

# Schlussbericht

---

Zuwendungsempfänger:

**inhouse engineering GmbH**

Förderkennzeichen:

**03BH205A**

---

Vorhabensbezeichnung:

**Feldtestbegleitprojekt: Optimierung eines Feldtestsystems, „in5000plus“**

---

Laufzeit des Vorhabens:

**01.07.2010 – 31.12.2013**

---

Berichtszeitraum:

**01.07.2010 – 31.12.2013**

---

## Feldtestbegleitprojekt: Optimierung eines Feldtestsystems, „in5000plus“

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) gefördert und vom Projektträger Jülich (PTJ) betreut.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

### Projektpartner/ Förderkennzeichen:



03BH205A

inhouse engineering GmbH

IE



03BH205B

SolviCore GmbH & Co. KG

SC



03BH205C

Riesaer Brennstoffzellen-  
technik GmbH

RBZ

### Laufzeit:

01.07.2010 – 31.12.2013

### Redaktion:

Dipl.-Ing. (FH) Frank Beckmann, inhouse engineering GmbH

## Autorenliste nach Projektpartnern

Christoph Hildebrandt, Dipl.-Ing. (FH) inhouse engineering GmbH

Frank Beckmann, Dipl.-Ing. (FH) IE

Stefan Andersch, Dipl.-Ing (FH). SolviCore GmbH & Co. KG

Christian Eickes, Dr. SC

Katrin Grosser, Dr. Riesaer Brennstoffzellentechnik GmbH

RBZ

Die Dokumentation stellt die Ergebnisse aus einem Forschungs- Verbundprojekt dar.  
Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1. Hintergrund des Projektes</b> .....	<b>5</b>
1.1 Aufgabenstellung .....	5
1.2 Voraussetzungen .....	7
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens.....	10
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand am Projektbeginn.....	12
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	14
<b>2. Darstellung der erzielten Ergebnisse</b> .....	<b>15</b>
2.1 AP 1 Verfahrenstechnische Analyse des Systems unter Nutzung von Feldtestdaten	15
2.2 AP 2 Entwicklung / Optimierung der systemischen Betriebsparameter und Ableitung/ Aktualisierung der Komponentenanforderungen .....	24
2.3 AP 3 Fehler und Ausfallanalyse unter Nutzung der Feldtestdaten.....	32
2.4 AP 4 Entwicklung/ Optimierung der Einzelkomponenten.....	37
2.5 AP5 Implementierung von Messverfahren für Zustandsanalysen im Labor und im Feldtest.....	54
2.6 AP 6 Bau und Test eines Demonstrators inhouse5000+ .....	59
2.7 AP 7 verfahrenstechnische Analyse von Feldtestdaten für Typenklassifizierung und Gebäudeintegration.....	66
2.8 AP 8 Recycling.....	69
2.9 AP9 Entwicklung eines Wirtschaftlichkeitskonzeptes .....	69
2.10 AP 10 Projektkoordination.....	73
<b>3. Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse</b> .....	<b>74</b>
<b>4. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen</b> .....	<b>74</b>
<b>5. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen</b> .....	<b>75</b>
<b>6. Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>76</b>
<b>7. Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>77</b>
<b>8. Quellenverzeichnis</b> .....	<b>78</b>
<b>9. Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>78</b>

## 1. Hintergrund des Projektes

### 1.1 Aufgabenstellung

Brennstoffzellen sind in den verschiedensten Anwendungsbereichen zur bedarfsgerechten Bereitstellung elektrischer Energie einsetzbar. Üblicherweise wird in portable, mobile und stationäre Anwendungen unterschieden. Durch die hohe Effizienz der Energiewandlung können und werden diese Systeme zum Erreichen der Klimaschutzziele beitragen, wofür verschiedene nationale und europäische Programme aufgelegt wurden. Ebenso wird führend in den USA sowie Japan und Korea die Einführung der Brennstoffzellentechnologie durch Fördermaßnahmen unterstützt.

In den vergangenen Jahren fand im Bereich der Brennstoffzellen eine rasante Entwicklung statt. In Labortests und Feldtests konnte die Funktionsfähigkeit, die Anwendbarkeit von Brennstoffzellensystemen und das enorme Potenzial der Brennstoffzellentechnologie nachgewiesen werden.

Ein PEM-Brennstoffzellen-Heizgerät dient der stationären Versorgung von Gebäuden mit Strom und Wärme. Es besteht aus den Kernkomponenten (Abb. 1):

- PEM-Brennstoffzellen-Stack zur Generation von Strom und Wärme aus Wasserstoff und Luftsauerstoff
- Brennstoffzellen-Modul zur Konditionierung der erforderlichen Medien (Luft und wasserstoffreiches Reformat sowie Kühlwasser für den Abtransport der im Prozess entstehenden Wärme)
- Reformiermodul zur Bereitstellung des benötigten Wasserstoffs in hoher Qualität mittels integriertem Prozess der Dampfreformierung von Erdgas
- Balance of Plant zur Zuführung, Aufbereitung und Dosierung der Medien Erdgas, Prozesswasser, Kühlwasser sowie zur Abführung der Abgase mit Brennwertnutzung
- Elektronik-Modul sowie Leistungselektronik mit Wechselrichter

Die Projektpartner IE und RBZ arbeiten seit mehreren Jahren in der Entwicklung von Brennstoffzellenheizgeräten zusammen und führten mit fünf Systemen vom Typ inhouse5000 zweijährige Feldtests im Rahmen des Nationalen Innovationsprogrammes „Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie“ (NIP /1/) durch. Begleitend zum Feldtest wurde mit dem vorliegenden Projekt „Optimierung eines Feldtestsystems“ das Ziel verfolgt, auf der Grundlage des Brennstoffzellensystems inhouse5000 die neue Generation für das netzgekoppelte, lebensdauer- und effizienzoptimierte NT-PEM Brennstoffzellensystem **inhouse5000+** für die stationäre Energieversorgung zu entwickeln und als Demonstrator zu testen. Das entwickelte System wird für die Markteinführungsphase genutzt.

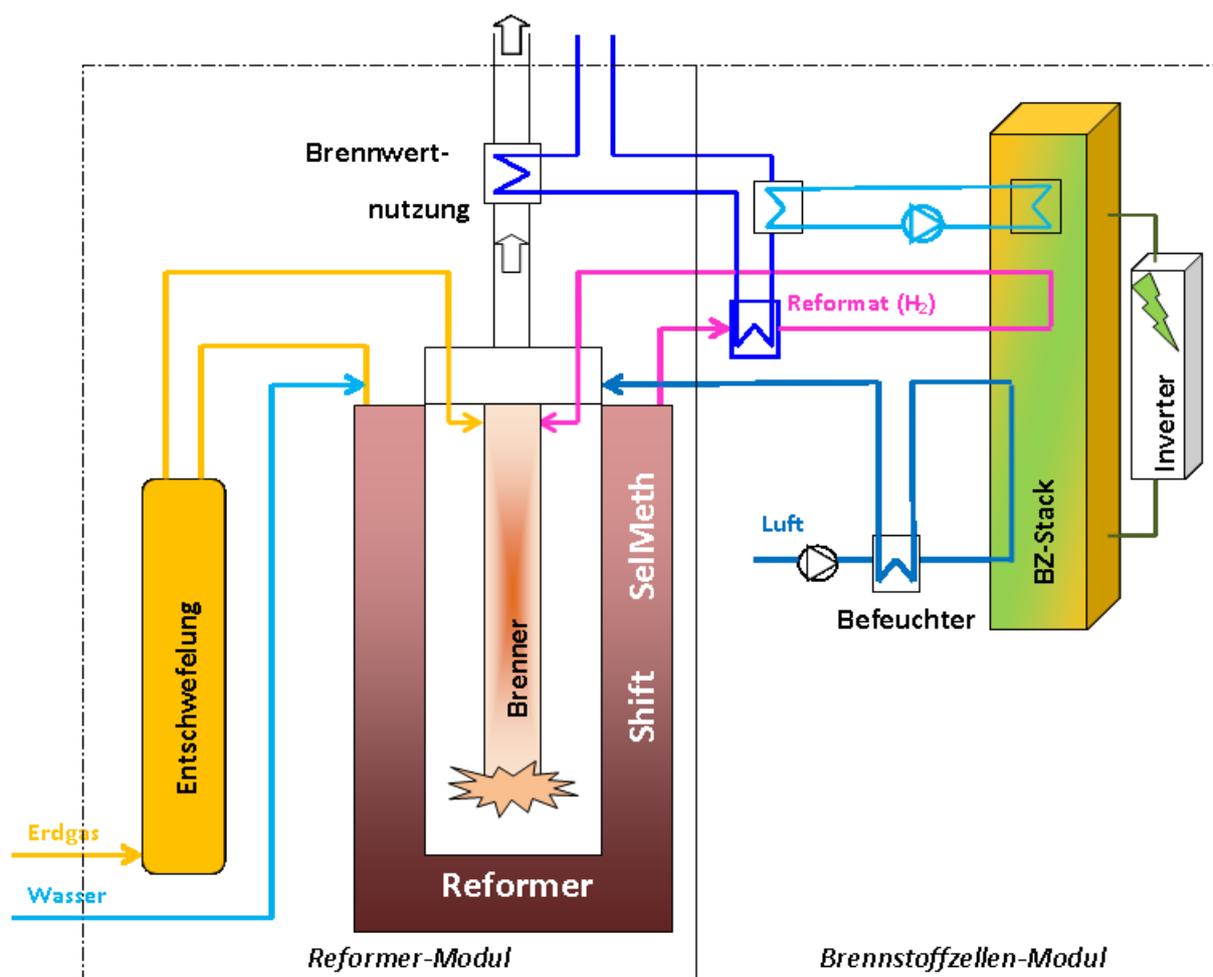


Abbildung 1 vereinfachtes Schema Brennstoffzellen-BHKW inhouse5000+

Daraus wurden die übergeordneten Projektziele in Form von verbesserten Performancewerten für das *inhouse5000+* System wie folgt definiert:

- hoher elektrischer Wirkungsgrad von 40 % (netto)
- hoher Gesamtwirkungsgrad von > 90 %
- Endkunden tauglicher Preis von 4.000,00 €/ kW elektrisch, d.h. Systempreis 20.000,00 €
- Effizienzsteigerung durch die Rückgewinnung von Verlustenergien
- Lebensdauer des PEM Stacks von mittelfristig 30.000 h\* zum Projektende 2013 und längerfristig 40.000 h (2015/2017)
- Degradationsrate des NT-PEM-Brennstoffzellenstacks < 5 mV/ 1000 h

Um diese Ziele zu erreichen, wurden die Kernkompetenzen der Projektpartner genutzt und ausgebaut. Zum einen wurden die Grundlagenuntersuchungen der Partner *inhouse* und *Solvicore* zum Brennstoffzellen-Stack im Rahmen weiterführender industrieller Forschungen spezifiziert und an die Ziele angepasst, zum anderen wurden die Ergebnisse aus den laufenden Feldtests kontinuierlich ausgewertet und in der Entwicklung des optimierten Systems berücksichtigt.

## 1.2 Voraussetzungen

Die im Projekt genutzten Expertisen werden im Folgenden jeweils für die einzelnen Partner beschrieben.

### **SolviCore GmbH & Co KG (SC)**

Umicore AG & Co KG verfügt über umfangreiches Know-how auf den Gebieten Katalyse, Edelmetalle und Oberflächentechnologie.

Der in Hanau angesiedelte Geschäftsbereich Fuel Cells und das Joint-Venture SolviCore entwickeln und vertreiben Elektrokatalysatoren, Katalysatoren für Wasserstoffherzeugung sowie -reinigung und Membran-Elektroden-Einheiten als wesentliche Komponenten moderner Brennstoffzellensysteme. Die Entwicklung stützt sich auf fünfzehn Jahre Forschung und Entwicklung im Bereich der Membranelektroden-Einheiten für Brennstoffzellen.

Seit dem 1.7.2006 werden die Aktivitäten der Umicore zu Entwicklung, Herstellung und Verkauf von Membran-Elektroden-Einheiten für Brennstoffzellen in dem oben erwähnten Joint Venture SolviCore weitergeführt. Die SolviCore ist jeweils zu 50% im Besitz der Umicore und der Solvay. Der Standort der SolviCore ist Hanau.

Im Rahmen des BMBF-Leitprojekts „PEM-Brennstoffzelle für mobile Anwendungen – Teilprojekt Katalysatorentwicklung“ (FKZ 0329567F, Projektpartner: Daimler-Benz, Laufzeit: 1994 - 1998) wurden bereits in Vorläuferorganisationen der SolviCore (Degussa) Elektrokatalysatoren und auch MEAs für PEM-Brennstoffzellensysteme entwickelt.

Die Membran-Elektroden-Einheiten wurden von SolviCore in den Folgejahren in anwendungsorientierten Projekten mit Systemherstellern für die jeweiligen Anwendungen weiter entwickelt.

Eine Weiterentwicklung der Membran-Elektroden-Einheiten für die stationäre Anwendungen auf Basis Erdgas erfolgt durch SolviCore in den BMWA-Verbundvorhaben „Erdgasbetriebene Hausenergieversorgungsanlage II und III“ (Förderkennzeichen 0326875c und 0327751D, Projektpartner: Viessmann).

SolviCore ist weiterhin Projektpartner in den deutsch-französischen Projekten „MDM – MEA-Degradationsmechanismen in PEM-Brennstoffzellen-Systemen für stationäre Backup-Power Systeme“ (FKZ 0327795) Projektpartner: Axane, Air Liquide (2008 – 2010).

SolviCore befasst sich in diesem Projekt mit der Weiterentwicklung von Membran-Elektroden-Einheiten für stationäre, wasserstoffbetriebene PEM-Brennstoffzellensysteme zur Notstromversorgung.

„Mephisto – PEM-Brennstoffzelle unter winterlichen Betriebsbedingungen: Inbetriebnahme, Funktion und Lagerung“, Partner: PSA, CEA (2006 – 2009).

Im Mephisto – Projekt untersucht SolviCore zusammen mit den Partnern die Auswirkungen von winterlichen Betriebsbedingungen auf Membran-Elektroden-Einheiten (MEA) in Brennstoffzellenstapeln für Automobile und entwickelt verbesserte MEA-Technologien für diese Bedingungen.

In den BMBF - Verbundprojekten

KonnEkt (03X2015F) „Konzeption und Entwicklung langzeitstabiler Hochleistungs-Elektroden für Automobile Brennstoffzellen (KonnEkt)“. Partner: Daimler, Evonik, Umicore (2007 – 2009).

Im KonnEkt – Projekt entwickelt SolviCore Membran-Elektroden-Einheiten auf Basis von konventionellen kohlenstoffgeträgerten Katalysatoren und Trägermaterialien der Partner für automobiler Brennstoffzellen.

DDMFC (FKZ 16SV3282). „Mikro-Direktbrennstoffzelle in Spritzgußtechnik mit diffusiver Luftversorgung und dampfförmiger Brennstoffzufuhr für portable Elektronik“, Partner: FEW, SGL Carbon, FumaTech und FhG-ISE u.a. (2007 – 2010).

SolviCore entwickelt in diesem Projekt spezielle MEAs für ein Methanoldampfbetriebenes, passives Mikro-Brennstoffzellensystem und ein entsprechendes Herstellverfahren für diese kleinformigen MEAs.

### ***inhouse engineering GmbH (IE)***

Die Firma inhouse engineering GmbH ist ein mittelständisches Unternehmen mit Sitz in Berlin. Sie ist in 2 Geschäftsfeldern mit insgesamt 22 Mitarbeitern tätig:

#### ***Effiziente Energiesysteme (Hauptgeschäftsfeld)***

In diesem Bereich werden gewerkeübergreifende und komplexe Steuerungssysteme in der Gebäudeautomation realisiert. Es wird mit der Projektierung, Programmierung/ Visualisierung, Schaltschrankbau, Inbetriebnahme und Wartung/ Kundendienst das volle Spektrum zur Realisierung effizienter Gebäudeleitsysteme abgedeckt. Typische Objekte sind Büro- und Verwaltungsgebäude, Botschaften, Hotels, Krankenhäuser, Industrieanlagen sowie Klär- und Wasserwerke.

#### ***Brennstoffzellensysteme***

Schwerpunkt ist die Entwicklung von reformat- und wasserstoffbetriebenen PEM-BZS und PEM-BZM bis 5 kW elektrisch für die stationäre Energieversorgung (Kraft-Wärme-Kopplung). Typische Anwendungsobjekte sind Mehrfamilienhäuser, Hotels, Bürogebäude und kleinere Gewerbebetriebe. Weiterhin werden in diesem Geschäftsfeld kundenspezifische Lösungen für die Anwendung und Testung von Brennstoffzellensystemen entworfen.

Inhouse engineering kann sich auf 14 Jahre Erfahrung in der Entwicklung von PEM Brennstoffzellen stützen. Über die Beteiligung in den nachfolgenden Projekten wurde umfangreiches Know-how aufgebaut. Ergänzt wurde dies durch konsequente Zusammenarbeit mit externen Partnern, z.B. Stadtwerken.

Im Verbundprojekt „Ebba III – Entwicklung und Feldtest von PEM Brennstoffzellenanlagen für die dezentrale Energieversorgung im Leistungsbereich bis 12 kW“ (FKZ 0327141 / 2001 - 2004) wurde ein System und Komponenten für erdgasbetriebene Brennstoffzellensystem im Bereich 4 kW entwickelt.

Im Programm Innovationskompetenz mittelständischer Unternehmen erfolgte die „Optimierung der Flowfieldkonstruktionstechnologie“ (FKZ KF0383901KWM2/ 2002-2005)

Im Energieforschungsrahmenprogramm wurde das Verbundvorhaben „MÖWE – Entwicklung eines Dampfreformers zur dezentralen Wasserstoffherzeugung auf Basis von Heizöl EL und Systemerprobung an einem stationären PEM Brennstoffzellensystem“ (FKZ 0327724B/ 2005 – 2008) durchgeführt.

Im Programm INNOWATT sind „Verbund- und Mehrstoffkomponenten für PEM Reformatstacks“ (FKZ IW060056/ 2006 – 2007) untersucht worden.

Im Energieforschungsrahmenprogramm wurde im Verbundvorhaben „EbbaIV – Entwicklung eines PEM Brennstoffzellensystems mit Hochtemperaturmembranen das Teilprojekt „Hochtemperatur-PEM-Stack mit Peripherie“ (FKZ 0327141 K 2006 – 2009) bearbeitet.

Im Energieforschungsrahmenprogramm ist für das Verbundvorhaben „MÖWE II – Entwicklung eines Dampfreformermoduls basierend auf Diesel zur Wasserstoffversorgung eines Brennstoffzellenmoduls für den Einsatz in mobilen Anwendungen ein Brennstoffzellenmodul und Steuerung entwickelt worden (FKZ 0327724 F/ 2009 – 2011). Im Programm Wachstumskerne Potenzial wird im Projekt „hyRef – Entwicklung und Fertigung eines Dampfreformermoduls zur Wasserstoffherzeugung; das Teilprojekt „Entwicklung eines Brennstoffzellenstacks und verfahrenstechnische Verschaltung“ (FKZ 03WKP05D/ 2009 – 2011) bearbeitet.

### ***Riesaer Brennstoffzellentechnik GmbH (RBZ)***

Die Firma Riesaer Brennstoffzellentechnik GmbH ist ein mittelständisches Unternehmen mit Sitz in Glauchitz/ Sachsen. Sie ist im Geschäftsfeld Brennstoffzellensysteme mit insgesamt 3 Mitarbeitern tätig, die langjährige Erfahrung im Bereich Reformerentwicklung und Systemintegration besitzen.

Schwerpunkt ist die Entwicklung von Erdgas-Dampf-Reformern für PEM-BZS bis 5 kW elektrisch für die stationäre Energieversorgung (Kraft-Wärme-Kopplung). Diese Reformer sind für Erdgas geeignet. Eine spätere Anwendung mit Flüssiggas ist in Planung. In einer Kooperation mit dem Agrartechnischen Institut Bornim wurde ein Reformer für eine Biogasanwendung angepasst und versorgte eine NT-PEM Brennstoffzelle.

Typische Anwendungsobjekte sind Mehrfamilienhäuser, Hotels, Bürogebäude und kleinere Gewerbebetriebe. Weiterhin werden in diesem Geschäftsfeld kundenspezifische Lösungen für die Anwendung und Testung von Brennstoffzellensystemen entworfen.

In Zusammenarbeit mit der inhouse engineering GmbH, der TU Bergakademie Freiberg und der DBI-GUT GmbH entwickelt RBZ die inhouse5000 Systeme. Die Endmontage der Systeme erfolgt bei der RBZ.

Im Programm Wachstumskerne Potenzial mit dem Projekt „hyRef – Entwicklung und Fertigung eines Dampfreformermoduls zur Wasserstoffherzeugung; Entwicklung eines Brennstoffzellenstacks und verfahrenstechnische Verschaltung“ (FKZ 03WKP05D/ 2009 – 2011) entwickelt, testet und optimiert die RBZ GmbH die erforderlichen BoP-Komponenten und setzt neue Ideen bei der Entwicklung der Gasfeinreinigung um.

### 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt „in5000plus“ wurde am 01.07.2010 begonnen und nach einer kostenneutralen Verlängerung um 6 Monate zum 31.12.2013 beendet. Es fanden halbjährliche Projekttreffen mit allen Partnern statt. Darüber hinaus gab es nach Bedarf Treffen innerhalb der einzelnen Arbeitspakete zur Abstimmung der einzelnen Teilaufgaben.

Als Projektkoordinator fungierte inhouse engineering GmbH. Das Projekt gliederte sich in zehn Arbeitspakete.

Die Ziele und die Partner waren den Arbeitspaketen wie folgt zugeordnet:

**AP1: *Verfahrenstechnische Analyse des Systems unter Nutzung von Feldtestdaten***

IE / RBZ

Ziele: über eine kontinuierliche, umfassende Datenerfassung den Lebens-zyklus eines inhouse5000 Systems zu analysieren und Schwachstellen zu erkennen.

**AP2: *Entwicklung / Optimierung der systemischen Betriebsparameter und Ableitung/ Aktualisierung der Komponentenanforderungen***

IE / RBZ / SC

Ziele: Entwicklung angepasster Betriebsparameter und Komponenten-anforderungen, um einen effizienten und kostengünstigen Betrieb der Systeme zu realisieren.

**AP3: *Fehler und Ausfallanalyse unter Nutzung der Feldtestdaten***

IE / RBZ / SC

Ziele: Untersuchung der Ausfallursache von Peripheriekomponenten, statistische Erfassung dieser und Charakterisierung mit standortspezifischen Faktoren.

Untersuchung ausgewählter MEAs aus den Feldtests mit in-situ und ex-situ – Analysemethoden.

**AP4: *Entwicklung/ Optimierung der Einzelkomponenten***

IE / RBZ / SC

Ziele: Für die MEA werden Entwicklungsarbeiten im Bereich Membran, Elektrode, Katalysator und Gasfeinverteilung, mit Fokus auf Reformat-anwendung bei SC erfolgen.

IE bearbeitet den Stack und das Brennstoffzellenmodul. Beim Stack betrifft dies die Entwicklung von angepassten Geometrien im Flowfield zur Homogenisierung von Stromdichte- und Temperaturverteilung, Optimierung von Stackdesign und MEA hinsichtlich Anpressdrücken und ohmschen Verlusten.

RBZ wird in dem Arbeitspaket das Reformermodule und BoP Komponenten bearbeiten. Für Brennstoffzellenmodul und Reformermodule werden verfahrenstechnische Lösungen entwickeln, um Komponenten einzusparen und Funktionen in den Modulen zusammenzufassen.

**AP5: *Implementierung von Messverfahren für Zustandsanalysen im Labor und im Feldtest***

IE / RBZ / SC

Ziele: Entwicklung und praktische Erprobung von Messverfahren zum Erhalten von degradationsrelevante Messdaten ohne MEA / Stack / Reformere zu zerlegen

**AP6: Bau und Test eines Demonstrators inhouse5000+**

IE / RBZ / SC

Ziele: Konstruktion, der Bau und der Test eines Mustergerätes vom Typ inhouse5000+. Alle in den vorhergehenden Arbeitspaketen gewonnenen Ergebnisse werden in diesem System umgesetzt.

**AP7: verfahrenstechnische Analyse von Feldtestdaten für Typenklassifizierung und Gebäudeintegration**

IE / RBZ

Ziele: Klassifizierung von Anwendungstypen unter Nutzung von Feldtestdaten und Rechercheergebnissen, um sie für die spätere Gebäudeintegration zu nutzen.

**AP8: Entwicklung eines Recyclingkonzeptes**

IE / RBZ / SC

Ziele: Erstellung komponentenspezifischer Konzepte zum Recycling, welche im Projektverlauf zu einem Gesamtkonzept zusammengesetzt werden.

**AP9: Entwicklung eines Wirtschaftlichkeitskonzeptes**

IE / RBZ / SC

Ziele: Entwicklung eines Wirtschaftlichkeitskonzeptes für das System. Erstellung fachspezifischer Teilkonzepte ausgerichtet auf die Kern-komponenten MEA, Stack, Brennstoffzellenmodul und Reformiermodul.

**AP10: Koordinierung**

IE

Dieses Arbeitspaket umfasst die folgenden Arbeiten:

- administrative Leitung des Projektes
- Koordination der einzelnen Arbeitspakete
- Abfrage und Standardisierung der Schnittstellen und Definitionen
- Planung und Durchführung von regelmäßigen Projekttreffen
- Sicherstellung der Kommunikation der einzelnen Projektpartner
- Organisation des Datenflusses und Kommunikation mit dem Feldtest „inhouse“

## 1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand am Projektbeginn

Im Bereich der Brennstoffzellentechnologie verfügt Deutschland neben den USA und Japan international über den höchsten technologischen Stand. Grundsätzlich hat die Brennstoffzelle in vorangegangenen Feldtests ihre Funktionalität unter Beweis gestellt. Ein hoher Entwicklungsstand wurde bereits erreicht. Für eine umfassende Markteinführung im stationären Bereich müssen jedoch die Zuverlässigkeit und Lebensdauer der Systeme erhöht und die Kosten gesenkt werden.

Neben der Firma Vaillant werden RBZ/ inhouse einer der wenigen Anbieter in Deutschland und Europa für diese Leistungsklasse sein. Die Firmen Baxi Innotech und Hexis entwickeln Systeme für den Einfamilienhaussektor mit einer elektrischen Leistung von 1 – 1,5 kW.

Viele Entwickler/Hersteller führen derzeit Feldtests mit ihren Systemen durch. Das Projekt „Callux“ mit den Entwicklern/ Herstellern Baxi Innotech, Hexis und Vaillant läuft seit 2008. Das Feldtestprojekt „inhouse“ mit dem Hersteller Riesaer Brennstoffzellentechnik GmbH läuft seit 2009. Ziel ist die Erprobung der Systeme im Alltagsbetrieb. Die im Test gewonnenen Daten fließen maßgeblich in die Entwicklung der nächsten Gerätegenerationen ein.

Studien wie “Brennstoffzellen in der Kraftwärmekopplung“ /3/ zeichnen einen durchaus attraktiven Markt für diese Systeme. Auf Grund der derzeitigen Marktsituation haben die Projektpartner mit Umsetzung der Projektziele die Möglichkeit eine sehr günstige Marktposition zu erreichen.

Die in dem vorliegenden Projekt favorisierte NT-PEM-Brennstoffzelle bietet nach Auffassung der Projektpartner die größten Möglichkeiten und Potenziale. NT-PEM-Systeme können auch mit Erdgasreformer dynamisch betrieben werden (Modulationsbereich 30 – 100%), um so bedarfsgerecht elektrische und thermische Energie bereitstellen zu können. Ist dies nicht ausreichend, kann die Anlage bei Bedarf auch ganz abgeschaltet und wieder neu gestartet werden. Dies stellt im Gegensatz zur SOFC einen sehr großen Vorteil dar. Schon sehr wenige An- und Abfahrzyklen, führen bei der SOFC zu irreparablen Schädigungen und Leistungsverlusten. Die Modulationsfähigkeit und damit die Möglichkeit auf Änderungen des Lastgangs zu reagieren sind sehr eingeschränkt. Die Gebäudeintegration gestaltet sich deutlich schwieriger. Dies wird durch die langen Aufheizzeiten von SOFC Systemen, die zwischen 8 und 12 Stunden liegen, noch verstärkt. Im Verbund eines virtuellen Kraftwerks können NT-PEM-Systeme weitere zusätzliche Aufgaben erfüllen, so können lokale Spitzenlastreserven (Modulationsfähigkeit), die dezentral und bedarfsorientiert zu Verfügung stehen, gebildet werden. Über intelligente Leistungselektronik können Netzdienstleistungen wie Blindleistungskompensation angeboten werden. Mit einem hohen elektrischen Wirkungsgrad von 40 % liegt das im Projekt zu entwickelnde System inhouse5000+ schon in dem kleinen Leistungsbereich deutlich über dem Durchschnittswert des deutschen Kraftwerksparks. Sicherlich sind im SOFC Bereich Werte von fast 60% erreicht worden. Aufgrund der eben genannten Einschränkungen eignen sich SOFC Systeme nach Meinung der Projektpartner sehr gut als Grundlastkraftwerke mit mehreren 100 kW elektrischer Leistung. Im Verbund mit kleinern NT-PEM-Systemen können so dezentrale und sehr flexible elektrische Netze entstehen.

Neben der Brennstoffzelle werden alternative Technologien wie der Stirling Motor entwickelt. Der Stirling Motor befindet sich, wie die Brennstoffzelle im Feldtest. Erste Ergebnisse zeigen deutlich geringere elektrische Wirkungsgrade.

Das Gasmotor BHKW ist eine am Markt etablierte Technologie und kann als Beispiel für die spätere Markteinführung von Brennstoffzellensystemen herangezogen werden. Die Firma Senertec verkauft heute ca. 3.000 Anlagen pro Jahr. Ein Großteil davon wird mit Erdgas bzw. Flüssiggas betrieben. Der elektrische Wirkungsgrad liegt bei ca. 26 %, der

Gesamtwirkungsgrad bei ca. 90%. Eine Wartung muss mindestens alle 3500 h erfolgen. Der Verkaufspreis von ca. 25.000 € ist vergleichbar mit dem Zielpreis für ein Brennstoffzellen Mini BHKW.

Mit einem elektrischen Wirkungsgrad von 40 % und einem zum Gasmotor BHKW vergleichbaren Gesamtwirkungsgrad von 90 % bietet ein Brennstoffzellen BHKW klare Vorteile und ist konkurrenzfähig. Ebenfalls wird angestrebt das System nur einmal im Jahr, ca. alle 8000 h, zu warten. Dies stellt im Vergleich zu motorischen BHKW's einen großen Vorteil da. Bei motorischen BHKW's, besonders bei Heizöl oder Pflanzenöl betriebenen Systemen, muss eine Wartung wesentlich öfter stattfinden. Weiterhin werden PEM Brennstoffzellen BHKW's leistungsmoduliert gefahren und stellen damit bedarfsgerecht Energie bereit, wobei sich der Wirkungsgrad im Teillastbetrieb verbessert. Dies ist mit vielen Motor-BHKW's nicht möglich. Auch sind die Schadgas-Emissionen von Motor BHKW sind deutlich höher.

In der nachfolgenden Tabelle 1 sind die namhaften deutschen Entwickler und als Vergleich Ebara Ballard (Japan) aufgeführt. Wie bereits erwähnt, ist nur die Firma Vaillant in dem Leistungsbereich bis 5 kW aktiv.

	Ebara Ballard	Baxi Innotech	Hexis AG	Vaillant	RBZ GmbH
<b>Systemintegration</b>	Ballard	Baxi Innotech/ Ballard	Hexis AG	PlugPower	inhouse engineering
<b>Stackfertigung</b>	Ballard	Baxi Innotech/ Ballard	Hexis AG	PlugPower	inhouse engineering
<b>Brennstoffzellentyp</b>	NT-PEMFC	NT-PEMFC	SOFC	NT/ HT-PEMFC/	NT-PEMFC
					
<b>Leistung elektrisch</b>	1 kW	1,5 kW	1 kW	4,6 kW	5 kW
<b>Leistung thermisch</b>	1,4 kW	3 kW	2,5 kW	7 kW	10 kW
<b>Leistungsmodulation</b>	k.A.	Ziel 20... 100%	keine Modulation	Ziel 20... 100%	30... 100 %
<b>Leistung Zusatzbrenner</b>		15 kW	12 - 22 kW	25... 280 kW	
<b>Systemwirkungsgrad elektrisch in %</b>	34% / Ziel 35%	32% / Ziel > 30%	24% / Ziel > 30%	29% / Ziel > 30%	25% - 30 % / Ziel 40%
<b>Entwicklungsstand</b>	Beginn Feldtest mit 17 Anlagen in Japan 2003. Derzeit über 200 Anlagen mit Erdgas und über 50 mit Kerosin	Beta 1.5 Plus Anlage	Umfangreiche Praxiserfahrung mit Vorserienprodukt	von 2003 - 2006 europaweiter Test mit 62 Euro 1 und Euro 2 Systemen	erfolgreicher Versuch mit Vorgängermodell inhouse4000 über 11800 h
<b>Planung</b>	Aufbau der Serienfertigung in Japan 2008/ Verbreitung ausschließlich in Japan	Test mit 15 Beta-Anlagen seit Herbst 2005 Ab Herbst 2007 Feldtest mit Beta 1.5 Plus Anlage (10 Systeme)	Anfang 2007 2 jähriger Feldtest gestartet	derzeit Entwicklung der nächsten Generation mit HT PEM und anschließend weitere Feldtests	Feldtest mit neuer Generation inhouse5000 seit 2009
<b>Einsatzbereich</b>	Einfamilienhaus	Einfamilienhaus	Einfamilienhaus	Mehrfamilienhaus/ Bürogebäude/ öffentliche Gebäude/ Gewerbebetriebe/ Restaurants	Mehrfamilienhaus/ Bürogebäude/ öffentliche Gebäude/ Gewerbebetriebe/ Restaurants
<b>Homepage</b>	<a href="http://www.ballard.com">www.ballard.com</a>	<a href="http://www.baxi-innotech.com">www.baxi-innotech.com</a>	<a href="http://www.hexis.com">www.hexis.com</a>	<a href="http://www.vaillant.de">www.vaillant.de</a>	<a href="http://www.rbz-fc.de">www.rbz-fc.de</a>

Tabelle 1 Übersicht Brennstoffzellensysteme

Das vom Bundesministerium für Wirtschaft beim Institut für ZukunftsEnergieSysteme (izes) in Auftrag gegebene Gutachten „Analyse und Bewertung von Instrumenten zur Markteinführung stationärer Brennstoffzellen“ /2/ gibt einen sehr guten Überblick zum Stand der

Brennstoffzellentechnologie in Deutschland und weltweit. Weiterhin werden in dem Gutachten die Chancen und Potenziale einer breiten Markteinführung ausführlich beleuchtet sowie die zu lösenden Herausforderungen und Hemmnisse definiert.

## **1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

### ***Analysen und Materialuntersuchungen - F&E Fremdauftrag GUT-Analytik***

Die GUT ist spezialisiert im Bereich der Wasseranalyse. Um die Alterung der Anlagen und der PEM-Stacks besser charakterisieren zu können, müssen unter anderem auch die peripheren Komponenten und Medienkreise untersucht werden. Dies geschieht zum einen optisch und zum anderen werden an kritischen Punkten im System – wie beispielsweise an den Stackeinlässen – Kondensatproben genommen, um den Eintrag an schädigenden Substanzen (Metallionen, Metallverbindungen, usw.) zu ermitteln. An den Stackauslässen werden in gleicher Art und Weise Kondensatproben genommen, um sowohl mit Hilfe von Bilanzrechnungen den Verbleib von eingetragenen Substanzen im Stack spezifizieren zu können als auch Hinweise darüber zu erhalten, ob und in welcher Größenordnung ein Austrag von Brennstoffzellenmaterialien (Membranmaterial, Katalysator, usw.) erfolgt. Damit können zum einen Rückschlüsse auf die Stackdegradation gezogen werden und zum anderen werden Beständigkeitsprobleme bei der Peripherie aufgedeckt.

Weiterhin ist im Projekt geplant, die Prozessführung des Brennstoffzellenmoduls dahingehend zu untersuchen und zu optimieren, dass die Bereitstellung von Prozesswasser für einen wasserautarken Reformerbetrieb möglich ist. Hierbei sind Wasseranalysen unerlässlich, da das System eine sehr hohe Reinheit des Wassers erfordert. Im Projekt wurde daher mit der GUT Analytik GmbH im Rahmen eines F&E-Auftrages intensiv zusammengearbeitet.

### ***Verfahrenstechnische Analyse von Feldtestdaten für die Typenklassifizierung und Gebäudeintegration F&E Fremdauftrag INECS GmbH***

Die Firma INECS ist langjährig in den Bereichen der Engineering Services (inkl. Feldtest von KWK Systemen) und Energieanalyse tätig. Dadurch konnte INECS großes Know-how beim Betrieb und der Einbindung von KWK Systemen inklusive Brennstoffzellensystem in Gebäuden aufbauen. Darauf aufbauend kann dieses Know-how bei der Typenklassifizierung und Gebäudeintegration in Verbindung mit den Feldtestdaten im Projekt genutzt werden

### ***simulative Unterstützung der Optimierung des Flowfield-Designs***

Um die im Projekt gesetzten Ziele hinsichtlich Performance und Lebensdauer des Stacks zu erreichen, war es auch zwingend notwendig das Flowfield-Design entsprechend zu optimieren und weiterzuentwickeln. Dieser Prozess ist sehr komplex, da es sehr viele Einflussgrößen gibt. IE hat sich deshalb zu Beginn des Projektes entschlossen diesen Prozess durch Simulationsuntersuchungen zu unterstützen. Da IE dafür nicht das notwendige Know-how und die erforderlichen Software-Werkzeuge besitzt wurde ein externer Know-how-Träger beauftragt. Die Kosten dafür wurden komplett von IE getragen. Die Ergebnisse wurden direkt in das Projekt eingespeist. Dieser F&E Fremdauftrag wurde von IE komplett eigenfinanziert.

## 2. Darstellung der erzielten Ergebnisse

Da die Ergebnisse des Verbundprojekts in enger Zusammenarbeit aller Projektpartner erarbeitet worden sind, werden die Ergebnisse in einem gemeinsamen Bericht erläutert. Da die Arbeiten aller Partner ineinandergreifen, werden sie im Folgenden anhand der zu erreichenden Ziele beschrieben.

### 2.1 AP 1 Verfahrenstechnische Analyse des Systems unter Nutzung von Feldtestdaten

#### **RBZ / IE**

Im Projektzeitraum waren fünf Anlagen des Typs inhouse5000 in Betrieb, anhand derer Erfahrungswerte hinsichtlich des Betriebs der Anlagen und der unterschiedlichen Aufstellorte gesammelt werden konnten. Für alle Anlagen wurde im Berichtszeitraum der Feldtest beendet. Betreuung, Auswertung und Betrieb der Anlagen wurde je nach Aufstellungsort zwischen RBZ und IE aufgeteilt. Nachfolgend befindet sich dazu eine zusammenfassende Übersicht.

Feldtest-anlage	Aufstellungsort	START ENDE	Betriebs- stunden	Stackwechsel/ Reparaturen	Ende
FT1	Vattenfall Innovationspark Berlin	04/2010 05/2012	12.950	2/1	Planmäßig
FT2	Stadtwerke Döbeln Städtische Schwimmbad	05/2010 06/2013	14.400	0/1	Außer- planmäßig durch Hochwasser
FT3	Next Energy Oldenburg EWE- Forschungszentrum	12/2010 01/2013	7.980	0/1	Planmäßig
FT4	GASAG Berlin Grundschule im Grünen	02/2011 06/2013	12.000	0/1	Planmäßig
FT5	SIB Polizeiwache Pirna	05/2011 04/2013	8.700	1/2	Planmäßig

Tabelle 2 Übersicht Feldtestanlagen

Beispielhaft sind nachfolgende Anlagen an ausgesuchten Aufstellungsorten zu sehen.

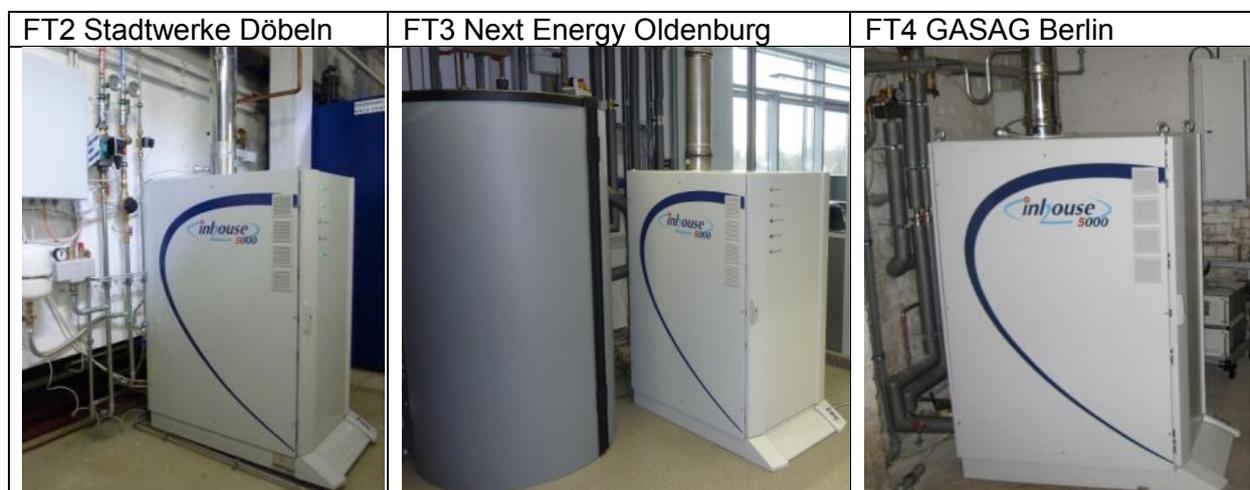


Abbildung 2 Bilder Feldtestanlagen

Die prozentuale Verteilung des Stackbetriebs über den gesamten Feldtest ist in nachfolgender Grafik zusammengefasst (Abbildung 3). Der Auslegungspunkt des Stacks war zu Begin of Life (BOL) bei einer Stromdichte von  $0,5 \text{ A/cm}^2$  festgelegt. Um degradationsbestimmende Faktoren zu vernachlässigen, wurde die Verteilung nicht bei gleicher Stack- bzw. Anlagenleistung sondern bei gleicher Stackstromdichte getätigt. Zu erkennen ist, dass bis auf Feldtestanlage 2 (FT2) alle Anlagen überwiegend im mittleren Stromdichtebereich betrieben wurden.

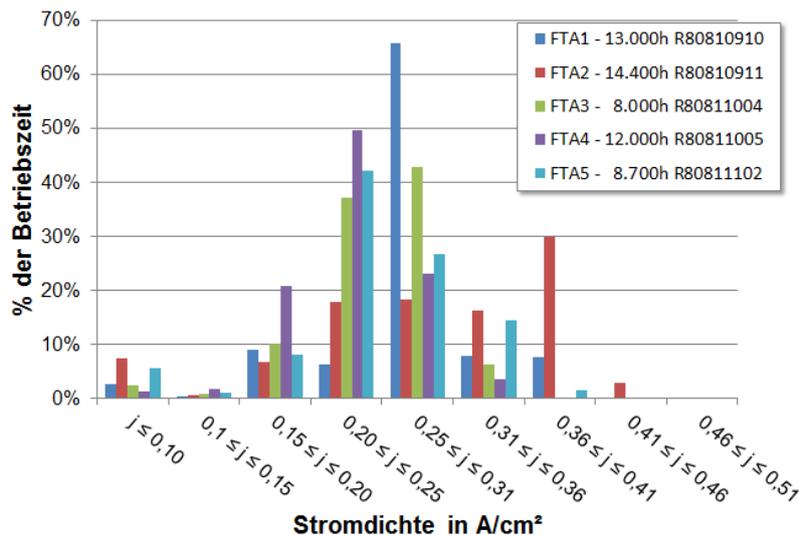


Abbildung 3 Prozentuale Stromdichteverteilung über gesamte Laufzeit für Feldtestanlagen 1-5

Die Lastprofile bzw. der Lastpunkt der Anlagen waren generell von mehreren Faktoren abhängig:

- Vorgaben vom Betreiber
- Zwänge durch Aufstellort bedingt
- Zwänge durch die Anlage selbst bedingt
- Vorgaben von inhouse (abgeleitet aus Arbeiten in AP 7)

Im Rahmen der Arbeiten in AP 7, der Typenklassifikation von Gebäuden hat sich im Verlauf des Feldtests gezeigt, dass für die genaue Analyse die thermischen Leistungsdaten der Aufstellungsorte erfasst werden müssten. Dies ist bisher nicht erfolgt. So konnte die Analyse des Wärmelastgangs des jeweiligen Gebäudes anfangs nur über die Rücklauftemperatur erfolgen. Auch für das elektrische Lastprofil der versorgten Gebäude konnten nur Extrapolationen erstellt werden, da die notwendigen Messeinrichtungen teilweise fehlten. Daher wurde zunächst anhand der Studie, welche als Unterauftrag von der Firma IECS GmbH erstellt wurde, ein Tageslastgang für den Elektroenergiebedarf eines Wohnhauses mit 10 Haushalten an einem Frühlingstag mit der Feldtestanlage 1 nachgefahren.

Aus dem laufenden Feldtest konnten aus systemrelevanten Daten nachfolgende Wirkungsgrade für die laufenden Systeme gewonnen werden (Abbildung 4). Dieser lag deutlich unter 30%, daher war dringender Optimierungsbedarf notwendig.

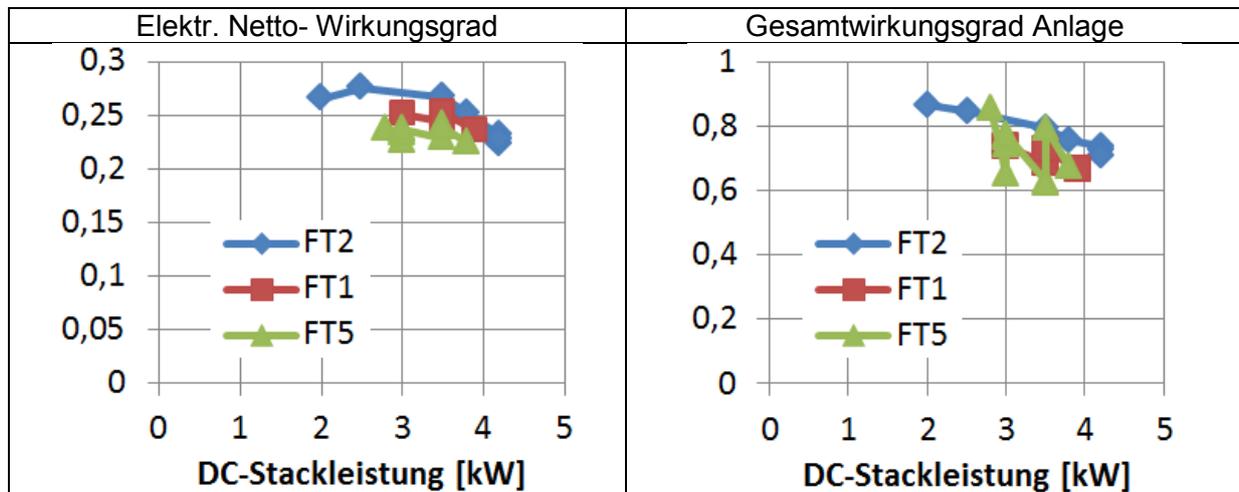


Abbildung 4 Wirkungsgrade ausgesuchter Feldtestanlagen

In Abbildung 5 links ist die Langzeitauswertung der mittleren Zellspannung von FT1 bei einer elektrischen Anlagenleistung von 3 kW<sub>el</sub> bis zum Berichtsende dargestellt. Für diese Anlage ist eine Degradationsrate der mittleren Zellspannung sehr gut durch eine Trendlinie zu bestimmen, anders sieht es bei Anlagen mit häufiger Modulation aus (siehe FT4 / FT3 Abbildung 5 rechts).

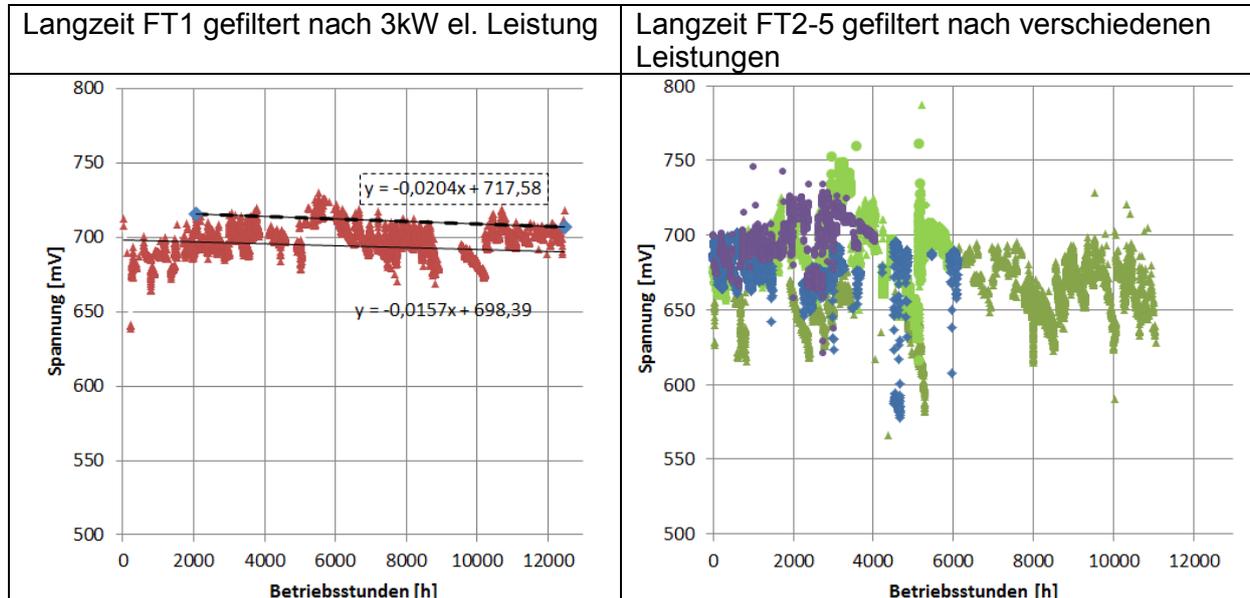


Abbildung 5 Übersicht Langzeitauswertungen u. Degradationsbetrachtungen (Decaybetrachtungen) aus Feldtest

Die Unterschiede lassen sich unter anderem mit den verschiedenen Betriebsführungen sowie den Umgebungsbedingungen der Aufstellorte erklären.

Um aus der jeweiligen Betriebshistorie einer Feldtestanlage die Spannungsverlustrate (Decayrate) des Stacks bei unterschiedlichen Stromdichten ermitteln zu können, wurden im Projektzeitraum verschiedene Betrachtungsarten entwickelt. Als Ergebnis wurde eine neue Auswertemethode entwickelt. Dazu wurde die Höhe der mittleren Zellspannungen zwei

Stunden nach jedem Anfahren der Anlage und dem anschließenden ca. einstündigen konstanten Betrieb bei der betrachteten mittleren Stromdichte für die Berechnung verwendet (Abbildung 6). Mit Bezug auf die stromdichtekorrespondierenden mittleren Zellspannungen aus der Begin-of-Life-Kennlinie wurden die Spannungsdifferenzen ermittelt.

Auf Basis der laufzeitbedingten Spannungsdifferenzen wurde dann vereinfacht die lineare Trendlinie von allen gewonnenen Datenpunkten gebildet und daraus die Degradation mit der Einheit  $\mu\text{V/h}$  für jeden Stack ermittelt.

Aus dieser Betrachtung ergeben sich andere Degradationsraten als bei linearen Trends (siehe Abbildung 5). Sie ermöglicht aber den Vergleich unterschiedlicher Lastprofile. Weitere Betrachtungen und Vergleiche dazu wurden im Laufe des Projektes mit Shortstacks auf IE- und SC- Testständen durchgeführt (siehe Abbildung 45).

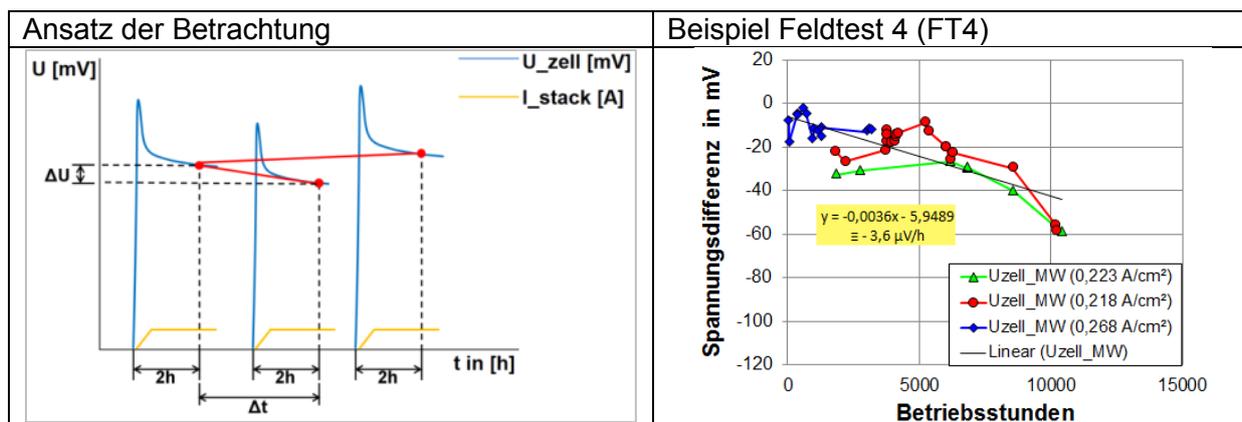


Abbildung 6 Ermittlung der Zellspannungsdifferenz für Degradationsratenbestimmung

Nachfolgend sind die ermittelten Degradationsraten nach der in Abbildung 6 beschriebenen Methode für alle Stacks in den Feldtestanlagen zusammengefasst.

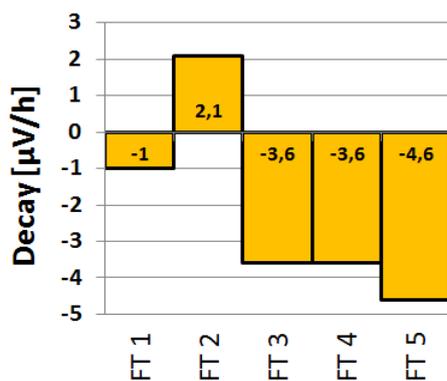


Abbildung 7 Degradationsraten aller Stacks in den Feldtestanlagen im Überblick

Das Ergebnis dieser Betrachtungen ist positiv, alle Stacks haben eine mittlere Degradationsrate von unter  $-5\mu\text{V/h}$ , das sind teilweise bessere Ergebnisse als auf inhouse-Testständen nachgewiesen wurden und zeigen das Potential für einen langlebigen Betrieb der NT-PEM-Technologie. Alle Ergebnisse wurden mit der MEA-Generation 0 erreicht. Im Projektzeitraum wurden vom Projektpartner Solvicore eine angepasste MEA für einen noch robusteren Betrieb entwickelt. Diese mit MEA-Generation 1 und 2 bezeichnete Technologie wurde bei Solvicore und inhouse in Shortstacks auf den Testständen intensiv für den Einsatz in einer neuen Anlagengeneration inhouse5000+ untersucht.

**IE**

Das Betriebsregime der Anlagen wurde permanent optimiert. Änderungen ergaben sich aus Beobachtungen und abgeleiteten Erkenntnissen vom Betriebsverhalten der Anlagen, sowie aus systematischen feldtestbegleitenden Untersuchungen mit Shortstacks auf den Testständen bei inhouse engineering.

Eine beispielhafte wichtige Erkenntnis und Änderung des dynamischen Betriebsverhaltens im Berichtszeitraum ist der Einfluss der Anfahrstrategie des Stacks nach einer Abschaltung der Anlage. Es zeigte sich, dass das Aufheizen des Stacks vor dem Start einen positiven Einfluss auf das Verhalten der Zellspannungen im nachfolgenden Betrieb hat. Die mittlere Zellspannung, die Abweichung der Zellspannungen vom Mittelwert sowie die Langzeitstabilität der Zellen zeigen ein deutlich besseres Verhalten nach einem Vorwärmen des Stacks auf 50°C (Abbildung 8). Dies war in den Feldtestanlagen ohne Umbauten und zusätzliche Hilfsenergie möglich. Durch eine Änderung der Steuerungsroutine wurde die Enthalpie des Anodengases am Reformerausgang in den Stackkühlkreis eingekoppelt und heizte diesen während der Startphase des Reformers auf (2). Gut ist in Abbildung 8 der Unterschied zum Anfahren aus dem kalten Zustand zu sehen (1).

Eine weitere Verbesserung bringt ein Vorheizen des Stacks und eine kurze Überhitzung des Stacks nach dem Hochfahren. Dies erfolgt durch eigene Wärmeerzeugung des Stacks (3). Alle positiven Effekte sind auf ein verbessertes Austragen von Wasser aus dem Stack zurückzuführen. Beim Abfahren des Stacks kondensiert Wasser in den Kanälen und verbleibt dort. Beim Anfahren kommt zusätzliches Wasser hinzu und beeinflusst das nachfolgende Betriebsverhalten. Das Aufheizen und Überhitzen fördert die Verdampfung und damit einen besseren Austrag des Wassers.

Ähnliche Untersuchungen und Ergebnisse wurden auch an Shortstacks durchgeführt bzw. beobachtet (siehe Abbildung 17)

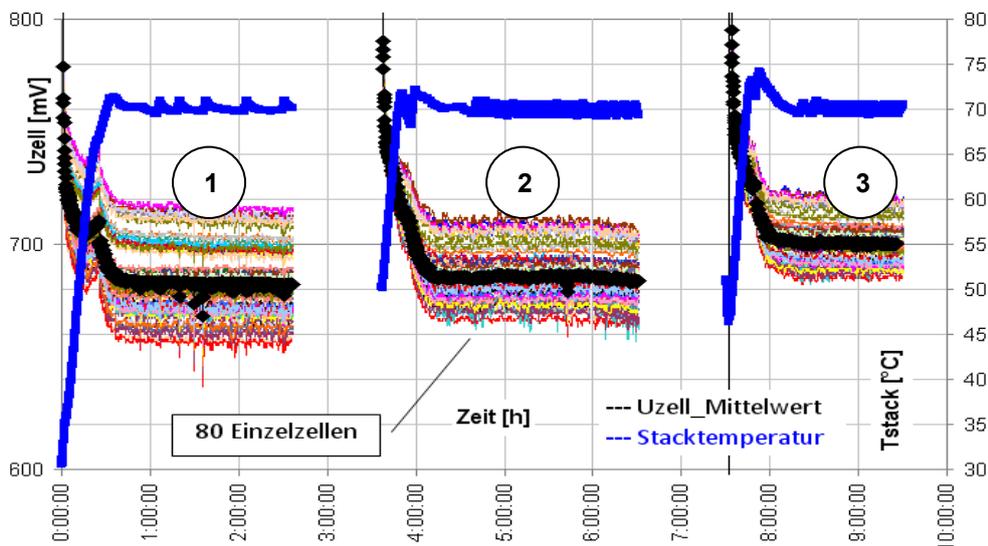


Abbildung 8 Einfluss Anfahrstrategie Stack

**IE**

Ein weiterer nicht unerheblicher Einfluss auf das Betriebsverhalten ist der Zusammenhang zwischen der Ansaugtemperatur der Kathodenluft und der Übertragungsleistung des Kathodenbefeuchters. Generell erfolgt durch die Verdichtungsleistung im Kathodengebläse eine Temperaturerhöhung von  $dT = 20 \dots 50^\circ\text{C}$  je nach Arbeitspunkt.

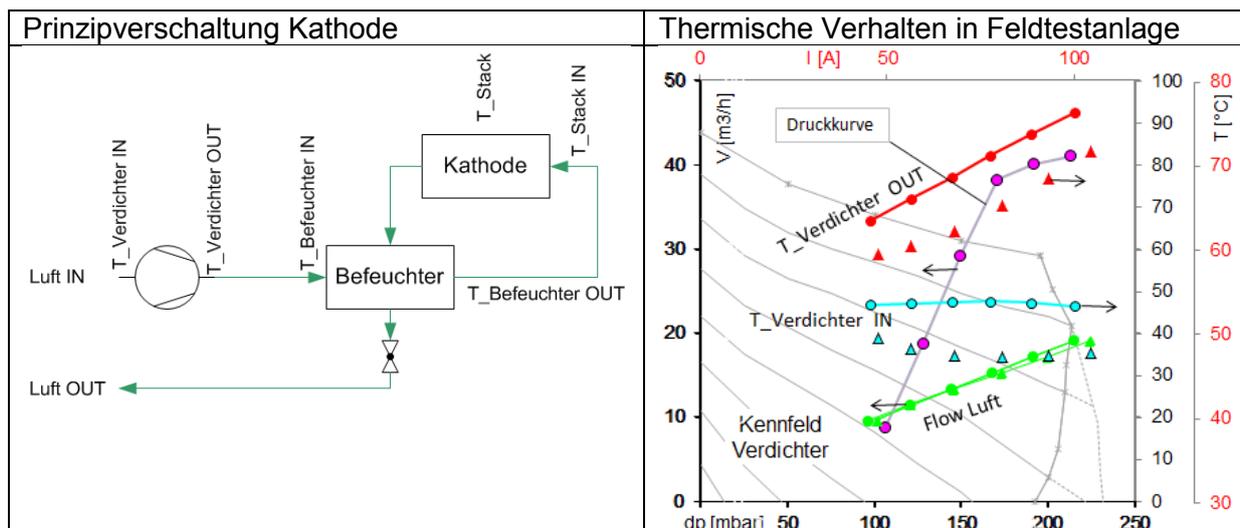


Abbildung 9 Abhängigkeit Befeuchtungsleistung Eingangstemperatur

Da die angesaugte Luft ( $T_{\text{Verdichter\_IN}}$ ) aufstellungsortunabhängig über ein Doppelpipesystem angesaugt wird, ist sie u.a. von der Innenraumtemperatur der Anlage abhängig. Diese variiert je nach Aufstellort in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur der Anlage, der Rücklaufstemperatur des Kühlkreises und der momentanen Anlagenleistung. Dadurch kann es im Betrieb zu mehr oder weniger starken Befeuchtungsgradienten kommen, deutlich zu sehen am Abknicken der Druckkurve in Abbildung 9.

In den Bereichen oberhalb des Knickes ist von einer schlechteren Befeuchtung auszugehen, was sich negativ auf die Langzeitstabilität des Stacks auswirkt. Kann die Anlage dem nicht entgegensteuern, ist dies ein typischer Auslöser für eine notwendige Leistungsreduzierung und bei der verwendeten MEA-Generation 0 ein degradationsbestimmender Faktor.

### IE/RBZ

Im Feldtestzeitraum wurden regelmäßig Kühlwasser- und Kondensatproben entnommen und analysiert. Zielstellung dieser Analysen war es:

- Aufnahme des jeweiligen Ist-Standes
- Erkennen von tendenziellen Änderungen des Zustandes mit zunehmender Betriebsdauer
- Hinweise auf eventuelle Degradationsvorgänge im System
- Identifikation von möglicherweise nicht geeigneten Materialien (bspw. Herauslösen bestimmter Ionen aus den verwendeten Materialien und deren Schädigung)
- Identifikation möglicher Kontaminationsquellen, die Schädigungen an der MEA / am Stack verursachen können

Beispielhaft dafür ist in der nachfolgenden Abbildung 10 eine Zusammenfassung von Analysen des Stackkühlkreises dargestellt. Hier wurden Werte aus Testständen sowie Feldtestanlagen gemeinsam dargestellt, um ähnliche Verhaltensmuster zu erkennen. Deutlich ist zu erkennen dass der Anstieg der Leitfähigkeit durch bestimmte Elemente hervorgerufen wird wie:

- Silizium
- Dissolved Organic Carbon
- Hydrogencarbonate

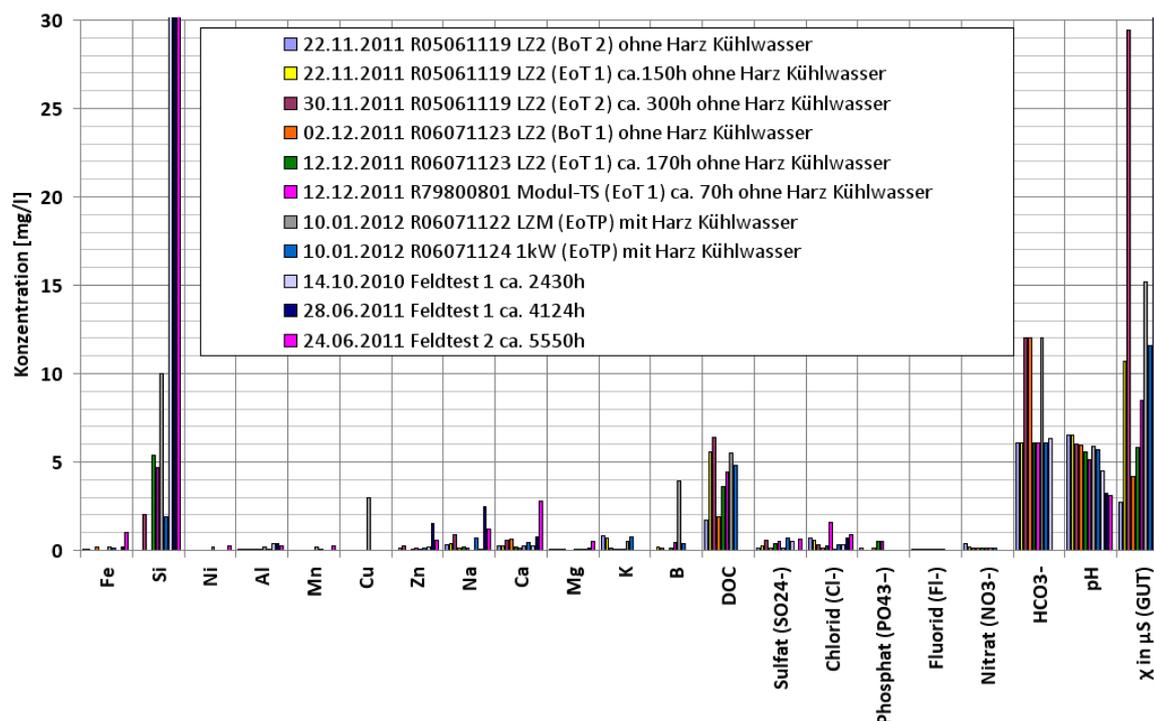


Abbildung 10 Probenanalyse Kühlkreis im Feldtest und in Testständen

Anhand dieser Ergebnisse liefen umfangreiche Recherchen nach möglichen Quellen der Verunreinigung. Es wurden alle Kühlkreiskomponenten einem Materialtest mit DI- Wasser zu unterzogen. Weiterhin wurden einzelne Anlagen mit Insitu- Leitfähigkeitssensoren ausgerüstet, um den Verlauf des Anstieges der Leitfähigkeit aufzuzeichnen. Der unkontrollierte Anstieg der Leitfähigkeit hatte derzeit drastische Folgen, z.B. einer massiven Schädigung des Flowfields wie in AP 3, Abbildung 27 beschrieben. Wie schon erwähnt wurden umfangreiche Materialtests durchgeführt, um die Hauptquellen für den Ionenaustausch in das Kühlmedium zu identifizieren. Die Ergebnisse sind in AP 5, Abbildung 57 zusammengefasst.

Ähnliche Untersuchungen auf Verunreinigungen wurden auch für das in den Gaswegen auskondensierte Wasser vorgenommen und für den Reformattefilter. Weiterhin wurde auch der Luftfilter nach Durchsatz eines vorgegebenen Massenstroms an den Hersteller zur Analyse zurückgesendet. Dabei wurden vor allem die gefilterten Spurenelemente und die verbleibende Filterkapazität untersucht. Im Falle des Reformattefilter konnte eindeutig eine Notwendigkeit seines Einsatzes nachgewiesen werden, da mehrere Spurenelemente mit Ursprung im vorgelagerten Reformmodul rausgefiltert wurden. Ungefiltert würden diese Spurenelemente den Degradationsprozess im Stack verstärken. Allgemein konnten auch hier in Verbindung mit den Materialtests, kritische Materialien erkannt werden und ersetzt werden.

## IE / RBZ

Im Projektzeitraum wurde für das System inhouse5000 ein Wirkungsgradmodell erstellt und Optimierungspunkte identifiziert. Das Hauptaugenmerk war dabei auf den elektrischen Wirkungsgrad gerichtet.

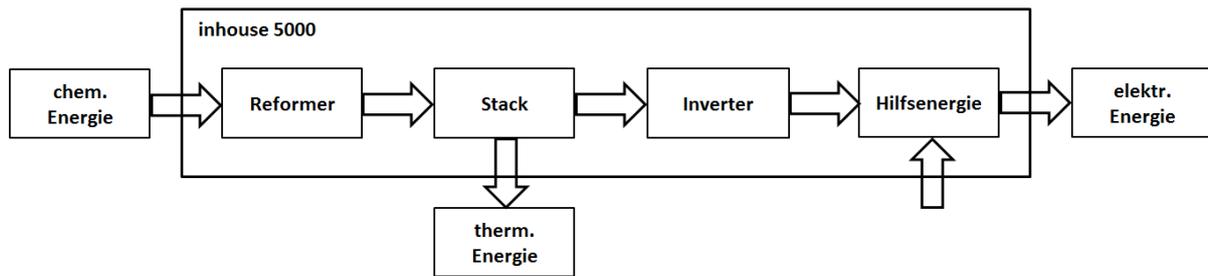


Abbildung 11 Wirkungsgradmodell System in5000

Der Einfluss der wirkungsgradbestimmenden Komponenten der Gesamtanlage wurde in einem Testaufbau bei RBZ ermittelt (siehe Abbildung 21), hier wurden sukzessiv Komponenten getauscht, optimiert und erprobt. Ergebnisse dazu werden in 2.2 erläutert.

Für einzelne Komponenten der Anlage wurde die jeweilige Charakteristik messtechnisch erfasst bzw. Herstellerdaten verwendet, so dass auf Basis dieser Daten Kennlinienscharen erzeugt werden konnten, welche im Modell miteinander verknüpft wurden. Durch Variation von einzelnen Parametern wie:

- Anodenumsatz
- Kathodenumsatz
- Verlagerung des elektrischen Stack- Arbeitspunktes
- Stack-Performance nach Wechsel von MEA-Gen0 auf Gen1 und 2
- Wechselrichter-Wirkungsgrad
- Eigenenergiebedarf

lassen sich deren Auswirkungen auf den Gesamt-Systemwirkungsgrad ableiten. Somit liegt ein gutes Werkzeug vor, um optimale Betriebspunkte aufzufinden und den Aufwand für deren Realisierung zu evaluieren.

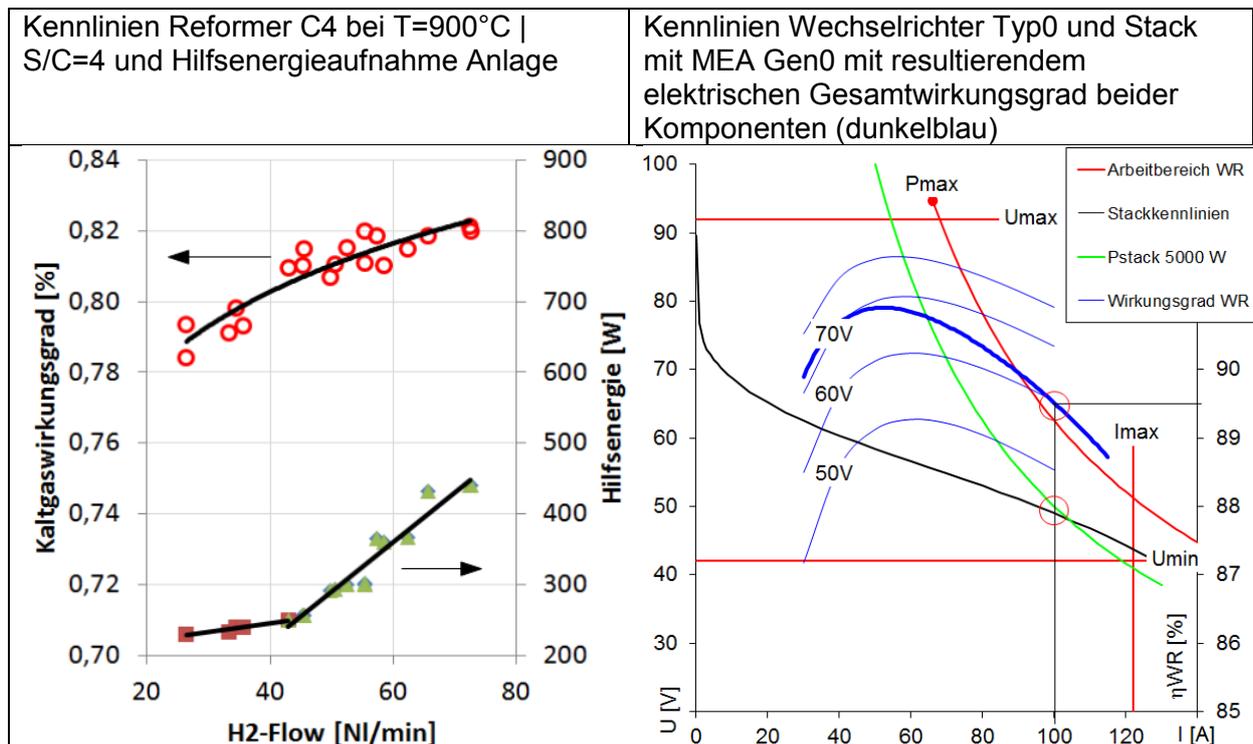


Abbildung 12 Beispielhafte Kennfeldaufnahmen wichtiger Systemkomponenten

Nachfolgend befindet sich ein Vergleich gemessener und mit dem erstellten Modell berechneter Wirkungsgrade bei verschiedenen Prozessparametern.

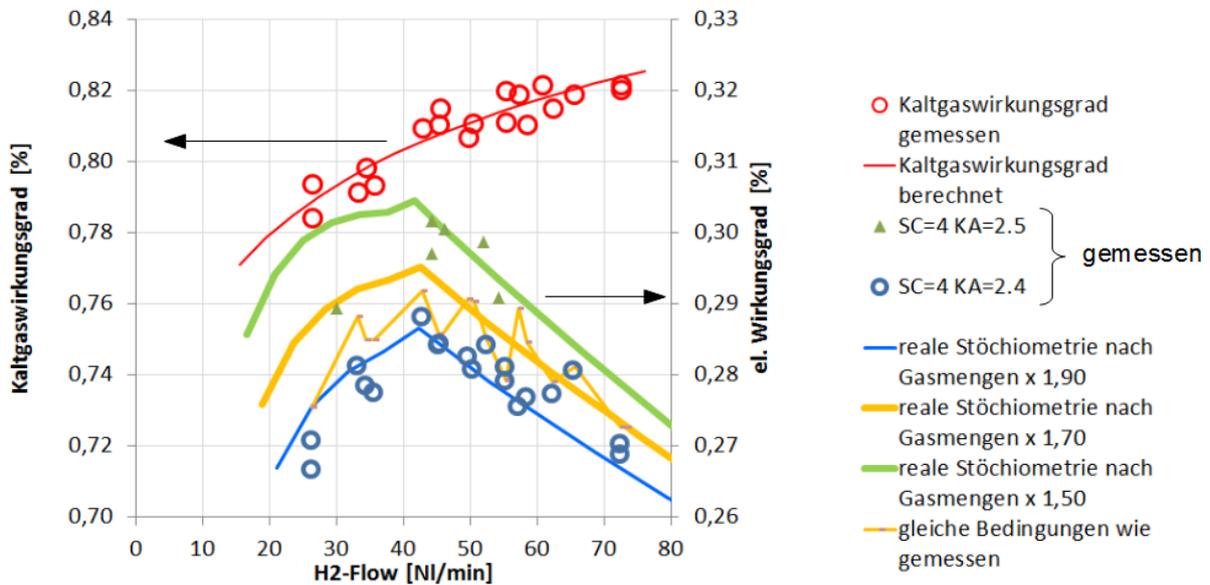


Abbildung 13 elektr. Gesamtwirkungsgrad in Abhängigkeit vom Anodenumsatz MEA Gen0

Der vorhandene elektrische Gesamtwirkungsgrad von 22-25% im FT kann durch den Einsatz eines neuen Reformertypen (siehe 2.6 AP 6), eine Änderung der Gasumsätze und Verschiebung des elektrischen Arbeitspunktes durch eine neue MEA- Generation auf mind. 32% angehoben werden (siehe Abbildung 14)

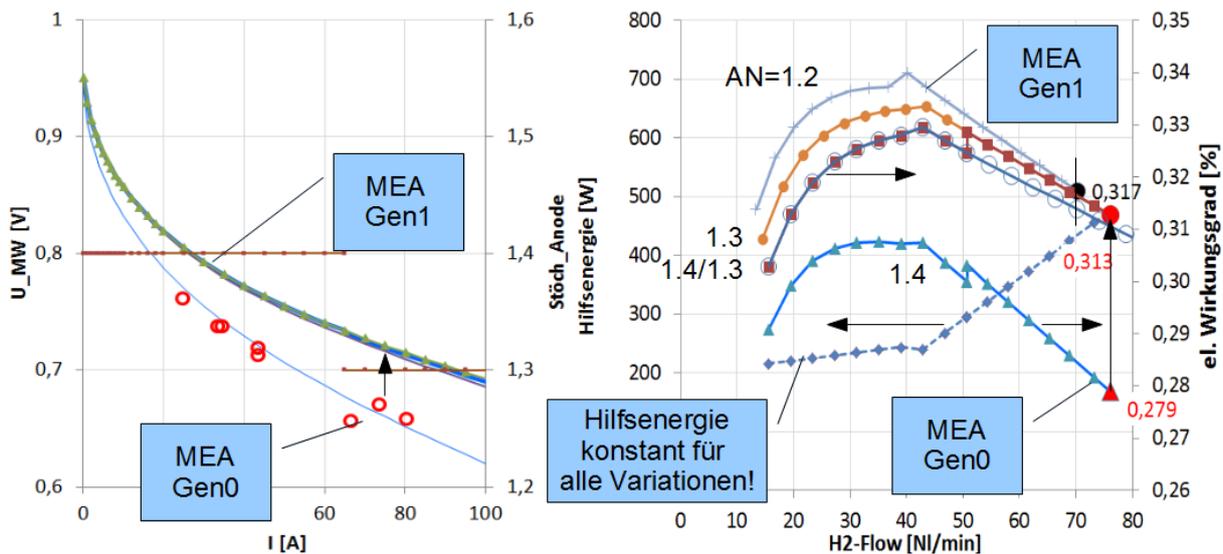


Abbildung 14 elektr. Gesamtwirkungsgrad in Abhängigkeit vom Anodenumsatz und Verschiebung des elektrischen Arbeitspunktes

Beispielhaft sind in Tabelle 3 die berechneten Steigerungsraten des Gesamt-Systemwirkungsgrades für einige Variationen zusammengefasst.

Parameter	Steigerung um [%]
Wechsel Reformertyp	3,0
Wechsel von MEA-Generation 0 auf die MEA-Generation 1	3,4
Erhöhung des Anodenumsatz der MEA-Gen1 von 71,4% auf 77%	0,5
Erhöhung des Anodenumsatz der MEA-Gen1 von 77% auf 83%	0,5
5% höherer Wechselrichter-Wirkungsgrad	0,9
Verschiebung des elektrischen Arbeitspunktes	0,8

Tabelle 3: Berechnete Steigerungsraten des Gesamt-Systemwirkungsgrades

Es wird ersichtlich, dass durch verschiedene Variationen eine Steigerung der Systemeffizienz erreicht werden kann. Die signifikanteste Steigerung ist der MEA (Umstieg von Gen0 auf Gen2) zuzuschreiben sowie der Wechsel des Reformertyps, was ein wichtiger Erfolg bzw. Meilenstein des Projektes war.

## 2.2 AP 2 Entwicklung / Optimierung der systemischen Betriebsparameter und Ableitung/ Aktualisierung der Komponentenanforderungen

### IE / SC

#### Definition aktueller Stack Betriebsparameter

Zu Beginn des Projektes wurde der Ist-Zustand der Betriebsparameter des Stacks und des Brennstoffzellen- Moduls mit MEA-Generation 0 erfasst und dem Projektpartner SC übermittelt. Anhand dieser Datenbasis und den ersten SC-Messergebnissen zur Generation 1 wurde bilateral mit SC diskutiert, in welchem Maße sich die für den MEA-Betrieb optimaleren Betriebsbedingungen mit dem vorhanden BZ-Modul respektive der inhouse5000-Anlage realisieren lassen. Die kompakte Ausführung des vorliegenden BZ-Moduls lässt jedoch durch die interne Verschaltung nur bedingt verbesserte Betriebsparameter zu. Daher wurden im ersten Schritt die MEA Gen1 mit der Gen0 in der gleichen inhouse- Stackplattform und bei gleichen Betriebsbedingungen betrieben und verglichen (siehe 2.4)

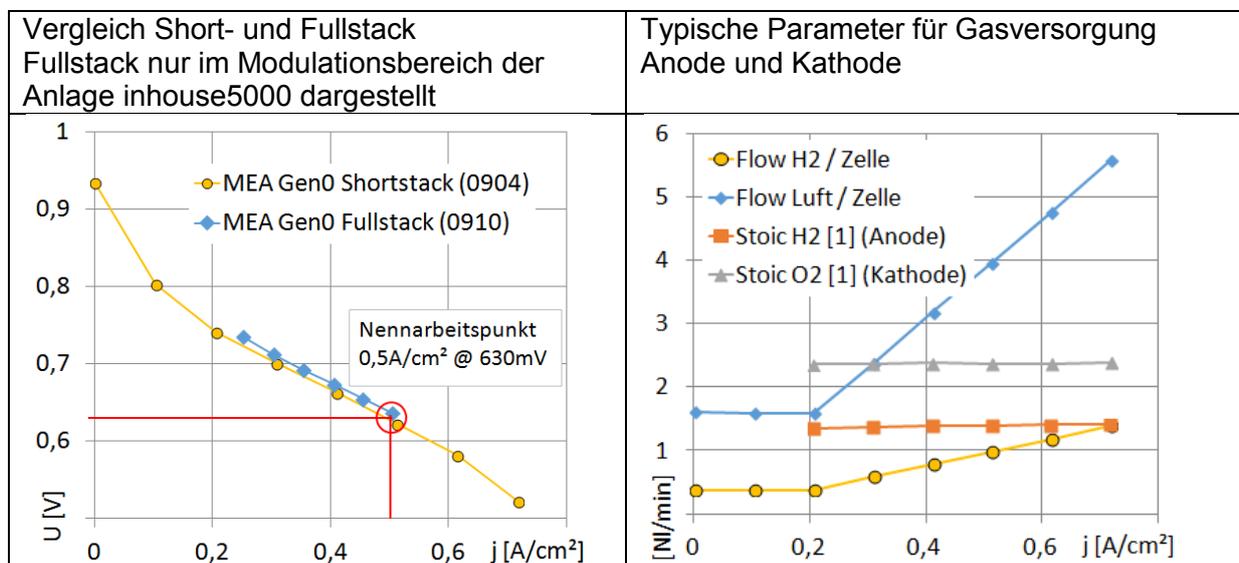


Abbildung 15 Performance und Prozessparameter MEA Gen0

In Abbildung 15 ist das typische elektrische Verhalten und die Betriebsbedingungen der MEA-Gen0 dargestellt. Die Performance der Shortstacks ist gut übertragbar auf Fullstacks. Der Shortstack wird über einen weiten Arbeitsbereich getestet, der Fullstack nur im möglichen Modulationsbereich der inhouse5000. Bis zu einer Stromdichte von  $0,2 \text{ A/cm}^2$  wird der Stack auf Anode und Kathode mit einem Offsetvolumenstrom durchströmt, ab dann werden beide Seiten mit einer konstanten Stöchiometrie betrieben.

Zur Definition der aktuellen Betriebsparameter wurde weiterhin der typische Temperaturverlauf der Ein- und Ausgangsparameter des Stacks aus der inhouse5000 herangezogen. In Abbildung 16 links ist die prinzipielle Verschaltung der 3 Medienkreise zu sehen. Auf die Kühlkreisausgangstemperatur des Stacks  $T_{\text{PRIM\_OUT}}$  wird in den Feldtestanlagen mittels eines Ventils geregelt. Sie wird über den gesamten Arbeitsbereich konstant auf  $65^\circ\text{C}$  gehalten. Eine Temperaturspreizung über den Stackkühlkreis von ca.  $5\text{K}$  wird ebenfalls über den gesamten Arbeitsbereich konstant gehalten. Diese wird über den Kühlwasserdurchfluss  $\text{FLOW\_PRIM}$  eingestellt. Der Befeuchter wurde anhand von Übertragungskennlinien des Herstellers und eigenen Messungen ausgewählt.

Die sich daraus ergebenden Temperaturverläufe sind in der gleichen Abbildung rechts dargestellt und relativ fest an die o.g. Auslegungen gebunden. Im Feldtest wurde festgestellt dass die Übertragungskurve des Befeuchters stark von der Luftansaugtemperatur  $T_{\text{ANSAUG}}$  abhängig ist (siehe hierzu Abbildung 9). Eine Beeinflussung der in Abbildung 9 rechts dargestellten Temperaturverläufe kann nur in geringem Maße durch Variation der Kühlkreisdurchflüsse erfolgen.

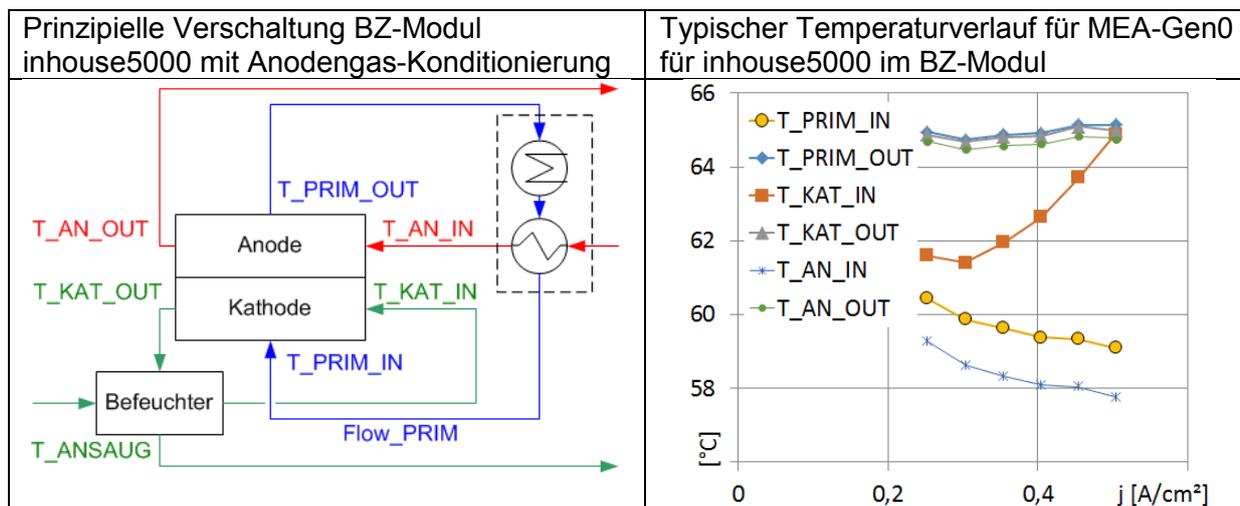


Abbildung 16 prinzipielle Medienverschaltung inhouse5000 und Übertragungseigenschaften

## IE

### Untersuchung und Definition Anfahrparameter für MEA-Gen1.

Ähnlich den Untersuchungsergebnissen im Feldtest zur Anfahrstrategie des Stacks mit MEA-Gen0 (siehe Abbildung 8) wurden diese auch mit Shortstacks und MEA-Gen1 auf IE-Testständen durchgeführt. Hierbei wurde das generelle Aufheizen des Stacks vor dem Betrieb untersucht und weiterhin das Vorheizen der Gase. Bewertungskriterien waren die gemessenen Zellspannungen und das Stromdichteprofil über einer Zelle.

Deutlich ist in Abbildung 17 links oben zu erkennen dass generell das Anfahren aus dem kalten Zustand möglich ist (Strategie1), kritisch wird es nur wenn die Taupunkte der Gase am Stackeingang nicht mindestens  $3\text{K}$  unter der Kühlungs- Eingangstemperatur liegen. Ein

komplettes Vorheizen des Kühlkreises und der Gase (Strategie3) zeigt den stabilsten Betrieb während des Anfahrens und dem nachfolgenden Betriebs (siehe Abbildung 17 rechts Oben). Die Strategie2 (siehe Abbildung 17 Mitte Oben) zeigt einen kurzzeitigen Einbruch der mittleren Zellspannung, welche durch die Zufuhr von zu kalten und damit trockenen Gasen verursacht wird.

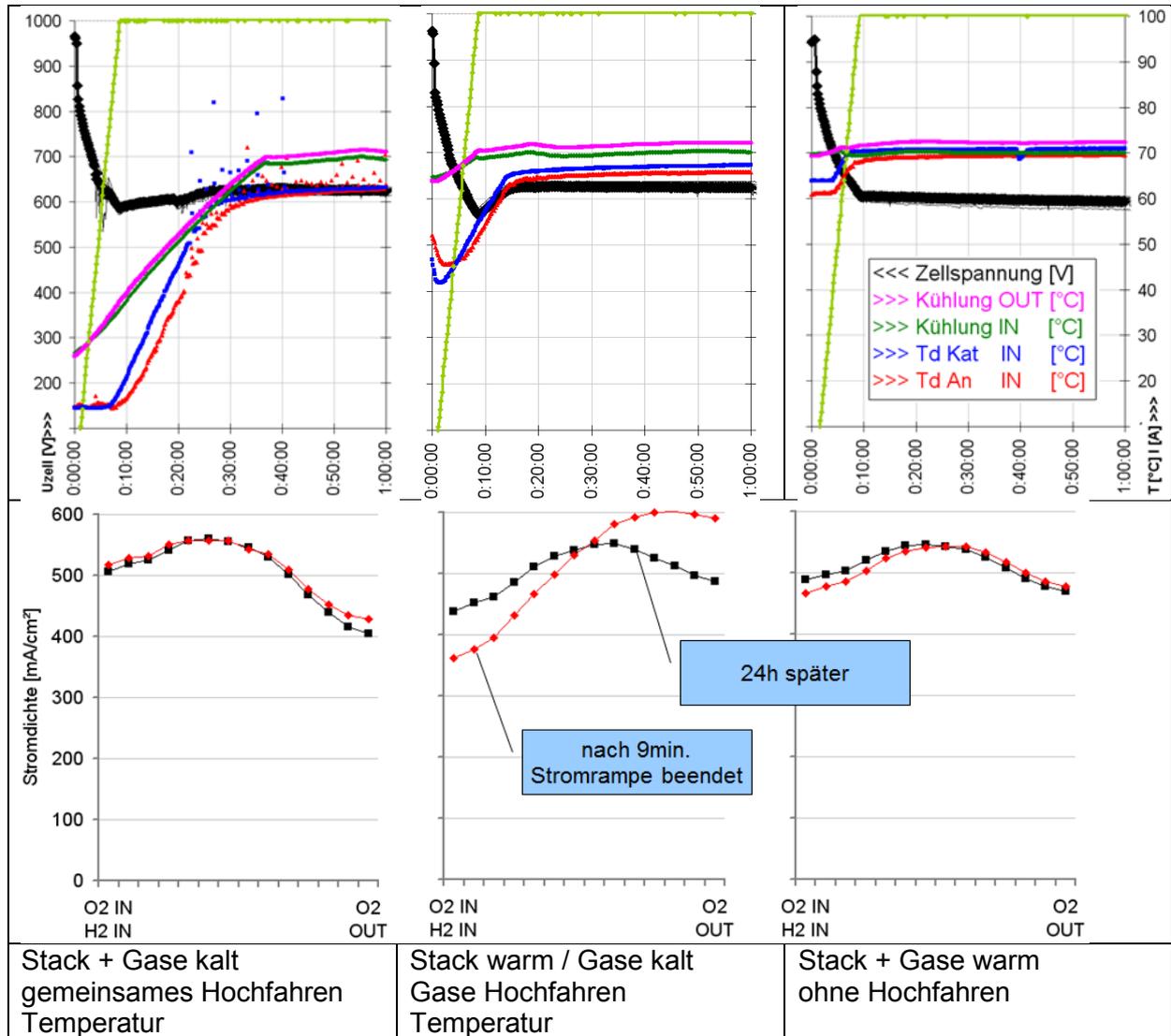


Abbildung 17 Untersuchung verschiedener Anfahrstrategien MEA Gen1

Die Stromdichteprofile aller drei Strategien ähneln sich nach 24h Betrieb. Direkt nach dem Anfahren weisen sie aber teilweise stark unterschiedlich ausgeprägte Gradienten auf (siehe Abbildung 17 Unten). Bei Strategie2 kommt es zu einem Gradienten von ca. 250mA/cm<sup>2</sup>. Dieser Gradient verursacht einen erheblichen Stress der MEA und sollten vermieden werden. Strategie 1 erfordert einen erhöhten Regel- und Kontrollaufwand, wobei Strategie 3 einfach zu realisieren ist. Die Strategie wurde in weiteren Tests auf allen Testständen übernommen. Eine Umsetzung im Demonstrator ist möglich und ist erfolgt.

**IE / SC****Entwicklung angepasster Betriebsparameter**

Nachfolgend sind die wichtigsten Betriebsparameter der MEA-Gen0 aus der inhouse5000 benannt und dazu im Vergleich die im Projekt angepassten Parameter für MEA-Gen2.

	Betriebsparameter	MEA-Gen0 inhouse5000	MEA-Gen1+2 Inhouse5000+
Kathode	Stöchiometrie	2,4 konstant	2,0 variabel
	Eingangstemperatur / Feuchte	65°C	60°C
Anode	Stöchiometrie	1,4 konstant	1,3 variabel
	Eingangs Temperatur / Feuchte	65°C variabel	60°C variabel
	Gaszusammensetzung	H2/CO2 = 70/30	H2/CO2 = 78/22
	An-/Abfahren	Ohne Spülung	Mit Spülung
Kühlung	Eingangstemperatur	65°C	70°C
	Ausgangstemperatur	65°C (Regeltemperatur)	70°C (Regeltemperatur)
	Anfahren Stack	Ohne Vorheizen	Mit Vorheizen
Elektrik	Stromdichte (Nennarbeitspunkt)	0,5A/cm <sup>2</sup>	0,4A/cm <sup>2</sup>
	Zellspannung bei Abschalten	Bleed Down ohne Überwachung	Bleed Down mit Überwachung

Tabelle 4 Übersicht Betriebsparameter

Auf die optimierten Parameter für MEA-Gen2 wird in 2.4 ausführlich bei den Stacktests eingegangen.

**IE / SC****Beistellung von Stacks an SC****Inbetriebnahme Short-Stack bei Solvicore (Aufnahme Vergleichswerte mit MEA Gen0)**

Im März 2011 wurde der erste Short-Stack mit einer IE- Nummer R05061106 (IHE-S01 – Bezeichnung bei SC) an SC übergeben, so dass am 16.03.2011 der Stack mit Unterstützung von IE beim Projektpartner SC erstmalig in Betrieb genommen werden konnte. Dieser Stack war schon mit der MEA-Gen1 ausgerüstet, aber noch mit dem bis dahin verwendeten Flowfield für MEA-Gen0. Im Rahmen dieser Inbetriebnahme wurde das Testprotokoll abgestimmt und über bauliche Änderungen am SC-Teststand diskutiert.

Im Juni 2011 wurde ein zweiter Short-Stack R10111108 (IHE-S02) an SC übergeben, der es dem Projektpartner ermöglichte, MEAs in Eigenregie zu wechseln. Dazu wurde am 15.06.2011 ein Arbeitstreffen in Hanau durchgeführt, bei dem der Projektpartner in die Stackmontage eingewiesen wurde. Dazu wurden u.a. die unterschiedlichen Werkzeuge zur mechanischen Verpressung des Zellstapels aufeinander abgeglichen. IE erstellte eine ausführliche Montage- und Demontageanleitung und übergab diese an SC.

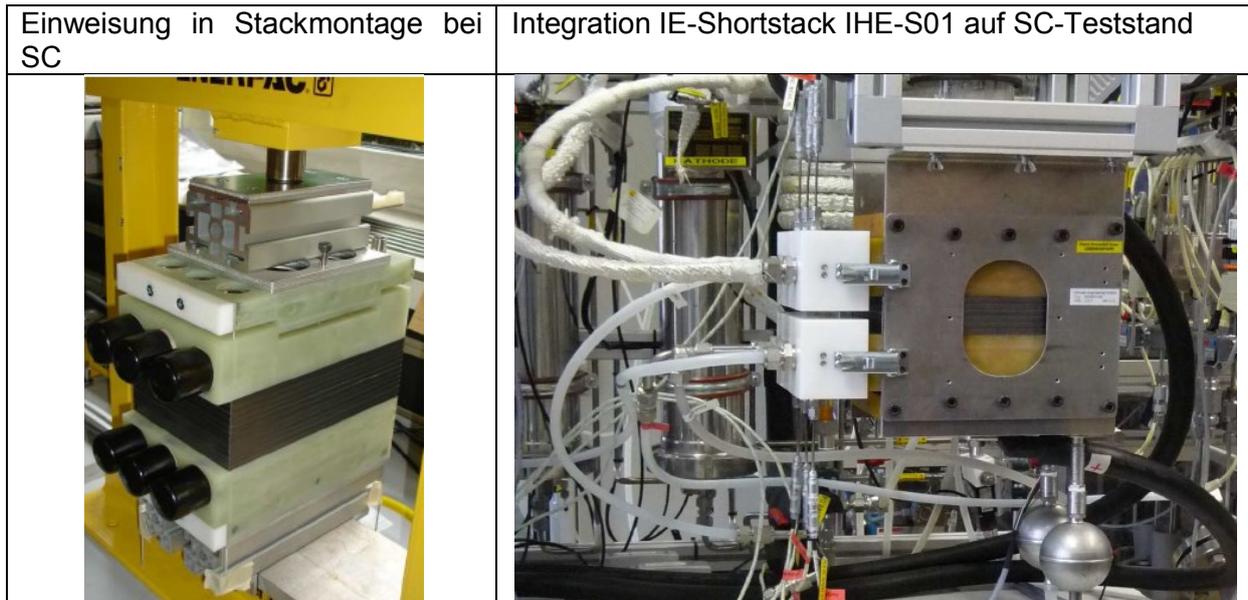


Abbildung 18 IE-Shortstacks bei SC

Mit dem 1. Shortstacks wurde die Reproduzierbarkeit und Übertragbarkeit von Messwerten aus IE-Testständen auf SC-Testständen überprüft. Ein Vergleich zur Performance der MEA-Gen1 vom Einzelzelltestsystem bei SC zeigte den Stand der Stackentwicklung bei IE und der bisherigen systemischen Prozessparameter.

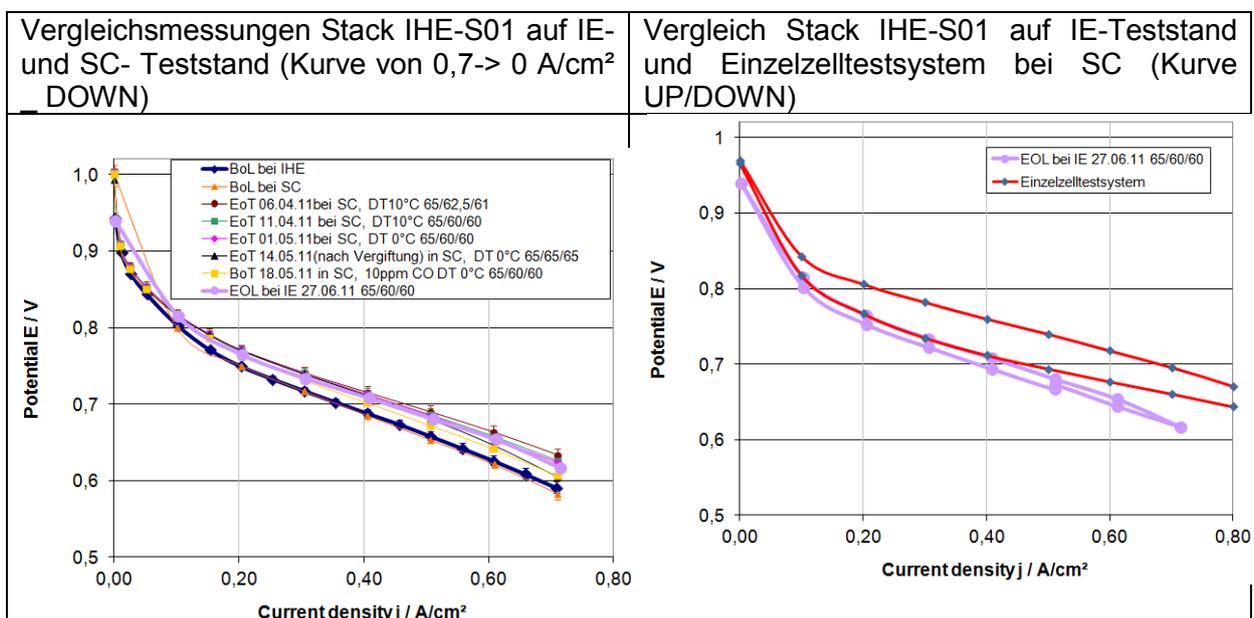


Abbildung 19 MEA-Gen1 im Vergleich auf verschiedenen Testsystemen und Zellflächen

Stack IHE-S01 wurde vor der Beistellung an SC auf einem IE-Teststand ca. 100h betrieben wobei wichtige Kenngrößen wie z.B. UI-Kurve aufgenommen wurden. Nach einer Testzeit von ca. 2200h bei SC wurde der Stack wieder auf einem IE-Teststand für ca. 500h betrieben. Die Testung bei SC kann in mehrere Abschnitte untergliedert werden, in denen Variationen von Betriebsparametern systematisch untersucht wurden. Schwerpunkt lag dabei auf Befeuchtung und Stöchiometrie. Der Testverlauf lässt sich wie folgt gliedern:

- Zunächst wurde bei einem Lastpunkt von konstant 100A gearbeitet; der von IE übernommene Stack stellte sich als noch nicht vollständig konditioniert heraus. Die weitere Konditionierung wurde für Programmierungsarbeiten am Teststand genutzt.
- Dann wurden Gaskonditionierung und Eingangsfeuchte schrittweise um den derzeitigen Betriebspunkt des Systems variiert.
- In weiterer Folge wurde dem synthetischen Reformat erstmals 10ppm CO zugemischt, dann die Stöchiometrien schrittweise auf 1,2/1,8 abgesenkt.

Für einen Betrieb ohne Begleitheizung der Medienversorgung zeigte sich das System nicht ausreichend robust:

Eine wichtige Erkenntnis aus dem Austausch dieses Stacks war:

- Bereits der erste extern betriebene Stacktest konnte über einen Zeitraum von 2000h ohne Ausfall von Stack oder MEA betrieben werden
- Bei SC wurde für die MEAs G1 im IHE-Shortstack Degradationsraten von  $<5\mu\text{V/h}$  gefunden, was einer Lebenserwartung von  $>40000\text{h}$  entspricht. Dies demonstrierte in einem frühen Projektstadium das vorhandene Potential, sowohl der MEA wie auch der Hardware.
- Performance des Stacks unmittelbar nach Wechsel der Testsysteme identisch und reproduzierbar in beide Richtungen
- Bei längerem Betrieb erheblicher Gewinn an Performance auf SC-Teststand durch andere An- und Abfahrstrategie als auf IE-Testständen (ca.  $20\text{mV/Zelle}$  bei  $0,5\text{A/cm}^2$ )
- Gleicher Verlust an Performance nach Rückbau und längerem Betrieb auf IE-Teststand

Die Unterschiede sind deutlich in Abbildung 19 links zu erkennen. Weitere Untersuchungen wurden im Laufe des Projektes dazu durchgeführt. Der dominierende Unterschied lag in unterschiedlichen Anfahrstrategien der Stacks. Die Betriebsstrategie der Teststände wurde sukzessive aufeinander abgeglichen so dass am Ende des Projektes nahezu identische Kurven erreicht wurden z.B. mit Shortstack 1320 siehe Tabelle (SC-Bezeichnung IHE-S05). Ergebnisse dazu werden in 2.4 präsentiert.

Die Testung bei SC kann in mehrere Abschnitte untergliedert werden, in denen Variationen von Betriebsparametern systematisch untersucht wurden. Schwerpunkt lag dabei auf Befeuchtung und Stöchiometrie. Der gesamte Testverlauf ist in Abbildung dargestellt und lässt sich wie folgt gliedern:

- Zunächst wurde bei einem Lastpunkt von konstant 100A gearbeitet; der von IE übernommene Stack stellte sich als noch nicht vollständig konditioniert heraus. Die weitere Konditionierung wurde für Programmierungsarbeiten am Teststand genutzt (Abschnitt 0)
- Dann wurden Gaskonditionierung und Eingangsfeuchte in den Abschnitten 1 und 3 um den derzeitigen Betriebspunkt des Systems (Abschnitt 2) variiert.
- In weiterer Folge wurde dem synthetischen Reformat erstmals 10ppm CO zugemischt (Abschnitt 4), dann die Stöchiometrien schrittweise auf 1,2/1,8 abgesenkt (Abschnitte 5 und 6).
- Für einen Betrieb ohne Begleitheizung der Medienversorgung (Abschnitt 7) zeigte sich das System nicht ausreichend robust.
- In Abschnitt 8 wurden nochmals die Testbedingungen von Abschnitt 2 angefahren.

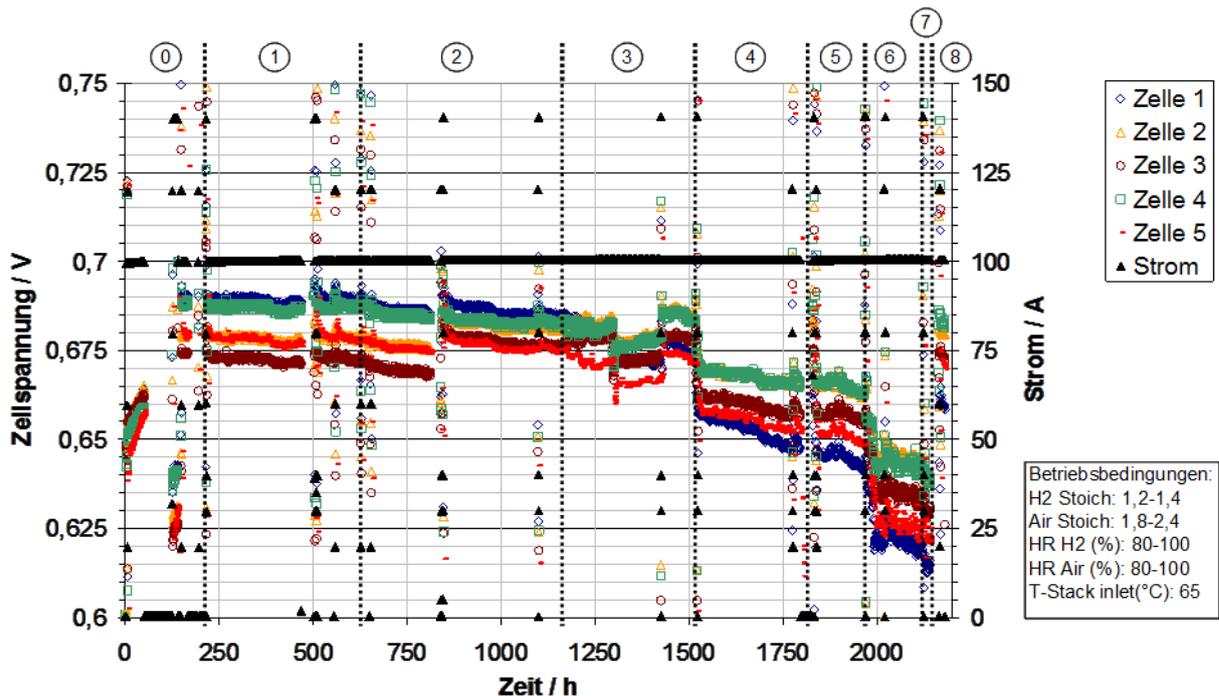


Abbildung 20 Übersicht der Stacktestung IHE\_S01

Insgesamt wurden bei SC 6 verschiedene Shortstacks getestet. Die längste Betriebsdauer wurde dabei mit IHE-S04 erzielt (>4000 Stunden). Das angewandte zyklische Testprogramm war als beschleunigter Alterungstest konzipiert, um das durchschnittliche Verhalten eines Systems nachzustellen:

- Teillast
- Vollast
- verschiedene Stoppzeiten

Es kam schließlich der in Abbildung 44 dargestellte Testzyklus zum Einsatz.

### **IE /RBZ**

Für Untersuchungen mit angepassten Betriebsparametern, neuen Komponenten und der Weiterentwicklung der gesamten Anlagenverschaltung wurde bei RBZ eine Testaufbau realisiert mit dem wichtige geplante und notwendige Änderungen im Anlagenkonzept einzeln und in Kombination getestet wurden. Es gab dazu unterschiedliche Konfigurationen von Testaufbauten.

1. Seit 2/2012 liefen Tests mit einem neuen Reformertyp 1 (Voruntersuchungen) und einem Fullstack mit MEA-Gen 0
2. Seit 3/2013 liefen Tests mit einem neuen Reformertyp 2 (dieser wird im Demonstrator verwendet) und einem Fullstack mit MEA-Gen 0

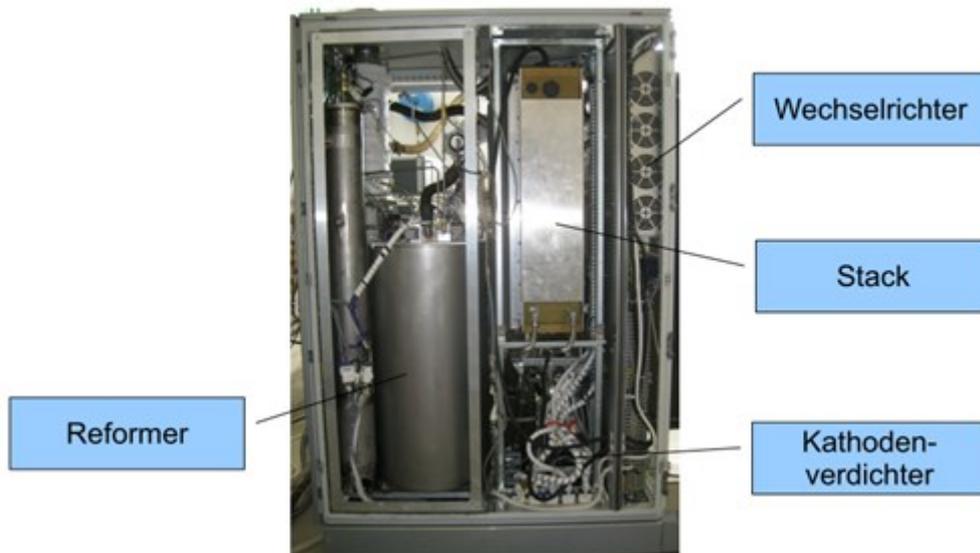


Abbildung 21 Testaufbau für Voruntersuchungen zum Demonstrator

Mit dem in Abbildung 21 dargestellten Aufbau wurden im Projektzeitraum seit 2/2012 nachfolgende Detailuntersuchungen durchgeführt:

- Erprobung neuer Reformertyp
- Wirkungsgradmessungen von BoP Komponenten und Baugruppen
- Vermessung der Dynamik der Gesamtanlage
- Erprobung einer optimierten Wasseraufbereitung
- Erprobung einer optimierten Entschwefelung für verlängertes Wartungsintervall
- Test neuer Sensoren
- Erprobung einer Betriebsroutine zur Erdgasspülung des Stack
- Erprobung optimierter Anlagenverschaltungskonzepte (z.B. Intercooler)
- Erprobung der neue Leistungselektronikbaugruppe
- Erprobung einer Kathodenluftversorgung mit Kennfeldsteuerung

Alle Erkenntnisse aus diesen Tests sind in die Entwicklung und Planung des Demonstrators eingeflossen.

## 2.3 AP 3 Fehler und Ausfallanalyse unter Nutzung der Feldtestdaten

### RBZ

Die zweijährige Feldtest der installierten Systeme inhouse5000 ist innerhalb der Projektlaufzeit abgelaufen. Die erste Anlage wurde im Mai 2012 stillgelegt, die Feldtestphase der fünften Anlage endete im August 2013. Mit einem der Feldtestpartner, den Stadtwerken Döbeln, wurde 2012 der Weiterbetrieb der Anlage beschlossen. Mit einem Vollwartungsvertrag zu jährlichen Kosten von 950 € sollte die inhouse5000 so lange betrieben werden, bis größere Reparaturen anfallen. Es konnte hier eine Anlagenlaufzeit von über 15.000 Stunden erreicht werden, bis im Juni 2013 der Totalverlust der Anlage zu verzeichnen war, da das Hochwasser der Mulde das Stadtbad überschwemmt und die Anlage vollständig unter Wasser gesetzt hatte.

Die arbeitstäglige Auswertung der Feldtestdaten wurde kontinuierlich fortgeführt und umfangreiche Tages-, Monats- und Langzeitauswertungen erstellt. Dadurch wurden weitergehende Analysen des Betriebsverhaltens und der Degradationsmechanismen ermöglicht. Aus den Daten wurden fortlaufende Fehler- und Ausfallanalysen erstellt und eventuelle Schwachstellen im Rahmen von Optimierungen oder der Neuentwicklung von Regelkreisen erkannt und abgebaut.

Die aufgelaufenen Fehler- bzw. Abschaltgründe wurden in Hauptkategorien mit weiterführenden Unterkategorien eingeteilt (Abbildung 22). Im Vergleich mit Veröffentlichungen und Präsentationen anderer Hersteller z.B. aus dem callux-Projekt /2/ zeigt sich bei den inhouse5000-Feldtests eine ähnliche Verteilung der aufgetretenen Vorfälle, die zur Anlagenabschaltung führten.

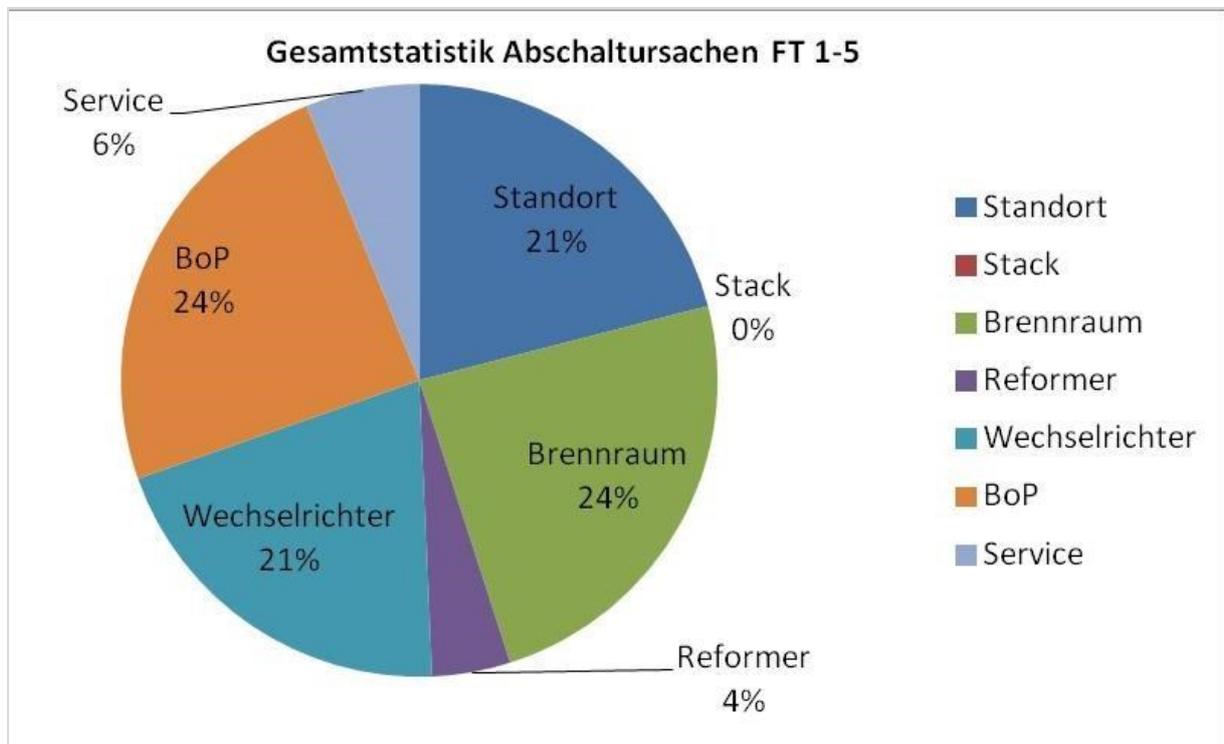


Abbildung 22 Grafische Darstellung der Ursachen für Anlagenabschaltungen (Summe aller Feldtests)

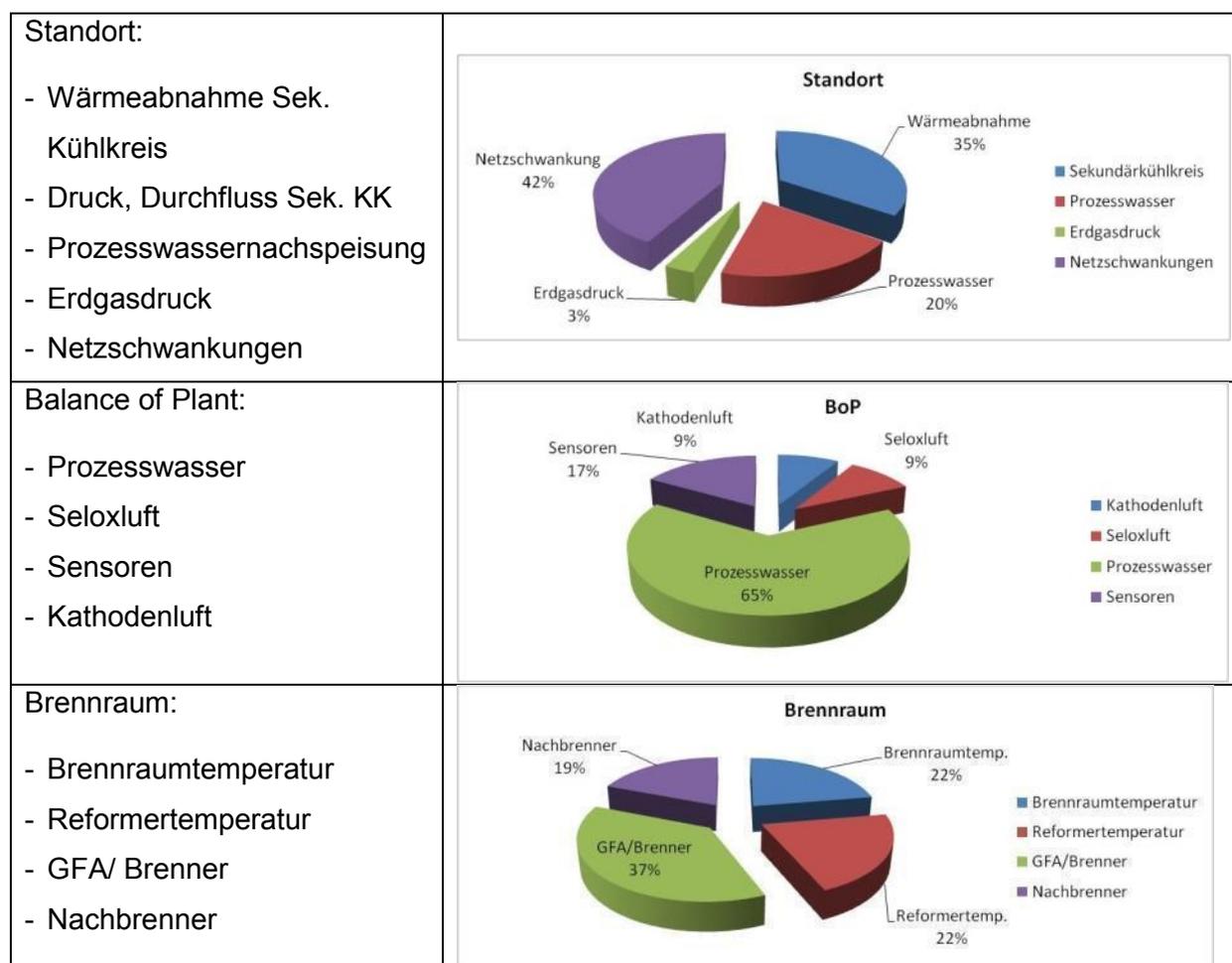


Abbildung 23 Detailanalyse der Kategorien für Fehlerursachen im Feldtest

Insgesamt war der Wartungsaufwand für Wechsel von defekten Komponenten oder Verbrauchsmaterialien während des durchgeführten Feldtests zu hoch (Abbildung 24). Damit war die Senkung der Wartungsintervalle und der notwendigen Verbrauchsmaterialien ein Schwerpunkt bei der Entwicklung von neuen BoP Lösungen für den Demonstrator. Es wurden dafür die folgenden Schwerpunkte gesetzt:

- Luftfilter – Brennstoffzellenmodul
- Leitfähigkeitsaufbereitung im primären Kühlkreislauf – Brennstoffzellenmodul
- Wasseraufbereitung – Reformermodule
- Erdgasentschwefelung – Reformermodule

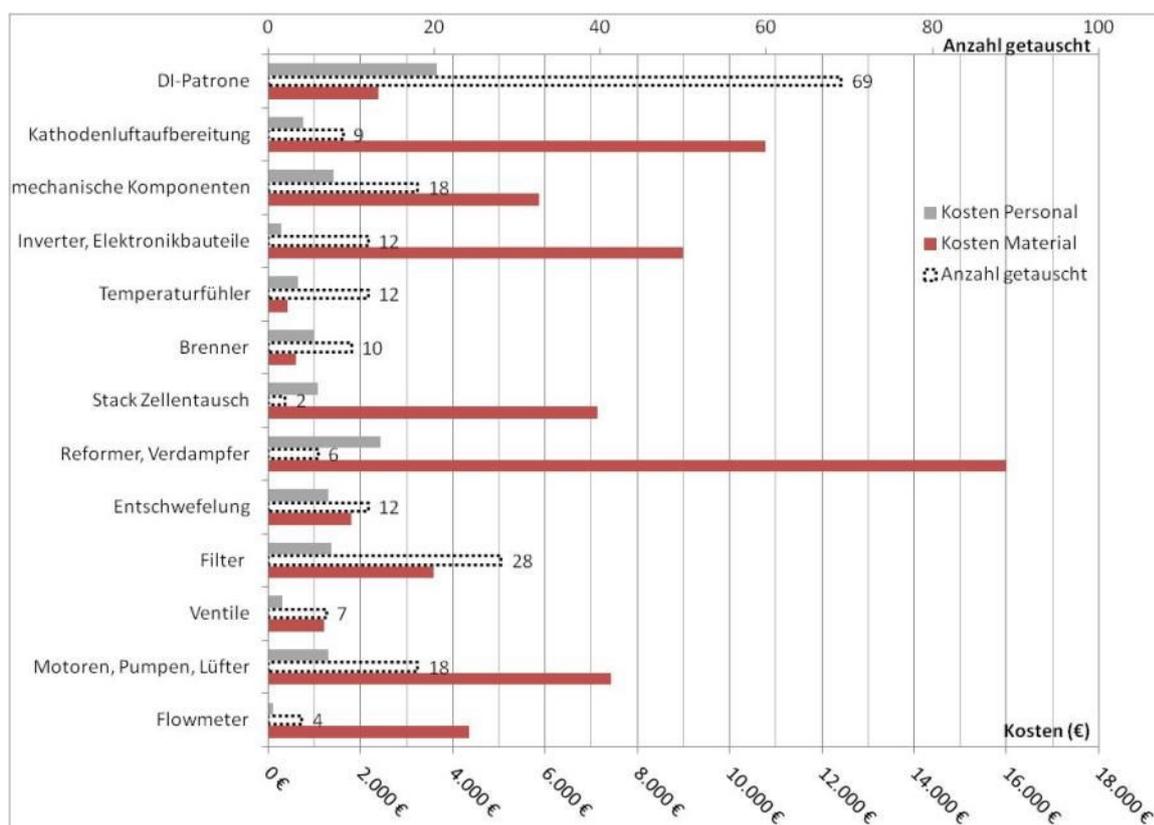


Abbildung 24 Feldtest inhouse 5000 - Anzahl getauschter Komponenten und zugehörige Kosten für Material und Personal

In Abbildung 24 wird deutlich, dass die Hauptkomponenten Stack, Reformer, Kathodenluftaufbereitung und Inverter auch die höchsten Materialkosten aufweisen. Die Personalkosten für Wartung oder Tausch sind dagegen relativ gering. Dagegen sind die Wartungskomponenten Entschwefelung und DI-Patrone mit moderaten Kosten, aber erhöhtem Personalaufwand verbunden, da für den Wechsel jeweils Serviceeinsätze notwendig wurden. Fazit aus diesen Feldtestergebnissen ist konform mit den Entwicklungszielen im Projekt – die Zuverlässigkeit der Komponenten muss erhöht werden, die Lieferanten sind gründlich auszuwählen, Alternativen für die Beschaffung zu erwägen und nicht zuletzt sind die Serviceintervalle drastisch zu erhöhen. Im Laufe der Systementwicklung konnten hier hervorragende Verbesserungen erzielt werden.

**IE / SC****Schutzrand im Ein-/ Ausströmbereich**

Im Projektzeitraum wurde u.a. der verwendete Schutzrand der MEA Gen0 als Schwachstelle identifiziert. Es gab dabei zwei wesentliche Punkte die im Projektzeitraum durch Änderung des eingesetzten Materials sowie des Designs der MEA zu einer deutlichen Erhöhung der Lebensdauer und Stabilisierung der Performance beitrugen.

1. Die Spannungen der Einzelzellen im Stacks drifteten im Betriebszeit kontinuierlich auseinander. Dies wurde durch eine Verformung des Schutzrandes in den Ein- und Ausströmbereichen des Flowfields hervorgerufen (Abbildung 25 links). Dadurch kam es zur undefinierten und ungleichen Gasversorgung der Zellen. Das Zellspannungsband betrug zu Begin of Life (BOL) 6-22mV und war nach einigen tausend Stunden >130mV.
2. Die Gas- Leckagerate über die MEA nahm mit der Betriebszeit erheblich zu, bis sie nicht akzeptable Grenzwerte überschritt. Diese Stacks wurden in den Feldtest-anlagen ausgewechselt und einer Diagnose unterzogen. Der Schutzrand war vorwiegend in den Ein- und Ausströmbereichen des Flowfields brüchig bis hin zur Bildung von Löchern (siehe Abbildung 25 rechts).



Abbildung 25 Leistungsmängel, Alterungsmechanismen MEA- Schutzrand

Beide Schwachstellen konnten nachweislich beseitigt werden durch eine Änderung des verwendeten Schutzrandmaterials und durch die mechanische Abstützung und Abdeckung des Ein-/Ausströmbereiches mit GDL-Material.

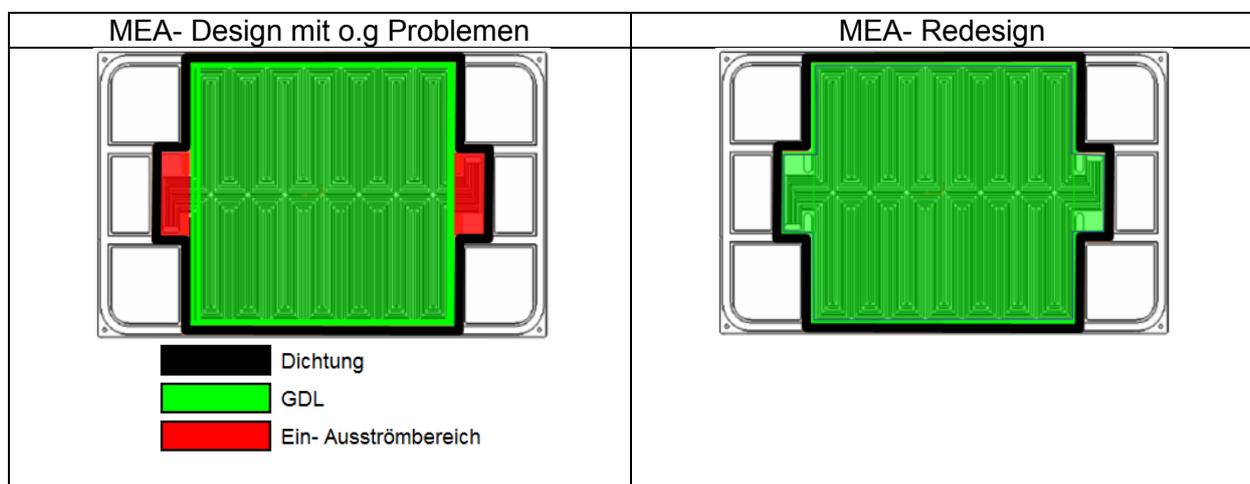


Abbildung 26 Designänderung zur Stärkung MEA-Schutzrand

**IE / RBZ / SC****Leitfähigkeit im Kühlkreis**

Im Projektzeitraum wurde beim Betrieb der Feldtestanlagen sowie beim Betrieb von Shortstacks über 6000h Betriebsstunden erkannt dass die Leitfähigkeit des Stackkühlkreises so gering wie möglich gehalten werden muss. Durch den Anstieg der Leitfähigkeit wirken die elektrischen Potentiale des Stacks wie Elektroden bei der Elektrolyse. Es kommt zur bekannten Zersetzung von Elektroden, besonders stark betroffen ist das positive Potential.

	Ausgangsmanifold	Eingangsmanifold
Plus Zelle 8	 <p>Starke Ablagerung ähnlich Galvanisierung</p>	 <p>Starke Zersetzung – Material ist weich</p>
Minus Zelle 1	 <p>unauffällig</p>	 <p>unauffällig</p>

Abbildung 27 Beispielhafte Zersetzung von Bipolarplatten am Shortstack IHE-S04

Dieser permanente Anstieg wurde durch Nachrüstung von Leitfähigkeitsmesszellen in Feldtestanlagen sowie Testständen bei IE und SC nachgewiesen (siehe Seite 52) Ein Anstieg der Leitfähigkeit kann viele Ursachen haben, dazu wurden umfangreiche Materialuntersuchungen im Projektzeitraum durchgeführt (siehe Abbildung 10). Materialien die bei diesen Materialtests stark auffällig waren wurden schrittweise aus den Stackaufbauten bzw. aus den Testständen entfernt.

## 2.4 AP 4 Entwicklung/ Optimierung der Einzelkomponenten

### SC

#### MEA-Entwicklung

Die MEA-Entwicklung bei SolviCore konzentrierte sich auf einzelne Bestandteile der MEA, um gezielt die Leistungs- und Degradationseigenschaften einer Reformat-MEA zu verbessern, sowie auf allgemeine Fortschritte bei der Fertigungstechnologie. Im Fokus standen:

- Neuentwicklung der Anoden-Elektrode
- Umstieg von CCB- auf CCM-Technologie
- Wechsel des GDL-Materials

Die MEA-Entwicklung und -Testung war in 3 Generationen geplant. Innerhalb der einzelnen Generationen waren dabei Veränderungen von einzelnen MEA-Bestandteilen, oder auch Fortschritte/Veränderungen in der Fertigungstechnologie geplant. Diese Modifikationen wurden durch Revisionsnummern kenntlich gemacht:

- Mit Gen 0 wurde der Ist-Stand zu Projektbeginn aufgenommen
- In Gen 1 erfolgten sukzessive Verbesserungen in Leistung und Degradationsverhalten
- In Gen 2 wurde die entwickelte MEA als Produkt finalisiert

Bedingt durch die im Projektverlauf erhaltenen Ergebnisse und Notwendigkeiten wurden außerdem Weiterentwicklungen, die nicht im Rahmen dieses Förderprojekts entstanden, zur Anwendung gebracht wie der Wechsel auf ein stabileres Randmaterial und der Einsatz einer Kathodenelektrode mit höherer Beladung zur Verbesserung der Langzeitstabilität.

Dies kam in Gen2 zu tragen. Allgemeine Verbesserungen der Fertigungstechnik flossen ebenfalls in die Entwicklung ein, so daß gegenüber dem Projektstart die Qualität von MEA-Komponenten (speziell der Elektrodenschichten, Rand) sowie des MEA als Ganzes verbessert werden konnte.

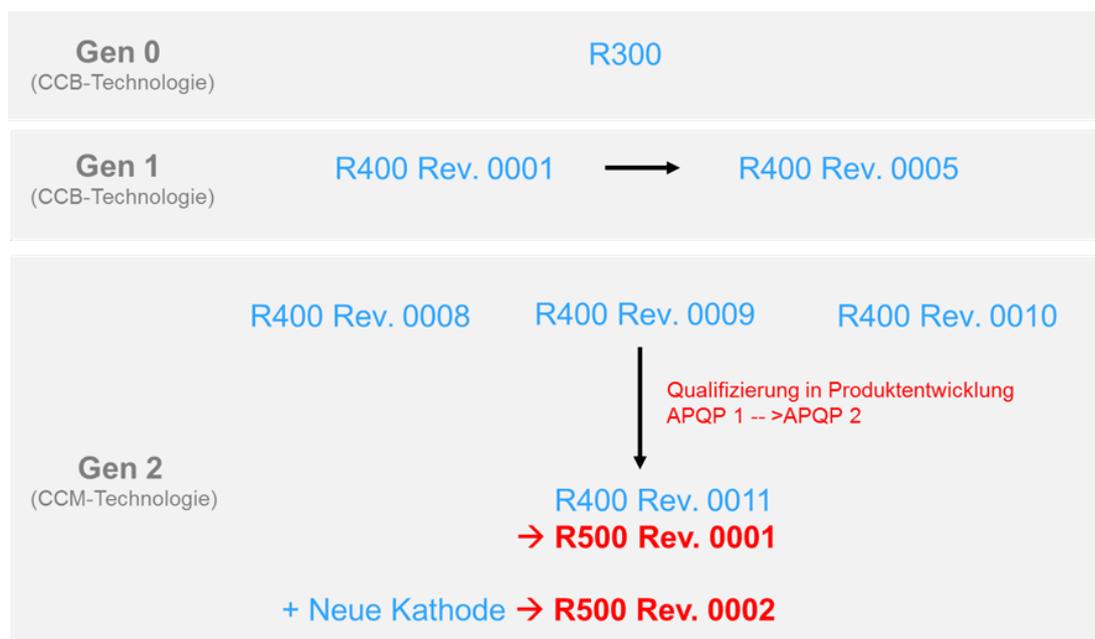


Abbildung 28 Wichtige Schritte der MEA-Entwicklung im Überblick

In Zahlen lassen sich die wichtigsten im Projekt erzielten Entwicklungsfortschritte wie folgt zusammenfassen:

- Die Zellspannung bei 500mA/cm<sup>2</sup> wurde verbessert von
  - a) 625mV, 0,315 W cm<sup>-2</sup> zu Projektbeginn auf
  - b) 725mV (0,35 W cm<sup>-2</sup>) zu Projektende
- Die Degradationsrate von 5µV/h (ermittelt im Zyklentest, 4.000h) ergibt hochgerechnet für 40.000h eine verbleibende Leistung von 0,25 W cm<sup>-2</sup> (bei 500mA cm<sup>-2</sup>)

Wichtige Erkenntnisse für das Arbeitspaket MEA-Entwicklung wurden in Shortstack-Testungen mit IHE-Hardware bei SolviCore erzielt. Siehe hierzu auch AP2. Ein Abriss über wenige wichtige Details der einzelnen Stack-Testungen sowie wichtiger Ergebnisse gibt daher einen Überblick über die Entwicklungshistorie der MEAs innerhalb des Projekts:

- **Stack IHE-S01**
  - o Getestet wurde R400 Rev.0001 (Gen 1)
  - o Anders als spätere Stacks war dieser nur mit einer MEA-Variante ausgestattet
  - o Über 2175h wurden systematisch Betriebsparametervariation durchgeführt
  - o Degradationsrate wurde ermittelt mit < 5µV/h
- **Stack IHE-S02**
  - o Getestet wurden Variationen der Gen 1: R400 Rev.0001, R400 Rev.0005, R400 Rev.0007
  - o Prozessverbesserung für MEA ist erfolgreich
  - o Es wird ein kontinuierlicher Leitfähigkeitsanstieg im Kühlkreislauf festgestellt
  - o Der Testverlauf für diesen typischen Robustheits- und Dauertest bei konstanter Last ist in Abbildung 29 dargestellt. Betriebsparameter wurden systematisch variiert, um Unterschiede in Betriebsverhalten und Degradationsraten zu ermitteln.
- **Stack IHE-S03**
  - o Dieser Stack stellt Gen 1 als Referenz (R400 Rev.0001) verschiedenen Kandidaten für MEA-Generation Gen 2 gegenüber (R400 Rev.0008, R400 Rev.0009, R400 Rev.0010)
  - o Es kommen erstmals CCM-basierte MEAs zum Einsatz.
  - o Der Test führte zur Entscheidung, die R400 Rev.0009 aufgrund höherer Leistung und Robustheit in Gen 2 weiterzuentwickeln.
- **Stack IHE-S04**
  - o R400 Rev.0009 wurde weiterentwickelt zu R400 Rev.0011 (Hochstufung im Produktentwicklungsprozess); dazu kommen in der Fertigung größere Aggregate zum Einsatz
  - o Es werden vergleichend zwei Anodenbeladungen der Rev.0011 als Kandidaten für MEA-Generation Gen2 getestet:
    - 1) Beladung A – niedrig beladen
    - 2) Beladung B – hoch
  - o Mit Testlaufzeit über 4.000h ist dies der längste im Rahmen des Projekts bei SC durchgeführte Stacktest. Zum Einsatz kommt ein Zyklentest; eine Absicht dabei ist die beschleunigte Alterung. Der gesamte Testverlauf ist in Abbildung dargestellt:
    - Es wurden Degradationsraten <5µV/h beobachtet.
    - Parallele Analysen der U/I-Kurven führen zu Degradationsraten von 5-11µV/h.
    - Die ermittelten Degradationsraten hängen von Betriebsparametern ab.

- Die Degradationsraten sind unabhängig von den getesteten Anodenbelastungen
- Es fällt die Entscheidung für Beladung A (niedrig), für Gen 2.
- **Stack IHE-S05**
  - Neben weiterer Dauertest wurde mit diesem Stack ein zweiter Round-Robin-Test durchgeführt.
  - IHE-S05 erbringt den Nachweis, daß die Vergleichbarkeit der Testergebnisse zwischen IHE und SC auch zu Projektende gegeben ist.
- **Stack IHE-S06**
  - Dieser Stack testet 2 Varianten Gen 2 (unterschiedliche Kathoden) im Vergleich:
    1. R500 Rev.0001 (identisch zu R400 Rev.0011 Beladung A)
    2. R500 Rev.0002 (implementiert Kathode aus anderem Projekt)
  - Es kommt ein neues Randkonzept incl. MEA Design zum Einsatz (robusteres Material); dieses wurde auch in anderen Projekten entwickelt.
  - Es kommen neue Flowfelddesigns zum Einsatz.
  - Anfangs ergeben sich Schwierigkeiten, der Stack läuft instabil.
  - Stöchiometrie der Anode muss von 1,3 auf 1,4 erhöht werden

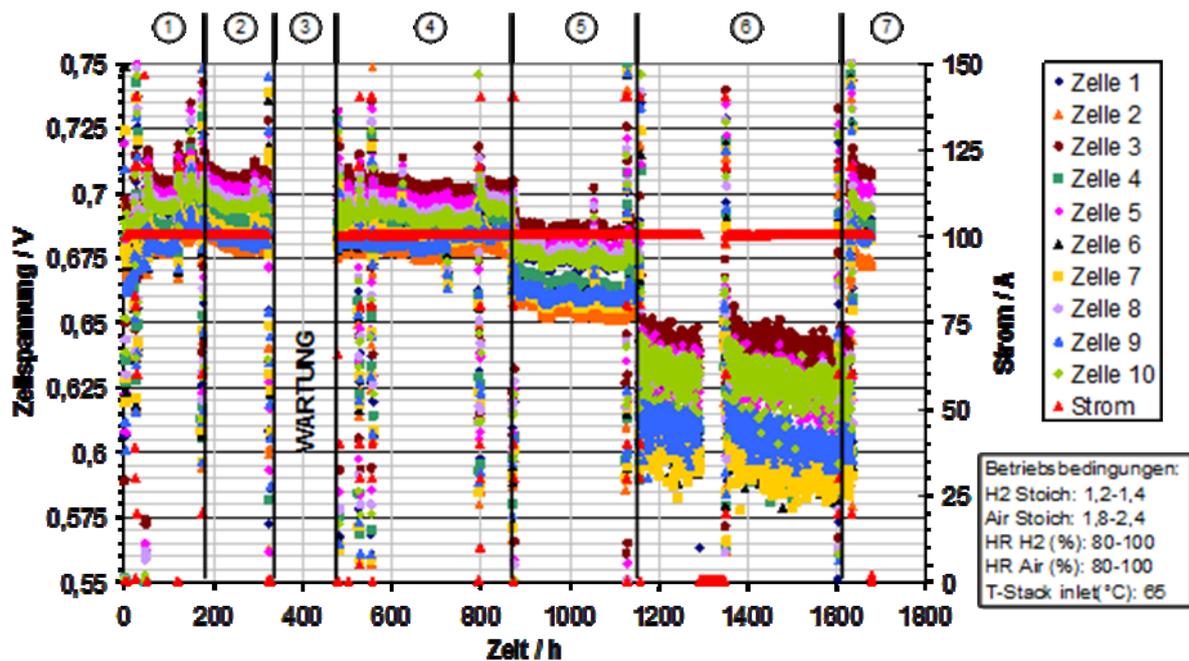


Abbildung 29 Stacktest IHE-S02, ein typischer Robustheits- und Dauertest

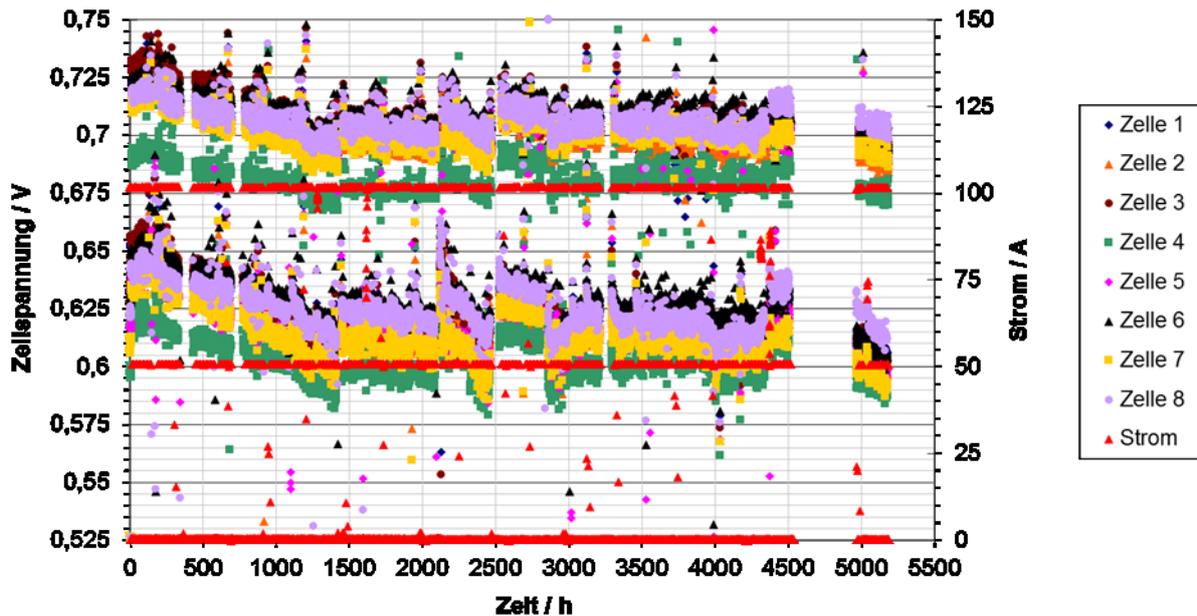


Abbildung 30 gesamter Testverlauf von IHE-S04

## SC

### Post-mortem MEA SC

Für die Zustandsanalyse von MEAs (post-mortem Analyse) standen gängige Verfahren für in-situ und ex-situ Untersuchungen zur Verfügung.

An In-situ Verfahren standen klassische elektrochemische Untersuchungen zur Verfügung: U/I-Kurven, zyklische Voltametrie, Crossover-Messungen, Widerstandsmessungen, sowie Impedanzspektroskopie. Spezialisierte elektrochemische Messungen kamen ebenfalls zum Einsatz, z.B. um den Vergiftungseffekt von CO zu quantifizieren. Die elektrochemischen Untersuchungen standen für Probengröße von 10cm<sup>2</sup> bis 200cm<sup>2</sup> zur Verfügung. Zu Projektbeginn wurden elektrochemische post-mortem Untersuchungen an Proben von R400 MEAs durchgeführt. Die Ergebnisse, wie z.B. in Abbildung 31 gezeigt, halfen bei der Planung der Entwicklungsarbeiten.

An ex-situ Untersuchungen standen REM-Schliffbilder sowie Elementanalysen zur Verfügung.

Außerhalb des Förderprojekts wurde eine Methodik erarbeitet, welche die Entnahme von bis zu 4 Proben mit aktiver Fläche 10cm<sup>2</sup> aus einer 200cm<sup>2</sup>-MEA erlaubt. Es konnte der Nachweis geführt werden, dass gängige elektrochemische Untersuchungen für Proben mit aktiver Fläche bis hinab zu 10cm<sup>2</sup> zu vergleichbaren Ergebnissen führten, und dass Proben mit 10cm<sup>2</sup> Aktivfläche geeignet sind, örtliche Unterschiede in den Eigenschaften von MEAs zugänglich zu machen. Es wurde daher angestrebt, dies als ergänzende Methode für die post-mortem Untersuchung im Projekt zu implementieren. Dies gelang leider nicht. Die Vorbereitung kleinflächiger Proben aus Mustern R400 und R500 stellte sich als schwierig heraus. Da nicht zuverlässig mehrere messbare Proben aus einer MEA erhalten werden konnten, musste auf den Einsatz dieser Methode verzichtet werden.

Kenngröße		BoL			EoL			Bemerkung
H2 Crossover		100%			140%			leicht erhöht
ECA Kathode		100%			139%			Ru Vergiftung deutlich zu erkennen, kaum Pt-peak, fast nur Ru Peak, Ru scheint sich auch auf C abzuscheiden
ECA Anode		100%			101%			Keine Peakverschiebung, keine Oberflächenverluste, keine Herausbildung von Pt-Peak
CO Titration	CO- Gehalt [ppm]	50	100	200	50	100	200	Anodenaktivitätsverluste, Oszillationen bei höheren CO Konzentrationen (daher nicht messbar)
	$\Delta U$ [mV]	-80	-119	-136	-110	n.b.	n.b.	
Einfluß Anodenstöchiometrie (2 – 1,1)	Stromdichte [A/cm <sup>2</sup> ]	0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7	Massentransportverluste auf der Anode
	$\Delta U$ [mV]	2	-6	-9	-22	+23 (?)	-49	
Einfluß Kathodenstöchiometrie (3,5 – 1,2)	Stromdichte [A/cm <sup>2</sup> ]	0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7	Massiver Verlust im Massentransport
	$\Delta U$ [mV]	-46	-57	-110	-72	-154	n.b.	
Massenaktivität Kathode		100 ± 8%			57%			ca. 43% Verlust gegenüber Referenzmittelwert

Abbildung 31: Zusammenstellung elektrochemischer Untersuchungsergebnisse R400

## IE / SC degradationsrelevante Messdaten Stack

Über den gesamten Projektzeitraum wurden degradationsrelevante Betriebszustände ermittelt, untersucht und abgestellt. Wichtig war es dabei die Realisierbarkeit nicht nur auf Testständen mit Shortstacks realisieren zu können sondern auch im neuen System inhouse5000+. Drei wesentliche Punkte werden nachfolgend beispielhaft erläutert:

- Optimierung der Verpressung der MEA und Dichtungen
- Start- / Stop- Prozedur Stack
- Absenkung der Eingangsfeuchte der Gase

## IE / SC Verpressung MEA / Dichtung

Um die Performance und Degradation des Stacks zu optimieren, wurden umfangreiche Tests zur Verpressungsrate der MEA und Dichtung durchgeführt. Ziel war es den elektrischen Wirkungsgrad der Zelle zu erhöhen und die Degradation der MEA durch schlechte Verpressung zu minimieren.

Empfehlungen für optimale Verpressungsraten wurden von SC vorgegeben. Vermessungen von Kraft- Weg- Kurven der MEA wurden bei beiden Projektpartnern durchgeführt und in einem iterativen Prozess aufeinander abgeglichen.



Abbildung 32 Messeinrichtungen für Kraft-Weg Kurven

Der Abgleich der Verpressung wurde mittels Aufnahme von Kraft-Weg Kurven im Projektzeitraum nur mit der MEA Gen0 und Gen1 durchgeführt und war erfolgreich. Da bei IE und SC unterschiedliche Messeinrichtungen sowie andere Zellflächen untersucht werden waren mehrere iterative Anpassungen und Abgleiche notwendig. Mit diesem Ergebnis konnten gezielt Änderungen in der Verpressungsrate untersucht und optimiert werden.

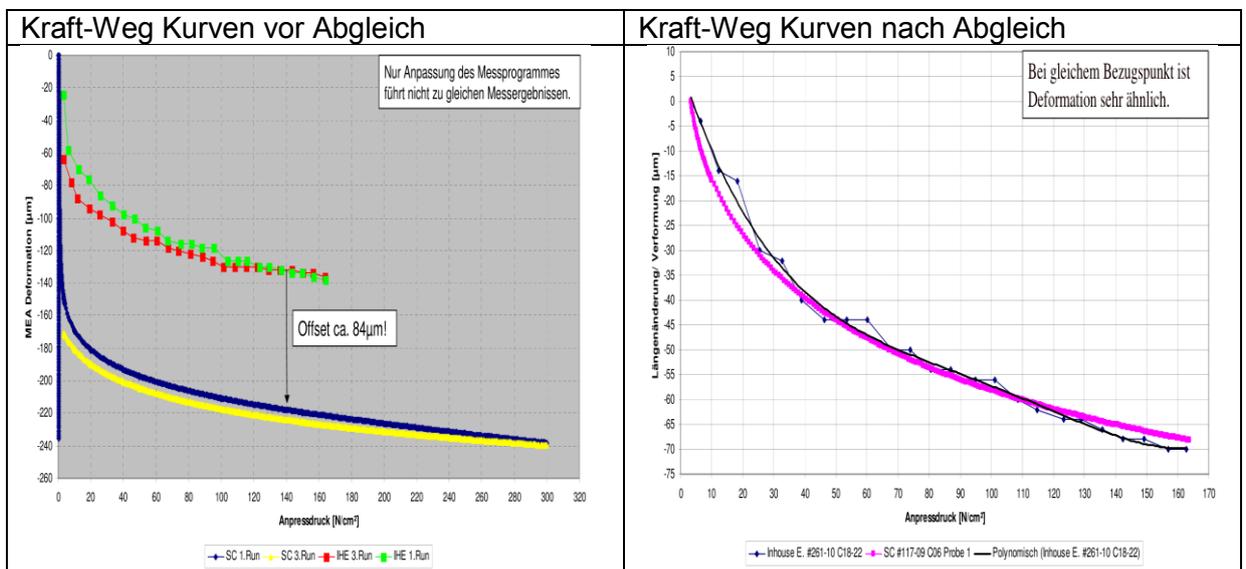


Abbildung 33 Vergleich Verpressungsraten MEA bei SC und IE

Bei IE wurden weiterhin alle kompressiblen Bauteile des Stacks vermessen und in einem Gesamtmodell zusammengefasst, daraus ließ sich das generelle Zusammenspiel von Dichtungen und MEA bestimmen und optimieren. Ein Vergleich zwischen dieser Simulation und Messungen brachte eine sehr gute Übereinstimmung (siehe Abbildung 34). Hier sind für jede Einzelkomponente die Kraft- Weg Kurven dargestellt, je nach Stackgeometrie sind die einzelnen Komponenten in den Kraftfluss eingebunden, eine simulierte und gemessene Gesamtkurve stellen die grünen Graphen dar.

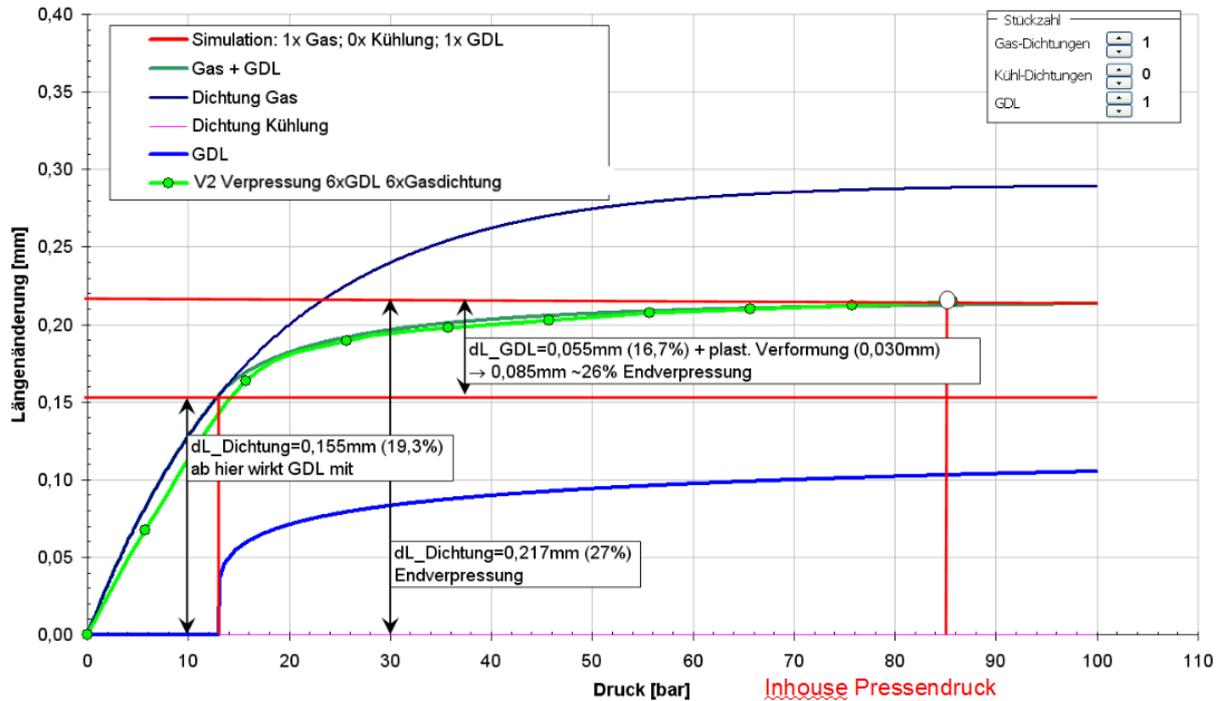


Abbildung 34 Modellrechnung und Vermessung Verpressung MEA Gen1 und Dichtung

Dieses Modell gibt es bisher nur für MEA Gen0 und Gen1. Eine Erweiterung auf MEA Gen2 erfolgt nach Projektabschluss.

Für MEA Gen2 wurde eine andere Methode verwendet. Hierbei wurde eine drucksensitive Folie des Typs Fujifilm LLW mit Messbereich 0,5 – 2,5 MPa verwendet. Nach Optimierungen die ebenfalls im Rahmen der Bachelorarbeit erfolgten liegen jetzt akzeptable Verpressungsraten und Abdruckbilder vor.

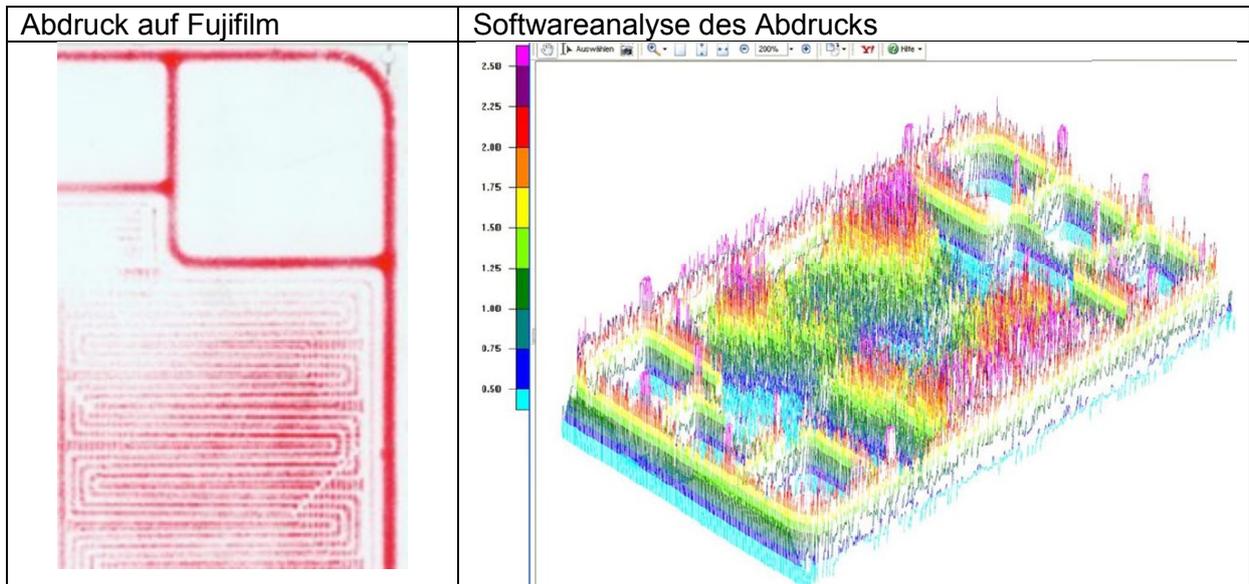


Abbildung 35 Abdruckbilder Verpressung MEA Gen2 im Stack

**IE / SC****Entwicklungsetappen Stack und MEA bis Projektende**

Im Projektzeitraum wurden bei IE 38 Shortstacks mit MEA Gen1 aufgebaut mit denen Grundlagenuntersuchungen zu nachfolgenden Schwerpunktthemen:

- Optimierung Flowfelddesign
- Anpassung systemischer Parameter
- Verbesserung Langzeitstabilität
- Leistungsanhebung (Verbesserung Stackwirkungsgrad)

Nach erfolgreichem Abschluss der Tests wurde ein Fullstack mit 90 Zellen MEA Gen1 aufgebaut und in der Testanlage bei RBZ sowie im Demonstrator getestet. Mit MEA Gen 2 wurden bei IE 4 Shortstacks aufgebaut und getestet. Ein Stack wurde wie zum Anfang des Projektes erst bei IE auf dem Teststand betrieben, dann bei SC auf dem Teststand und zum Schluss wieder bei IE betrieben. Die Ergebnisse wurden wieder verglichen und bewertet. Zum Abschluss des Projektes wurde der Prototyp eines Fullstacks mit 90 Zellen MEA Gen2 erfolgreich in Betrieb genommen und getestet. Ergebnisse dazu befinden sich Abbildung 43. Alle MEAs Gen1 wurden im Projektrahmen von SC zur Verfügung gestellt. Für MEA Gen2 wurden für Shortstacks ebenfalls MEAs von SC zur Verfügung gestellt.

Die wichtigsten Entwicklungsetappen die bei IE mit den Shortstackaufbauten durchlaufen wurden, werden nachfolgend erläutert.

Lfd. Nr.	Stack	MEA	Was wurde gemacht
1	0904	Gen0	Shortstack (5 Zellen) Stand der Technik zu Beginn des Projektes als Vergleich
2	0910	Gen0	Fullstack (80 Zellen) Stand der Technik zu Beginn des Projektes als Vergleich
3	1106	Gen1	Shortstack (5-Zeller) Stand der Technik zu Beginn des Projektes als Vergleich
4	1015	Gen1	Shortstack (7-Zeller) Flowfelddesign, Materialstärke, Prozessparameter
5	1207	Gen1	Shortstack (6-Zeller) Flowfelddesign, Materialstärke, Prozessparameter, Änderung GDL-Design, Änderung Material Verstärkungsrand
6	1301	Gen1	Shortstack (6-Zeller) Prozessparameter, verschiedene MEA-Kat.-Beladungen, Umstieg von CCB auf CCM
7	1302	Gen1	Shortstack (6-Zeller) Prozessparameter, verschiedene MEA-Kat.-Beladungen, Umstieg von CCB auf CCM
8	1308	Gen1	Fullstack (90-Zeller) verschiedene MEA-Kat.-Beladungen Testanlage / Demonstrator
9	1320	Gen2	Shortstack (5-Zeller) Prozessparameter, neue MEA-Materialien und Design, neue Break-In- Procedur, Änderung An- / Abfahrprozedur
10	1404	Gen2	Fullstack (90-Zeller) Demonstrator

Tabelle 5 Übersicht wichtigste Stackaufbauten bei IE

Der typische Betrieb und das Verhalten der MEA-Gen0 wurde in 2.2 beschrieben. Nachfolgend werden hauptsächlich die Ergebnisse der MEA-Gen1 und Gen2 betrachtet und MEA-Gen0 nur als Vergleich herangezogen.

MEA-Gen1 wurde vorerst mit der vorhandenen modifizierten Stackhardware und gleichen Betriebsbedingungen wie MEA-Gen0 getestet- mit erheblichem Performancegewinn (siehe Abbildung 36). Mit der Langzeitstabilität im Stack 1106 gab es aber erhebliche Probleme. Daher wurde eine umfangreiche Anpassung des Flowfelddesigns und der Prozessparameter vorgenommen.

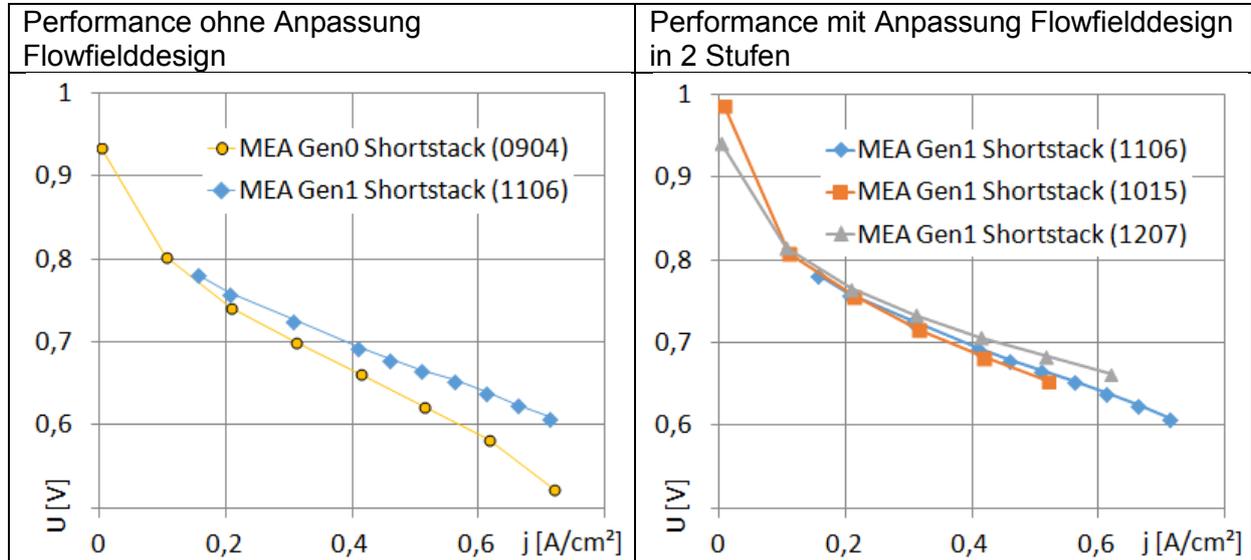


Abbildung 36 Entwicklung Performance bei MEA-Wechsel

MEA und Stack wurden ab Flowfelddesign 3 (Stack 1207) aufeinander abgestimmt und erkannte Schwachstellen eliminiert. Es war notwendig das MEA-Design im GDL-Zuschnitt anzupassen. Dies brachte eine deutliche Verbesserung in der Stabilität der Zellspannungen bei geringen Stöchiometrien und Degradationsraten.

Die Anpassung der Betriebsparameter erfolgte in einem Parameterscreening mit verschiedenen Flowfelddesigns. Der Schwerpunkt wurde dabei auf die Stöchiometrien, die Gaszusammensetzung und die Gasbefeuchtung gelegt:

- Die Gaszusammensetzung der Anode musste angepasst werden da das neue Reformerkonzept einen besseren H<sub>2</sub>-Umsatz erreichte und damit sich das Verhältnis H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> verschob (siehe Abschnitt 2.2).
- Die Absenkung der Stöchiometrien wurde forciert durch eine mögliche Verbesserung des Wirkungsgrades der Anlage.
- Das Absenken der Kathodenbefeuchtung wurde untersucht um kleinere und kostengünstigere Kathodenbefeuchter verwenden zu können, weiterhin um eine bessere Stabilität der Zellspannung zu erreichen.
- Das Absenken der Anodenbefeuchtung wurde von SC dringend empfohlen um das degradationsfördernde Problem des „fuel starvation“ zu vermeiden.

Alle Parameteränderungen wurden kritisch untersucht auf Performance, Stabilität der Zelle. Bei Absenkung der Kathodenstöchiometrie war ein deutlicher Einfluss auf die Performance erkennbar, dieser stand aber im Gegenzug zur Absenkung des Druckabfalls über die Zelle und damit einer Abnahme des Hilfsenergieverbrauches für das Kathodengebläse. Diese Prozesse laufen beim Gesamtwirkungsgrad der Anlage gegeneinander. Sie wurden in dem erstellten Wirkungsgradmodell (siehe Abschnitt 2.1) abgewogen und gewichtet.

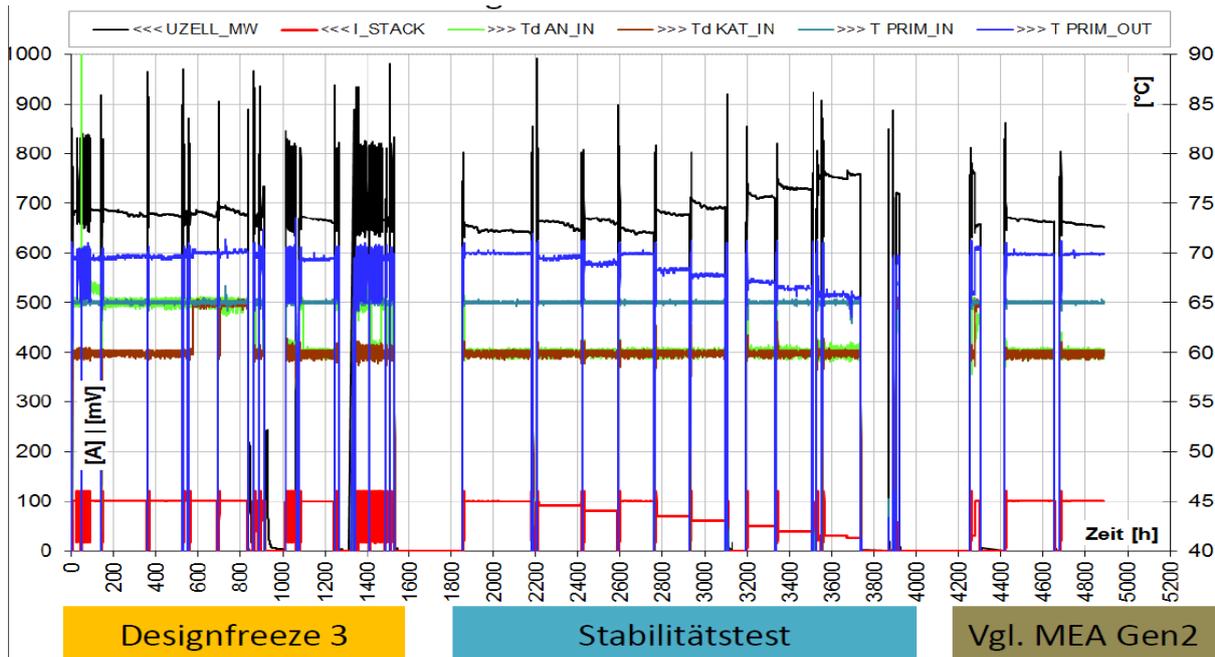


Abbildung 37 zeitlicher Ablauf Optimierung Prozessparameter mit Stack 1207

Die Optimierung der Prozessparameter wurde im Abschnitt „Designfreeze3“ durchgeführt. Das Ergebnis wurde in Langzeittests pro Lastpunkt im Abschnitt „Stabilitätstest“ bestätigt bzw. leicht angepasst. Der letzte Abschnitt „Vgl. MEA Gen2“ wurde noch als Vergleich zum Shortstack 1320 (MEA-Gen2) durchgeführt.

Nachfolgend sind Variationen aus dem Abschnitt „Designfreeze3“ beispielhaft aufgeführt (siehe Abbildung 38).

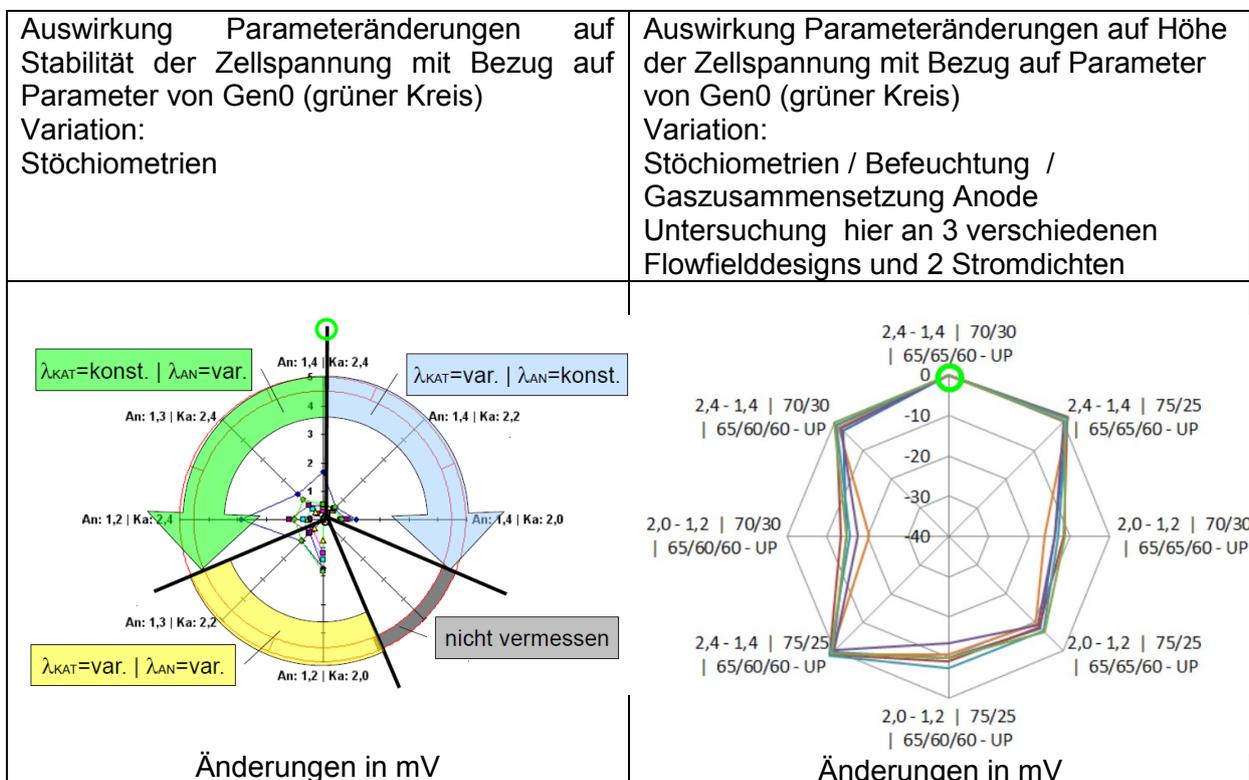


Abbildung 38 Optimierung Prozessparameter für MEA-Gen1

Nach der abgeschlossenen Optimierung der Prozessparameter wurde eine Verschiebung des Nennarbeitspunktes der Zelle von 0,5 auf 0,4A/cm<sup>2</sup> entschieden. Zum einen wurde eine

geringere Degradationsrate der Zelle erwartet und gemessen zum anderen ergab sich durch die Berechnungen mit dem Wirkungsgradmodell eine deutliche mögliche Verbesserung des Gesamtwirkungsgrad der Anlage (siehe Abbildung 39).

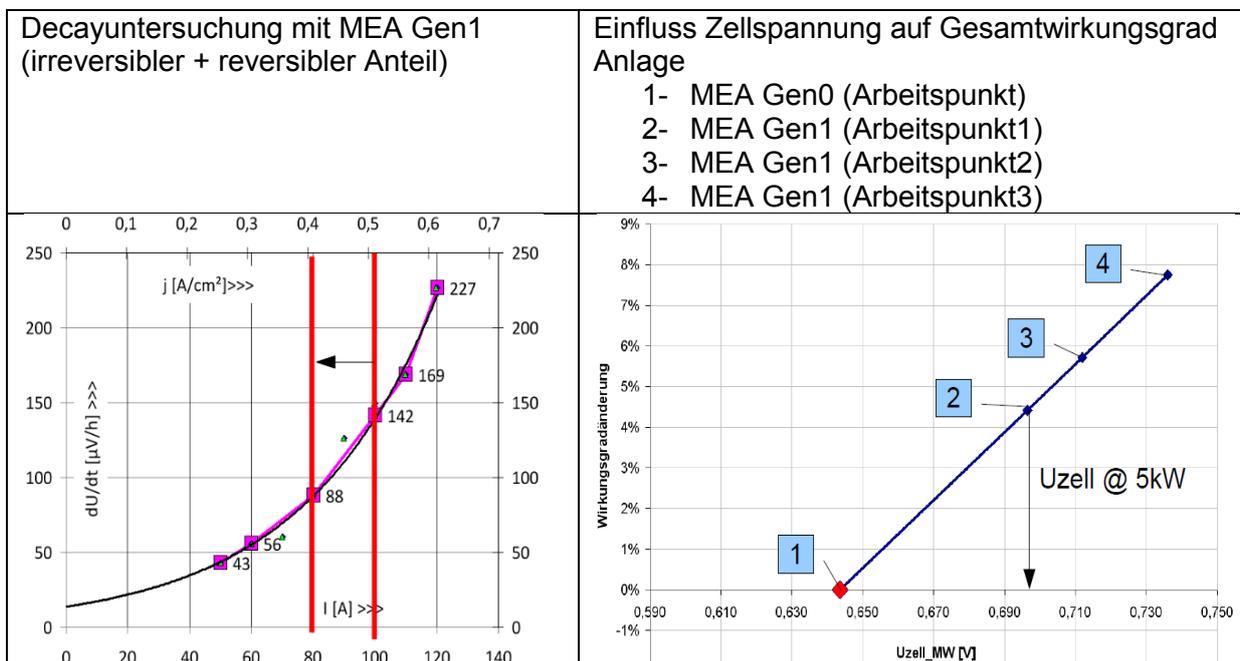


Abbildung 39 Motivation der Verschiebung des Nennarbeitspunkte der Zelle

Ab Shortstack 1301/1302 wurden alle o.g optimierten Prozessparameter sowie die Verschiebung des Nennarbeitspunktes mit einem neuen MEA-Technologie und zwei unterschiedlichen Katalysatorbeladungen getestet. Ziel war es die bisherige Katalysatorbeladung zu reduzieren. Shortstack 1301 / 1302 wurden gemischt mit zwei verschiedenen Beladungen aufgebaut. Es wurde die Performance beider Beladungen untersucht sowie das Langzeitverhalten. Bei der Performance und dem Langzeitverhalten verhielten sich Beladung A und B nahezu identisch. Mit Beladung A und B gemischt wurde ein Fullstack (1308) aufgebaut und in der Testanlage vermessen. Die Skalierbarkeit von Short- auf Fullstack und die Übertragbarkeit der neuen Prozessparameter waren erfolgreich. Der Fullstack wurde nur im möglichen Modulationsbereich der Anlage getestet und dargestellt (Abbildung 40 links).

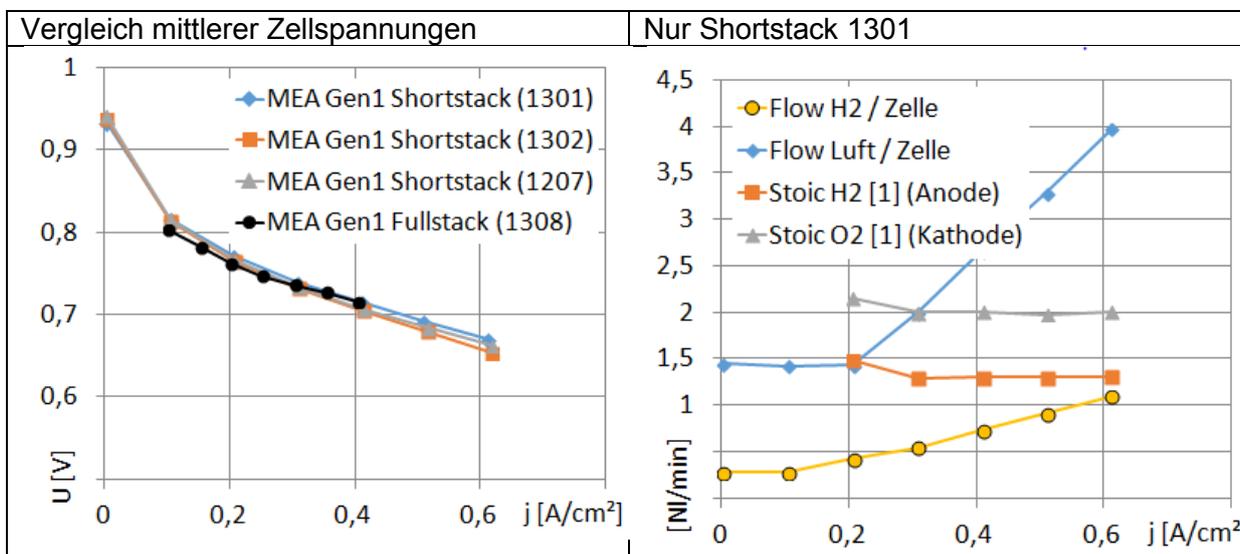


Abbildung 40 Entwicklung bei Parameteränderung Prozessparameter mit MEA-Gen1

Die beiden Shortstacks 1301 und 1302 wurden über 10.000h betrieben u.a. für die Ermittlung von Degradationsraten.

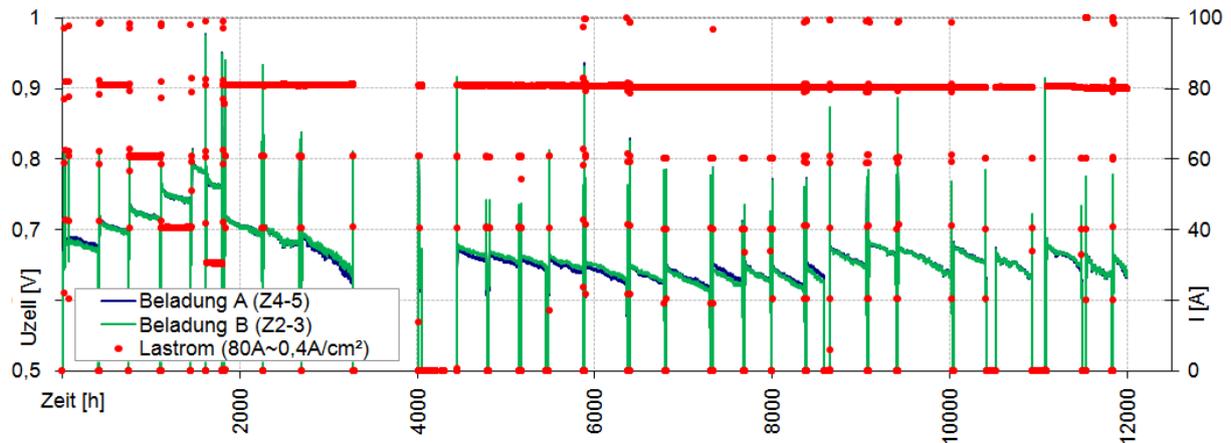


Abbildung 41 Langzeit MEA-Gen1 (Stack 1302) mit optimierten Prozessparametern

Die Degradationsraten im Langzeittest mit MEA-Gen1 (1301/1302) wurden ähnlich bestimmt wie in Abbildung 6 und konnten Degradationsraten  $< 10 \mu\text{V/h}$  erzielen (siehe Abbildung 42).

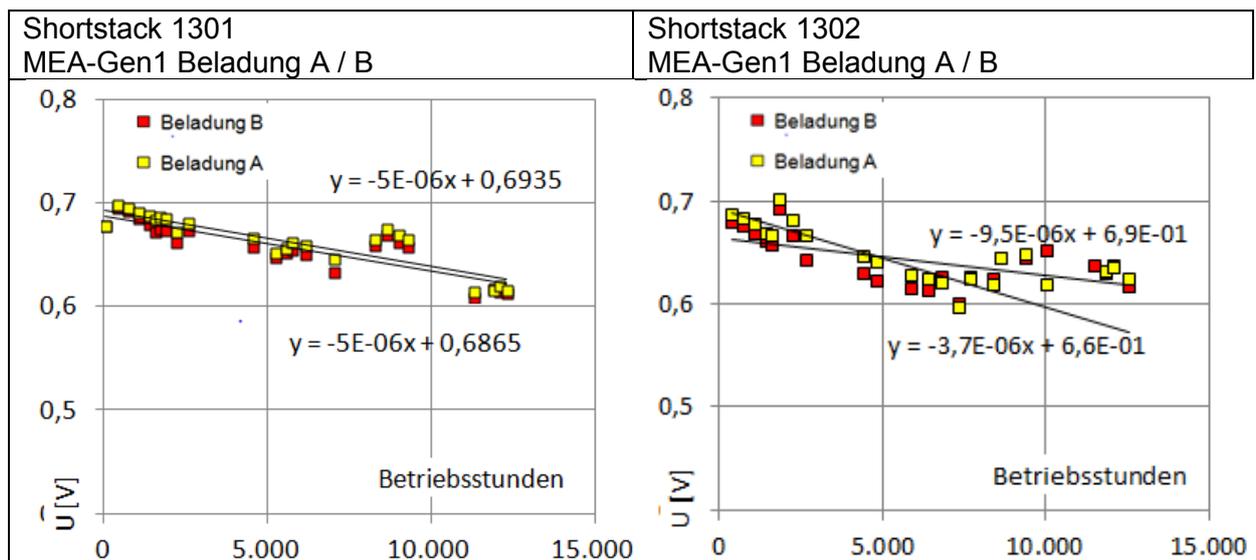


Abbildung 42 Degradationsraten MEA-Gen1 bei  $0,4\text{A/cm}^2$  Langzeitbetrieb

Am Ende des Projektes wurde ein Shortstack (1320) mit der MEA-Gen2 aufgebaut und vermessen. Durch den Einsatz eines neuen Kathodenkatalysators der ein robusteres Langzeitverhalten aufweist, wurde für diese MEA eine etwas schlechtere Performance von SC prognostiziert. Die Aufbauten bestätigten dies. Ein Fullstack mit MEA-Gen2 konnte aus vielfältigen Gründen erst nach Ablauf des Projektes aufgebaut und getestet werden. Die Skalierbarkeit von Short- auf Fullstack und die Übertragbarkeit der neuen Prozessparameter waren auch hier erfolgreich. Der Fullstack wurde nur im Modulationsbereich der Anlage dargestellt (siehe Abbildung 43).

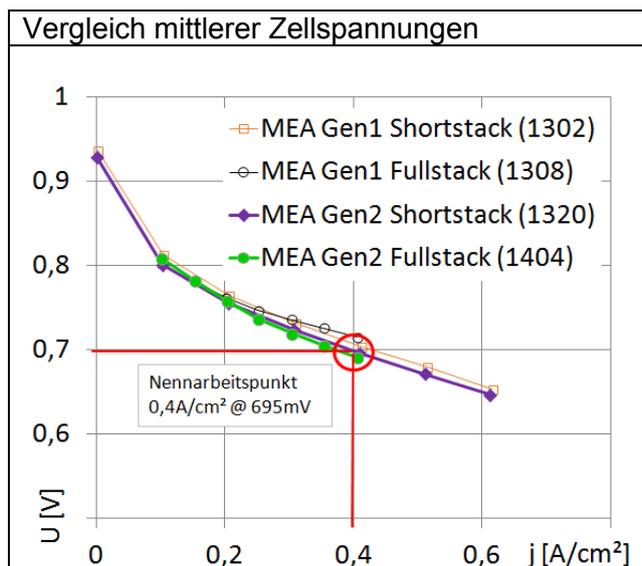


Abbildung 43 Performance mit optimierten Prozessparametern mit MEA-Gen1 / 2

Eine weitere Untersuchungsmethode zur Degradationsrate wurde von SC aus der INECS-Studie (siehe AP 2.7) abgeleitet. Diese ist stark angelehnt an typische Lastprofile in Mehrfamilienhäusern. Es wurde ein Messprogramm aufgestellt mit charakteristischen Lastwechseln, Abschaltungen mit Warm- und Kaltstarts des Stacks. Ähnliche Untersuchungen wurden mit dem Demonstrator durchgeführt siehe Abbildung 62.

Diese Untersuchungen wurden mit MEA-Gen1 und 2 durchgeführt. Es konnte ein direkter Vergleich der Degradationsraten zwischen zyklischem Betrieb mit konstanter Last und dem Betrieb mit in Abbildung 44 beschriebenen Lastprofil hergestellt werden.

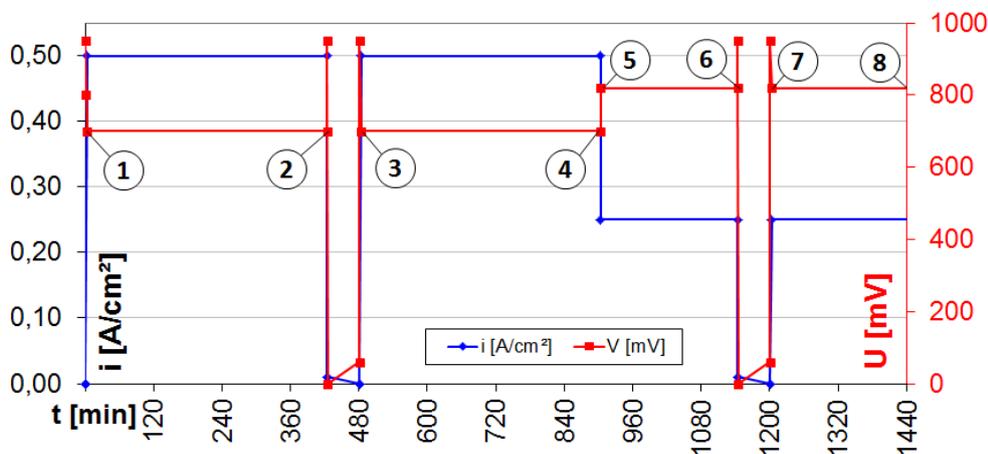


Abbildung 44 Lastprofil für Test MEA-Gen2 abgeleitet aus INECS-Studie für einen Tag

In Abbildung 44 ist der Lastgang eines Tages dargestellt, dieser Test wurde pro Woche 6x wiederholt, 1 Tag wurde der Stack komplett ausgeschaltet. Dadurch entstand ein typischer Wochenlastgang. Dieser Lastgang wurde bei SC 30x wiederholt, bei IE 7x. An den in Abbildung 44 durchnummerierten Punkten wurden die Zellspannungen gemessen. Die Differenz zum vorherigen gleichen Betriebspunkt ergab dann eine Degradationsrate und wurde in einem Diagramm über die Zeit abgetragen.

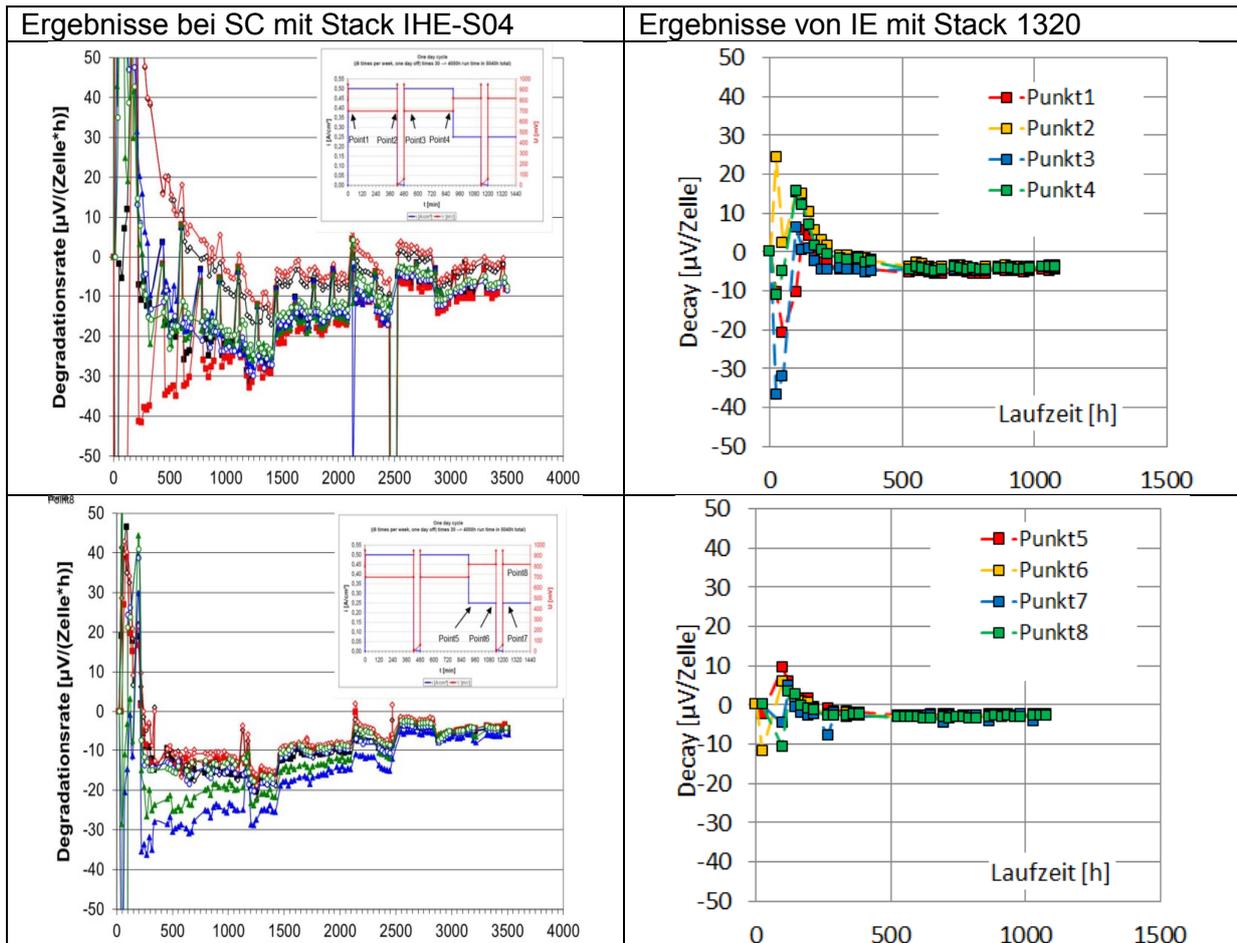


Abbildung 45 Vergleich Degradationsraten zwischen SC und IE mit MEA-Gen2

Der Vergleich der Ergebnisse von SC und IE zeigt eine gute Übereinstimmung und Reproduzierbarkeit zum einen in der typischen Form der Degradationsentwicklung und zum anderen in der sich einstellenden Höhe der Degradationsrate nach einer gewissen Laufzeit. Beide Stacks erreichen eine Degradationsrate von deutlich unter  $5\mu\text{V}/\text{h}$ . Dieser Wert deckt sich gut mit der Betrachtung in Abbildung 42. Beide Untersuchungen und Lastgänge führen also zu sehr ähnlichen Ergebnissen und können verwendet werden.

Der komplette Testablauf des Shortstack 1320 mit MEA Gen2 ist in der nachfolgenden Abbildung 46 dargestellt. In Betriebsstunde 2500-2800 fand ein Austausch des Stacks zwischen IE und SC statt. Hier wurde noch einmal am Ende des Projektes die Übertragbarkeit der Messergebnisse zwischen beiden Testsystemen überprüft.

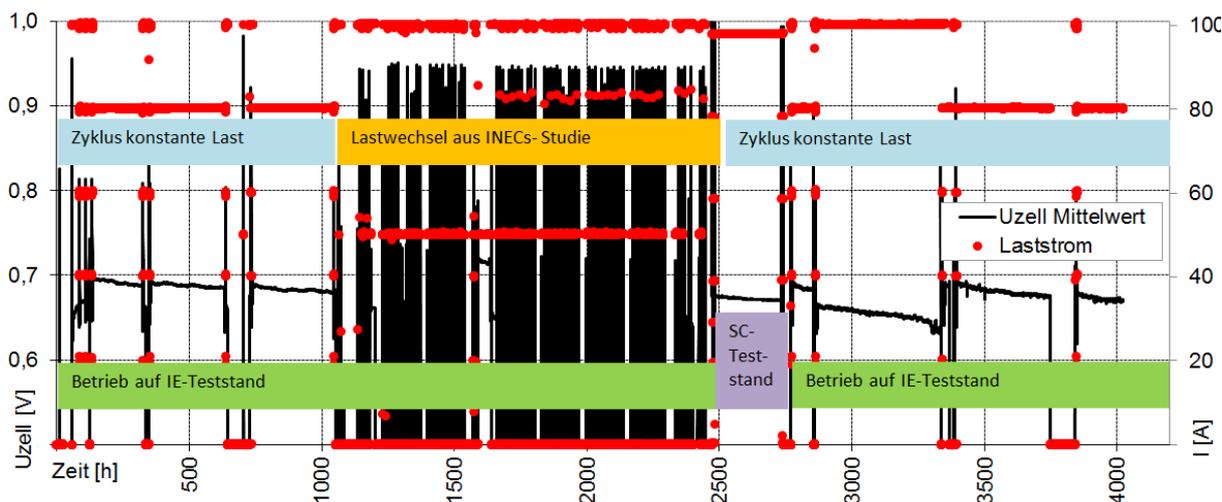


Abbildung 46 Betriebsablauf Shortstack 1320 MEA-Gen2 bei IE

**IE**  
**Integration Stromdichtemessung (SDM) und Untersuchung Langzeitverhalten**

Die in 2.5 beschriebene Stromdichtemessung wurde nicht nur für die Optimierung der Flowfieldstruktur und der Prozessparameter genutzt sondern auch zur Untersuchung und Beurteilung des Langzeitverhaltens der MEA. Hierbei konnten generelle Trends des Stromdichteprofilverhaltens ermittelt werden. Zur zeitlichen Beurteilung der Profilentwicklung wurden 3 markante Definitionen festgelegt. In Abbildung 47 sind Stromdichteprofile eines Langzeittests der MEA Gen1 dargestellt und die Markierung der Definitionen.

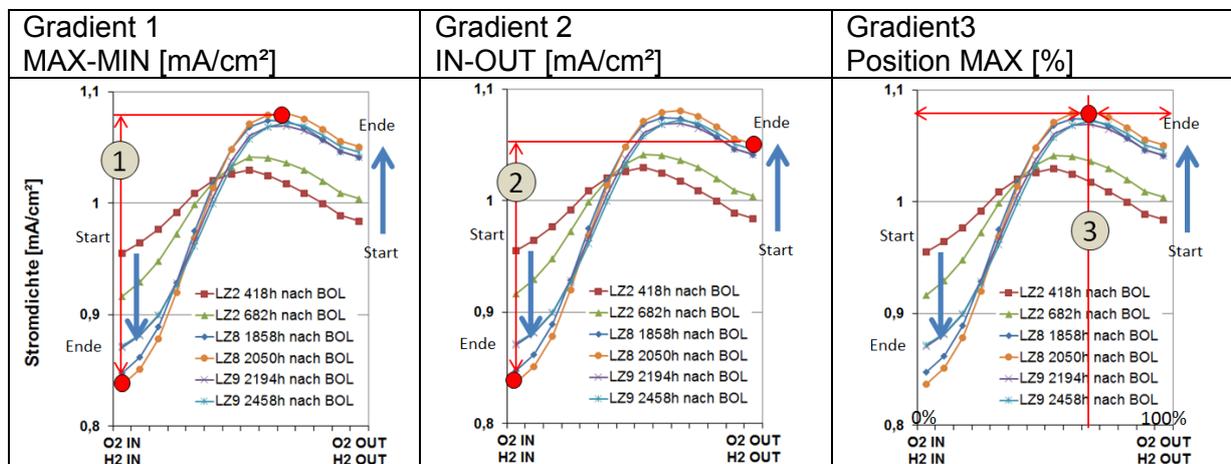


Abbildung 47 Definition Stromdichtegradiënten

Die in Abbildung 47 erläuterten Gradienten sind nachfolgend für Stack 1302 (MEA-Gen1) beispielhaft dargestellt.

Bis ca. Betriebsstunde 4000 wurden Stabilitätstests durchgeführt wie in Abbildung 36 dargestellt und erläutert. In diesem Zeitraum ist eine starke Verschiebung der Gradienten 1 und 2 zu erkennen. Bei konstanten Lastpunkten im Zeitraum 4000-9000 h gibt es wieder einen rückläufigen Trend. Ab Betriebsstunde 9000 wurde die An- und Abfahrstrategie des Stacks geändert und den Bedingungen bei SC angepasst. Ab hier bleiben die Gradienten relativ konstant. Ob das unmittelbar mit dieser neuen Strategie zusammenhängt ist nicht eindeutig nachweisbar. Dieses Verhalten wurde ähnlich auch bei anderen Stacks (1301 / 1207) beobachtet. Es sind weitere Tests und Aufbauten dazu notwendig.

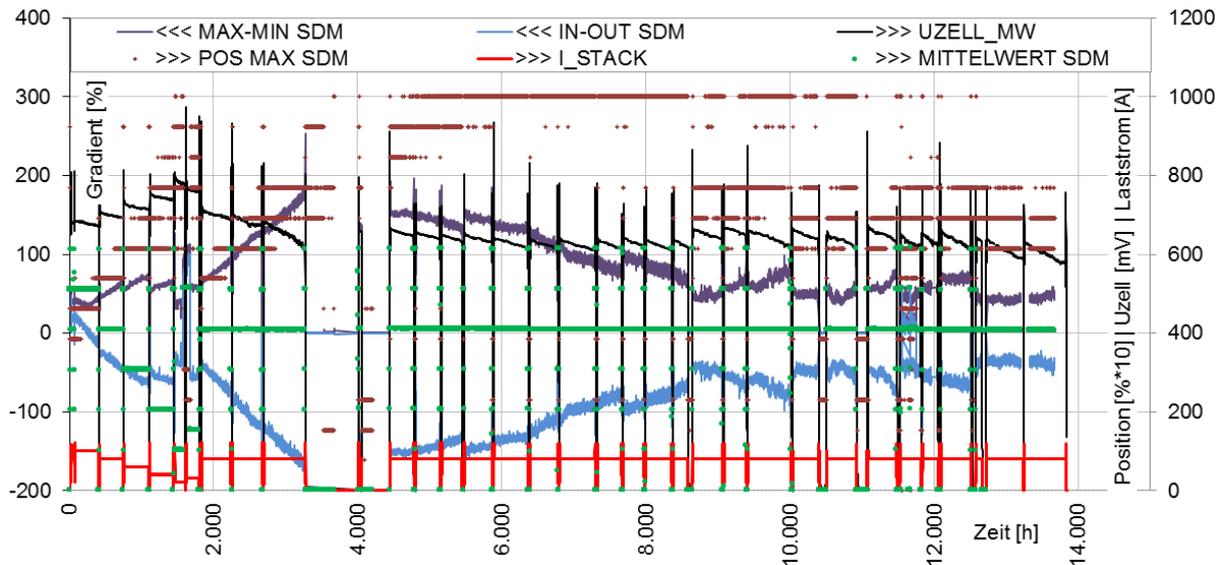


Abbildung 48 Stromdichtegradienten / mittlere Zellspannung Shortstack1302 MEA-Gen1

## IE / SC / RBZ

### Kühlwasseraufbereitung (Leitfähigkeit)

Das Fazit aus den Untersuchungen zum Leitfähigkeitsanstieg im Stackkühlkreis ist, dass es für einen langzeitstabilen Betrieb notwendig ist:

- Vermeidung von Leitfähigkeitstreibern im Stackkühlkreis
  - o IE beseitigte schrittweise alle Materialien die in Materialtests diesbezüglich stark auffällig waren
  - o SC veränderte das MEA-Design um das Ionomer aus dem Stackkühlkreis zu entfernen
- Die bisherigen Ergebnisse haben sich weiter verbessert, leider aber noch nicht die Erwartungen erfüllt (siehe Abbildung 57). Die Untersuchungen gehen auch nach Projektabschluss weiter.
- Überwachung der Leitfähigkeit im Stackkühlkreis
  - o IE integrierte in alle Teststände und den Demonstrator Leitfähigkeits-sensoren (siehe Abbildung 57).
- Permanente Aufarbeitung der Leitfähigkeit des Stackkühlkreises durch geeignete Maßnahmen
  - o IE integriert eine neu entwickelte DI-Patrone in den Stackkühlkreis
  - o RBZ integrierte in den Demonstrator ein Wasseraufbereitungskonzept, welches permanent die Leitfähigkeit reduzieren kann

Zu Gunsten der Lebensdauer sind alle drei o.g. Schutzmechanismen im Demonstrator umgesetzt worden und werden redundant benutzt. Das Wasseraufbereitungskonzept von RBZ wird derzeit ausschließlich für die Aufarbeitung des Reformer- Prozesswassers genutzt. Sollten sich bei weiteren Entwicklungen neue Sachverhalte ergeben, ist es geplant eine redundante Aufbereitung im Brennstoffzellenmodul einzusparen.

**IE****Konditionierung Kathodenluft mit Intercooler**

Wie in Abbildung 9 dargestellt und erläutert, wird das Übertragungsverhalten des verwendeten Abgasbefeuchters stark von der Eingangstemperatur der trockenen Luft beeinflusst. Diese ist durch die Verlustleistung eines Verdichters nicht zu vermeiden. Im Projekt wurde deshalb eine Gaskonditionierung entwickelt und getestet die diesen Effekt nahezu beseitigt. Dieser Wärmetauscher wird über den Vorlauf des Stackkühlkreises auf relativ konstante 60-65°C konditioniert. Diese Temperatur liegt unter den kritischen 70°C bei der die Befeuchterleistung stark abnimmt.

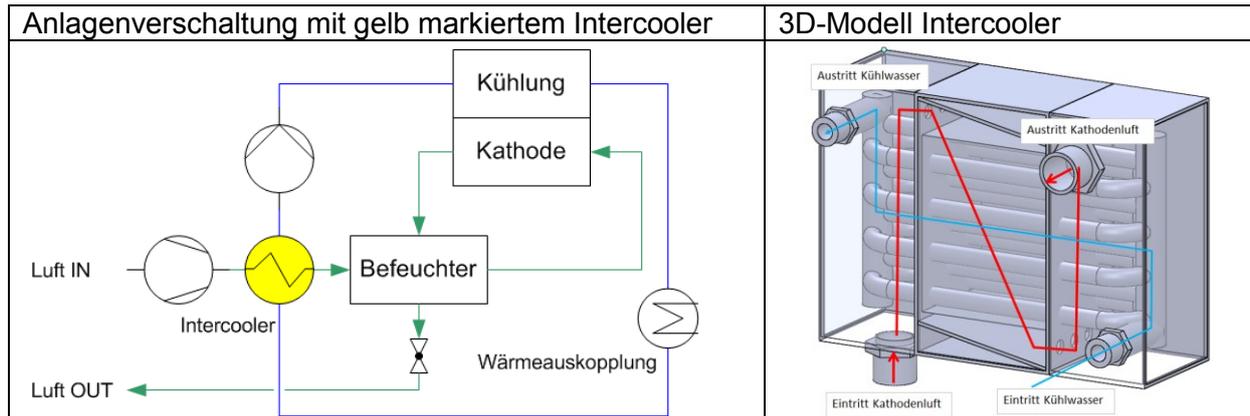


Abbildung 49 Kühlung der Eingangsluft vor Abgasbefeuchter mittels Intercooler

**IE****Kathodenluftsteuerung über Kennfeldsteuerung**

Ein weiterer wesentlicher Entwicklungserfolg konnte mit der Kathodenluftversorgung in enger Zusammenarbeit mit dem Hersteller erreicht werden (siehe dazu nachfolgende Abbildung).

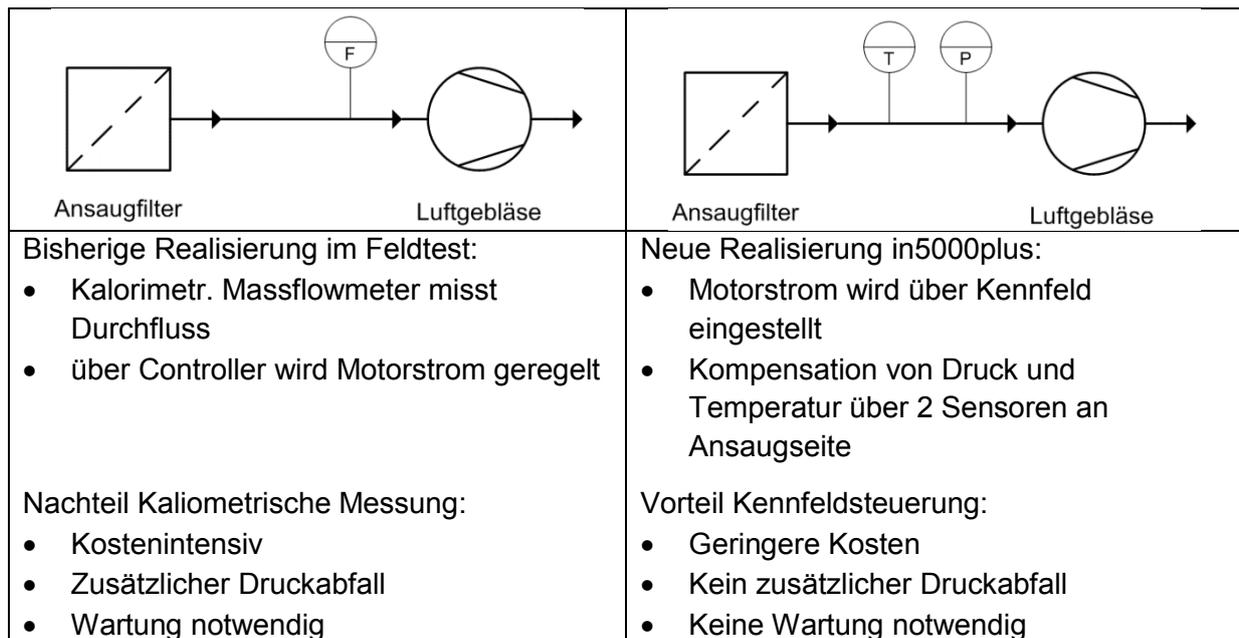


Abbildung 50 Entwicklungsschritte Kathodenluftsteuerung

Mit der Kennfeldsteuerung wurden die Kosten erheblich gesenkt. Der Druckabfall über das kalorimetrische Messorgan entfällt komplett und verringert damit die Leistungsaufnahme der Kathodenluftversorgung als größter Anlagen- Energieverbraucher erheblich.

Dies ist ein weiterer wichtiger Schritt zur Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades der Anlage.

Ein Nachteil der Kennfeldsteuerung ist die geringere Genauigkeit des eingestellten Volumenstromes. Mit dem kalorim. Messverfahren wurde eine Genauigkeit von +/-1,5% vom Messwert erzielt, die Kennfeldsteuerung konnte nur eine Genauigkeit von +/-5,0% vom Messwert erreichen. An der Genauigkeit kann noch weiter verbessert werden, es wird aber versucht mit dieser Abweichung den Stack sicher zu betreiben.

## 2.5 AP5 Implementierung von Messverfahren für Zustandsanalysen im Labor und im Feldtest

### IE

Erfolgreich wurde im Projektzeitraum ein selbst entwickeltes Messverfahren zur Stromdichteverteilung (Stromdichtemessung SDM) in Shortstacks integriert. Dieses wurde über den gesamten Projektzeitraum genutzt um eine generelle Aussage über das Stromdichteprofil in einer Zelle zu erhalten bei Variationen von:

- MEA-Typ (Gen0 / 1 / 2)
- Prozessparametern (Stöchiometrie / Temperatur / elektrischer Lastpunkt)

Die verwendete Stromdichtemessung ist wie folgt auf- bzw. eingebaut:

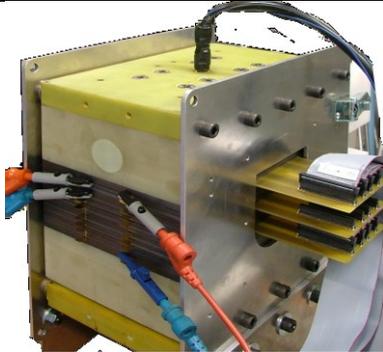
Eckdaten SDM	Einbau SDM
Anzahl Messfelder / Ebene = 112	
Messbereich / Messfeld = 0 - 0,72 A/cm <sup>2</sup>	
Max. Messzyklus = 0,5 sec	
Auflösung / AD-Wandlung = 15bit	

Abbildung 51 Spezifikationen der IE Stromdichtemessung

Ein typisches SDM-Profil ist in nachfolgender Abbildung 52 zu sehen. Es wurden umfangreiche Auswertungen und Betrachtungen dazu durchgeführt. Bewährt und weitestgehend angewendet wurde Betrachtungsart 3. Diese wurde im Projektzeitraum für Vergleiche herangezogen.

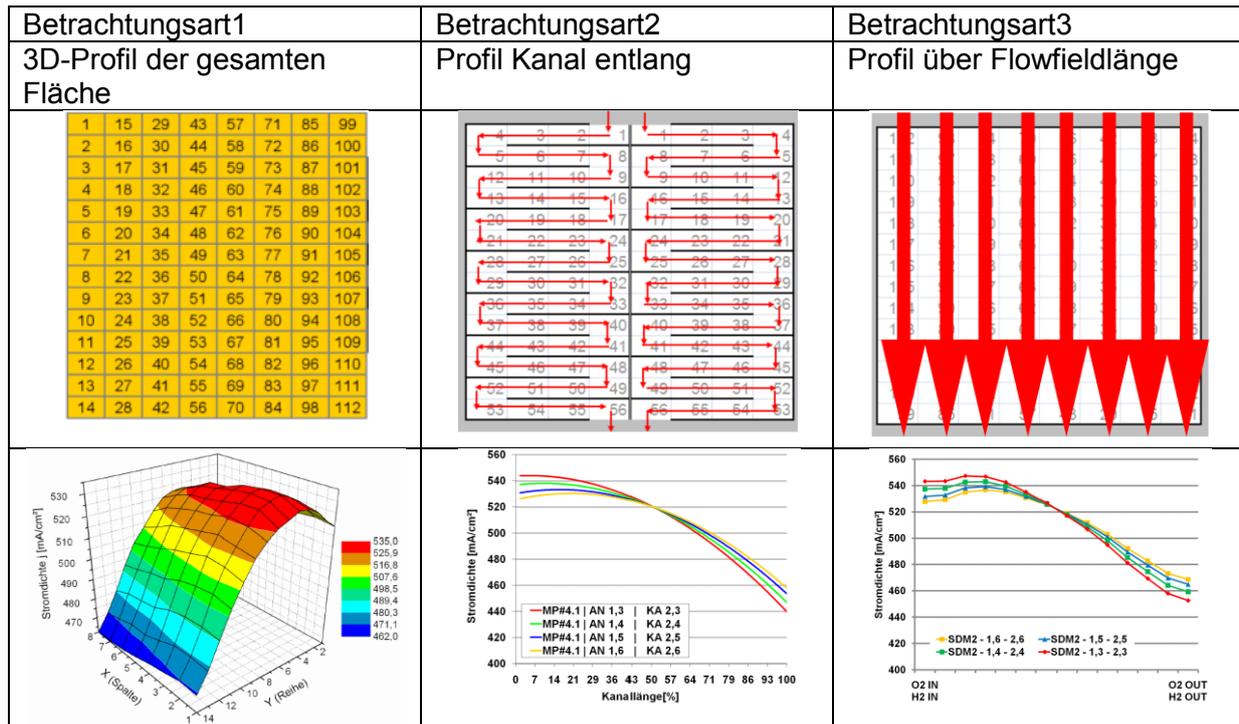


Abbildung 52 Betrachtungsarten SDM-Profil

Am häufigsten wurde Betrachtungsart3 verwendet. Hier wurde je nach Untersuchung nur eine Spalte verwendet. Mittelwerte oder Maximalwerte über alle Spalten wurden je nach Anforderungen auch teilweise verwendet. Auswertungen im Liniendiagramm beziehen sich im Bericht alle auf eine Spalte.

Die wichtigsten Erkenntnisse die mit dem SDM im Projekt gesammelt wurden sind

- Auffinden und Beseitigen von kritischen Anlagenzuständen wie Dynamik beim Start (siehe Abbildung 53)
- Strömungstechnische Untersuchung und Optimierung des Flowfields
- Charakteristisches Langzeitverhalten des Profils (siehe Seite 51)

Kritische Anlagenzustände wurden z.B. beim Anfahren des Stacks identifiziert. Ist der Stack beim Start noch nicht komplett mit Gasen gefüllt kann es im hinteren Flowfieldbereich zur Unterversorgung kommen. Anhand der mittleren Zellspannung war dieser Effekt nicht zu sehen. Dieser Zustand trägt massiv zur Erhöhung der Degradationsrate bei. Durch Veränderung der Dynamik der Gasversorgung und der elektrischen Last konnte dieser kritische Zustand beseitigt werden.

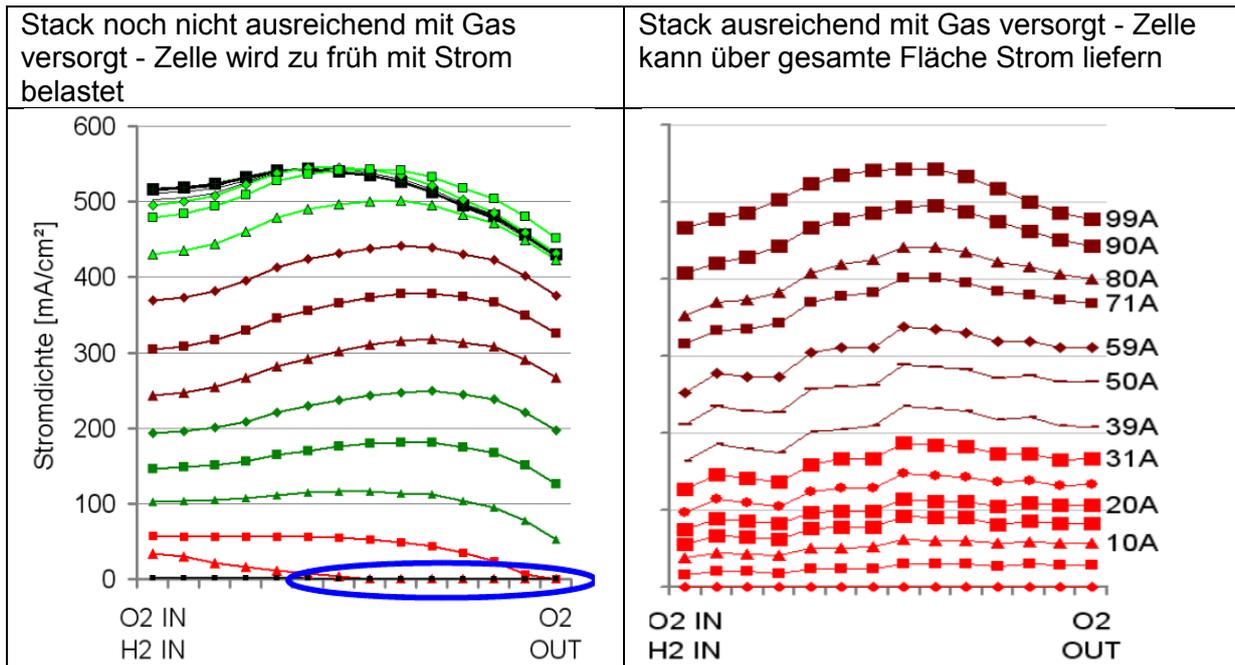


Abbildung 53 Untersuchung Anlagendynamik mit SDM

Im Projektzeitraum wurden die Flowfields u.a. strömungstechnisch optimiert. Schlecht versorgte bzw. durchströmte Bereiche und Betriebsparameter wurden mittels SDM identifiziert und beseitigt. In Abbildung 54 ist die Schwankung der Stromdichte über der gesamten Zellfläche zu sehen. Der rot markierte Bereich zeigt starke Schwankungen hervorgerufen durch eine Unterversorgung oder Wasseransammlung.

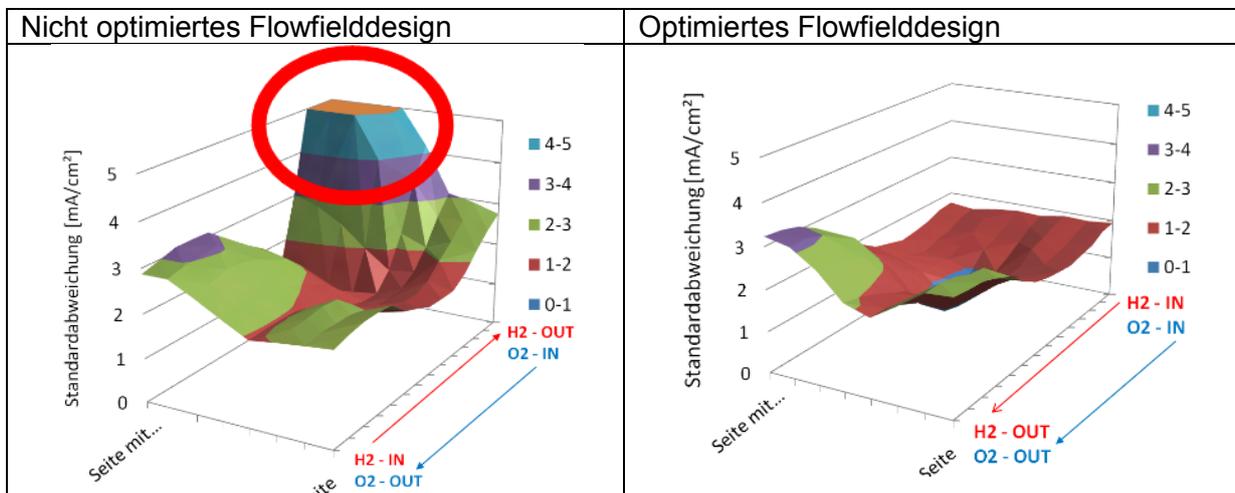


Abbildung 54 strömungstechnische Flowfield-Optimierung mit SDM

Die Implementierung einer Impedanzmessung am Shortstack bei SC war nicht erfolgreich. Zwar wurden im Rahmen der durchgeführten Dauertests Versuche für eine EIS-Diagnostik im Stack vorgenommen, die erprobte Vorgehensweise lieferte jedoch keine Ergebnisse in der erforderlichen Genauigkeit und Reproduzierbarkeit. Außerdem traten im Zusammenhang mit der EIS-Diagnostik wiederholt kleinere Störungen im Stackbetrieb auf. Zu Gunsten eines möglichst störungsfreien Dauertests wurde daher von weiteren Arbeiten an einer EIS-Diagnostik abgesehen.

**IE**

Eine gezielte Beeinflussung des Wasserhaushaltes der MEA sollte durch Anpassung des Temperaturprofils über den Stackkühlkreis vorgenommen werden. Dazu war es notwendig eine Messeinrichtung zu implementieren, die eine Temperaturverteilung in der Zellebene aufnehmen kann. Dafür wurde eine Messplatte entwickelt welche 9 Bohrungen enthielt. Dieses wurde in einen Shortstack integriert. Temperaturfühler konnten nun unterschiedlich tief in die Zellebene eingetaucht werden, wodurch ein 3D- Temperaturprofil erstellt werden konnte. Das Profil ist über die Eintauchtiefe relativ homogen und weicht nur an den Randbereichen ab. Die Abweichungen am Rand wurden größtenteils Messfehlern zugeordnet. Für weitere Betrachtungen wurde das 2D-Profil in der Mitte verwendet (siehe Abbildung 55 rechts).

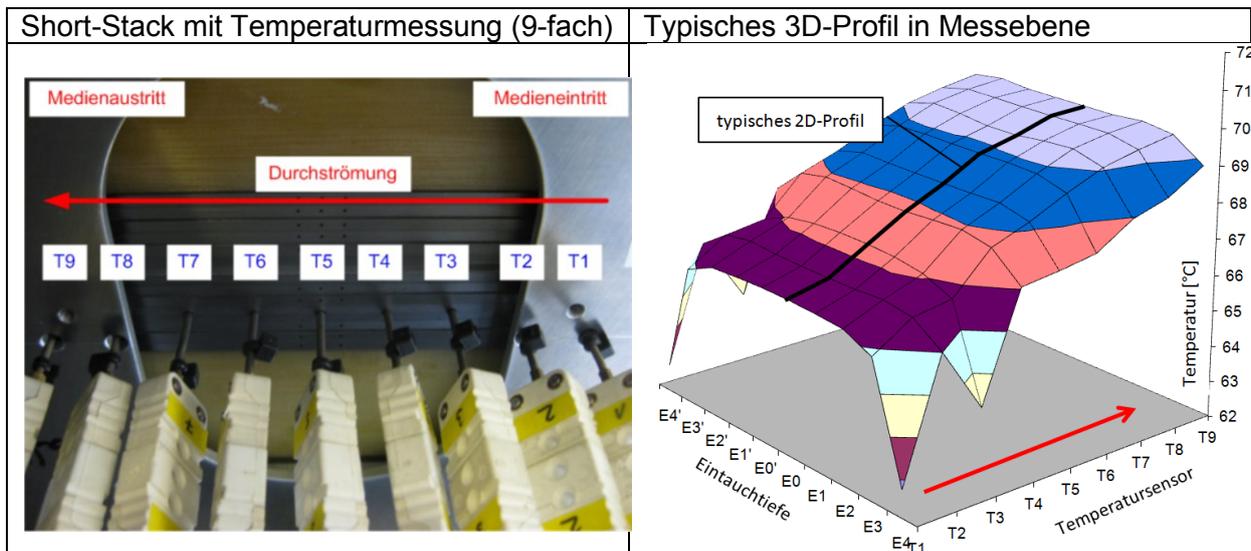


Abbildung 55 Messeinrichtung für Temperaturverteilung in Zellebene

In Strömungsrichtung des Kühlmediums verhält sich der Temperaturanstieg weitestgehend linear, auch bei Variation der Durchflussrate des Kühlmediums oder der elektrischen Last.

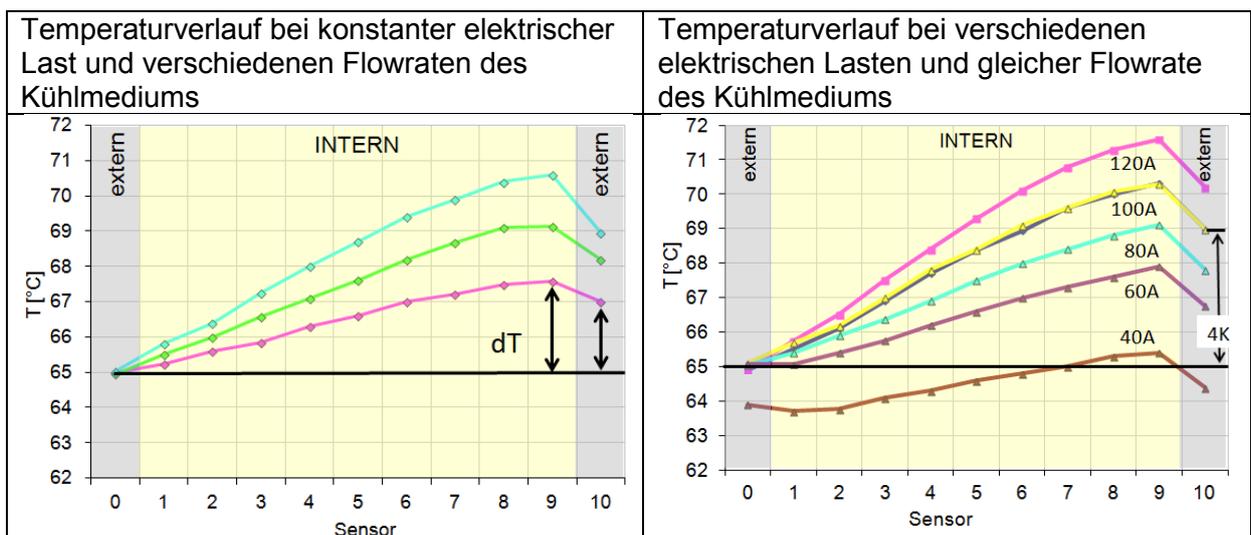


Abbildung 56 Temperaturprofil in 2D bei Variation verschiedener Betriebsparameter

Durch die Messung des Temperaturprofils ergaben sich wichtige neue Erkenntnisse. Die in Abbildung 56 dargestellten Temperaturmessstellen T0 und T10 befinden sich außerhalb des

Stacks unmittelbar an den Medienports. Der Stack wird auf die Eingangstemperatur  $T_0$  geregelt sowie alle Gastemperaturen auf diese Temperatur bezogen. Eine Temperaturspreizung von 4K zwischen Ein- und Ausgang hat sich im Auslegungspunkt für die Normleistung des Stacks bewährt. Die innen liegende Ein- und Ausgangstemperatursensoren sowie die sich daraus ergebende Temperaturspreizung weichen aber erheblich von den angenommenen Werten ab.

Für eine Verringerung der Degradationsrate der MEA Gen0 hätte eine Anpassung der Gasbefeuchtung erfolgen müssen. Dies wurde aber im Projekt durch einen erheblich geringeren Feuchtebedarf der MEA Gen1 und Gen2 kompensiert. (siehe 2.2 AP 2).

Untersuchungen mit MEA Gen1 und 2 wurden mit dieser Messeinrichtung nur teilweise bzw. nicht durchgeführt, sind aber über den Projektzeitraum hinaus geplant. Dafür wurde eine neue kompakte Messeinrichtung entwickelt die eine Kombination aus Stromdichte- und Temperaturmessung beinhaltet.

Die Untersuchungen zur gezielten Beeinflussung des Wasserhaushaltes der MEA wurden im Laufe des Projektes ausgesetzt durch, da das Verhalten stark abhängig ist von:

- MEA – Typ
- Flowfelddesign
- Betriebsparameter (Stöchiometrie / Temperatur / Gasfeuchte...)

Alle Parameter wurden im Laufe des Projektes geändert und iterativ optimiert. Eine gezielte Untersuchung zu o.g. Aufgabenstellung ist erst mit Designfreeze der MEA und dem Flowfield möglich. Dies war erst am Ende des Projektes erreicht und kann jetzt begonnen werden.

## IE

In allen Testständen bei IE ist die permanente Aufarbeitung des Kühlwassers deaktiviert worden. Die Leitfähigkeitsanstiege wurden aufgezeichnet, überwacht und bei Überschreiten eines Grenzwertes wurde das Kühlwasser gewechselt. Es lassen sich aus dem zeitlichen Verlauf Rückschlüsse auf verwendete Komponenten ziehen. In Abbildung 57 ist der optimierte verwendete Materialset im Projekt rot dargestellt. Blau sind Tests ohne Stack, dieser Anstieg wird von Teststandkomponenten verursacht. Die Grauen Kurven zeigen Anstiege von anderen Materialkombinationen welche im Projekt untersucht wurden.

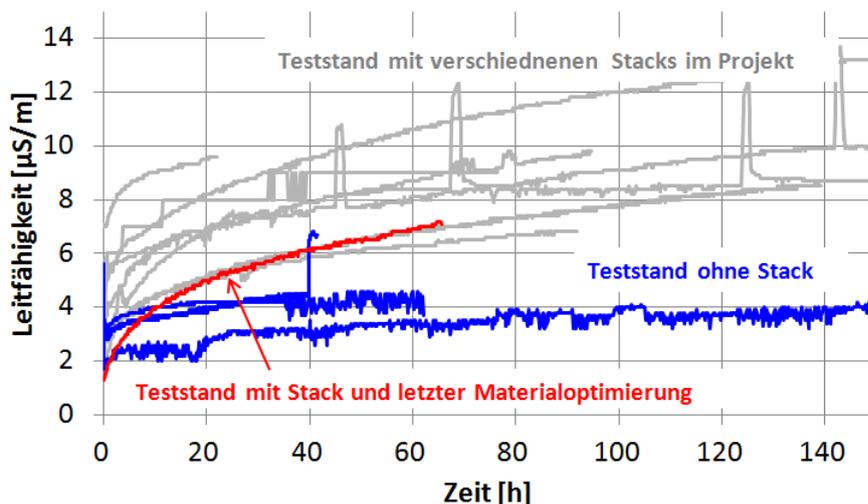


Abbildung 57 Vergleich Leitfähigkeitsanstiege im Stackkühlkreis

## 2.6 AP 6 Bau und Test eines Demonstrators inhouse5000+

### IE / RBZ:

#### Bau eines Demonstrators

Der Bau des Demonstrators wurde erfolgreich im Projekt durchgeführt. Hierzu wurde ein neues modulares Gehäusekonzept entwickelt. Dieses Konzept wurde unter der Maßgabe eines serientauglichen, für den Endkunden geeigneten Gerätes entwickelt. Die einzelnen Module können separat mit BOP-Komponenten bestückt und vorgeprüft zusammengebaut werden. Die 3 Hauptkomponenten des Demonstrators bestehen aus:

- Elektromodul
  - o Steuerungsmodul
  - o Leistungsmodul
- Brennstoffzellenmodul
  - o Brennstoffzelle
  - o Balance of Plant
- Reformiermodul
  - o Reformer
  - o Entschwefelung
  - o Wasseraufbereitung

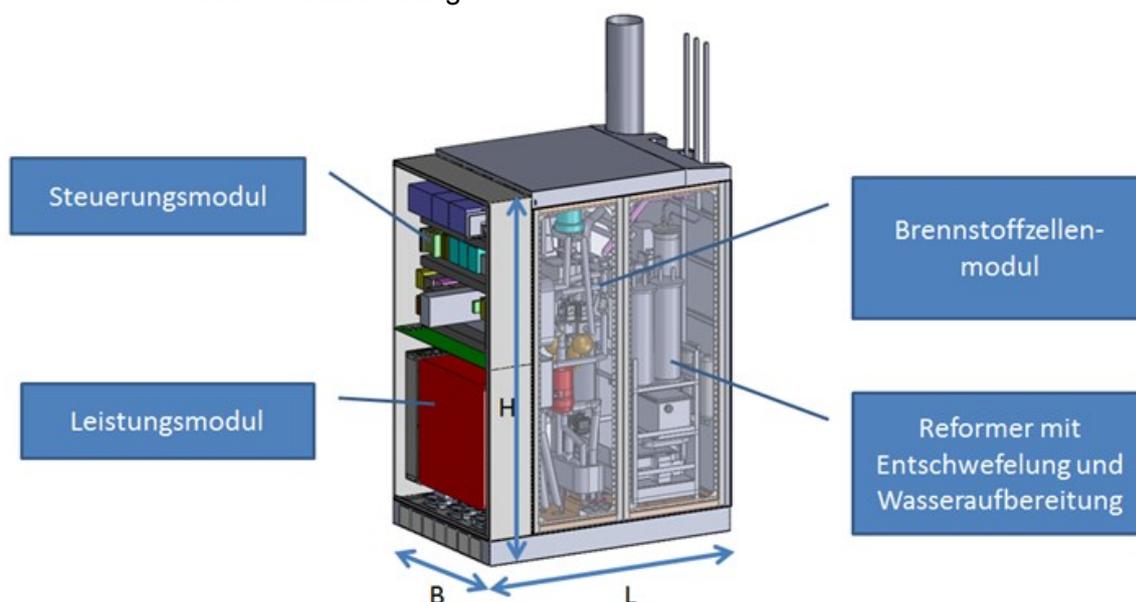


Abbildung 58 Demonstrator in5000plus in der Planungsphase

Alle Module werden auf einen Bodenträger zu einer kompletten Einheit zusammengefügt und über trennbare elektrische und medientechnische Übergabestellen verbunden. Das Brennstoffzellenmodul sowie der Stack können aus dem Anlagenverbund für Wartung oder Montagearbeiten per Einschub herausgenommen werden (siehe Abbildung 59). Die Abmaße des Demonstrators betragen  $L \times B \times H = 1160 \times 740 \times 1550 \text{ mm}^3$ .

Die Aufteilung der Komponenten erfolgte nach folgenden Zuständigkeiten:

- RBZ - Auslegung / Konstruktion / Bau / Test Reformiermodul
- IE - Auslegung / Konstruktion / Bau / Test Brennstoffzellenmodul
- IE - Auslegung / Konstruktion / Bau / Test Steuerungs-/Leistungsmodul
- IE - Auslegung / Konstruktion / Bau / Test Stack
- SC - Beistellung MEAs für Stack

- RBZ - Montage der einzelnen Komponenten zur Gesamtanlage  
 RBZ - Test / Inbetriebnahme Demonstrator

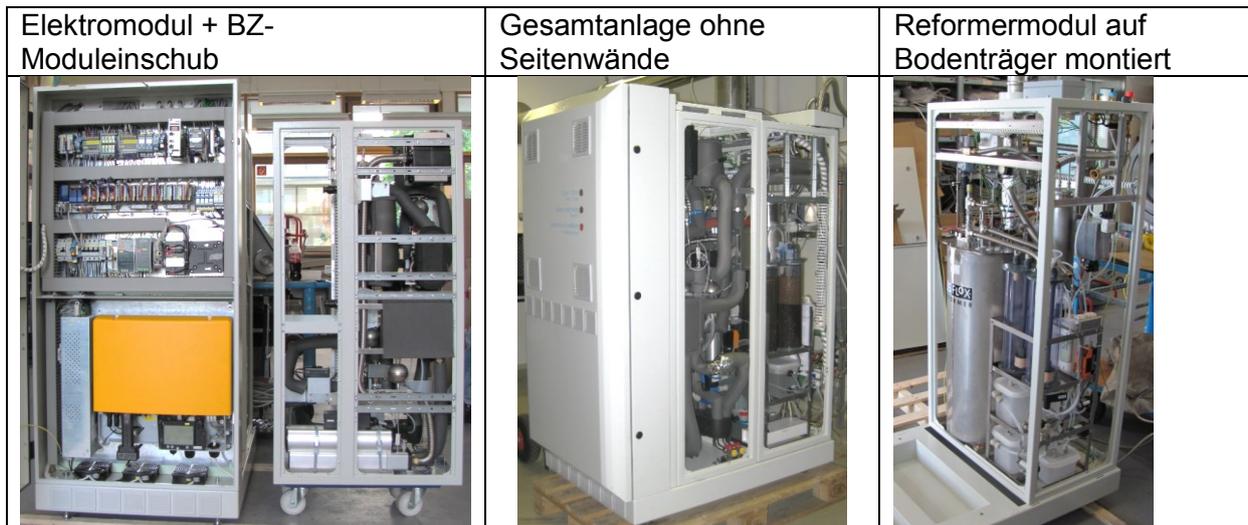


Abbildung 59 Demonstrator Brennstoffzellen-BHKW inhouse5000+

In Abbildung 59 und Abbildung 60 sind die Hauptkomponenten in unterschiedlichen Aufbaustadien zu sehen. Deutlich ist auch die Volumen- und Gewichtersparnis des Stacks in Abbildung 60 im Vergleich zum Feldteststack zu erkennen. Der Stack wird isoliert in das Brennstoffzellenmodul eingebaut um eine Wechselwirkung zwischen Anlageninnentemperatur und Stacktemperatur zu minimieren.

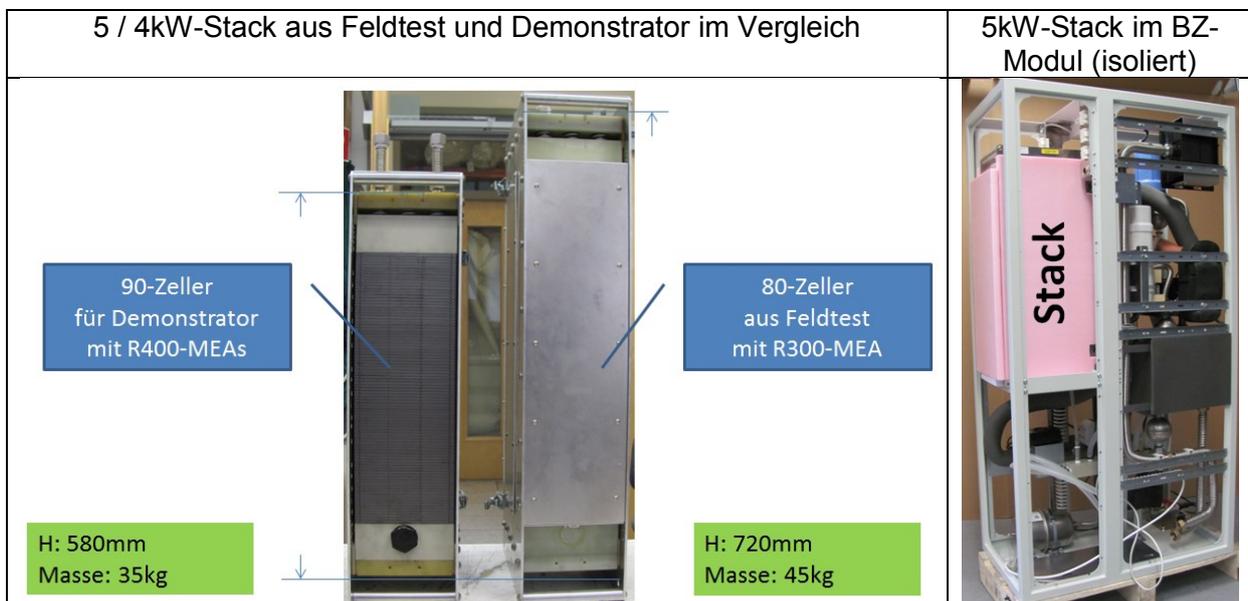


Abbildung 60 IE-NT-PEM Fullstacks (finaler Projektstand) versus NT\_PEM Fuelstack (Feldtest inhouse)

**IE / RBZ****Optimierungen für Ausfallursachen und Standzeitverbesserung im Demonstrator im Vergleich zum Feldtest**

Im Projektzeitraum wurden kontinuierlich und systematisch Ausfälle und Schwachstellen untersucht und begleitend Verbesserungen entwickelt und getestet (siehe vorherige Abschnitte). Im Demonstrator wurden diese Erkenntnisse zusammengefasst und umgesetzt. Nachfolgend befindet sich ein Überblick der wichtigsten Erkenntnisse.

Komponente	Problem	Lösung
DI Patrone BZ-Modul Primärkühlkreis	Standzeit kurz (Wechsel W15x)	Neuer Filtertyp + Aufbereitung im Reformier
Luftfilter	Standzeit kurz ( W17x)	Neues Modell
Katodenluftgebläse	Defekt durch Wärme, Wasserleckagen (W6x)	Innenraumtemperatur absenken, optimieren Verschraubungen
Befeuchter	Gehäusedefekt Umgebungswärme & zu hohe Eingangstemperatur (W3x)	Innenraum- und Eintrittstemperatur absenken
Befeuchter	Schlechte Performance in hohen Lastbereichen durch zu hohe Eingangstemperatur (permanent)	Eintrittstemperatur absenken
Kunststoffblöcke	Undichtigkeiten (W11x)	Optimierung Konstruktion / Einsatz anderer Materialien
Bypassventil Anodeneingang	Defekt durch zu hohe Umgebungswärme (W3x)	Innenraumtemperatur absenken, anderen Ventillieferanten
Wechselrichter	Defekte durch zu hohe Umgebungswärme und Konzeptfehler im Schaltungsdesign (W3x)	Anderer WR-Lösung aus Projekt MÖWE3
Stack Zellentausch	Defekt durch Zersetzung FF aus hoher Leitfähigkeit KK, Löcher im Randmaterial (W2x)	Leitfähigkeit kontrollieren, andere MEA (R500) + Randmaterial & abdecken

Tabelle 6 Ausgewählte FT-Schwachstellen und Lösungen für Demonstrator

**IE / RBZ****Kosten- und Wirkungsgradoptimierungen Demonstrator im Vergleich zum Feldfest**

Durch umfangreiche Problemanalyse und daraus abgeleiteter Suche und Erprobung von verschiedenen Lösungen konnten im Demonstrator Kosten gesenkt und der Wirkungsgrad deutlich verbessert werden. Nachfolgend sind einige Schwerpunkte aufgelistet.

<b>Komponente</b>	<b>Problem</b>	<b>Lösung</b>
Wechselrichter	Wirkungsgrad unter 91%	Neuentwicklung in MÖWE3
Stack	Degradation Wirkungsgrad Flowfields + Dichtungen teuer Endplatten teuer	Optimierung Parameter / Design Anpassung Arbeitspunkt / Zellen Press- und Spritzgussform in MÖWE2 Spritzgussdesign in MÖWE3
Kathodenluftverdichter	Ausgangsluft zu heiß Kühlt Verlustwärme in Anlage Druckabfall hoch Dosierung teuer	Zwischenkühlung Kühlung über Ansaugluft Stackdruckabfall senken + Massflowmeter einsparen durch Kennfeldsteuerung Verdichter
Gehäuse	Kosten für Nacharbeiten an Standard-Rittalgehäuse	Entwicklung / Fertigung spezielles Anlagengehäuse für Montage ohne Nacharbeiten

Tabelle 7 Ausgewählte Kosten- und Wirkungsgradoptimierungen

## IE /RBZ Test Demonstrator

Der Demonstrator wurde bei RBZ aufgestellt und getestet. Nachfolgende Untersuchungen wurden u.a. durchgeführt:

- Aufnahme Innentemperatur Anlage bei verschiedenen Laststufen
- Anlagendynamik Kaltstart / Warmstart / Lastwechsel mit neuer Stackvorheizung
- Wirkungsgradermittlung bei verschiedenen Lastpunkten
- Im Projekt entwickelte An- und Abfahrstrategie mit Bleed-Down Erdgasspülung Stack für Verringerung der Stackdegradation
- Kontinuierliche Kondensatrückgewinnung und –aufbereitung (siehe auch Abschnitt 2.4)
- Kathodenluftversorgung mit Kennfeldsteuerung (siehe auch Abschnitt 2.4)
- Dauererprobung System

Aus dem umfangreichen Testprogramm des Demonstrators konnten nachfolgende Wirkungsgrade ermittelt werden.

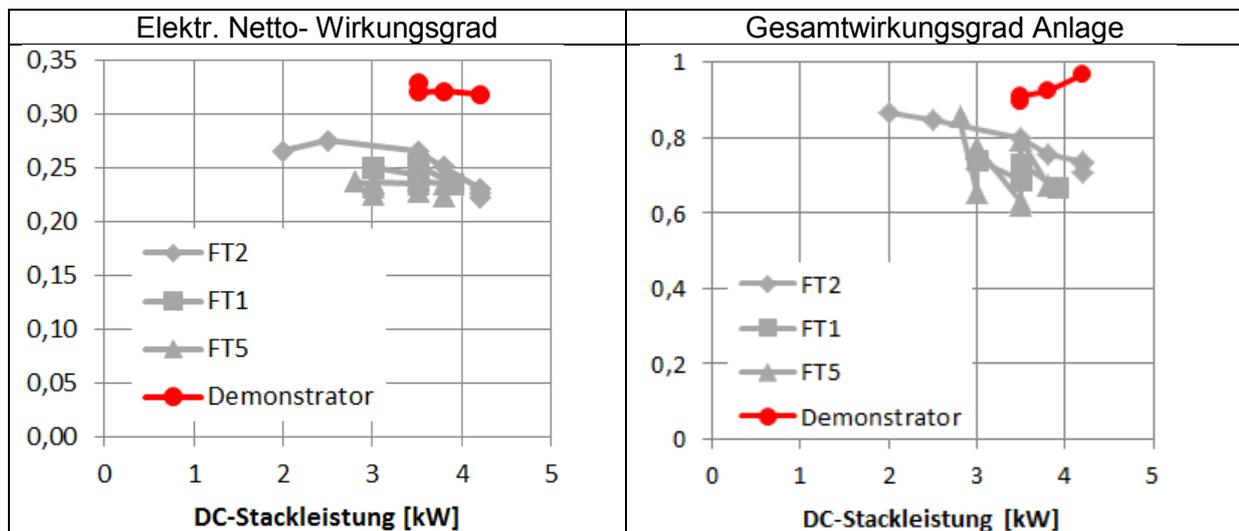


Abbildung 61 Wirkungsgrad Demonstrator

Die Testzyklen des Demonstrators wurden ebenfalls wie die Stacktest (siehe Abbildung 44) an die INECS-Studie angelehnt (siehe 2.7). Für den Anlagentest wurden sie aber leicht modifiziert (siehe Abbildung 62).

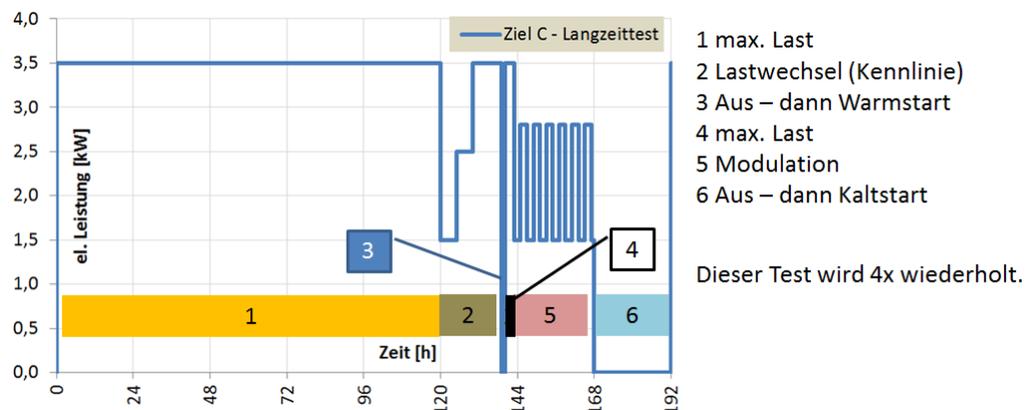


Abbildung 62 Lastgang für Demonstrator test angelehnt an INECS-Studie

Aus diesen Messungen konnten Degradationsraten für einen Fullstack im Anlagenbetrieb abgeleitet werden, ähnlich der Betrachtung in Abbildung 45.

Ein kurzer Überblick über einen Lastgangzyklus und der Decaybetrachtung befinden sich in nachfolgenden Abbildungen. Diese Lastgangzyklen wurden in mehreren Etappen gefahren mit unterschiedlicher Zielstellung. Nachfolgend wird nur der INECS- Zyklus dargestellt.

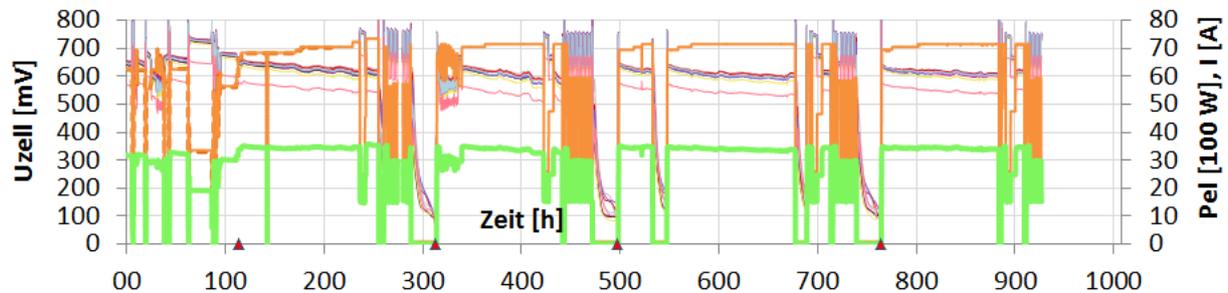


Abbildung 63 Lastgang im Demonstrator aus INECS- Zyklus

Diese Messungen konnten noch nicht mit der MEA-Gen2 getestet werden, sie wurden mit MEA-Gen1 durchgeführt. Die Ergebnisse decken sich bzw. sind noch besser als die Untersuchungen mit den Shortstacks.

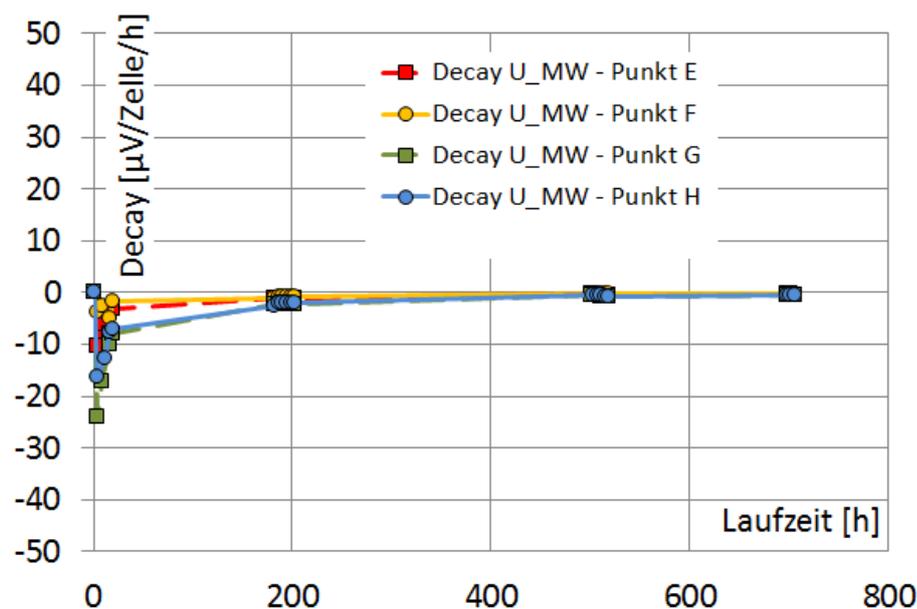


Abbildung 64 Decayrate Stack MEA Gen1

## RBZ

Zur Forcierung des Projektfortschritts wurde im September 2012 beschlossen, die Entwicklung eines eigenen Erdgas-Dampf-Reformers auszusetzen und statt dessen ein Fremdprodukt einzusetzen, das mit hoher Performance und den Vorteilen einer integrierten Gasreinigung mit Selektiver Methanisierung statt Selektiver Oxidation und eines patentierten Flox-Brenners arbeitet. Durch das fundierte Know-how bei RBZ konnte die Implementierung dieses Reformers sehr schnell und effizient erfolgen. Im Zusammenhang mit dem Einsatz des neuen Reformers wurden die Optimierungsarbeiten am Reformersmodul fortgeführt und die Balance-of-Plant-Komponenten angepasst. Es wurde ein ausführliches Langzeit-Testprogramm mit dem optimierten Reformersmodul in Verbindung mit einem BZ-Modul alter

Bauart gefahren. Mit den Ergebnissen des Langzeittests wurde eine Erhöhung des elektrischen und Gesamtwirkungsgrades durch den Einsatz des neuen Reformers bestätigt. Hervorzuheben ist der gleichbleibend gute Wirkungsgrad über die gesamte Leistung (modulierender Betrieb von 1,5 bis 4,5 kW elektrisch) (Abbildung 66).

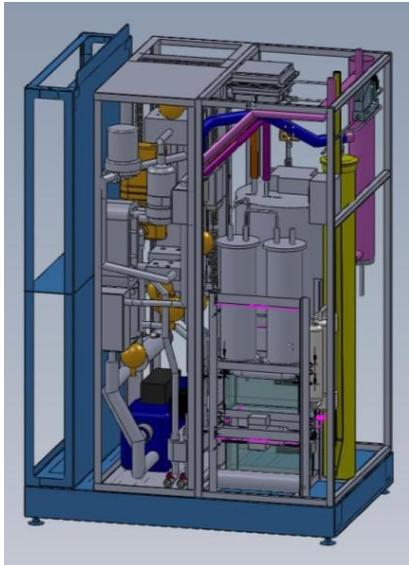


Abbildung 65 Packagingentwurf Demonstrator Brennstoffzellen-BHKW inhouse5000+

Für den Demonstrator wurde ein komplett neues Gehäusedesign entwickelt und das Packaging für die einzelnen Module finalisiert. Das Gehäuse ist modular aufgebaut: ein Sockel dient als Montageplattform für die einzelnen Module Brennstoffzellen-, Reformer- und Elektronikmodul. Die Seitenwände dichten das System komplett gegen Dach und Sockel ab, so dass die Anlage raumluftunabhängig betrieben werden kann. Mit dem neuen Gehäusekonzept wird das Ziel verfolgt, eine einfache Montage in jedem Keller zu ermöglichen und die einzelnen Komponenten für Wartungs- oder Servicearbeiten leicht zugänglich anzuordnen. Die Einzelmodule wiegen jeweils nicht mehr als 50 – 60 kg, sodass eine Montage mit zwei Mann problemlos möglich ist. Durch die geringen Abmessungen der Einzelmodule sind auch keine extra breiten Türen oder Zugänge erforderlich.

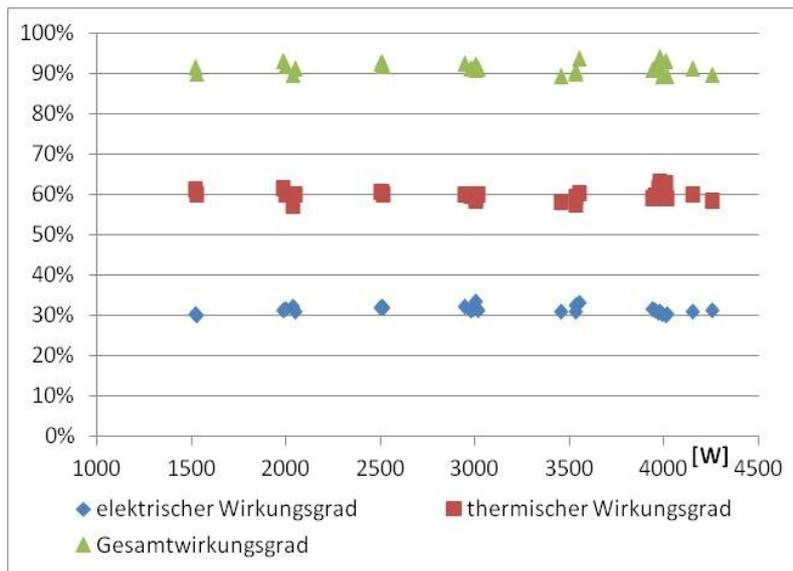


Abbildung 66 Performance Demonstrator inhouse5000+

## 2.7 AP 7 verfahrenstechnische Analyse von Feldtestdaten für Typenklassifizierung und Gebäudeintegration

### Studie zur Typenklassifizierung und Gebäudeintegration der INECS GMBH

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurde per Unterauftrag von der Fa. inecs GmbH eine Studie zur Klassifizierung von Wohngebäuden für die Integration von Brennstoffzellensystemen erstellt, welche unter anderem das EU-weite Marktpotenzial von Brennstoffzellensystemen prognostiziert hat.

Ausgehend von der derzeitigen Bevölkerungszahl und der Bevölkerungsentwicklung der einzelnen EU-Länder bis 2050 wurden die Haushaltszahlen der einzelnen EU-Länder ermittelt. Hierzu wurde auch die Verteilung der Haushalte (1 bis 5+ Personen pro Haushalt) je EU-Land berücksichtigt. Anhand dieser Vorbetrachtungen wurde die Gebäudestruktur der EU – aufgeschlüsselt nach Ländern – vorgenommen (Abbildung 67).

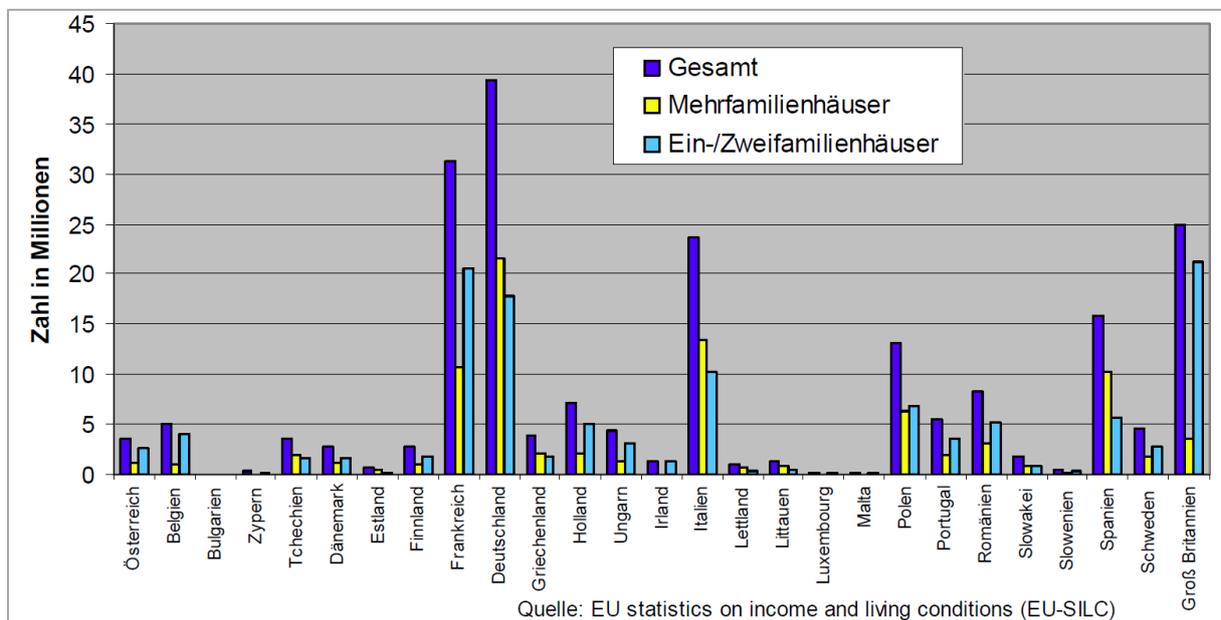


Abbildung 67 Gebäudestruktur der EU (Quelle: Studie INECS GmbH)

Abgeleitet von dem Gebäudebestand wurde die prozentuale Verteilung des EU-Gebäudebestandes hinsichtlich der Anteile an Ein-, Zwei- und Mehrfamilienhäusern untersucht und die absolute Anzahl an Mehrfamilienhäusern ermittelt. Mit Hilfe dieser Anzahl und der in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** getroffenen Annahmen wurde das Potenzial für Brennstoffzellensysteme der 5kW-Klasse hochgerechnet.

Wirkungsgrad elektr.	30%	
Wirkungsgrad therm.	55%	
Installierte erl. Leistung	5,0 kW	
Installierte th. Leistung	10,0 kW	
Benutzungsdauer	5000 h/a	
	<b>Bandbreite</b>	
Wasserverbrauch	<b>40 L/d</b>	<b>20 L/d</b>
Wärmeverbrauch/Pers.d	2 kWh/Pers.d	1 kWh/Pers.d
Wärmeverbrauch/Pers..a.	628 kWh/Pers.d	314 kWh/Pers.d
Anzahl Pers./WE	4	4
Wärmeverbrauch/WE	2.512 kWh/WE.a	1.256 kWh/WE.a
Stromerzeugung/WE	1.370 kWh/WE.a	685 kWh/WE.a

Tabelle 8 Annahme Trinkwarmwasserverbrauch Brennstoffzellen-KWK-System (Quelle: inecs- Studie)

Für den deutschen Markt wurde somit von inecs ein Leistungspotenzial von 2.850 MWth bis 5.703 MWth errechnet. Insgesamt ergibt sich für den EU-Bereich ein Gesamtpotenzial zwischen 12.000 MWth und 24.000 MWth.

Die korrespondierenden Anlagen-Stückzahlen für ein Brennstoffzellensystem mit 5kWel sind Abbildung 68 zu entnehmen. Die Ergebnisse zeigen, dass EU-weit theoretisch ein Gesamtpotenzial von 2,4 bis 4,9 Mio. Einheiten zur Verfügung steht. Bezogen auf die großen Mitgliedsländer Deutschland, Italien, Frankreich, Polen und Spanien beläuft sich das Potenzial allein auf 1,7 bis 3,5 Mio. Einheiten. Ein Blick auf den Heimatmarkt von inhouse engineering zeigt, dass allein dessen Potenzial ein unternehmerisches Engagement rechtfertigt. Die Auswertung zeigt, dass in Deutschland von einem Potenzial von 0,6 bis 1,1 Mio. Einheiten auszugehen ist. Basierend auf einer angenommenen spezifischen Investition von 3.000 Euro /kW entspricht dies einem Investitionspotenzial von 8 bis 17 Milliarden Euro.

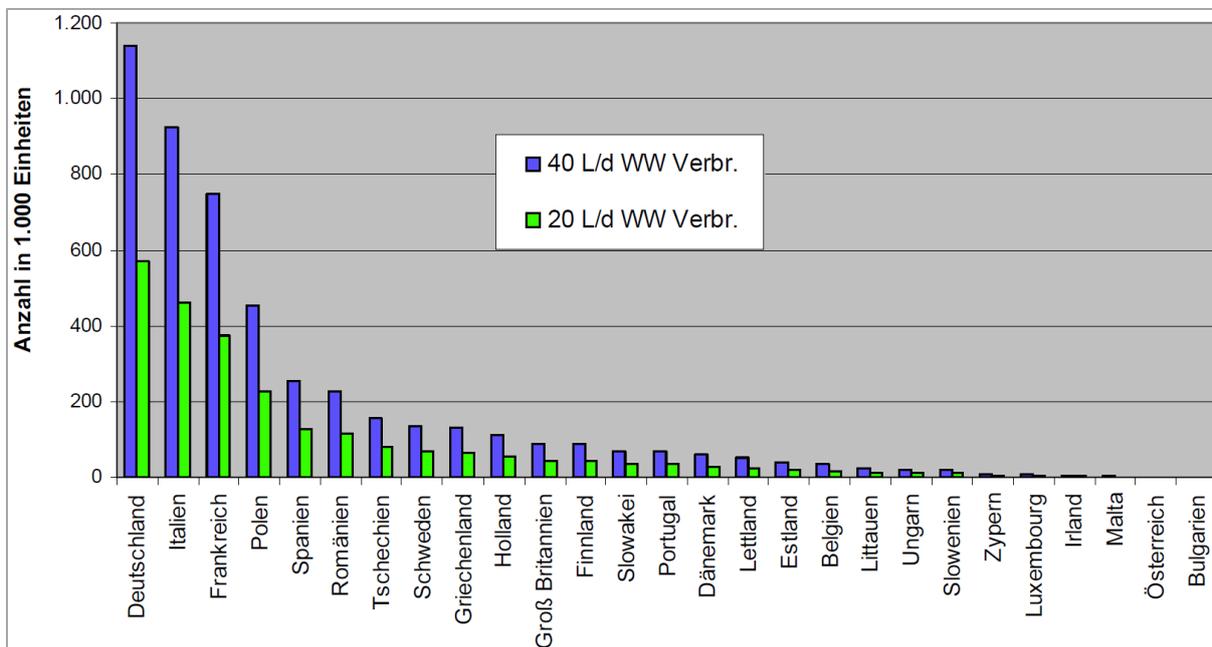


Abbildung 68 Potenzial für Brennstoffzellensysteme mit einer installierten elektrischen Leistung von 5kW (Quelle: inecs-Studie)

Die Studie zeigt, dass für den Einsatz von Brennstoffzellensystemen ein großes Potenzial besteht. Schwerpunkt für eine Markteinführung sollte hierbei das Zentrum Europas sein. Die hier vorhandene hohe Konzentration an Wohnungen in Mehrfamilienhäusern sowie das hohe Strompreisniveau sprechen für eine aussichtsreiche Markteinführung.

## SC / IE

Die Projektpartnern SC und IE leiteten aus der INECS-Studie typische Messverfahren der Stacks und Anlage ab zur:

- Ermittlung typischer Leistungsverteilungen für Gebäudeintegration
- Ermittlung typischer Lastabwurfzyklen
- Ermittlung typischer Kalt- und Warmstarts in Gebäuden

Die Ergebnisse sind in den Stack- und Anlagentestprotokollen wiederzufinden (siehe Abbildung 44 für Stack und Abbildung 62 für die Anlage)

## RBZ

Im Rahmen einer Bachelorarbeit, die durch RBZ betreut wurde, sind auf Basis der Richtlinie VDI 4656 „Planung und Dimensionierung von KWK-Anlagen“ die Typklassifizierung und die Implementierung der inhouse5000+ in verschiedene Gebäudeklassen untersucht worden. Die VDI-Software bietet eine sehr gute Auslegungsgrundlage, da hier reale Lastgangskurven von Mehrfamilienhäusern hinterlegt sind. Aus den Ergebnissen der Bachelorarbeit wird ein breites Einsatzspektrum der inhouse5000+ Systeme ersichtlich. Bereits ab Gebäudegrößen von ca. 10 Wohneinheiten werden je nach Modernisierungsstand rechnerisch mehr als 6.000 Betriebsstunden erreicht.



Rieser  
Brennstoffzellentechnik  
GmbH



### Planung Beispiel Mehrfamilienhaus (10 WE, EnEV 2009)



#### Objektdaten:

- |                    |              |
|--------------------|--------------|
| • Strombedarf      | 30.000 kWh/a |
| • Heizwärmebedarf  | 25.600 kWh/a |
| • Warmwasserbedarf | 10.000 kWh/a |

#### Einbindung inhouse5000

- |                                  |                        |
|----------------------------------|------------------------|
| • Einbindung über Pufferspeicher | 500... 1.000l          |
| • Rücklauf / Vortlauf            | 40 °C / 60 °C          |
| • Zusatzheizgerät                | Brennwert-Therme 20 kW |



#### Betriebsdaten inhouse5000 (Planung VDI/VDE-Norm 4656)

- |                                   |            |
|-----------------------------------|------------|
| • abgegebene Strommenge           | 16.157 kWh |
| • abgegebene Wärmemenge           | 36.450 kWh |
| • Betriebsstunden Netzeinspeisung | 6.380 h    |
| • Anzahl Startvorgänge            | 179        |

16

Abbildung 69 Simulation Betriebsdaten in einem MFH mit 10 WE gemäß VDI 4656 /3/

## 2.8 AP 8 Recycling

### SC

In AP 8 sollten die einzelnen Partner an der Entwicklung eines komponentenspezifischen Recyclingkonzeptes arbeiten. Für die MEA fielen dabei nur wenig Arbeiten an. Über die Mutterfirma Umicore besteht Zugang zu einer patentierten EM-Recyclingtechnologie. Projektübergreifende Verbesserungen im Fertigungsprozess erlauben bessere Ausbeuten für die verschiedenen Rohmaterialien. Für ein sinnvolles Recycling anderer MEA-Bestandteile als dem Edelmetall der Katalysatoren haben sich noch keine Ansätze ergeben.

### IE / RBZ

Ein Recyclingkonzept für den Stack, die Anlage und den Reformer konnte nur teilweise erstellt werden.

Nachfolgend werden einige wichtige Bestandteile der Anlage aufgelistet

Komponente	Material	Recycling
Flowfields (Stack)	Graphitcompount	nicht möglich lt. Lieferant
Dichtungen	Elastomer	nicht möglich lt. Lieferant
Mechanik / Gehäuse	Metall	Verschrottung
Aktoren / Sensoren	Metall Elektronik	Verschrottung Elektroschrott
Elektrokabel / komponenten	Metall Elektronik	Verschrottung Elektroschrott
Isolierung	Kunststoff	Nicht möglich
Reformer- Katalysatoren	Katalysator	Recycling durch Lieferanten

Tabelle 9 Auszug aus Recyclingkonzept

## 2.9 AP9 Entwicklung eines Wirtschaftlichkeitskonzeptes

### SC

In AP9 war die Aufgabe gestellt, ein Wirtschaftlichkeitskonzept für die Kernkomponenten zu erstellen. Leider ist die Nachfrage an stationären BZ-Systemen noch nicht so hoch, dass Skaleneffekte bei den Materialkosten für die MEA greifen. Da diese erst bei höherer Nachfrage nutzbar werden, mussten zusätzliche Ansätze erfolgt werden, um Verbesserungen zu erzielen. Daher wurden Entwicklungen aus anderen Projekten implementiert, für das vorliegende Projekt z.B. eine neue Kathodenelektrode, ein verbessertes Randmaterial und der zugehörige Fertigungsprozess. Außerdem wurde von CCB- auf CCM-Technologie umgestellt, welche künftig das Potential für eine Fertigung Rolle zu Rolle und damit zu verbesserter Wirtschaftlichkeit bietet. Der im Projekt etablierte Entwicklungsansatz senkt insgesamt den Entwicklungsaufwand; einzelne Materialien können, auch bedingt durch das gewählte Fertigungskonzept, schneller ersetzt werden, z.B. wenn ein besseres oder günstigeres Material verfügbar wird. Ein typisches Beispiel für einen solchen Materialtausch wäre der Einsatz einer preisgünstigeren und/oder leitungsfähigeren Membran.

## **IE/RBZ**

Gemeinsam entwickelten die Partner in Laufe des Projektes ein Konzept zur Senkung der Kosten des Brennstoffzellen-BHKW. Dabei wurden jedem Partner auch die im Projektverlauf definierten Schwerpunkte zugeordnet:

- Solvicore      MEA
- inhouse        PEM-Brennstoffzellenstack
  - Brennstoffzellenmodul
  - Steuerung
- RBZ             Reformermodul

Das Konzept zielt darauf ab schon bei geringen bzw. Einzelstückzahlen die Kosten zu senken berücksichtigt aber auch die Entwicklung der Herstellkosten mit steigenden Stückzahlen. In dem Konzept wurde von einer maximalen Stückzahl von 4.000 Systemen pro Jahr ausgegangen. Das Konzept berücksichtigt zwei Phasen zur Kostensenkungen durch konstruktive Verbesserungen & Materialeinsparungen, Komponenten- und Funktionsoptimierung.

### **Phase 1 - Umfassende konstruktive Optimierung**

In Phase 1 werden durch umfassende konstruktive Veränderungen und technologische Entwicklungen die Materialeinzelkosten reduziert. Es werden umfassende konstruktive Optimierungen umgesetzt durch die Entwicklung von hoch- und höchstintegrierten BoP Lösungen in der Anlage. So sollen in Phase 1 die folgenden Entwicklungen umgesetzt werden:

- Optimierung der des BoP Konzeptes im Brennstoffzellenmodul z.B.: Kondensatableitung, Einsatz von deutlich günstigeren Neuentwicklungen wie z.B. Kathodenluftbefeuchter, Spritzguss von Kunststoffteilen
- Optimierung des Endplatten, Dehnungsausgleichs- und Verspannsystem und Überführung in den Spritzguss
- Einführung neue Reformergeneration mit neuer Produktionstechnologie
- Reduzierung der Katalysatormengen im Reformer und in der Gasreinigung
- Optimierung des Reformer BoP Konzeptes (Reduktion von Sensoren, Reduktion von Komponenten durch neue Reformergeneration)

Parallel werden Möglichkeiten zur partiellen Serienfertigung bzw. teilautomatisierten Fertigung von Komponenten evaluiert und da wo eine Anwendung auch bei geringen Stückzahlen sinnvoll ist, auch umgesetzt. So ist z.B. geplant den Spritzguss bzw. das Pressen für Flowfield und Dichtungen ein umzusetzen.

### **Phase 2 - Komponenten- und Funktionsoptimierung im System**

Durch eine immer größere werdende Prozessstabilität in Produktion und Betrieb der Systeme kann z.B. eine Reduzierung von sensorischen Komponenten erfolgen. Weiterhin werden mit diesen Erfahrungen Hochleistungsmaterialien durch geeignete preiswerte Materialien ersetzt und spezifisch angefertigte Komponenten durch verfügbare geeignete Standardkomponenten ersetzt. Weiterhin werden alternative Bezugsquellen z.B. im europäischen Rahmen erschlossen.

Durch die Umsetzung der beiden Phasen sollen/ werden die folgenden Effekte erzielt:

- Reduktion des Materialeinsatzes
- Substitution von Materialien durch geeignete günstigere Materialien
- Einsparung von Komponenten
- Erhöhung der Standardisierung und Nutzung von Standardkomponenten

Skaleneffekte werden mit steigender Stückzahl im Bereich (2015 bis 2020) immer mehr zum Tragen kommen. Die durch Skaleneffekte erreichbare Reduktion der Materialeinzelkosten beträgt bezogen auf den heutigen Wert ca. 28 %. Für die Analyse der Skaleneffekte werden von den Zulieferern der Kernkomponenten, PEM-Stack und Reformer und der wichtigsten BoP-Komponenten (Balance of Plant) angefordert. Der Schwerpunkt der Analyse wird auf die folgenden Einheiten gesetzt:

- Brennstoffzellenmodul
- PEM- Brennstoffzellenstack
- Reformersmodul
- Steuerung/
- Leistungselektronik (Wechselrichter)
- Gehäuse

Ifd Nr.	Kernkomponente	aktuelle Materialeinzel- kosten	Einsparung		Skaleneffekte 2015-2020	Ziel für Materialeinzel- kosten	Kernmaßnahmen
			Phase 1	Phase 2			
1	Reformer+Gasreinigung	100%	66,9%	8,2%	6,0%	19,0%	Einführung neue Reformergeneration, Laserschweißen, Vorrichtungsbau für Laserschweißen
2	Brenner	100,00%	53,5%	0,0%	27,7%	18,8%	Optimierung durch Einführung neue Reformergeneration
3	Katalysatoren	100,00%	15,9%	39,4%	25,0%	19,7%	Katalysatorrecycling/ Optimierung Katalysatormengen, neue Katalysatorstechnologie
4	BoP Reformer	100,00%	37,1%	22,7%	25,8%	14,4%	
6	PEM Stack	100,00%	54,2%	0,0%	33,5%	12,3%	Einführung Spritzguss/Pressen Flowfield, Dichtung und Verklebung zu Bipolarplatte, Spritzguss der Endplatten und Optimierung Verspannung und Dehnungsausgleich
7	Kathodenluftbefeuchter	100,00%	57,1%	0,0%	20,2%	22,7%	Einsatz eines neues Befeuchtersystem (neue Membranmaterialien)
8	BoP BZ-Modul	100,00%	44,9%	23,2%	23,2%	8,8%	Optimierung BoP Konzept & Kondensatableitung Spritzguss von Medienblöcken und Nutzung von Normteilen
9	Wechselrichter	100,00%	0,0%	0,0%	80,5%	19,5%	
10	Steuerung	100,00%	35,9%	15,4%	31,7%	17,0%	Umstellung Steuerung auf OEM Produkt / Einsparung Industrie PC )
11	Gehäuse	100,00%	0,0%	68,2%	21,0%	10,8%	
12	BoP-System	100,00%	40,0%	31,3%	18,8%	9,9%	Skaleneffekte da nur Standardkomponenten genutzt

Tabelle 10 Kostensenkungspotenziale BHKW inhouse5000+ in den einzelnen Optimierungsphasen

## **2.10 AP 10 Projektkoordination**

### ***IE***

Die Projektkoordination durch inhouse engineering GmbH umfasste die Koordination der einzelnen Arbeitspakete, die administrative Leitung des Projektes. Zusätzlich oblagen inhouse engineering GmbH die Planung und Durchführung von halbjährlichen Projekttreffen, ergänzenden Techniktreffen die Öffentlichkeitsarbeit, die Dokumentation der Arbeitsergebnisse und die Sicherstellung der Kommunikation der einzelnen Projektpartner.

### **3. Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse**

#### **IE/ SC/ RBZ**

Die Verwertung der Ergebnisse wird von jedem Partner in Form des Erfolgskontrollberichts eingereicht.

### **4. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

#### **IE/SC/RBZ**

Insgesamt bemühen sich die Hersteller von Brennstoffzellen-Systemen durch Öffentlichkeitsarbeit, Zusammenschluss in Gremien wie dem VDMA /5/, der IBZ /6/ oder dem energy saxony e.V. /8/ sowie durch politische Lobbyarbeit um die Etablierung der hocheffizienten Brennstoffzellentechnologie in der breiten Öffentlichkeit. Die gesamte KWK-Technologie, zu der auch die Brennstoffzellensysteme gehören, ist einem Großteil der Bevölkerung als hocheffiziente „Heiztechnologie“ noch gar nicht gegenwärtig. Durch die nationalen Programme und die Bemühungen von Herstellern und Verbänden ist der Bekanntheitsgrad in den letzten Jahren stetig gestiegen, aber leider noch nicht auf dem gewünschten Niveau angelangt.

Insbesondere Japan hat durch eine gezielte Förderpolitik die Entwicklung von Brennstoffzellensystemen vorangetrieben, sodass Konzerne wie Panasonic oder Toshiba ihre Systeme für das Einfamilienhaus aktuell auf den europäischen Markt anpassen. Hierbei kooperieren sie eng mit deutschen Entwicklern wie Viessmann oder Baxi Innotech.

Einzigiger Konkurrent der inhouse-Systeme für das Mehrfamilienhaus ist die US-amerikanische Firma ClearEdge Power, die ebenso wie RBZ Brennstoffzellen-Systeme mit 5 kW elektrischer Leistung anbietet. (Aktuellen Informationen zufolge hat Clear Edge jedoch Anfang 2014 Insolvenz angemeldet.)

Weltweit wird weiter intensiv an der Markteinführung von Brennstoffzellen-Systemen gearbeitet. Einige Nischenprodukte haben durchaus schon die Marktfähigkeit erreicht (portable Systeme für Outdooranwendungen oder Ersatz von Batteriepacks in Gabelstaplern). Die Automobilindustrie kündigt marktfähige Lösungen für 2017 an. Hier werden Synergieeffekte bezüglich Materialforschung aber auch hinsichtlich Marktakzeptanz und Bekanntheitsgrad erwartet.

Auch die Projektpartner sehen insbesondere auf Grund der in diesem Projekt erreichten Ergebnisse eine reelle Chance die Marktfähigkeit der Systeme zeitnah zu erreichen.

## 5. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Vorstellung des Projektes auf der NIP Vollversammlung in Berlin - „in5000plus – Optimierung eines Feldtestsystems Begleitprojekt zum Feldtest inhouse5000“ 07.11.2011, Christoph Hildebrandt (inhouse)
Tagung des VDE Fachausschusses Brennstoffzellen und des VDI Fachausschusses Brennstoffzellen und Dezentrale Versorgung 06.12.2012, Christoph Hildebrandt (inhouse), Dr. Katrin Grosser (RBZ)
Berliner Energietage - KWK-konkret - „Praxistest Brennstoffzelle – Erfahrungen im Feldtest“ 16.05.2013 Christoph Hildebrandt (inhouse)
HZwei – Ausländische BZ-Firmen kommen nach Deutschland Sven Geitmann, 07/2012
Berliner Netzwerk E Vorstellung des Brennstoffzellensystems inhouse5000+ für Energiebeauftragte der Berliner Bezirke 11.06.2013 Christoph Hildebrandt (inhouse)
Vorstellung des Projektes auf der NIP Vollversammlung in Berlin - „in5000plus – Optimierung eines Feldtestsystems Begleitprojekt zum Feldtest inhouse5000“ 17.06.2013, Dr. Katrin Grosser (RBZ)

## 6. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	vereinfachtes Schema Brennstoffzellen-BHKW inhouse5000+ .....	6
Abbildung 2	Bilder Feldtestanlagen .....	15
Abbildung 3	Prozentuale Stromdichteverteilung über gesamte Laufzeit für Feldtestanlagen 1-5 .....	16
Abbildung 4	Wirkungsgrade ausgesuchter Feldtestanlagen .....	17
Abbildung 5	Übersicht Langzeitauswertungen u. Degradationsbetrachtungen (Decaybetrachtungen) aus Feldtest .....	17
Abbildung 6	Ermittlung der Zellspannungsdifferenz für Degradationsratenbestimmung.....	18
Abbildung 7	Degradationsraten aller Stacks in den Feldtestanlagen im Überblick.....	18
Abbildung 8	Einfluss Anfahrstrategie Stack .....	19
Abbildung 9	Abhängigkeit Befeuchtungsleistung Eingangstemperatur .....	20
Abbildung 10	Probenanalyse Kühlkreis im Feldtest und in Testständen .....	21
Abbildung 11	Wirkungsgradmodell System in5000 .....	22
Abbildung 12	Beispielhafte Kennfeldaufnahmen wichtiger Systemkomponenten.....	22
Abbildung 13	elektr. Gesamtwirkungsgrad in Abhängigkeit vom Anodenumsatz MEA Gen0 .....	23
Abbildung 14	elektr. Gesamtwirkungsgrad in Abhängigkeit vom Anodenumsatz und Verschiebung des elektrischen Arbeitspunktes.....	23
Abbildung 15	Performance und Prozessparameter MEA Gen0 .....	24
Abbildung 16	prinzipielle Medienverschaltung inhouse5000 und Übertragungseigenschaften .....	25
Abbildung 17	Untersuchung verschiedener Anfahrstrategien MEA Gen1 .....	26
Abbildung 18	IE-Shortstacks bei SC.....	28
Abbildung 19	MEA-Gen1 im Vergleich auf verschiedenen Testsystemen und Zellflächen...28	
Abbildung 20	Übersicht der Stacktestung IHE_S01 .....	30
Abbildung 21	Testaufbau für Voruntersuchungen zum Demonstrator.....	31
Abbildung 22	Grafische Darstellung der Ursachen für Anlagenabschaltungen (Summe aller Feldtests).....	32
Abbildung 23	Detailanalyse der Kategorien für Fehlerursachen im Feldtest .....	33
Abbildung 24	Feldtest inhouse 5000 - Anzahl getauschter Komponenten und zugehörige Kosten für Material und Personal .....	34
Abbildung 25	Leistungsmängel, Alterungsmechanismen MEA- Schutzrand .....	35
Abbildung 26	Designänderung zur Stärkung MEA-Schutzrand.....	35
Abbildung 27	Beispielhafte Zersetzung von Bipolarplatten am Shortstack IHE-S04 .....	36
Abbildung 28	Wichtige Schritte der MEA-Entwicklung im Überblick.....	37
Abbildung 29	Stacktest IHE-S02, ein typischer Robustheits- und Dauertest.....	39
Abbildung 30	gesamter Testverlauf von IHE-S04 .....	40
Abbildung 31:	Zusammenstellung elektrochemischer Untersuchungsergebnisse R400.....	41
Abbildung 32	Messeinrichtungen für Kraft-Weg Kurven.....	42
Abbildung 33	Vergleich Verpressungsraten MEA bei SC und IE .....	42
Abbildung 34	Modellrechnung und Vermessung Verpressung MEA Gen1 und Dichtung....	43
Abbildung 35	Abdruckbilder Verpressung MEA Gen2 im Stack .....	43
Abbildung 36	Entwicklung Performance bei MEA-Wechsel .....	45
Abbildung 37	zeitlicher Ablauf Optimierung Prozessparameter mit Stack 1207 .....	46
Abbildung 38	Optimierung Prozessparameter für MEA-Gen1 .....	46
Abbildung 39	Motivation der Verschiebung des Nennarbeitspunkte der Zelle.....	47
Abbildung 40	Entwicklung bei Parameteränderung Prozessparameter mit MEA-Gen1.....	47
Abbildung 41	Langzeit MEA-Gen1 (Stack 1302) mit optimierten Prozessparametern.....	48
Abbildung 42	Degradationsraten MEA-Gen1 bei 0,4A/cm <sup>2</sup> Langzeitbetrieb .....	48
Abbildung 43	Performance mit optimierten Prozessparametern mit MEA-Gen1 / 2 .....	49
Abbildung 44	Lastprofil für Test MEA-Gen2 abgeleitet aus INECs-Studie für einen Tag.....	49
Abbildung 45	Vergleich Degradationsraten zwischen SC und IE mit MEA-Gen2.....	50
Abbildung 46	Betriebsablauf Shortstack 1320 MEA-Gen2 bei IE.....	51
Abbildung 47	Definition Stromdichtegradienten .....	51

Abbildung 48	Stromdichtegradienten / mittlere Zellspannung Shortstack1302 MEA-Gen1 ..	52
Abbildung 49	Kühlung der Eingangsluft vor Abgasbefeuchter mittels Intercooler.....	53
Abbildung 50	Entwicklungsschritte Kathodenluftsteuerung .....	53
Abbildung 51	Spezifikationen der IE Stromdichtemessung .....	54
Abbildung 52	Betrachtungsarten SDM-Profil .....	55
Abbildung 53	Untersuchung Anlagendynamik mit SDM.....	56
Abbildung 54	strömungstechnische Flowfield-Optimierung mit SDM .....	56
Abbildung 55	Messeinrichtung für Temperaturverteilung in Zellebene .....	57
Abbildung 56	Temperaturprofil in 2D bei Variation verschiedener Betriebsparameter.....	57
Abbildung 57	Vergleich Leitfähigkeitsanstiege im Stackkühlkreis .....	58
Abbildung 58	Demonstrator in5000plus in der Planungsphase.....	59
Abbildung 59	Demonstrator Brennstoffzellen-BHKW inhouse5000+.....	60
Abbildung 60	IE-NT-PEM Fullstacks (finaler Projektstand) versus NT_PEM Fuelstack (Feldtest inhouse).....	60
Abbildung 61	Wirkungsgrad Demonstrator .....	63
Abbildung 62	Lastgang für Demonstrator test angelehnt an INECs-Studie .....	63
Abbildung 63	Lastgang im Demonstrator test aus INECs- Zyklus .....	64
Abbildung 64	Decayrate Stack MEA Gen1 .....	64
Abbildung 65	Packagingentwurf Demonstrator Brennstoffzellen-BHKW inhouse5000+.....	65
Abbildung 66	Performance Demonstrator inhouse5000+.....	65
Abbildung 67	Gebäudestruktur der EU (Quelle: Studie INECs GmbH).....	66
Abbildung 68	Potenzial für Brennstoffzellensysteme mit einer installierten elektrischen Leistung von 5kW (Quelle: inecs-Studie) .....	67
Abbildung 69	Simulation Betriebsdaten in einem MFH mit 10 WE gemäß VDI 4656 /3/ .....	68

## 7. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Übersicht Brennstoffzellensysteme .....	13
Tabelle 2	Übersicht Feldtestanlagen .....	15
Tabelle 3	Berechnete Steigerungsraten des Gesamt-Systemwirkungsgrades .....	24
Tabelle 4	Übersicht Betriebsparameter .....	27
Tabelle 5	Übersicht wichtigste Stackaufbauten bei IE.....	44
Tabelle 6	Ausgewählte FT-Schwachstellen und Lösungen für Demonstrator .....	61
Tabelle 7	Ausgewählte Kosten- und Wirkungsgradoptimierungen .....	62
Tabelle 8	Annahme Trinkwarmwasserverbrauch Brennstoffzellen-KWK-System (Quelle: inecs- Studie) .....	67
Tabelle 9	Auszug aus Recyclingkonzept .....	69
Tabelle 10	Kostensenkungspotenziale BHKW inhouse5000+ in den einzelnen Optimierungsphasen .....	72

## 8. Quellenverzeichnis

- /1/ BMVBS, BMWi, BMBF: Nationales Innovationsprogramm „Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie“ (NIP), Download – Stichwort NIP NOW  
<http://www.now-gmbh.de/de/ueber-die-now/foerderprogramme/nationalesinnovationsprogramm-nip.html>, Stand 30.04.2014
- /2/ callux – Praxistest Brennstoffzelle fürs Eigenheim, [www.callux.net](http://www.callux.net)
- /3/ VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt: Richtlinie VDI 4656 "Planung und Dimensionierung von Mikro-KWK-Anlagen", Düsseldorf, Sept. 2013
- /4/ ene.field – fuel cells x combined heat and power, Europäisches Demonstrationsprojekt zur stationären Hausenergieversorgung, [www.enefield.eu](http://www.enefield.eu)
- /5/ VDMA Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau, [www.vdma.org](http://www.vdma.org)
- /6/ IBZ - Initiative Brennstoffzelle, [www.ibz-info.de](http://www.ibz-info.de)
- /7/ Grosser, Katrin: in5000plus – Optimierung eines Feldtestsystems  
Begleitprojekt zum Feldtest inhouse5000, NIP Vollversammlung 2013  
Download – Stichwort NIP-Vollversammlung 2013  
[http://www.now-gmbh.de/fileadmin/user\\_upload/RE-Downloads/RE\\_NIP\\_Vollversammlung\\_2013/04\\_Hausenergie\\_\\_in5000plus\\_RBZ\\_Grosser\\_NIP\\_VV\\_2013.pdf](http://www.now-gmbh.de/fileadmin/user_upload/RE-Downloads/RE_NIP_Vollversammlung_2013/04_Hausenergie__in5000plus_RBZ_Grosser_NIP_VV_2013.pdf), Stand 30.04.2014

## 9. Abkürzungsverzeichnis

IE	inhouse engineering GmbH
RBZ	Riesaer Brennstoffzellentechnik GmbH
SC	SolviCore GmbH & Co. KG
FT	Feldtest
FT1...5	Feldtestanlage 1...5
Gen0..2	Generation 0...2
MEA	Membran Electrode Assembly
SDM	Stromdichtemessung
BoP	Balance of Plant
BOL	Begin of Life
EOL	End of Life
BOT	Begin of Test
EOT	End of Test