



Florian Berthold, *1997
Pascal Berthold, *1997
Niklas Kroh, *1991

Schule:
Carl-Friedrich Gauß Gymnasium,
Frankfurt (Oder)

Eingang der Arbeit:
November 2013

Zur Veröffentlichung angenommen:
Dezember 2013

Die Platinsparerer

Mikrostrukturierte Elektroden für Brennstoffzellen

Die bisher bekannten Brennstoffzellensysteme sind technisch ausgereift, aber aufgrund der hohen Katalysatormenge noch zu teuer. Das wollen wir ändern, indem wir die Edelmetalle in nur nanometerdicken Schichten auf ein Trägermaterial aufbringen. Wir konnten in unseren Demonstrationsversuchen mit einem Bruchteil der Menge des Katalysators Platin bis zu 65% der Leistung erreichen.

1 Einleitung

Wie können teure Katalysatoren in Brennstoffzellen eingespart werden? So lautet die Kernfrage unseres Projekts, das wir 2012 begonnen haben. In dieser Zeit haben wir uns intensiv mit den gängigen Technologien industrieller PEM-Brennstoffzellen auseinandergesetzt und nach Lösungen gesucht, die einen Beitrag leisten könnten, dass die Brennstoffzellentechnik den Weg in die Massenfertigung findet. Um die physikalischen Vorgänge bei der Erzeugung von Strom aus Wasserstoff und Sauerstoff zu erklären und das Wirkprinzip einer PEM-Brennstoffzelle sowie seiner einzelnen Komponenten nachzuweisen, konstruierten wir zunächst einen eigenen Demonstrator.

Aus diesen Erkenntnissen heraus haben wir innovative Elektroden entwickelt,

die durch Strukturveränderungen nur eine sehr geringe Menge an Katalysatormaterial benötigen und gleichzeitig für eine industrielle Fertigung durch Prozesse der Mikroelektronik- oder Photovoltaikfertigung geeignet sein könnten. Wir haben unsere Erfindung am 4. März 2013 zum Patent angemeldet und hoffen, dadurch einen Teil zur Verbreitung dieser zukunftsreichen Technologie beitragen zu können.

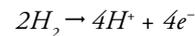
2 Theorie

2.1 PEM-Brennstoffzelle

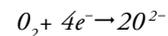
Eine PEM-Brennstoffzelle besteht zunächst aus zwei Bipolarhalbplatten, die elektrisch und thermisch leitfähig sein müssen. Zwischen den Bipolarhalbplatten befindet sich die Membran-Elektroden-Einheit (MEA – membrane electrode assembly), ein Komplex aus einer PEM-Membran, zwei Dich-

tungen und zwei Elektroden. In Abb. 1 ist der Aufbau zu erkennen, die Dichtungen wurden nicht gezeichnet.

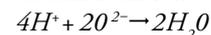
Reaktion an der Anode:



Reaktion an der Kathode:



Gesamtreaktion:



Bei einer PEM-Brennstoffzelle wird ein Katalysator, der in den Elektroden enthalten ist, eingesetzt. Die Elektroden bestehen meistens aus Graphit mit einer Beschichtung aus Platin. Sie sind aus drei Lagen aufgebaut, der Gasdiffusionslage, der Deckschicht und der Katalysatorschicht. Die Deckschicht bildet dabei die thermische und elektrische Anbindung der Katalysatorschicht an die Gasdiffusionslage. Außerdem wird

das grobporöse System der Gasdiffusionslage durch das feinporöse System der Deckschicht angeschlossen. Es werden auch andere Materialien bei der Elektrodenbasis (z.B. Titan) und dem Katalysator (z.B. Platin-Legierungen) verwendet. Ohne Katalysator würde der Wasserstoff nicht oxidiert und der Sauerstoff nicht reduziert werden. Die Ionen könnten nicht zu Wasser reagieren. Das Elektrolyt ist eine saure Polymermembran, die nur für Ionen (Protonen) durchlässig ist. Die Ionen und Elektronen entstehen an der Anodenseite. Die H^+ -Ionen bzw. Protonen diffundieren durch die Membran zur Kathode, an der die Reduktion von Sauerstoff und damit eine Elektronenaufnahme stattfindet. Bei dieser Redoxreaktion entstehen elektrische Energie, Wasser und Wärme. Die außerhalb von der Zelle (äußerer Stromkreis) von der Anode zur Kathode fließenden Elektronen ergeben einen elektrischen Strom, der als Stromquelle genutzt werden kann. Bei der Brennstoffzelle liegt das Prinzip der kalten Verbrennung vor. Es kann ein hoher Wirkungsgrad erreicht werden, da insgesamt nicht sehr viel Wärmeenergie frei wird.

2.2 Technologiebewertung [1], [2]

Innerhalb der Katalysatorschicht bzw. der genannten Dreiphasenzonen werden als Katalysator meist Platinpartikel verwendet, die zusammen mit protonenleitendem Polymer und ggf. auch Grafitpartikeln sowie PTFE auf ein Kohlenstoffgewebe aufgedruckt werden. Dabei sitzen die eigentlichen Pt-Katalysatorpartikel wiederum auf Grafitpartikeln, die letztlich einen elektrischen Kontakt innerhalb der Elektroden der Brennstoffzelle herstellen sollen. Die Kohlefaserschicht bzw. Gasdiffusionsschicht, die mit PTFE hydrophobiert sein muss, sorgt dafür, dass die Elektrode gasdurchlässig und nicht mit Wasser flutbar ist und leitet die Reaktionsgase bis zum Katalysator. Es können neben Platin auch andere Edelmetalle benutzt werden, die teilweise höhere (z.B. Pt-Legierungen), z.T. aber auch deutlich geringere Wirkungsgrade (z.B. Pd oder Ir) besitzen.

2.3 Verbesserungsansatz

Unser Lösungsansatz besteht darin, die in der Mikroelektronik/ Photovoltaik eingesetzten Strukturierungs- und

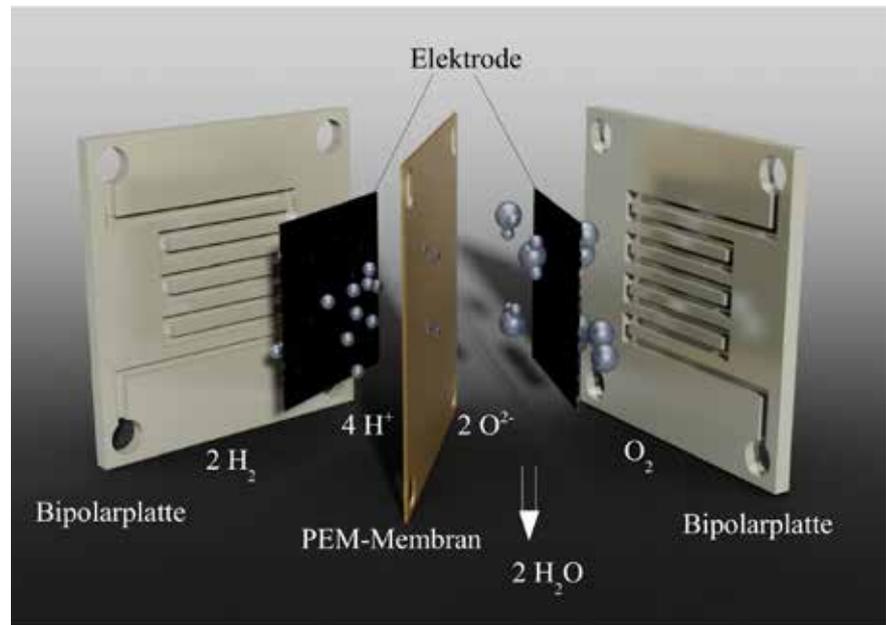


Abb. 1: Funktionsweise der PEM - Brennstoffzelle.

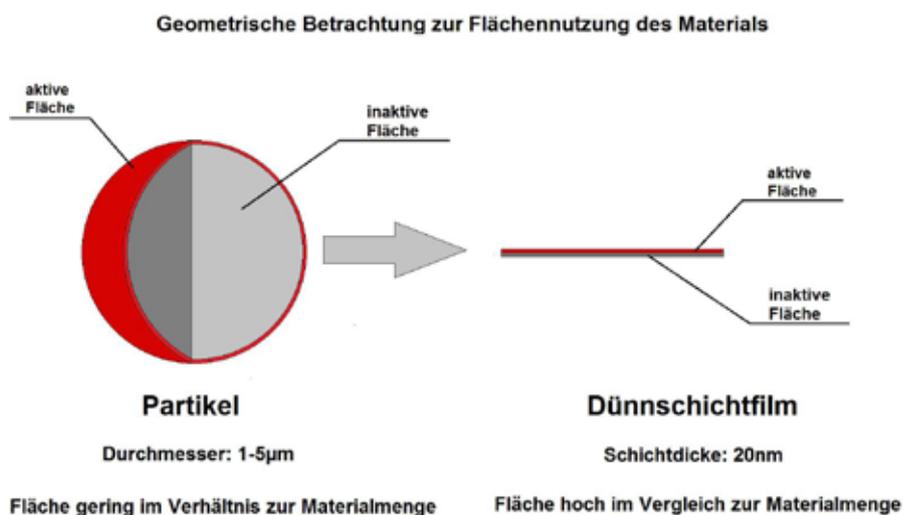


Abb. 2: Vergleich der Materialmenge von Platin auf der Grafitelektrode von Alfa Aesar (links) und der Siliziumelektrode (rechts).

Dünnschichtabscheidungsverfahren zu verwenden, um den Platinverbrauch in der PEM-Brennstoffzelle zu reduzieren. Durch sie können große Flächen mit sehr geringen Materialmengen beschichtet werden, die als Katalysator für die kalte Verbrennung dienen. Die theoretische Grundlage dafür ist im Schema (Abb. 2) dargestellt. Wie dem Schema zu entnehmen ist, kann durch Dünnschichtfilme die Menge an benötigtem Katalysatormaterial theoretisch stark verringert werden. Dabei wollen wir erreichen, dass ein möglichst hoher Anteil des Katalysators aktiv an der Reaktion mitwirkt und nicht wie bei der Partikelmethode im Inneren ungenutzt

als Trägermaterial dient. Dabei gibt es zwar durch die Verringerung der Fläche Leistungseinbußen, die jedoch deutlich geringer ins Gewicht fallen, als die Menge an Edelmetallen, die eingespart werden kann. Ein weiterer Vorteil dieses Herstellungsverfahrens ist, dass die katalytisch aktive Schicht der beiden Elektroden sehr dicht an der Polymermembran, die die Protonen von der Anode zur Kathode transportiert, liegt. Bei normalen Elektroden sind die Katalysatorpartikel eingebettet in Kohlenstoffpartikeln, die zusammen mit einem Kohlenstoffgewebe als Trägermaterial dienen. Somit erhöht sich der Widerstand für die Protonen, um

bis zur Polymermembran zu gelangen und die Leistung sinkt.

Wie in Abb. 2 zu erkennen, wollen wir erreichen, dass ein hoher Anteil des Katalysators Kontakt zum Reaktionsgas besitzt. Wir erhöhen also den aktiven Anteil, in dem wir nur eine 20 nm dicke Schicht auftragen, die die Reaktion bewirkt. Ungenutzte Anteile des Materials werden so verringert und der Katalysator kann effizienter eingesetzt werden. Zur weiteren Erhöhung der Leitfähigkeit entwickeln wir im Moment einen Lösungsansatz, um Graphen mit einer Atomlage als zusätzliche Schicht aufzubringen bzw. Graphen sogar als Trägermaterial zu benutzen, das nachfolgend mit verschiedenen Katalysatoren beschichtet werden kann.

Graphen eignet sich prinzipiell hervorragend für die elektrische Leitung innerhalb der Elektrode und es weist eine vergleichsweise hohe mechanische Stabilität auf. Es könnte in naher Zukunft das Substratmaterial normaler Kohlenstoffelektroden ersetzen, die bis jetzt noch viele Nachteile mit sich bringen. Da Graphen jedoch noch relativ wenig erforscht ist, stecken wir neben weltweit vielen weiteren Forschungsgruppen noch mitten in der Entwicklung für den Einsatz dieses Werkstoffs in unseren mikrostrukturierten Elektroden.

3 Umsetzung im Experiment

3.1 Eigenbau eines Demonstrators

Grundlage unserer Untersuchungen ist ein von uns selbst entworfener Brennstoffzellenstack, den wir aus Edelstahlplatten und Einzelkomponenten gefertigt haben. Ein Stack ist eine Reihenschaltung von PEM-Brennstoffzellen.

Mit diesem Stack haben wir uns das physikalische Verhalten von Brennstoffzellen erarbeitet und nach den Kernproblemen gesucht. Nachdem wir uns darauf konzentriert haben, einen Lösungsansatz für die Verringerung des Katalysatormaterials zu finden, wurde der Stack auf den Betrieb mit einer Einzelzelle umgebaut, um Messreihen besser miteinander vergleichen zu können. Die Messergebnisse sind so wesentlich reproduzierbarer. Zur Medienversorgung haben wir ein Gassystem an die Zelle angepasst, welches über zwei

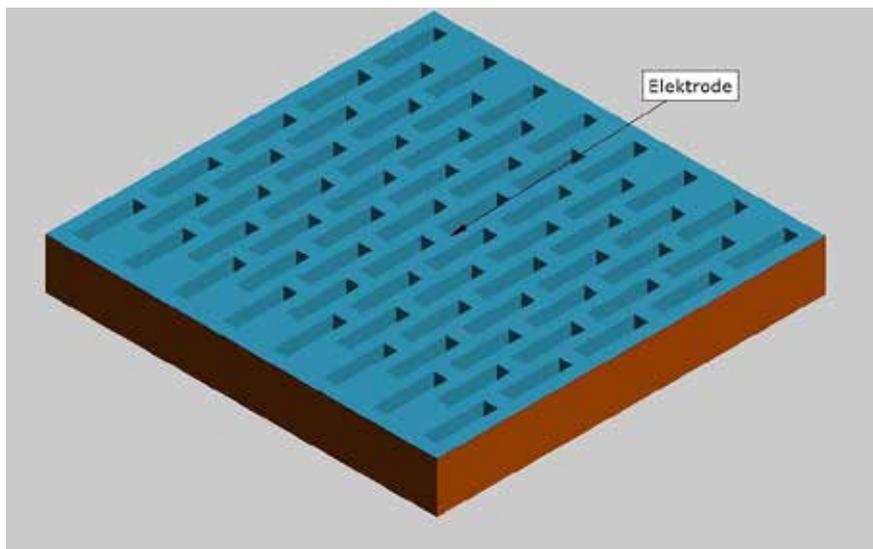


Abb. 3: Struktur der Siliziumelektrode.

Laborflaschen mit Sauerstoff und Wasserstoff gespeist wird.

Der Großteil der Entwicklung, Fertigung und Montage wurde von uns selbst ausgeführt. Wir haben versucht, aus unserem Vorwissen einen Demonstrator zu entwickeln, der industrielle Komponenten aufnehmen kann, aber trotzdem universell einsetzbar, erweiterbar und vor allem in Eigenfertigung herstellbar ist. Mit den Mono- und Bipolarplatten der Brennstoffzelle haben wir begonnen. Die Entwürfe entwickelten wir mit AutoCAD und anschließend wurden sie per CNC-Technik gefräst. Die Platten sind so gestaltet, dass sie Elektroden in der Größe von 5x5 cm aufnehmen können und vier Medienanschlüsse für das Gassystem besitzen.

Dadurch können die Elektroden, die im Reinraum des IHP hergestellt werden, in den Demonstrator eingesetzt werden. Als Dichtungsmaterial nutzen wir Teflon, das wir in Handarbeit zurechtschneiden. Es ist jedoch wenig komprimierbar und besitzt dadurch weniger gute Dichtungseigenschaften. Die einzige industrielle Komponente, die wir einsetzen, ist die Polymermembran zur Protonenleitung. Es ist uns nicht möglich, diese selbst herzustellen.

3.2 Fertigung der Siliziumelektrode

In unserer Brennstoffzelle verwenden wir die von uns entwickelten Siliziumelektroden. Diese Entwicklung wurde zum Patent angemeldet. Diese Elek-

troden ermöglichen es, sehr homogene und dünne Schichten von wenigen Nanometern (z.B. Platin) zu verwenden. Auf Grund der vorhandenen technisch und technologisch ausgereiften Dünnschichtabscheidungsverfahren eignen sich die Siliziumelektroden unserer Meinung nach gut als Grundlage für Materialtests, bei denen katalytische Edelmetalle untereinander verglichen werden können. Wir verwenden als Basismaterial dotiertes Silizium mit einem spezifischem Widerstand von $10 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}$.

Zum Vergleich besitzt Grafit einen spezifischen Widerstand von $0,8 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}$, also liegt er geringfügig unter dem spezifischen Widerstand von Silizium [3]. Für unser Projekt haben wir ein System entworfen und gefertigt, welches aus drei Schichten oder bei Verwendung von Graphen aus vier Schichten besteht.

Die unterste Schicht bildet dabei die Trägerelektrode. Sie muss zwei Aufgaben erfüllen. Erstens soll sie dem Dünnschichtfilm die für den Gebrauch benötigte mechanische Stabilität geben und zweitens muss sie leitfähig sein. Auf Grund der Verfügbarkeit von Silizium im IHP Frankfurt (Oder) haben wir uns für dieses Trägermaterial entschieden. Es ist jedoch auch jedes andere leitfähige, chemisch und mechanisch stabile Material einsetzbar. Um die Trägerelektrode gasdurchlässig zu machen, werden Gaskanäle im Mikrometerbereich in die Elektrode geätzt.

Dazu wird das Layout der Kanäle mit Hilfe einer Maske und eines Fotolacks

aufgebracht und ausgehärtet. Anschließend werden alle freien Flächen durch Plasmaätzen geätzt, wobei Gase durch eine Hochfrequenzspannung aufgesplittet werden. Dabei entstehen freie Radikale, die den Ätzprozess bewirken. Der Siliziumwafer ist zu diesem Zeitpunkt 700 µm dick. Die Kanäle werden 200 µm tief geätzt. Im nächsten Arbeitsschritt wird der Fotolack entfernt. Die Trägerelektrode ist nun mikrostrukturiert und kann beschichtet werden.

Als Erstes wird eine Zwischenschicht aus Titanitrid aufgebracht. Diese Schicht verhindert, dass das Platin zusammen mit Silizium Platinsilizid bildet. Außerdem ist wichtig, dass mit der vom CVD-Verfahren erzeugten TiN-Schicht die kompletten Kanäle der Elektrode metallisiert werden. Optional kann auch noch vor diesem Schritt poröses Silizium aufgebracht werden, um die Oberfläche zu vergrößern. Nun wird die einseitig strukturierte Elektrode gedreht und von der Rückseite chemisch-mechanisch poliert. Dabei werden 500 µm Silizium abgetragen, wodurch die geätzte Struktur der Kanäle auch auf der Rückseite freigelegt wird. Die Trägerelektrode ist an diesem Punkt fertig prozessiert (siehe Abb. 4).

Nun kommt die Dünnschichttechnologie zum Tragen. Mit Hilfe des Verfahrens Kathodenzerstäubung (engl. to sputter) wird der Katalysator aufgetragen. Dieses Verfahren gehört zur Gruppe der physikalischen Abscheidung von Stoffen aus einer Gasphase. Bei diesem Verfahren wird ein Target mit energiereichen Edelgasionen beschossen, wodurch Atome des Targets in die Gasphase übergehen. Diese Ionen werden zum Substrat (hier: unser Wafer) beschleunigt und lagern sich dort als feste Schicht an. Diese Schicht ist am Ende ca. 20 nm dick. Als letzter Schritt kann Graphen z.B. durch Aufkleben als Schicht darüber gelegt werden, um die Leitfähigkeit für Protonen zu erhöhen. Danach sind die Elektroden einsatzfähig und können getestet werden.

3.3 Versuchsdurchführung

In unseren Experimenten haben wir charakteristische Kennlinien unter möglichst gleichen Messbedingungen aufgenommen. Dabei haben wir die

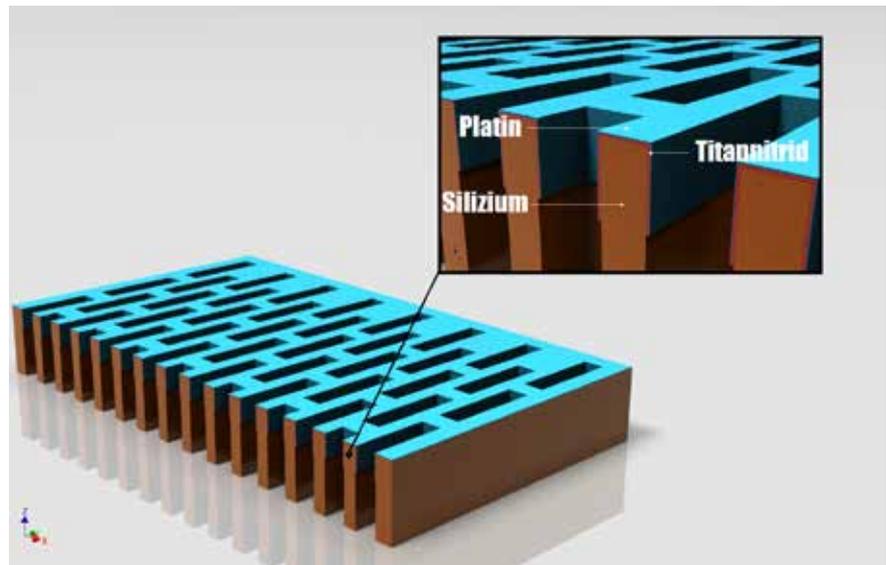


Abb. 4: Aufbau der Siliziumelektrode im Schnitt.

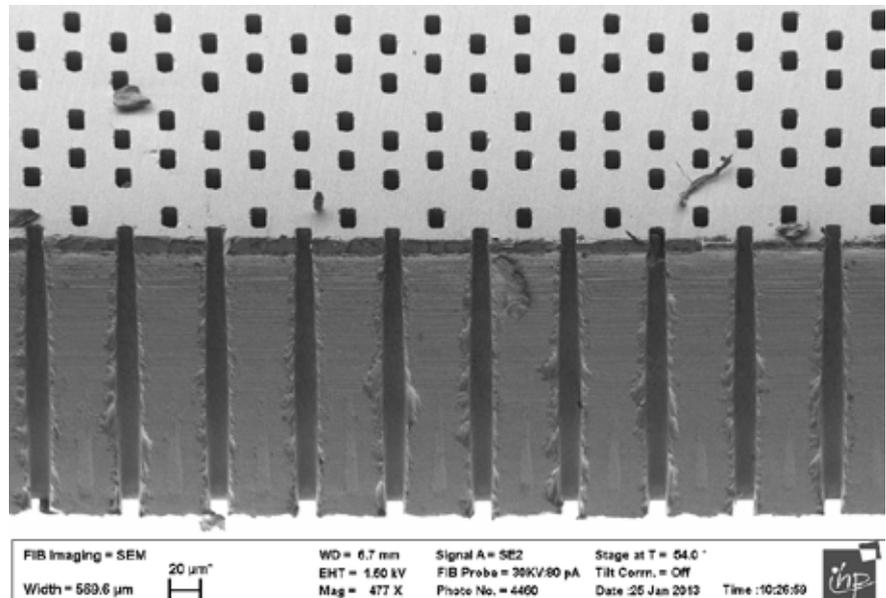


Abb. 5: REM-Aufnahme der Siliziumelektrode.

kommerziell erworbenen Elektroden mit den von uns entwickelten Elektroden verglichen. Um die Elektroden zu charakterisieren, haben wir vier Kennlinien pro Elektrode aufgenommen und versucht, Zusammenhänge zwischen der strukturellen Änderung und den physikalischen Eigenschaften zu erkennen. Die erste Kennlinie stellt die Leerlaufspannung dar.

Die Spannung wird ohne Last gemessen und spiegelt besonders das verwendete Material und dessen katalytische Eigenschaften wieder. Alle anderen Kennlinien werden unter Last gemessen. Dabei werden die Lastkurven für die Spannung, den Strom und die Leistung aufgenommen. Hierbei sind

besonders strukturelle Eigenschaften nachvollziehbar bzw. erklärbar.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Kennlinienvergleich der Graphit- und Siliziumelektroden

Zur Charakterisierung unserer Siliziumelektroden haben wir als Erstes die Leerlaufkennlinien der Spannung aufgenommen. Dabei haben wir drei Versuchsmessungen ausgeführt, um die optimalen Betriebsbedingungen zu finden. Wir haben den Betriebsdruck und die Spülzyklen (Veränderungen von Test 1 zu Test 2) und den inneren Kontakt der Zelle (siehe Test 3) angepasst. Das Ergebnis der Anpassung ist deutlich im Verlauf der Kennlinien zu sehen (die Leerlaufspannung unserer Brenn-

stoffzelle hat sich vom 1. Test bis zum 3. Test stark gesteigert). Wir konnten feststellen, dass der optimale Betriebsdruck ca. 1,9 bar auf beiden Seiten beträgt, wobei auf der Wasserstoffseite ein leichter Überdruck herrschen sollte. Außerdem sollte ca. jede halbe Stunde gespült werden. Um Übergangswiderstände zu verringern, haben wir den Anpressdruck der Elektroden an die Membran erhöht.

Aus den Messungen (siehe Abb. 6) wird ersichtlich, dass die ersten beiden Versuche mit den Siliziumelektroden noch weniger Spannung lieferten. Nachdem jedoch die Betriebsbedingungen angepasst wurden, erkennt man sogar eine Verbesserung der Werte auf bis zu 780 mV. Das entspricht einer Erhöhung um 6,4 %.

Außerdem wird der Maximalwert der Spannung schon nach etwa 50 Minuten erreicht, 25 Minuten früher als bei den Grafitelktroden. Der Zeitpunkt an dem der Maximalwert erreicht wird, ist vom Wasserhaushalt der Zelle abhängig und wird in der Auswertung der Leistungskennndaten genauer von uns beschrieben. Zusätzlich haben wir Elektroden mit Gold-, Iridium- und Cobaltbeschichtung getestet, aber wir konnten keine katalytische Aktivität erkennen.

Abb. 7 bis 9 zeigen die Kennlinien der Elektroden unter Last. Der Leistungsvergleich der Elektroden zeigt, dass die Siliziumelektroden je nach Betriebsdauer 17-65 % der Leistung industrieller Elektroden besitzen. Dabei nähert sich die Leistung der Siliziumelektroden mit der Dauer der Messungen immer mehr an die Werte der Grafitelktroden an und erreicht dabei ihren Höchstwert von ca. 65 %. Besonders am Anfang der Messungen sind die Grafitelktroden noch deutlich leistungsfähiger.

Das liegt an der höheren Oberfläche des Katalysators, da Partikel verwendet werden, die eine hohe Gesamtfläche erzeugen. Dadurch wird mehr Wasserstoff gespalten und es entstehen mehr Elektronen, die sofort genutzt werden können. Die Menge der Elektronen bzw. des Stromflusses wird jedoch durch den Wasserhaushalt der Zelle begrenzt. Um eine hohe Leistung zu

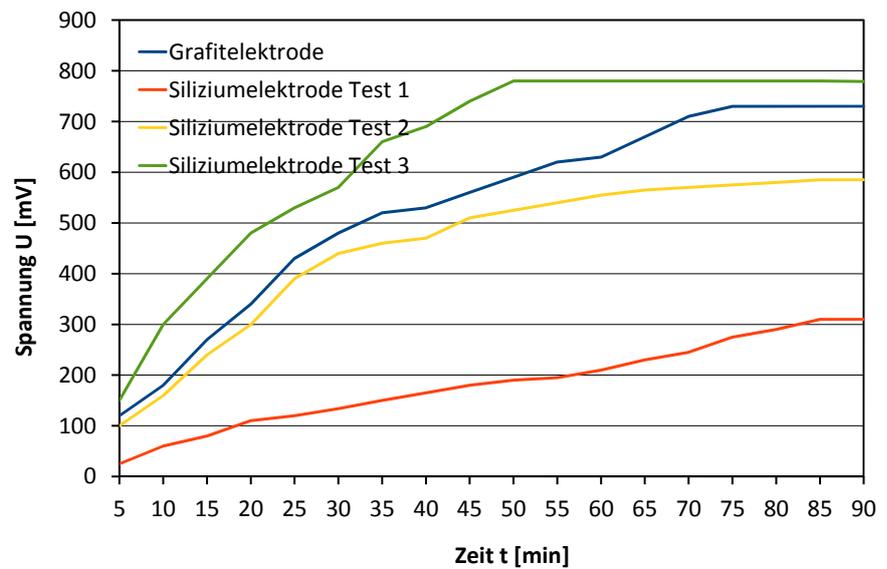


Abb. 6: Leerlaufspannungskennlinien der Brennstoffzelle mit Siliziumelektrode (Verbesserungen von Test 1 zum letzten Test 3) und mit Grafitelktrode als Vergleich.

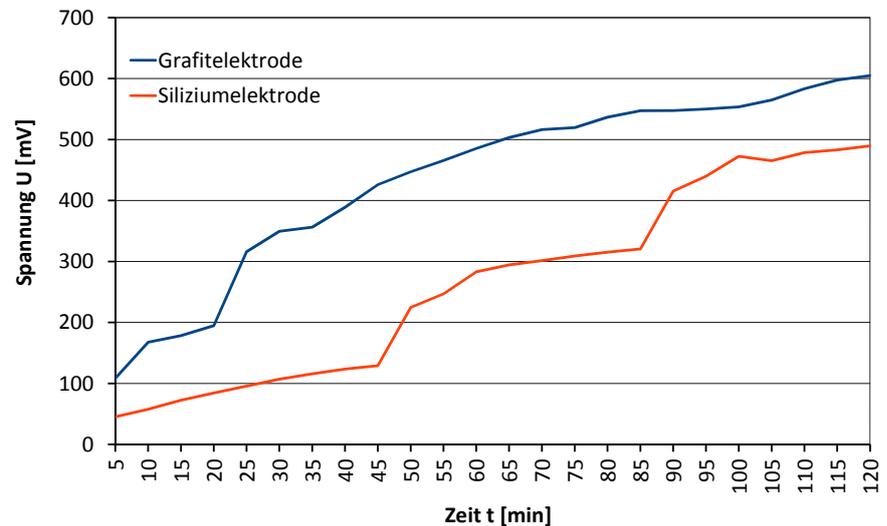


Abb. 7: Spannungskennlinien unter Last (R=250 Ohm) einer herkömmlichen Graphitelktrode im Vergleich zur entwickelten Siliziumelektrode.

erzielen, benötigt die PEM-Membran zwischen den Elektroden Feuchtigkeit. Die Feuchtigkeit wird von der Membran aufgenommen und verbessert die Protonenleitfähigkeit. Genau an diesem Punkt sinkt die Differenz der Werte zwischen der Silizium- und Grafitelktrode, da das Kohlefasergewebe stark porös ist und somit viele Einschlüsse besitzt, in denen sich das Wasser ablagert, bevor es die Membran erreicht. Sie nimmt also erst viel Wasser auf, bis sie immer gesättigter wird und es dann auch an die Membran weiterleitet. Die Siliziumelektrode hingegen besitzt weniger Hohlräume und auch der Katalysator sitzt dichter an der Membran. Somit wird weniger Was-

ser aufgesogen und es kann durch die Nähe zur Membran gleich weitergeleitet werden. Die PEM-Membran wird also schneller leitfähig und der Nachteil der geringeren Oberfläche gleicht sich somit etwas aus.

In Abb. 7 bis 9 sind immer wieder Bereiche mit einem deutlichen Spannungs-, Strom- bzw. Leistungsanstieg zu erkennen. Diese Beschleunigung kommt durch das Spülen mit Sauerstoff zustande. Unsere Zelle wird nicht im Durchflussbetrieb genutzt, sondern die Gase werden hineingeleitet und arbeiten so lange im Reaktionsraum, bis kaum noch ein Leistungsanstieg erkennbar ist. An diesem Punkt wird mit

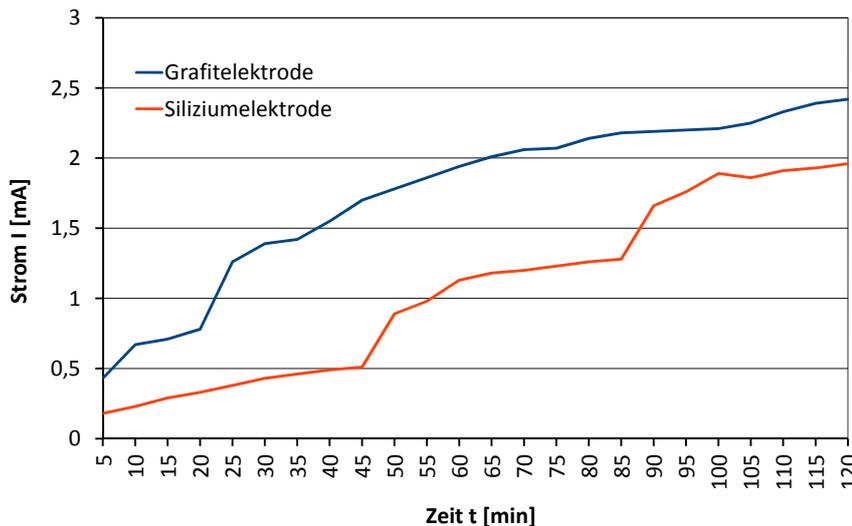


Abb. 8: Stromkennlinien unter Last ($R=250\ \Omega$) einer herkömmlichen Graphitelektrode im Vergleich zur entwickelten Siliziumelektrode.

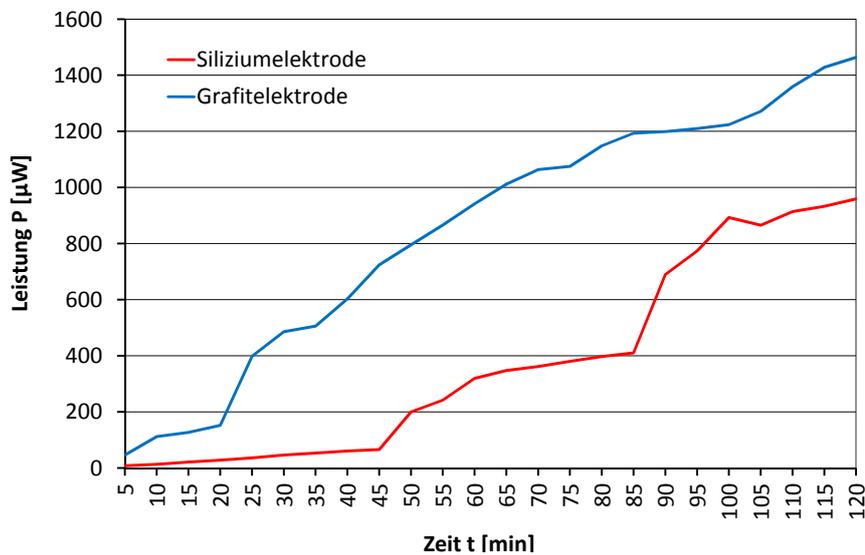


Abb. 9: Leistungskennlinien unter Last ($R=250\ \Omega$) einer herkömmlichen Graphitelektrode im Vergleich zur entwickelten Siliziumelektrode.

Sauerstoff gespült, um das verbrauchte Gas zu erneuern und Reaktionsprodukte wie Wasser abzuführen. Durch eine erhöhte Menge an nutzbarem Gas steigt dadurch auch die Leistung schlagartig. Ein Durchflussbetrieb ist bei unserer Zelle nicht möglich, da somit zu viel Feuchtigkeit aus der Zelle heraus geleitet werden würde und die Leistung sinken würde. Diese Betriebsart ist nur bei Hochleistungszellen, die mit befeuchteten Gasen versorgt werden, möglich.

4.2 Einsparpotenzial der Erfindung

Durch unsere Messergebnisse konnten wir unsere Annahme bestätigen, dass Katalysatoren in Brennstoffzellen deut-

lich kostengünstiger eingesetzt werden können. Durch die Aufbringung eines Dünnschichtfilms haben wir nur 3,43 % der Materialmenge konventioneller Elektroden benötigt und dabei bis zu 65 % der Leistung erreicht. Jedoch kommen wir nicht an die großen Leistungsdichten von kommerziell genutzten Elektroden heran.

Um es mit einem Beispiel zu verdeutlichen, kann man sich vorstellen, dass wir bei einer ca. 25 cm² großen industriellen Elektrode nur die Menge des Katalysators benötigen, die auf 1 cm² Fläche enthalten ist, um damit unsere gesamte Elektrode, die ebenfalls 25 cm² groß ist, zu beschichten.

Dabei gibt es natürlich einen Oberflächenverlust, da mathematisch betrachtet aus vielen kugelförmigen Partikeln eine ebene Fläche gemacht wird. Dieser Verlust gleicht jedoch nicht die Menge an eingespartem Material aus. Selbst wenn man unsere Elektroden auf 70 cm² vergrößern würde, um dieselbe aktive Oberfläche der Graphitelektrode zu erreichen, würden wir trotzdem nur ca. 12 % der Materialmenge benötigen. Eine Oberflächenvergrößerung ergibt sich ebenfalls durch eine Aufrauung der Oberfläche.

Dies kann z.B. durch poröses Silizium erreicht werden. Das heißt überall dort, wo keine kompakten Bauformen von Brennstoffzellen benötigt werden, bietet sich diese Lösung als Alternative an, da viel Material eingespart wird. Natürlich wirft sich dabei die Frage auf, warum es nicht schon längst so gemacht wird. Das liegt an den Herstellungskosten und der Technologie, die das ermöglicht.

Bisher wurden konventionelle Elektroden in einer Heißpressmethode hergestellt, da diese günstig und leicht umsetzbar ist. Unser Verfahren hingegen ist noch sehr teuer, besonders in der Prototypenphase. Wenn Brennstoffzellen jedoch in Massenfertigung hergestellt würden, könnten sich die Herstellungskosten ähnlich wie in der Photovoltaikindustrie rasch verringern. Damit wäre der Rohstoffpreis deutlich ausschlaggebender für die Gesamtkosten der Brennstoffzelle.

4.3 Mathematisch-physikalischer Nachweis

Für die physikalische Berechnung der Materialmenge an Platin betrachten wir die Anzahl der Gaskanäle auf einer Fläche von 5 x 5 cm. Horizontal besitzt unsere Elektrode 1000 Kanäle mit einem Kanal auf 50 µm und vertikal 2500 Kanäle mit einem Kanal auf 20 µm. Auf der gesamten Elektrode befinden sich somit 2.500.000 Kanäle. Jeder Gaskanal besitzt eine Höhe von 20 µm und eine Breite von 10 µm. Die Gesamtfläche der Gaskanäle beträgt 5 cm², also ein Fünftel der gesamten Fläche der Elektrode. Die Elektrode besitzt 20 cm² aktive und 5 cm² freie Fläche. Durch die Mengenberechnung für Platin mit einer Beschich-

	Kommerzielle Elektrode (5x5cm)	Siliziumelektrode (5x5cm)	Siliziumelektrode (aktive Fläche angepasst)
Aktive Fläche	70,02 cm ²	20 cm ²	70,02 cm ²
Menge Platin	25 mg (Quintech)	0,858 mg	3 mg
Anteil Platin	100,00 %	3,43 %	12,00 %

Tab. 1: Vergleich der kommerziellen Elektrode mit der Siliziumelektrode

tungsfläche von 20 cm² und einer Schichtdicke von 20 nm lässt sich ein Gewicht von 0,858 mg Platin pro Elektrode bestimmen. Im Vergleich dazu stehen die Herstellerangaben des Platingewichts von Graphitelektroden (siehe Tab. 1). Es werden für die Beschichtung einer 5 x 5 cm Elektrode nur 3,43 % der Menge an Platin einer kommerziellen Elektrode benötigt. Jedoch besitzt die Si-Elektrode nur eine aktive Fläche von 20 cm².

Die Gesamtfläche der Partikel lässt sich über die Anzahl, das Volumen, die Masse und die Fläche eines Partikels bestimmen. Die aktive Fläche beträgt 70,02 cm². Bei gleicher aktiver Fläche von kommerziellen Elektroden und unseren mikrostrukturierten Elektrode werden nur 12 % der Menge an Platin benötigt, die sonst zur Herstellung benötigt werden.

4.4 Weiterentwicklung und Produktumsetzung

Wir wollen die Beschichtung der Siliziumelektrode effizienter gestalten, um den Wirkungsgrad zu erhöhen und die Leistung zu verbessern. Dabei wollen

wir zum Beispiel poröses Silizium unter der Titanitridschicht abscheiden, um eine Oberflächenvergrößerung zu erhalten. Zudem sollte eine elektrisch hochleitfähige Schicht, z.B. aus ein- oder mehrlagigem Graphen auf das poröse Silizium aufgebracht werden, um den Strom in der Ebene der Elektrode zum Rand der Elektrode bzw. nach außen ableiten zu können. Ergänzend sollte diese oder eine weitere Schicht so gestaltet werden, dass - vor allem für Sauerstoff auf der Kathodenseite - der Gaszutritt deutlich verbessert werden kann.

Ein weiteres Ziel von uns ist es, auch Trägerpartikel mit Katalysatoren in ähnlicher Dicke zu beschichten. Das würde den Oberflächenverlust komplett ausgleichen. Des Weiteren wollen wir verschiedene Materialien sowohl für die Katalysatoren als auch für die Elektrode testen. Gerade der Werkstoff Graphen könnte als Grundlage für neue Elektroden dienen. Alle Schritte sollen über Prozesse der Mikroelektronik/ Photovoltaik umgesetzt werden können, da dort bereits eine gesamte Technologiebasis bereit steht, die für

dieses Anwendungsfeld genutzt werden kann, da in beiden Bereichen ähnliche Anforderungen gestellt werden.

5 Zusammenfassung

Durch unser Projekt und unsere Erfindung konnten wir nachweisen, dass es durch strukturelle Änderungen möglich ist, die Katalysatormenge in Elektroden von PEM-Brennstoffzellen deutlich zu verringern. Wir haben die dadurch entstehenden Vor- und Nachteile physikalisch erklärt und kommen zu dem Ergebnis, dass eine Leistungsfähigkeit bis zu 65% einer Graphitelektrode mit nur 3,43 % des Materialaufwands erreicht werden kann.

Durch den Einsatz von etablierten Verfahren aus der Mikroelektronik- und Photovoltaikindustrie ist es in der Zukunft vielleicht möglich, mit unserer Erfindung Brennstoffzellen deutlich kostengünstiger herzustellen als bisher.

Danksagung

Wir bedanken uns für die Unterstützung der Mitarbeiter des IHP – Leibniz-Institut für innovative Mikroelektronik.

Quellenverzeichnis

- [1] Stratis Karamanolis 2003; Brennstoffzellen – Schlüsselemente der Wasserstofftechnologie; Verlag: Vogel Fachbuch (2003); 1. Auflage, Seite 59 und 60
- [2] Martin Pehnt 2002; Energierevolution – Brennstoffzelle?; Verlag: WILEY-VCH (2002) Seite 48
- [3] Horst Stöcker; Taschenbuch der Physik (https://elearning.physik.uni-frankfurt.de/data/FB 13-PhysikOnline/lm_data/lm_324/daten/kap_12/node27.htm); Verlag: Harri Deutsch