

## Kurzbeschreibung zum FuE-Vorhaben

Reg.-Nr.: 49VF210061

Kurztitel: PEMWEST

Laufzeit des Projekts vom: 01.04.2022

bis: 31.03.2025

### Name und Anschrift des Zuwendungsempfängers

Zentrum für Brennstoffzellentechnik ZBT GmbH  
Carl-Benz-Straße 201  
47057 Duisburg  
Deutschland

### Kurzfassung (Zielstellung, Ergebnisse)

In diesem Vorhaben soll ein modularer PEMWE-Stapel als Testplattform entwickelt werden, der die anwendungsnahe Charakterisierung und Testung unterschiedlicher Zellkomponenten ermöglicht. Die PEMWE-Testplattform sollte die folgenden Spezifikationen aufweisen:

- aktive Zellfläche von ca. 100 cm<sup>2</sup>
- Verwendung von mindestens 5 Einzelzellen
- Flexibilität in Bezug auf die einzusetzenden CCM und des Materials der Separatorplatten
- einfache Montage/Demontage des Stapels;
- Druckstabilität bis zu 35 bar

Mit diesen Spezifikationen soll die Testplattform sehr flexibel an bestehende und zukünftige variable Anforderungen aus der vorwettbewerblichen, anwendungsnahen, wissenschaftlichen Forschung und der Weiterentwicklung von Komponenten für die PEMWE angepasst werden.

Im Projektverlauf wurden nach einer Recherche und Spezifikationsphase zunächst zum Vortest von Flussfeldern, CCM-Materialien, Dichtungsgeometrien sowie additiv gefertigter Dichtrahmen kleinere Versuchsaufbauten realisiert, die der Thesensvalidierung für die Entwicklung des finalen Testplattform dienten. Diese wurde entsprechend den Zielsetzungen und validierten Konzeptthesen entwickelt, aufgebaut und getestet.

Dabei konnten alle Zielsetzungen - ausschließlich der Druckstabilität bis 35 bar - erreicht werden und eine sehr gute Performance bei 5 A cm<sup>-2</sup> nachgewiesen werden. Im Anschluss wurden Prüfprotokolle – insbesondere PEMWE Alterungsprotokolle (AST) – in der entwickelten Zelle erprobt und untersucht.

### Veröffentlichungen

- Power-to-X Symposium 2024, Aarhus (DK)

- ZBT-Wasserstofftage 2025, Duisburg (DE)
- Hannover Messe 2025, Hannover (DE)

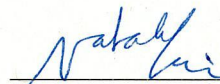
### Patentanmeldungen

keine

Duisburg  
(Ort)

30.09.2025  
(Datum)

Natalia Levin  
(Name Projektleiter)



(Rechtsverbindliche Unterschrift)

## Sachbericht (Schlussbericht)

zum Verwendungsnachweis zu FuE Vorhaben

Reg.-Nr.: 49VF210061

FuE-Einrichtung: Zentrum für BrennstoffzellenTechnik ZBT GmbH

Kurztitel: PEMWEST

Laufzeit des Projekts vom: 01.04.2022

bis: 31.03.2025



**Zentrum für BrennstoffzellenTechnik GmbH**

Carl-Benz-Straße 201 P +49 203 7598-0  
D-47057 Duisburg F +49 203 7598 2222  
www.zbt.de info@zbt.de

Natalia Levin (0203/7598-4282)  
(Name und Telefon Projektleiter)

Duisburg  
(Ort)

30.09.2025  
(Datum)

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Natalia Levin', written over a horizontal line.

(Rechtsverbindliche Unterschrift)

## 1) Technisch-technologische Zielstellung des Vorhabens

Im Rahmen dieses Vorhabens wurde eine modulare Protonen-Austausch-Membran-Wasserelektrolyse (PEMWE)-Testplattform mit einer aktiven Zellfläche von ca. 100 cm<sup>2</sup> entwickelt, die die anwendungsnahe Charakterisierung verschiedener Zellkomponenten im Stapelverbund ermöglicht. Der Stapel besteht aus bis zum fünf Einzelzellen mit separaten Spannungsabgriffen und bietet hohe Flexibilität hinsichtlich der eingesetzten Catalyst Coated Membranes (CCMs), Porous Transport Layers (PTLs) sowie Material und Beschichtung der Separatorplatten. Darüber hinaus erlaubt das anwenderfreundliches Zellkonzept den Betrieb unter erhöhtem Druck bis 35 bar bei einem Differenzdruck von bis zu 10 bar und unterstützt eine einfache Montage und Demontage.

## 2) Darstellung der erzielten Vorhabensergebnisse

### AP 1: Anforderungsprofil und Entwicklung des Stapelkonzepts

Hinsichtlich des Stapelkonzepts wurden zunächst Anforderungen an den zu entwickelnden Elektrolysestapel sowie technische Ansätze zur Umsetzung definiert (Tabelle 1).

Tabelle 1: Spezifikation / Konzeption für Zelldesign und Stapelkonzept [\*insbesondere Gegenstand der Thesensvalidierung]

| Allgemeine Angaben                         | Wert / These                                                                                 |
|--------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Elektrolyseart                             | H <sub>2</sub> O, PEM                                                                        |
| Aktive Fläche                              | 100 cm <sup>2</sup>                                                                          |
| <b>*A X B</b>                              | <b>tbd.</b>                                                                                  |
| max. Zellzahl                              | 5                                                                                            |
| Max. Spannung                              | 2,5 V                                                                                        |
| Max. Strom                                 | 600 A                                                                                        |
| Nennbetrieb Strom                          | 400 A                                                                                        |
| Min. Spannung                              | 1,48 V                                                                                       |
| Nennspannung                               | 2,0 V                                                                                        |
| Min. Strom                                 | 0A @ minimalem Durchfluss                                                                    |
| <b>Medienströme</b>                        |                                                                                              |
| <u>Anode, H<sub>2</sub>O+O<sub>2</sub></u> |                                                                                              |
| <b>*min/max. Druck (Niederdruckseite)</b>  | <b>atm / 35 barü</b>                                                                         |
| min/max. Temperatur                        | 45-80°C (90° für neue Materialien?)                                                          |
| M' _Reaktionswasser_ Nenn                  | 0,011 l/min                                                                                  |
| M' _Kühlwasser_ Nenn (dT = 2K)             | 7,46 l/min                                                                                   |
| <b>*dp_H<sub>2</sub>O</b>                  | <b>Abgleich mit Literaturwerten / Erfahrungswerten</b>                                       |
| V' _O <sub>2</sub> @ Nenn                  | 6,96 l/min                                                                                   |
| <u>Kathode, H<sub>2</sub></u>              |                                                                                              |
| <b>*min/max. Druck (Hochdruckseite)</b>    | <b>atm / 35 barü</b>                                                                         |
| min/max. Temperatur                        | 45-80°C (90° für neue Materialien?)                                                          |
| V' _H <sub>2</sub> _ Nenn                  | 13,95 l/min                                                                                  |
| Wasser- bzw. Feuchteanteil?                | Gas in Wasser (gelöst)                                                                       |
| dp_H <sub>2</sub>                          | Abgleich mit Literaturwerten / Erfahrungswerten                                              |
| <b>Mechanischer Aufbau</b>                 |                                                                                              |
| <b>*BPP / Flussfeld</b>                    | <b>einteilig, strukturierte Folie mit umgeformten Kanälen</b>                                |
| <b>*BPP-Substratmaterial</b>               | <b>Titan Gr. 1 / t = 0.2...0.3 mm</b>                                                        |
| <b>*Beschichtung</b>                       | <b>tbd. (Gegenstand von F&amp;E)</b>                                                         |
| <b>*CCM</b>                                | <b>tbd. (Gegenstand von F&amp;E)</b>                                                         |
| <b>*PTL, GDL</b>                           | <b>tbd. (Gegenstand von F&amp;E), min. Höhe 500 µm, wg. minimaler Aufbauhöhe Dichtrahmen</b> |
| Dichtung                                   | (1) Dispenserdichtung, (2) alternativ O-Ringe                                                |
| <b>*Dichtungsrahmen</b>                    | <b>PA12, Multi Jet Fusion (hp)</b>                                                           |
| Abmaße                                     | rechteckig                                                                                   |
| <b>*Erforderliche Verspannkraft</b>        | <b>tbd =&gt; Testaufbau</b>                                                                  |

Auf der Basis der Konzeption wurde ein Prototypendesign abgeleitet, mit dessen Hilfe spezifische Ansätze im Rahmen der Thesenvalidierung überprüft werden sollten.

Grundidee des Prototypendesigns (Abbildung 1) war es, die den konzeptionellen Aufbau betreffenden technischen Ansätze, insbesondere BPP-Substratmaterial, Dichtungslösung, Dichtrahmen und Integration von CCM und PTL, repräsentativ im kleinen Maßstab (hier 8 cm<sup>2</sup> aktive Fläche) abzubilden, um die Einzellösung vorab zu evaluieren. Der Prototyp bietet demnach die Möglichkeit zunächst rein mechanische Versuche hinsichtlich Verspannung, Dichtheit und Höhenabstimmung der Zellkomponenten zur Dichtung durchzuführen. Der Aufbau bot auch die Möglichkeit einzel- bzw. mehrzellige funktionale Aufbauten zu realisieren, um diesen bis zur In-Situ-Funktionalität zu überprüfen. Infolge von Verzögerungen im Projekt wurde keine Betriebsprüfung des Prototypendesigns zugunsten der Weiterentwicklung des größeren Designs durchgeführt. Performance-Tests mit zellaktiven Komponenten (z.B. CCM) wurden ersatzweise in vorhandenen Testzellen (bekannte CCM-Formate mit Referenzdaten) durchgeführt.

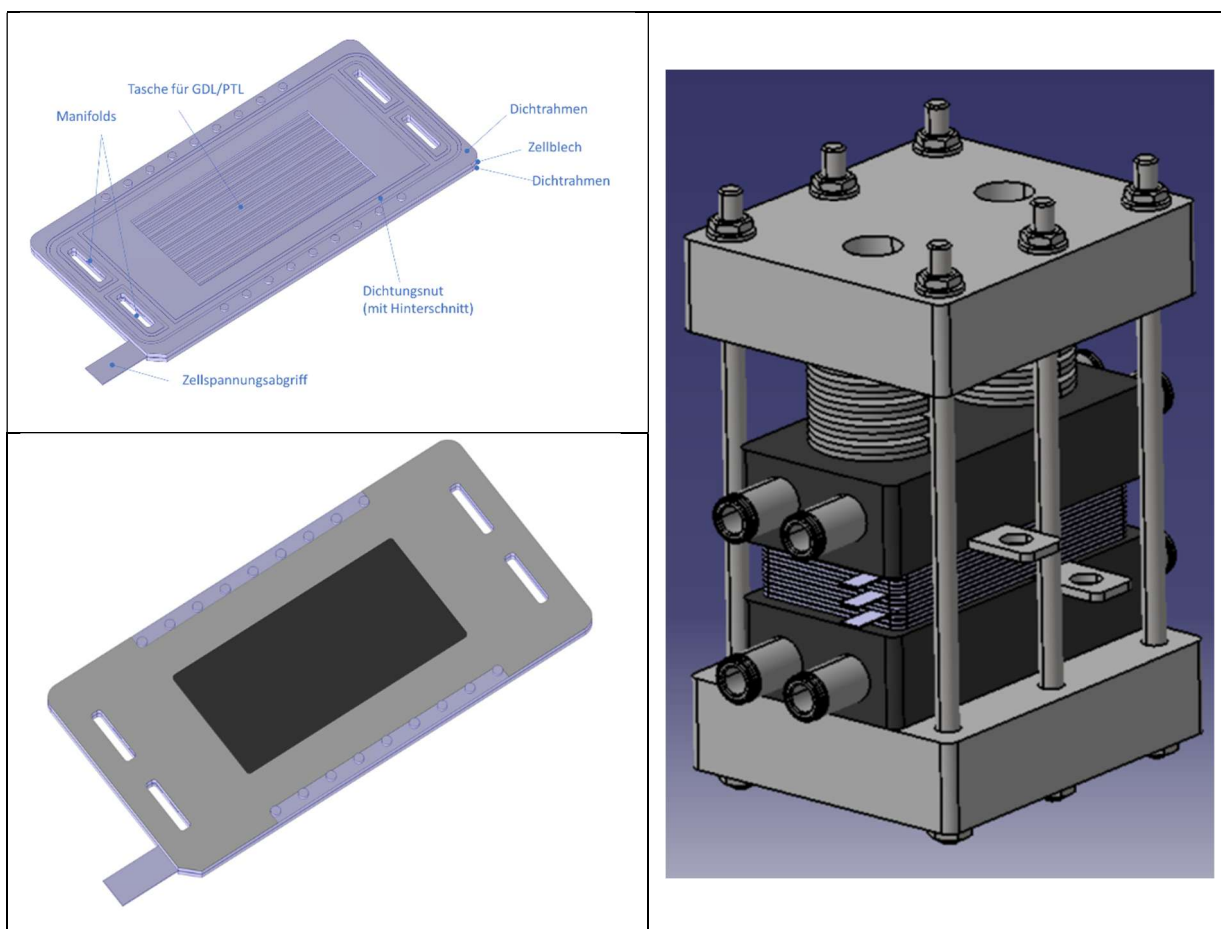


Abbildung 1: Prototypisches Zelldesign, Grundaufbau anodischer und kathodischer Dichtrahmen und Bipolarplatte (oben links), Prototypisches Zelldesign mit CCM (unten links), Stapel mit 4 Zellen (rechts).

### Umformung Separatorplatte

Für die Integration in das Prototypendesigns wurden entsprechende Zellbleche mit geraden und leicht gewellten Strömungskanälen entwickelt und bei der Firma Borit abgeformt. Die Kanalstrukturen ließen sich in den Blechstärken 200 µm, 250 µm und 300 µm gut abbilden (Abbildung 2).

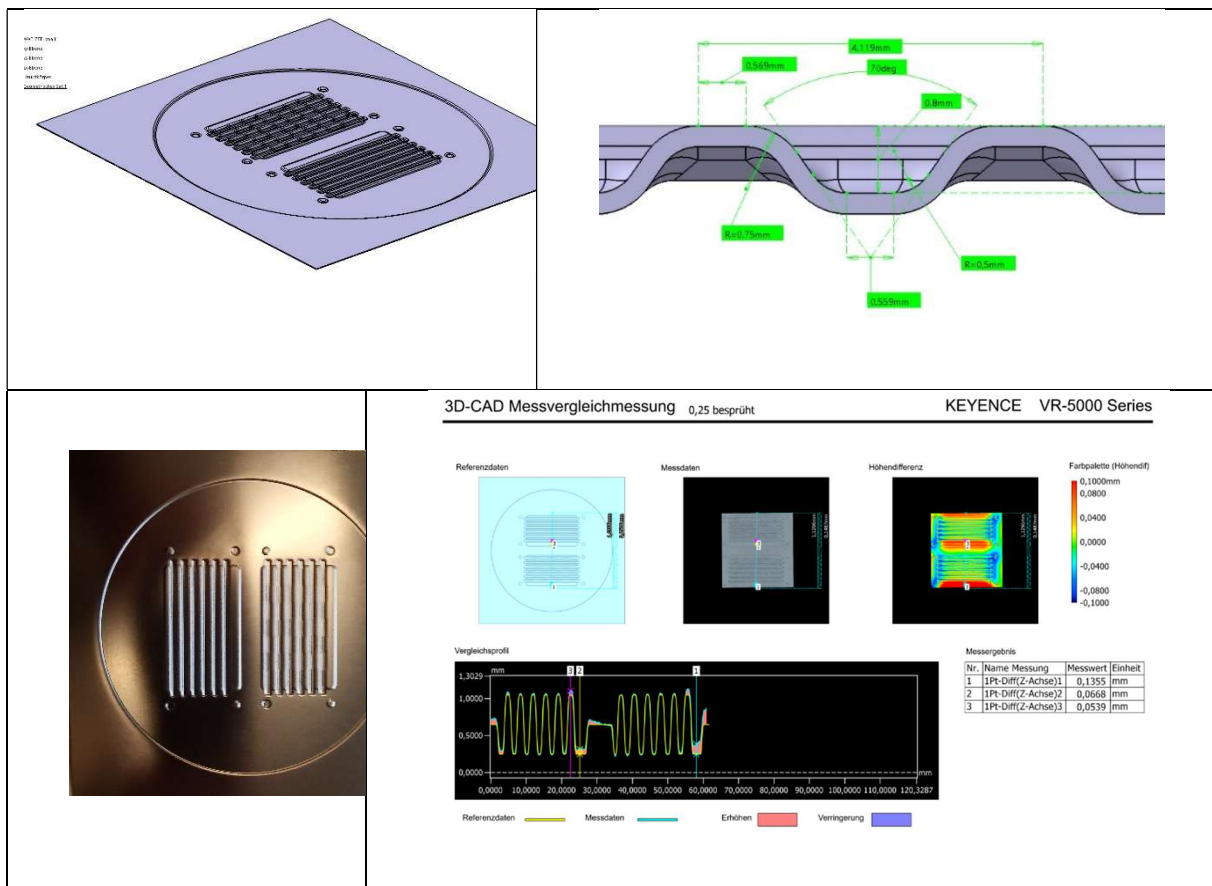


Abbildung 2: Modell der prototypischen Flussfelder (oben links), Kanal- und Stegquerschnitt (oben rechts), Umgeformte Platine aus 0,25 mm Titan Gr. 1 (unten links), Vermessung Höhenprofil der Platine im Abgleich mit dem CAD-Modell (unten rechts).

Auf Basis dieser Ergebnisse konnte die **These bezüglich der Kanalstrukturen in Titan Grade 1 und einer Substratstärke von 0,2-0,3 mm Stärke validiert** und der Entwurf der Kanalstrukturen für das größere Zellformat abgesichert werden.

### Flussfeld-Entwicklung

Im Bereich des Flussfeld (FF)-Designs wurden zwei gefräste Test-Flussfelder entwickelt und in Testhardware (balticFuelCells qCf FC5) integriert. Dazu wurden vier Bauteile aus Titan G2 extern gefertigt und bei einem weiteren Zulieferer platinisiert.

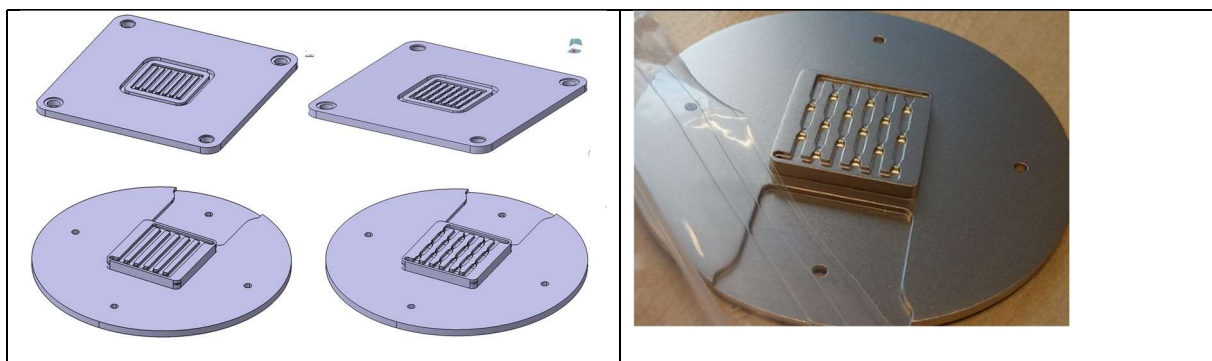


Abbildung 3: Modelle der FF-Testhardware (links), gefräster Zelleinsatz (rechts).

Hintergrund bei der Flussfeldauslegung war es u.a. analog zu entsprechenden Ansätzen aus der Brennstoffzelle Engstellen in Kanälen so alternierend einzubringen, dass durch den dynamischen Druckunterschied in benachbarten Kanälen eine Strömung über den Steg (durch die PTL/GDL) zu erzwingen und so die Versorgung der CCM zu verbessern. Dabei wurden Kanalbreite und Schlussbericht – PEMWEST

Stegbreite jedoch analog zu den Limitationen aus der Umformtechnik (Dehngrenze) eher breit gewählt, was im Vergleich mit frästechnisch generierten, feinen FF zunächst eine etwas schlechtere Druckverteilung in der CCM und geringere Performance hervorruft (Abbildung 4).

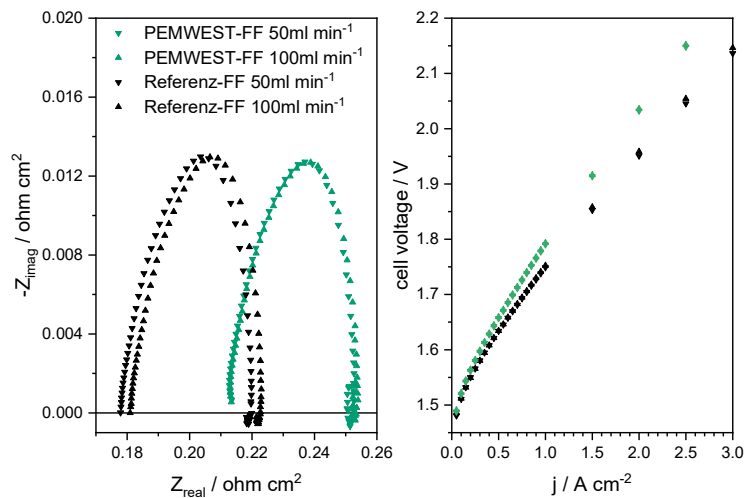


Abbildung 4: PEMWEST-FF vs. Referenz: Nyquist-Plot der elektrochemischen Impedanz-Messung (links), UI-Kennlinien (rechts).

Beide FF-Ansätze erbrachten im Test eine vergleichbare Leistung, jeweils unter der feiner strukturierten Referenz-Geometrie, sodass in diesem Versuch nur **die prinzipielle Eignung der breiteren Strukturen festgestellt** aber keine Aussage einer optimierten Performance im Allgemeinen oder einen spezifischen Unterschied der gewählten Ansätze (gerade Kanäle vs. Anhebungen) getroffen werden konnte. Letzteres ist sehr wahrscheinlich auf die sehr kleine Testfläche (5 cm<sup>2</sup>) in dieser Testreihe zurückzuführen, da der beabsichtigte Effekt auf der kurzen Lauflänge nicht zum Tragen kam.

### PTL-Benchmark

Die elektrische Leitfähigkeit der PTL ist ebenso wie ihre Porosität ein wichtiger Parameter. Je geringer der Widerstand ist, der durch Zellkomponenten verursacht wird, desto höher liegt die Effizienz des Elektrolyseurs.

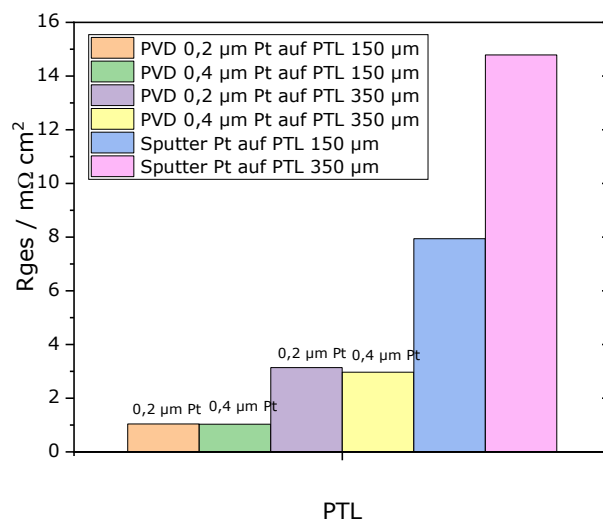


Abbildung 5: Untersuchung des elektrischen Widerstandes verschiedener PTL.

Um diesen Parameter gezielt zu verbessern, wurden Standard Ti-PTL platinisiert. Hierzu wurden Magnetronspütern, physikalische Gasphasenabscheidung und Galvanobeschichtung als Verfahren evaluiert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5 dargestellt.

Es konnte klar gezeigt werden, dass mittels Galvanoabscheidung hergestellte Beschichtungen den Widerstand am effektivsten senken. Dies wurde auf den nicht gerichtete Auftragsprozess zurückgeführt, der eine homogene Beschichtung der PTL von allen Seiten gewährleistet.

**Daraufhin wurden elektrische und mechanische Kenndaten von kommerziellen PTL mit galvanischer Pt-Beschichtung für die Auslegung des Zellstapels analysiert.** Ein Produkt der Firma Bekaert wurde ausgewählt.

### CCM-Benchmark

Für die CCM wurden zwei Hersteller (Japan und China) gewählt, die konfektionierte CCM liefern können, als Einzelzelle mit 25 cm<sup>2</sup> getestet und hinsichtlich ihrer Performance miteinander verglichen (Abbildung 6). Dazu wurden sie zunächst wie vom Hersteller empfohlen bei den Betriebsbedingungen 60 °C und einem Volumenstrom von 250 mL min<sup>-1</sup> konditioniert.

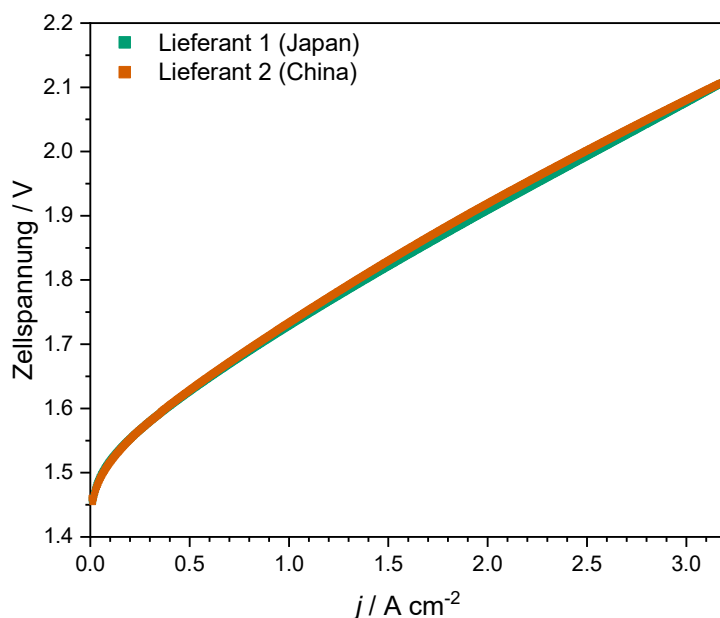


Abbildung 6: UI-Kennlinien der getesteten CCM.

Die Leistungskennlinien waren nahezu identisch, jedoch zeichneten sich die chinesischen CCM durch einen deutlich geringeren Preis und kürzere Lieferzeiten aus und darüber hinaus konnten die Produkte mit einem Subgasket (nicht-aktiver Schutzrand) ausgestattet werden, was den Aufbau erheblich sicherer und einfacher macht. **Daher wurde für die weitere Entwicklung die CCM des chinesischen Herstellers ausgewählt.**

### Dichtrahmen

Für die Dichtrahmen wurde zunächst ein additiver Fertigungsansatz Multi-Jet-Fusion / PA12) getestet, da dieser potenziell im Hinblick auf eine spätere Integration von Zellkomponenten mit variierender Materialstärke eine höhere Flexibilität versprach. Im Hinblick auf H<sub>2</sub>-Dichtheit und zusammen mit höheren Wandstärken, waren in anderen Arbeitsgruppen des ZBT durchaus positive Ergebnisse mit diesem Ansatz erzielt worden. Aufgrund der herausfordernden, geringen Restwandstärke der Bauteile, Schlussbericht – PEMWEST

wiesen diese eine zu hohe Verschüsselung, Rauheit und keine H<sub>2</sub>-Dichtheit auf. **Im weiteren Verlauf wurde frästechnisch erzeugte Polyetheretherketon (PEEK)-Rahmen als valide Lösung festgelegt** (Abbildung 7). Dieses Material wird laut einschlägiger Zulieferer für Dichtrahmen am Markt eingesetzt, ist gut verfügbar in den geforderten Materialstärken (~1 mm) und konnte aufgrund früherer Fräserfahrungen am ZBT mit einer hohen Präzision bearbeitet werden.

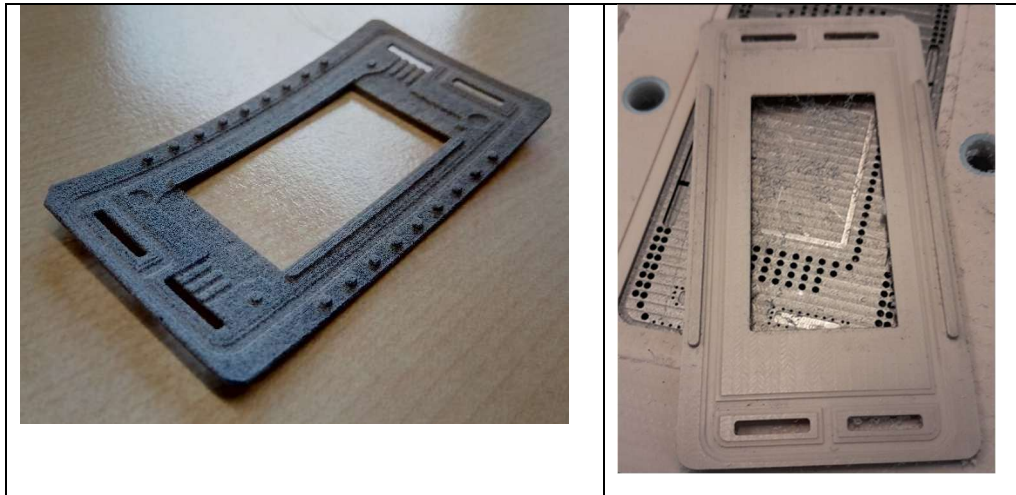


Abbildung 7: Additiv gedruckte Dichtrahmen (links), gefräste Dichtrahmen (rechts).

### Dichtungen

Es wurden auf den kleinen, gefrästen Dichtrahmen in entsprechend optimierte Nutstrukturen auch silikonbasierte Dichtungen per Dispenser aufgebracht. Die Entwicklung des Prozesses, sowie die Dichtungsgeometrie, zeigten sich insbesondere hinsichtlich des vollständigen Verpressens in die Nut als herausfordernd. Daher sollte im Bereich der Dichtungstechnik im weiteren Verlauf des Projektes (Testzellstapel) zunächst auf konventionelle O-Ring-Dichtungen zurückgegriffen werden, gegenüber einem Dispenser-basierten Ansatz für die kleine Testzelle. Grund hierfür sind die größere Materialflexibilität und das marktseitige Feedback eher Fluorkautschuk (FKM) oder Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuken (EPDM) zu verwenden.

### Strömung und Druckverlust

Für die weitere Auslegung eines Flussfelds für den großen Zellstapel wurden größere Zellformate hinsichtlich ihres Druckverlustes auf der Anodenseite (Wasser) analysiert. Dies sollte Aufschluss darüber geben, wie Druckverlust und Strömungsgeschwindigkeit ausgelegt werden müssen, um Gasblasen bei hoher Gasentwicklung auszutragen und die Zugänglichkeit der Reaktionszone für das nachströmende Wasser zu gewährleisten. Es zeigte sich dabei ein großer Korridor an Druckverlusten bezogen auf die aktive Fläche und den Wasserdurchfluss, was vermutlich auf die hohe Vielfalt an Zellkonzepten (mit FF, ohne FF, Einsatz von Streckmetall, Lochblechen, kombiniert mit PTL, gradierte PTL, etc.) und sehr unterschiedlichen TRL am Markt widerspiegelt. Dennoch konnte aus dieser Untersuchung eine Orientierung für die Strömungsauslegung gewonnen werden (300-600 mbar bei 2-4 A cm<sup>-2</sup>), die in die weitere Auslegung des Flussfeldes für die Testzelle einfließt. Auf der Basis der Vorversuche in AP 1 konnten die Spezifikationen für die Teststapel-Entwicklung detailliert und wichtige Entscheidungen zum Konzept getroffen werden (Tabelle 2).

Tabelle 2: Spezifikation / Konzeption für Zelldesign und Stapelkonzept (\*weiterhin offen) (\*\*festgelegt / validiert).

| Allgemeine Angaben                         | Wert / These                                                                                | Wert / Festlegung für 100cm <sup>2</sup> Plattform                                   |
|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Elektrolyseart                             | H <sub>2</sub> O, PEM                                                                       | H <sub>2</sub> O, PEM                                                                |
| Aktive Fläche                              | 100 cm <sup>2</sup>                                                                         | 100 cm <sup>2</sup>                                                                  |
| <b>*A X B</b>                              | <b>tbd.</b>                                                                                 | <b>tbd.</b>                                                                          |
| max. Zellzahl                              | 5                                                                                           | 5                                                                                    |
| Max. Spannung                              | 2,5 V                                                                                       | 2,2 V                                                                                |
| Max. Strom                                 | 600 A                                                                                       | 400 A                                                                                |
| Nennbetrieb Strom                          | 400 A                                                                                       | 400 A                                                                                |
| Min. Spannung                              | 1,48 V                                                                                      | 1,48 V                                                                               |
| Nennspannung                               | 2,0 V                                                                                       | 2,0 V                                                                                |
| Min. Strom                                 | 0 A @ minimalem Durchfluss                                                                  | 0 A @ minimalem Durchfluss                                                           |
| <b>Medienströme</b>                        |                                                                                             |                                                                                      |
| <u>Anode, H<sub>2</sub>O+O<sub>2</sub></u> |                                                                                             |                                                                                      |
| <b>*min/max. Druck (Niederdruckseite)</b>  | <b>atm / 35 barü</b>                                                                        | <b>atm / 35 barü</b>                                                                 |
| min/max. Temperatur                        | 45-80°C (90° für neue Materialien?)                                                         | 45-80°C (90° für neue Materialien?)                                                  |
| M' _Reaktionswasser_Nenn                   | 0,011 l/min                                                                                 | 0,46...0,94 l/min @ 2 - 4 A/cm <sup>2</sup> (pro Zelle)                              |
| M' _Kühlwasser_Nenn (dT = 2K)              | 7,46 l/min                                                                                  |                                                                                      |
| <b>*dp_H2O</b>                             | <b>Abgleich mit Literaturwerten / Erfahrungswerten</b>                                      | <b>300-600 mbar @ 2 - 4 A/cm<sup>2</sup></b>                                         |
| V' _O2 @ Nenn                              | 6,96 l/min                                                                                  | 6,96 l/min                                                                           |
| <u>Kathode, H<sub>2</sub></u>              |                                                                                             |                                                                                      |
| <b>*min/max. Druck (Hochdruckseite)</b>    | <b>atm / 35 barü</b>                                                                        | <b>atm / 35 barü</b>                                                                 |
| min/max. Temperatur                        | 45-80°C (90° für neue Materialien?)                                                         | 45-80°C (90° für neue Materialien?)                                                  |
| V' _H <sub>2</sub> _Nenn                   | 13,95 l/min                                                                                 | 13,95 l/min                                                                          |
| Wasser- bzw. Feuchteanteil?                | Gas in Wasser (gelöst)                                                                      | Gas in Wasser (gelöst)                                                               |
| dp_H <sub>2</sub>                          | Abgleich mit Literaturwerten / Erfahrungswerten                                             | Keine Anforderungen ermittelt, Anodenseite eher dominant                             |
| <b>Mechanischer Aufbau</b>                 |                                                                                             |                                                                                      |
| <b>*BPP / Flussfeld</b>                    | <b>einteilig, strukturierte Folie mit umgeformten Kanälen</b>                               | <b>einteilig, strukturierte Folie mit umgeformten Kanälen</b>                        |
| <b>*BPP-Substratmaterial</b>               | <b>Titan Gr. 1 / t = 0,2...0,3 mm</b>                                                       | <b>Titan Gr. 1 / t = 0,25 mm</b>                                                     |
| <b>*Beschichtung</b>                       | <b>tbd. (Gegenstand von F&amp;E)</b>                                                        | <b>Galvanische Platinschicht als Referenz</b>                                        |
| <b>*CCM</b>                                | <b>tbd. (Gegenstand von F&amp;E)</b>                                                        | <b>Lieferant 2 (China)</b>                                                           |
| <b>*PTL, GDL</b>                           | <b>tbd. (Gegenstand von F&amp;E), min. Höhe 500µm, wg. minimaler Aufbauhöhe Dichtrahmen</b> | <b>Ti-PTL platinert (Bekaert) als Referenz (beidseitig)</b>                          |
| Dichtung                                   | (1) Dispenserdichtung, (2) alternativ O-Ringe                                               | <b>O-Ringe, EPDM</b>                                                                 |
| <b>*Dichtungsrahmen</b>                    | <b>PA12, Multi Jet Fusion (hp)</b>                                                          | <b>PEEK, gefräst</b>                                                                 |
| Abmaße                                     | rechteckig                                                                                  | rechteckig                                                                           |
| <b>*Erforderliche Verspannkraft</b>        | <b>tbd =&gt; Testaufbau</b>                                                                 | <b>~44-50 kN (auf Basis mechanischer Kennwerte PTL und 35 bar Druckkompensation)</b> |

## AP 2: Entwicklung und Optimierung des Stapel-Designs

### Entwicklung des Zelldesigns (CAD/CFD)

In diesem Arbeitspaket wurde das finale Zell- und Stapeldesign inklusive aller Zellkomponenten und der Balance-of-Stack-Komponenten ausgelegt und entwickelt. Dabei wurden die Ergebnisse aus AP 1 zugrunde gelegt.

Analog zu den in AP 1 gefrästen Flussfeld-Geometrien wurden blechbasierte Varianten entwickelt (Abbildung 8), worin zunächst eine Kanallänge von 200 mm (Aktivfläche 50x200 mm<sup>2</sup>) angenommen wurde, in der Absicht über die Lauflänge und Variationen des Kanalquerschnitts, den in AP 1 ermittelten, erforderlichen Druckverlust für den späteren Blasenaustrag zu generieren.

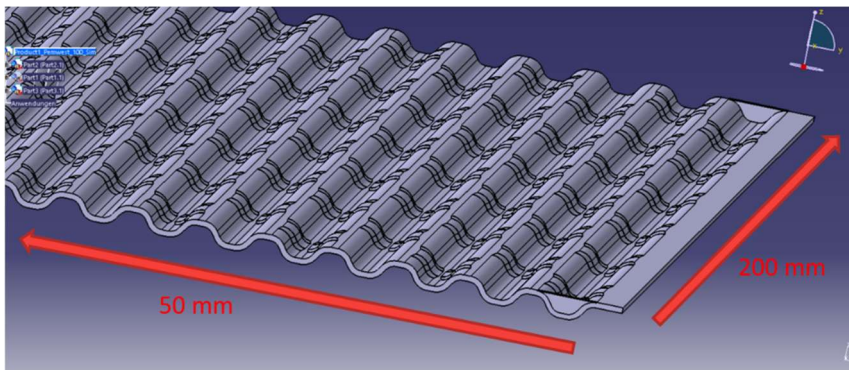


Abbildung 8: Flussfeld-Entwurf mit „geraden“ Kanälen (Variante 1)

Im Hinblick auf den Druckverlust der Anoden-Strömung wurden analog zu den in Tabelle 2 festgelegten Randbedingungen Einkanal-Simulationen mit Wasser ( $T = 70\text{ °C}$ ) mit einem Kanal-Volumenstrom analog dem Zellvolumenstrom von  $0,46\text{ l/min}$  durchgeführt. Es ergab sich ein zu geringer Druckverlust von nur  $14\text{ mbar}$  und es zeigte sich, dass sich dieser Wert unter Beibehaltung der fertigmachen Kanengeometrien mit gerade verlaufenden Kanälen nicht sinnvoll steigern ließ. Zu Steigerung des Anoden-Druckverlustes wurde folgende Maßnahmen ergriffen:

- Mäandrieren des Kanals
  - Steigerung der wirksamen Lauflänge bezogen Flussfeldlänge
  - Steigerung des Massenstroms je Kanal (Abdeckung größerer Fläche durch den Kanal)
- Anhebung des Kanalgrunds in den Kehren
  - Erhöhter Druckverlust der Wasserströmung durch Querschnittsverjüngung
  - Freistellung eines Strömungspfades auf der Kathodenseite ( $\text{H}_2$ )

Hierdurch konnten die geforderten Druckverhältnisse für die Anodenströmung ( $\geq 300\text{ mbar}$ ) gut eingestellt werden (Abbildung 9) und zeitgleich die bereits in AP 1 umformtechnisch validierten Kanengeometrien nahezu beibehalten werden.

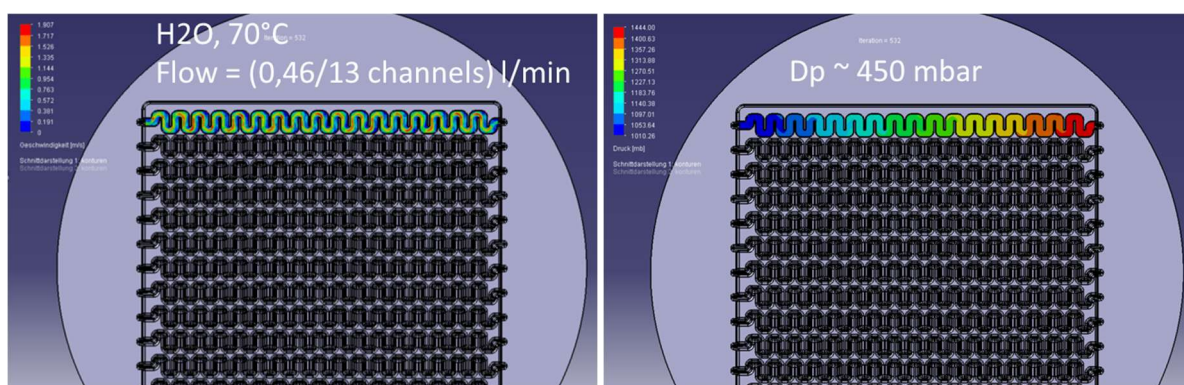


Abbildung 9: Einkanal-Simulation der Anodenströmung im Mäanderkanal (Variante 2.1).

In Ermangelung an Strömungsspezifikationen für die Kathodenseite und der fehlenden Abbildbarkeit der Zweiphasenströmung ( $\text{H}_2/\text{H}_2\text{O}$ ), wurde eine analoge Simulation mit Wasser auch auf der Kathodenseite durchgeführt, um zumindest die Gleichförmigkeit einer sich einstellenden Strömung in dem sich ergebenden Strömungsraum nachzuweisen (Abbildung 10).

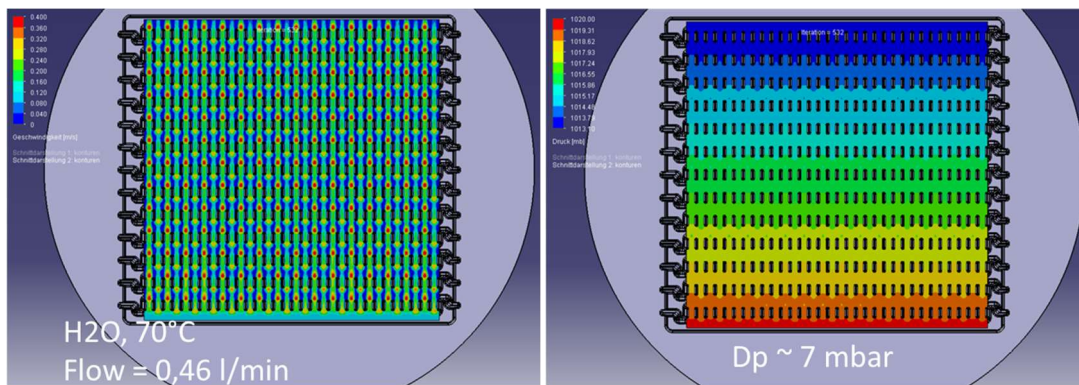


Abbildung 10: Simulation der Kathodenseite mit Wasser (ganze Zelle, aufgrund einer offenen Strömungsstruktur), Variante 2.1.

Es zeigte sich, dass sich eine gleichförmige und gleichverteilte Strömung mit einem sehr geringen Druckverlust einstellt, welcher im realen Betrieb (Zweiphasenströmung  $H_2/H_2O$ ), ggfs. abweichen würde.

Im Zuge dieser Entwicklungen und der Entscheidung für eine O-Ring-basierte Abdichtung wurde für die folgenden Entwicklungen eine quadratische aktive Fläche ( $\sim 10 \times 10$  cm) festgelegt, da dies die Umschließung mit O-Ring-Dichtungen zulässt und die homogene Krafteinleitung durch das Endplattenensemble verbessert.

Im Folgenden wurde das Kanaldesign noch geringfügig angepasst (Variante 2.2), mit der Zielsetzung:

- den Strömungsdruckverlust der Anode weiter zu senken (Abbildung 11)
- lokale Druckgradienten benachbarter Kanalabschnitte zu provozieren, um die Versorgung der CCM zu verbessern (Ansatz analog zu Kathodenflussfeldern von Brennstoffzellen, Abbildung 12)
- Strömungsverteilung der Kathode zu optimieren (Abbildung 13)

Hierzu wurde das Niveau der Anhebung in den Mäander-Kehren angepasst und zugleich alternierend unterschiedlich hoch ausgelegt. Dadurch konnten die oben genannten Ziele erreicht werden.

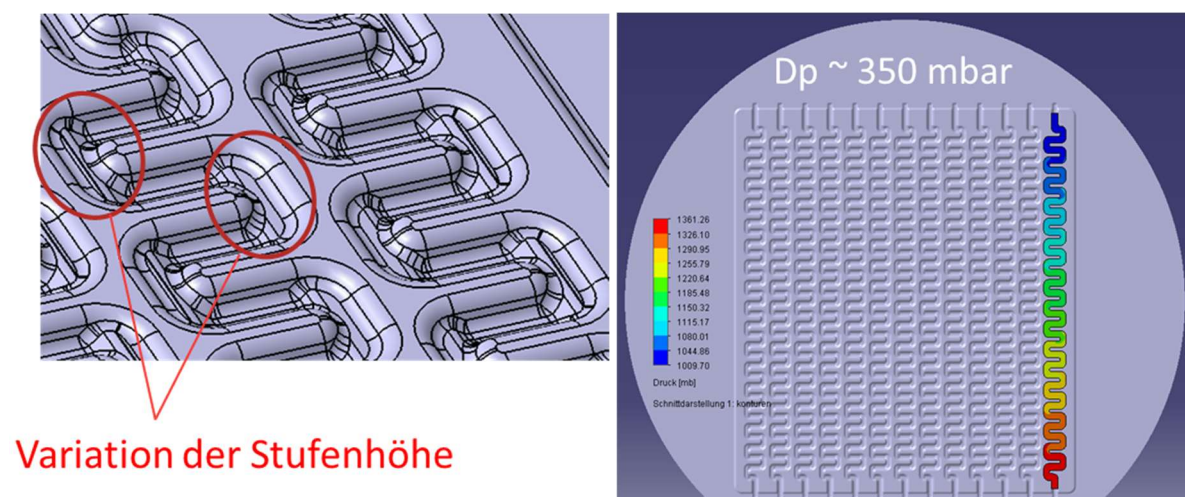


Abbildung 11: Anpassung der Stufenhöhe in Variante 2.2 (links); Reduzierung des Anodendruckverlustes von 450 mbar auf 350 mbar (rechts).

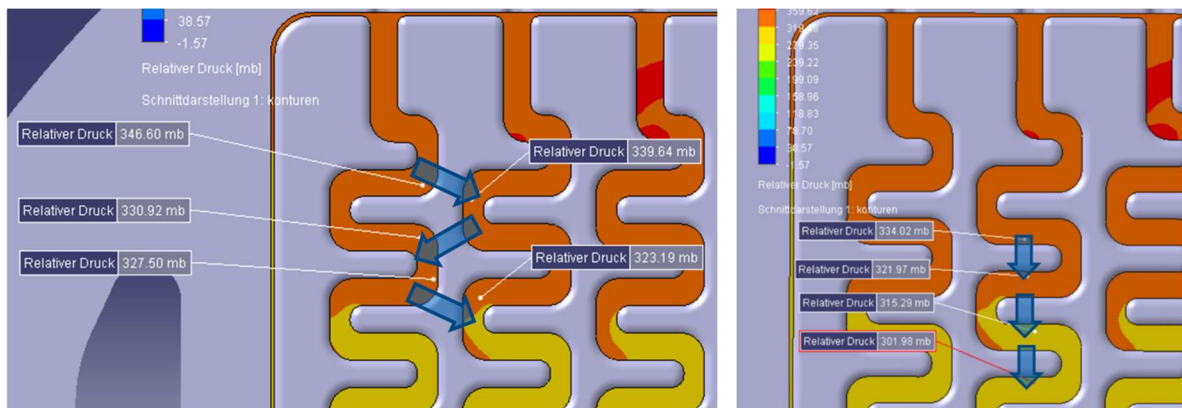


Abbildung 12: Lokale Druckgradienten der Anodenströmung in Variante 2.2. Etwa 5-10 mbar zwischen benachbarten Kanälen (links) und etwa 7-13 mbar benachbarter Kanalabschnitte eines Kanals (rechts).

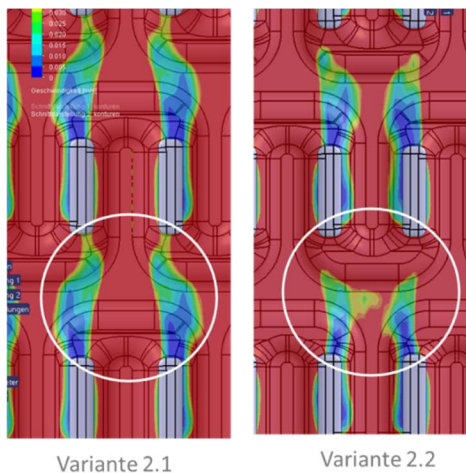


Abbildung 13: Geringfügige Reduzierung Totgebiete der Kathodenströmung von Variante 2.1 zu 2.2.

In den nächsten Schritten wurde anoden- und kathodenseitige Zellrahmen entwickelt. Diese wurden im Hinblick auf die Abdichtung mit O-Ringen so ausgelegt, dass sich beim Verspannen der Komponenten, die Dichtrahmen und das zwischen ihnen befindliche Separatorblech vollflächigen Kontakt (hard stop) im Bereich der Dichtungen haben. So wurde vermieden, dass geformte Bereiche des Blechs Dichtungskräfte aufnehmen müssen und diese ausschließlich durch das Vollmaterial der Dichtrahmen getragen werden. Außerdem wurde die Unterverteilung der Strömung aus den Manifolds auch ausschließlich durch Strukturen in den Dichtrahmen umgesetzt. Dadurch waren sehr feine Verteilstrukturen auf engem Raum (für ein kompaktes Design), unabhängig von den Umformgrenzen des Titans möglich. Die sich ergebenden Gesamtdruckverluste einer Zelle (Manifold – Verteiler – Flussfeld – Sammler – Manifold) sowie insbesondere die Gleichverteilung, die sich im Zusammenspiel mit den Verteiler- und Sammlerstrukturen der Dichtrahmen ergaben, wurden wiederum im Rahmen von Strömungssimulationen überprüft.

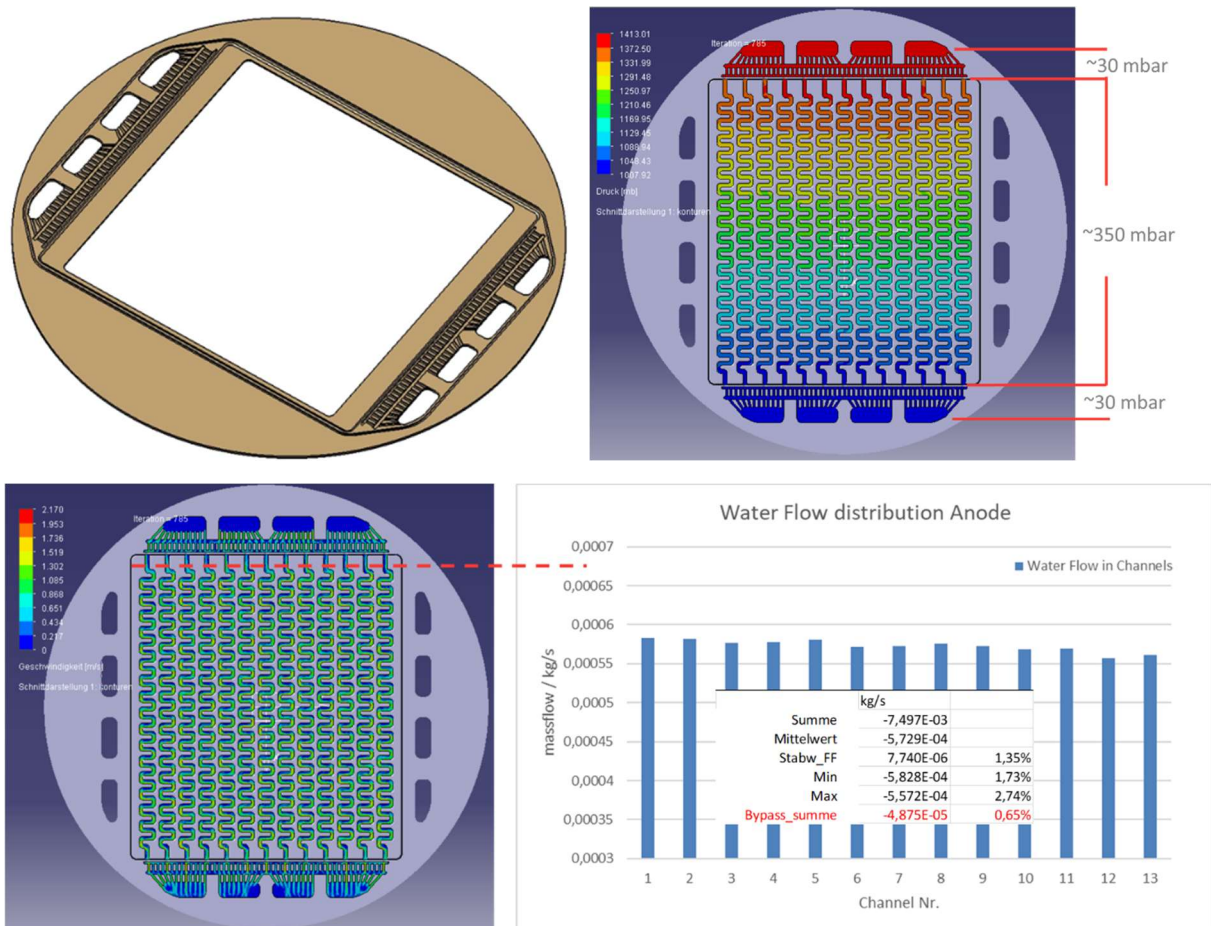


Abbildung 14: Entwurf für Verteilerstruktur im Anodendichtrahmen (oben links), Simulierte Anodendruckverluste der Zelle inklusive Dichtrahmenstrukturen (oben rechts), Simulierte Strömungsgeschwindigkeiten der Anode in der Zelle inklusive Dichtrahmen (unten links), Massenstromverteilung in den jeweiligen Kanälen zeigt nur geringfügige Abweichungen (unten rechts).

Für die Anodenseite konnte hierbei ein sehr gutes Verteilungsbild mit nur geringfügigen relativen Abweichungen ( $< 2\%$ ) und einem vernachlässigbaren Bypass ( $< 1\%$ ) dargestellt werden (Abbildung 14).

Eine analoge Auslegung und Betrachtung erfolgte für die Kathodenseite, wobei analog zu den Vorauslegungen die Simulation mit Wasser durchgeführt und das Hauptaugenmerk auf einer gleichförmigen Strömungsverteilung lag. Hier konnte aufgrund des geringeren Eigendruckverlusts (8 mbar) des Flussfeldes eine größere Störung der Gleichverteilung durch die Verteilerstrukturen (11 mbar) beobachtet werden (Abbildung 15). Die sich ergebenden Ungleichverteilungen (9-11 %) des abströmenden Wasserstoffs auf der Kathode wurden – auch aufgrund fehlender Zielwerte/Untersuchungen aus der Literatur – als hinreichend gering eingeschätzt und die Verteilerstruktur nicht weiter optimiert.

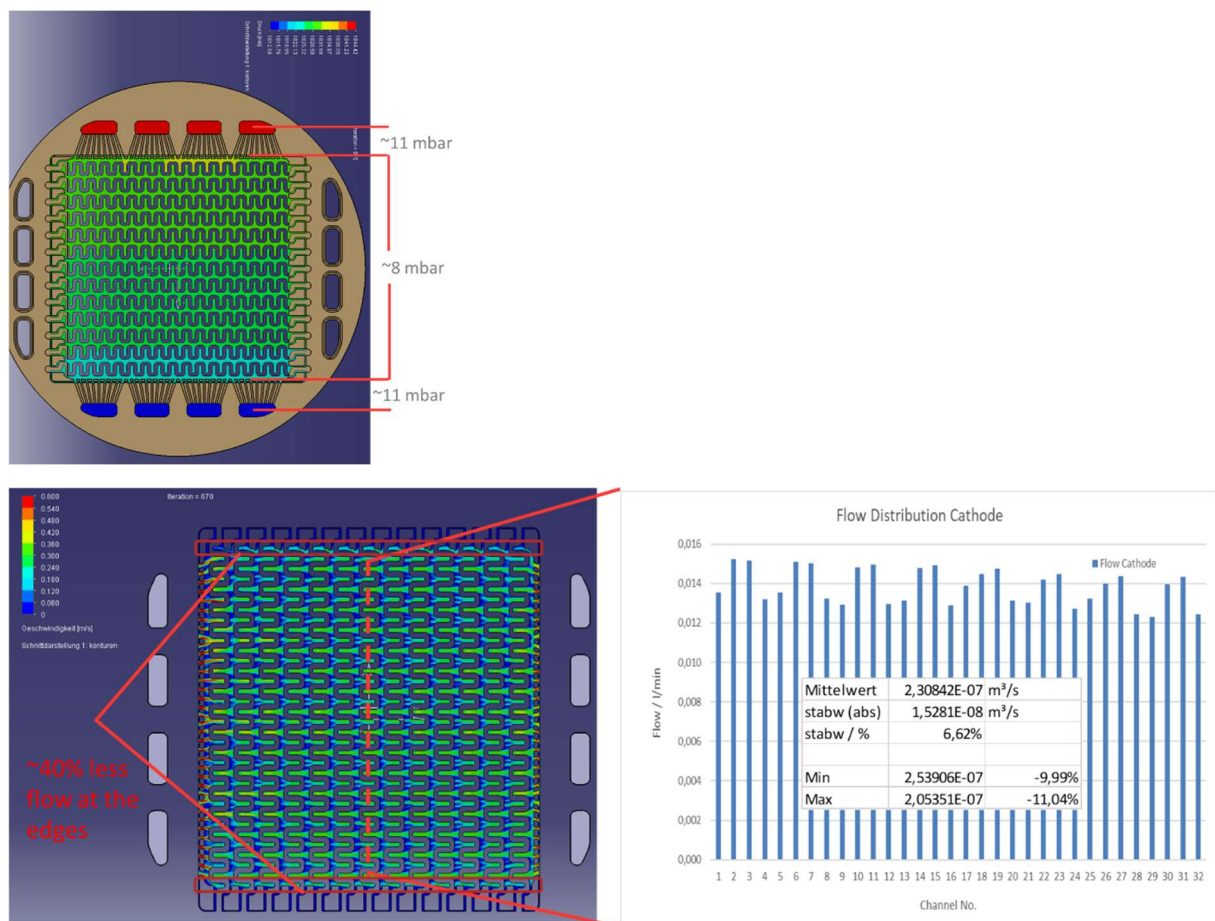


Abbildung 15: Simulierte Kathodendruckverluste der Zelle inklusive Dichtrahmenstrukturen (oben), Simulierte Strömungsgeschwindigkeiten der Kathode in der Zelle inklusive Dichtrahmen (unten links), Massenstromverteilung in den jeweiligen Kanälen der Kathode (unten rechts).

Auf dieser Basis konnte das Design und die Auslegung im Hinblick auf die Strömungsauslegung abgeschlossen werden. Die Zellbleche wurden beim Hersteller beauftragt und parallel zur deren Fertigung wurden die Zellrahmen hinsichtlich Abdichtung und Positionierung, die hierauf basierenden Abmessungen der PTL und CCM abgeleitet sowie weitere Balance-of-Stack-Komponenten hinsichtlich der Verspannung des Zellstapels ausgelegt und entwickelt.

## AP 4: Funktionsvalidierung Teststapel

### Entwicklung Dichtrahmen / Dichtstrukturen:

Zur Montage der O-Ringe, zur Gewährleistung der Stapeldichtigkeit sowie zur Realisierung des Mediendurchflusses im Stapel wird auf Dichtrahmen zurückgegriffen. Die Dichtrahmen bestehen aus Polyetheretherketon (PEEK), das Basismaterial wurden bei der Firma Plastic Team bestellt. Hierzu wurden zwei Rahmenkonzepte in unterschiedlichen Dicken entwickelt (Abbildung 16). Die Variante, über die der Wasserdurchfluss realisiert wird und die auf der Anodenseite montiert wird, weist eine Dicke von 1,0 mm auf. Der auf der Kathodenseite montierten Rahmen, über den der Wasserstoffdurchfluss erfolgt, hat eine Dicke von 1,25 mm. Zur Positionierung der Rahmen, Separatorplatten sowie CCM wurden Stifte mit einem Durchmesser von 3,6 mm auf vier Ecken der genannten Komponenten eingesetzt. Zur Vermeidung elektrischer Kontaktierung während des Betriebs des Stapels wurden Stifte aus Keramik ausgewählt. Die Konstruktion und Fertigung der Rahmen wurde am ZBT durchgeführt. Es wurden als Dichtungen O-Ringe aus EPDM (Shore A 70, Durchmesser 0,5 mm) der Firma Arcus ausgewählt:

- **14 × 0,5 mm:** Diese Variante dient zur Abdichtung der Manifolds. Auf jedem Dichtrahmen werden 32 Stück (16 pro Seite) montiert.
- **141 × 0,5 mm:** Diese Variante dient zur Abdichtung des aktiven Bereichs auf der Vorderseite. Auf jeder Platte wird ein Stück dieser Variante montiert.
- **146 × 0,5 mm:** Diese Variante dient zur Abdichtung der aktiven Fläche auf der Rückseite, wo der Mediendurchfluss stattfindet.

Da bei den obersten und untersten Dichtrahmen kein Bedarf an einer Abdichtung um den aktiven Bereich besteht, wurden bei diesen Rahmen die großen Dichtungen (Varianten 2 und 3) weggelassen. Alle weiteren Geometrieaspekte dieser Rahmen bleiben identisch mit den oben dargestellten Rahmen.

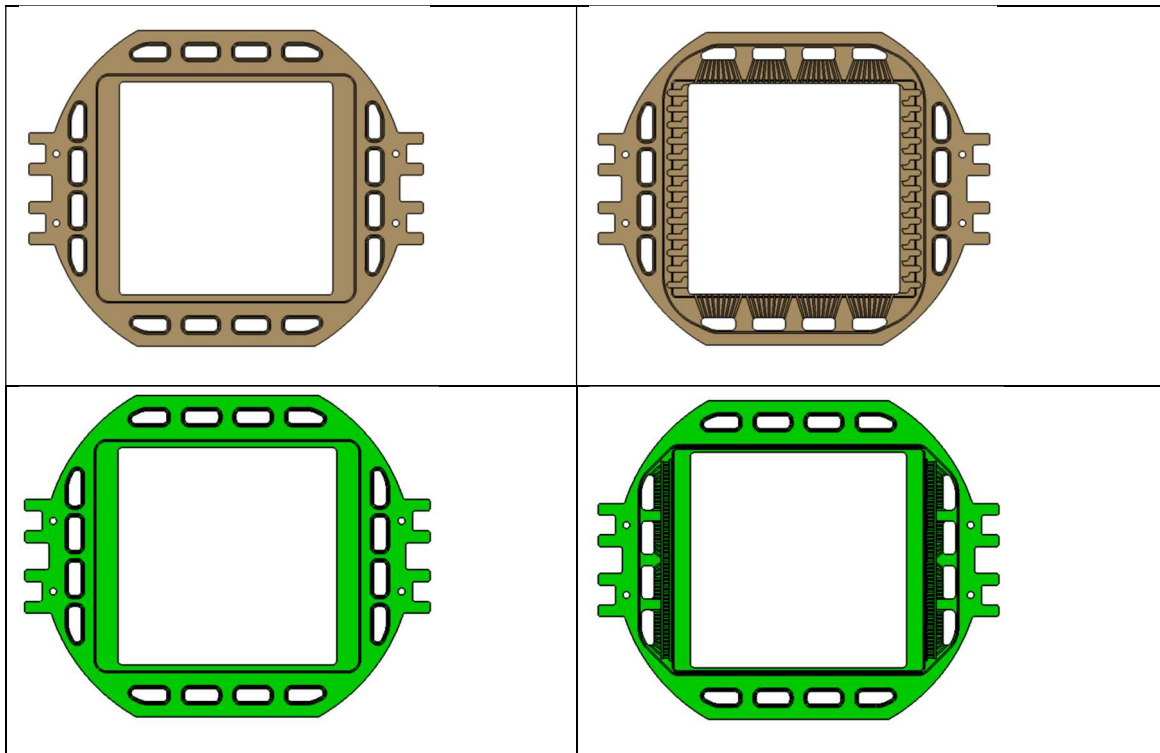


Abbildung 16: Überblick der Dichtrahmen: Oben links: H<sub>2</sub> Rahmen Vorderseite oben rechts: H<sub>2</sub> Rahmen Rückseite unten links: H<sub>2</sub>O Rahmen Vorderseite unten rechts: H<sub>2</sub>O Rahmen Rückseite.

### Fertigung der Dichtraahmen:

Die signifikante Herausforderung bei der Fertigung der Dichtraahmen lässt sich als folgenden Punkten darstellen:

#### 1. Einhaltung der Lage- und Formtoleranzen:

Bei der Auslegung der Rahmen wurde basierend auf der Komprimierung der O-Ringe sowie der Erzielung des Hard-Stop-Prinzips (Zero-Gap-Konzept) für die O-Ringe mit 0,5 mm Schnurstärke eine Nutttiefe von 0,37 mm vorgesehen. Ein Überstand der O-Ringe über die Oberfläche der Rahmen von 0,13 mm wurde vorgesehen. Das zulässige Toleranzfeld hierfür liegt bei  $\pm 0,02$  mm. Das enge Toleranzfeld sowie die geforderte Genauigkeit bei der Fertigung waren für das Zero-Gap-Konzept notwendig. Letztlich konnten die Toleranzen eingehalten und die Fertigung der Rahmen erfolgreich abgeschlossen werden.

#### 2. Krümmung der PEKK-Rahmen nach dem Schleifen:

Um die Planebenheit der Rahmen auf der Vorder- und Rückseite zu gewährleisten, musste aufgrund der vom Lieferanten angegebenen Toleranzen auf beiden Seiten eine gewisse Dicke abgefräst werden. Dadurch wird die finale Dicke erreicht.

#### 3. Temperierung der PEEK-Rahmen:

PEEK ist für seine Temperaturbeständigkeit bekannt. Allerdings entstehen beim Walzen flacher Halbzeuge innere Spannungen, die während des FräSENS und des Betriebs des Stapels bei 80 °C zu einer Deformation der Rahmen führen. Demnach waren erste Rahmen, die in den Stapel eingesetzt werden sollten, nach wenigen Temperaturschritten (Applikation der Dichtung) nicht mehr maßhaltig und wiesen Maßabweichungen in der Größenordnung von Millimetern (!) auf. Hierzu wurde intern eine Tempermethode auf Basis von entsprechenden Industrieprozessen abgeleitet, durch die die gespeicherten Spannungen freigesetzt werden. Abschließend konnten mit getemperten Halbzeugen maßhaltige Dichtraahmen für das Projekt hergestellt werden (Abbildung 17).

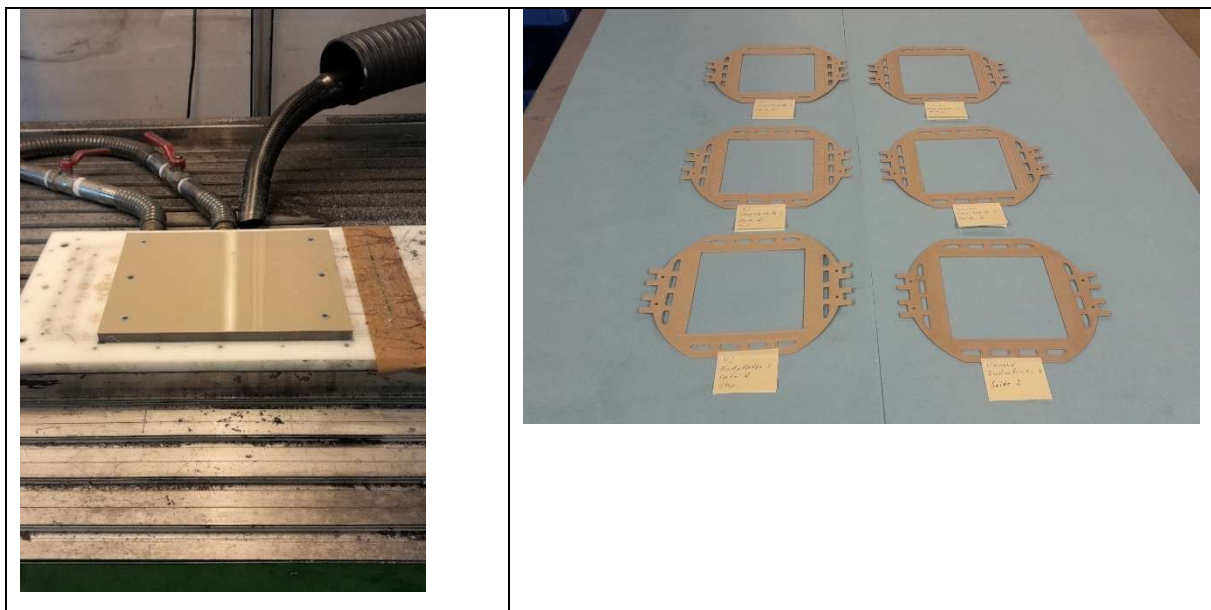


Abbildung 17: Herstellungsprozess für die Dichtraahmen (links), gefertigte Dichtraahmen (rechts).

### Montage der O-Ringe:

Die O-Ringe und die dazugehörigen Dichtungsnuten auf der Platte wurden in der Nut innen-anliegend konzipiert. Dadurch stehen die O-Ringe mit ihrer gesamten Oberfläche in Kontakt mit dem inneren Bereich der Dichtungsnut. Dies ermöglicht die Ausdehnung und den Kraftaufbau der O-Ringe gegen die Nut, sodass sie darin sicher appliziert sind (Abbildung 18). Die Montage der O-Ringe auf den Platten erfolgte manuell. Dabei wurde festgestellt, dass die O-Ringe aufgrund der geringen Schnurstärke und der daraus resultierenden geringen Nuttiefe nicht dauerhaft in der Nut verbleiben. Daher wurde auf ein für Brennstoffzellen etabliertes Silikonmaterial zurückgegriffen. Eine dünne Silikonschicht wurde mit einer Spritze punktuell auf den Nutgrund aufgetragen. Anschließend wurden die O-Ringe montiert und die Platten für drei Stunden bei 120 °C temperiert, damit das Silikon aushärtet.

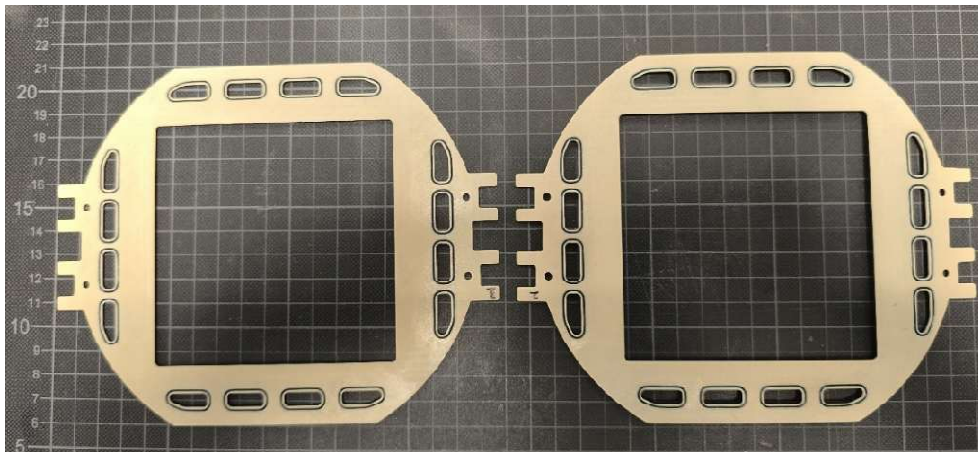


Abbildung 18: Übersicht der Dichtrahmen aus PEEK mit den darauf montierten O-Ringen.

### Anpassung der PTL:

Bei diesem Projekt wurden sowohl für die Anoden- als auch für die Kathodenseite PTLs mit einer Dicke von 750 µm bei der Firma Bekaert bestellt, die beidseitig mit Platin beschichtet sind. Diese wurden in großen Abmessungen von 440 × 550 mm als Matten geliefert. Anschließend mussten sie für die aktive Fläche auf 100 × 100 mm zugeschnitten werden. Hierzu wurde ein Stanzwerkzeug (Abbildung 19) konstruiert und bei der Firma Seeger bestellt. Die PTLs wurden schließlich mit dem Stanzwerkzeug in der Presse auf die entsprechenden Abmessungen gebracht und im weiteren Verlauf in den Stapel eingebaut.

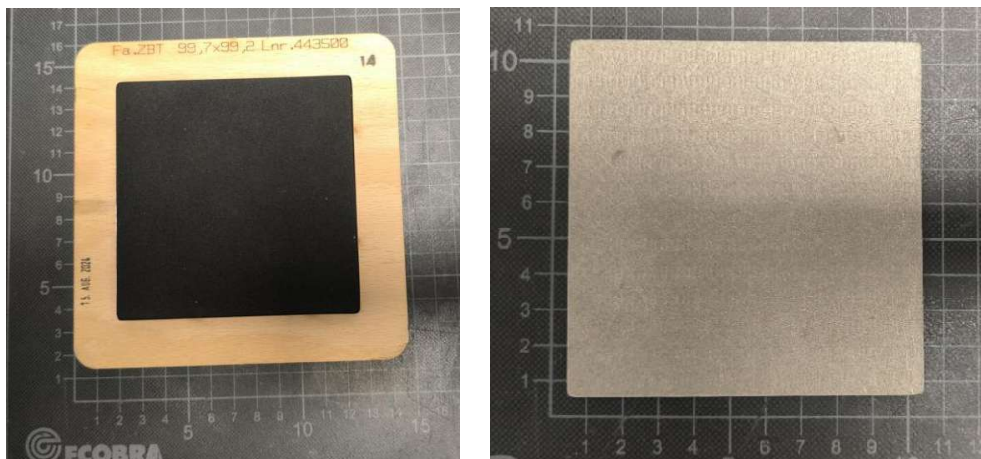


Abbildung 19: Stanzwerkzeug aus Firma Seeger und dadurch geschnittene PTL.

### Auslegung Verspannkräfte:

Als Grundlage für die Konzeption des Verspannungssystems steht die Erzielung des Hard-Stop-Prinzips sowie die Realisierung des Zero-Gap-Konzepts im Vordergrund. Im Falle von Fehlern in diesem Bereich oder mangelnder Umsetzung des Hard-Stop-Prinzips würde der Stapel undicht. Vor diesem Hintergrund wurde zunächst die notwendige Kraft für den Hard-Stop berechnet. In diesem Zusammenhang müssen die PTLs und Dichtungen aufgrund ihres elastischen Verhaltens besonders berücksichtigt werden. Auf der anderen Seite muss das Konzept so ausgelegt sein, dass der Stapel auch unter einem Betriebsdruck von 35 bar dicht bleibt. Grundlegende Randbedingungen für die Auslegung sind in Tabelle 3 dargestellt

*Tabelle 3: Ermittlung der erforderlichen Verspannkräfte.*

| Angaben                         | Wert                                                   |
|---------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Länge aktive Fläche             | 100,5 mm                                               |
| Breite aktive Fläche            | 100 mm                                                 |
| aktive Fläche                   | 10050 mm <sup>2</sup>                                  |
| Dicke PTL unkomprimiert         | 750 µm                                                 |
| Notwendige Verspannkraft PTL    | <b>10,72 kN</b>                                        |
| Druckkraft @ 35 bar             | <b>35,18 kN</b>                                        |
| Sicherheitsfaktor               | <b>1,1</b>                                             |
| Härte O-Ringe                   | 70 Shore A                                             |
| Elastizitätsmodul O-Ringe       | 7 MPa                                                  |
| Verspannung O-Ringe             | 0,33 kN                                                |
| Anzahl Dichtungen pro Rahmen    | 26                                                     |
| Summe Verspannkräfte pro Rahmen | <b>1,47 kN</b>                                         |
| Summe erzeugte Kräfte           | $10,72 + 35,18 \cdot 1,1 + 1,47 \approx 52 \text{ kN}$ |

### Entwicklung Montage-Elemente:

Zum Aufbau des Stapels wurde ein Montagekonzept entwickelt. Das Konzept besteht aus den folgenden Bauteilen (Abbildung 20):

- **Grundplatte:** Diese wurde intern aus Aluminium mit 30 mm Dicke konstruiert und gefertigt. Auf dieser Platte wird der Stapel aufgebaut und bei Bedarf transportiert.
- **Stapel-Features:** Zwei Stapel-Features zur Platzierung und genauen Positionierung der Stapel-Komponenten werden auf beiden Seiten des Stapels mittels Schrauben auf der Grundplatte montiert. Diese wurden in Form von Winkeln mit Langlöchern auf der Unterseite gefertigt. Durch die Langlöcher kann die Positionierung der Stapel-Features präzise definiert werden. Für jede Zell-Komponente wurde eine entsprechende Aussparung in Form des Stapel-Features vorgesehen. Durch die genaue Positionierung der Aussparungen und Stapel-Features, werden die Komponenten korrekt aufeinandergestapelt. Die Stapelvorrichtung aus Aluminium wurden ebenfalls intern hergestellt.

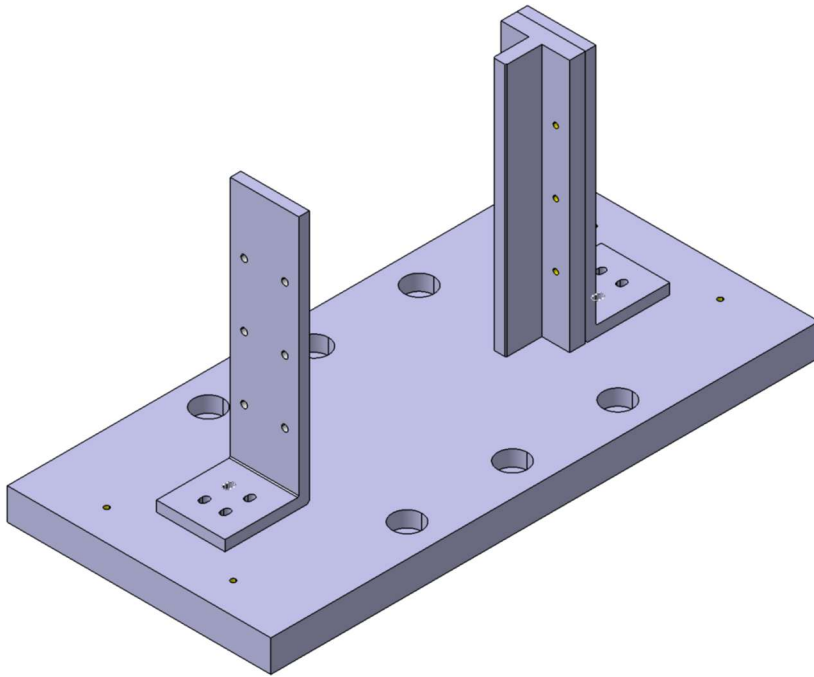


Abbildung 20: Der Stapel wird in der Mitte aufgebaut. Die Positionierung der Komponenten erfolgt über die hervorstehende Leiste.

#### Entwicklung und Aufbau Stapel-Komponente:

Als nächster Schritt wurden die Stapel-Architektur konzipiert. In diesem Zusammenhang wurden folgenden Komponenten in Betracht gezogen:

- **Obere und untere Endplatte:** Die beiden Endplatten wurden mit einer Dicke von 50 mm konstruiert und intern am ZBT aus Aluminium (3.3211) gefertigt.
- **Schraubenfeder:** Zur Realisierung des Verspannkonzpts und zum Aufbau der Verspannkräfte wurden insgesamt 12 Schraubenfedern der Firma Febrotec mit den folgenden Eigenschaften eingesetzt:
  - Durchmesser 64 mm
  - Länge 114 mm
  - Federrate 370 N/mm
  - Max. Federweg 34,2 mm
- **Federplatte:** Zur Montage der Schraubenfedern wurde eine Platte aus Werkzeugstahl mit 30 mm Dicke konstruiert und intern am ZBT gefertigt.
- **Stromabnehmer:** Zwei Stromabnehmer aus Kupfer mit einer Dicke von 5 mm wurden konstruiert, intern gefertigt und anschließend vergoldet.
- **Medienplatte:** Zur Realisierung des Mediendurchflusses wurde eine Medienplatte aus Polyoxymethylen (POM) mit 50 mm Dicke konstruiert und intern gefertigt.
- **Isolatorplatte:** Zur elektrischen Isolierung wurde diese Platte aus POM mit 12 mm Dicke konstruiert und intern gefertigt.
- **Zuganker:** Als Teil des Verspannkonzpts kommen sechs Zuganker M10 zum Einsatz. Hierzu wurde die Positionierung dieser Elemente ermittelt, um eine homogene Kraftverteilung auf dem Stapel sowie die Planebenheit der oberen Endplatte zu gewährleisten. Die Zuganker wurden extern bestellt.

### Ermittlung der homogenen Kraftverteilung:

Zur Validierung des Verspannkonzpts, zur Umsetzung des Hard-Stop-Konzpts sowie zur Überprüfung der homogenen Kraftverteilung wurde einen Teststapel gebaut und drucksensitive Folien eingesetzt, um die ersten Kraftabdrücke zu visualisieren. Die Sensorfolien wurden an unterschiedlichen Stellen im Stapel aufgelegt, um die Kraftabdrücke sowie die Kontaktierung der Komponenten zu visualisieren (Abbildung 21).

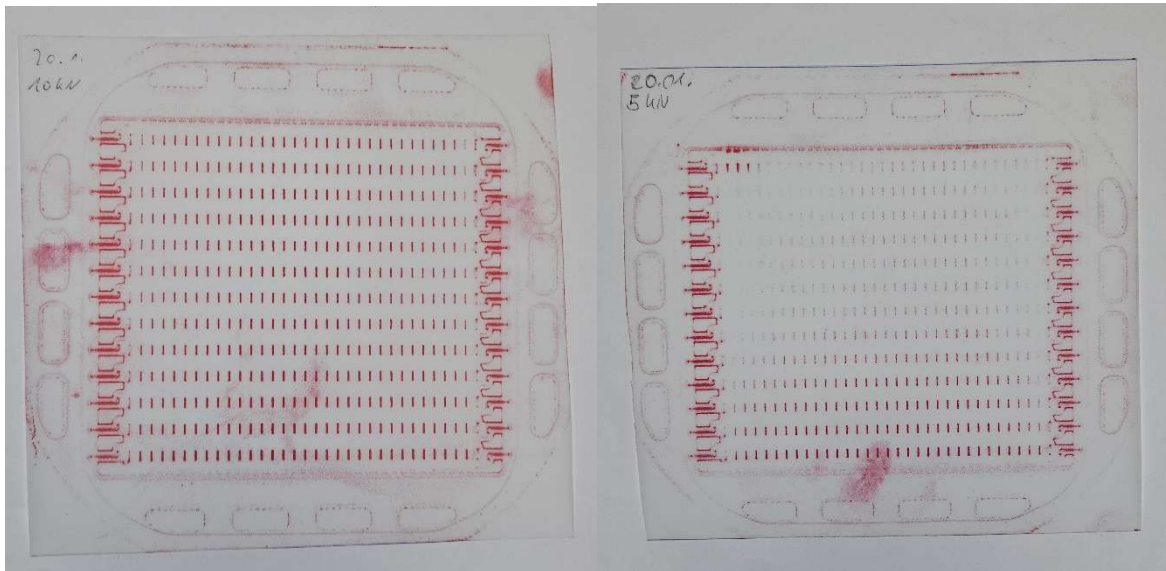


Abbildung 21: Fuji-Abdruck der Bipolarplatte bei 5 kN und 10 kN. Bei 10 kN zeigen die Abdrücke, dass der Hard-Stop erreicht wurde.

### Aufbau des Stapels und Durchführung der Leckageprüfung:

Nach der Ermittlung der Gleichmäßigkeit der Kraftaufteilung wird der Stapel aufgebaut. Für die Durchführung der Stapelmontage wird das oben vorgestellte Montagesystem verwendet (Abbildung 20). Die Komponenten werden dabei von unten nach oben montiert. Abbildung 22 zeigt eine Übersicht sowie die Reihenfolge für den Aufbau der Komponenten.

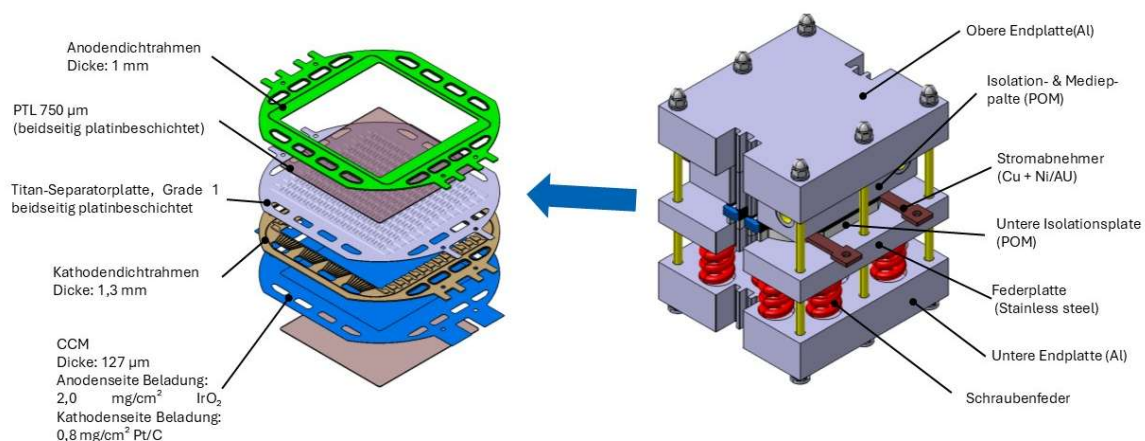
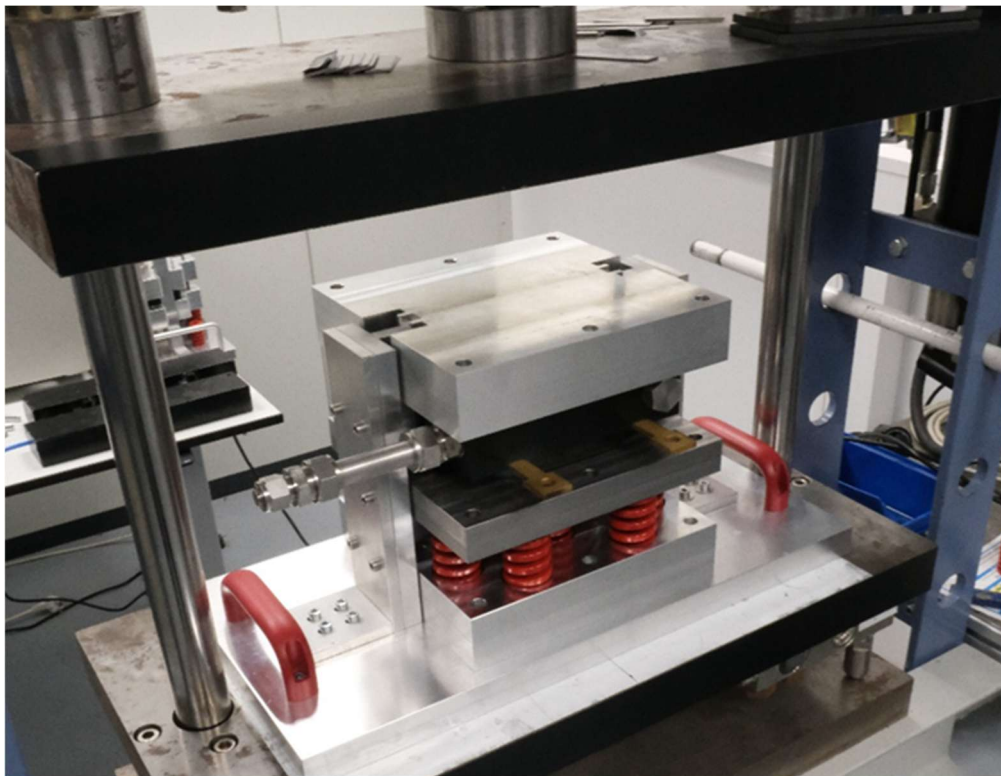


Abbildung 22: Darstellung der Aufbau der Zell und Stapel-Komponenten.

Nach dem Aufbau der Komponenten und der Finalisierung des Einzeller-Stapels wurde dieser zusammen mit dem Montagesystem in die Presse eingebracht und bis 2 Tonnen komprimiert. Nachdem die berechnete Verspannkraft sowie die gewünschte Komprimierung erreicht waren, Schlussbericht – PEMWEST

wurden die Muttern auf der oberen Endplatte von Hand festgezogen. Anschließend wurde die Presse geöffnet und der Stapel entlastet.



*Abbildung 23: Montage des Test-Stapels in der Hydraulikpresse.*

Im Rahmen des Montageprozesses (Abbildung 23) muss die Dichtigkeit des aufgebauten Stapels vor dem Transport zum Teststand überprüft werden. Zunächst wurde die Dichtigkeit mit einem Barometer bei einem Gesamtlimit von 600 mbar getestet; hierbei zeigte der Stapel keine Undichtigkeiten. Im nächsten Schritt wurde der Leckagetest auf einem Teststand durchgeführt, um den Prüfdruck zu erreichen. Bei dieser Vorprüfung wurde bei 3,5 barg eine Leckage von 1 ml/min festgestellt. Es zeigte sich, dass die ausgewählten O-Ringe keine höhere Druckbeaufschlagung zuließen und aufgrund des Hard-Stop-Prinzips auch höhere Stackverspannkkräfte keine höhere Druckstabilität nach sich ziehen konnten. Im weiteren Verlauf wurde die Stackverspannkraft auf 25 kN reduziert, da die Kompensation von Mediendrücken von 35 bar nicht möglich und somit im Hinblick auf die Verspannkraft nicht erforderlich waren. Die weiteren Versuche wurden ohne Druckaufladung der Kathodenseite geplant.

### **Inbetriebnahme und Funktionsprüfung**

Bevor die Performance und Accelerated Stress Test (AST) durchgeführt wurden, wurde jeder Stapel einer Einfahrprozedur unterzogen, welche hauptsächlich der Konditionierung der CCM dient und für stabile Interfaces zwischen den einzelnen Komponenten sorgt. Dazu wurde das in Tabelle 4 aufgelistete Protokoll gewählt.

Tabelle 4: Konditionierungsprotokoll.

| # |       | <b>Stromdichte/Zellspannung</b> | <b>Zeit / min</b> |
|---|-------|---------------------------------|-------------------|
| 1 | Galv. | 0,2 A cm <sup>-2</sup>          | 60                |
| 2 | Galv. | 1,0 A cm <sup>-2</sup>          | 60                |
| 3 | Pot.  | 2,0 V                           | 30                |
| 4 | Pot.  | 1,7 V                           | 120               |
| 5 | Pot.  | 2,0 V                           | 30                |

## AP 5: Entwicklung von Testprozeduren mit variierenden Materialien und Komponenten

### Entwicklung von Prüfprotokollen

Es wurden mehrere Prüfprotokolle sowohl zur hydraulischen als auch zur elektrochemischen Charakterisierung entwickelt. Als erstes wurden Hydraulikkennlinien bei verschiedenen Volumenströmen des Prozesswassers der Anode und diversen Temperaturen ohne Elektrolysebetrieb getestet, um den Druckverlust und die Temperaturdifferenz am Eingang und Ausgang des Stapels zu messen und mit den Simulationen aus AP2 zu vergleichen. Hierbei wurde beim Aufheizen jeweils eine Stunde bis zur Temperaturkonstanz gewartet und dann jeder Betriebspunkt für fünf Minuten gehalten. Das gleiche Protokoll wurde dann noch einmal bei drei verschiedenen Stromdichten durchgeführt, um zu überprüfen, welcher Volumenstrom zur Kühlung benötigt wird und wieviel Gegendruck durch die Gasproduktion im Elektrolysebetrieb entsteht. Die einzelnen Betriebspunkte der Betriebsparameter sind in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Betriebsparameter und -punkte der Hydraulikkennlinien.

| <b>Betriebsparameter</b> | <b>Betriebspunkte</b>                                      |
|--------------------------|------------------------------------------------------------|
| <b>Temperatur</b>        | 50, 60, 70, 80 °C                                          |
| <b>Stromdichte</b>       | 0, 1, 3, 5 A cm <sup>-2</sup>                              |
| <b>Volumenstrom</b>      | (4, 5,) 6, 7, 8, 9 / mL min <sup>-1</sup> cm <sup>-2</sup> |

Zur Evaluierung der elektrochemischen Performance werden bei konstantem Volumenstrom von 9 mL min<sup>-1</sup> cm<sup>-2</sup> stromgeführte Polarisationskurven bei den Temperaturen 50, 60, 70 und 80 °C aufgenommen. Hierbei wird jeder Punkt zwischen 0,01 und 5,0 A cm<sup>-2</sup> für zwei Minuten gehalten, ohne dass eine Zelle eine Spannung von 2,3 V übersteigt.

Um in möglichst kurzer Zeit (< 500 h) die Komponenten des Stapels im Elektrolysebetrieb zu degradieren und diese untersuchen zu können, wurden ein Protokoll zur beschleunigten Alterung (engl. *Accelerated Stress Test*, AST) entwickelt. Hierbei wird eine niedrige (0,2 A cm<sup>-2</sup>) und eine hohe

Stromdichte ( $5 \text{ A cm}^{-2}$ ) gewählt zwischen denen alle 30 Sekunden schlagartig gewechselt wird. Dieser Test wird bei der höchsten Temperatur von  $80 \text{ °C}$  durchgeführt.

### Stapelbetrieb mit variierenden Zellkonfigurationen

Zur Überprüfung des Stapelkonzepts wurde zunächst nur eine Zelle aufgebaut und getestet. Der Maximaldruck wurde aufgrund des in AP 4.3 durchgeführten Leckagetests auf  $2 \text{ bar(g)}$  limitiert und alle weiteren Tests liefen bei  $1 \text{ bar(g)}$   $\text{H}_2$  ab.

Zuerst wurden Hydraulikkennlinien bei vier unterschiedlichen Temperaturen aufgenommen, welche in Abbildung 24 gezeigt sind.

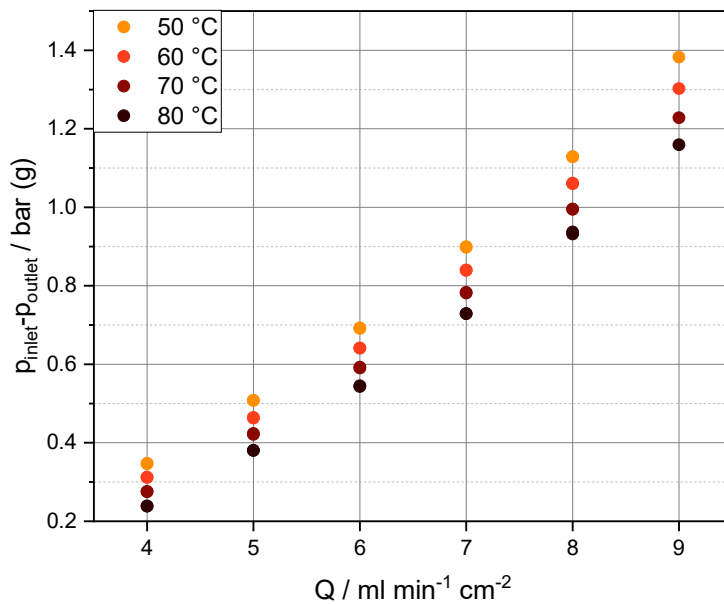


Abbildung 24: Hydraulikkennlinien bei vier verschiedenen Temperaturen.

Hierbei zeigt der Teststapel beim Betriebspunkt  $4,6 \text{ ml min}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  und  $70 \text{ °C}$  einen Druckverlust von  $360 \text{ mbar}$ , was nur eine leichte Abweichung ( $-12 \%$ ) des in AP2 simulierten Druckverlustes ( $410 \text{ mbar}$ ) darstellt. Bei steigendem Volumenstrom steigt wie zu erwarten auch der Druckverlust. Ebenso sinkt der Druckverlust bei höherer Temperatur aufgrund der geringeren Viskosität des Prozesswassers.

Als nächstes werden exemplarisch die Hydraulikkennlinien sowie die Temperaturdifferenzen von Eingang und Ausgang des Teststapels im Elektrolysebetrieb bei drei Lastpunkten und zwei unterschiedlichen Temperaturen dargestellt. In Abbildung 25 sind die Kennlinien bei  $50 \text{ °C}$  gezeigt.

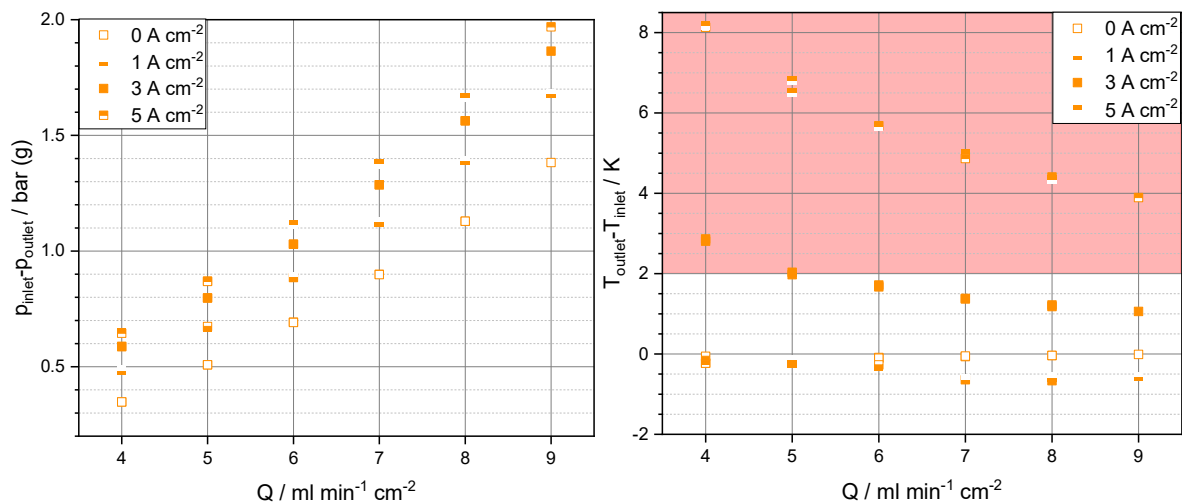


Abbildung 25: Hydraulikkennlinien im Elektrolysebetrieb bei 50 °C und vier Betriebspunkten (links) und zugehörige Temperaturdifferenzen (rechts).

Durch die Gasentwicklung im Betrieb steigt der Gegendruck und somit auch die Druckdifferenz im Teststapel an. Je höher die Gasproduktion, desto höher ist auch die Druckdifferenz. Bei der niedrigsten Temperatur von 50 °C und somit dem höchsten Überpotential wird mehr Wärme freigesetzt und dadurch auch ein höherer Volumenstrom des Prozesswassers zum Kühlen benötigt. Bei einem Betrieb bis 3  $\text{A cm}^{-2}$  reicht ein spezifischer Volumenstrom von 5  $\text{ml min}^{-1} \text{cm}^{-2}$  aus, um unter dem angepeilten Temperaturanstieg von 2 K zu bleiben. Bei höheren Strömen ist die Wärmeentwicklung bei 50 °C zu hoch.

Nun sind in Abbildung 26 die Kennlinien bei der höchsten Temperatur von 80 °C dargestellt.

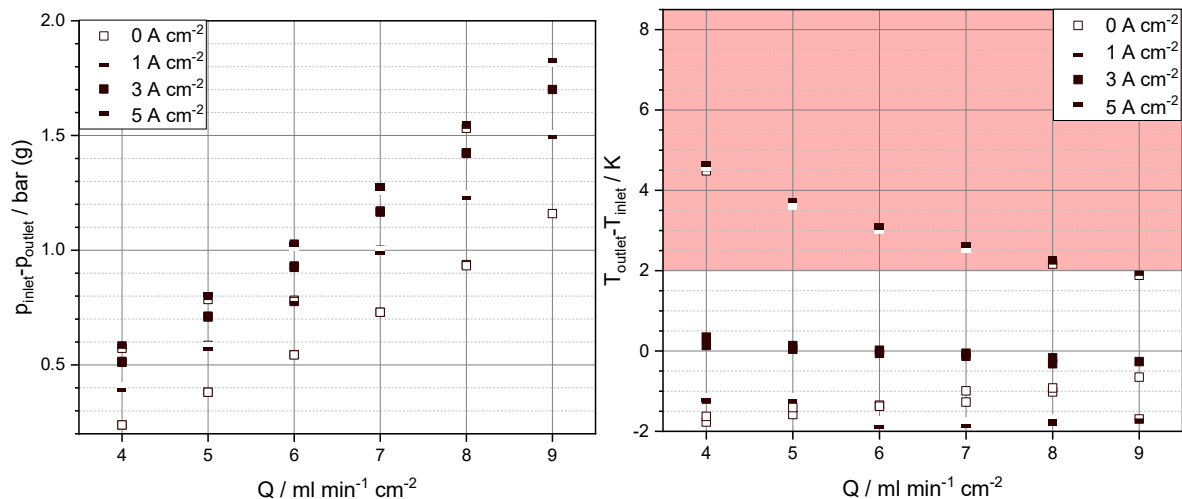


Abbildung 26: Hydraulikkennlinien im Elektrolysebetrieb bei 80 °C und vier Betriebspunkten (links) und zugehörige Temperaturdifferenzen (rechts).

Bei 80 °C sind die Hydraulikkennlinien durch die geringere Viskosität des Prozesswassers zu leicht niedrigerem Druck verschoben. Aufgrund des durch die Temperatur deutlich niedrigeren Überpotentials sind die Temperaturdifferenzen deutlich kleiner als bei 50 °C. Bis 3  $\text{A cm}^{-2}$  ist die Temperaturdifferenz nahezu null bis negativ. Dies deutet darauf hin, dass hier ein optimaler Volumenstrom eingestellt ist, der sogar noch leicht verringert werden könnte. Auch bei hohen Stromdichten von 5  $\text{A cm}^{-2}$  kann beim höchsten Volumenstrom von 9  $\text{ml min}^{-1} \text{cm}^{-2}$  die Temperaturdifferenz auf 2 K begrenzt werden, weswegen im weiteren Verlauf lediglich dieser Volumenstrom genutzt wird.

Zur weiteren Charakterisierung wurden UI-Kennlinien bei verschiedenen Temperaturen aufgenommen, welche in Abbildung 27 dargestellt sind.

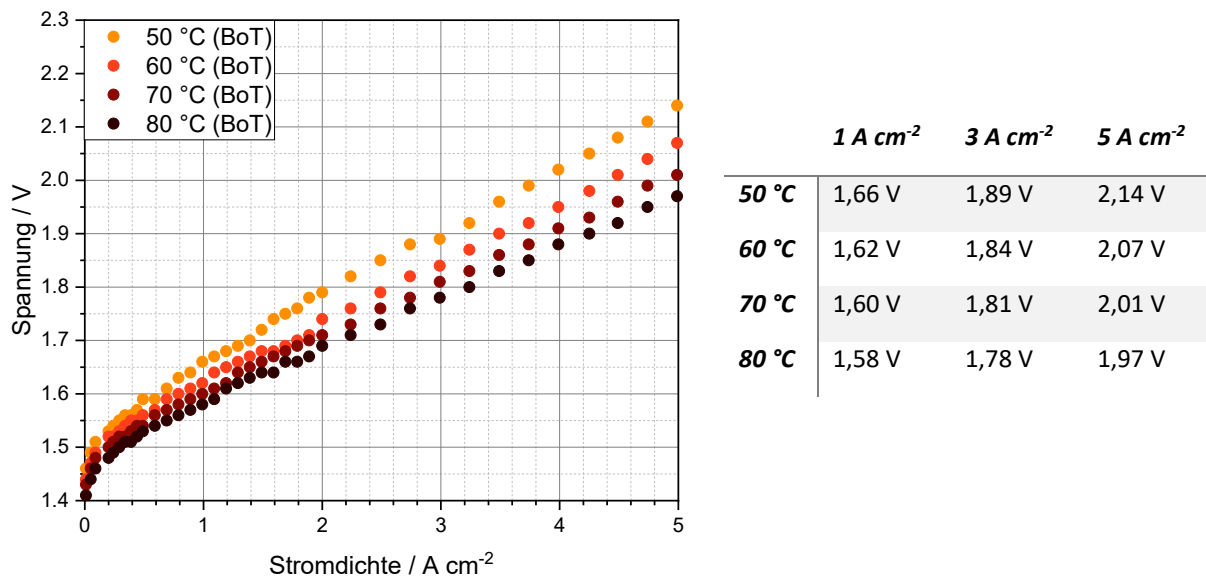


Abbildung 27: UI-Kennlinien zu Anfang des Tests (engl. Begin of Test, BoT) bei verschiedenen Temperaturen.

Durch lineare Geradenanpassung im ohmschen Bereich ( $1 - 4 \text{ A cm}^{-2}$ ) nimmt der ohmsche Widerstand des Teststapels von 50 bis 80 °C von  $119 \text{ m}\Omega \text{ cm}^2$  auf  $96 \text{ m}\Omega \text{ cm}^2$  ab. Dies ist überwiegend durch die bessere Ionenleitfähigkeit der Membran zu begründen. Die Performance unterbietet bei 80 °C die Zielspannung von 1,8 V bei  $3 \text{ A cm}^{-2}$  als technisches Ziel von PEM-Elektrolyseuren im Jahre 2026 des amerikanischen *Department of Energy*<sup>[1]</sup>.

Nach der Eingangscharakterisierung wurde der Teststapel mit dem in AP5.1 entwickelten AST für 375 Stunden belastet und danach wieder UI-Kennlinien bei verschiedenen Temperaturen aufgenommen, um die Degradation bestimmen zu können. Diese sind in Abbildung 28 dargestellt.

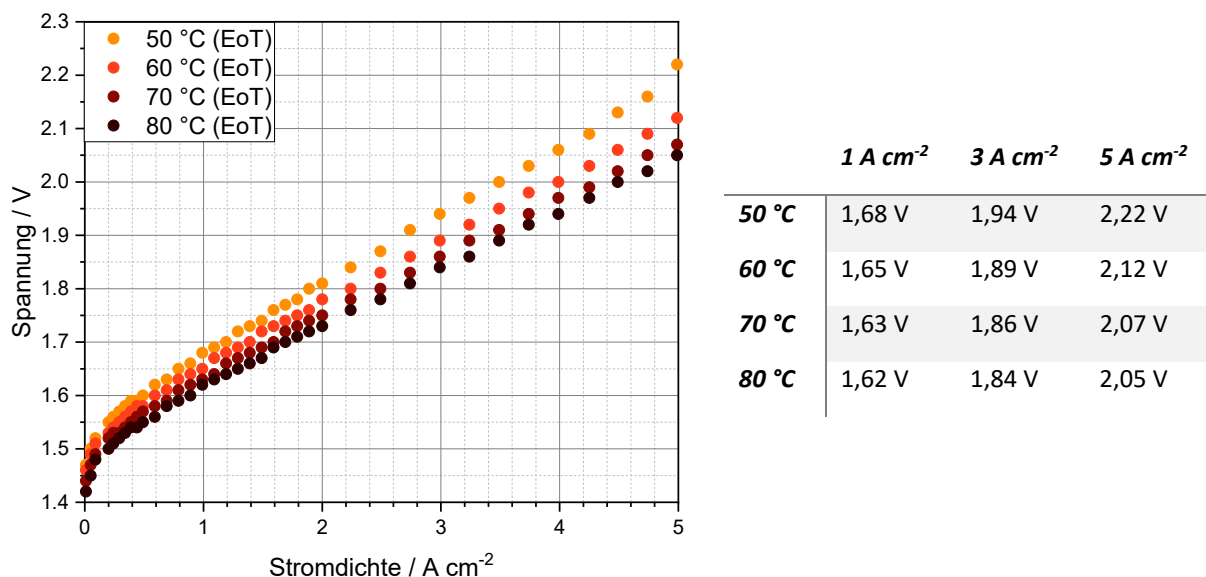


Abbildung 28: UI-Kennlinien nach Ende des Tests (engl. End of Test, EoT) bei verschiedenen Temperaturen.

Um Erkenntnisse über Degradation durch Erhöhung des Widerstands zu erlangen, wurde auch hier eine lineare Geradenanpassung durchgeführt. Der ohmsche Widerstand nahm bei 50 °C auf  $128 \text{ m}\Omega \text{ cm}^2$  zu und bei 80 °C auf  $108 \text{ m}\Omega \text{ cm}^2$ . Die erwartete Spannungszunahme durch

Erhöhung des Widerstands am Punkt  $3 \text{ A cm}^{-2}$  liegt bei 36 mV. Es ist allerdings eine Erhöhung 50 - 60 mV verzeichnet, was auch bspw. auf kinetische oder Massentransportverluste zurückzuführen ist.

Anschließend wurde ein Teststapel mit **drei identischen Zellen** aufgebaut und charakterisiert. Um die Auslegung der Verteilerplatte und Kanäle zu überprüfen, werden zunächst die Hydraulikkennlinien verglichen. Diese sind in Abbildung 27 für eine Temperatur an mehreren Betriebspunkten dargestellt.

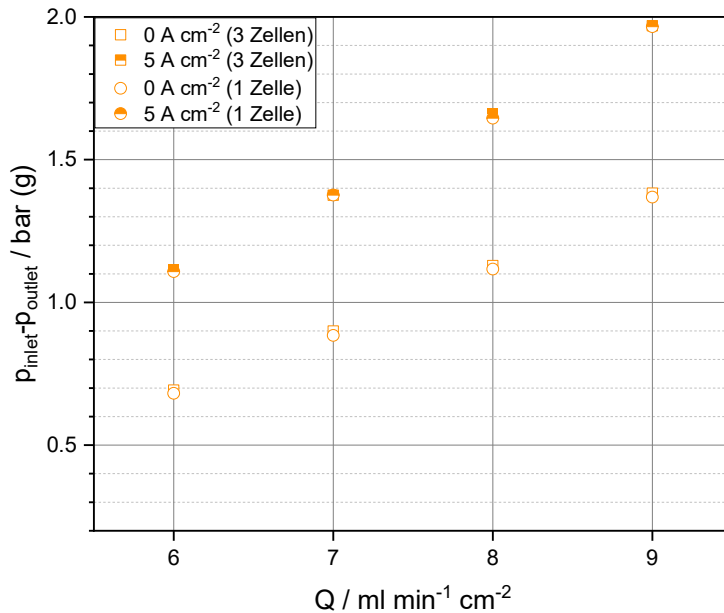
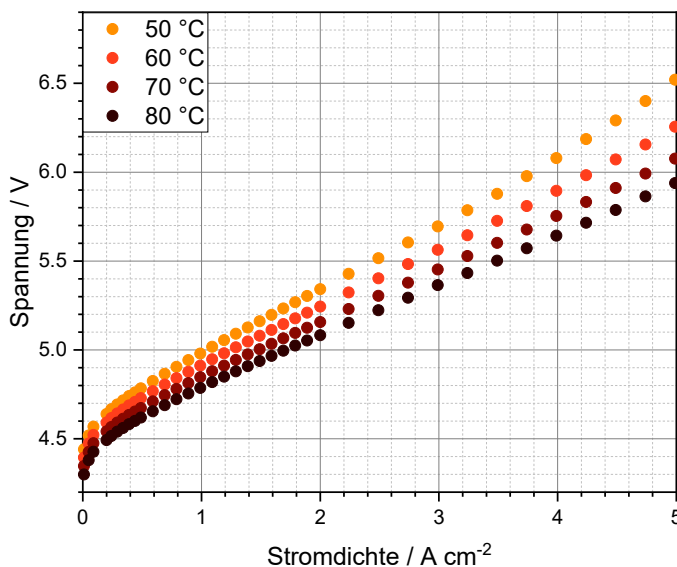


Abbildung 29: Vergleich der Hydraulikkennlinien des Einzelzell- und Dreizellstapels bei 50 °C und zwei Lastpunkten.

Der Druckabfall der Teststapel mit einer und drei Zellen zeigen keine signifikanten Unterschiede, was für eine optimale Auslegung der Verteilerplatte und -kanäle spricht.

Es folgen die UI-Kennlinien sowohl vom gesamten Stapel als auch von den einzelnen Zellen. Als Erstes sind die UI-Kennlinien des gesamten Stapels bei verschiedenen Temperaturen in Abbildung 30 gezeigt.



|              | $1 \text{ A cm}^{-2}$ | $3 \text{ A cm}^{-2}$ | $5 \text{ A cm}^{-2}$ |
|--------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <b>50 °C</b> | 4,9796 V              | 5,6949 V              | 6,5200 V              |
| <b>60 °C</b> | 4,9118 V              | 5,5637 V              | 6,2560 V              |
| <b>70 °C</b> | 4,8462 V              | 5,4529 V              | 6,0763 V              |
| <b>80 °C</b> | 4,7865 V              | 5,3648 V              | 5,9384 V              |

Abbildung 30: UI-Kennlinien des gesamten Stapels bei verschiedenen Temperaturen.

Auch beim Dreizeller wurden die DoE Ziele für 2026<sup>[1]</sup> bei 80 °C unterboten. Der gesamte ohmsche Widerstand des Stapels liegt bei 361 mOhm cm<sup>2</sup> bei 50 °C und bei 283 mOhm cm<sup>2</sup> bei 80 °C. Diese

Werte sind demnach direkt vergleichbar zum Stapel mit einer Zelle und es gibt vermutlich kein Kontaktierungsproblem beim Stapeln. Als nächstes werden die UI-Kennlinien der drei einzelnen Zellen gemittelt und die Standardabweichung bestimmt. Es folgen in Abbildung 31 sowohl die UI-Kennlinien der Einzelzellen als auch die gemittelten UI-Kennlinien der Einzelzellen des Stapels.

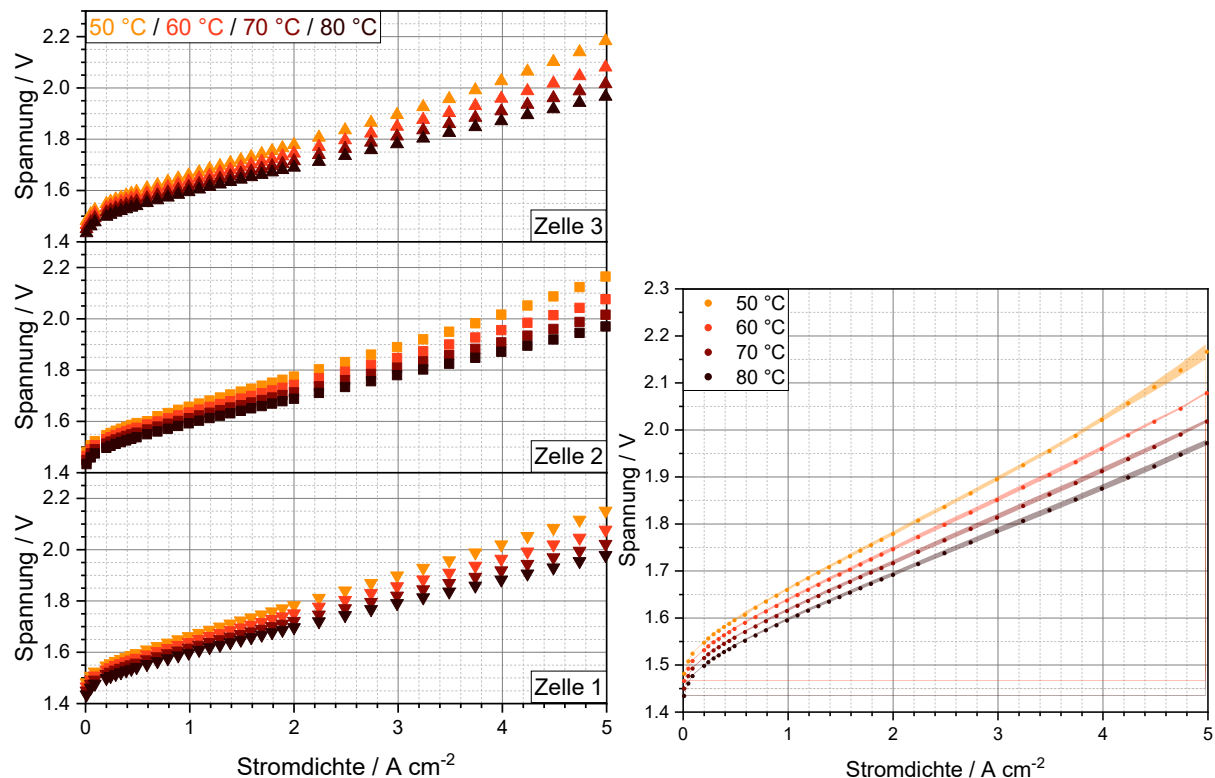


Abbildung 31: UI-Kennlinien der Einzelzellen des Stapels (links) und gemittelte UI-Kennlinien der Einzelzellen des Stapels und Standardabweichung (rechts) bei verschiedenen Temperaturen.

Wie in Abbildung 31 auf der rechten Seite zu sehen, ist die Abweichung der Einzelzellen mit wenigen Ausreißern maximal zwischen 5-6 mV. Dies deutet auf eine sehr homogene Verteilung des Anpressdrucks und des Prozesswassers hin. Die Einzelzellen weisen einen ohmschen Widerstand von 118 mOhm cm<sup>2</sup> (Zelle 1), 118 mOhm cm<sup>2</sup> (Zelle 2) und 120 mOhm cm<sup>2</sup> (Zelle 3) bei 50 °C auf. Das ist leicht weniger als der gesamte Stapel und dadurch zu erklären, dass die Zellspannung der Einzelzellen direkt an den Bipolarplatten gemessen wurde und die Stapelspannung an den Stromabnehmern. Der zusätzliche Widerstand der Stromabnehmer und PTL als Kontaktierung der BPP liegt somit bei etwa 5 mOhm cm<sup>2</sup>.

### 3) Bewertung der erzielten Ergebnisse in Gegenüberstellung mit den Zielsetzungen Antrages, Bezugnahme auf die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit, Bezugnahme auf die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Gegenüberstellung mit den Zielsetzungen des Antrages:

Die wesentlichen Projektmeilensteine wurden erreicht: Mit dem optimierten Stapeldesign (AP2) liegt ein flexibles 100 cm<sup>2</sup>-Konzept vor, und mit der Funktionsprüfung (AP4) konnte die Leistungsfähigkeit nachgewiesen werden. Insbesondere wurde eine sehr gute Performance bis 5 A cm<sup>-2</sup> demonstriert.

Nicht vollständig erreicht wurde das Ziel der Druckstabilität bis 35 bar; auch die praktische Demonstration der Flexibilität im Betrieb konnte nicht mehr erfolgen. Ein wesentlicher Grund dafür war die größere Komplexität der Dichtungsaufgabe: Die Abdichtung bei hohem Druck stellte sich als deutlich umfangreicher und anspruchsvoller heraus als zu Projektbeginn angenommen. Dies zeigt sich auch aktuell als Problemstellung in größeren, industriegeführten Vorhaben. Infolge der hohen technischen Herausforderungen beim Herstellen der PEEK-Rahmen und beim Abdichten des Stapels entstand erheblicher Mehraufwand. Dieser führte dazu, dass der geplante Aufbau einer breiten Komponentenvarianz nicht mehr vollständig umgesetzt werden konnte. Beide Punkte sind jedoch konstruktiv vorbereitet, beispielsweise durch die Auslegung variabler Dichtrahmen.

Über die Antragstellung hinaus wurde ein beschleunigtes Alterungsprotokoll (AST) entwickelt, das in kurzer Zeit eine realistische Degradation des Stapels erzeugt und damit die Aussagekraft von Tests erheblich steigert.

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit:

Die durchgeführten Arbeiten in den Bereichen Stapeldesign, Dichtungsapplikation, Qualitätssicherung und Komponentenvalidierung waren zur Erreichung der Projektziele zwingend erforderlich. Der Personal- und Sachaufwand war angemessen und stand in einem klaren Verhältnis zum erreichten Erkenntnisgewinn. Durch die Arbeiten konnte das notwendige Know-how am ZBT im Bereich Stapeldesign und -Aufbau, sowie AST-Tests für die PEMWE deutlich erweitert werden.

Bezugnahme auf die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises:

Die eingesetzten Fördermittel entfielen im Wesentlichen auf Personalmittel sowie die Beschaffung und Bearbeitung von Materialien und Komponenten. Alle Mittel wurden sparsam und zweckentsprechend eingesetzt. Die im Projekt entwickelten Anlagen und Stapelkomponenten stehen nach Projektende für weitere Forschungsvorhaben und Dienstleistungen zur Verfügung, wodurch eine nachhaltige Nutzung der Mittel gewährleistet ist.

## 4) Darstellung der Innovationspotenziale und Applikationsmöglichkeiten

### 4.1) Wissenschaftliche und wirtschaftliche Bedeutung der Ergebnisse

Die im Projekt entwickelte Testplattform für PEM-Wasserelektrolyseure mit einer aktiven Zellfläche von 100 cm<sup>2</sup> als mehrzelliger Aufbau stellt einen wichtigen wissenschaftlichen Beitrag dar, da sie den Übergang von kleinformatigen Laborzellen ( $\leq 25$  cm<sup>2</sup>) zu anwendungsnahen Zellflächen ermöglicht. Damit können flexible Material- und Komponentenuntersuchungen unter realistischeren Betriebsbedingungen durchgeführt werden. Jede einzelne Komponente kann getauscht und durch Anpassungen anderer Komponenten auch einzeln evaluiert und verglichen werden. Auf diese Weise leistet das Projekt einen wesentlichen Beitrag zum besseren Verständnis von dem Zusammenspiel der Komponenten in der PEMWE und ermöglicht auch die Validierung neuer Komponenten im Stapelverbund.

Wirtschaftlich sind die Ergebnisse relevant, da die Plattform die Entwicklungszyklen für Komponentenhersteller erheblich verkürzt. Durch die flexible Integration unterschiedlicher CCM, PTL und Separatorplatten lassen sich Materialvarianten direkt vergleichen, wodurch

Entscheidungsentscheidungen beschleunigt und Kosten für aufwendige Großstapeltests eingespart werden. Somit stärkt das Projekt nicht nur die Grundlagenforschung, sondern trägt auch unmittelbar zur Wettbewerbsfähigkeit der Industrie im Bereich Wasserstofftechnologien bei.

#### 4.2) Internes Innovations- und Anwendungspotenzial (eigene Nutzung der Ergebnisse, Folgeprojekte)

Die Testplattform bildet die Grundlage für zukünftige Forschungsarbeiten und eröffnet neue Chancen für Verbundprojekte und bilaterale Kooperationen mit KMU, die von den flexiblen Prüf- und Validierungsmöglichkeiten profitieren können.

Für das ZBT bietet die entwickelte Plattform ein hohes internes Innovationspotenzial. Sie dient künftig als zentrale Forschungs- und Entwicklungsumgebung zur Charakterisierung neuer Materialien, Dichtungskonzepte und Zelldesigns im mittleren Zellflächenmaßstab. Insbesondere die Flexibilität bei der Anpassung von CCM, PTL und Flussfeldern ermöglicht eine schnelle Umsetzung neuer Projektideen sowie industriennahe Machbarkeitsstudien.

Die Plattform wird in künftigen Verbund- und Industrieprojekten genutzt, um Komponenten unter realistischen Betriebsbedingungen zu evaluieren und vergleichend zu testen. Darüber hinaus erlaubt sie den Aufbau sogenannter „Regenbogenstapel“, bei denen unterschiedliche Materialvarianten parallel betrieben werden, was eine einzigartige Möglichkeit für schnelles Benchmarking darstellt.

#### 4.3) Darstellung erworbener bzw. anzumeldender Schutzrechte

Bisher sind keine Schutzrechte angemeldet worden und es wird aktuell nicht geplant Schutzrechte anzumelden.

#### 4.4) Spätere Applikationsmöglichkeiten für die mittelständische Industrie und Transferkonzept

Das Testplattform wird auf Workshops, Konferenzen und Messen vorgestellt. Parallel wird die Möglichkeit überprüft eine abgewandelte Form KMU zur freien Verfügung (Open Source Hardware) zu stellen, um die Entwicklung einzelner Komponenten voranzutreiben.

### 5) Zusammenstellung aller erfolgten bzw. geplanten Veröffentlichungen

|         |                                                                                                                                                                                                       |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 05/2024 | PEM electrolysis: from components characterization to lifetime prediction of stacks, Vortrag, Power-to-X Symposium 2024, Aarhus (DK)                                                                  |
| 02/2025 | PEMWE und AEMWE im Vergleich: Gemeinsamkeiten und Unterschiede, Vortrag, ZBT-Wasserstofftage 2025, Duisburg (DE)                                                                                      |
| 04/2025 | PEMWEST-Stapel als Ausstellungsstück am ZBT-Messestand, Hannover Messe 2025, Hannover (DE)                                                                                                            |
| 11/2025 | PEMWEST: Development of a modular high-pressure electrolysis stack as a test platform for the qualification of materials and components, Postervortrag, Hydrogen Energy Symposium 2025, Duisburg (DE) |

## 6) Referenzen

- [1] U.S. Department of Energy, Technical Targets for Proton Exchange Membrane Electrolysis, abgerufen am 30. September 2025, unter <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/technical-targets-proton-exchange-membrane-electrolysis>