Moduls ist in Kapitel 3.2 beschrieben. Für die zielgerichtete Entwicklung des Stacks werden zunächst die quantifizierbaren Größen des Basis-Moduls, der Zellköpfe und der Modulplatten herausgearbeitet. Die Massenkennwerte wurden durch Wiegen bestimmt, die Bauraumgrößen durch Vermessen und die Volumengrößen durch Auswertung von CAD-Modellen. Diese sind im Anhang C1 tabellarisch aufgeführt. Aus diesen Kennzahlen werden Vergleichswerte abgeleitet, welche eine übersichtliche Quantifizierung der Eigenschaften des Stacks ermöglichen. Der Bauraum und der Materialeinsatz werden dazu auf die Zellen bezogen, um diese unabhängig von der Anzahl der Zellen des Stacks bewerten zu können. Als weitere Kennzahl wird das Volumen der Vergussmasse pro Zelle definiert. Als hydraulische Vergleichsgröße wird der Anteil der Versorgung am Druckverlust des Stacks gewählt. Die abgeleiteten Kennzahlen des Basis-Moduls sind in Tabelle 13 eingetragen. Alle Größen, auf die Bezug genommen wird, sind im Anhang C-1 aufgeführt.

Tabelle 13: Abgeleitete Kennzahlen des Basis-Moduls

| Abgeleitete Kennzahlen – Basis-Modul | | | |
|---|-------------|-----------------|------------------------------|
| Kennzahltyp | Wert | Einheit | Kommentar |
| Bauraum pro Zelle | 421 | cm ³ | |
| Materialeinsatz pro Zelle | 131,44 | g | MP+Köpfe (ohne Vergussmasse) |
| Vergussmasse pro Zelle | 1,232 | ml | |
| Druckverlust Versorgung | 4 - 12 | % | |

Für die Konzeptentwicklung wird die Demontierbarkeit als grundlegende Systemeigenschaft unterschieden: 1. Die Zellen sind zerstörungsfrei aus dem Stack zu entnehmen und 2. Die Zellen sind im Stack vereinigt und nicht zerstörungsfrei zu entnehmen. Für beide Fälle sollen Konzeptideen entwickelt werden. Als weitere Zielvorgabe für die Konzeptentwicklung sind folgende Eigenschaften und Aufgaben zu erfüllen:

- Zusammenfassung von ca. 50 Zellen zu einem Stack mit einer Leistung von ca. 100W
- Gleichmäßige druckverlustarme Zu- und Ableitung des Elektrolyten zu/von den Halbzellen & Ein- und Ausleitung aus den FC
 - Unter 5% Anteil am Gesamt-Druckverlust des Stacks
- Reduktion Materialaufwand
 - Modulplatten bezogen auf Zellen (50-90%)
 - Köpfe 50%
 - Vergussmasse bezogen auf Zellen nicht erhöhen
- Kostenreduktion Komponentenfertigung
 - Wirtschaftliche Produktion mit Spritzguss
 - Keine/minimale Nachbearbeitung der Einzelteile
- Bauraumreduktion des Stacks bezogen auf Zellen
 - Vergleich Basis Modul
 - Vergleich planare Bauweise
- Fertigbarkeit Modul
 - Reduzierung der Arbeitsschritte (Wunsch)
 - Automatisierbarkeit (Wunsch)
- Realisierungsmöglichkeit von Interdigitated Flow
- Elektrische Verschaltung der Zellen (parallel)
- Volumenstrom Elektrolyt 24 ml/min pro Zelle (Maximal 32 ml/min)

Mit diesen Anforderungen werden aus Tabelle 13 die Zielwerte für die Entwicklung des Stacks abgeleitet. Diese sind in Tabelle 14 dargestellt.

Tabelle 14: Zielwerte der abgeleiteten Kennzahlen für die Entwicklung des Stacks

| Zielwerte abgeleitete Kennzahlen – TXS50 | | | |
|---|-------------|-----------------|------------------------------------|
| Kennzahltyp | Wert | Einheit | Kommentar |
| Bauraum pro Zelle | < 421 | cm ³ | |
| Materialeinsatz pro Zelle | 13 | g | Ohne Vergussmasse, Anschlüsse etc. |
| Vergussmasse pro Zelle | ≤ 1,232 | ml | |
| Druckverlust Versorgung | ≤ 5 | % | |

Der Umfang der Arbeit wird dahingehend eingegrenzt, dass die Fertigbarkeit und Automatisierung als Randbedingung mit beachtet wird, jedoch keine Lösungen erarbeitet werden. Ein Konzept zum Montageablauf des finalen Stacks wird unter Kapitel 6.3 umrissen. Weiter soll eine elektrische Parallelschaltung oder flexible Verschaltung der Zellen möglich sein. Als weitere Randbedingung ist zu nennen, dass die Anschlussgeometrie des Stacks an den Trunk frei wählbar ist. Die Umgebungsbedingungen für den Einsatz des Stacks sind mit Raumtemperatur und saubere, ölfreie, nicht erosive Umgebung und geschützt vor mechanischen Einwirkungen definiert. Für die Materialauswahl der Bauteile wird aufgrund erfolgreicher Anwendung im Basis-Modul Polypropylen vorgeschlagen.

Zur Bewertung des Ergebnisses der Entwicklung wird Tabelle 14 herangezogen. Abschließend eine kritische Betrachtung der Fertigbarkeit, Montierbarkeit und Automatisierbarkeit durchgeführt werden.

6.2 Entwicklungsprozess

Für den Entwicklungsprozess wird sich an der methodischen Produktentwicklung orientiert. In [23] wird die Konstruktionsmethodik in Anlehnung an die VDI 2222 beschrieben. Der Entwicklungsprozess wird in vier Abschnitte unterteilt: Planen, Konzipieren; Entwerfen und Ausarbeiten. Planen umfasst das genaue Herausarbeiten der Entwicklungsaufgabe und definiert Festanforderungen, Mindestanforderungen und Wünsche. Zur Umsetzung der Planungsphase wird in dieser Arbeit ein Lastenheft erstellt. Das Resultat ist in Kapitel 6.1 beschrieben. Der Schritt Konzipieren umfasst das Definieren von Teilproblemen bzw. -aufgaben, die Ausarbeitung von Lösungsansätzen für diese Teilprobleme, das Vereinigen verschiedener Lösungsansätze zu unterschiedlichen Konzeptideen und das technisch-wirtschaftliche Bewerten dieser Konzeptvarianten. Diese Schritte werden in den Kapiteln 6.2.1 und 6.2.2 zusammengefasst. Das in Kapitel 6.2.2 herausgearbeitete favorisierte Konzept geht in die Entwurfsphase. In den Folgekapiteln 6.2.3 bis 6.2.4 werden Konzeptentwürfe unter Betrachtung der Anordnung der Zellen und der hydraulischen Modellierung erstellt und optimiert. Die Ausarbeitung wird in Kapitel 6.3 dargestellt, in dem die Ausgestaltung beschrieben, die hydraulische Performance überprüft und das Montagekonzept vorgestellt wird.

6.2.1 Lösungsansätze für Teilprobleme

Produkte und Konstruktionen müssen oft viele Funktionen gleichzeitig erfüllen. Zusätzlich gibt es für jedes Problem mehrere Lösungsansätze, sodass sich bereits bei wenigen Funktionen eine unübersichtliche Anzahl von Lösungskombinationen ergibt. Um dieses Problem methodisch zu lösen, wird ein morphologischer Kasten empfohlen. Dieser wird erstellt, indem das komplexe Produkt in die einzelnen Teilaufgaben, die es zu erbringen hat, zerlegt wird. Anschließend werden für jede Teilaufgabe mögliche Lösungsansätze formuliert, ohne eine feste Lösungskombination zu forcieren. Dieser Ansatz wird auch in dieser Arbeit verfolgt. Dazu werden elf Teilprobleme zum Lösen der Entwicklungsaufgabe formuliert und Lösungsideen skizziert. Das Ergebnis dieser Untersuchung ist in der Tabelle im Anhang C-2 dargestellt. In der

Tabelle sind in Rot Anmerkungen verfasst, welche eine Umsetzung der Lösungsidee verhindern. Mit kursiver Schrift sind die Lösungsansätze markiert, welche im Basis-Modul umgesetzt sind. An dieser Stelle soll das Finden von Lösungsansätzen an zwei Teilproblemen erläutert werden. Als erstes wird das Teilproblem 3 „Dichtung zwischen den Halbzellen – Dichtfläche an Membran“ betrachtet. Im Basismodul wird an dieser Stelle der Innenraum des Kopfes vergossen. Als weitere Lösungsansätze sind die Anpressdichtung, Verkleben mit Ausnutzung von Kapillarwirkung und Verschweißen aufgeführt. Zudem wird eine Umformung der Membran als Lösungsansatz aufgenommen. Damit wird eine Fläche orthogonal zur Zellachse erzeugt, um eine besser geeignete Dichtfläche zu erhalten. Bis auf das Vergießen werden jedoch alle Lösungsansätze als nicht umsetzbar oder nicht praktikabel bewertet. Damit bleibt für dieses Problem als Einzelfall nur ein Lösungsansatz. Als zweites Beispiel wird Teilproblem 5 „Aufbau Modul – Trennung der Elektrolyten“ erläutert, da dieses in der folgenden Konzeptionierung den größten Einfluss hat. Damit ist die konstruktive Ausgestaltung des Verteilungssystems, welches die beiden Elektrolyten getrennt zu den Zellen fördert, gemeint. Die Abgrenzung wird ersichtlich, indem die Lösungsansätze betrachtet werden. Lösungsansatz 1 ist die Ausführung als Vollmaterial mit eingelassenen Verteilungskanälen für beide Elektrolyten, wie es im Basis-Modul der Fall ist. Zudem werden verschiedene Lösungsansätze mit einem Sandwichaufbau skizziert. Diese Lösungen zeichnen sich dadurch aus, dass die Versorgungsmodule aus drei einzelnen Platten aufgebaut sind: in der Mitte eine Trennplatte, welche die beiden Halbzellseiten voneinander trennt, eine Verteilerplatte für die OHC und eine für die IHC, mit entsprechenden Versorgungskanälen (Abbildung 48). Dieser Lösungsansatz kann mit unterschiedlichen Dichtungskonzepten oder Mischbauweisen ausgeführt werden. Ein weiterer Lösungsansatz ist die „vertikale Trennung“. In den bisher beschriebenen Ansätzen hat man Platten mit eingelassenen Löchern für die Zellen oder Zellköpfe. Der Ansatz der vertikalen Trennung sieht vor, die Versorgungsmodule entlang einer Ebene der Zellachse zu trennen.

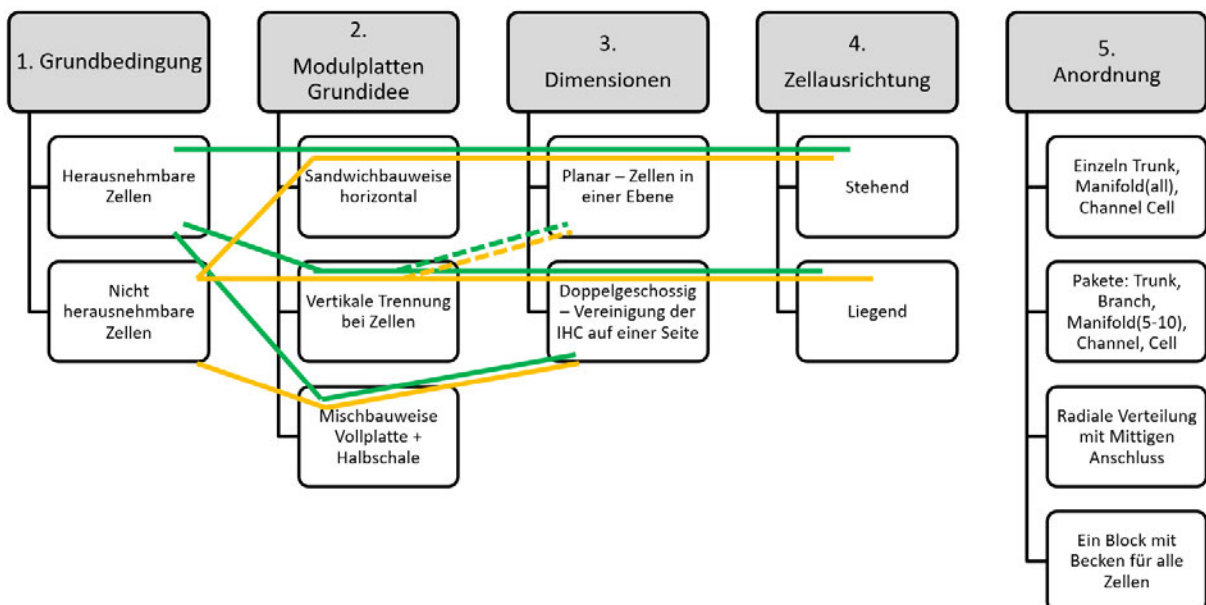


Abbildung 46: Design-Ebenen der Entwicklung des Stacks mit markierten Lösungspfaden

Anders als im morphologischen Kasten üblich, werden an dieser Stelle keine Lösungskonzepte gebildet, indem ein Lösungsansatz für jedes Problem ausgewählt und diese miteinander verbunden werden. Stattdessen werden Design-Ebenen erstellt, welche die Designentscheidungen absteigend danach ordnet, wie groß der Einfluss auf die Auswahl anderer Lösungsansätze ist. Damit soll die Komplexität aufgrund der vielen sich teilweise beeinflussenden Lösungsansätze reduziert werden. Die Design-Ebenen sind in Abbildung 46 abgebildet. Die oberste Ebene ist die Grundbedingung aus Kapitel 6.1. Die Zellen sind zerstörungsfrei herausnehmbar oder nicht. Die zweite Design-Ebene ist die oben beschriebene Ausgestaltung der Verteilerplatten. Hier sind die Unterscheidungsmerkmale auf Sandwichbauweise, vertikale Trennung und Mischbauweise heruntergebrochen. Die dritte Design-Ebene ist die Entscheidung über die Dimensionen. Es wird unterschieden, ob die Zellen auf einer Ebene stehen oder ob der Stack mehrere Ebenen hat, sodass bspw. zwei Zellen übereinander stehen. Diese drei Ebenen werden als die treibenden Designentscheidungen bewertet. Die weiteren Ebenen der Ausrichtung und Anordnung der Zellen oder die Umsetzung der Dichtungskonzepte haben einen geringeren Einfluss auf das gesamte Lösungskonzept. Es wird die Einschätzung getroffen, dass sich die weiteren Lösungsansätze der Teilprobleme entweder aufgrund von Anforderungen der ersten beiden Ebenen entscheiden oder frei wählbar sind. Beispielsweise erfordert eine demontierbare Zelle zwangsläufig Dichtelemente wie O-Ringe oder Flachdichtungen. Zudem wird damit ein Zellkopf notwendig, da an der Dichtstelle der Membran nur vergossen werden kann.

In Abbildung 46 sind zudem Lösungspfade eingezeichnet. Diese beschreiben mögliche Lösungspfade entlang der Design-Ebenen mit signifikanten Unterschieden. Im nachfolgenden Kapitel werden anhand dieser Lösungspfade Konzeptideen zur Auswahl eines finalen Konzepts skizziert.

6.2.2 Erstellung und Evaluierung von Konzeptideen

Im vorangegangenen Kapitel wird die Gesamtfunktion des Stacks aufgegliedert und daraus Teilprobleme abstrahiert. Daraus werden die in Abbildung 46 dargestellten Design-Ebenen gebildet. Entlang der Lösungspfade werden Konzeptideen für jede Kombination der ersten beiden Ebenen gebildet. Zusätzlich zu dem Basis-Modul besteht ein Konzept zur Skalierung des Stacks aus dem Projekt StaTuR. Dieses Konzept wird als „Konzept Simon“ bezeichnet und lässt sich in der Designstruktur unter „nicht demontierbar“ und „Mischbauweise“ einordnen. Dieses Konzept wird als Konzeptidee mit aufgenommen. Eine Beschreibung des Konzepts ist weiter unten zu finden. Zur Bildung weiterer Konzeptideen wird sich auf jeweils ein Konzept in Sandwichbauweise und vertikale Trennung für demontierbare und vereinigte Konzepte begrenzt. Damit ergibt sich der Design-Tree in Abbildung 47 mit sechs Konzeptideen. Mit dieser Reduzierung der Komplexität wird es ermöglicht, die signifikanten Unterschiede der treibenden Design-Entscheidungen herauszuarbeiten und in der Evaluation gegeneinander zu bewerten. Die Konzeptideen, welche nach dieser Struktur ausgearbeitet werden, stellen dabei Extrembeispiele dar, um die Konzepte in Ihren Grundbedingungen zu bewerten.

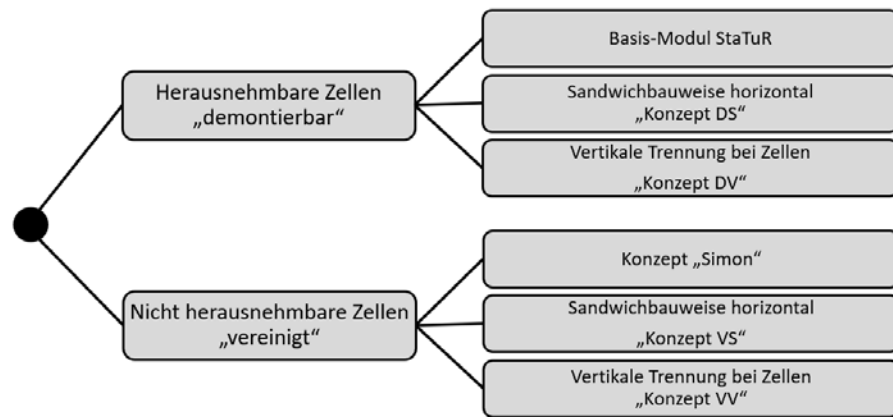


Abbildung 47: Design-Tree zur strukturierten Entwicklung von Konzeptideen

Aus der Struktur des Design-Tree in Abbildung 47 leiten sich folgende Bezeichnungen für die Konzeptideen ab: Konzepte mit herausnehmbaren Zellen fallen unter die Bezeichnung „demontierbar“ mit Kürzel D. Konzepte mit nicht herausnehmbaren Zellen fallen unter die Bezeichnung „vereinigt“ mit Kürzel V. Die Ausführung der Verteilerplatten werden für Sandwichbauweise mit Kürzel S und für vertikale Trennung mit Kürzel V unterschieden. Damit ergibt sich für die Konzeptidee mit demontierbaren Zellen und Sandwichbauweise die Kurzbezeichnung „Konzept DS“. Die Bezeichnungen für das Basis-Modul und Konzept Simon werden übernommen. Die Konzepte werden in Ihren Eigenschaften, Besonderheiten und Vor- und Nachteilen kurz vorgestellt. Anschließend wird die Evaluation der Konzeptideen erläutert und anschließend die Designentscheidungen für das umzusetzende Konzept vorgestellt.

Konzept DS

Konzepte mit demontierbaren Zellen benötigen Zellköpfe und Dichtelemente. Zur Skizzierung des Konzepts DS werden die Köpfe vom Basis-Modul übernommen. Abbildung 48 zeigt den Ansatz der Konzeptstudie. Die Verteilerplatte besteht aus drei Lagen: einer mittleren Trennebene und zwei äußeren Verteilerplatten mit Kanälen für den Elektrolytfluss. Die Löcher zum Einpressen der Zelle sind jeweils mit Einlaufschrägen für die O-Ringe versehen. Zur Abdichtung der Ebenen wird die Trennebene aus Dichtmaterial gefertigt oder es müssen zusätzliche Flachdichtungen vorgesehen werden. Darüber hinaus müssen die Ebenen beispielsweise durch Schraubverbindungen gegeneinander verspannt werden. Interdigitated Flow wird über Stopfen in den Zellköpfen realisiert, welche jeweils versetzt vier der acht Flow Channels verschließen. Dieses Konzept benötigt somit neben einer Vielzahl an Dichtungen zusätzliche Verbindungselemente. Vorteile bestehen darin, dass die einzelnen Platten einfach durch Spritzguss fertigbar sind. Die zu dichtenden Flächen sind klar definiert. Die Sandwichbauweise bietet sehr viel Spielraum in der Gestaltung der Versorgungskanäle und Anordnung der Zellen.

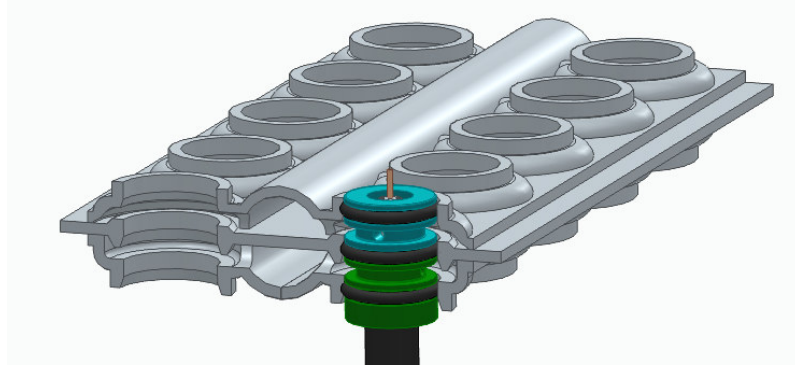


Abbildung 48: Konzeptstudie "Konzept DS" - demontierbare Sandwichbauweise

Konzept DV

Dieses Konzept besteht aus einem geschichteten Aufbau aus drei Teilen: Ein Endstück, abwechselnd ein Zwischenstück A und Zwischenstück B und abschließend erneut ein Endstück. Zur Demontierbarkeit werden Zellköpfe und ein komplexes Dichtelement, welches die Zellköpfe umschließt, benötigt. Dieses ist in Abbildung 49 als schwarzes Element dargestellt. Interdigitated Flow wird über Stopfen in den Zellköpfen realisiert, welche jeweils versetzt vier der acht Flow Channels verschließen. Die Köpfe weisen zudem die zu erkennende Wabenstruktur auf, um durch Verspannen in Schichtungsrichtung eine möglichst gleichmäßige Anpressung der Dichtflächen zu gewährleisten. Die Versorgung mit Elektrolyten wird über die beiden Branches realisiert, welche in Abbildung 49 im vorderen Teil als vertikale Kanäle zu erkennen sind. Von diesen gehen Manifolds in horizontaler Richtung zu den Zellen. Der Nachteil dieses Konzepts sind die großen und komplexen Dichtflächen, welche im Bereich der spitzen Winkel der Zellköpfe zu Dichtigkeitsproblemen führen können. Zudem ist die Versorgung der Zellen auf das dargestellte Konzept limitiert.

Die Vorteile des Konzepts bestehen darin, dass die Einzelteile der Versorgungsplatten einfach und aufgrund der hohen Stückzahl günstig über Spritzguss fertigbar sind. Der geschichtete Aufbau ist zudem besonders freundlich für die Montage und Kontaktierung. Auch lässt sich die Anzahl der Zellen im Stack durch eine Anpassung der Schichtzahlen flexibel skalieren. Ebenfalls bietet das Konzept der vertikalen Trennung eine einfache Umsetzung der doppelgeschossigen Ausführung. Diese ist in Abbildung 52 dargestellt und wird im Konzept VV näher beschrieben.

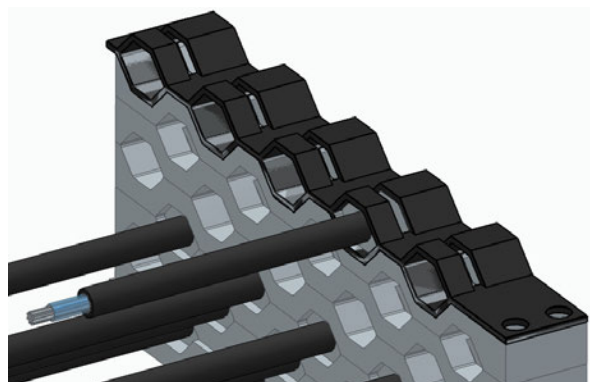


Abbildung 49: Konzeptstudie "Konzept DV" - demontierbare vertikale Trennung

Konzept Simon

Dieses Konzept stammt aus einer Betrachtung im Projekt StaTuR und lässt sich in der Designstruktur unter „vereinigt“ und „Mischbauweise“ einordnen. Das Konzept ist in Abbildung 50 dargestellt. Die Versorgungsgeometrie ist aufgeteilt in eine Ober-Platte aus Vollmaterial mit integrierten Manifolds zur Versorgung von jeweils vier Zellen und eine Unter-Platte mit offenen Kanälen, die gegen die Ober-Platte abschließen. An den Zellen sind Halbköpfe vorgesehen, welche mit O-Ringen versehen sind. Diese ermöglichen die Montage der Zellen in die Unter-Platte durch Einpressen. Anschließend wird die Dichtstelle an der Membran vergossen, die Oberplatte aufgesetzt und am Durchlass der Zelle ebenfalls vergossen. Damit muss während der Montage nicht von der Innenseite vergossen oder verklebt werden, was durch die schlechte Zugänglichkeit bei einer dichten Packung der Zellen unhandlich ist. Interdigitated Flow wird über Stopfen in dem Zellkopf und der Ober-Platte realisiert, welche jeweils versetzt vier der acht Flow Channel verschließen.

Nachteile dieses Konzepts sind die zusätzlichen Dichtringe und die anspruchsvolle Dichtung zwischen den Platten. Es wird angenommen, dass Ultraschall-Schweißen zur Vereinigung der Platten vorgesehen ist. Zudem sorgt die fertigungsbedingte offene Geometrie des Branchs der Ober-Platte für einen aufwendigen Anschluss des Trunks.

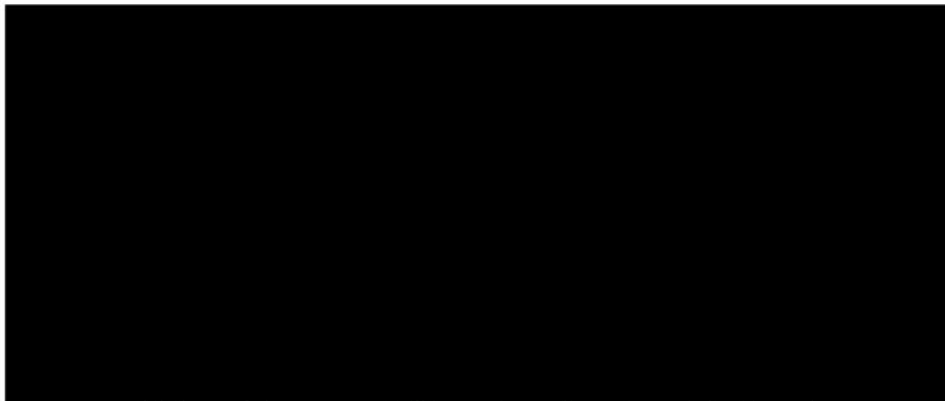


Abbildung 50: Konzeptstudie "Konzept Simon" - vereinigte Mischbauweise

Konzept VS

Das Konzept VS ist ähnlich aufgebaut wie das Konzept DS. Die Verteilerplatte besteht aus drei Lagen: einer mittleren Trennebene und zwei äußeren Verteilerplatten mit Kanälen für den Elektrolytfluss. Der in Abbildung 51 zu erkennende Unterschied besteht darin, dass dieses Konzept komplett auf Dichtelemente und Zellköpfe verzichtet, da keine Demontierbarkeit gewährleistet werden muss. Die Zellen werden in die untere Platte und Trennebene eingesetzt und von der Unterseite vergossen. Anschließend wird die Membran vergossen, die obere Platte aufgesetzt und ebenfalls vergossen. Der Nachteil dieses Konzepts liegt in der schlechten Zugänglichkeit der unteren Vergussstellen und der Notwendigkeit des Drehens des Stacks für diesen Fertigungsschritt. Die Platten können durch Verschweißen der Außenkanten kostengünstig und einfach abgedichtet werden. Interdigitated Flow wird über Stopfen in der oberen und unteren Platte realisiert, welche jeweils versetzt vier der acht Flow Channel verschließen. Vorteile bestehen darin, dass die einzelnen Platten einfach durch Spritzguss

fertigbar sind. Die zu dichtenden Flächen sind klar definiert. Die Sandwichbauweise bietet sehr viel Flexibilität in der Gestaltung der Versorgungskanäle und Anordnung der Zellen.



Abbildung 51: Konzeptstudie "Konzept VS" - vereinigte Sandwichbauweise

Konzept VV

Das in Abbildung 52 abgebildete Konzept besteht ähnlich wie Konzept DV aus einem geschichteten Aufbau aus drei Teilen: Ein Endstück A, welches nur einseitig geöffnet ist, einer beliebigen Anzahl von Zwischenstücken und ein Endstück B, welches ebenfalls einseitig geschlossen ist. Die Versorgung der Zellen erfolgt über normal zur Schichtebene verlaufende Branchs und in der Schichtebene verlaufende Manifolds. Die Montage erfolgt liegend durch schichtweises Einlegen der Zellen und den nächsten Zwischenstücken. Die Dichtung erfolgt über Verguss. Dafür sind Schächte in die Komponenten eingelassen, welche nach dem Aufschichten von oben vergossen werden und so die OHC und die Membran abdichten. Zum Vergießen der IHC nach außen muss der Stack auf die Seite gedreht werden. Ein Problem stellt die Dichtung der Trennfuge zwischen den Plattenbauteilen dar, da diese Dichtflächen schlecht definiert sind. Der Interdigitated Flow wird in diesem Konzept mittels zusätzlicher Kopfelemente realisiert. Diese werden bei der Montage auf die Zellen gesteckt und verschließen die Hälfte der Flow Channel mit Stopfen.

Die Vorteile des Konzepts bestehen darin, dass die Einzelteile der Versorgungsplatten einfach und aufgrund der hohen Stückzahl günstig über Spritzguss fertigbar sind. Der geschichtete Aufbau ist zudem besonders freundlich für die Montage und Kontaktierung. Auch lässt sich die Anzahl der Zellen im Stack durch eine Anpassung der Schichtzahlen flexibel skalieren. Ebenfalls bietet das Konzept der vertikalen Trennung eine einfache Umsetzung der doppelgeschossigen Ausführung. Diese ist in Abbildung 52 zu erkennen. Da die inneren Halbzellen zur Kontaktierung nur einseitig herausragen müssen, ist es möglich, zwei Zellen mit den Gegenseiten zusammen in einem Kanal zu versorgen. Ein Versiegeln der unteren Stirnseiten der Zellen ist dennoch notwendig, da der Kupferdraht der Zelle ansonsten um Elektrolyten erodiert. Eine weitere Variante dieses Konzepts setzt auf einen Aufbau wie in Konzept DV nur, dass die Dichtflächen zwischen den Köpfen und Verteilerplatten verklebt werden. Ein Bild der Konzeptstudie ist im Anhang C-3 abgebildet.



Abbildung 52: Konzeptstudie "Konzept VV" - vereinigte vertikale Trennung

Evaluation der Konzeptideen

Zur Evaluation der Konzeptideen wurde zunächst eine quantitative Auswertung bezüglich Materialeinsatz, Bauraumeffizienz und Bedarf an Vergussmasse durchgeführt. Diese ist im Anhang C-4 aufgeführt. Jedoch ist die quantitative Betrachtung der Konzeptideen in diesem Stadium wenig aussagekräftig, da bis auf das Konzept Simon keine Konzeptstudie optimiert wurde.

Um eine technisch-wirtschaftliche Bewertung der Konzeptvarianten vorzunehmen, wird eine Bewertungsmatrix erstellt. Diese ist im Anhang C-5 dargestellt. Es werden vierzehn Bewertungskriterien festgelegt. Die Bewertungskriterien erhalten einen Gewichtungsfaktor und werden mit Zahlenwerten von 1 (schlecht) bis 5 (sehr gut) bewertet. Die Bewertung des jeweiligen Konzepts ist eine Punktzahl, berechnet als Summe der mit den Gewichtungen multiplizierten Bewertungen der Kriterien. Die ersten sechs Kriterien sind material- bzw. kostenbezogen. Sie umfassen geringer Materialeinsatz der Versorgungsplatten, Zellköpfe und Vergussmassen, wenige zusätzliche Dichteelemente, Bauraumeffizienz und günstige Fertigbarkeit der Komponenten. Weitere Kriterien sind wenige Einzelkomponenten und einfache Montage, aber auch Systemeigenschaften wie gute Skalierbarkeit, flexibles Versorgungsdesign und flexible elektrische Verschaltung. Das Kriterium Umsetzungssicherheit bezieht sich auf die Erwartbarkeit von Problemen wie beispielweise Dichtigkeitsprobleme bei den Konzepten mit vertikaler Trennung. Trotz großen Vergussmassenbedarfs und schlechter Umsetzungssicherheit landet auf Platz 3 das Konzept VV. Dies liegt daran, dass das Konzept in den Kriterien günstige Fertigung, einfache Montage und Skalierbarkeit sehr gut bewertet wird. An zweiter Stelle landet Konzept Simon und an erster Stelle Konzept VS. Konzept VS schneidet besser ab, da es keine Zellköpfe oder zusätzliche Dichteelemente aufweist und das Versorgungs-Design flexibler ausgestaltet werden kann.

Finale Konzeptvariante

Die oben dargestellten Konzepte sind als Extrembeispiele ausgeführt, um die Grundeigenschaften der Konzepte zu untersuchen. Das Konzept VS, welches in der Bewertung am besten abschneidet, weist den Nachteil auf, dass dieses schwer zugänglich von der Innenseite des Stacks vergossen oder verklebt werden muss. Zudem wird die Umsetzung des Interdigitated Flow durch Stopfen an den Verteilerplatten als fertigungstechnisch schwer umsetzbar eingeschätzt. Um diese Probleme zu umgehen, wird eine Mischung der Konzepte

durchgeführt. Es werden zusätzliche Kopfelemente in Kauf genommen, wie sie in Konzept Simon und Konzept VV Verwendung finden. Die finale Konzeptvariante ist ein vereinigter Stack mit Verteilerplatten in Sandwichbauweise. Ein Kopfelement an der OHC dient dazu, den Interdigitated Flow der Halbzelle und gleichzeitig eine montagefreundliche Dichtung der OHC zur Umgebung zu ermöglichen. Ein zusätzliches Kopfelement an der IHC soll mittels Stopfen an dieser Halbzelle den Interdigitated Flow realisieren. Zudem wird die Dimension des Konzepts einlagig festgelegt. Aufgrund der Sandwichbauweise und der Vergussstellen wird der Stack mit stehenden Zellen montiert und betrieben. Darüber hinaus wird durch die Verwendung von Kopfelementen die Möglichkeit geschaffen, die Geometrien so zu gestalten, dass die obere und untere Versorgungsplatte identisch sind. Da diese Eigenschaft potenziell Fertigungs- und Lagerkosten senkt und die Anzahl unterschiedlicher Komponenten bei der Montage reduziert, wird dies in die Konzeptentwicklung mit aufgenommen. Der Materialvorschlag zur Verwendung von Polypropylen wird angenommen, da dieses in der Praxis eine gute chemische Beständigkeit gezeigt hat, günstig und schweißbar ist. Die nächste Design-Ebene nach Abbildung 46 und damit der nächste zu betrachtende Aspekt ist die Anordnung der Zellen im Stack. Diese wird im nächsten Kapitel diskutiert.

6.2.3 Betrachtung der Anordnung der Zellen im Stack

In den erarbeiteten Design-Ebenen, dargestellt in Abbildung 46, ist in der fünften Ebene die Anordnung der Zellen aufgeführt. Die Designentscheidungen der ersten vier Ebenen sind im vorherigen Kapitel erläutert. Für die Anordnung der Zellen werden vier Lösungsideen vorgestellt. Diese befassen sich mit der Art der hydraulischen Versorgung. Es wird unterschieden, ob Zellen einzeln oder in Paketen von mehreren Zellen oder alle gleichzeitig aus einem Becken versorgt werden. Zudem wird neben der linearen Versorgung auch eine kreisförmige Anordnung mit mittigem Anschluss und sternförmiger Verteilung als Lösungsidee skizziert. Für die Anordnung der Zellen sind jedoch mehr Aspekte zu beachten als nur die Führung der Hydraulik. So hat die Anordnung einen Einfluss auf die Packungsdichte der Zellen und damit auf den Bauraum und Materialeinsatz des Stacks. Darüber hinaus erfordert eine gleichmäßige Versorgung die Betrachtung des gesamten Elektrolytflusses und eine Wahl von U- oder Z-Durchströmung. Auch die elektrische Kontaktierung und Verschalung der Zellen sowie Montagefreundlichkeit sind bei der Anordnung der Zellen im Stack zu beachten. Die Analysen und daraus resultierenden Designentscheidungen sind in den nächsten Abschnitten dargelegt.

Position der hydraulischen Anschlüsse

Im Basis-Modul sind die hydraulischen Anschlüsse auf beiden Seiten, sodass je nach Einbausituation eine Installation der Anschlüsse unhandlich ist. Dies ist zum Beispiel bereits im Prüfstand der Fall, wo sich die einen Anschlüsse für den Bediener auf der schlecht zugänglichen Rückseite befinden. Siehe dazu Abbildung 16 in Kapitel 4.3.1. Als Vorgabe wird gesetzt, dass der zu entwickelnde Stack einseitig hydraulisch angeschlossen wird. Neben einer einfacheren und flexibleren Installation des Stacks in einem System ermöglicht dieses auch die Trennung von Hydraulik und Elektrik, indem die elektrischen Anschlüsse zur gegenüberliegenden Seite gelegt werden.

Zudem wird die Position des oder der Anschlüsse an der Verteilerplatte betrachtet. Mittige Anschlüsse, wie im Lösungsansatz der kreisförmigen Anordnung der Zellen vorgesehen, bieten den Vorteil, dass durch die sternförmige Verteilung die Leitungswege kurz sind und durch die Aufteilung des Volumenstroms geringe Druckverluste zu erwarten sind. Jedoch entstehen durch den ebenfalls mittigen Anschluss der Ableitung unterschiedlich lange Leitungswege. Weiter ist der mittige Anschluss der inneren Verteilerplatten aufgrund des umschließenden Rings aus Zellen nicht montierbar. Dieses Problem lässt sich mit einem Durchbruch in der oberen Verteilerplatte lösen. Dieser Lösungsansatz ist im Anhang C-6 skizziert. Damit wird jedoch die Anforderung, dass innere und äußere Verteilerplatte gleich sind, nicht eingehalten. Bei einer rechteckigen Anordnung der Zellen ergeben sich die Möglichkeiten der Zuleitung am Rand mittig oder seitlich. Bei einem mittigen Anschluss kann eine gleichmäßige Versorgung der Zellen über eine Z-Durchströmung nur gewährleistet werden, indem der Anschluss der Ableitung auf der gegenüberliegenden Seite ist. Mit einer sich seitlich am Rand befindlichen Einleitung des Elektrolyten ergibt sich die Möglichkeit, die Ausleitung auf der gegenüberliegenden Seite vorzusehen und eine Z-Durchströmung zwischen diesen Seiten zu erzeugen. Diese wird für eine gleichmäßige Versorgung der Zellen bevorzugt umgesetzt.

Packungsdichte

Der zu entwickelnde Stack soll 50 Zellen beinhalten. Dabei ist eine Abweichung von bis zu zwei Zellen nach unten zulässig, wie im Konzept Simon der Fall. Nach oben ist keine harte Grenze definiert. Als Anordnungskonzepte wird die Form der Grundflächen als Rechteck oder Hexagon betrachtet, da diese eine platzsparende Anordnung mehrerer Stacks zusammen ermöglichen. Die Hexagon-Grundform dient hierbei der Annäherung der Kreisgeometrie. Für die rechteckige Grundform wird angenommen, dass ein eher längliches Rechteck mit den hydraulischen Anschlüssen an der kurzen Seite eine bessere Systemintegration bietet als eine quadratische oder breite Anordnung, da mit mehreren Stacks nebeneinander besser die Tiefe ausgenutzt wird. Damit ergibt sich für die rechteckige Anordnung die Möglichkeit, die Zellen im 5x10 oder 4x12 Raster anzuordnen.

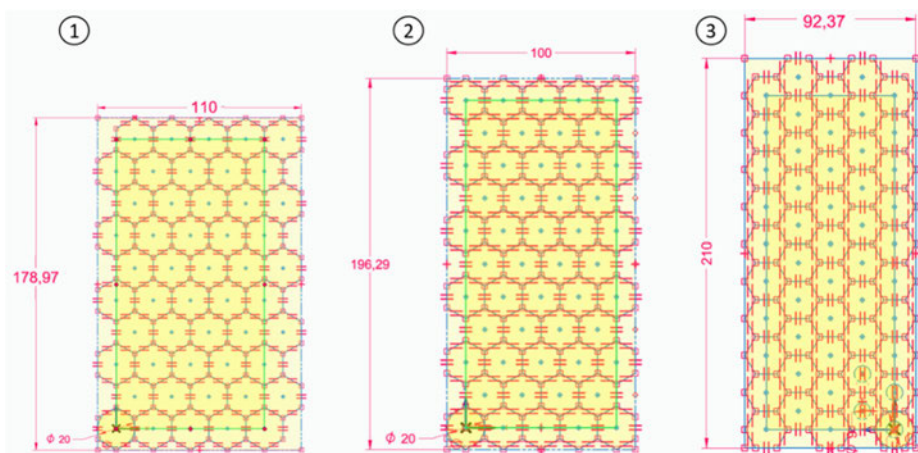


Abbildung 53: Studien zum Grundflächenbedarf von versetzten Zellanordnungen

Die dichteste Packung von Kreisen ist dann gegeben, wenn die Mittelpunkte der Kreise ein gleichseitiges Dreieck bilden. Überträgt man dies auf die Zellen, scheint es sinnvoll zu sein, die

Zellen versetzt anzuordnen, wie in den Studien in Abbildung 53 dargestellt. Um den Einfluss der Anordnung im Hexagon und der rechteckigen Anordnung im geraden oder versetzten Raster zu untersuchen, wird eine Studie zur Grundfläche des Stacks durchgeführt.

Es wird vereinfacht angenommen, dass der minimale Abstand der Zellen 20 mm beträgt. Als Vergleichswert wird die gerade 5x10-Anordnung gewählt. Damit ergibt sich für diese Anordnung eine Grundfläche von 200 cm². Abbildung 53 zeigt drei Studien der versetzten Anordnungen. Zur Darstellung der Zellabstände wurden Hexagone mit einem Kreisdurchmesser von 20 mm gewählt, welche in dieser Anordnung die dichteste Packung von Kreisen realisieren. In jeder der drei Studien sind 50 Zellen angeordnet. Zur Auswertung wird die Rechteckfläche der Anordnung berechnet und mit der geraden 5x10-Anordnung ins Verhältnis gesetzt. Studie 1 besteht aus zehn versetzten Reihen mit jeweils 5 Zellen und benötigt eine Grundfläche von 196,9 cm². Dies entspricht 98,4% der Vergleichsanordnung. Diese Anordnung verfügt jedoch über keine Symmetrieachse, welche für eine identische obere und untere Verteilplatte benötigt wird. Studie 2 besteht aus abwechselnden Reihen von fünf und vier Zellen und erfüllt die geforderte Bedingung der Symmetrie. Zudem hat Studie 2 mit einer Grundfläche von 196,3 cm² einen Bedarf von 98,1%. Studie 3 besteht aus versetzten Reihen von jeweils 10 Zellen und ist ebenfalls symmetrisch. Mit einer Grundfläche von 194,0 cm² hat diese Studie einen Bedarf von 97,0%. Weiter wird betrachtet, dass der Stack für eine gleichmäßige Versorgung der Zellen einen Branch entlang der langen Seite des Stacks benötigt. Dieser wird mit 10 mm Breite angenommen. Damit hat die Vergleichsanordnung eine Grundfläche von 240 cm², Studie 2 einen Bedarf von 98,1% und Studie 3 einen Bedarf von 98,3%.

Die Studie zur Zellanordnung im Hexagon ist im Anhang C-7 abgebildet. Dort wird gezeigt, wie in einem Hexagon mit der Seitenlänge von 100 mm 60 Zellen angeordnet werden können und mittig noch Raum für Anschlüsse ist. Das Hexagon hat eine Grundfläche von 259,8 cm². Wird diese Fläche jedoch auf 60 Zellen bezogen, ergibt sich ein Vergleichsbedarf von 90,2%.

Montage und elektrische Verschaltung

Die Anordnung der Zellen im Rechteck besteht aus einer Staffelung von vier oder fünf Zellen. Für die Montage des Stacks wird es als vorteilhaft erachtet, die Zellen nicht einzeln, sondern in diesen Paketen von vier bzw. fünf Zellen in den Stack einzusetzen. Diese Methode hat zudem den Vorteil, dass die elektrische Kontaktierung der äußeren Stromsammler der Zellen im Paket vor der Montage durchgeführt werden kann. Der Montageprozess wird in Kapitel 6.3.3 näher beschrieben. Damit entsteht eine Parallelschaltung. Zudem ist es möglich, die Pakete des Stacks parallel oder in Reihe zu schalten. Bei einer Reihenschaltung der Pakete in Anordnung 2 werden Zellpakete von vier und fünf Zellen in Reihe geschaltet, sodass durch alle Pakete der gleiche Strom fließt. Dies führt zu einer Begrenzung der Leistung der 5er Pakete. Damit erfüllt Anordnung 2 nicht die Anforderung einer flexiblen elektrischen Verschaltung. In Anordnung 3 sind die Pakete aus fünf Zellen nicht auf einer Ebene, sondern bilden eine M-Form. Die Alternative sind fünf Pakete von jeweils zehn Zellen. Für beide Paketformen wird ein automatisierter Montageprozess aufgrund der nicht ebenen Struktur bzw. des notwendigen Versatzes bei jeder Reihe als schwieriger umsetzbar eingeschätzt als die Rechteckanordnung im geraden Raster. Die Anordnung im Hexagon bietet nicht die Möglichkeit, die Zellen zu ebenen, gleichgroßen Paketen zusammenzufassen. Damit ist ein einzelnes Einsetzen und

Kontaktieren notwendig, womit ein großer Automatisierungsaufwand verbunden ist.
Anordnungs- und Versorgungskonzept TXS50

Aus den oben erläuterten Analysen wird das in Abbildung 54 dargestellte Konzept zur Anordnung und Versorgung der Zellen im Ziel-Stack TXS50 abgeleitet. Der Stack hat eine rechteckige gerade Anordnung von zehn Reihen mit jeweils fünf Zellen. Diese Pakete aus fünf Zellen wird vor der Montage an den äußeren Stromsammlern elektrisch parallelgeschaltet und über die Verbindung als Paket zusammengefügt. Diese 5er-Pakete können flexibel und von den Seiten leicht zugänglich miteinander verschaltet werden. Obwohl die anderen betrachteten Anordnungskonzepte eine bessere Bauraumausnutzung versprechen, wird dieses Konzept aufgrund der Montage- und Verschaltungsfreundlichkeit gewählt.

In Abbildung 56 ist das Versorgungskonzept der Zellen schematisch abgebildet. Der Stack wird in der Draufsicht und reduziert auf einen Elektrolytfluss dargestellt. Die roten Pfeile bilden den Elektrolytfluss ab, wobei die durchgezogenen Pfeile den eingeleiteten und die gestrichelten Pfeile den abgeleiteten Elektrolyten darstellen. Alle hydraulischen Anschlüsse des Stacks befinden sich an einer der kurzen Seiten. Es sind vier Anschlüsse vorgesehen. Die Verteilerplatten werden baugleich ausgeführt, dadurch befindet sich die Ausleitung auf der gegenüberliegenden Seite der Einleitung. Der Elektrolyt wird vom Anschluss in den Branch geleitet, welcher sich seitlich über die gesamte Länge des Stacks erstreckt. Abzweigend von diesen versorgen zehn Manifolds jeweils ein Paket aus fünf elektrisch parallelgeschalteten Zellen. Der Branch der Ableitung befindet sich auf der gegenüberliegenden Seite. Damit besteht eine Z-Versorgung der Zellen im Manifold.

Die Zellpakete sind jeweils mit einem eigenen Manifold versorgt, um Shunt Currents zu minimieren. Werden die Pakete in Reihe geschaltet, entstehen Spannungsgefälle zwischen diesen und Shunt Currents bilden sich aus. Befinden sich solche Zellen in einem Manifold, ist die Leitungslänge gering und die Shunt Currents bilden sich stärker aus. Daher sind die Zellpakete möglichst voneinander getrennt und die Leitungswege durch minimierte Einlässe in die Manifolds verlängert. Nach [7] und [24] ist jedoch damit zu rechnen, dass die Verluste durch Shunt Currents für eine Reihenschaltung von 10 Paketen deutlich unter 0,5% liegen.

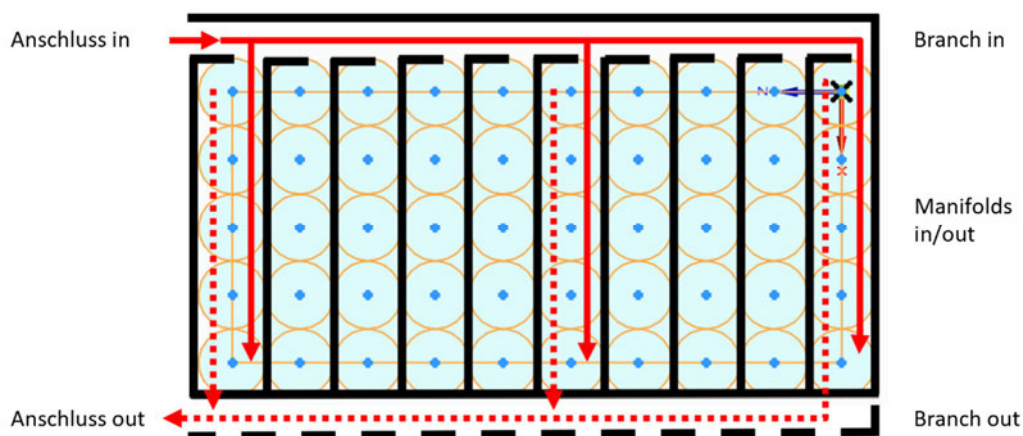


Abbildung 54: Konzept zur Anordnung und Versorgung der Zellen im Stack TXS50 reduziert auf einen Elektrolytfluss in der Draufsicht

Die Manifolds sind in einer U-Versorgung an die Branches angeschlossen. Mit den Anschlüssen auf einer Seite und den identischen Verteilerplatten ist dies nicht anders möglich. Daraus folgt die Anforderung an die hydraulische Auslegung des Branch, dass dieser eine gleichmäßige Versorgung der Manifolds bei geringem hydraulischem Widerstand gewährleistet. Die Auslegung der Branch über ein hydraulisches Modell wird im folgenden Kapitel vorgestellt.

6.2.4 Modellierung und Auslegung der Hydraulik

In Kapitel 5 werden die hydraulischen Comsol-Modelle des Basis-Moduls entwickelt und mit der in Kapitel 4 erstellten Datenbasis evaluiert. Darauf aufbauend wird in diesem Kapitel die Hydraulik des TXS50 modellbasiert ausgelegt. Aus dem Entwicklungsprozess ergibt sich die Anforderung an das hydraulische System, dass alle Zellen gleichmäßig versorgt werden und der hydraulische Widerstand der Versorgung unter 5% des Widerstands der Zellen beträgt. In Kapitel 5.5 wird gezeigt, dass die unterschiedlichen hydraulischen Widerstände der Zellen zu Volumenstromabweichungen von bis zu 50%, im Mittel ca. 20% führen. Für die Verteilung wird ein Zielwert von unter 2% angestrebt. Für die Hydraulik der Halbzellseiten wird kein signifikanter Unterschied angenommen. Daher werden die Anforderungen auf die innere Halbzellseite als kritische Seite mit geringerem hydraulischem Widerstand bezogen. Als Vergleichswert wird der mittlere hydraulische Widerstand der IHC $\overline{Z_{IHC}} = 6,35 \cdot 10^{12} \text{ m}^{-3}$ aus Kapitel 4.4 herangezogen.

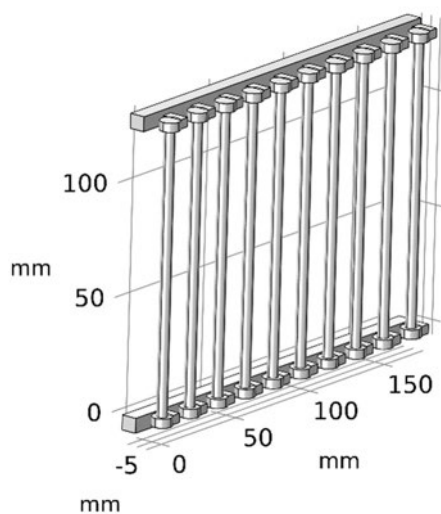


Abbildung 55: Comsol-Modell zur hydraulischen Auslegung des Branchs

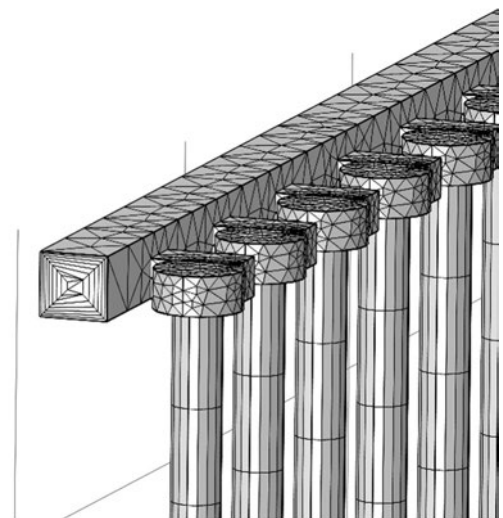


Abbildung 56: Vernetztes Comsol-Modell zur hydraulischen Auslegung des Branchs

Voruntersuchung

In einer ersten Untersuchung wird der Branch als rechteckiger Kanal modelliert. Siehe Abbildung 55. Die Abmaße in Breite und Höhe sind parametrisiert und werden zur Untersuchung variiert. Die zehn Zellpakete aus jeweils fünf IHC werden über jeweils eine Dummy-Zelle mit dem Fünffachen der Permeabilität der mittleren IHC abgebildet. Eine fünffache Permeabilität erzeugt nach Kapitel 5.2 ein Fünftel des hydraulischen Widerstands, wodurch die fünf IHC in Parallelschaltung abgebildet werden. In Abbildung 56 ist das Mesh mit

der Größeneinstellung „fein“ Randschichtverfeinerung des Branch zu erkennen. Als Einlassbedingung wird ein Volumenstrom von 1200 ml/min gesetzt, was 24 ml/min pro Zelle entspricht. Als Auslassbedingung wird der Druck null gewählt. Als Fluid wird Wasser mit einer Temperatur von 20°C eingestellt.

Zur Untersuchung des Einflusses der Branch-Maße auf den Druckverlust und die Verteilung wird ein Parameter-Sweep mit einer Auswahl an Breiten und Höhen durchgeführt. Es werden vier Untersuchungen mit der Höhe von 6,5 mm und den Breiten 5, 7, 10 und 12 mm, sowie eine weitere mit der Höhe und Breite von 10 mm ausgewertet. Die Höhe von 6,5 mm entspricht der zulässigen Höhe des Branch, mit der das Höhenmaß der Verteilerplatte nicht überschritten wird. Zur Auswertung werden die Strömungsgeschwindigkeiten in den Dummy-Zellen und der Druckabfall über das Modell als Oberflächenmittelwerte an den Zellen bzw. dem Einlass des Modells abgeleitet.

Als Resultat ergibt sich, dass nur der Branch mit dem 10x10 mm Maß die Anforderung der gleichmäßigen Verteilung mit einer Abweichung von unter 2% einhält. Die Abweichungen der Strömungsgeschwindigkeiten in den Manifolds vom Mittel sind im Anhang C-8 graphisch dargestellt. Um den Anteil des Branchs am Druckverlust des Modells zu ermitteln, wird der Druckverlust der Zellen berechnet. Es wird angenommen, dass bei einer optimalen Verteilung die 50 Zellen des Stacks parallelgeschaltet sind und damit ein fünfzigstel des hydraulischen Widerstands darstellen. Weiter resultiert jede Abweichung aus der Verteilung bzw. in diesem Modell aus dem Branch. Damit ergibt sich $Z_{IHC50} = 1,27 \cdot 10^{11} \text{ m}^{-3}$. Mit der dynamischen Viskosität und dem Volumenstrom wird nach Gleichung 10 der Druckabfall berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 15 aufgeführt. Nur der Branch mit den Maßen 10x10 mm erfüllt die Anforderung mit einem Anteil von unter 5% des Druckverlusts am Stack.

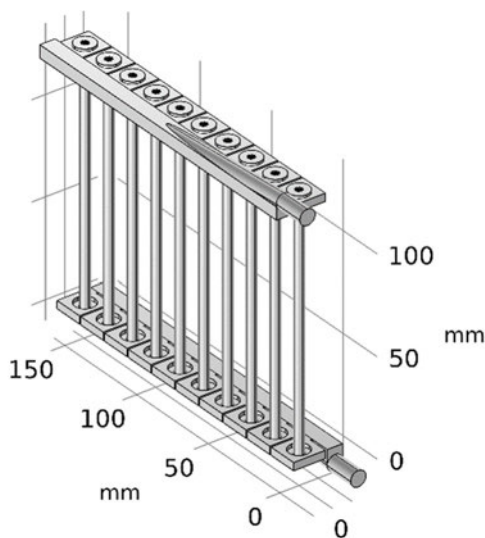


Abbildung 57: Comsol-Modell hydraulische Auslegung des TXS50-Branchs

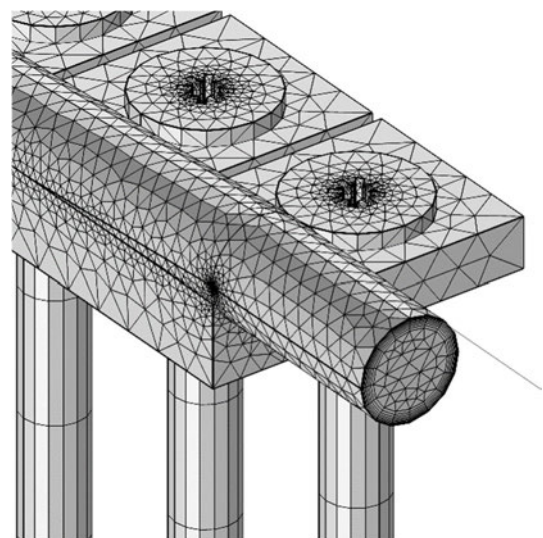


Abbildung 58: Vernetztes Comsol-Modell hydraulische Auslegung des TXS50-Branchs

Auslegung Branch TXS50

Aus dieser Erkenntnis wird der Branch für den TXS50 mit einer Breite und einem Anschluss von 10 mm Innendurchmesser konstruiert. Der hydraulische Anschluss liegt nicht auf einer Höhe mit dem Branch, um eine Schweißbarkeit der Unterkante der Verteilerplatte zu gewährleisten.

Dadurch wird der Branch am Einlass erhöht. Der Einlauf vom Anschluss in den Branch wird sich verjüngend konstruiert, sodass der Strömungsquerschnitt im Branch ab der Mitte der Länge nur noch die angestrebte Höhe von 6,5 mm aufweist. Das hydraulische Modell der Konstruktion ist in den Abbildungen 57 und 58 dargestellt. Darüber hinaus wird ein Branch mit einem Einlassdurchmesser und einer Breite von 8mm modelliert. Diese Varianten werden als „Branch d10“ und „Branch d8“ bezeichnet. In der gleichen Vorgehensweise wie in der Voruntersuchung werden die Unterschiede der Strömungsgeschwindigkeit und die Druckanteile ermittelt. Die Ergebnisse der Versorgungsanalyse sind in Abbildung 59 dargestellt. Die Ergebnisse der Analyse des hydraulischen Widerstands sind in Tabelle 15 eingetragen.

Die Variante Branch d8 weist eine maximale Versorgungsabweichung von -2,7% an Manifold 6 auf. Dieser Wert weicht stark von den umliegenden Werten ab, sodass die Möglichkeit besteht, dass es sich um einen Fehler im Modell handelt. Für den Branch wird ein Anteil des Druckverlusts von 2,14% berechnet.

Die Variante Branch d10 hält mit einer maximalen Abweichung von 1,23% die Anforderung der gleichmäßigen Verteilung ein. Der Anteil des Druckverlusts ist mit 1,20% exzellent, sodass diese Variante für die Umsetzung im TXS50 gewählt wird.

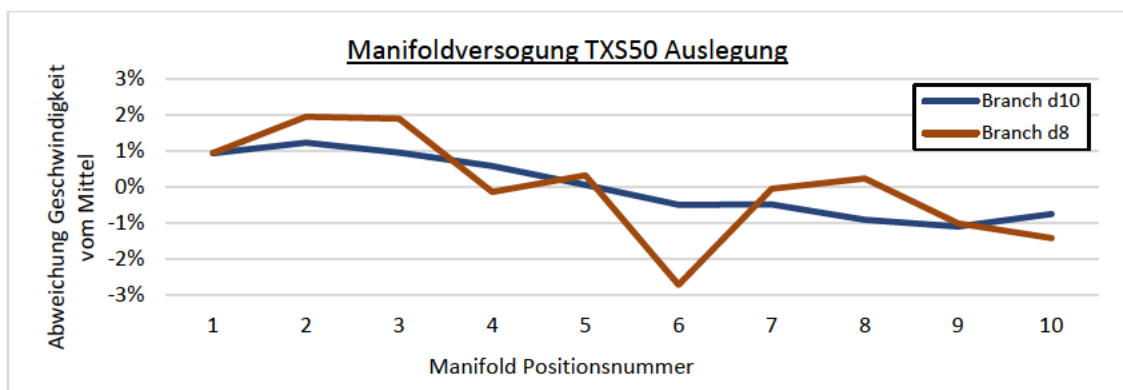


Abbildung 59: Auslegung Branch TXS50 - Unterschiede der Strömungsgeschwindigkeit in den Manifolds der Varianten Branch d10 und Branch d8

Tabelle 15: Auslegung Branch: Anteile Druckverlust Branch in Abhängigkeit der Maße

| Breite [mm] | Höhe [mm] | Druck Inlet [Pa] | Dyn. Viskosität [Pas] | V. Inlet [m³/s] | Druck IHC 50 [Pa] | Druck Verteilung [Pa] | Anteil Verteilung |
|----------------|-----------|------------------|-----------------------|-----------------|-------------------|-----------------------|-------------------|
| 5 | 6,5 | 3145 | 1,01E-03 | -2,00E-05 | 2564 | 581 | 18,48% |
| 7 | 6,5 | 2853 | 1,01E-03 | -2,00E-05 | 2564 | 290 | 10,15% |
| 10 | 6,5 | 2732 | 1,01E-03 | -2,00E-05 | 2564 | 168 | 6,14% |
| 12 | 6,5 | 2736 | 1,01E-03 | -2,00E-05 | 2564 | 173 | 6,31% |
| 10 | 10 | 2690 | 1,01E-03 | -2,00E-05 | 2564 | 127 | 4,71% |
| TXS Branch d10 | | 2595 | 1,01E-03 | -2,00E-05 | 2564 | 31 | 1,20% |
| TXS Branch d8 | | 2620 | 1,01E-03 | -2,00E-05 | 2564 | 56 | 2,14% |

6.3 Entwurfsbeschreibung Ziel-Stack TXS50

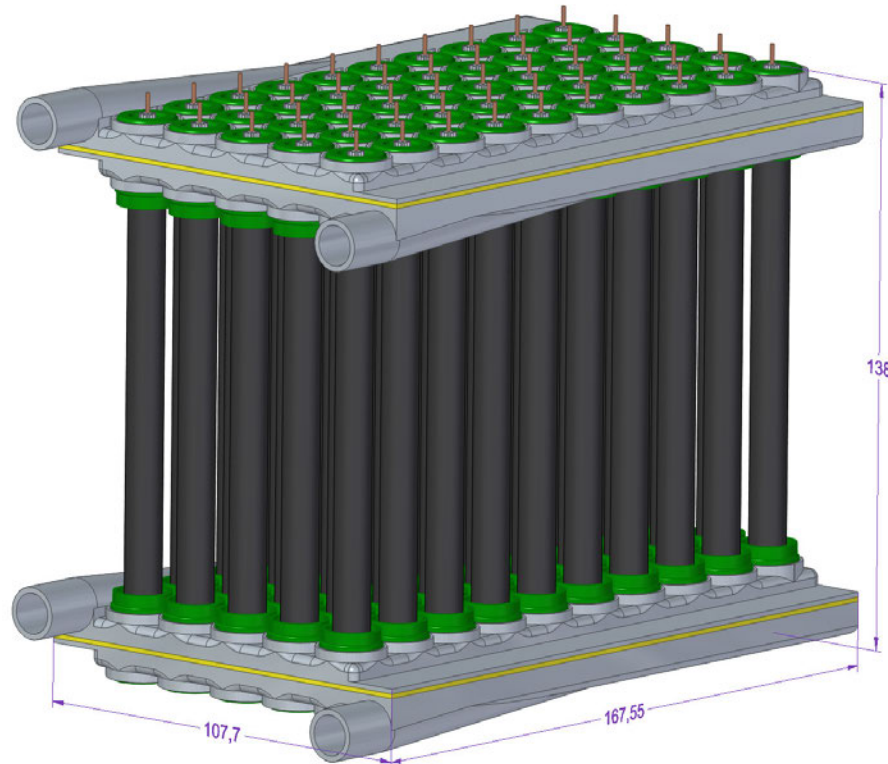


Abbildung 60: CAD-Modell Ziel-Stack TXS50

In den vorangehenden Kapiteln 6.1 und 6.2 werden die konstruktionsmethodischen Schritte zur Entwicklung des Stacks tubulärer RFB-Zellen dargelegt. 6.1 umreißt die Planung und legt die Zielsetzung und die Anforderungen der Entwicklung fest. Kapitel 6.2 erläutert die Schritte des Konzipierens und Entwerfens. Die Entwicklungsaufgabe wird in Teilprobleme unterteilt, Lösungsansätze werden formuliert und ihr Einfluss auf die Gesamtlösung in Design-Ebenen eingeteilt. Für die ersten beiden Design-Ebenen „Demontierbarkeit der Zellen“ und „Konzept der Verteilerplatten“ werden Konzeptideen entwickelt und evaluiert. Für die finale Konzeptvariante werden Studien zur Zellanordnung durchgeführt und auf den hydraulischen Modellen basierende Entwürfe entwickelt. In diesem Kapitel wird das Resultat der Entwicklung, der Stack TXS50, dargestellt in Abbildung 60, vorgestellt. Es werden die Ausgestaltung des Solid Edge CAD-Modells, das hydraulische Comsol-Modell und das Montagekonzept erläutert. Abschließend wird ein Vergleich mit den Zielvorgaben gezogen und im Rahmen einer kritischen Betrachtung werden Verbesserungsansätze dargestellt.

6.3.1 Geometrische Ausgestaltung

Der entwickelte Stack TXS50 ist, wie in Kapitel 6.2.2 festgelegt, ein vereinigter Stack mit Versorgungsmodulen in Sandwichbauweise. Kopfelemente dienen dazu, den Interdigitated Flow umzusetzen und eine einfache Montage zu ermöglichen. Das in Solid Edge erstellte CAD Modell des Stacks ist in Abbildung 60 und Anhang C-10 als Baugruppe abgebildet. In Abbildung 61 ist ein Schnitt durch das Modell dargestellt, an dem der Aufbau und die Komponenten zu erkennen sind. Die Versorgungsmodule des Stacks bestehen pro Seite aus drei

Sandwichplatten: der äußeren Verteilerplatte 1, der Trennplatte 2 und der inneren Verteilerplatte 3. Die Verteilerplatten 1 und 3 sind identisch. Jede Zelle ist pro Kopfseite mit drei Kopfelementen versehen. Dem OHC-Kopf 4, dem Membran-Kopf 5 und dem IHC-Kopf 6.

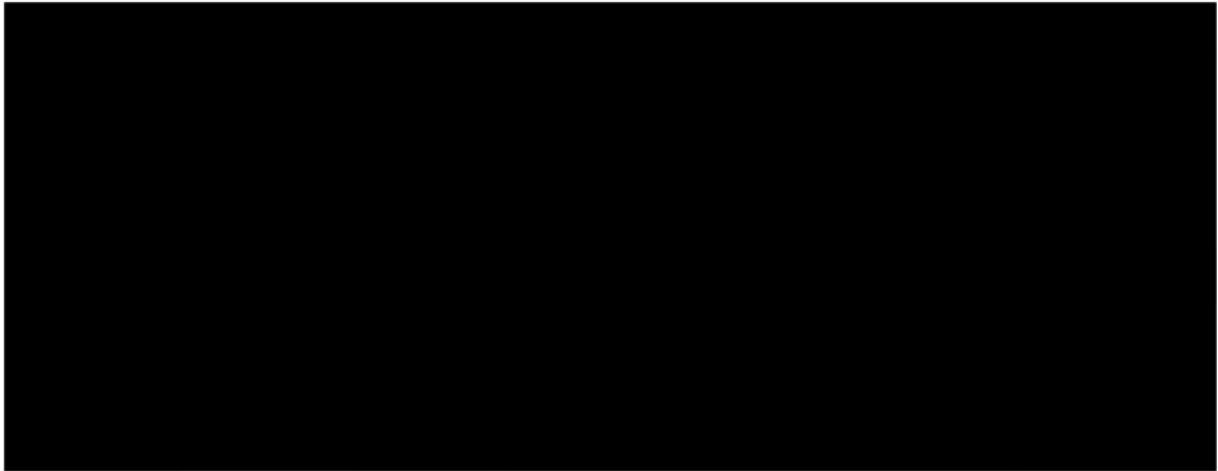


Abbildung 61: CAD-Modell TXS50 – Schnitt durch einen Manifold: 1 Äußere Verteilerplatte; 2 Trennplatte; 3 Innere Verteilerplatte; 4 OHC-Kopf; 5 Membran-Kopf; 6 IHC-Kopf

In die Verteilerplatte sind seitlich ein Branch und davon abgehend zehn Manifolds für jeweils fünf Zellen eingelassen. Eine Unteransicht, in der der Branch und die Manifolds erkennbar sind, ist im Anhang C-11 dargestellt. Damit wird die in Abbildung 54 skizzierte Versorgung umgesetzt. Der Branch hat eine Breite von [REDACTED] und eine Minimalhöhe von [REDACTED]. In Richtung des Anschlusses weitet sich der Branch nach oben aus, um dem höheren Volumenstrom gerecht zu werden. Die Manifolds haben eine Höhe [REDACTED]. Die Einlässe haben eine Breite von [REDACTED]. Die Verteilerplatten werden möglichst spritzgussgerecht designt. Dabei wird sich an Empfehlungen nach [17] und [12] orientiert. Nach [17] sind für Polypropylen Wandstärken von 0,635 bis 3,81 mm empfohlen. Die Verteilerplatte weist eine maximale Wandstärke von 1,3 mm auf. Diese ist auf die Seitenwände und den Boden bzw. das Dach der Platte beschränkt. Verrippungen sollen etwa 50% der Hauptwandstärke aufweisen. Die Kragen, welche die Vergussfugen für die Zellköpfe bilden und vereinfacht als Rippen betrachtet werden, weisen daher eine Stärke von 0,65 mm auf. Ausformungsschrägen werden bei den geringen Tiefen nicht benötigt.

Der OHC-Kopf verfügt abwechselnd über einen Stopfen und einen Durchlass für die FC im äußeren Stromsammler. Damit wird der Interdigitated Flow umgesetzt und zudem wird der Kopf beim Verguss mit der Zelle durch die Stopfen positioniert. Der OHC-Kopf ermöglicht zudem eine Montage des Stacks ohne, dass an der Innenseite vergossen werden muss. Dazu verfügen sowohl der OHC-Kopf, als auch die Verteilerplatte über ineinandergreifende Vergussfugen. Im Montageprozess ist es somit möglich, die Zellen mit den inneren Verteilerplatten und einer äußeren Verteilerplatte zu vergießen, ohne dass der Stack gedreht oder auf das Trocknen der Vergussmasse gewartet werden muss. Zudem sorgt die Fase am inneren Kragen des Kopfes für ein selbstständiges Positionieren. Der Durchmesser des OHC-Kopfes ist so gering wie möglich gehalten, ohne die Funktion einzuschränken. Zudem

überlappen sich die äußeren Kragen der Vergussfugen der Verteilerplatte, wie in Abbildung 60 zu sehen. Somit wird der Abstand zwischen den Zellen minimiert, um Bauraum und Material zu reduzieren.

Die Trennplatte hat eine Stärke von 1,1 mm und ist einfach gestaltet. Eine Abbildung ist im Anhang C-12 dargestellt. Die Platte verfügt über Durchlässe und daran angrenzende Vergusskragen für die Zellen. Zusammen mit den Membran-Köpfen wird das Abdichten der Halbzellseiten gegeneinander durch Vergießen ermöglicht. Der Membran-Kopf hat die Funktion, Fertigungstoleranzen auszugleichen. Es kann eine Abweichung der Konzentrität von 0,3 mm ausgeglichen werden.

Der IHC-Kopf verfügt über vier Stopfen, welche die FC der IHC versiegeln und somit den Interdigitated Flow realisieren. Die Köpfe sind so konzipiert, dass auch diese einen Abweichung der Konzentrität von 0,3mm ausgleichen und gleichzeitig die Verwendung identischer Platten für die innere und äußere Verteilung möglich ist.

In der Darstellung des Stacks in Abbildung 60 ist zu erkennen, dass die hydraulischen Anschlüsse von der Auflagefläche der Verteilerplatten angehoben sind. Damit wird eine klar definierte und gut zugängliche Kante für das Verschweißen der Sandwichplatten erzeugt. Das Schweißen der Platten ist somit über Ultraschall-Schweißen oder mit Schweißlot entlang der Außenkante möglich. Darüber hinaus wird durch die Anhebung des Anschlussstutzens auch der Branch erhöht. Dies sorgt für einen größeren Strömungsquerschnitt an der Stelle, wo der größte Volumenstrom auftritt. Anschließend senkt sich der Branch bis zur Mitte des Stacks ab, womit eine möglichst gleichmäßige Strömungsgeschwindigkeit und gleichmäßige Versorgung der Manifolds bezweckt wird. Zudem wird verzichtbares Material und Bauhöhe im hinteren Bereich des Stacks eingespart. Der Außendurchmesser des Anschlussstutzens beträgt 12,7 mm. Dies entspricht dem Innendurchmesser eines Standard-PP-Schlauchs [5]. Alternative Schlauchinnendurchmesser von 12 mm sind ebenfalls umsetzbar. Für den Wechsel auf die Variante des Branch mit 8 mm Breite und Anschlussdurchmesser bieten sich Schläuche des Standardlieferanten mit einem Innendurchmesser von 10 mm an [9]. Für die Befestigung des Schlauchs am Stack ist ein Aufstecken und Sichern mittels Schlauchschelle als kostengünstige Variante vorgesehen.

Zur Ausarbeitung der Vergussstellen wird das Handbuch [22] des Herstellers und Projektpartners Wevo-Chemie GmbH genutzt. Dort wird die minimale Spaltbreite für das Vergießen von 0,5 – 1mm angegeben.

Alle Komponenten sind so konstruiert, dass diese geeignet für die Spritzgussfertigung sind und keine aufwendige Nachbearbeitung benötigen. Lediglich die Verteilerplatten weisen mit den Anschlussstutzen eine Hinterschneidung auf, welche nur durch die Verwendung eines Schiebers erstellt werden kann. Die Fertigung mit Spritzguss lohnt sich ab einer Stückzahl von 1 000 bis 10 000 Stück. Nach [12] wird die Mindeststückzahl mit 500 Stück angegeben, da sich ab dann Skaleneffekte bemerkbar machen und die hohen Anlaufkosten des Formenbaus kompensiert werden. Mit der angenommenen Produktion von 1 Million Zellen im Jahr und damit 20 000 Stacks aus 50 Zellen wird geschlussfolgert, dass das Spritzgussverfahren zur Fertigung der Komponenten sowohl geeignet als auch am günstigsten ist.

6.3.2 Hydraulische Modellierung des Gesamtsystems

In Kapitel 6.2.4 wird zur Auslegung des Branchs der Stack vereinfacht modelliert. Dabei wird der Manifold auf die Einlassöffnung und eine Dummy-Zelle, welche den Druckabfall über die fünf parallelen Zellen abbildet, reduziert. Das Modell erfüllt die gesetzten Anforderungen von unter 2% Unterschied in der Versorgung der Manifolds und einem Anteil der Versorgung von unter 5% am hydraulischen Widerstand und liegt dort mit einem Anteil von 1,2% sogar deutlich unter der Vorgabe.

Da das Modell in der Auslegung jedoch vereinfacht ist und die Strömungsbedingungen im Manifold nicht berücksichtigt, wird zur Überprüfung der Anforderungen an die Hydraulik ein Gesamtmodell des TXS50 modelliert. Wie auch schon in der Auslegung wird die innere Halbzellenseite des TXS50 als kritisch erachtet, sodass diese modelliert und analysiert wird. Das Modell ist in Abbildung 62 und vergrößert im Anhang C-13 dargestellt.

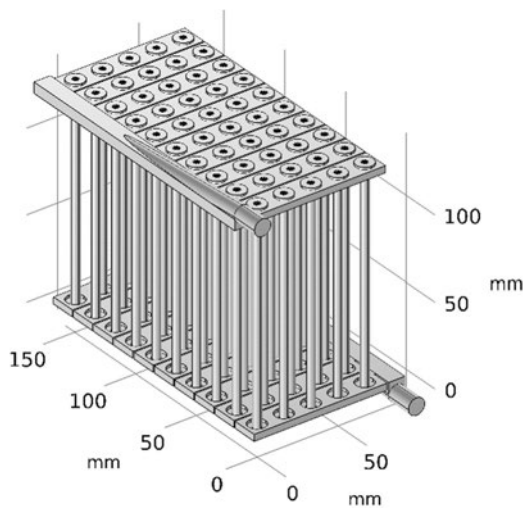


Abbildung 62: Cmsol-Modell Hydraulik der inneren Halbzellenseite des TXS50

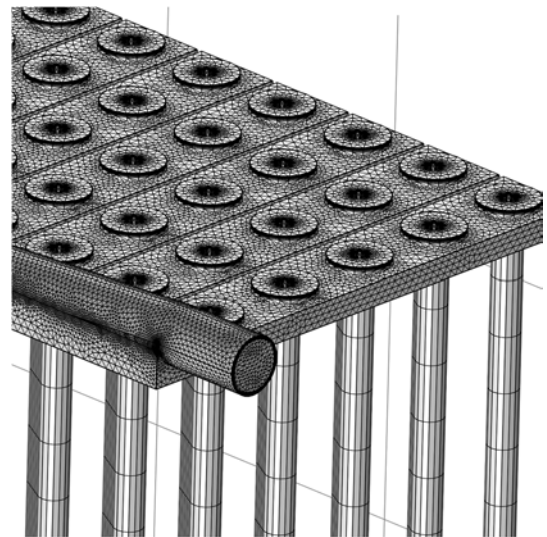


Abbildung 63: Vernetzung des Cmsol-Modells Hydraulik der inneren Halbzellenseite des TXS50

Das Modell besteht aus dem Branch zur Einleitung unten rechts mit sich reduzierendem Strömungsquerschnitt, den zehn daran anschließenden Manifolds mit jeweils fünf IHC-Dummys und auf der Ableitungsseite erneut zehn Manifolds, sowie dem Branch mit sich zum Anschluss erweiternden Strömungsquerschnitt. In Abbildung 63 ist ein Ausschnitt des vernetzten Modells abgebildet. Im Bereich der Verteilungsgeometrie wird eine Randschichtverfeinerung mit 8 Schichten und eine einfache „gleichmäßige Netzverfeinerung“ angewandt. Die IHC-Dummys sind bezüglich Geometrie und Mesh unverändert zu Kapitel 5.2 übernommen und mit der Permeabilität des Mittelwerts der IHC aus Kapitel 4.4 belegt. Am Anschluss unten rechts des Modells wird die Einlassbedingung des Volumenstroms mit 1200 ml/min eingesetzt. Dieser Volumenstrom entspricht dem Richtwert von 24 ml/min pro Zelle. Die Auslassbedingung am Anschluss oben links des Modells wird als Druck null gewählt. Als Fluid wird Wasser mit 20°C eingestellt.

Zur quantitativen Analyse des Stacks werden an den Ausgängen der Manifolds zum Auslass-Branch die Strömungsgeschwindigkeiten als Flächenmittelwert abgeleitet. Zudem wird an der

Einlassfläche des Modells der Druck, die dynamische Viskosität und die Strömungsgeschwindigkeit als Oberflächenmittelwert abgeleitet. Die Ergebnisse der Auswertung der Strömungsgeschwindigkeit sind in der Tabelle im Anhang C-14 und graphisch in der Abbildung Anhang C-15 abgebildet. Die Abweichungen des Modells sind mit einem maximalen Betrag von 0,9% sogar geringer als der Wert des Auslegungsmodells. Um den Anteil der Versorgung am Druckverlust des Modells zu ermitteln, wird der Druckverlust der Zellen berechnet. Es wird angenommen, dass bei einer optimalen Verteilung die 50 Zellen des Stacks parallelgeschaltet sind und damit nur ein Fünfzigstel des hydraulischen Widerstands darstellen. Weiter resultiert jede Abweichung aus der Verteilung des Systems. Damit ergibt sich $Z_{IHC50} = 1,27 \cdot 10^{11} m^{-3}$. Mit der dynamischen Viskosität und dem Volumenstrom wird nach Gleichung 10 der Druckabfall berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 16 aufgeführt. Über das Modul wird eine Druckdifferenz von 2611 Pa ausgewertet. Die erwartete Druckdifferenz durch die 50 IHC beträgt 2564 Pa. Damit hat die Versorgung einen Anteil von 1,80% am hydraulischen Widerstand der kritischen inneren Halbzellseite. Der Anteil ist um 0,6% höher als der Wert der Auslegung. Da bei der Auslegung die Manifolds nicht mitberücksichtigt wurden, ist das Ergebnis dahingehend plausibel. Auf der äußeren Halbzellseite wird durch den höheren hydraulischen Widerstand der OHC ein geringerer Anteil der Versorgung am Druckverlust erwartet. Aus dem Vergleich der berechneten Anteile gegen die Halbzellen in den Tabellen im Anhang B-10 und B-12 wird der Faktor 4 abgeschätzt. Der Stack TXS50 erfüllt somit die hydraulischen Anforderungen im vollen Umfang.

Tabelle 16: Comsol Modell TXS50 - Analyse der Druckverlustanteile

| Druck Inlet [Pa] | Dyn.Viskosität [Pas] | V. Inlet [m³/s] | Druck IHC 50 [Pa] | Druck Versorgung [Pa] | Anteil Verteilung |
|-----------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|------------------------------|----------------------------------|------------------------------|
| 2611 | 1,01E-03 | 2,56E-01 | 2564 | 47 | 1,80% |

In den Abbildungen 64 und 65 sind die Strömungsgeschwindigkeiten in ausgewählten Schnitten im Modell dargestellt. In Abbildung 64 lässt sich die Verteilung der Strömung in den Manifolds und der Übergang zum Branch erkennen. Es ist auffällig, dass die Strömungsgeschwindigkeit in diesem Schnitt in der Mitte des Branchs am höchsten ist. Dies ist mit der Verjüngung des Branchs zu erklären. In Abbildung 65 ist am Einlass die voll ausgeprägte Strömung zu erkennen, während am Auslass eine sehr gleichmäßige Strömungsverteilung über eine weite Länge des Branchs zu erkennen ist. Im Anhang C-16 ist die Darstellung von Abbildung 65 zur Verdeutlichung in der Seitenansicht dargestellt. Die graphische Darstellung der Druckverteilung über das Modul ist im Anhang C-17 abgebildet. Diese bestätigt jedoch nur den geringen Anteil des Druckverlustes über die Versorgung.

Schnitt: Geschwindigkeitsbetrag (m/s)

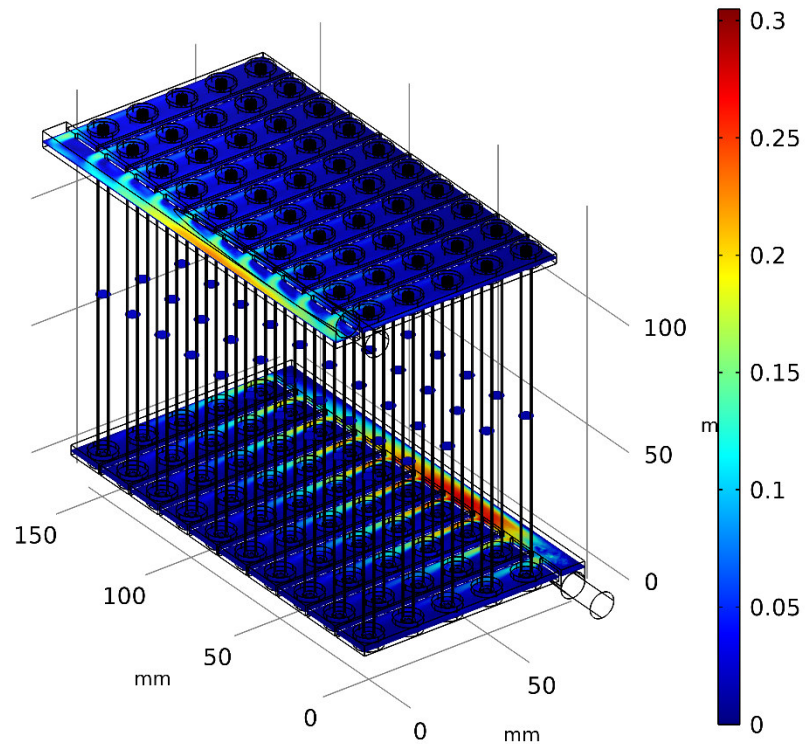


Abbildung 64: Graphische Darstellung der Strömungsgeschwindigkeiten im Modell TXS50 x/y

Schnitt: Geschwindigkeitsbetrag (m/s)

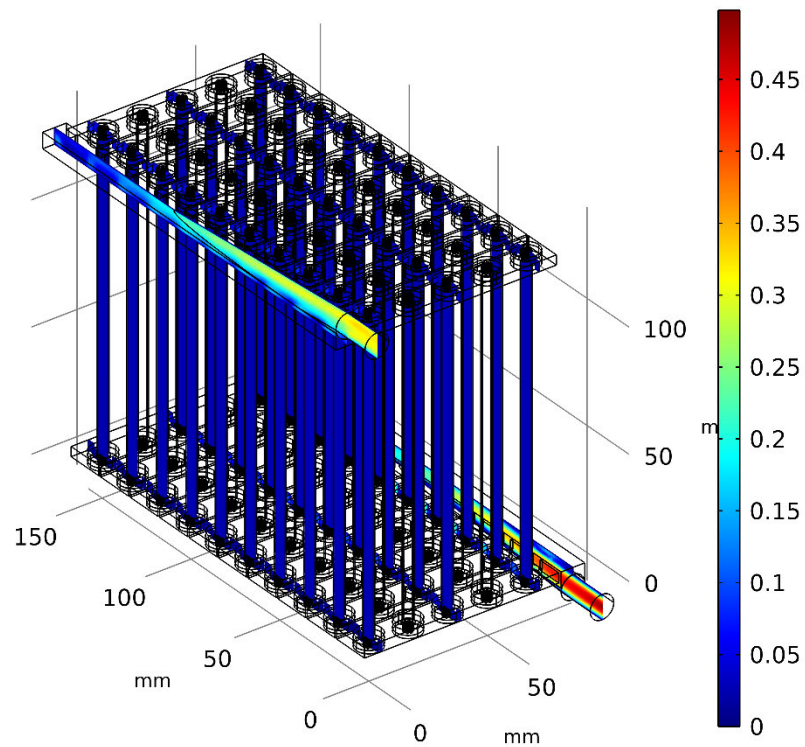


Abbildung 65: Graphische Darstellung der Strömungsgeschwindigkeiten im Modell TXS50 y/z

6.3.3 Konzept der Montage

In den konstruktionsmethodischen Schritten des Planens, Konzipierens und Entwerfens ist die Montage des Stacks beim Treffen von Designentscheidungen ein wichtiger Einflussfaktor gewesen. Dabei wurde auch eine möglichst einfache Automatisierung der Montage berücksichtigt. Im Rahmen dieser Arbeit ist es nicht gefordert, ein umfassendes Montage- oder Automatisierungskonzept auszuarbeiten, jedoch wurde während des Entwicklungsprozesses zwangsläufig ein Montagekonzept des Stacks in groben Zügen mitentwickelt. Das Montagekonzept, welches als Ausgangslage die produzierten Zellen hat, wird folgend skizziert:

Schritt 1: Aufstecken und Vergießen der inneren Zellköpfe mit dem Stromsammler der OHC. Dies geschieht in zwei Schritten, da die Zelle zum Vergießen gedreht werden muss.

Schritt 2: Einlegen von fünf Zellen in eine Positioniervorrichtung und Verlöten zu einem Paket an den äußeren Stromsammlern.

Schritt 3: Positionierung der unteren inneren Verteilerplatte mit den Vergussfugen für die Köpfe nach oben in einer Montagevorrichtung.

Schritt 4: Befüllen der Fugen mit Vergussmasse bis zu einer Höhe von 1 - 1,25 mm.

Schritt 5: Einsetzen der Zellpakete. Die Zellen sind durch Fasen selbstpositionierend. Hier ist eine Haltekonstruktion notwendig, um die Zellpakete in Position zu halten und ein Umkippen zu verhindern.

Schritt 6: Befüllen der Vergussfugen der nach oben zeigenden Zellköpfe mit Vergussmasse bis zu einer Höhe von 1 - 1,25 mm.

Schritt 7: Aufsetzen der inneren Verteilerplatte. Die Zellen sind durch Fasen selbstpositionierend. Eine Vorrichtung zum geraden Aussetzen und genauen Positionieren der Verteilerplatten ist notwendig.

Schritt 8: Aufsetzen der Trennplatte. Diese kann auch im Vorhinein bereits mit der Verteilerplatte bspw. über Ultraschall-Schweißen vereinigt werden.

Schritt 9: Einsetzen und Vergießen der Membran-Köpfe zum Toleranzausgleich.

Schritt 10: Aufsetzen der äußeren Verteilerplatte, aufstecken der IHC-Köpfe und vergießen.

Schritt 11: Drehen des Stacks. Dabei ist ein Montagerahmen sinnvoll, an dem der Stack sicher bewegt werden kann.

Schritt 12: Wiederholen der Schritte 7 – 10 auf der anderen Seite.

Schritt 13: Verschweißen der Außenkantern der Platten (eventuell Ultraschall).

Schritt 14: Kontaktieren der Zellpakete.

Der beschriebene Prozess benötigt einen Montagerahmen zum Positionieren, Sichern und Bewegen. Dennoch ist der Prozess in gut lösbare Teilaufgaben untergliedert und kann in einem Schichtungsprozess an einem Fließband realisiert werden. Eine Wartezeit zum Aushärten der Vergussmassen ist nur noch Schritt 10 notwendig. Die größte Herausforderung wird bei der richtigen Positionierung der Köpfe und das Einführen der Stopfen in die Flow Channel der Halbzellen zur Umsetzung der Interdigitated Flow gesehen.

6.3.4 Vergleich mit Zielvorgabe

In der Zielsetzung der Stack-Entwicklung in Kapitel 6.1 werden qualitative und quantitative Anforderungen an den zu entwickelnden Stack gestellt. In den vorherigen Kapiteln werden die Eigenschaften des TXS50 Stacks mit Bezug auf die Anforderungen erläutert. Es wird gezeigt, dass eine Produktion durch Spritzguss praktikabel und damit eine Kostenreduktion der Produktion erwartbar ist. Mit der Analyse des hydraulischen Modells der inneren Halbzelleseite des Stacks wird nachgewiesen, dass die Anforderungen an einen geringen Druckverlust bei gleichmäßiger Versorgung eingehalten werden. Die Konzeptidee zur Montage des Stacks verspricht durch den schichtenden Ablauf mit nur einmaligem Drehen des Stacks eine gute Umsetzbarkeit und Automatisierbarkeit. Mit den angeregten Paketen aus fünf parallelgeschalteten Zellen lässt sich der Stack leicht zugänglich und flexibel an den Seiten verschalten. Zudem wird auch der Interdigitated Flow über die Kopfelemente der IHC und OHC umgesetzt.

Quantitativ werden, neben den hydraulischen Kennwerten, auch Materialaufwand- und Bauraumanforderungen gesetzt. Diese werden als Reduktionsvorgaben in Bezug auf das Basis-Modul festgelegt. Der Materialaufwand, bezogen auf die Zellen, ist um mindestens 50%, optimalerweise 90%, zu reduzieren. Der Materialaufwand der Köpfe ist, wenn möglich, ebenfalls um 50% zu senken. Weiter ist die Vergussmasse pro Zelle nicht zu erhöhen und der Bauraum auf ein Minimum zu reduzieren. Aus diesen Anforderungen wurden die Kennzahlen des Basis-Moduls abgeleitet und die Zielwerte nach Tabelle 14 festgesetzt. Für den Ziel-Stack werden die Kennzahlen dem CAD- und Comsol-Modell entnommen und in den Tabellen im Anhang C-18 zusammengestellt. Aus diesen werden die Vergleichskennzahlen abgeleitet und den Zielwerten aus der Zielsetzung in Tabelle 17 gegenübergestellt. Der Stack TXS50 weist einen Bauraum pro Zelle von 54 cm^3 auf, eine Reduktion von 87%. Der Materialeinsatz der Versorgungsplatten pro Zelle beträgt abgeschätzt 4,3g. Aufgrund von unterschiedlicher Materialdichte wird die Reduktion über das eingesetzte Materialvolumen berechnet. Es ergibt sich eine Reduktion von 94%. Die benötigte Vergussmasse wird mit 1,1 ml pro Zelle veranschlagt und ist somit ebenfalls um 10% verringert. Der Materialeinsatz der Köpfe wird um 65% von $4,1 \text{ cm}^3$ auf $1,4 \text{ cm}^3$ pro Zelle reduziert.

Damit ist gezeigt, dass alle qualitativen Anforderungen und quantitativen Zielsetzungen mit dem entwickelten Stack TXS50 vollumfänglich erfüllt sind.

Tabelle 17: Abgeleitete Kennzahlen des Ziel-Stacks TXS50

| Abgeleitete Kennzahlen – TXS50 | | | | |
|---------------------------------------|--------------|-------------|----------------|----------------------------------|
| Kennzahltyp | Ziel | Wert | Einheit | Kommentar |
| Bauraum pro Zelle | << 421 | 54 | cm^3 | |
| Materialeinsatz pro Zelle | 13 | 4,3 | g | Unterschiedliche Materialdichten |
| Materialeinsatz pro Zelle | 7,7 | 4,8 | cm^3 | |
| Vergussmasse pro Zelle | $\leq 1,232$ | 1,11 | ml | |
| Material Köpfe pro Zelle | 2,1 | 1,4 | cm^3 | Wunsch |
| Druckverlust Versorgung | ≤ 5 | 1,8 | % | |

6.3.5 Kritische Bewertung und Verbesserungsansätze

Im vorangehenden Kapitel wird gezeigt, dass der entwickelte Stack TXS50 die Zielvorgaben umfassend erfüllt, dennoch gehört zu einer Produktentwicklung auch ein stetiger Verbesserungsprozess und nicht alle Überlegungen konnten ausreichend beleuchtet werden. In den folgenden Abschnitten sollen einige kritische Punkte und weitergehende Verbesserungsansätze dargestellt werden, um einen Ausblick zu schaffen.

Bündelung von Zellen

In dem Entwicklungsprozess wurde der Ansatz entwickelt und Zellen umgesetzt, Zellen zu bündeln. Dies erhöht die Montagefreundlichkeit. Jedoch wurden die Zellen während der Entwicklung der Köpfe nur einzeln betrachtet. Der Durchmesser der Köpfe wurde gering gehalten, um eine hohe Packungsdichte zu ermöglichen. Eine andere Lösung ist, einen Kopf für ein Bündel aus Zellen konstruieren. Damit wird die Packungsdichte weiter erhöht und auch Vergussmassen werden potenziell eingespart. Wird dieser Ansatz mit Ultraschall-Schweißen kombiniert, können auch dichtgepackte Pakete erstellt werden.

Damit ließe sich auch eine Anordnung im Hexagon, welche eine gute Bauraumausnutzung hat, realisieren, indem dreieckige Pakete von zehn Zellen in einem Kopf vereint werden und anschließend sechs Pakete zusammen einen Stack bilden.

Interdigitated Flow

Eine Vorgabe der Entwicklung ist es, die Interdigitated Flow umzusetzen. Dies wird mit Stopfen realisiert, welche bei der automatisierten Montage eine Herausforderung darstellen können. Eine günstige und einfach automatisierbare Alternative ist das Versiegeln der Flow Channel im Fertigungsprozess der Zelle. Dies kann beispielsweise durch Klebpunkte an den entsprechenden Öffnungen der FC umgesetzt werden.

Der Interdigitated Flow wird bei der Modellierung und Auslegung der Hydraulik nicht berücksichtigt. Wird angenommen, dass durch den erzwingenden Volumenstrom durch den Filz ein geringer Volumenstrom durch die Zellen geleitet werden muss, verringern sich die Volumenströme des Stacks und der Branch kann kleiner dimensioniert werden.

Position der Anschlüsse

Die Anschlüsse über Verteilerplatten sind so positioniert, dass die Höhe der Verteilerplatten möglichst gering gehalten wird. Eventuell ist es lohnend, die Anschlüsse so weit anzuheben, dass sie über der Verteilerplatte hinausragen. Damit ist es möglich, Stacks direkt hintereinander zu positionieren.

Versorgung der Manifolds

Die Manifolds haben in den Verteilerplatten kleine Einlässe. Diese sind so positioniert, dass ein verlängerter Leitungsweg für Shunt Currents zwischen den Manifolds entsteht. Zusätzlich ließe sich eine Beeinflussung der Manifoldversorgung über unterschiedlich große Einlässe realisieren. Damit kann eventuell bei größeren Modulen eine Abwägung zwischen Materialeinsatz durch die Größe des Branchs und Effizienz des Stacks beeinflusst werden.

7 Zusammenfassung und Fazit

In dieser Arbeit wurde mit dem TXS50 ein im industriellen Maßstab fertiger Stack tubulärer Redox-Flow-Batteriezellen entwickelt. Der Stack ist material- und bauraumeffizient gestaltet und für die kostengünstige Spritzgussfertigung geeignet. Mittels der versuchstechnischen Ermittlung hydraulischer Kennwerte und der darauf aufbauenden Entwicklung hydraulischer Modelle wurde ein minimierter Druckverlust und eine gleichmäßige Versorgung der Zellen sichergestellt. Der entwickelte Stack TXS50 mit 50 tubulären Zellen und einer abgeschätzten Leistung von 100W erfüllt alle gesetzten Anforderungen der Material- und Bauraumreduktion. Darüber hinaus werden die Schritte eines automatisierbaren Montageprozesses skizziert.

Die Arbeit beinhaltet einen praktischen Versuchsteil zur Ermittlung der hydraulischen Systemkennwerte, die Entwicklung der hydraulischen Modelle und die methodische Produktentwicklung des Stacks. Nachfolgend werden die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst und abschließend ein Fazit gezogen.

In Kapitel 4 werden die experimentellen Versuche zur Erstellung der hydraulischen Datenbasis dargelegt. Die Datenbasis dient der Evaluierung und Parametrisierung der hydraulischen Modelle. Zur Vergleichbarkeit des Druckabfalls unterschiedlicher Komponenten wird der hydraulische Widerstand $Z [m^{-3}]$ eingeführt. Die Größe Z fasst die geometrischen Einflussfaktoren auf den Druckabfall zusammen, sodass der hydraulische Widerstand unabhängig von Fluideigenschaften, Strömungsgeschwindigkeiten und Widerstandseffekten verglichen werden kann. Aus der Untersuchung von fünf Einzelzellen im dafür entwickelten Einzelmodul wird für die IHC ein mittlerer hydraulischer Widerstand von $\overline{Z_{IHC}} = 6,35 \cdot 10^{12} m^{-3}$ mit einer Standardabweichung von $1,05 \cdot 10^{12} m^{-3}$ ermittelt. Für die OHC ergibt sich ein mittlerer hydraulischer Widerstand von $\overline{Z_{OHC}} = 2,64 \cdot 10^{13} m^{-3}$ mit einer Standardabweichung von $6,44 \cdot 10^{12} m^{-3}$. Es wird aus einem Vergleich mit dem Basis-Modul bestätigt, dass sich der hydraulische Widerstand mehrerer Zellen mithilfe eines elektrischen Ersatzschaltbildes und der Gleichsetzung von hydraulischen und elektrischen Widerständen berechnen lässt. Darüber hinaus wird ermittelt, dass der Anteil der Versorgungsmodule und Köpfe gegenüber den Zellen nicht signifikant ist.

Darauf aufbauend werden in Kapitel 5 hydraulische Modelle der Ist-Geometrien des untersuchten Basis-Moduls erstellt und die Übertragbarkeit des modellierten Verhaltens in die Praxis verifiziert. Die hydraulischen Widerstände der Zellen werden erfolgreich mit dem Parameter der Eindringtiefe des Filzes in die Flow Channels modelliert. Die Analyse zeigt, dass der Einfluss der Eindringtiefe auf Z_{OHC} 7-mal höher ist als auf Z_{IHC} . Damit ist ein Ansatz geliefert, der die um den Faktor 6 unterschiedlich hohen Schwankungen zwischen den Halbzellen erklärt. Für die effiziente Einbindung in Stack-Modelle werden Dummy-Zellen entwickelt, welche über eine lineare Parametrisierung den hydraulischen Widerstand der Halbzellen verlässlich abbilden und den Modellierungs- und Rechenaufwand der Stack-Modelle reduzieren.

Im folgenden Kapitel 6 wurden über einen methodischen Konstruktionsprozess mehrere Stack-Konzepte entworfen, technisch-wirtschaftlich verglichen und das Ziel-Stack-Design TXS50 als

favorisiertes Konzept identifiziert. Der Ziel-Stack TXS50 erfüllt einen Kompromiss aus Montage- und Verschaltungsfreundlichkeit gegen Bauraum- und Materialeffizienz. Die Komponenten der Verteilermodule werden in einer geometrisch flexiblen, materialeffizienten und ohne Nachbearbeitung mittels Spritzguss fertigen Sandwichbauweise ausgearbeitet. Mit der Einbeziehung des hydraulischen Modells in die Entwicklung wird eine Versorgung mit einer Verteilungsabweichung von 0,9% und einem Anteil am Druckverlust von 1,8% gegen die kritische innere Halbzelle realisiert. Auf der äußeren Halbzelle wird durch den höheren hydraulischen Widerstand der OHC ein um den Faktor 4 geringerer Anteil der Versorgung am Druckverlust erwartet. Im Vergleich zum Basis-Modul ist der Bauraumbedarf des TXS50 pro Zelle um 87% und der Materialeinsatz in Volumen pro Zelle um 94% reduziert. Der Entwurf des Stacks wird mit der Skizze des Montagekonzepts und einer kritischen Bewertung vervollständigt.

Der entwickelte Stack TXS50 erfüllt alle Anforderungen, die an das System gestellt wurden, und ist auf einem Entwicklungsstand, welcher die grundsätzlichen Systemfunktionen gewährleistet. Jedoch war es im zeitlichen Rahmen dieser Masterarbeit nicht möglich, den Entwurf mit Spritzgussfertigern abzusprechen. Zudem wurde kein Prototyp gefertigt und getestet. Daher ist davon auszugehen, dass noch weitere Iterationen der Entwicklung folgen werden. In der Gesamtheit werden der Entwurf und die postulierten Verbesserungsansätze des Stacks abschließend als vielversprechende Grundlagen für die Entwicklung wettbewerbsfähiger und industriell skalierbarer Stacks tubulärer Redox-Flow-Batteriezellen bewertet.

Damit wird ein wichtiger Beitrag zum Forschungsprojekt TuRoX und dem Ziel der Etablierung tubulärer Redox-Flow-Batteriesysteme für ein zukunftsfähiges Energiesystem geleistet.

8 Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] Alotto P., Guarnieri M., Moro F.: Redox flow batteries for the storage of renewable energy: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*; 29: 325–335. 2014.
- [2] Arenas L. F., Ponce de León C., Walsh F. C.: Engineering aspects of the design, construction and performance of modular redox flow batteries for energy storage. *Journal of Energy Storage*; 11: 119–153. 2017.
- [3] Becker M., Turek T.: New Mass Transport Correlation for Vanadium Redox-Flow Batteries Based on a Model-Assisted Parameter Estimation. *Batteries*; 9: 253. 2023.
- [4] Bender B., Göhlich D., Dubbel H.: *Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau*, 26. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg; 2020.
- [5] Chemietechnik R.: PP-Chemieschlauch - Standard. <https://www.rct-online.de/de/schlaeuche/harte-kunststoffschlaeuche-kunststoffrohre/pp-schlaeuche/pp-chemieschlauch-standard>, Abruf am 06.11.2023.
- [6] Colthorpe A.: First phase of 800MWh world biggest flow battery commissioned in China. *Energy-Storage.News*. 21.07.2022.
- [7] Delgado N. M., Monteiro R., Cruz J., Bentien A., Mendes A.: Shunt currents in vanadium redox flow batteries – a parametric and optimization study. *Electrochimica Acta*; 403: 139667. 2022.
- [8] Durst F.: *Grundlagen der Strömungsmechanik. Eine Einführung in die Theorie der Strömung von Fluiden*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2006.
- [9] EM-Technik Hochwertige Verschraubungen | EM-Technik. <https://em-technik.com/produkte/schlaeuche/flexible-schlaeuche-1/pvc-schlaeuche/sl1pvw>, Abruf am 06.11.2023.
- [10] *HAW-Hamburg*: Forschungsprojekte Detail - TuRoX. <https://www.haw-hamburg.de/forschung/forschungsprojekte-detail/project/project/show/turox/>, Abruf am 07.11.2023.
- [11] *HAW-Hamburg*: Forschungsprojekte Detail - X-Energy. <https://www.haw-hamburg.de/forschung/forschungsprojekte-detail/project/project/show/x-energy/>, Abruf am 07.11.2023.
- [12] *Hubs*: Leitfaden: Spritzguss/Spritzgießen. <https://www.hubs.com/de/leitfaden/spritzgiessen/#design-for-injection-molding>, Abruf am 06.11.2023.
- [13] *IAS GmbH - M. Schmäh*: Daten zum Drucksensor im beheizten Anschlussblock HovaCAL D3214-SP; eMail. 12.04.2023.
- [14] *IPCC*: Synthesebericht - de-IPCC. <https://www.de-ipcc.de/358.php>, Abruf am 07.11.2023.
- [15] *JUMO GmbH & Co. KG*: JUMO MIDAS C08. <https://www.jumo.de/web/products/apps/productdetailpage?pdpld=401002>, Abruf am 28.10.2023.
- [16] Lourenssen K., Williams J., Ahmadpour F., Clemmer R., Tasnim S.: Vanadium redox flow batteries: A comprehensive review. *Journal of Energy Storage*; 25: 100844. 2019.

- [17] *Protolabs*: Grundlagen für den Kunststoff-Spritzguss. <https://www.protolabs.com/de-de/ressourcen/design-tipps/designgrundlagen-fur-den-spritzguss/>, Abruf am 06.11.2023.
- [18] Ressel S. P.: Tubular All Vanadium and Vanadium/Air Redox Flow Cells. Tubular All Vanadium and Vanadium/Air Redox Flow Cells; 2019.
- [19] *SGL Group*: Typical Felt Properties. IFBF 2014; 2014.
- [20] *Statista*: Weltweiter Energiemix nach Energieträger 2022 | Statista. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/167998/umfrage/weltweiter-energiemix-nach-energetraeger/>, Abruf am 07.11.2023.
- [21] *VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen*: VDI-Wärmeatlas. Mit 320 Tabellen, 11. Aufl. Berlin: Springer Vieweg; 2013.
- [22] *Wevo-Chemie GmbH*: Handbuch - Vergussfreundliches Konstruieren; 21.09.2023.
- [23] Wittel H., Spura C., Jannasch D.: Roloff/Matek Maschinenelemente, 25. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg; 2021.
- [24] Ye Q., Hu J., Cheng P., Ma Z.: Design trade-offs among shunt current, pumping loss and compactness in the piping system of a multi-stack vanadium flow battery. *Journal of Power Sources*; 296: 352–364. 2015.

Anhang A

A-1 Ausschnitt Datenblatt Druckmessumformer „Jumo Midas C08“ [15]

JUMO GmbH & Co. KG



Typenblatt 401002

Seite 2/10

Technische Daten

Allgemein

| | |
|-----------------------|---|
| Referenzbedingungen | DIN 16086 und DIN EN 60770 |
| Sensor | |
| Messprinzip | Dickschicht auf Keramikkörper (piezoresistiv) |
| zulässige Lastwechsel | > 10 Millionen, 0 bis 100 % Messbereich |
| Montagelage | beliebig |
| Kalibrationslage | Gerät senkrecht stehend, Prozessanschluss unten |

Messbereich und Genauigkeit

| Messbereich | Linearität ^a % MSP ^f | Genauigkeit bei | | | Langzeit- stabilität ^b % MSP pro Jahr | Überlast- barkeit ^c bar | Berst- druck bar | |
|------------------------------|---|-----------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|---|--|------------------------|------|
| | | 20 °C ^d % MSP | -10 bis +85 °C ^e % MSP | -20 bis +100 °C ^e % MSP | | | | |
| 0 bis 1,6 bar Relativdruck | 0,25 | 0,5 | 0,65 | 1 | 0,2 | 6 | 12 | |
| 0 bis 2,5 bar Relativdruck | | | | | | 6 | 12 | |
| 0 bis 4 bar Relativdruck | | 0,35 | 0,5 | | | | 12 | 25 |
| 0 bis 6 bar Relativdruck | | | | | | | 12 | 25 |
| 0 bis 10 bar Relativdruck | | | | | | | 20 | 38 |
| 0 bis 16 bar Relativdruck | | | | | | | 50 | 75 |
| 0 bis 25 bar Relativdruck | | | | | | | 50 | 75 |
| 0 bis 40 bar Relativdruck | | | | | | | 120 | 200 |
| 0 bis 60 bar Relativdruck | | | | | | | 120 | 200 |
| -1 bis +0,6 bar Relativdruck | | | | | | | 0,5 | 0,65 |
| -1 bis +1,5 bar Relativdruck | | 6 | 12 | | | | | |
| -1 bis +3 bar Relativdruck | | 0,35 | 0,5 | | | | 12 | 25 |
| -1 bis +5 bar Relativdruck | | | | | | | 12 | 25 |
| -1 bis +9 bar Relativdruck | | | | | | | 20 | 38 |
| -1 bis +15 bar Relativdruck | | | | | | | 50 | 75 |
| -1 bis +24 bar Relativdruck | | 50 | 75 | | | | 50 | 75 |

^a Linearität nach Grenzpunkteinstellung^b Referenzbedingungen EN 61298-1^c Alle Druckmessumformer sind vakuumfest.^d Beinhaltet: Linearität, Hysterese, Wiederholbarkeit, Abweichung Messbereichsanfangswert und Messbereichsendwert^e Beinhaltet: Linearität, Hysterese, Wiederholbarkeit, Abweichung Messbereichsanfangswert und Messbereichsendwert, thermischer Einfluss auf Messbereichsanfang und Messspanne^f MSP = Messspanne

A-2 Messroutine 1. Kalibrierung Drucksensoren

| Measurement Routine - Calibration Pressure-Sensor | | | |
|---|-------|---|---------|
| Objective_Measurement: Calibration of the pressure sensors | | | |
| Sensor 'Name' | | | |
| - | | | |
| Comment: Ref-Drücke: Dichtigkeit Umgebung etwa 1020 - 1070 - 1370 - 1670 - 1970 - umgebung end | | | |
| Measurement file name: | | | |
| Number | Step# | Set Parameters / goal | Remark |
| 0 | 0 | Start measurement in Zumo | |
| 1 | 1 | N2_2_s_ml_min from 0 to 80 - Colse Ventil | |
| 2 | 1 | wait till Volumenflow reaches constant minimum | |
| 3 | 2 | Enter Kommentar 'Dichtigkeit' - measure 30s | |
| 4 | 3 | N2_2_s_ml_min from 80 to 0 - open Ventil | |
| 5 | 3 | wait till preassure reaches constant minimum | |
| 6 | 4 | Kommentar 'Null_Ambient' - measure 30s | |
| 7 | 5 | N2_2_s_ml_min from 0 to 80 | |
| 8 | 5 | pl15_i_hPa = constant ~ 1070 hPa (manuell Ventil) | +5 hPa |
| 9 | 6 | Kommentar 'Punkt1_1070' - measure 30s | |
| 10 | 7 | Kommentar 'Anpassung' | |
| 11 | 7 | pl15_i_hPa = constant ~ 1370 hPa (manuell Ventil) | +10 hPa |
| 12 | 8 | Kommentar 'Punkt2_1370' - measure 30s | |
| 13 | 9 | Kommentar 'Anpassung' | |
| 14 | 9 | pl15_i_hPa = constant ~ 1670 hPa (manuell Ventil) | +10 hPa |
| 15 | 10 | Kommentar 'Punkt3_1670' - measure 30s | |
| 16 | 11 | Kommentar 'Anpassung' | |
| 17 | 11 | pl15_i_hPa = constant ~ 1970 hPa (manuell Ventil) | +10 hPa |
| 18 | 12 | Kommentar 'Punkt4_1970' - measure 30s | |
| 19 | 13 | N2_2_s_ml_min from 80 to 0 - open Ventil | |
| 20 | 13 | wait till preassure reaches constant minimum | |
| 21 | 14 | Kommentar 'Null_Ambient end' - measure 30s | |
| 22 | | end measurement in Zumo | |

A-3 Korrekturparameter der Drucksensoren aus zweiter Kalibrierung

| | P1 | P2 | P3 | P4 |
|-------------|--------|--------|--------|--------|
| x1 | 159,7 | 160,4 | 178,0 | 166,3 |
| X0 | -617,9 | -625,1 | -701,5 | -663,3 |
| R^2 | 0,998 | 0,997 | 0,994 | 0,999 |
| RMSE | 2,10 | 2,99 | 4,05 | 1,89 |

A-4 Report Viskositätsbestimmung mit Druckabfallzellen – Wasser & V3,5

| Water | | | V3,5 | | |
|------------|-------------|-------------------------------------|------------|-------------|------------------------------------|
| Schritt_VI | Schritt_pot | Set Parameters/Goal | Schritt_VI | Schritt_pot | Set Parameters/Goal |
| 1 | 0 | V_pump from 0,000000 to 32,000000 | 1 | 0 | V_pump from 0,000000 to 32,000000 |
| 2 | 0 | V_pump from 32,000000 to 120,000000 | 2 | 0 | V_pump from 32,000000 to 96,000000 |
| 3 | 0 | V_pump from 120,000000 to 0,000000 | 3 | 0 | V_pump from 96,000000 to 0,000000 |
| 4 | 0 | start Qtest | 4 | 0 | Start Qtest |
| 5 | 0 | V_pump from 0,000000 to 6,400000 | 5 | 0 | V_pump from 0,000000 to 6,400000 |
| 6 | 0 | V_pump from 6,400000 to 8,000000 | 6 | 0 | V_pump from 6,400000 to 8,000000 |
| 7 | 0 | V_pump from 8,000000 to 12,400000 | 7 | 0 | V_pump from 8,000000 to 12,400000 |
| 8 | 0 | V_pump from 12,400000 to 16,000000 | 8 | 0 | V_pump from 12,400000 to 16,000000 |
| 9 | 0 | V_pump from 16,000000 to 24,000000 | 9 | 0 | V_pump from 16,000000 to 24,000000 |
| 10 | 0 | V_pump from 24,000000 to 32,000000 | 10 | 0 | V_pump from 24,000000 to 32,000000 |
| 11 | 0 | V_pump from 32,000000 to 48,000000 | 11 | 0 | V_pump from 32,000000 to 48,000000 |
| 12 | 0 | V_pump from 48,000000 to 64,000000 | 12 | 0 | V_pump from 48,000000 to 64,000000 |
| 13 | 0 | V_pump from 64,000000 to 120,000000 | 13 | 0 | V_pump from 64,000000 to 96,000000 |
| 14 | 0 | V_pump from 120,000000 to 0,000000 | 14 | 0 | V_pump from 96,000000 to 0,000000 |

A-5 Berechnung der Reynoldszahlen zur Abgrenzung des Gültigkeitsbereichs von Darcy für die Druckabfallzelle

Geometrische Parameter

| | | |
|------------------------|----------|-------|
| Charak. Länge d_f | 9,00E-06 | m |
| Porosität ϵ_0 | 0,94 | |
| Kompression | 0,2789 | |
| Porosität ϵ | 0,9168 | |
| Außendurchm. D_a | 6,40E+00 | mm |
| Innendurchm. D_i | 5,03 | mm |
| Fläche | 1,23E-05 | m^2 |

Berechnung der Reynoldszahlen

| | | | | | | |
|---------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Vorg. Volumenstrom [ml/min] | 6,4 | 24 | 32 | 48 | 64 | 96 |
| Tats. Volumenstrom Wasser [m^3/s] | 1,19E-07 | 4,48E-07 | 5,97E-07 | 8,96E-07 | 1,19E-06 | 1,79E-06 |
| Re – Wasser | 1,20 | 4,51 | 6,02 | 9,03 | 12,04 | 18,06 |
| Tats. Volumenstrom V3,5 [m^3/s] | 1,12E-07 | 4,20E-07 | 5,60E-07 | 8,40E-07 | 1,12E-06 | 1,68E-06 |
| Re – V3,5 | 0,25 | 0,94 | 1,26 | 1,89 | 2,52 | 3,78 |

A-6 Messroutine Modul TXM1 mit Wasser

| 01) Q-Scan TXM1 Wasser | | | | |
|--|-------|--|---|----------------------|
| Pre-set Potentiostat Setting file used: | | | | |
| Test rig / test cell settings, connections and conditions: | | Module: TXM1 – Ser Modul P1: negativ/outer cell out P2: positiv/inner cell out P3: positiv/inner cell in P4: negativ/outer cell in | Pumps: $V = x \cdot 1$ ml/min Medium: Water Systemdruck: 76 hPa | |
| Measurement file name: | | 202307XX_Qtest_TXM1_Wasser | | |
| Number | STEP# | Set Parameters / Goal | Time /min | Remark/Notes/Changes |
| 0 | 0 | Start ZumoLab | | |
| 1 | 1 | flood system and Cell set pumps to $V = 32$ ml/min | | |
| 3 | 2 | set pumps to $V = 160$ ml/min | 1 | |
| 4 | 3 | set pumps to $V = 0$ ml/min | | |
| 5 | 4 | Comment: start Qtest | 2 | |
| 7 | 5 | set pumps to $V = 8$ ml/min | 2 | |
| 8 | 6 | set pumps to $V = 16$ ml/min | 2 | |
| 9 | 7 | set pumps to $V = 32$ ml/min | 2 | |
| 10 | 8 | set pumps to $V = 48$ ml/min | 2 | |
| 11 | 9 | set pumps to $V = 64$ ml/min | 2 | |
| 12 | 10 | set pumps to $V = 80$ ml/min | 2 | |
| 13 | 11 | set pumps to $V = 96$ ml/min | 2 | |
| 14 | 12 | set pumps to $V = 120$ ml/min | 2 | |
| 15 | 13 | set pumps to $V = 160$ ml/min | 2 | |
| 12 | 14 | set pumps to $V = 0$ ml/min | 2 | |
| 13 | 15 | Empty cell = set pumps to $V = -32$ ml/min | | |
| 14 | 16 | set pumps to $V = 0$ ml/min | | |
| 15 | | end ZumoLab | | |

A-7 Messroutine Modul TXM1 mit V3,5

| 02) Q-Scan TXM1 V3,5 | | | | |
|--|-------|--|---|----------------------|
| Pre-set Potentiostat Setting file used: | | | | |
| Test rig / test cell settings, connections and conditions: | | Module: TXM1 – Ser Modul P1: negativ/outer cell out P2: positiv/inner cell out P3: positiv/inner cell in P4: negativ/outer cell in | Pumps: V = x*1 ml/min Medium: Water Systemdruck: 76 hPa | |
| Measurement file name: | | 202307XX_Qtest_TXM1_Wasser | | |
| Number | STEP# | Set Parameters / Goal | Time /min | Remark/Notes/Changes |
| 0 | | Start Zumolab | | |
| 1 | 0 | flood system and Cell _ set pumps to V= 32 ml/min | | |
| 3 | 2 | set pumps to V = 160 ml/min | 1 | |
| 4 | 3 | set pumps to V = 0 ml/min | | |
| 5 | 4 | Comment: start Qtest | 2 | |
| 7 | 6 | set pumps to V = 8 ml/min | 2 | |
| 8 | 7 | set pumps to V = 16 ml/min | 2 | |
| 9 | 8 | set pumps to V = 32 ml/min | 2 | |
| 10 | 9 | set pumps to V = 48 ml/min | 2 | |
| 11 | 10 | set pumps to V = 64 ml/min | 2 | |
| 12 | 11 | set pumps to V = 80 ml/min | 2 | |
| 13 | 12 | set pumps to V = 96 ml/min | | |
| 14 | 14 | set pumps to V = 120 ml/min | | |
| 15 | | set pumps to V = 160 ml/min | | |
| 12 | 11 | set pumps to V = 0 ml/min | 2 | |
| 15 | | end Zumolab | | |

A-8 Messroutine TXM3 mit V3,5 und SoC50 und TXM2 mit SoC50

| 01) Q-Scan with SOC 50% | | | | |
|--|-------|---|---|----------------------|
| Pre-set Potentiostat Setting file used: | | OCV | | |
| Test rig / test cell settings, connections and conditions: | | Module TXM2 Connection Type: 5p P1: P2: S1: S2: | Pumps: V = 32 ml/min E _{ref} = 1,400 V E _{NO2} = V E _{NO3} = V SOC(EL) = 50% | |
| Measurement file name: | | 20230428_01_Q_Scan_SoC50 | | |
| Number | STEP# | Set Parameters / Goal | Time /min | Remark/Notes/Changes |
| 0 | 11 | Trigger out rising 2 sec | | |
| 1 | 11 | OCV for 3h , rec 1s | | |
| 1 | 12 | stop pumps for 3 min | | |
| 1 | 13 | set pumps to V = 8 ml/min for 3min | | |
| 1 | 14 | set pumps to V = 16 ml/min for 3min | | |
| 1 | 15 | set pumps to V = 32 ml/min for 3min | | |
| 1 | 16 | set pumps to V = 48 ml/min for 3min | | |
| 1 | 17 | set pumps to V = 64 ml/min for 3min | | |
| 1 | 18 | set pumps to V = 80 ml/min for 3min | | |
| 1 | 19 | set pumps to V = 96 ml/min for 3min | | |
| 1 | 20 | set pumps to V = 120 ml/min for 3min | | |
| 1 | 21 | set pumps to V = 80 ml/min | | |

A-9 Übersicht der Regressionsparameter der Basis-Modul-Messungen

| Ergebnis - Lineare Regressionen der Messpunkte | | | | | |
|--|--------|--------------------------------|-------------------------|----------------|-----------|
| Modul | Fluid | x ₁ [hPa/ml*min] | x ₀ [hPa] | R ² | T [°C] |
| TXM1 | Wasser | 0,141 | 14,045 | 0,956 | 26,71 |
| TXM1 | Wasser | 0,678 | 7,795 | 0,993 | 26,53 |
| TXM1 | V3,5 | 1,157 | 0,050 | 0,998 | 26,78 |
| TXM1 | V3,5 | 3,081 | 15,662 | 1,000 | 26,69 |
| TXM2 | Soc50 | 0,791 | 45,509 | 0,995 | 22,70 |
| TXM2 | SoC50 | 1,920 | 38,032 | 1,000 | 22,67 |
| TXM3 | V3,5 | 1,134 | 26,315 | 0,980 | 22,56 |
| TXM3 | V3,5 | 2,900 | 30,204 | 0,999 | 22,46 |
| TXM3 | Soc50 | 0,821 | 28,410 | 0,990 | 21,97 |
| TXM3 | SoC50 | 3,276 | 29,347 | 0,999 | 22,04 |

A-10 Messroutine Single Cell 1 mit Einzelmodul 1

| 01) Q-Scan Single Cell 1 | | | | |
|--|-------|---|---|------------------------------------|
| Pre-set Potentiostat Setting file used: | | | | |
| Test rig / test cell settings, connections and conditions: | | Module: Einzelmodul_1 P1: negativ/outer cell out P2: positiv/inner cell out P3: positiv/inner cell in P4: negativ/outer cell in | Pumps: V = x*1 ml/min Medium: Water Systemdruck: 76 hPa | |
| Measurement file name: | | 20230620_Qtest_SingleCell_1_TX-V-A-7 | | |
| Number | STEP# | Set Parameters / Goal | Time /min | Remark/Notes/Changes |
| 0 | 0 | Start Zumolab | | |
| 1 | 0 | flood system and Cell _ set pumps to V= 16 ml/min | | |
| 3 | 2 | set pumps to V = 32 ml/min | 1 | nicht _vereinzelt stationäre Blase |
| 4 | 3 | set pumps to V = 0 ml/min | | |
| 5 | 4 | Comment: start Qtest | 2 | |
| 7 | 6 | set pumps to V = 6,4 ml/min | 2 | |
| 8 | 7 | set pumps to V = 12,8 ml/min | 2 | |
| 9 | 8 | set pumps to V = 16 ml/min | 2 | |
| 10 | 9 | set pumps to V = 24 ml/min | 2 | |
| 11 | 10 | set pumps to V = 32 ml/min | 2 | okay |
| 12 | 11 | set pumps to V = 0 ml/min | 2 | |
| 13 | 12 | Empty cell = set pumps to V = -8 ml/min | | |
| 14 | 14 | set pumps to V = 0 ml/min | | okay |
| 15 | | end Zumolab | | |

A-11 Messroutine Single Cell 3 mit Einzelmodul 2

| 03) Q-Scan Single Cell 3 | | | | |
|--|-------|---|---|------------------------------------|
| Pre-set Potentiostat Setting file used: | | | | |
| Test rig / test cell settings, connections and conditions: | | Module: Einzelmodul_2 P1: negativ/inner cell out P2: positiv/outer cell out P3: positiv/outer cell in P4: negativ/inner cell in | Pumps: V = x*1 ml/min Medium: Water Systemdruck: 79 hPa | |
| Measurement file name: | | 20230621_Qtest_SingleCell_3_TX-V-A-13 | | |
| Number | STEP# | Set Parameters / Goal | Time /min | Remark/Notes/Changes |
| 0 | 0 | Start Zumolab | | |
| 1 | 1 | flood system and Cell _ set pumps to V= 16 ml/min | | Undicht 1/8 Stopfen Modul oben |
| 3 | 3 | set pumps to V = 32 ml/min | 1 | nicht _vereinzelt stationäre Blase |
| 4 | 4 | set pumps to V = 0 ml/min | | |
| 5 | 7 | Comment: start Qtest | 2 | |
| 7 | 8 | set pumps to V = 6,4 ml/min | 2 | |
| 8 | 9 | set pumps to V = 12,8 ml/min | 2 | |
| 9 | 10 | set pumps to V = 16 ml/min | 2 | |
| 10 | 11 | set pumps to V = 24 ml/min | 2 | |
| 11 | 12 | set pumps to V = 32 ml/min | 2 | ok |
| 12 | 13 | set pumps to V = 0 ml/min | 2 | |
| 13 | 14 | Empty cell = set pumps to V = -16 ml/min | | |
| 14 | 15 | set pumps to V = 0 ml/min | | |
| 15 | | end Zumolab | | |

A-12 Übersicht der Einzelzellmessungen und Ergebnisse

| Datum | Zelle | Bezeichnung | Messung Halbzelle | Druck [hPa] | Kommentar | Hyd.-W [1/m ³] |
|----------|-------|-------------|----------------------|----------------|-----------------|-------------------------------|
| 20230602 | SC 1 | TX-V-A-7 | positiv | -50 – 150 | Defekt P3 | |
| 20230602 | SC 1 | TX-V-A-7 | negativ | -50 – 150 | Negativer Druck | 3,01E+13 |
| 20230620 | SC 1 | TX-V-A-7 | positiv | 40 – 240 | | 5,19E+12 |
| 20230620 | SC 1 | TX-V-A-7 | negativ | 40 – 240 | | 3,27E+13 |
| 20230602 | SC 2 | TX-V-A-4 | positiv | -40 – 60 | Negativer Druck | 5,47E+12 |
| 20230602 | SC 2 | TX-V-A-4 | negativ | -40 – 60 | Defekt P3 | |
| 20230620 | SC 2 | TX-V-A-4 | positiv | 40 – 150 | | 5,74E+12 |
| 20230620 | SC 2 | TX-V-A-4 | negativ | 40 – 150 | | 1,52E+13 |

| | | | | | | |
|----------|------|-----------|---------|-----------|-----------------|----------|
| 20230602 | SC 3 | TX-V-A-13 | positiv | -40 – 150 | Defekt P3 | |
| 20230602 | SC 3 | TX-V-A-13 | negativ | -40 – 150 | Negativer Druck | 3,05E+13 |
| 20230620 | SC 3 | TX-V-A-13 | positiv | 40 – 200 | | 7,62E+12 |
| 20230620 | SC 3 | TX-V-A-13 | negativ | 40 – 200 | | 3,37E+13 |
| 20230602 | SC 4 | TX-V-A-12 | positiv | -40 – 80 | Negativer Druck | 5,89E+12 |
| 20230602 | SC 4 | TX-V-A-12 | negativ | -40 – 80 | Defekt P3 | |
| 20230620 | SC 4 | TX-V-A-12 | positiv | 40 – 180 | | 6,77E+12 |
| 20230620 | SC 4 | TX-V-A-12 | negativ | 40 – 180 | | 2,28E+13 |
| 20230602 | SC 5 | TX-V-A-6 | positiv | -40 – 100 | Defekt P3 | |
| 20230602 | SC 5 | TX-V-A-6 | negativ | -40 – 100 | Negativer Druck | 2,17E+13 |
| 20230620 | SC 5 | TX-V-A-6 | positiv | 40 – 160 | | 7,79E+12 |
| 20230620 | SC 5 | TX-V-A-6 | negativ | 40 – 160 | | 2,40E+13 |

A-13 Messroutine Beispiel Head Cell 1

| 01) Q-Scan HeadCell_1 | | | | | |
|--|-------|---|-----------|--|------------------------------------|
| Pre-set Potentiostat Setting file used: | | Module: Einzelmodul_1 P1: negativ/outer cell out P2: positiv/inner cell out P3: positiv/inner cell in P4: negativ/outer cell in | | Pumps: V = x*1 ml/min Medium: Water Überdruck: 75 hPa(76-78) | |
| Test rig / test cell settings, connections and conditions: | | | | | |
| Measurement file name: | | 20230615_Qtest_HeadCell_1 | | | |
| Number | STEP# | Set Parameters / Goal | Time /min | Remark/Notes/Changes | |
| | | open all tubes, insert all pipes in pump | | | |
| 0 | 0 | Start Zumolab | | | |
| 1 | 1 | flood system, set pumps to V= 180 ml/min | 1 | | kd_cEII tropft leicht aus oberen |
| 2 | 2 | set pumps to V = 360 ml/min | 1 | | ft leicht aus oberen Kopf |
| 3 | 3 | set pumps to V = 0 ml/min | | | Überdruck leicht undicht... Zel |
| 4 | | close pipes of outer cell, remove tubes of outer cell from pump | | | nten Undicht! Im Wasser steigen zw |
| 5 | 4 | Comment: start Qtest inner Cell | 2 | | System leer gelaufen |
| 6 | 5 | set pumps to V = 60 ml/min | 2 | | |
| 7 | 6 | set pumps to V = 120 ml/min | 2 | | |
| 9 | 8 | set pumps to V = 240 ml/min | 2 | | vereinzelt Tropfen ~5 |
| 11 | 10 | set pumps to V = 360 ml/min | 2 | | |
| 13 | 12 | set pumps to V = 480 ml/min | 2 | | ok, vereinzelt Tropfen |
| 14 | 13 | set pumps to V = 0 ml/min | | | |
| 15 | | close pipes of inner cell, switch tubes in pump, open outer cell | | | |
| 16 | 14 | Comment: start Qtest outer Cell | 2 | | system leer gelaufen |
| 17 | 15 | set pumps to V = 60 ml/min | 2 | | |
| 18 | 16 | set pumps to V = 120 ml/min | 2 | | |
| 20 | 18 | set pumps to V = 240 ml/min | 2 | | vereinzelt Tropfen |
| 22 | 20 | set pumps to V = 360 ml/min | 2 | | |
| 24 | 22 | set pumps to V = 480 ml/min | 2 | | ndicht sowohl oben ans auch un |
| 25 | 23 | set pumps to V = 0 ml/min | | | |
| 26 | 0 | end Zumolab | | | |

A-14 Berechnungs- und Ergebnistabelle Anteile der Köpfe am hydraulischen Widerstand der Zellen

| Betrachtung pro Zelle (durchschnittlich) | | | |
|--|-----------|-----------|-------------------|
| Fluid | Wasser | V3,5 | |
| Viskosität | 1,00E-03 | 4,00E-03 | Pas |
| Dichte | 9,98E+02 | 1350 | kg/m ³ |
| V. Zelle | 24 | 24 | ml/min |
| V. Zelle | 0,0000004 | 0,0000004 | m ³ /s |
| | | | |
| Z_Zellen_neg | 2,635E+13 | 2,635E+13 | 1/m ³ |
| Z_Zellen_pos | 6,35E+12 | 6,35E+12 | 1/m ³ |
| dP_Zellen_neg | 105,4 | 421,6 | hPa |
| dP_Zellen_pos | 25,4 | 101,7 | hPa |
| | | | |
| Z_qu_Köpfe | 1,08E+11 | 1,08E+11 | 1/m ⁴ |
| Z_lin_Köpfe | 1,29E+11 | 1,29E+11 | 1/m ³ |
| dP_Köpfe | 0,69 | 2,30 | hPa |
| Anteil neg | 0,7% | 0,5% | |
| Anteil pos | 2,7% | 2,3% | |

A-15 Report Ausschnitt zur Untersuchung der Modulplatten

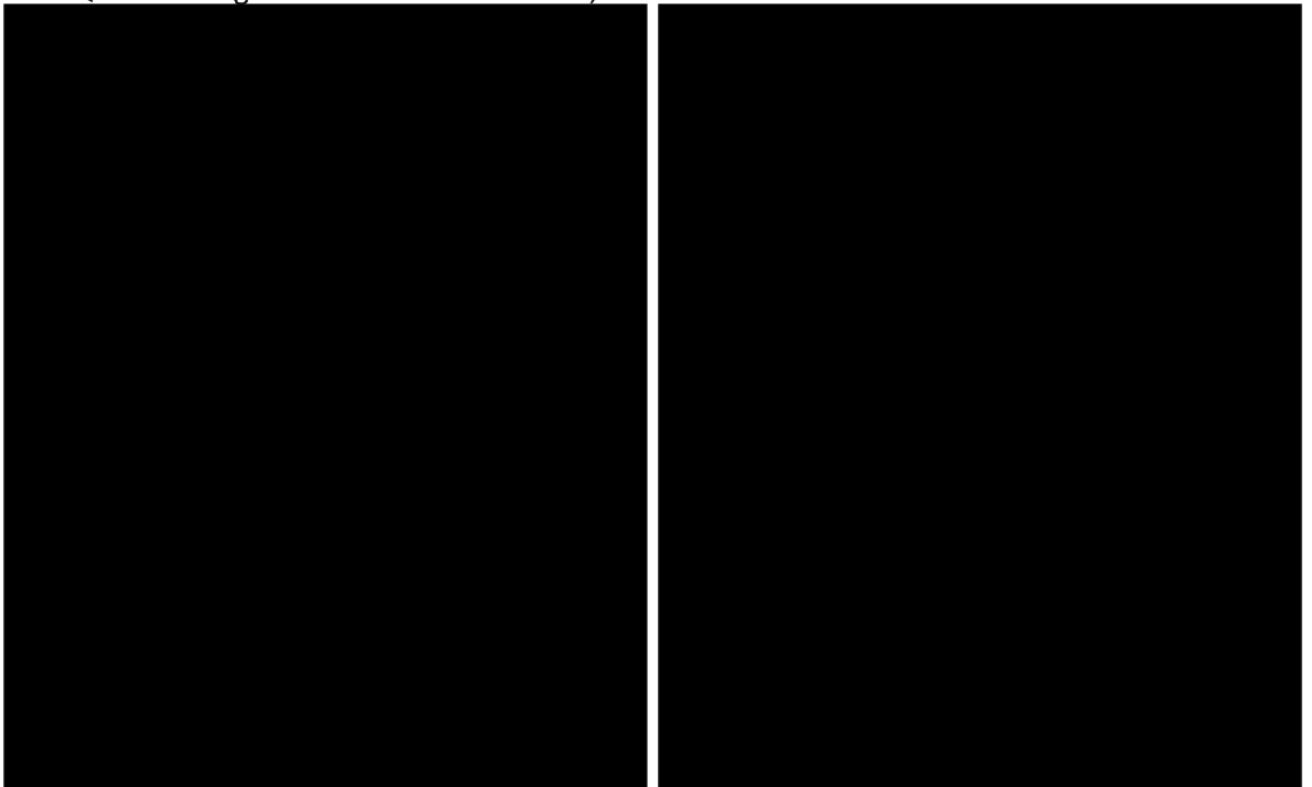
```

16      0      V_pump from 240,000000 to 60,000000
17      0      V_pump from 60,000000 to 120,000000
18      0      V_pump from 120,000000 to 180,000000
19      0      V_pump from 180,000000 to 240,000000
20      0      V_pump from 240,000000 to 300,000000
21      0      V_pump from 300,000000 to 360,000000
22      0      V_pump from 360,000000 to 420,000000
23      0      V_pump from 420,000000 to 480,000000
24      0      V_pump from 480,000000 to 240,000000
25      0      V_pump from 240,000000 to 120,000000
26      0      V_pump from 120,000000 to 60,000000
27      0      V_pump from 60,000000 to 0,000000
28      0      V_pump from 0,000000 to -60,000000
29      0      V_pump from -60,000000 to -180,000000
30      0      V_pump from -180,000000 to 0,000000
31      0      switch half cell...
32      0      pos side now connected
33      0      apply Ar Pressure
34      0      Ar press at flask between 75-80mbar
35      0      flood system
36      0      V_pump from 0,000000 to 120,000000
37      0      V_pump from 120,000000 to 240,000000
38      0      V_pump from 240,000000 to 480,000000
39      0      now begin measurement for pos. HC
40      0      V_pump from 480,000000 to 60,000000
41      0      V_pump from 60,000000 to 120,000000
42      0      V_pump from 120,000000 to 180,000000
43      0      V_pump from 180,000000 to 240,000000
44      0      V_pump from 240,000000 to 300,000000
45      0      V_pump from 300,000000 to 360,000000
46      0      V_pump from 360,000000 to 420,000000
47      0      V_pump from 420,000000 to 480,000000
48      0      V_pump from 480,000000 to 240,000000

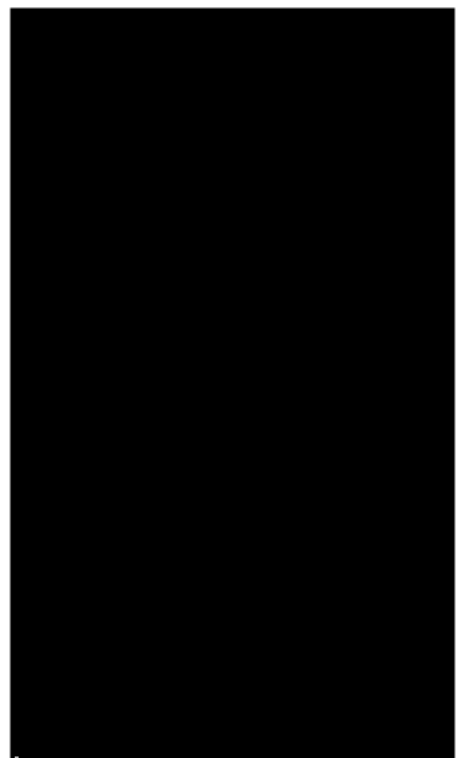
```

Anhang B

B-1 Querschnittsgeometrie: Modell IHC links; Modell-OHC- rechts



B-2 links: Modell IHC mit Einlauf unten; rechts: Modell-OHC mit Einlauf unten



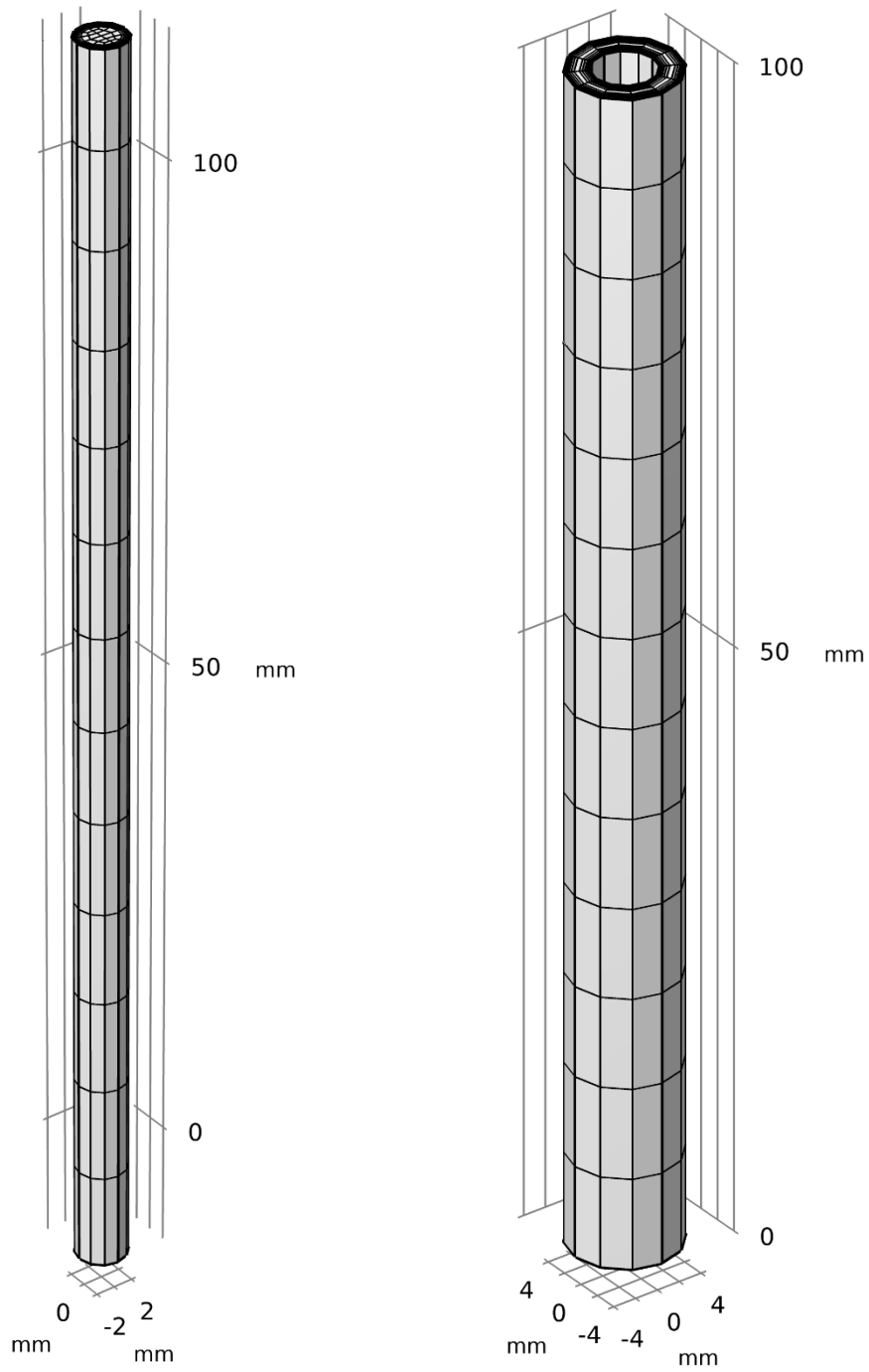
B-3 Modell der IHC – Ergebnisse des Parameter Sweeps der Eindringtiefe t_fifc

| t_fifc [mm] | P_FC_in [Pa] | V_FC out [m ³ /s] | V_Felt out [m ³ /s] | V.Felt/V.ges | Dyn.Viskosität [Pa*s] | V. Inlet [m ³ /s] | Z(t_fifc) [m ⁻³] | Z_Zelle(t_fifc) [m ⁻³] |
|-------------|--------------|------------------------------|--------------------------------|--------------|-----------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------------|
| 0,3 | 190 | 4,77E-08 | 2,49E-09 | 4,99% | 1,01E-03 | 5,00E-08 | 3,76E+12 | 4,70E+12 |
| 0,325 | 209 | 4,74E-08 | 2,77E-09 | 5,54% | 1,01E-03 | 5,00E-08 | 4,15E+12 | 5,18E+12 |
| 0,35 | 231 | 4,71E-08 | 3,08E-09 | 6,16% | 1,01E-03 | 5,00E-08 | 4,59E+12 | 5,73E+12 |
| 0,375 | 257 | 4,67E-08 | 3,44E-09 | 6,88% | 1,01E-03 | 5,00E-08 | 5,09E+12 | 6,37E+12 |
| 0,4 | 286 | 4,63E-08 | 3,86E-09 | 7,73% | 1,01E-03 | 5,00E-08 | 5,67E+12 | 7,09E+12 |
| 0,425 | 320 | 4,58E-08 | 4,35E-09 | 8,70% | 1,01E-03 | 5,00E-08 | 6,34E+12 | 7,93E+12 |
| 0,45 | 359 | 4,52E-08 | 4,92E-09 | 9,84% | 1,01E-03 | 5,00E-08 | 7,12E+12 | 8,90E+12 |

B-4 Modell der OHC – Ergebnisse des Parameter Sweeps der Eindringtiefe t_fifc

| t_fifc [mm] | P_FC_in [Pa] | V_FC out [m ³ /s] | V_Felt out [m ³ /s] | V.Felt/V.ges | Dyn.Viskosität [Pa*s] | V. Inlet [m ³ /s] | Z(t_fifc) [m ⁻³] | Z_Zelle(t_fifc) [m ⁻³] |
|-------------|--------------|------------------------------|--------------------------------|--------------|-----------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------------|
| 0,35 | 501 | 4,42E-08 | 6,01E-09 | 12,02% | 1,01E-03 | 5,00E-08 | 9,92E+12 | 1,24E+13 |
| 0,37 | 597 | 4,29E-08 | 7,25E-09 | 14,51% | 1,01E-03 | 5,00E-08 | 1,18E+13 | 1,48E+13 |
| 0,39 | 717 | 4,13E-08 | 8,84E-09 | 17,69% | 1,01E-03 | 5,00E-08 | 1,42E+13 | 1,78E+13 |
| 0,41 | 866 | 3,93E-08 | 1,08E-08 | 21,70% | 1,01E-03 | 5,00E-08 | 1,72E+13 | 2,15E+13 |
| 0,43 | 1051 | 3,68E-08 | 1,34E-08 | 26,80% | 1,01E-03 | 5,00E-08 | 2,08E+13 | 2,60E+13 |
| 0,45 | 1278 | 3,35E-08 | 1,66E-08 | 33,19% | 1,01E-03 | 5,00E-08 | 2,53E+13 | 3,16E+13 |

B-5 Vernetzte Geometrien der Dummy-Zellen: links IHC; rechts OHC



B-6 Ergebnistabelle Comsol Parametrisierung des IHC-Dummys

| κ_{DC} [m ²] | Druck [Pa] | Dyn. Viskosität [Pas] | V. Inlet [m ³ /s] | Z [1/m ³] | 1/ κ [1/m ²] |
|---------------------------------|------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| 8,00E-10 | 3400 | 1,01E-03 | 4,00E-07 | 8,42E+12 | 1,25E+09 |
| 9,00E-10 | 3027 | 1,01E-03 | 4,00E-07 | 7,50E+12 | 1,11E+09 |
| 1,00E-09 | 2728 | 1,01E-03 | 4,00E-07 | 6,76E+12 | 1,00E+09 |
| 1,10E-09 | 2484 | 1,01E-03 | 4,00E-07 | 6,15E+12 | 9,09E+08 |
| 1,20E-09 | 2280 | 1,01E-03 | 4,00E-07 | 5,65E+12 | 8,33E+08 |
| 1,30E-09 | 2107 | 1,01E-03 | 4,00E-07 | 5,22E+12 | 7,69E+08 |
| 1,40E-09 | 1959 | 1,01E-03 | 4,00E-07 | 4,85E+12 | 7,14E+08 |

B-7 Ergebnistabelle Comsol Parametrisierung des IHC-Dummys

| κ_{DC} [m ²] | Druck [Pa] | Dyn. Viskosität [Pas] | V. Inlet [m ³ /s] | Z [1/m ³] | 1/ κ [1/m ²] |
|---------------------------------|------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| 7,00E-11 | 14276 | 1,01E-03 | 4,00E-07 | 3,54E+13 | 1,43E+10 |
| 8,00E-11 | 12492 | 1,01E-03 | 4,00E-07 | 3,09E+13 | 1,25E+10 |
| 9,00E-11 | 11105 | 1,01E-03 | 4,00E-07 | 2,75E+13 | 1,11E+10 |
| 1,00E-10 | 9995 | 1,01E-03 | 4,00E-07 | 2,48E+13 | 1,00E+10 |
| 1,10E-10 | 9087 | 1,01E-03 | 4,00E-07 | 2,25E+13 | 9,09E+09 |
| 1,20E-10 | 8330 | 1,01E-03 | 4,00E-07 | 2,06E+13 | 8,33E+09 |
| 1,30E-10 | 7690 | 1,01E-03 | 4,00E-07 | 1,90E+13 | 7,69E+09 |
| 1,40E-10 | 7141 | 1,01E-03 | 4,00E-07 | 1,77E+13 | 7,14E+09 |
| 1,50E-10 | 6665 | 1,01E-03 | 4,00E-07 | 1,65E+13 | 6,67E+09 |
| 1,60E-10 | 6249 | 1,01E-03 | 4,00E-07 | 1,55E+13 | 6,25E+09 |
| 1,70E-10 | 5882 | 1,01E-03 | 4,00E-07 | 1,46E+13 | 5,88E+09 |

B-8 Parameter der Dummy-Zellen zur Abbildung der gemessenen Einzelzellen

| SingelCell | SC1 | SC2 | SC3 | SC4 | SC5 |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|
| hyd. Widerstand IHC [m ⁻³] | 5,19E+12 | 5,74E+12 | 7,62E+12 | 6,77E+12 | 7,79E+12 |
| Permeabilität IDC [m ²] | 1,31E-09 | 1,18E-09 | 8,85E-10 | 9,98E-10 | 8,65E-10 |
| hyd. Widerstand OHC [m ⁻³] | 3,27E+13 | 1,52E+13 | 3,37E+13 | 2,28E+13 | 2,40E+13 |
| Permeabilität ODC [m ²] | 7,56E-11 | 1,62E-10 | 7,34E-11 | 1,09E-10 | 1,03E-10 |

B-9 Ergebnistabelle des Volumeflow-Parameter-Sweeps des Kopfmodells

| V_in [ml/min] | Pressure [Pa] | Dyn. Viscosity [Pas] | Volumeflow Inlet [m ³ /s] |
|---------------|---------------|----------------------|--------------------------------------|
| 12,00 | 1,55E+01 | 1,01E-03 | 8,85E-08 |
| 24,00 | 4,13E+01 | 1,01E-03 | 1,77E-07 |
| 60,00 | 1,84E+02 | 1,01E-03 | 4,43E-07 |
| 90,00 | 3,77E+02 | 1,01E-03 | 6,64E-07 |
| 120,00 | 6,37E+02 | 1,01E-03 | 8,85E-07 |

B-10 Berechnungs- und Ergebnistabelle Anteile der Zellköpfe am hydraulischen Widerstand der Zellen nach Comsol-Modell

| Betrachtung pro Zelle (durchschnittlich) | | | |
|---|---------------|-------------|-------------------|
| | Wasser | V3,5 | Einheit |
| Viskosität | 1,00E-03 | 4,00E-03 | Pas |
| Dichte | 9,98E+02 | 1350 | kg/m ³ |
| V. Zelle | 24 | 24 | ml/min |
| V. Zelle | 0,0000004 | 0,0000004 | m ³ /s |
| Z_Zellen_neg | 2,635E+13 | 2,635E+13 | 1/m ³ |
| Z_Zellen_pos | 6,35E+12 | 6,35E+12 | 1/m ³ |
| dP_Zellen_neg | 105,4 | 421,6 | hPa |
| dP_Zellen_pos | 25,4 | 101,7 | hPa |
| Z_qu_Köpfe | 1,73E+11 | 1,73E+11 | 1/m ⁴ |
| Z_lin_Köpfe | 5,34E+10 | 5,34E+10 | 1/m ³ |
| dP_Köpfe | 0,49 | 1,23 | hPa |
| Anteil neg | 0,5% | 0,3% | |
| Anteil pos | 1,9% | 1,2% | |

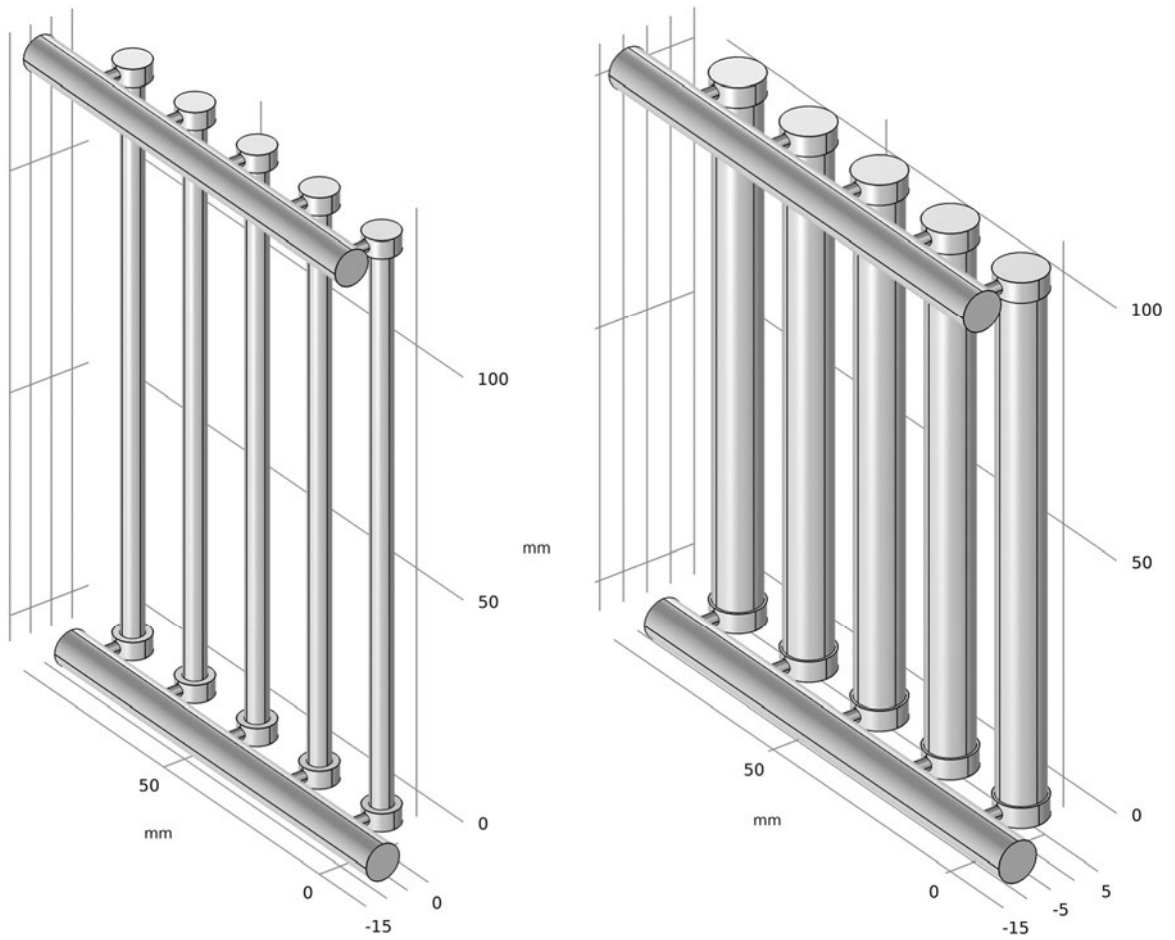
B-11 Ergebnistabelle des Volumeflow-Parameter-Sweeps des Modulplatten-Modells

| V_in [ml/min] | Pressure [Pa] | Dyn. Viscosity [Pas] | Volumeflow Inlet [m³/s] | Dichte [kg/m³] |
|--------------------------|--------------------------|---------------------------------|---|--------------------------------------|
| 12 | 0,014 | 1,01E-03 | 1,93E-07 | 998 |
| 24 | 0,033 | 1,01E-03 | 3,87E-07 | 998 |
| 60 | 0,128 | 1,01E-03 | 9,67E-07 | 998 |
| 90 | 0,252 | 1,01E-03 | 1,45E-06 | 998 |
| 120 | 0,420 | 1,01E-03 | 1,93E-06 | 998 |

B-12 Berechnungs- und Ergebnistabelle Anteile der Modulplatten am hydraulischen Widerstand des Basis-Modul nach Comsol-Modell

| Betrachtung 5er Modul | | | |
|------------------------------|---------------|-------------|-------------------|
| | Wasser | V3,5 | Einheit |
| Viskosität | 1,00E-03 | 4,00E-03 | Pas |
| Dichte | 9,98E+02 | 1350 | kg/m ³ |
| V. Modul | 120 | 120 | ml/min |
| V. Modul | 0,000002 | 0,000002 | m ³ /s |
| Z_Zellen_neg | 4,731E+12 | 4,731E+12 | 1/m ³ |
| Z_Zellen_pos | 1,29E+12 | 1,29E+12 | 1/m ³ |
| dP_Zellen_neg | 94,6 | 378,5 | hPa |
| dP_Zellen_pos | 25,8 | 103,2 | hPa |
| Z_qu_Modulplatte | 8,38E+09 | 8,38E+09 | 1/m ³ |
| Z_lin_Modulplatte | 4,06E+09 | 4,06E+09 | |
| dP_Modulplatten | 0,4 | 0,8 | hPa |
| Anteil neg | 0,4% | 0,2% | |
| Anteil pos | 1,6% | 0,8% | |

B-13 Geometrien der Modelle des Basis-Moduls: links IHC; rechts OHC



Anhang C

C-1 Kennzahlen der Basis-Moduls, der Zellköpfe und der Modulplatten

| System (Basis-Modul) | | | |
|----------------------|------|-----------------|----------------------------|
| Kennzahltyp | Wert | Einheit | Kommentar |
| Anzahl Zellen | 5 | Stk | |
| Anzahl Modulplatten | 2 | Stk | |
| Anzahl Fittings | 4 | Stk | |
| Anzahl Stopfen | 20 | Stk | |
| Gewicht | 1060 | g | Eingelagert mit Elektrolyt |
| Breite | 72 | mm | |
| Tiefe | 195 | mm | |
| Höhe | 150 | mm | zzgl. Kontaktierung |
| Bauraum | 2106 | cm ³ | |
| Bauraum/Zelle | 421 | cm ³ | |
| Leistung | 10 | W | |

| Zellköpfe pro Zelle | | | |
|-----------------------|-----------------|-----------------|-------------------|
| Kennzahltyp | Wert | Einheit | Kommentar |
| Material | Holstalen PP | | Genauere Kennung? |
| Materialeinsatz Teile | 3,74 | g | |
| Durchmesser | 15,6 | mm | |
| Höhe | 21,5 | mm | |
| Bauraum | 4,1 | cm ³ | |
| Vergussmasse | 1,23 | ml | Nach CAD |
| Einzelkomponenten | 6 | Stk | |
| Dichtringe | 3 | Stk | |
| Anteil Druckverlust | 3 | % | nach Messung |
| Anteil Druckverlust | 2 | % | nach Modell |

| Modulplatte – einzel | | | |
|----------------------|--------|-----------------|-------------------------------------|
| Kennzahltyp | Wert | Einheit | Kommentar |
| Material | PVDF | | |
| Materialeinsatz | 319,25 | g | |
| Breite | 59 | mm | |
| Tiefe | 134 | mm | |
| Höhe | 30 | mm | |
| Bauraum | 237 | cm ³ | |
| Vergussmasse | 0 | mm ³ | |
| Einzelkomponenten | 1 | Stk | |
| Dichtringe | 15 | Stk | |
| Anteil Druckverlust | 9 | % | nach Messung – Kombination aus zwei |
| Anteil Druckverlust | 2 | % | nach Modell – Kombination aus zwei |

C-2 Teilprobleme bzw. -aufgaben und Lösungsansätze

| Nr. | Aufgabe | Lösungsidee 1 | Lösungsidee 2 | Lösungsidee 3 | Lösungsidee 4 | Lösungsidee 5 | Lösungsidee 6 |
|-----|--|---|---|--|---|--|--|
| 1 | Gleichmäßige Versorgung der 8 Flowchannel der Halbzellen | Einleitung seitlich über 1 Zufluss und U Ausfluss | Einleitung seitlich über 1 Zufluss und Z Ausfluss | Einleitung seitlich über 2 Zuflüsse und 2 Ausflüsse | HZ befindet sich im versorgten Becken | Einleitung von oben über X Zuflüsse | Lösungsidee 6 |
| 2 | Gleichmäßige Versorgung der Halbzellen | Ein Manifold + Channel zu Zelle | Zelle stehen in einem Becken | Branch+ Manifold zu mehreren Zellen (Bündelung) | | | |
| 3 | Dichtung zwischen Halbzellen - Dichtfläche an Membran | Verpotten / Verguss | Anpressdichtung keine Anpressung durch nachgiebige Membran + Fertigungstoleranzen | Verkleben, Kapillarwirkung im Spalt nutzen - Fertigungstoleranzen und Nachgiebigkeit Membran | Auffächern/Stülpen der Membran Dichtfläche - Membran nicht widerstandsfähig und flexibel genug | Warmumformen der Membran oder Verschweißen - nicht praktikabel | |
| 4 | Dichtung HZ nach außen | Verpotten / Verguss | <i>Dichtring Radial zwischen Kopf und Modul + Dichtung Kopf-Zelle</i> | Flachdichtung zwischen Zelle und Modul (OHC) | Dichtring zwischen Zelle und Modul (OHC) | Äußerer Überdruck | Verkleben --> Kapillarwirkung im Spalt nutzen |
| 4,1 | Dichtung Zelle zu Kopfelement | Verpotten / Verguss | Verkleben --> Kapillarwirkung im Spalt nutzen | Flachdichtung Stirnseite OSS | Dichtring Seitenfläche OSS | Verschweißen (Bsp. Ultraschall) - Momentanes Material nicht geeignet | |
| 5 | Aufbau Modul / Trennung der Elektrolyte | Vollmaterial mit Getrennten Kanälen | Sandwich aus Halbschale mit Kanälen, Flachdichtung, Trennplatte, Dichtung, Halbschale mit Kanälen | Sandwich aus Halbschale mit Kanälen, Trennplatte aus Dichtmaterial, Halbschale mit Kanälen | Sandwich aus Deckplatte, Dichtung, doppelte Halbschale mit Kanälen, Dichtung, Deckplatte | Mischung: Einseitig Vollmaterial mit Kanälen und Halbschale + Deckplatte | Trennung vertikal entlang der Zellen nicht zwischen den Elektrolyt-Kreisläufen |

*Kursiv: Momentane Lösung im Basis-Modul; **rot**: Grund wodurch Lösung nicht anwendbar

Fortsetzung C-2 Teilprobleme bzw. -aufgaben und Lösungsansätze

| Nr. | Aufgabe | Lösungsidee 1 | Lösungsidee 2 | Lösungsidee 3 | Lösungsidee 4 | Lösungsidee 5 | Lösungsidee 6 |
|-----|--|---|--|---|---|--|---------------|
| 5.1 | Verbindung von Sandwich Teilen | Verpotten | Verschrauben - lösbar | Verkleben | Verschweißen | | |
| 6 | Anordnung der Zellen | <i>Linear, 1 oder mehrere Reihen, einzeln an Manifold</i> | In Paketen von 5-10 Stück in paralleler Versorgung, jeweils als Paket am Manifold angeschlossen. | Kreisförmige Anordnung in Paketen, Mittlerer Einlass mit sternförmiger Verteilung | Großer Block 5x10 mit Becken-Versorgung und Z Anschluss. | Zweigeschossig - Kontakte IHC nach außen, Versorgung von innen | |
| 6.1 | Ausrichtung Zellen | <i>Stehend</i> | liegend | Kreisförmig | | | |
| 7 | Anschlüsse | <i>1 Hauptanschluss pro HZ und Verteilung im Modul</i> | mehrere Anschlüsse pro HZ verteilt übers Stack | Anschluss Manifold OHC durch Modulplatte der IHC hindurch | | | |
| 8 | Realisierungsmöglichkeit von Interdigitated Flow | Versiegeln der Einlässe entsprechenden FC nach/während Produktion der Zelle | Versperrn der Einlässe entsprechenden FC durch Abdeckungen in der Kopf/Modul Geometrie | Verstopfen der Einlässe entsprechenden FC durch Stopfen in der Kopf/Modul Geometrie | Versperrn der Einlässe entsprechenden FC durch separate Stopfen | | |
| 9 | Elektrische Anschlüsse IHC - Draht | <i>Kontaktierung von oben - klemmen an Stromschiene</i> | freie Kontaktierung von oben - löten an Stromschiene | | | | |
| 10 | Elektrische Anschlüsse OHC - Kupfermantel | <i>Aufsteckkontakt zum Anklemmen einer Stromschiene / Kabel</i> | Aufsteckkontakt zum Löten einer Stromschiene / Kabel | Aufgelöteter Kontakt zum Anklemmen einer Stromschiene | Direkt verlötete Stromschiene | | |
| 11 | Sicherung der mechanischen Stabilität | <i>Durch Formschluss zwischen Zellen und Modulen</i> | Durch Stützstrukturen im Model | Durch externe Stützstrukturen | | | |

* Kursiv: Momentane Lösung im Basis-Modul; rot: Grund wodurch Lösung nicht anwendbar

C-3 Konzeptstudie „Konzept VV“ vereinigte Vertikale Trennung mit Verklebung der Komponenten



C-4 Quantitative Auswertung der Konzeptideen

| | Basis-Modul | Konzept DS | Konzept DV | Konzept Simon | Konzept VS | Konzept VV |
|---|-------------|------------|------------|---------------|------------|------------|
| Material MP [cm ³] | 182 | 72 | 528 | 70 | 78 | 220 |
| Anzahl Zellen | 5 | 10 | 50 | 48 | 10 | 50 |
| Material Kopf | 2 | 2 | 2 | 0,25 | 0 | 0,19 |
| Material MP pro Zelle [cm ³] | 38,4 | 9,2 | 12,6 | 1,7 | 7,8 | 4,59 |
| Vergussmasse pro Zelle [cm ³] | 1,2 | 1,2 | 1,2 | ~1,2? | ~1,2? | 3,07 |
| Bauraum pro Zelle [cm ³] | 421 | 131 | 87 | 35 | 131 | 37 |

C-5 Bewertungsmatrix Konzeptideen Stackentwicklung

Bewertung: Zahl von 1 (schlecht)

bis 5 (sehr gut)

1 Schlecht

2 eher schlecht

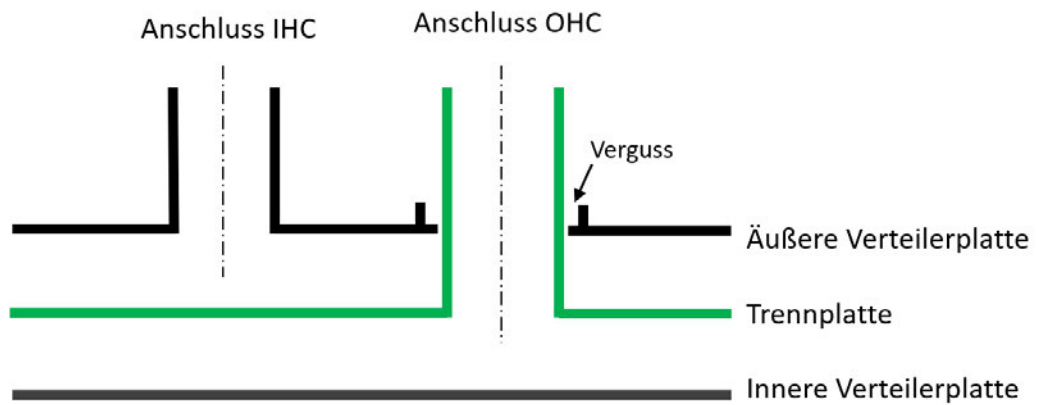
3 okay

4 gut

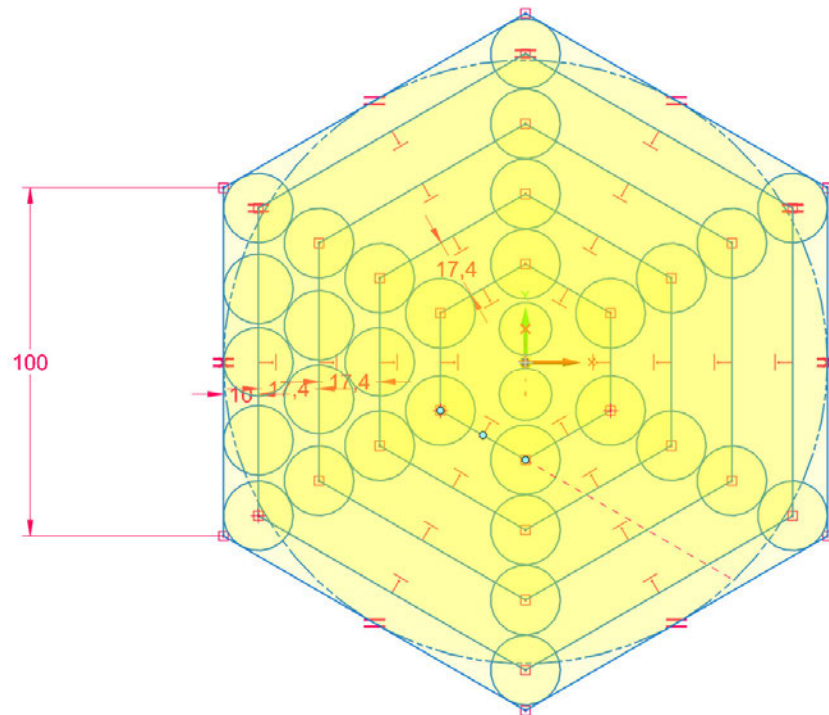
5 Sehr gut

| Nr. Bewertungs Kriterium | Gewichtung | Konzept | | | | | | | VV-Klebung |
|--------------------------------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
| | | StaTuR | DS | DV | Simon | VS | VV-Potting | VV-Klebung | |
| 1 Geringer Materialeinsatz MP | 2 | 1 | 4 | 3 | 4 | 4 | 4 | 3 | |
| 2 Geringer Materialeinsatz Köpfe | 2 | 2 | 2 | 2 | 4 | 5 | 3 | 2 | |
| 3 Geringer Materialeinsatz Pott | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 1 | 3 | |
| 4 Wenig zusätzliche Dichtelemente | 2 | 1 | 1 | 1 | 3 | 5 | 4 | 3 | |
| 5 Bauraum-Effizienz | 1 | 1 | 4 | 4 | 5 | 4 | 4 | 4 | |
| 6 Günstige Fertigbarkeit Kompo | 2 | 1 | 3 | 5 | 4 | 4 | 5 | 5 | |
| 7 Wenige Einzelkomponenten | 2 | 1 | 1 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | |
| 8 Einfache Montage Modul | 2 | 2 | 3 | 5 | 4 | 3 | 5 | 5 | |
| 9 Gute Skalierbarkeit | 1 | 1 | 3 | 5 | 3 | 3 | 5 | 5 | |
| 10 Flexibles Versorgungs-Design | 1 | 1 | 4 | 2 | 3 | 4 | 2 | 2 | |
| 11 Umsetzungssicherheit | 2 | 5 | 4 | 2 | 4 | 4 | 1 | 2 | |
| 12 Flexible elektrische Verschaltung | 1 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | |
| 13 Recyclebarkeit | 1 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 1 | |
| 14 Umsetzbarkeit Interdigitated | 1 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | |
| Bewertung | | 41 | 60 | 66 | 75 | 81 | 73 | 69 | |

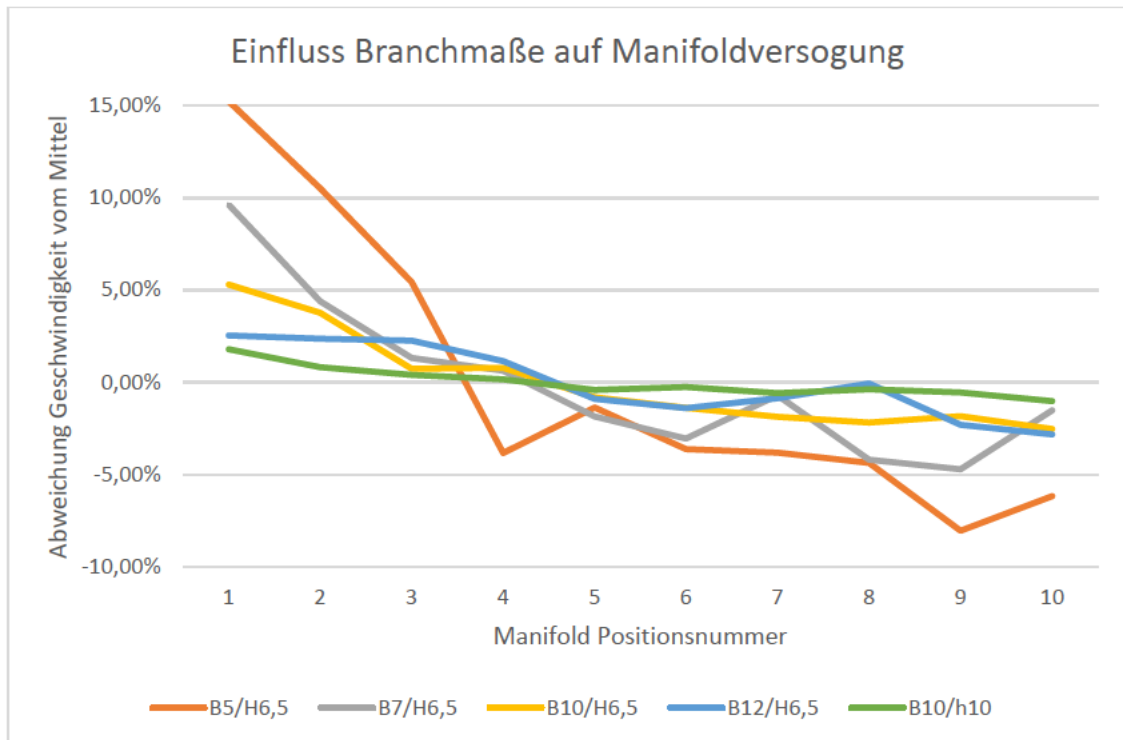
C-6 Skizze zum Durchbruch durch die äußere Verteilerplatte zum Anschluss der inneren Verteilerplatte



C-7 Studie zum Grundflächenbedarf der Zellanordnung im Hexagon



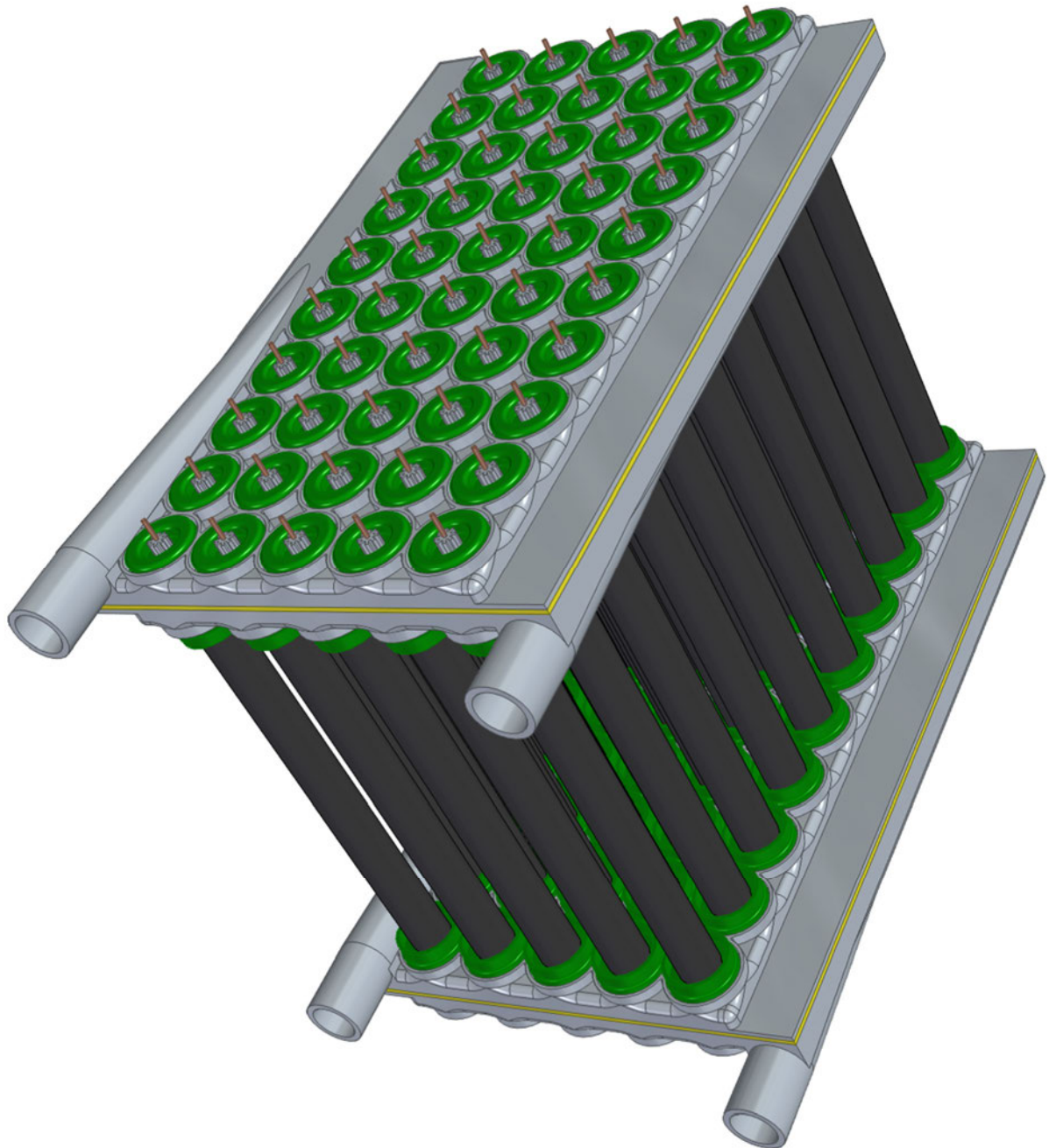
C-8 Strömungsverteilung in den Manifolds aus der Voruntersuchung der Branch-Maße



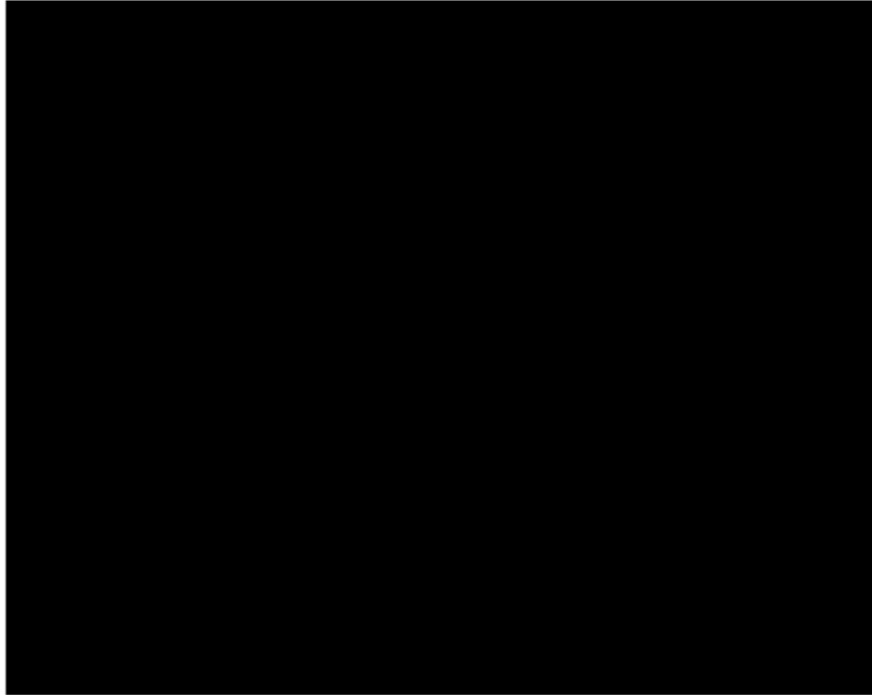
C-9 Ergebnis der Voruntersuchung des Branch: Anteil Druckverlust Branch IHC

| Breite [mm] | Höhe [mm] | Druck Inlet [Pa] | Dyn. Viskosität [Pas] | V. Inlet [m ³ /s] | Druck IHC 50 [Pa] | Druck Verteilung [Pa] | Anteil Verteilung |
|----------------|-----------|------------------|-----------------------|------------------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|
| 5 | 4 | 4014 | 1,01E-03 | -2,00E-05 | 2564 | 1450 | 36,13% |
| 5 | 6,5 | 3145 | 1,01E-03 | -2,00E-05 | 2564 | 581 | 18,48% |
| 7 | 6,5 | 2853 | 1,01E-03 | -2,00E-05 | 2564 | 290 | 10,15% |
| 10 | 6,5 | 2732 | 1,01E-03 | -2,00E-05 | 2564 | 168 | 6,14% |
| 12 | 6,5 | 2736 | 1,01E-03 | -2,00E-05 | 2564 | 173 | 6,31% |
| 10 | 10 | 2690 | 1,01E-03 | -2,00E-05 | 2564 | 127 | 4,71% |
| TXS Branch d10 | | 2595 | 1,01E-03 | -2,00E-05 | 2564 | 31 | 1,20% |
| TXS Branch d8 | | 2620 | 1,01E-03 | -2,00E-05 | 2564 | 56 | 2,14% |

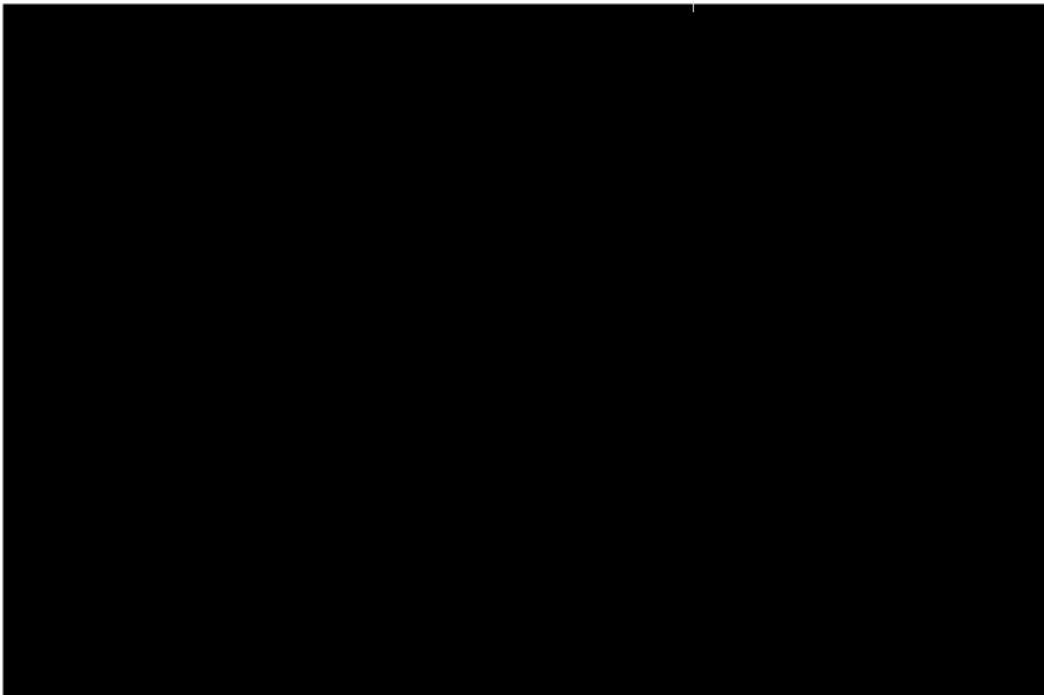
C-10 CAD-Modell finaler Stack TXS50



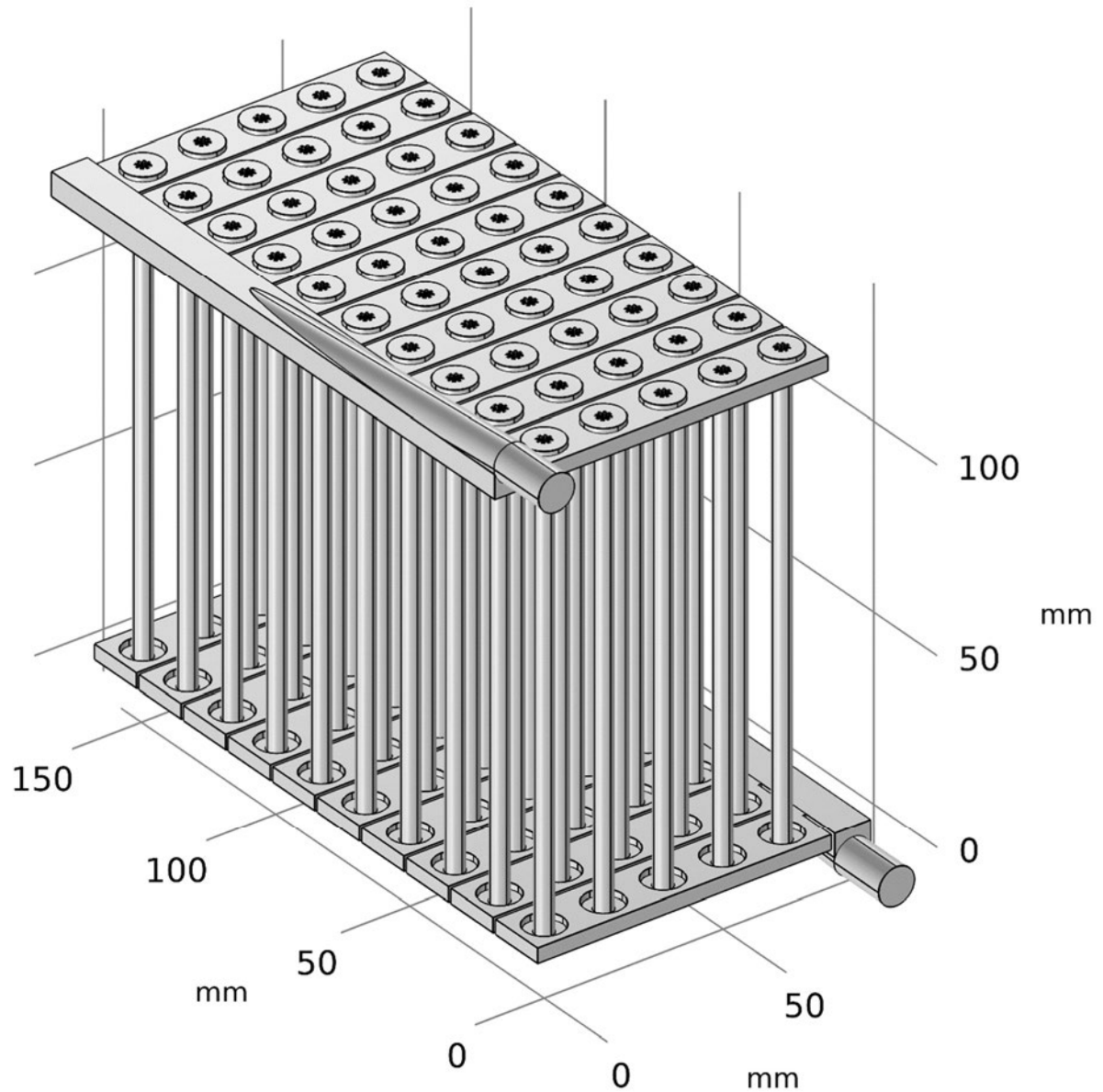
C-11 TXS50 Verteilerplatte mit eingelassenen Brach und Manifolds



C-12 TXS50 Trennplatte mit Durchlässen und Vergusskragen



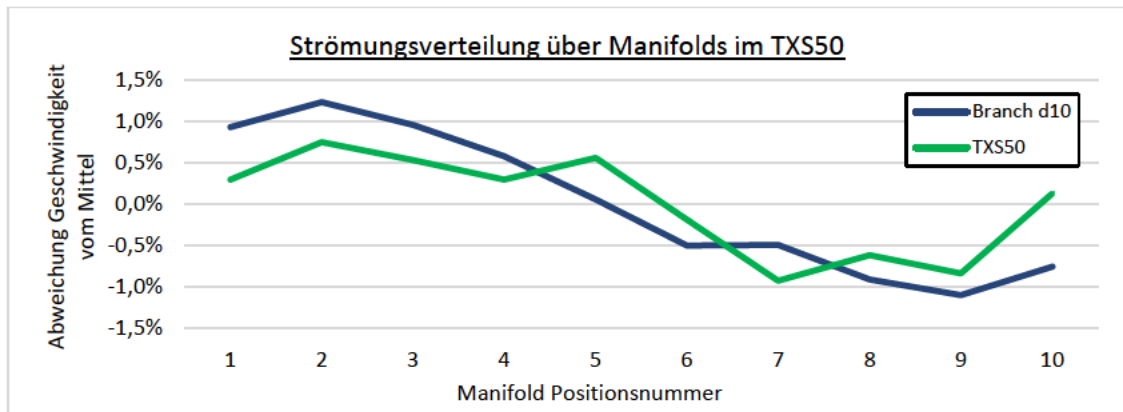
C-13 Comsol-Modell Hydraulik der inneren Halbzelleseite des TXS50



C-14 Modell TXS50 Auswertung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit im Ausgang der Manifolds zur Analyse der Strömungsverteilung

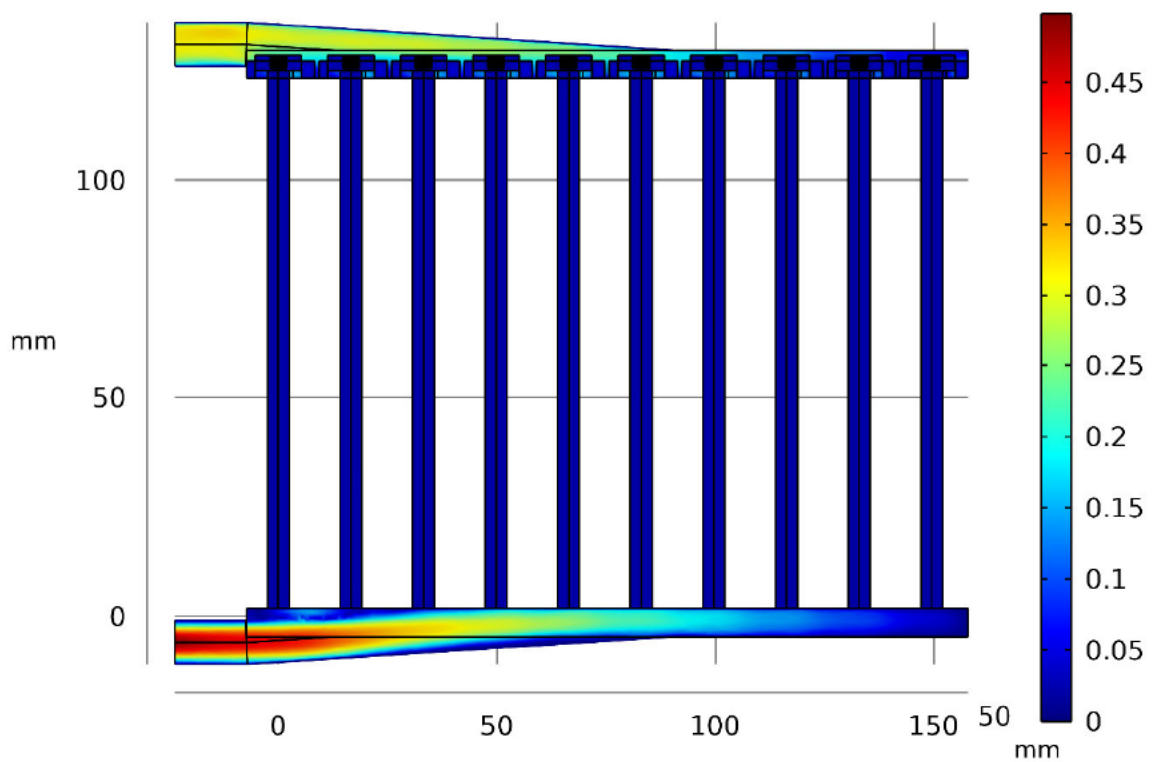
| | MF 1 | MF 2 | MF 3 | MF 4 | MF 5 | MF 6 | MF 7 | MF 8 | MF 9 | MF 10 |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Geschw. X10⁻² [m/s] | 9,64 | 9,68 | 9,66 | 9,64 | 9,67 | 9,59 | 9,52 | 9,55 | 9,53 | 9,62 |
| Abweichung | 0,30% | 0,75% | 0,53% | 0,30% | 0,56% | -0,19% | -0,92% | -0,62% | -0,84% | 0,13% |

C-15 Strömungsverteilung der Manifolds aus Modell TXS50

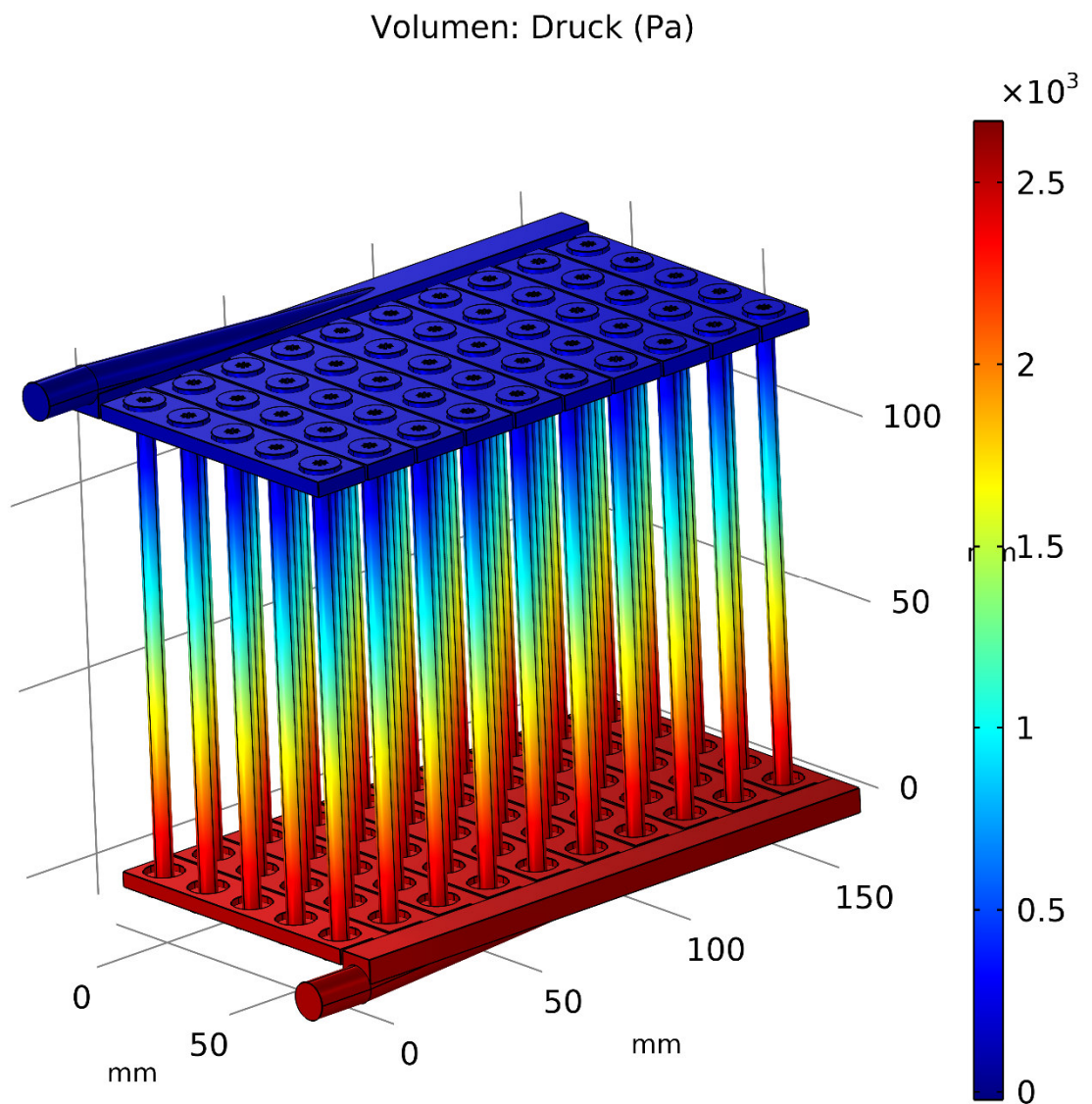


C-16 Graphische Darstellung der Strömungsgeschwindigkeiten im Modell TXS50 Seitansicht

Schnitt: Geschwindigkeitsbetrag (m/s)



C-17 Graphische Darstellung der Druckverteilung im Modell TXS50



C-18 Kennzahlen des Ziel-Moduls TXS50

| System (TXS50) | | | |
|---------------------|--------|-----------------|---------------------|
| Kennzahltyp | Wert | Einheit | Kommentar |
| Anzahl Zellen | 50 | Stk | |
| Anzahl Modulplatten | 6 | Stk | |
| Anzahl Fittinge | 0 | Stk | |
| Anzahl Stopfen | 0 | Stk | |
| Gewicht | | g | |
| Breite | 107,7 | mm | |
| Tiefe | 182,55 | mm | |
| Höhe | 138 | mm | zzgl. Kontaktierung |
| Bauraum | 2713 | cm ³ | |
| Bauraum/Zelle | 54 | cm ³ | |
| Leistung | 100 | W | |

| Zellköpfe pro Zelle | | | |
|-----------------------|-----------------|-----------------|----------------------|
| Kennzahltyp | Wert | Einheit | Kommentar |
| Material | Holstalen PP | | |
| Materialeinsatz Teile | 1,3 | g | |
| Durchmesser | 15,1 | mm | |
| Höhe | | mm | |
| Materialeinsatz Teile | 1,4 | cm ³ | |
| Vergussmasse | 1,11 | ml | Abschätzung nach CAD |
| Einzelkomponenten | 6 | Stk | |
| Dichtringe | 0 | Stk | |
| Anteil Druckverlust | | % | nach Messung |
| Anteil Druckverlust | | % | nach Modell |

| Versorgungsgeometrie einseitig | | | |
|--------------------------------|-------|-----------------|--------------|
| Kennzahltyp | Wert | Einheit | Kommentar |
| Material | PP | | |
| Materialeinsatz | 75,6 | g | |
| Materialeinsatz | 83,6 | cm ³ | nach CAD |
| Breite | 107,7 | mm | |
| Tiefe | 167,6 | mm | |
| Höhe | 29,2 | mm | |
| Bauraum | 527 | cm ³ | |
| Vergussmasse | 0 | mm ³ | |
| Einzelkomponenten | 3 | Stk | |
| Dichtringe | 0 | Stk | |
| Anteil Druckverlust | | % | nach Messung |
| Anteil Druckverlust | <2 | % | nach Modell |



Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name:

Vorname:

dass ich die vorliegende Masterarbeit bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Modellbasierte Entwicklung von Modulen für Stacks tubulärer Redox-Flow-Batteriezellen

ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der -bitte auswählen- ist erfolgt durch:

Ort

Datum

Unterschrift im Original