

Verbundprojekt: Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP)

ZE: SFC Energy AG
Eugen-Sänger-Ring 7
85649 Brunnthal

Förderkennzeichen: 03BS108C
Vorhabenbezeichnung: „STEP2 – ECPD – vom Prototypen zur Fertigungsreife“

Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2010 bis 31.12.2013
vorzeitig beendet zum 30.09.2013

Berichtszeitraum: 01.07.2010 bis 30.09.2013

Ziele des Vorhabens:

- Weiterentwicklung der elcomax-MEA-Technologie
- Entwicklung von dazu kompatibler Stack-Hardware
- Entwicklung einer Systemperipherie-Plattform mit deutlichen Kostenvorteilen
- Entwicklung einer neuen, kostenoptimierten Betriebsstrategie

Arbeitspakete:

AP S1: MEA-Betriebsführung und Qualifizierung

AP S2: Stack-Hardware-Entwicklung

AP S3: Low-cost-Systemperipherie

AP S4: Gesamtsystem

AP S5: Aufbau, Inbetriebnahme und Test der finalen Pilotsysteme

Projektplan

Nr.	Beginn MM/JJ	Ende MM/JJ	Arbeitspaket
S1	07/10	06/12	MEA
S2	01/11	06/12	Stack-Hardware
S3	07/10	12/12	Low-cost-Systemperipherie
S4	07/10	03/13	Gesamtsystem
S5	01/13	09/13	Aufbau, Inbetriebnahme und Test der finalen Pilotsysteme

1. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Fortschritt im allgemeinen

Die Arbeitspakete wurden erfolgreich und innerhalb des Zeitrahmens vorzeitig zum 30.09.2013 abgeschlossen. Durch die Aufstockung der Mittel konnten die ursprünglichen Ziele der Arbeitspakete in der letzten Phase des Vorhabens übertroffen werden.

AP S1: MEA

Im Rahmen des Vorhabens wurden zahlreiche DMFC Stacks und Systeme mit elcomax MEAs aufgebaut und getestet und hinsichtlich der Parameter Stromdichte, Leistungsdichte und Degradation in mehreren Iterationsschleifen untersucht und Optimierungsmöglichkeiten mit elcomax abgestimmt. Dazu haben zahlreiche Workshops zwischen SFC und elcomax stattgefunden und die Ergebnisse und Zielsetzungen wurden in Lastenheften und Spezifikationen festgehalten.

Diese Arbeitsweise hat im Rahmen des Projektes zur kontinuierlichen Optimierung und Leistungssteigerung auf MEA Seite geführt. 2010 wurden bereits erste elcomax MEAs mit Stromdichten von 160 bis 240 mA/cm² getestet.

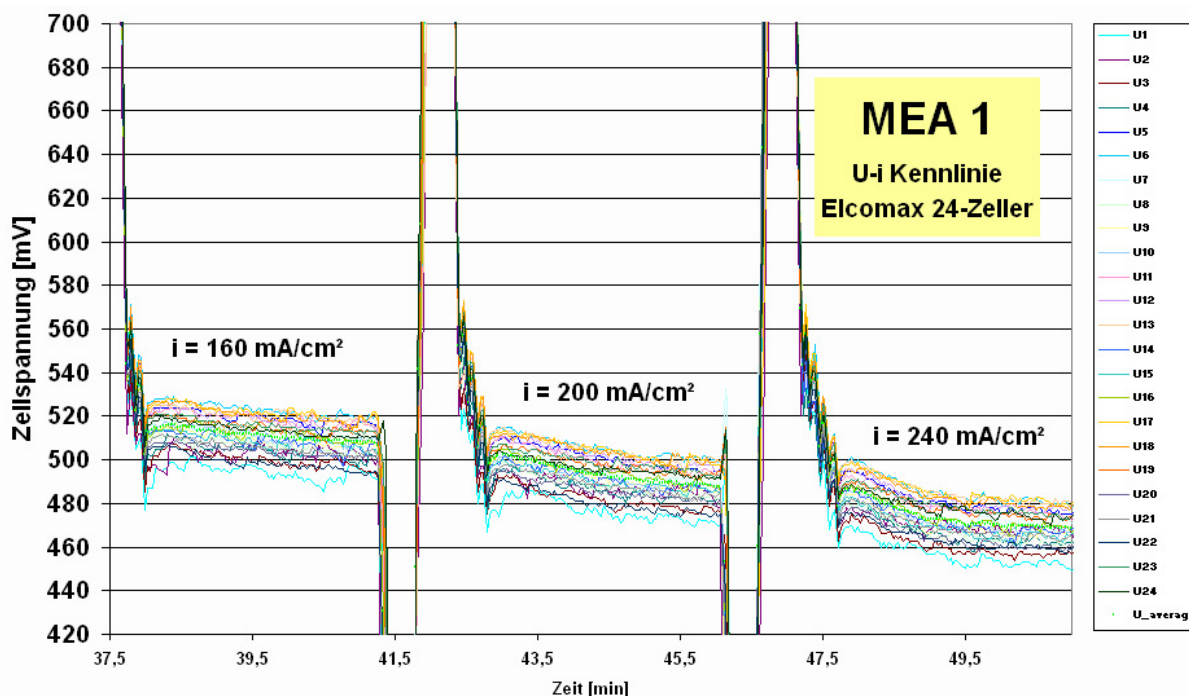


Abbildung 1: Strom-Spannungs-Kennlinie 24 zelliger Stack mit elcomax MEAs am SFC-Prüfstand.

Es zeigt sich eine sehr geringe Streuung der Einzelzellspannungen selbst bei hohen Stromdichten von 240 mA/cm² zwischen 460 mV und 480 mV. Das mittlere Spannungsniveau liegt mit ca. 470 mV pro Zelle sehr hoch bei einer Stromdichte von 240 mA/cm².

Um die prinzipielle Leistungsfähigkeit von MEAs zu beurteilen, können spezifische Kennlinien am Prüfstand aufgenommen werden. Ein sehr aussagekräftiger Versuch ist die Aufnahme der Zellspannungen bei unterschiedlichen Stromdichten, die sogenannte Strom-Spannungs-Kennlinie. Mit den von SFC entwickelten Prüfständen kann die Spannung von jeder einzelnen Zelle im Stack gemessen und aufgezeichnet werden. Dies ermöglicht eine genaue Beurteilung aller im Stack verbauten MEAs. Dies liefert zum einen Erkenntnisse über die allgemeine Streuung einer MEA Charge, zum anderen lässt sich dadurch die Charakteristik unterschiedlicher MEA-Typen, die in einem Stack verbaut sind, beurteilen. So können beispielsweise sehr effizient mit einem Stacktest die Unterschiede verschiedener Fertigungslose festgestellt werden.

Im Prüfstand können die für den Stackbetrieb relevanten Betriebsparameter eingestellt und geregelt werden. Für eine korrekte Interpretation der Ergebnisse ist es unerlässlich Betriebsparameter wie Volumenströme der Betriebsmedien, Stacktemperatur, Methanolkonzentration, Gegendrücke und die Umgebungsbedingungen zu kennen und aufzuzeichnen.

Ende 2010 wurde mit den bis dahin gesammelten Erkenntnissen das Lastenheft 2. Generation für DMFC verabschiedet und somit Meilenstein M1 erreicht.

Für die Langzeittests werden die Stacks in SFC Brennstoffzellensysteme verbaut. Das System wird über ein Ladekabel mit einer Batterie verbunden, um diese zu laden. Die Batterie ist an eine elektronische Last angeschlossen, die ständig Energie aus der Batterie zieht, um diese unter einer gewissen Spannung zu halten. Der Prüfaufbau simuliert so eine nicht vollgeladene Batterie, die dem System das Signal gibt mit voller Leistung Energie zur Verfügung zu stellen.

In 2011 waren die elcomax MEAs bereits so stabil, dass eine Lebensdauer von 6500 Stunden in realen SFC Standard-Systemen bei einer Stromdichte von 230 mA/cm^2 nachgewiesen werden konnte. Somit wurde Ende 2011 der Meilenstein M2 erreicht.

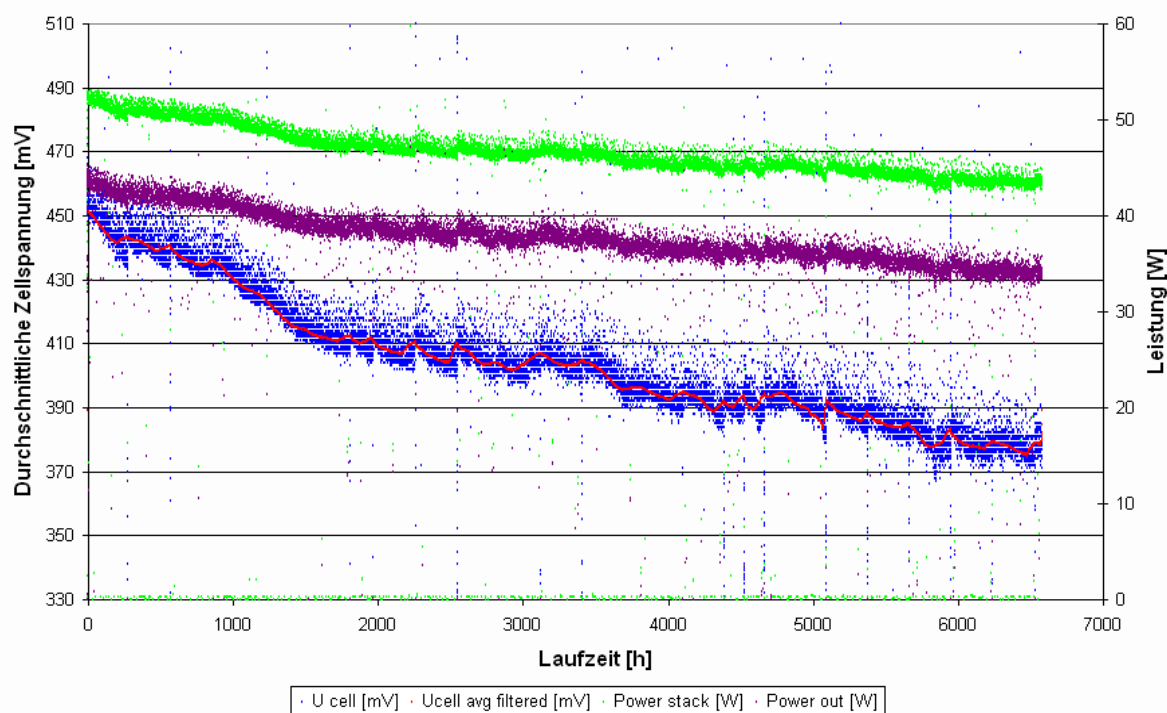


Abbildung 2: Lebensdauertest eines 10 zelligen Stacks mit elcomax MEAs im Brennstoffzellen System.

In Abbildung 2 wurden durchschnittliche Zellspannung (blaue Kurve), Ausgangsleistung (lila Kurve), Stackleistung (grüne Kurve) bei einer konstanten Stackstromdichte von 230 mA/cm^2 über einen Zeitraum von ca. 6.500 Stackbetriebsstunden aufgetragen. Es zeigen sich sehr hohe mittlere Zellspannungen von ca. 450 mV zu Beginn des Tests. Und ein sehr hohes Zellspannungsniveau von ca. 380 mV/Zelle nach 6.500 Stackbetriebsstunden. Sowie ein sehr stabiles Langzeitverhalten bei einer sehr niedrigen Degradationsrate von ca. $11 \mu\text{V/h}$ pro Zelle.

Die praxisnahe Durchführung der Langzeittests im System hat gegenüber einem Test am Prüfstand den Vorteil, dass so neben der eigentlich zu testenden Stabilität der neuen Komponente (hier die elcomax MEA) auch gleich das Zusammenspiel mit den anderen Systemkomponenten überprüft werden kann. Die Verwendung von neuen MEAs kann konkret dazu führen, dass sich der Strömungswiderstand des Stacks verändert. Durch die Drucksensibilität der im System verbauten Pumpen kann dies zu Veränderungen der Volumenströme der Betriebsmedien führen, was sich wiederum auf die Langzeitstabilität der MEA auswirken kann. Die zuvor durchgeführten Messungen am Prüfstand liefern erste Hinweise auf mögliche Einflussfaktoren bezüglich des Systembetriebs. Es ist allerdings unerlässlich beim Start des Langzeittests die Betriebsparameter im System zu überprüfen und bei Bedarf entsprechend anzupassen.

In 2012 konnten elcomax MEAs bereits bei einer Stromdichte von 300 mA/cm^2 erfolgreich in Stacks eingesetzt und in Systemen getestet werden, wobei die durchgeführten Optimierungen an der MEA und den Betriebsparametern des Systems weiteres Verbesserungspotenzial zur Steigerung der Langzeitstabilität aufzeigten.

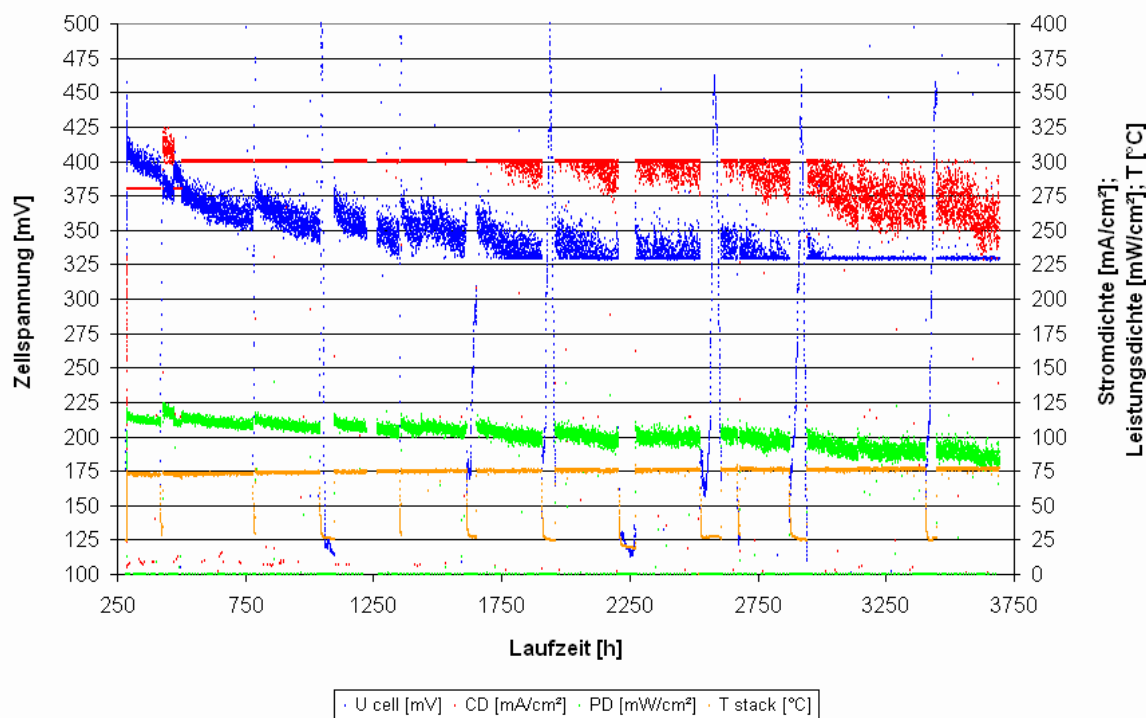


Abbildung 3: Lebensdauertest mit elcomax MEAs

In Abbildung 3 ist der Lebensdauertest mit elcomax MEAs bei erhöhter Stromdichte von 300 mA/cm^2 dargestellt. Die durchschnittliche Zellspannung (blaue Kurve), die Stackstromdichte (rote Kurve), die Stackleistungsdichte (grüne Kurve) und die Stacktemperatur (orange Kurve) sind über der Systemlaufzeit aufgetragen. Es zeigt sich eine relativ niedrige mittlere Zellspannung von ca. 400 mV zu Beginn des Tests. Nach ca. 2.000 Stunden ist die minimal zugelassene mittlere Zellspannung von 330 mV erreicht und die Stromdichte reduziert sich automatisch. Der Test endet nach ca. 3.500 Stunden bei einer Stromdichte von ca. 250 mA/cm^2 . Das Spannungsniveau und die Langzeitstabilität haben noch Verbesserungspotential. Die mittlere Leistungsdichte von ca. 100 mW/cm^2 über die Testdauer von 3.500 Stunden ist bereits eine deutliche Steigerung verglichen mit dem Standardbetrieb bei Stromdichten von 230 mA/cm^2 .

Parallel zu den Versuchen mit elcomax MEAs wurde aus Gründen des Benchmarkings Systeme mit MEAs von alternativen Herstellern aufgebaut und getestet. So konnten die Leistungsdaten der elcomax MEA und die Zielkosten mit anderen Herstellern und der Weiterentwicklung der am Markt erhältlichen MEAs verglichen werden.

Aufgrund der guten Ergebnisse im Vorhabensverlauf und des erkannten möglichen Optimierungspotentials wurde eine Aufstockung der Mittel beantragt und bewilligt. Damit war es möglich den Dauerbetrieb von MEAs in Systemen bei einer Stromdichte von 380 mA/cm^2 in mehreren Testreihen zu testen und deren Tauglichkeit nachweisen zu können.

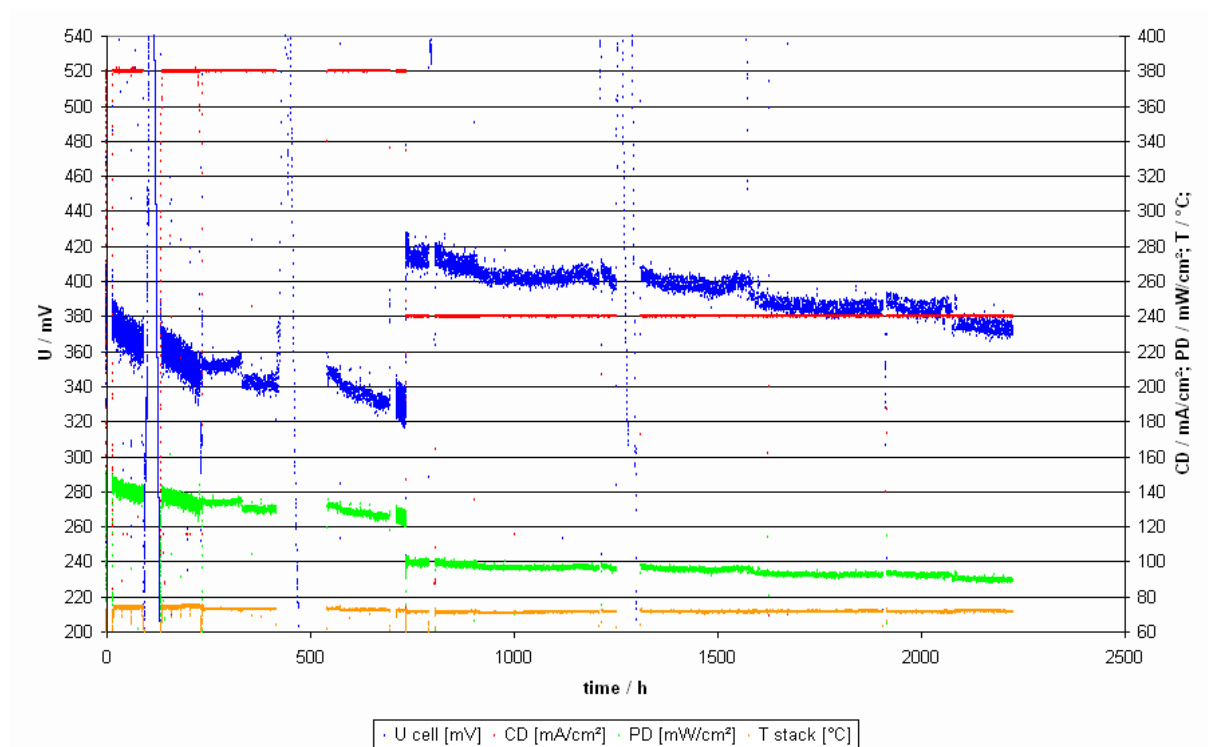


Abbildung 4: Lebensdauer test mit 10-zelligem Stack bei erhöhter Stromdichte von 380 mA/cm²

Abbildung 4 zeigt die Lebensdauerdaten von speziell für höhere Leistungsdichten entwickelte MEAs eines alternativen Herstellers. Durchschnittliche Zellspannung (blaue Kurve), Stackstromdichte (rote Kurve), Stackleistungsdichte (grüne Kurve) und Stacktemperatur (orange Kurve) sind über der Systemlaufzeit aufgetragen. Die hohe Stromdichte bei einer mittleren Zellspannung von ca. 380 mV zu Beginn des Tests führt zu einer Erhöhung der Leistungsdichte auf etwa 150 mW/cm². Die relativ hohe Degradationsrate von ca. 80 μ V/h pro Zelle führt über ca. 750 Stunden zu einer mittleren Zellspannung von ca. 320 mV. Die Stromdichte wird auf 240 mA/cm² reduziert. Hier ist ein stabiler Betrieb über ca. 1.500 Stunden bei einer gewohnt niedrigen Degradationsrate von ca. 20 μ V/h pro Zelle möglich.

Eine speziell für hohe Leistungsdichten angepasste MEA wurde von einem alternativen MEA-Hersteller entwickelt und bei SFC getestet. Ein 10-zelliger Stack wurde aufgebaut, am SFC-Prüfstand untersucht und eine charakteristische Strom-Spannungskennlinie aufgenommen. Beim Vergleich der Strom-Spannungskennlinie dieser „high power“ MEA mit einer Standard MEA wurde deutlich, dass diese bei den getesteten Stromdichten in etwa auf dem gleichen Spannungsniveau liegen. Wider Erwarten ließen sich also im Prüfstand mit dieser MEA keine signifikant höheren Leistungsdichten realisieren, als mit einer Standard-MEA.

Um eventuelle Vorteile dieser MEA bezüglich der Langzeitstabilität bei erhöhten Stromdichten zu untersuchen, wurde ein Langzeittest im Brennstoffzellensystem gestartet. Hierzu mussten zunächst einige elektronische Bauteile auf der Steuerplatine angepasst

bzw. ausgetauscht werden, um einen sicheren Betrieb bei Stromdichten bis 380 mA/cm^2 (entspricht einem Strom von 19 A) zu ermöglichen. Des Weiteren wurde ein 10-zelliger Stack mit den „high-power“-MEAs aufgebaut, der zusätzlich mit einer modifizierten Bipolarplatte ausgestattet wurde. Die wesentliche Änderung bei der Bipolarplatte betrifft die Kanalgeometrie auf der Kathode (siehe AP S2). Hier wurden die Kanäle deutlich tiefer gestaltet, um bei dem erhöhten Luftvolumenstrom niedrige Druckverluste zu realisieren, wodurch die Luftpumpe bei deutlich reduzierter elektrischer Leistung den geforderten Luftvolumenstrom bereitstellen kann. Dadurch wurden die Peripherieverluste deutlich reduziert und der gesamte Wirkungsgrad des Systems verbessert. Nachdem der neue Stack zunächst am Prüfstand charakterisiert wurde, mussten die Auswirkungen der Neuerungen im Gesamtsystem überprüft werden. Durch die veränderten Strömungsverhältnisse auf der Kathode und den geplanten Systembetrieb bei hoher Stromdichte mussten notwendige Anpassungen bei der Ansteuerung der Peripheriekomponenten durchgeführt werden, um die gewünschten Stack-Betriebsparameter wie Luftstöchiometrie, Methanolstöchiometrie und Methanolkonzentration im System zu realisieren.

Der Dauertest lief über ca. 750 Stunden bei einer Stromdichte von 380 mA/cm^2 . Die durchschnittliche Leistungsdichte von etwa 130 mW/cm^2 lag in dieser Zeit etwa 30% höher als bei einem standardmäßig betriebenen Brennstoffzellen-System. Der Betrieb geht einher mit einer relativ hohen Degradation von $80 \text{ } \mu\text{V/h}$ pro Zelle, so dass daraufhin die Stromdichte auf 240 mA/cm^2 reduziert wurde. Hier lief das System über weitere ca. 1.500 Stunden stabil bei einer gewohnt niedrigen Degradationsrate von ca. $20 \text{ } \mu\text{V/h}$ pro Zelle. Zusammengefasst wurde festgestellt, dass die Anpassungen, die bei der „high-power“-MEA vorgenommen wurden, kaum zu Verbesserungen geführt haben und eine weitere Entwicklungsschleife bei dem MEA-Lieferanten, sowie weitere Tests zur Optimierung der Betriebsparameter bei SFC notwendig sind.

Leistungsoptimierte Membran

Einige MEA Hersteller setzen auf eine Kohlenwasserstoff-basierte Membran, die sich durch Vergleich zu herkömmlichen Membranen sehr geringe Innenwiderstände auszeichnet und reduzierten Methanol cross-over, was sie besonders für den Einsatz bei hohen Stromdichten sehr interessant macht. Es konnte eine sehr gute Langzeitstabilität bei einer Stromdichte von 380 mA/cm^2 nachgewiesen werden. Die Leistungsdichte lag zu Beginn bei ca. 140 mW/cm^2 und reduzierte sich nach 3.000 Stunden auf etwa 120 mW/cm^2 . Die hier über 3.000 Stunden gezeigte mittlere Leistungsdichte von ca. 130 mW/cm^2 entspricht einer Steigerung von über 40% im Vergleich zu standardmäßig bei einer Stromdichte von 230 mA/cm^2 betriebenen Systemen, die über 3.000 Stunden eine mittlere Leistungsdichte von ca. 90 mW/cm^2 abgeben.

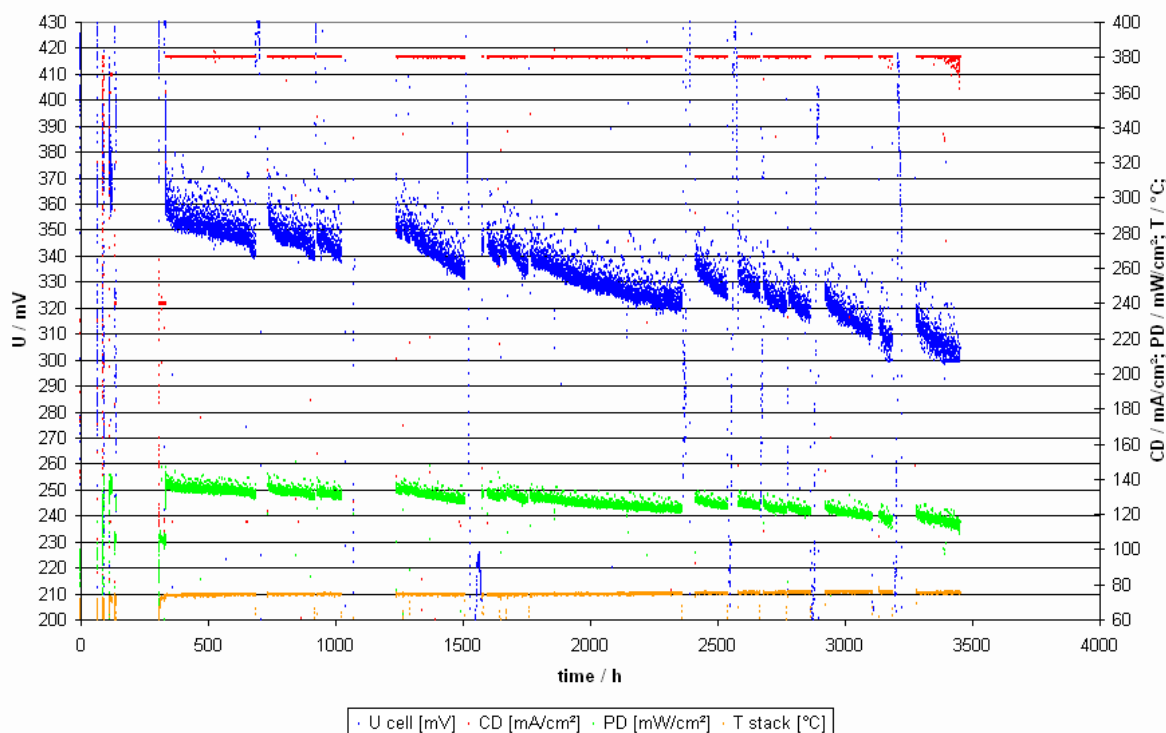


Abbildung 5: Lebensdauererprobung mit 10-zelligem Stack bei erhöhter Stromdichte von 380 mA/cm².

In Abbildung 5 dargestellt sind die Lebensdauerdaten von MEAs auf Kohlenwasserstoff basierter Membran eines alternativen Herstellers. Durchschnittliche Zellspannung (blaue Kurve), Stackstromdichte (rote Kurve), Stackleistungsdichte (grüne Kurve) und Stacktemperatur (orange Kurve) sind über der Systemlaufzeit aufgetragen. Die hohe Stromdichte bei einer mittleren Zellspannung von ca. 360 mV zu Beginn des Tests führt zu einer Leistungsdichte von etwa 140 mW/cm². Sehr stabiler Betrieb über ca. 3.000 Stunden bei einer niedrigen Degradationsrate von ca. 20 μ V/h pro Zelle.

Bei der aktiven Fläche der SFC Stacks und einer Zellenzahl bis 30, ergibt sich bei einer Leistungsdichte von 140 mW/cm² eine Stackleistung von ca. 200 W zu Beginn der Stack-Lebensdauer. So konnte das ursprünglich gesetzte Ziel des Arbeitspaketes von 110 W Systemleistung auf über 150 W bei gleicher Stackfläche um ca. 35% übertroffen werden.

Die gesteigerte Leistungsdichte resultiert direkt in einer höheren Leistungsabgabe der Stacks, bei gleich bleibender Zellenzahl und ohne Vergrößerung des Stackvolumens. Dies ermöglicht in Zukunft den Aufbau leistungsstarker Brennstoffzellensysteme, ohne das Gerätedesign verändern zu müssen, da der Raum für den Stack unverändert bleibt. Dadurch können beim Systemaufbau für unterschiedliche Leistungsklassen Gleichteile verwendet werden, was wiederum die Stückzahlen in der Lieferkette erhöht und somit die Kosten, trotz der neu geschaffenen Leistungsklasse, stabil hält. Dies resultiert automatisch in einer spezifischen Kostenreduktion, bezogen sowohl auf die Leistung aber auch die vom Stack produzierte Gesamtenergie. Für Systeme mit höheren

Stackleistungen ist allerdings eine Anpassung der Medienversorgung durch leistungsfähigere Peripheriekomponenten notwendig (siehe AP S3).

Die so gesammelten Erfahrungen dieser „high-power“ MEAs wurden intensiv weiter verfolgt und in mehreren Prototypen im Bezug auf Leistung, Energieausbeute und Langzeitstabilität untersucht. Dabei wurden Testläufe mit unterschiedlichen Stromdichten bis 600 mA/cm² gefahren.

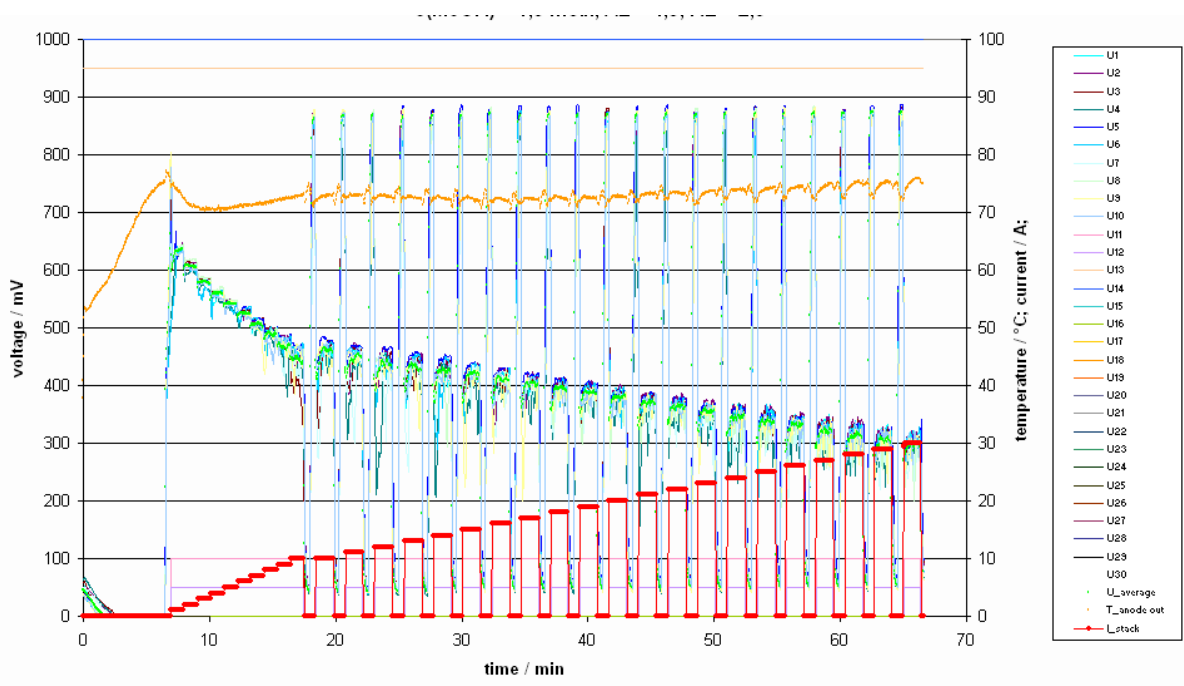


Abbildung 6: Strom-Spannungs-Kennlinie eines 10zelligen Stacks am SFC Prüfstand. Alle Zellspannungen (bunte Kurvenschar), Stackstrom (rote Kurve) und Stacktemperatur (orange Kurve) sind über der Zeit aufgetragen. Ströme von 10 A (= 200 mA/cm² beim SFCStack) bis 30 A

Die so gesammelten Erfahrungen sind in eine Spezifikation einer „high-power“ MEA eingeflossen, Die Entwicklung einer solchen MEA soll zukünftig weitere Optimierungen auf MEA Seite ermöglichen

AP S2: Stack-Hardware-Entwicklung

In diesem Arbeitspaket wurden zahlreiche Komponenten hinsichtlich Designvereinfachung und Kostenoptimierung untersucht und gleichzeitig die Leistungsfähigkeit, speziell für leistungsstärkere MEAs, zu verbessern.

In 2011 wurde die Einsparmöglichkeit durch optimierten Materialeinsatz und angepasste Fertigungsverfahren beim monopolaren Stackdesign untersucht. Hier hat man sich unter anderem den Stromableitern gewidmet und durch eine alternative Beschichtungen deutlich die Kosten senken können. Die Verwendung günstiger Beschichtungsmaterialien, die Reduzierung der Beschichtungsdicke und ein innovatives Beschichtungsverfahren zur Realisierung kurzer Taktzeiten, haben zu keinen wesentlichen Nachteilen im Einsatz geführt. Um die elektrischen Eigenschaften wie Kontaktwiderstand und Leitfähigkeit der neuen Beschichtung auf den Stromableitern zu testen, wurden Stacks aufgebaut und Strom-Spannungs-Kennlinien aufgenommen. Als Referenzkurven dienten Stromableiter die mit Gold beschichtet waren. Durch den Vergleich der Zellspannungen bei den jeweils getesteten Strömen konnten Rückschlüsse auf die elektrischen Eigenschaften gezogen werden. Wie zu erwarten war, zeigten die Zellen mit der innovativen, kostengünstigen Beschichtung auf den Stromableitern ein etwas niedrigeres Spannungsniveau als die mit Gold beschichteten Stromableiter. Dies liegt zum einen an der sehr hohen Leitfähigkeit und dem sehr niedrigen Kontaktwiderstand von Gold. Zum anderen wurde die galvanisch aufgebraachte Goldschicht deutlich dicker ausgeführt, als die durch ein spezielles PVD-Verfahren (Physical Vapor Deposition) aufgebraachte alternative Beschichtung. Dies allein führt schon zu einem niedrigerem ohmschen Widerstand des mit Gold beschichteten Stromableiters und somit zu geringeren Zellspannungsverlusten. Die Spannungsverluste durch die elektrischen Eigenschaften bzw. geringe Dicke der alternativen Beschichtung hielten sich allerdings in Grenzen und konnten teilweise durch die Verwendung eines dickeren Kernmaterials ausgeglichen werden.

Die Tauglichkeit dieser Beschichtung konnte auch in Langzeittests im Brennstoffzellensystem nachgewiesen werden, so dass insgesamt die bisherigen Tests sehr vielversprechende Ergebnisse geliefert haben und eine technisch einwandfreie und sehr kostengünstige Alternative versprechen.



Abbildung 7: Monopolarer Stromableiter nach Korrosionstest, Darstellung in unterschiedlicher Detaillierung

Als weiteren Ansatz zur Kostenreduzierung wurden am Markt verfügbare Bipolarplatten für Wasserstoff-Stacks im DMFC Einsatz erprobt. Diese potentiellen Skaleneffekte reduzieren perspektivisch Einkaufspreise und führen zu einer besseren Auslastung in der Zulieferindustrie. Parallel zu Standardkomponenten wurden Verfahren untersucht, die eine einfachere und schnellere Stackmontage ermöglichen und z.B. den Wegfall von Dichtrahmen durch aufgebrachte Dichtungen oder vergossene Stacks untersucht.

In 2012 hat man das Design der Bipolarplatten für den Einsatz mit leistungsfähigeren MEAs optimiert. Mit höherer Stromdichte muss der Volumenstrom der Medien linear zunehmen, um die Stöchiometrien konstant zu halten und so eine ausreichende Versorgung der Reaktionszentren der MEA sicher zu stellen. Das Strömungsfeld (Flowfield) der Bipolarplatte war bisher für eine Stromdichte von 230 mA/cm^2 optimiert. Bei der im Flowfield sich einstellenden laminaren Strömung führt eine Erhöhung des Volumenstroms zu einem linearen Anstieg des Druckverlustes. Die Pumpen im System werden also in zweifacher Hinsicht höher belastet. Zum einen müssen sie einen höheren Volumenstrom bereit stellen, zum anderen müssen sie zusätzlich gegen einen höheren Strömungswiderstand pumpen. Dies führt zu einer höheren Leistungsaufnahme der Pumpen. Besonders auf der Kathode ist dies durch die geringe Drucksteifigkeit der Luftpumpe und die Kompressibilität der Luft signifikant. Daher wurde auf der Luftseite der Standard-Bipolarplatte die Kanaltiefe erhöht.

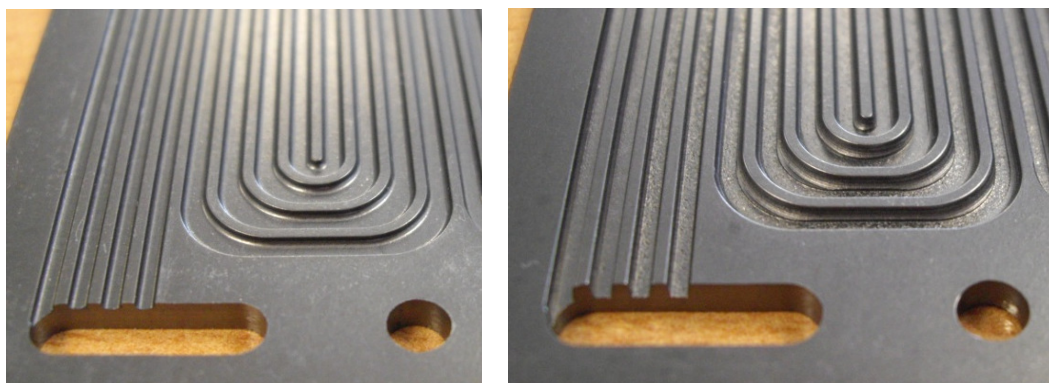


Abbildung 8: Bipolarplatte mit ursprünglicher und 50% tieferen Kanälen

In der Grundformel der Berechnung des Druckverlustes bei laminarer Strömung fließt die Kanaltiefe quadratisch ein, so dass sich hier geringe Veränderungen bereits deutlich auswirken. Allerdings sind die Bedingungen auf der Kathodenseite einer Direkt-Methanol-Brennstoffzelle sehr komplex, so dass sich die Druckverluste nicht mit den allgemeinen Formeln der Strömungsmechanik ausreichend genau berechnen lassen. Dies liegt zum einen daran, dass bei der Reaktion auf der Kathode Wasser produziert wird und somit eine Zwei-Phasen-Strömung vorherrscht. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die Luft in einem relativ kalten und trockenem Zustand aus der Umgebung in den Stack gefördert wird und sich auf dem Weg durch das Flowfield immer weiter erwärmt (und somit ausdehnt), sowie zu 100% befeuchtet wird. Eine genaue Vorhersage des Druckverlustes ist sehr wichtig, da ein zu geringer Druckverlust zur Folge hat, dass der Wasseraustrag auf der Kathode nicht ausreichend ist, was zum Verschließen einzelner Kanäle und so zu einem sehr instabilen Betrieb der Zellen führt. Daher wurde in der Vergangenheit von SFC auf Basis von Versuchen und Testreihen ein Modell entwickelt, mit dem die Auswirkungen von Geometrieänderungen auf die Druckverluste ausreichend genau ermittelt werden können. Dies wurde auch bei dieser Anpassung erfolgreich angewendet.

Zusätzlich wurde der Ein- und Auslassbereich sowohl auf der Kathode als auch auf der Anode deutlich vertieft, um eine weitere Optimierung der Fluidströmungen zu erzielen.

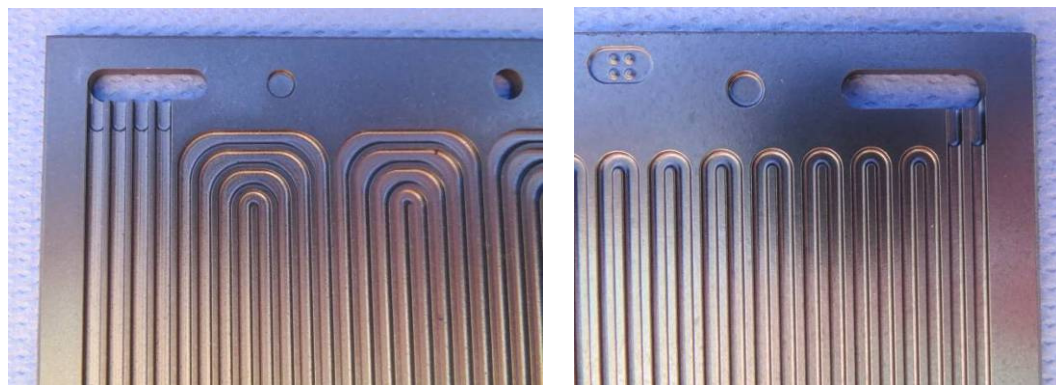


Abbildung 9: Bipolarplatte mit zusätzlicher Vertiefung im Ein- und Auslassbereich

Durch die Aufstockung des Vorhabens konnten in 2013 weiter an der Optimierung der Bipolarplatten gearbeitet werden. Dabei wurde das Herstellungsverfahren der Platte nochmals angepasst, wodurch die Kanaltiefe (siehe Abbildung 9) auf der Kathode weiter vergrößert werden konnte, ohne die Stabilität bzw. die Dichtigkeit der Platte zu beeinträchtigen. Diese Maßnahmen ermöglichen zum einen den höheren Medienfluss und reduzieren die Druckverluste.

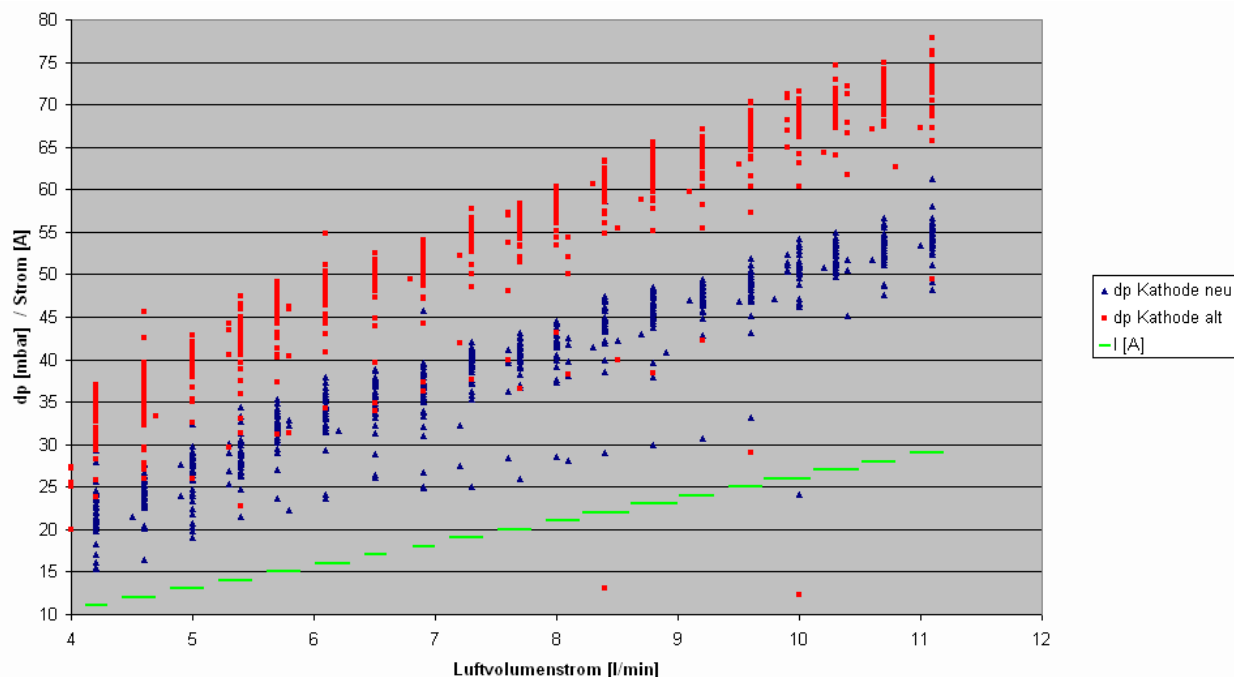


Abbildung 10: Vergleich der Kathodendruckverluste bei altem und neuem Flowfelddesign

Abbildung 10 zeigt den Druckverlustverlauf auf der Kathode (Luftseite) in Abhängigkeit des Luftvolumenstroms, der mit ansteigendem Stackstrom (grüne Linien) erhöht wurde. Die untere Kurvenschaar (blaue Dreiecke) zeigt die Messwerte der neuen Bipolarplatte und macht den geringeren Strömungswiderstand im Vergleich zur alten Flowfieldgeometrie (rote Quadrate) deutlich.

Weitere Aktivitäten wurden bezüglich einer kostengünstigen und technisch optimierten Verspannung durchgeführt. Gerade bei hohen Stromdichten ist eine möglichst gleichmäßige Anpressung über die aktive Fläche zu gewährleisten, um lokale Überbeanspruchungen der MEA zu vermeiden (lokale Stromdichtespitzen). Zu diesem Zweck wurde eine Montage-Lösung auf Basis von Alu-Stangpressprofilen untersucht, die sowohl eine optimale Anpressung realisieren kann und gleichzeitig eine sehr kostengünstige Lösung darstellt.

AP S3: Low-cost-Systemperipherie

Um die in AP S1 und S2 erreichten Kostensenkungspotentiale auf Stackseite nicht durch Kostensteigerung, verursacht durch leistungsfähigere Peripheriekomponenten, zu schmälern, wurden auf Komponentenseite zahlreiche Vereinfachungen entwickelt und neue Materialien und Komponenten eingesetzt und erprobt.

Luftversorgung

Die Luftversorgung, bestehend aus mehreren Filtern und der Luftpumpe, wurde komplett überarbeitet und eine einfach zu montierende und aus wenigen Teilen bestehende, integrierte Einheit entwickelt und erprobt.

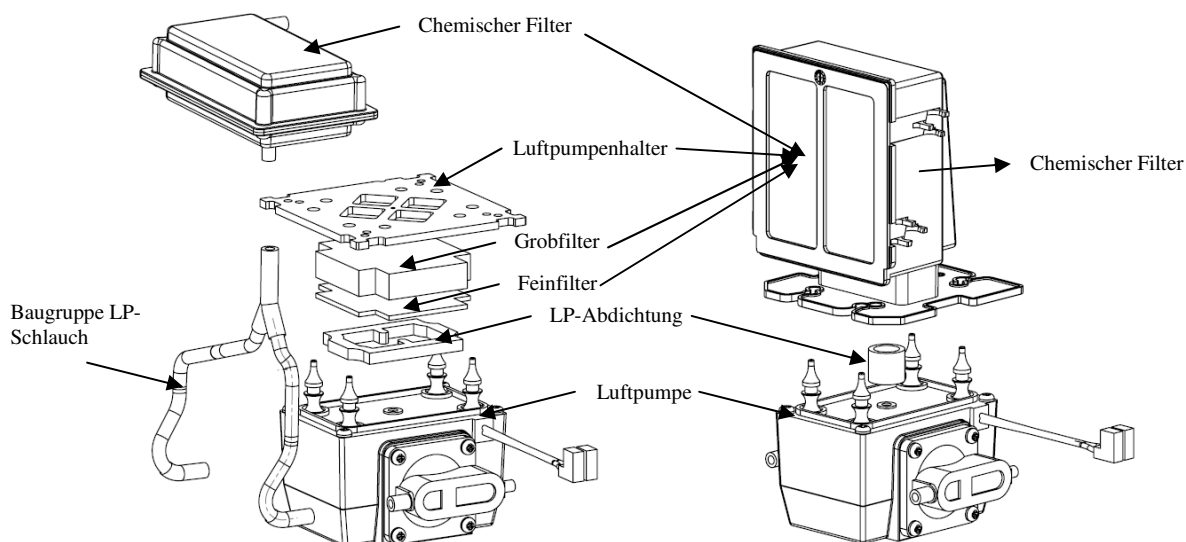


Abbildung 11: Ursprüngliche und überarbeitete Luftpumpenbaugruppe

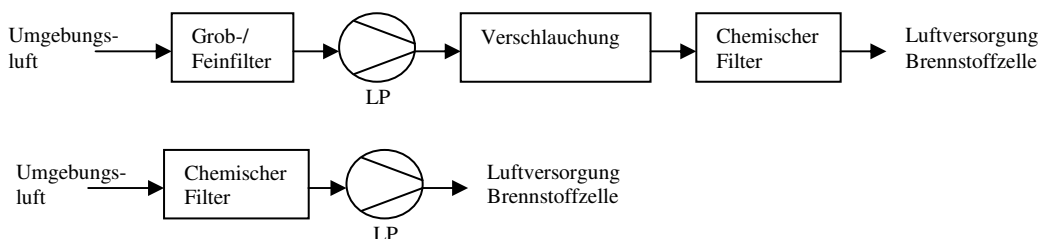


Abbildung 12: Flussdiagramm der ursprünglichen und angepassten Luftversorgungseinheit

Aus Abbildung 11 gehen die konstruktiven Anpassungen hervor. Auf der linken Seite ist der ursprüngliche Aufbau der Luftversorgungseinheit dargestellt. Diese bestand aus einem chemischen Filter, einem Luftpumpenhalter, einem Grob- sowie Feinfilter, einem Abdichtungselement, der Pumpe selbst und einem notwendigem Verschlauchungselement. Rechts ist der angepasste Aufbau dargestellt. Hier geht

hervor, dass durch konstruktive Maßnahmen der Aufbau grundlegend vereinfacht werden konnte. Die einzelnen Elemente „chemischer Filter“, „Luftpumpenhalter“, „Grob- und Feinfilter“ wurde konstruktiv in einem neuen Filterelement zusammengefasst. Dieses Filterelement übernimmt neben der Filtrationsaufgabe auch die Befestigung der Luftpumpe. Abbildung 12 zeigt das Flussdiagramm der Luftversorgungseinheit vor und nach der konstruktiven Anpassung. Es zeigt sich, dass durch die Kombination der einzelnen Filterelemente zu einem Filterelement auf das bis dato notwendige Verschlauchungselement verzichtet werden konnte. Durch die Neuordnung bzw. die Kombination der Komponenten, wurde der Aufbau und somit die Montage grundlegend vereinfacht. Weiter konnte hierdurch das Bauraumvolumen deutlich besser ausgenutzt und die Filterfläche wie auch Filterleistung deutlich gesteigert werden. Diese Steigerung ist durch die Volumenstromerhöhung der Luftversorgung bzw. zur Lebensdauererlängerung des Brennstoffzellensystems notwendig. Die Volumenstromerhöhung resultiert aus der Leistungssteigerung. Je mehr elektrische Leistung mittels einer Brennstoffzelle erzeugt wird, desto höher ist der Luftbedarf.

Da Brennstoffzellenstacks sehr sensibel auf Schwankungen der Versorgung bzw. einer Unterversorgung der Kathode reagieren, musste in Folge des neu entwickelten Filterelements und der angepassten Luftpumpenbefestigung unterschiedliche Modelle verschiedener Hersteller erneut vermessen, analysiert und das Verhalten mit verschiedenen Filtern und bei unterschiedlichen Drücken überprüft werden.

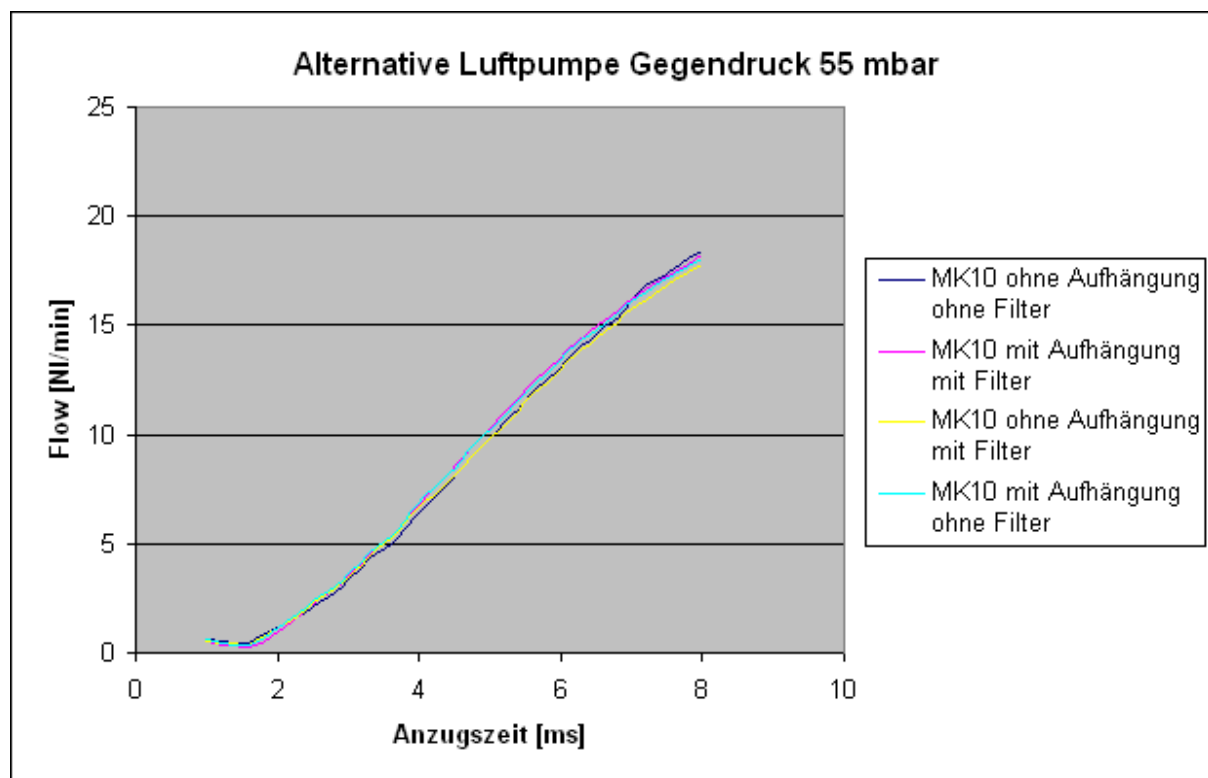


Abbildung 13: Messergebnis einer alternativen Luftpumpe ohne und mit neuem Filterelement

Abbildung 13 zeigt das Ergebnisse der erneuten Vermessung von Luftpumpen in verschiedenen Kombinationen. Das neue Filterelement mit integrierter Befestigung der Luftpumpe beeinflusst den Volumenstrom in Abhängigkeit der Anzugszeit leicht. Aus den ermittelten Daten wurde ein spezifisches Luftpumpenkennfeld erzeugt. Dieses Kennfeld musste vor der Verwendung des neuen Filterelements in der Firmware der Brennstoffzelle implementiert werden.

Die prinzipielle Tauglichkeit und die Langzeitstabilität der neuen Filtereinheit wurden über 6.000 Stunden im Brennstoffzellen-System getestet.

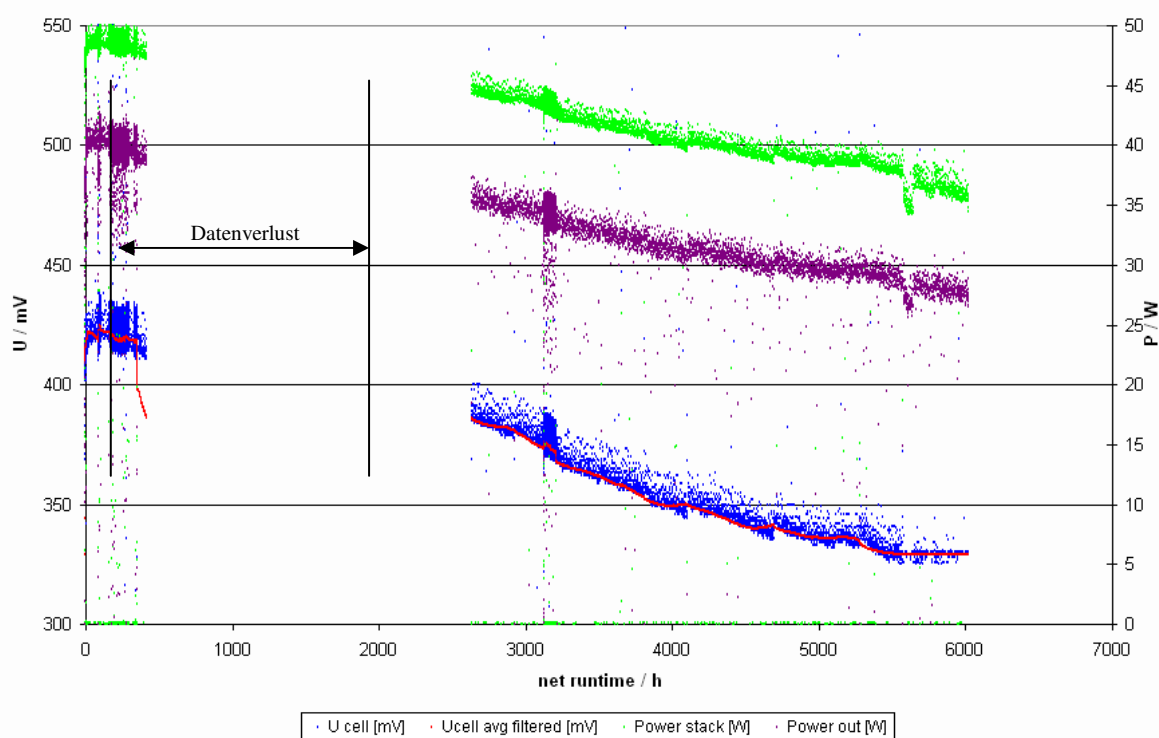


Abbildung 14: Langzeittest über 6.000 Stunden mit neuer Luftfiltereinheit

In Abbildung 14 ist das Ergebnis des Langzeittests mit neuem Luftfilterelement dargestellt. Die aufgezeichneten Daten weisen bedingt durch einen systemtechnischen Datenverlust eine Lücke zwischen 350 Stunden und 2.650 Stunden auf. Trotz des Datenverlusts kann das Ergebnis bewertet werden, da eine mangelhafte Filtrationsleistung zu einer irreversiblen Schädigung des Systems geführt hätte und in Folge dessen ein Betrieb über weitere ~3.000 Stunden nicht möglich gewesen wäre. Im Diagramm ist die Einzelzellspannung in blau dargestellt. Diese liegt bei Versuchsbeginn mit 425 mV im Soll. Nach etwa 5.500 Betriebsstunden fällt die Zellspannung auf 330 mV. Aus der Zeitdauer des Abfalls von 425 mV auf 330 mV geht keine negative Beeinträchtigung des Brennstoffzellensystems bzw. Erhöhung der Degradationsrate des Brennstoffzellenstacks durch das neue Luftfilterelement hervor.

Zusätzlich wurde die Filterwirkung über 300 Stunden in einem Feldtest an einer stark befahrenen Straße geprüft.

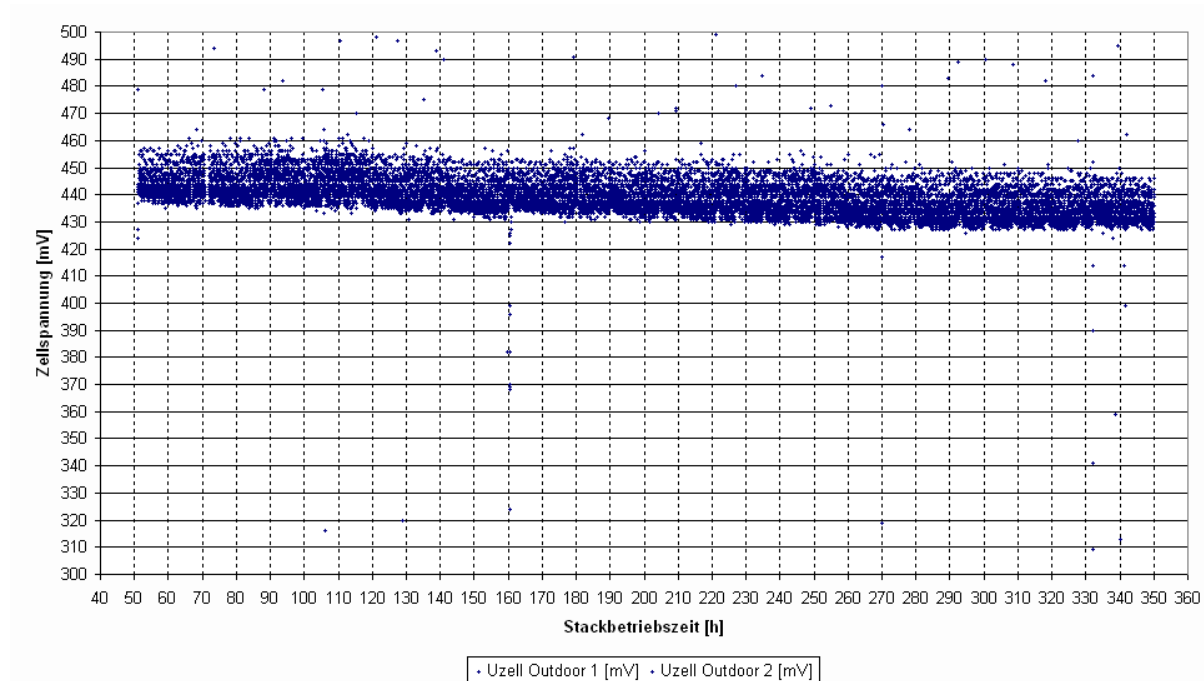


Abbildung 15: Test der neuen Luftfiltereinheit über 300 Stunden an einer befahrenen Straßenkreuzung

Die Abbildung 15 zeigt den Verlauf eines 300 Stunden Tests eines Systems mit neuer Luftfiltereinheit. Es ist deutlich zu sehen, dass die Brennstoffzelle sehr stabil bei niedriger Degradation lief. Die Abnahme der Zellspannung über die Zeit lag hierbei bei 7 mV in 300 h. Dies entspricht einer Degradationsrate von 26 $\mu\text{V}/\text{h}$. Somit ist die Tauglichkeit der Filtereinheit selbst bei hoher Abgasbelastung belegt.

Anodenversorgung

Die Anodenversorgung bzw. der Anodenkreislauf einer Direkt-Methanol-Brennstoffzelle ist grundlegend wie folgt aufgebaut:

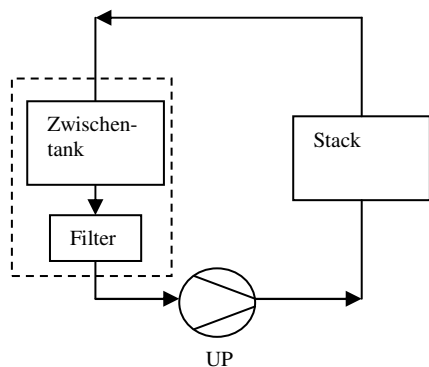


Abbildung 16: Prinzipskizze der Anodenversorgung

Abbildung 16 zeigt die benötigten Komponenten zur Versorgung der Anodenseite des Brennstoffzellenstacks. Zwischentank und Filter ergaben zu Beginn des Projektes eine Einheit (gestrichelt dargestellt). Diese Einheit wurde im Rahmen des Projektes getrennt und steht nun als zwei getrennte Komponenten zur Verfügung. Durch diese Anpassungsentwicklung wurde die Komplexität der Baugruppe deutlich reduziert und somit das Risiko von Qualitätsmängeln signifikant gesenkt. Weiter ist die Durchführung von Wartungen an der Brennstoffzelle durch die Trennung deutlich spezifischer durchzuführen. Durch den Einsatz alternativer Materialien und Reduzierung der Schieberanzahl im Spritzgusswerkzeug konnten die Produktionskosten für beide Komponenten reduziert werden.

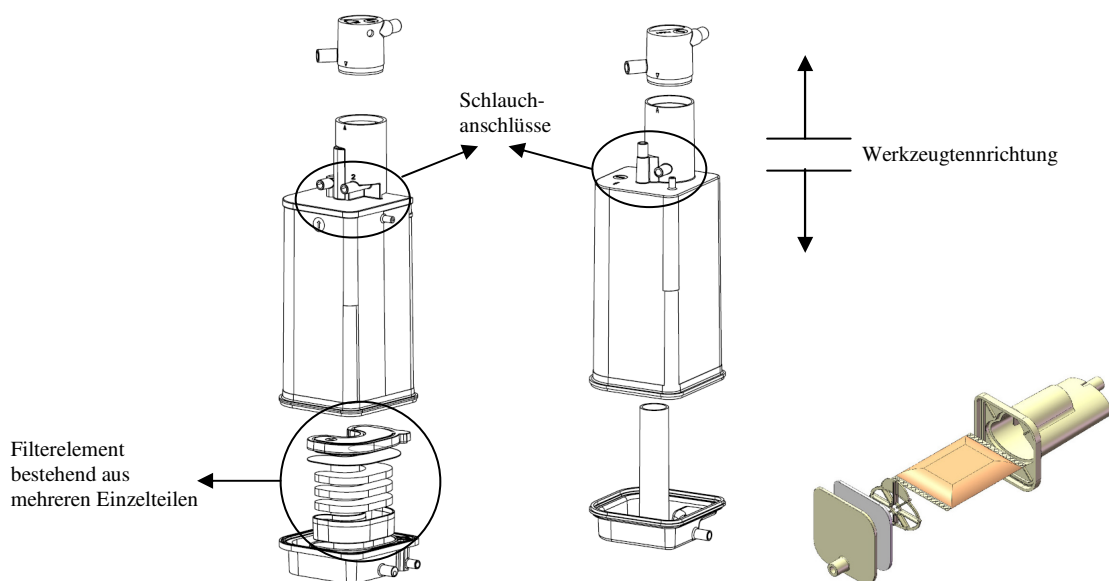


Abbildung 17: Links: Vereinfachter Zwischentank vor und nach Optimierung, Rechts: Neu entwickelte Filtereinheit

In Abbildung 17 ist der Zwischentank vor und nach der Optimierung sowie das neu entwickelte Filtermodul dargestellt. Es ist deutlich zu sehen, dass die Abtrennung des Filterelementes eine klare Reduzierung der Komplexität zur Folge hatte. Die einzelnen Filterelemente mussten aufwendig manuell zusammengefügt werden. Dabei konnten einzelne Elemente verrutschen. Dadurch war die einwandfreie Funktion nicht mehr gewährleistet. Das spiegelte sich ebenfalls in der Qualität der angelieferten Systeme wieder.

Weiter wurde bei der Neukonstruktion des Zwischentanks darauf geachtet, dass die Konstruktion eine einfache Spritzgusswerkzeugausführung ermöglicht. Dies wird beispielhaft an den markierten Schlauchanschlüssen deutlich. In der vorherigen Zwischentankkonstruktion waren zur Ausbildung und Entformung der Schlauchanschlüsse Werkzeugschieber auf zwei Längsseiten des Tanks notwendig. In der Neukonstruktion wurden die Schlauchanschlüsse so platziert, dass Schlauchanschlüsse nur mehr an einer Längsseite vorhanden sind.

Durch diese Änderungen mussten auch am Schaum, der die Komponenten trägt, Änderungen implementiert werden. Da der Schaum neben der mechanischen Fixierung der Bauteile auch eine wärme- und vibrationsdämmende Funktion hat, sind für diese Änderungen in zahlreichen Iterationsschritten Prototypen aufgebaut und unter praxisnahen Bedingungen getestet und vermessen worden.

Mit der im Vorhabensverlauf erarbeiteten, um etwa 50% auf ca. 10.000 Betriebsstunden gesteigerten Lebenserwartung auf Stackseite, werden auch die Peripheriekomponenten im Rahmen eines Brennstoffzellenlebens stärker beansprucht. Um die Peripheriekomponenten dafür zu qualifizieren und weiterzuentwickeln, wurden nahezu alle bewegten Teile wie Pumpen und Lüfter untersucht, ggfls. optimiert und in verlängerten Lebensdauertests getestet.

Um die Versorgung der Stacks bei höher Ausgangsleistung mit einer ausreichenden Menge an Reaktionsmedien sicherzustellen, muss die Fördermenge der Pumpen entsprechend erhöht werden. Hierzu wurden alternative Pumpenlieferanten qualifiziert und neue Pumpen untersucht und deren Kennlinien aufgenommen.

Die Volumenströme [ml/min] von Umlaufpumpen verschiedener Hersteller und Modelle wurden in Abhängigkeit der Pumpenspannung bei verschiedenen Gegendrücken vermessen und die Änderung des Verhaltens der Pumpen über die Zeit aufgezeichnet.

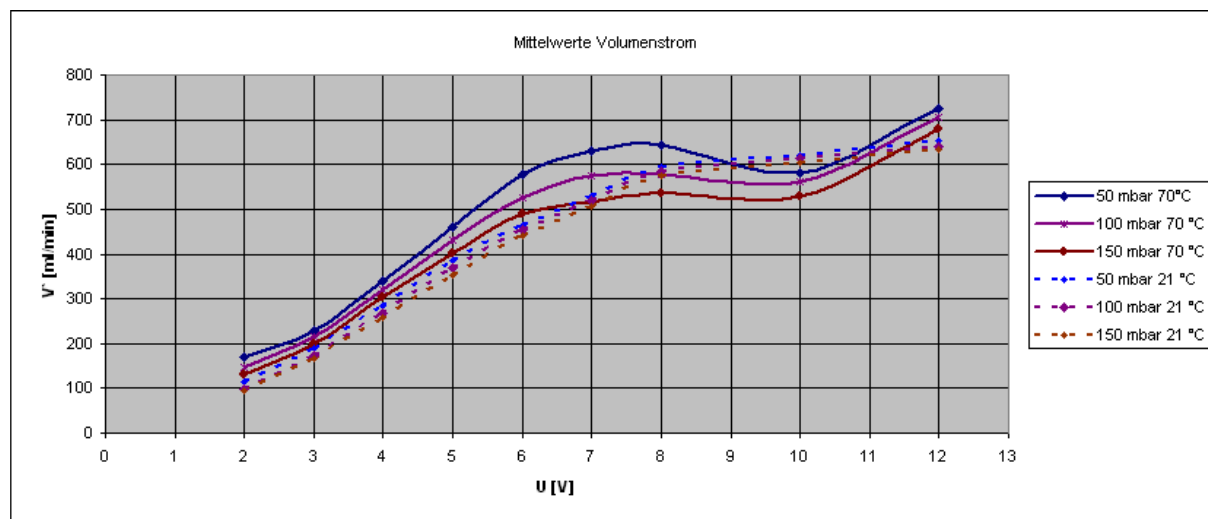


Abbildung 18: Aufgenommene Pumpenkennlinie bei unterschiedlichen Temperaturen und Drücken

In Abbildung 18 ist die ermittelte charakteristische Pumpenkennlinie dargestellt. Zur Ermittlung wurden Pumpen mit unterschiedlichen Spannungen bei wechselnden Gegendrücken und unterschiedlicher Temperatur des Fördermediums betrieben und der sich einstellende Volumenstrom gemessen und aufgezeichnet. Es zeigt sich, dass bei einer Flüssigkeitstemperatur von 21°C der Fördervolumenstrom mit steigender Spannung zunimmt und ab ca. 8,5 V der maximale Volumenstrom erreicht ist und

nahezu konstant bleibt. Vergleicht man dagegen die Kennlinien für Flüssigkeitstemperaturen von 70°C, zeigt sich eine deutlich größere Abweichung der einzelnen Pumpen zueinander. Der maximale Volumenstrom wird hier erst bei maximaler Spannung erreicht. Im Bereich um 10 V weisen alle getesteten Pumpen einen starken Abfall des Volumenstroms auf. Eine mögliche Ursache hierfür kann im Zusammenspiel von Ein- und Auslassventil liegen. Weiterführende Untersuchungen wurden hier nicht angestrebt.

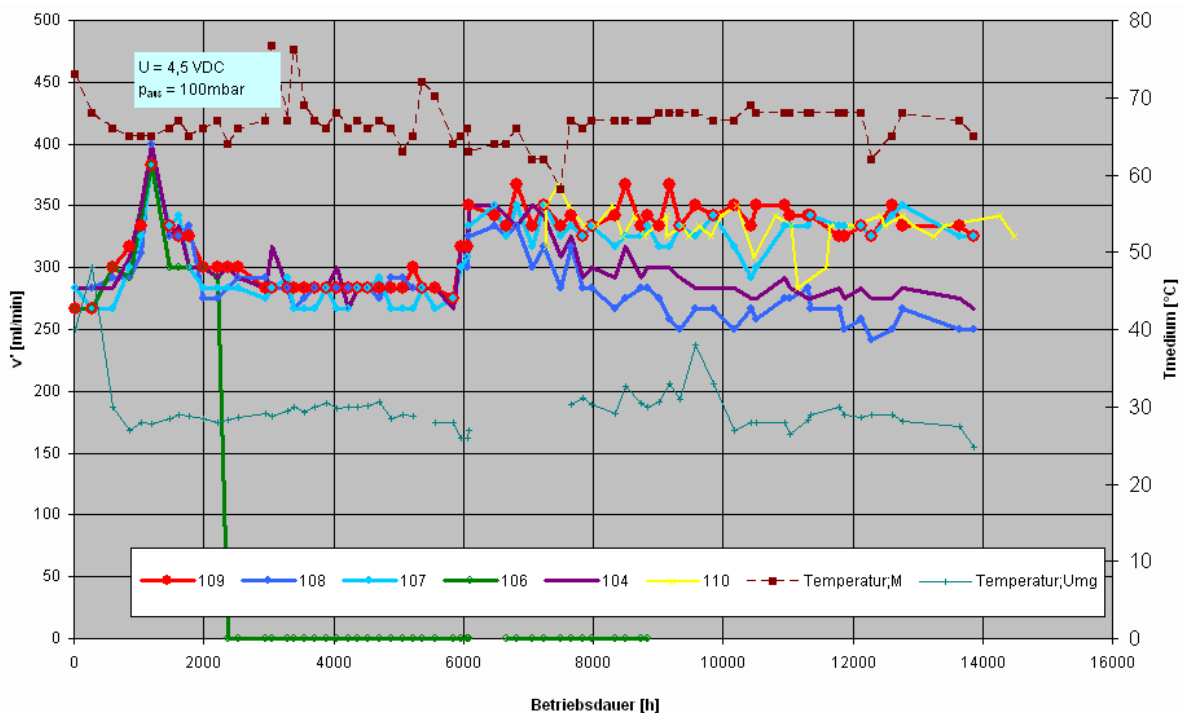


Abbildung 19: Ergebnis der Langzeituntersuchung von Umlaufpumpen

Im Prüfstand wurden die Umlaufpumpen im Dauerbetrieb über 10.000 Stunden betrieben und konnten dort ihre Tauglichkeit nachweisen. Zur Untersuchung der Dauerbetriebstauglichkeit wurden die Pumpen in einem Teststand kontinuierlich mit 4,5 V angesteuert. Die Pumpen haben dabei ein 70°C warmes Methanol-Wasser-Gemisch im Kreis gegen einen Druck von 100 mbar gefördert. Abbildung 19 zeigt den zeitlichen Verlauf des Volumenstroms. Die Pumpe #106 ist bei 2.350 Stunden ausgefallen. Nach eingehender Analyse des Herstellers lag die Ursache an nicht abgetragenen Kohlebürstenabrieb des Motors. Dies führte zur stetig steigenden Stromaufnahme und schlussendlich zum Kurzschluss dessen. Auf Grund dessen wurde der Pumpenbetrieb nochmals eingehend analysiert und verbessert. Die Pumpenansteuerung wurde nach 6.000 Stunden so angepasst, dass die Steuerspannung jeweils nach 30 Minuten Betrieb für 10 Sekunden von 4,5 V auf 6 V angehoben wurde. Im weiteren Verlauf der Langzeitbetriebsuntersuchung kam es zu keinem weiteren Pumpenausfall.

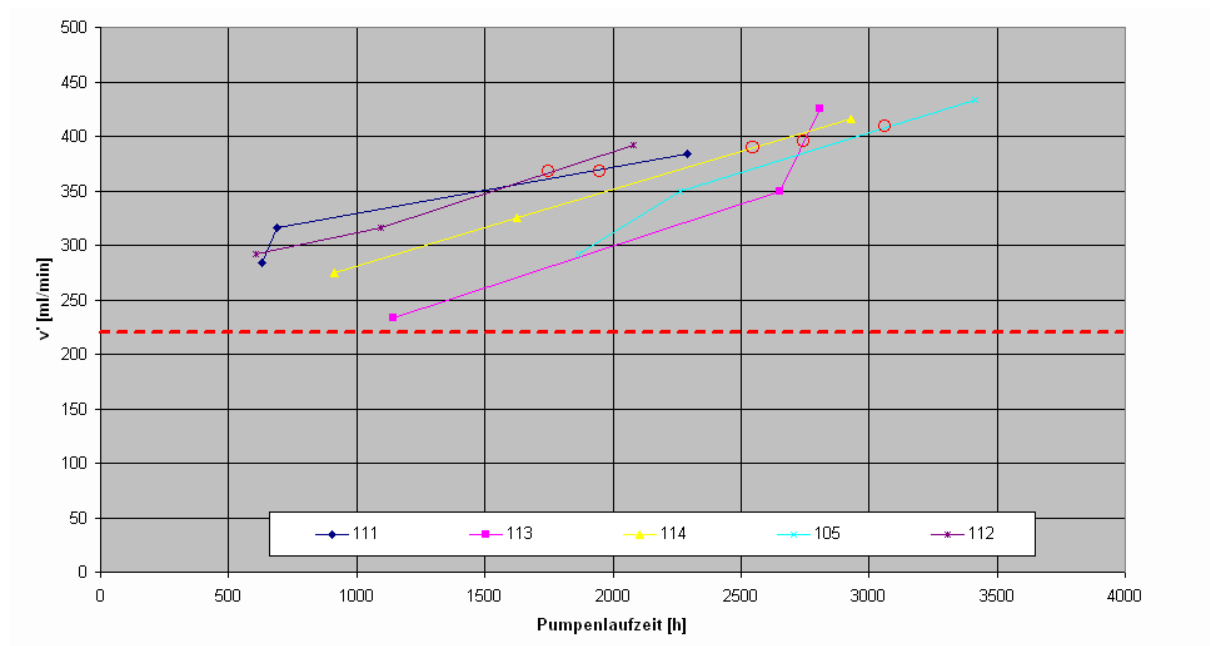


Abbildung 20: Umlaufpumpen im Lebensdauertest

Nach den vielversprechenden Ergebnissen der Umlaufpumpen im Prüfstand, wurden Pumpen in Brennstoffzellen-Systeme verbaut und im Langzeitbetrieb untersucht. Abbildung 20 zeigt das Ergebnis der regelmäßigen Überprüfung der Pumpen am Teststand. Dazu wurden diese in regelmäßigen Abständen ausgebaut und am Prüfstand vermessen. Bisher konnte ein stabiler Betrieb auch in den Systemen nachgewiesen werden. Im Diagramm sind die jeweiligen Betriebsstunden markiert, ab der die Ansteuerung der Pumpe auf Basis der ex situ Analysen angepasst wurde.

AP S4: Gesamtsystem

Mit der Zielsetzung, über ein Brennstoffzellenleben und den damit verbundenen Materialeinsatz, die maximale Energieausbeute zu erreichen wurden zu Beginn des Projektes unterschiedliche Betriebsstrategien entwickelt, in Testsystemen implementiert und die Ergebnisse im realen Einsatz miteinander verglichen. Hierbei spielte neben der Effizienz zu Beginn des Stacklebens auch die Degradation über die Zeit im jeweils untersuchten Betriebsmodus eine entscheidende Rolle.

Besonderes Augenmerk wurde auf den Constant Current Betrieb gerichtet. In diesem Betriebsmodus wird die abfallende Zellspannung nicht mit einem höheren Strom kompensiert, sondern dieser Spannungs- und Leistungsverlust zugelassen. Mit dieser für den Stack und für die Pumpen schonenden Betriebsweise konnte die Lebensdauer erhöht werden und somit die Gesamtenergieausbeute um über 50% verbessert werden.

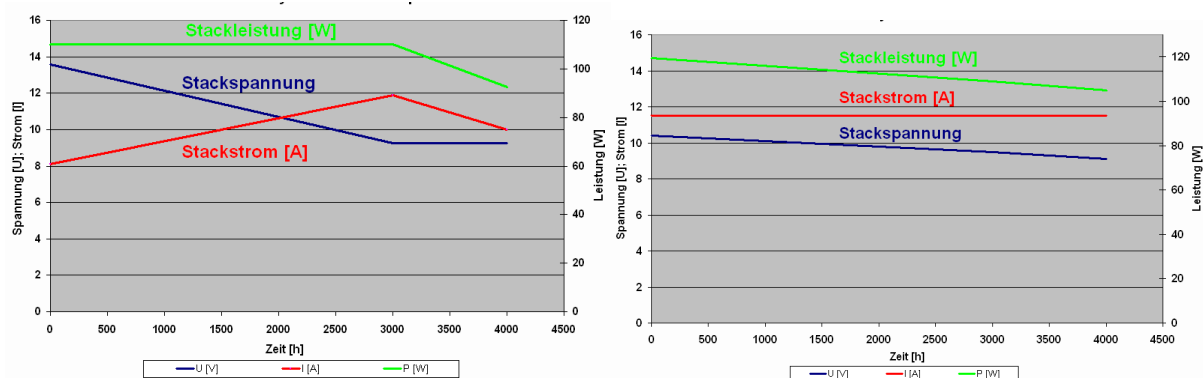


Abbildung 21: Links: Verlauf von Zellstrom und –spannung bei Constant Power; Rechts: Verlauf von Zellstrom und –spannung bei Constant Current

Gegen Ende des Projektes wurden die Vorteile der Constant Power Betriebsstrategie und der Constant Current Strategie miteinander kombiniert und erste Tests mit einer Art MPP „Maximum Power Point“ Betriebsstrategie gesammelt, um die Energieausbeute über die Lebenszeit weiter zu steigern.

Bei dieser Strategie wird, unter Einhaltung gewisser Grenzen (maximal zulässiger Stackstrom, minimal zulässige Stackspannung) nach der maximal möglichen Leistung geregelt. Das besondere ist, dass nach der maximal möglichen Ausgangsleistung des Systems geregelt wird (nicht nach der maximalen Stackleistung) und so unnötige Verluste der Peripherie und der Elektronik vermieden werden.

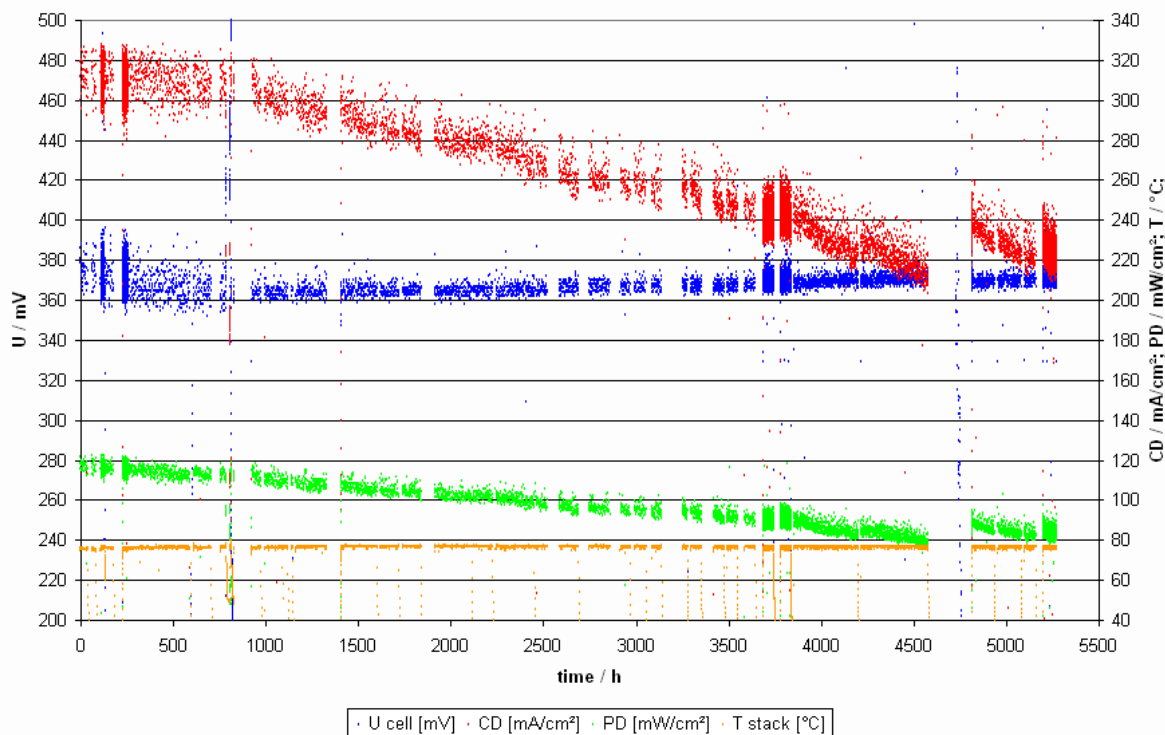


Abbildung 22: Langzeittest eines kompletten Systems mit MPP Betriebsstrategie

In Abbildung 22 sind die durchschnittliche Zellspannung (blaue Kurve), Stackstromdichte (rote Kurve), Stackleistungsdichte (grüne Kurve) und Stacktemperatur (orange Kurve) über der Systemlaufzeit aufgetragen. Beim Start liegt die Leistungsdichte bei ca. $120 \text{ mW}/\text{cm}^2$, die Stromdichte bei ca. $320 \text{ mA}/\text{cm}^2$ und die mittlere Zellspannung bei ca. 370 mV . Nach ca. 5.000 Stunden ist die Leistungsdichte auf ca. $85 \text{ mW}/\text{cm}^2$, die Stromdichte auf ca. $230 \text{ mA}/\text{cm}^2$ und die mittlere Zellspannung auf ca. 370 mV gefallen. Dies zeigt eine sehr gute Langzeitstabilität, bei hoher mittlerer Leistungsdichte.

Im Vergleich zur Betriebsstrategie „constant current“ zeigte der Lebensdauertest mit der Betriebsstrategie „Maximum Power Point“, dass man hierdurch eine signifikant höhere Energieausbeute bei vergleichbarer Langzeitstabilität erzielt (Leistungsdichte BOL bei MPP: $120 \text{ mW}/\text{cm}^2$; Leistungsdichte BOL bei CC: $100 \text{ mW}/\text{cm}^2$).

Die Systeme mit elcomax MEAs wurden mehrere tausend Stunden erfolgreich betrieben und somit der Nachweis der Langzeitstabilität der entwickelten Stacks erbracht. Somit wurde Meilenstein M3 erreicht.

Weiterhin konnten auf Gesamtsystemseite durch Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten Kostensenkungsmaßnahmen implementiert werden. Durch Vereinfachung und Wegfall einiger Komponenten konnten die Kosten der Peripherie deutlich reduziert werden, ohne an Funktionalität oder Leistungsfähigkeit zu verlieren. In dieser Phase wurden zahlreiche in AP S3 entwickelte Komponenten nach dem Design-In Prozess im Gesamtsystem unter praxisnahen Umgebungsbedingungen erprobt und bewertet und iterativ weiter optimiert.

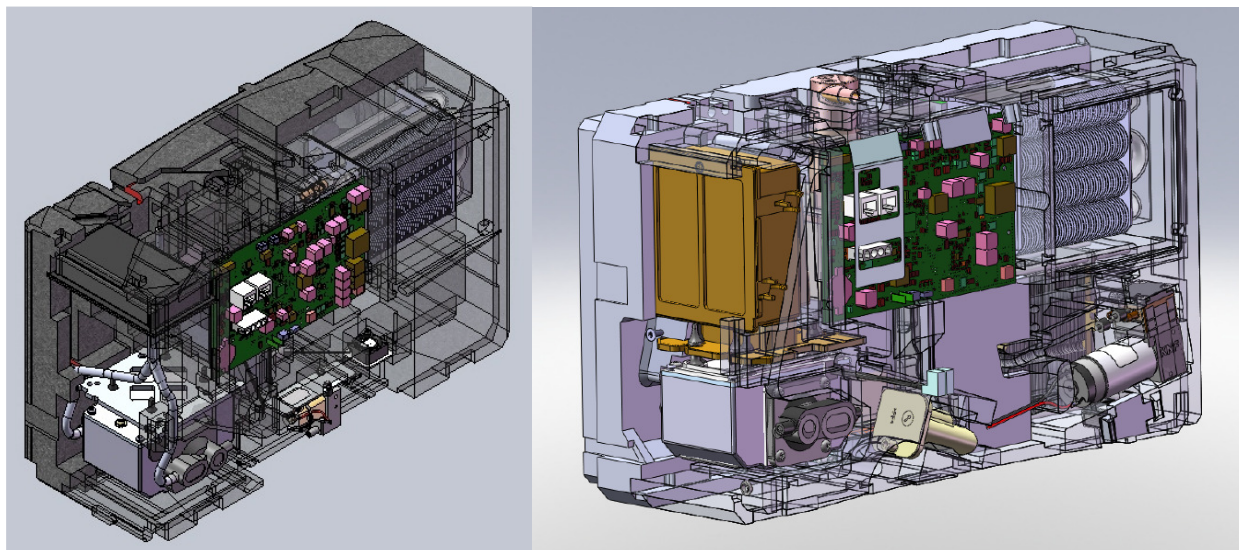


Abbildung 23: Überarbeiteter Schaum zur Montage und Dämpfung der Bauteile einer Brennstoffzelle

Aus Abbildung 23 geht die konstruktive Anpassung des Befestigungsschaums der Brennstoffzelle hervor. Die Verschlauchung der einzelnen Komponenten ist im Schaum eingebettet und musste bedingt durch die Implementierung des neuen Luftfilterelements (braun dargestellt) und der optimierten Anodenversorgung, bestehend aus dem neu entwickeltem Zwischentank und dem entkoppelten Anodenfilterelement, grundlegend angepasst werden. Dazu wurden in mehreren Konstruktionsschleifen die jeweiligen Komponenten in die Gesamtkonstruktion eingepasst und entsprechend elektrisch und fluidisch angeschlossen. Die einzelnen Varianten wurden von allen beteiligten Abteilungen begutachtet und geprüft und entsprechend die Konstruktion angepasst. Nach Abschluss der Konstruktionsarbeiten wurde ein abschließender Montage- und Funktionstest mit positivem Ergebnis durchgeführt.

Um potentiellen Nutzern der Brennstoffzelle eine verlängerte Autarkie anbieten zu können, wurde im Rahmen der Konstruktionsanpassung des Befestigungsschaums eine verbesserte Treibstoffversorgung entwickelt.

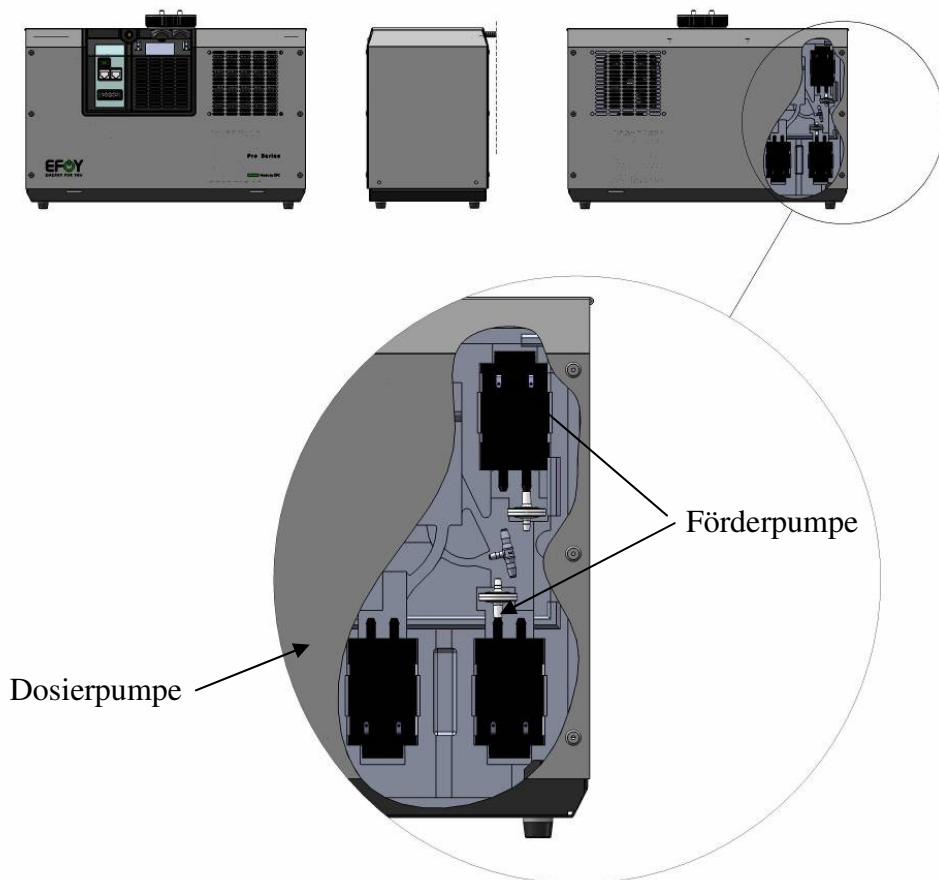


Abbildung 24: Dosierstrang mit zwei Förderpumpen

Ein neu entwickeltes Methanolversorgungskonzept (siehe Abbildung 24) ermöglicht, dass gleichzeitig zwei Methanol-Tankpatronen an die Brennstoffzelle angeschlossen werden können. In der bis dahin vorliegenden Ausführung der Brennstoffzelle, war es nur möglich eine Tankpatrone mit bis zu 28 Litern Methanol anzuschließen. Durch die Einführung der innerhalb des Projektes neu entwickelten Komponenten konnte die Anordnung so weit verbessert werden, dass der Einbau eines zweiten Methanolversorgungsstranges möglich wurde.

Die Treibstoffversorgung der Brennstoffzelle ist wie folgt aufgebaut:

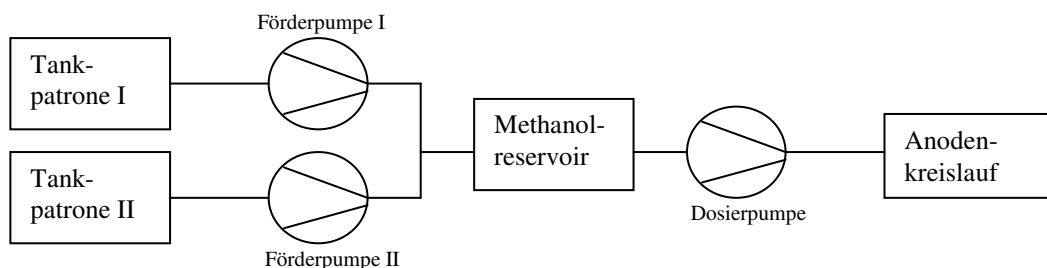


Abbildung 25: Prinzipskizze der Treibstoffversorgung der Brennstoffzelle

Am Gerät befinden sich zwei Tankpatronenanschlüsse. Jeder Anschluss geht auf eine Förderpumpe. Im Betrieb beginnt Förderpumpe I das integrierte Methanolreservoir bei Bedarf zu füllen. Aus dem Reservoir entnimmt eine sogenannte Dosierpumpe die von der Brennstoffzelle benötigte Menge an Methanol und dosiert es in den Anodenkreislauf. Sensoren überwachen den Zustand der ersten Tankpatrone und schalten nach der Entleerung auf den zweiten Tankanschluss um und das Reservoir wird mittels Förderpumpe II im Bedarfsfall gefüllt.

Mit diesem Verfahren kann die doppelte Treibstoffmenge an die Brennstoffzelle angeschlossen werden, was selbst bei erhöhter Ausgangsleistung die Autarkie weiter verlängert. Des Weiteren sinkt die Störanfälligkeit durch dieses redundante Versorgungskonzept und die entleerten Tankpatronen können bei laufender Brennstoffzelle getauscht werden, da in dem Moment der zweite Methanolversorgungs kanal aktiv ist.

	bisheriger Tankanschluss	neu entwickeltes Konzept
Angeschlossene Tankpatrone (n)	1 x M28	2 x M28
Autarkie @ 50 W (in Tagen)	26 Tage	52 Tage

Beispiel für eine Anwendung mit 50 W Strombedarf

AP S5: Pilotsysteme

Im Rahmen des Vorhabens wurden zahlreiche MEAs, die mit verschiedensten Prozessparametern gefertigt wurden in verschieden großen Stacks verbaut. Diese Stacks wurden in Brennstoffzellensystemen mit unterschiedlichen Betriebsparametern betrieben, um ein mögliches Optimum an MEA Beschaffenheit, Betriebsstrategie und Energieausbeute bei gleichzeitiger spezifischer Kostenreduzierung zu erreichen.

Gegen Ende des Vorhabens wurden diese Erfahrungen in einer großen Testreihe gegenübergestellt. Dazu wurden diverse Brennstoffzellensysteme aufgebaut und mit unterschiedlichsten Stacks ausgestattet und betrieben. Die Tabelle zeigt die aufgebauten Systeme und den Leistungsverlauf über die Zeit der im Intervall von 500 Stunden festgehalten wird.

Systemnummer	MEA Charge	Systemstart	Ausgangsleistung nach x Stunden								3500	3750
			0	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500		
			[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]
281104-1238-28502	1014843	15.11.2012	41	39	37	35	34	32				
281304-1238-28503	1014843	14.11.2012	108	101	97	92	88	83				
281104-1238-28504	1014842	14.11.2012	42	39	37	35	33	31				
281304-1238-28501	1014842	14.11.2012	109	102	96	91	85	78				
281104-1246-28849	1014485	14.11.2012	42	38	37	35	33	32	30	28		
281304-1246-28855	1014485	14.11.2012	113	103	99	92	87	81				
281104-1238-28500	1014941	14.11.2012	41	39	37	35	33	32	29			
281304-1238-28505	1014941	14.11.2012	110	102	97	91	86	79				
281104-1245-28794	1014942	20.11.2012	42	38	37	35	34	33	32	30	29	
281304-1245-28793	1014942	19.11.2012	110	104	98	91	85	78				
281104-1245-28792	1015209	20.11.2012	42	39	37	35	33	32	29			
281304-1245-28791	1015209	20.11.2012	111	103	98	92	87	80				
281104-1247-28943	1015905	21.11.2012	43	40	38	37	35	34	32	29	29	
281304-1247-28942	1015905	21.11.2012	112	105	102	97	93	88	84	78		
281104-1249-29176	1016334	05.12.2012	43	39	38							
281304-1249-29175	1016334	05.12.2012	111	101	95	91	86	81				
281104-1249-29177	1016265	05.12.2012	43	40	38	36	35	33	32	30	29	
281304-1249-29174	1016265	05.12.2012	112	103	99	96	91	86	81			
281104-1249-29178	1016396	05.12.2012	41	39	36	34	32	29				
281304-1249-29173	1016396	05.12.2012	110	104	99	97	93	89	85	79	78	
281105-1303-29388	1016538	23.01.2013	42	37	33	30						
281305-1303-29391	1016538	23.01.2013	109	98	89	83	77					
281105-1303-29389	1016583	23.01.2013	41	38	35	33	30					
281305-1303-29392	1016583	23.01.2013	110	98	89	83	78					
281105-1303-29387	1016483	23.01.2013	42	38	37	35	34	32	29			
281305-1303-29390	1016483	23.01.2013	111	102	97	93	89	85				
281105-1308-29598	1016761	19.02.2013	42	38	35	32	29					
281305-1308-29600	1016761	19.02.2013	108	99	93	89	83					
281105-1308-29599	1016617	19.02.2013	42	39	38	37	36					
281305-1308-29601	1016617	19.02.2013	111	102	99	96	95					
281105-1311-29952	1017466	12.03.2013	42	39	38	37	36					
281305-1311-29951	1017466	12.03.2013	110	104	101	99						
281105-1312-30095	1017796	19.03.2013	41	38	36	35	35					
281305-1312-30094	1017796	19.03.2013	108	101	98	97	95					
281105-1312-30096	1017796	19.03.2013	40	37	36	35	35					
281305-1312-30093	1017796	19.03.2013	106	102	99	97	96					
281105-1313-30244	1017779	27.03.2013	41	38	37	36	35					
281305-1313-30246	1017779	27.03.2013	108	102	99	99						
281105-1313-30245	1017867	27.03.2013	41	38	37	36	35					
281305-1313-30247	1017867	27.03.2013	107	101	98	96						
281105-1314-30260	1017772	03.04.2013	42	39	37	36	35					
281305-1314-30265	1017772	03.04.2013	107	103	99	98						
281105-1314-30261	1017856	03.04.2013	41	38	37	36						
281305-1314-30264	1017856	03.04.2013	103	100	98	96						
281105-1314-30262	1017798	03.04.2013	40	38	36	36						
281305-1314-30263	1017798	03.04.2013	104	102	100	97						
281105-1315-30288	1018036	09.04.2013	42	39	38	37						
281305-1315-30285	1018036	09.04.2013	109	105	102	101						
281105-1315-30289	1018053	09.04.2013	42	40	38	38						
281305-1315-30286	1018053	09.04.2013	110	106	103	102						
281105-1315-30290	1018069	09.04.2013	42	39	37	37						
281305-1315-30287	1018069	09.04.2013	106		99	98						
281105-1317-30478	1017857	25.04.2013	41	38								
281305-1317-30477	1017857	25.04.2013	106	103	101							
281105-1320-30656	1018256	14.05.2013	41	39	38							
281305-1320-30658	1018256	14.05.2013	105	102								
281105-1320-30655	1018257	14.05.2013	41	38	37							
281305-1320-30657	1018257	14.05.2013	105	103								

Abbildung 26: Übersicht über Testreihe Brennstoffzellensysteme

Einige Systeme haben bereits einen Betrieb von deutlich mehr als 3.000 Stunden nachgewiesen. Einige Systeme laufen zurzeit noch. Es gibt Systeme die eine Lebensdauer von 10.000 Stunden erreichen werden. Dieses Ergebnis konnte durch die Aufstockung der Mittel erreicht werden und die ursprünglich gesetzte Zielmarke von 7.500 Betriebsstunden wurde deutlich übertroffen. Stacks mit einer Lebensdauer von 10.000 Stunden konnten so im Prototypenstadium im Rahmen dieses Projektes erfolgreich aufgebaut und getestet werden.

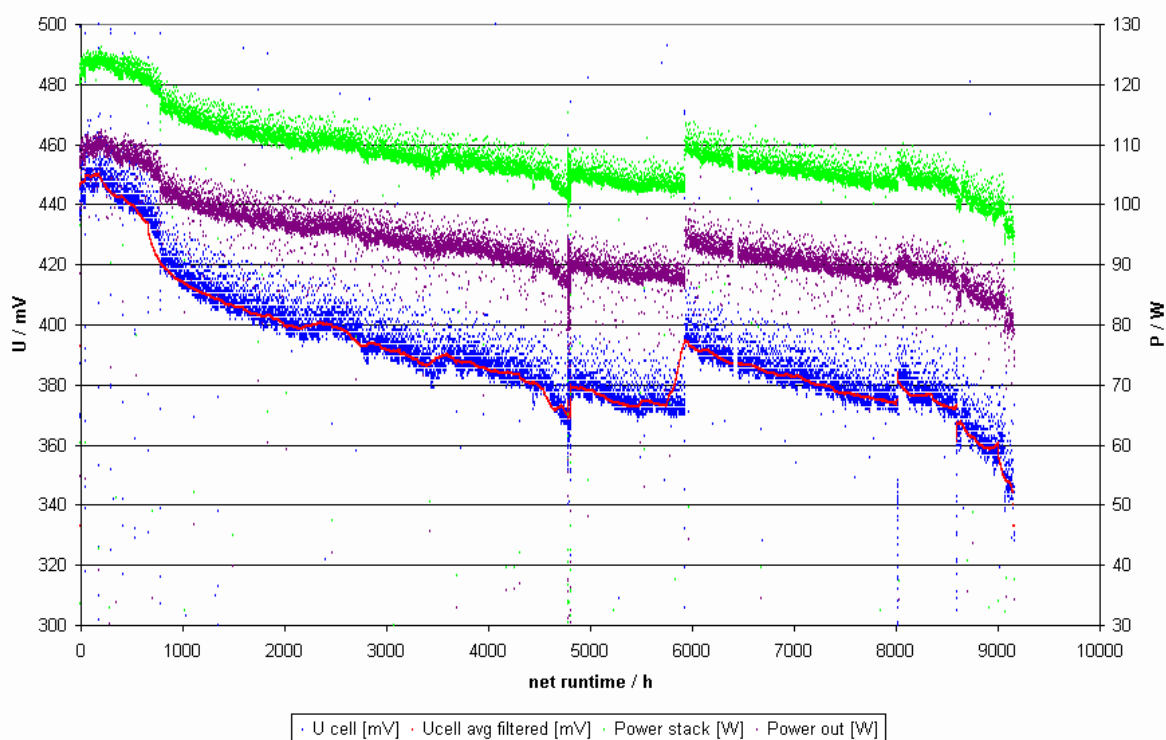


Abbildung 27: Langzeitlebensdauererprobung einer Brennstoffzelle

Abbildung 27 zeigt den Lebensdauererprobungstest von elcomax MEAs in einem 24-zelligen Stack im Brennstoffzellensystem. Es sind die durchschnittliche Zellspannung (blaue Kurve), die Ausgangsleistung (lila Kurve), die Stackleistung (grüne Kurve) bei einer konstanten Stackstromdichte von 230 mA/cm^2 über einen Zeitraum von ca. 9.000 Stackbetriebsstunden aufgetragen.

Die Brennstoffzelle läuft bei einer sehr hohen mittleren Zellspannung von ca. 450 mV zu Beginn des Tests. Das Spannungsniveau von ca. 360 mV/Zelle ist nach ca. 9.000 Stackbetriebsstunden immer noch sehr hoch. Über die Gesamtdauer zeigt sich ein bis dahin sehr stabiles Langzeitverhalten bei einer sehr niedrigen Degradationsrate von ca. $10 \text{ } \mu\text{V/h}$ pro Zelle. Nach 9.000 Stunden geschieht ein rapider Abfall der Zellspannung, der durch das Versagen einer Pumpe verursacht wurde.

Zusätzlich zu dieser bereits anfangs geplanten Testreihe konnten weitere Hochleistungsstacks aufgebaut werden. Diese wurden ebenfalls in Brennstoffzellensysteme integriert und einem noch laufenden Langzeittest unterzogen.

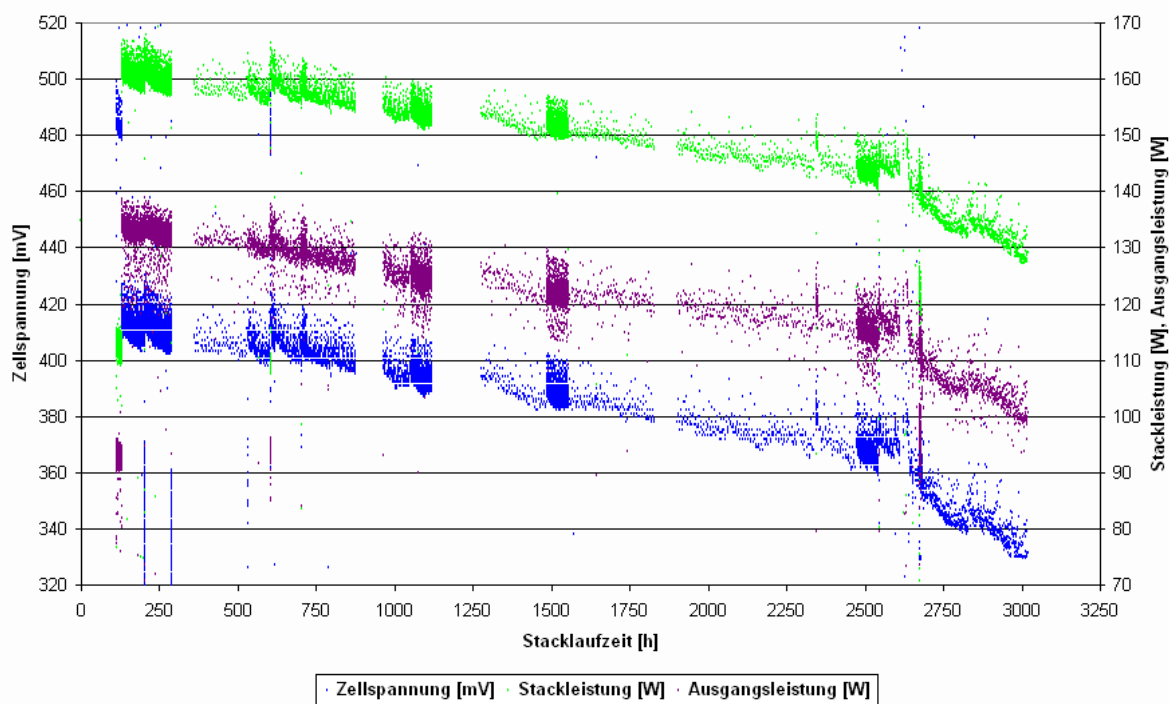


Abbildung 28: Weiterer Lebensdauertest

Der Lebensdauertest, dargestellt in Abbildung 28, zeigt den Betrieb eines 30-zelligen Stacks bei hohen Leistungen mit alternativen MEAs. Die durchschnittliche Zellspannung (blaue Kurve), die Ausgangsleistung (lila Kurve), die Stackleistung (grüne Kurve) bei einer konstanten Stackstromdichte von 260 mA/cm^2 ist über einen Zeitraum von ca. 3.000 Stackbetriebsstunden aufgetragen. Es zeigen sich eine sehr hohe Stackleistung beim Start von ca. 165 W und nach 3.000 Stunden ca. 130 W. Die Peripherieverluste sind mit bis zu 30 W relativ hoch. Die Langzeitstabilität der alternativen MEA ist noch nicht optimal bei einer Degradationsrate von ca. $30 \mu\text{V/h}$ pro Zelle.

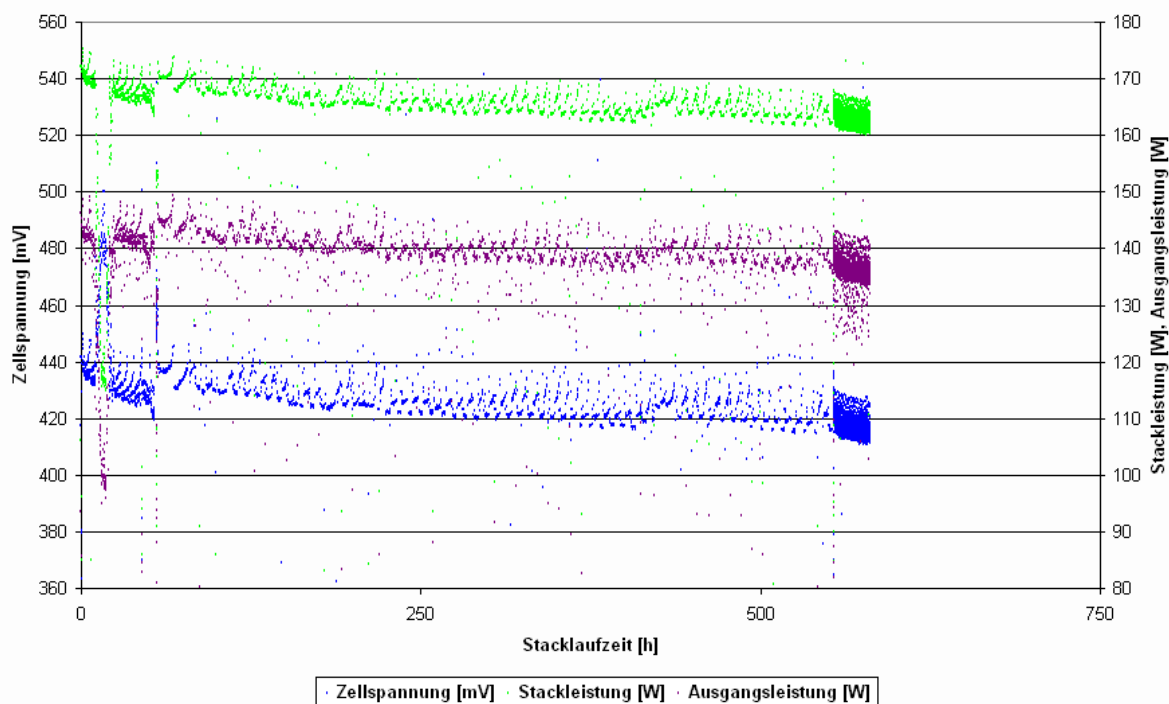


Abbildung 29: Lebensdauerdiagramm mit alternativen MEAs

Das in Abbildung 29 gezeigte Testergebnis zur Lebensdauer eines 30-zelligen Stacks bei hohen Leistungen mit alternativen MEAs, zeigt einen sehr stabilen Betrieb. Es ist die durchschnittliche Zellspannung (blaue Kurve), die Ausgangsleistung (lila Kurve), die Stackleistung (grüne Kurve) bei einer konstanten Stackstromdichte von 260 mA/cm^2 über einen Zeitraum von ca. 600 Stackbetriebsstunden aufgetragen. Die Anfangsstackleistung ist mit ca. 170 W sehr hoch.

2. Vergleich aktueller Status mit der ursprünglichen Planung

Alle Arbeitspakete wurden erfolgreich abgeschlossen. Durch die zusätzlichen Mittel, die durch die Aufstockung des Vorhabens zur Verfügung standen, konnten die ursprünglich gesetzten Ziele übertroffen werden. Insbesondere die Ausgangsleistung und die Lebensdauer konnte besonders gesteigert werden und ermöglichen heute den Aufbau von Systemen mit 150 W Ausgangsleistung.

Aufgrund der beantragten Aufstockung für das Fördervorhaben wurde die Bearbeitung der Arbeitspakete mit erhöhtem Sach- und Personaleinsatz bearbeitet. Die Arbeiten konnten aufgrund der guten Fortschritte im Projektzeitplan vorzeitig zum 30.09.2013 abgeschlossen werden.

Die Kosten wurden im Vergleich zur Gesamtvorkalkulation um rund 4,0% geringfügig überschritten. Zur Erreichung der Projektziele, unter anderem signifikante Kostenreduzierung und Leistungssteigerung, wurden eine erhöhte Anzahl an Stacks und Testsysteme aufgebaut und untersucht. Zum Nachweis der Übererfüllung der Ziele wurden weitere Systeme zur Nachweisführung aufgebaut. Dadurch konnten im Vergleich zur Vorkalkulation Personalkosten geringer gestaltet werden, dafür fielen aber höhere Ausgaben für Material, FE-Fremdleistungen und Abschreibungen auf vorhabensspezifische Anlagen an.

3. Aussichten auf Erreichung der Ziele des Vorhabens

Die definierten Ziele wurden im beantragten Zeitrahmen erreicht und dank zusätzlicher Mittel sogar übertroffen.

4. Informationen von dritter Seite im Bezug auf das Vorhaben

Im Rahmen des Projektes fanden Gespräche mit allen relevanten Lieferanten statt. Neue Komponenten wurden untersucht und ggf. in Testaufbauten und Prototypen integriert.

Neue Erkenntnisse aus Forschung und Entwicklung wurden in Gesprächen auf Konferenzen und Messen bewertet und flossen in die Arbeitspakete ein. Per Webrecherche wurden themenverwandte Patentanmeldungen und Veröffentlichungen beobachtet und ausgewertet.

5. Änderungen in der Zielsetzung

Aus Sicht von SFC waren bis auf die Aufstockung der Mittel keine Änderungen in der Zielsetzung erforderlich.

6. Verwertung

- *Erfindungen:* Im Rahmen des Vorhabens wurden für ein Patent die Kosten für die Übernahme der Vertretung der nationalen Teile des Patents in diversen europäischen Ländern geltend gemacht. Weitere Kosten und Schutzrechtsanmeldungen wurden nicht abgerechnet.
- *Wirtschaftliche Erfolgsaussichten:* Im Anschluss an das Vorhaben ist geplant, aufgrund der anzunehmenden Kosteneinsparungen mit günstigeren Produkten neue Märkte mit der Brennstoffzelle zu erschließen. Die erwarteten Stückzahleffekte werden wiederum Einfluss auf die gesamte Lieferkette und Kostenstruktur um die Brennstoffzelle haben.
- *Wissenschaftliche Erfolgsaussichten:* Die von elcomax auf MEA Seite und von SFC auf Systemebene erarbeiteten Verbesserungen werden es ermöglichen die Systemkomplexität der Brennstoffzelle zu reduzieren, um zuverlässige Prototypen und perspektivisch auch Produkte entstehen zu lassen. Die durch SFC erprobten neuen Technologien und bei elcomax entwickelten Verfahren zur MEA Fertigung, werden eine ökonomisch sinnvolle Installation einer tiefen Wertschöpfungskette am Standort Deutschland ermöglichen.
- *Anschlussfähigkeit für eine nächste Phase:* Die Faktoren Stackkosten und Systemkosten sind entscheidend für eine erfolgreiche Markteinführung der Brennstoffzelle. Daher werden diese Themen noch viele Jahre Entwicklungspotential bieten. Neu sich öffnende Märkte aufgrund kostengünstiger Brennstoffzellen werden zu neuen Produktideen und Systemkonzepten führen. Die Brennstoffzelle wird marktspezifische Anforderungen und Standards erfüllen und dahingehend weiterentwickelt werden müssen. Weiterhin ermöglicht die Kostenreduzierung die Möglichkeit auf DMFC-Basis in höhere Leistungsklassen vorzudringen.