

KEINE ZUKUNFT FÜR BRENNSTOFFZELLENFAHRZEUGE?

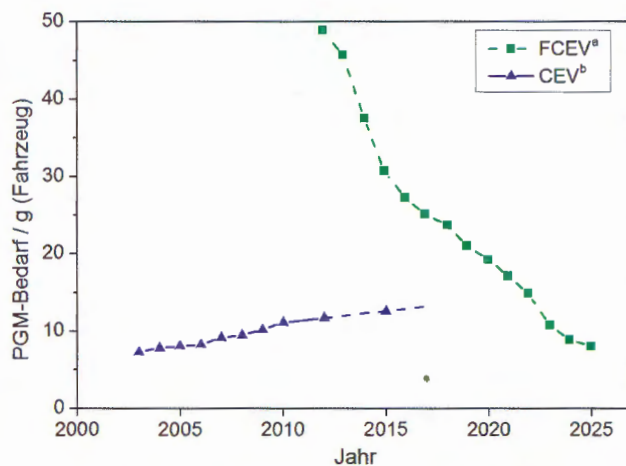
Eine Antwort auf die Roland-Berger-Studie

Die Studie von Roland Berger Strategy Consulting „Fuel Cells – A realistic alternative for zero emission?“ hat im Dezember 2013 die Wirtschaftlichkeit von brennstoffzellenbasierten Elektrofahrzeugen (FCEVs) im Hinblick auf die Markteinführung in den kommenden Jahren im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor (CEVs) untersucht. In dieser Studie wurde die Zukunftsfähigkeit von Systemen mit Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle (PEMFC) in den Jahren 2020 und 2025 untersucht und bewertet. In dieser Studie wird postuliert, dass die Kosten der Membranelektrodeneneinheit (MEA) ein Schlüsselfaktor für deren Wirtschaftlichkeit sind, wobei eben diese Kosten im Wesentlichen von dem hohen Materialpreis für die Ionomembran und den Katalysator Platin bestimmt werden. Aufgrund dieser hohen Materialpreise stellt die Studie die Wirtschaftlichkeit und somit die Erfolgsaussichten einer zukünftigen Markteinführung von FCEVs grundsätzlich in Frage. In der Studie wurden jedoch einige wichtige Aspekte, vor allem in Bezug auf die Platinmenge pro Fahrzeug, die Recyclingfähigkeit der Materialien sowie alternative PEMFC-Materialien, nicht ausreichend beachtet. Diese sind aber für eine Bewertung mitentscheidend und sollen in diesem Artikel näher erläutert werden.

PLATINBEDARF VERSCHIEDENER ANTRIEBSSYSTEME

Ein großer Vorteil von Brennstoffzellensystemen als Antriebselement in Fahrzeugen ist ihre emissionsfreie Betriebsweise, die nicht nur die globale Kohlenstoffdioxidemission (CO_2) senkt, sondern auch in Ballungszentren die Entstehung von Smog vermeidet und somit die Gesundheit und Lebensqualität der Bewohner beeinflusst. Eine Vermeidung von CO_2 -Emissionen ist bei der Verwendung von Verbrennungsmotoren nie zu erreichen, und es muss ein hoher Aufwand betrieben werden, um andere schädliche Emissionen wie Stickoxide, nicht umgesetzte Kohlenwasserstoffe und Kohlenstoffmonoxid zu verringern. Um dies zu erreichen, wird in den Abgaskatalysatoren ein hoher Gehalt an Edelmetallen (PGMs) benötigt. Hierbei kommen abhängig vom Motorentyp Platin (45 €/g), Palladium (24 €/g) und Rhodium (35 €/g) zum Einsatz¹. Deren Verwendung in Abgaskatalysatoren deckt dabei 56 Prozent des gesamten weltweiten Bedarfs an diesen PGMs². Während es bei Katalysatoren von benzinbetriebenen Fahrzeugen gelungen ist, einen großen Teil des Platins durch das günstigere Palladium zu ersetzen, bestehen die heute üblichen Katalysatoren in Dieselfahrzeugen noch immer zum größten Teil aus Platin.

In benzinbetriebenen Fahrzeugen beträgt die mittlere Zusammensetzung² ungefähr $\text{Pt}_1\text{Pd}_8\text{Rh}_1$. Die PGM-Menge in einem Fahrzeug ist hierbei sehr stark vom Hubraum abhängig und reicht von 1 g in Kleinstfahrzeugen bis hin zu 15 g in sehr stark motorisierten Fahrzeugen. Der weltweite Mittelwert liegt bei ungefähr 4 bis 5 g pro Fahrzeug³. Hingegen beträgt die Zusammensetzung² in Dieselfahrzeugen ungefähr Pt_4Pd_1 bei einer Katalysatormenge von 5 bis 10 g und einem weltweiten Mittel von 5,5 g pro Fahrzeug³⁻⁵. Bei Dieselfahrzeugen, die die Euro-6-Norm erfüllen, wird die-



^a: The impact of widespread deployment of fuel cell vehicles on platinum demand and price, Intern. Journal of Hydrogen Energy 2011, 36, 11116-11127

^b: Global PGM Outlook, RBC Capital Markets 2013, http://www.resource-capital.ch/fileadmin/research/fremde/Heinz_Isler_Juli2013/Global_PGM_Outlook_RBC_28.6.13.pdf

Abb. 1: Erwartete Entwicklung im PGM-Bedarf pro Fahrzeug für CEV und FCEV

ser Wert bei etwa 10 g liegen. Gerade hierbei ist zu erkennen, dass die benötigte Katalysatormenge zur Abgasreinigung dem Katalysatorbedarf in FCEVs, wie sie in der Studie von Roland Berger bestimmt wurde (abhängig vom Szenario 10 bzw. 16 g pro Fahrzeug), nahe kommt.

Bei der Betrachtung der Kosten für die jeweiligen Katalysatoren betragen diese im Mittel für Benzinfahrzeuge 120 bis 130 €/Fahrzeug, für Dieselfahrzeuge 220 bis 260 €/Fahrzeug und für FCEVs ungefähr 400 bis 460 €/Fahrzeug. Aufgrund der weltweit immer strenger werdenden Abgasrichtlinien ist hierbei zu erwarten, dass der Bedarf in CEVs tendenziell weiter zunimmt (Abb. 1). So werden die Richtlinien in Europa durch Euro 6 in 2014, in China durch Euro 5 in 2015 und in Indien durch BS-IV in 2015 weltweit noch einmal deutlich verschärft^{6,7}. Ein solcher Anstieg im PGM-Bedarf ist aufgrund des emissionsfreien Antriebs bei FCEVs nicht vorhanden. Stattdessen sinkt die PGM-Beladung hier sukzessive. Es ist also zu erwarten, dass sich der PGM-Bedarf in FCEVs und CEVs weiter annähert. Die Argumentation, FCEVs hätten aufgrund der hohen Platinkosten geringe Zukunftsaussichten, erscheint somit nicht gerechtfertigt.

Untersuchungen zur PGM-Verfügbarkeit und Umweltverträglichkeit der PGM-Förderung kommen zu dem Schluss, dass ausreichende Lagerstätten im Bereich des Bushveld-Komplexes in Südafrika, in Zimbabwe, in Russland, in den USA und in Kanada vorhanden sind und eine weitere Erhöhung der Förderrate, die historisch kontinuierlich ansteigend war, mit der zunehmenden Nachfrage höchst wahrscheinlich ist. Als größter Umweltfaktor wird die Wassernutzung in ariden Gegenden angegeben⁸.

RECYCLING VON PEMFC-KOMPONENTEN Das in PEMFCs verwendete Platin wird im Betrieb – wie bei Katalysatoren üblich – nicht verbraucht, und es kommt über die Lebensdauer eines Stacks nur zu einem sehr geringen Verlust die-

Abkürzungsverzeichnis:

CEV:	Fahrzeug mit Verbrennungsmotor (combustion engine vehicle)
FCEV:	Brennstoffzellenbasiertes Elektrofahrzeug (fuel cell electric vehicle)
KW:	Kohlenwasserstoff
MEA:	Membranelektrodeneinheit (membrane electrode assembly)
PEM:	Polymerelektrolytmembran (polymer electrolyte membrane)
PEMFC:	Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle (polymer electrolyte membrane fuel cell)
PFSA:	Perfluorsulfonsäure (perfluorsulfonic acid)
PGM:	Edelmetall (platinum group metal)
SPEEK:	sulfoniertes Poly(Ether-Ether-Keton)
SPI:	sulfoniertes Polyimid
SPP:	sulfoniertes Polyphenylen
SPSf:	sulfoniertes Polysulfon

ses aktiven Materials. Im Gegensatz zu Abgaskatalysatoren kommt es hier nicht zu einem massiven Gewichtsverlust des Katalysators, indem dieser mit den heißen Abgasen aus dem System ausgetragen wird. Zwar kommt es auch hier zu einer Verringerung der katalytischen Aktivität über die Zeit, diese ist aber im Wesentlichen durch die Verringerung der Katalysatoroberfläche durch Partikelwachstum, Partikelagglomeration und Wanderung von Pt-Ionen zu inaktiven Stellen in der Membran bedingt⁹. Somit ist es nach Beendigung des Lebenszyklus eines PEMFC-Stacks möglich, das eingesetzte Platin nahezu vollständig zu recyceln. Hierbei werden beispielsweise von der BASF durch neue Verfahren Recyclingraten von über 98 % erreicht¹⁰.

Neben den verwendeten PGM-Katalysatoren ist es auch möglich, das PEM-Material, das ebenfalls einen deutlichen Anteil am PEMFC-Preis einnimmt, zu recyceln. So wurde von Ion Power ein Verfahren vorgestellt, durch das eine nahezu vollständige Wiederverwertung des Ionomermaterials erreicht werden kann. Des Weiteren wurde hier gezeigt, dass bei MEAs aus diesem recycelten Material die gleiche MEA-Leistungsfähigkeit erreicht werden kann, wie dies bei neuen Membranen der Fall ist¹¹.

Hingegen kommt es in Abgasreinigungskatalysatoren von CEVs zu einem deutlichen Verlust des teuren Katalysatormaterials mit den ausströmenden, heißen Abgasen und somit zu einer Freisetzung von feinverteilten Katalysatorpartikeln in die Umwelt. Die Recyclingrate ist regional sehr verschieden und lag global in den Jahren 2011 und 2012 bei 50 bis 60 %^{3,12}. Dies wird zum einen durch den erwähnten Katalysatorverlust und zum anderen durch eine nicht effiziente Rückführung von gebrauchten Katalysatoreinheiten sowie den Export von Gebrauchtwagen in Länder mit einem unzureichenden Recyclingsystem verursacht. Die geringe Rückführung solcher Einheiten ist auf deren geringen Preis zurückzuführen, während dies bei hochpreisigen Komponenten, wie Antriebseinheiten auf PEMFC-Basis, nicht zu erwarten ist.

Neben dem rein wirtschaftlichen Aspekt des Katalysatorverlustes wird in den letzten Jahren auch die Auswirkung auf Mensch und Umwelt diskutiert, da die Emission von feinsten PGM-Partikeln, vor allem aus Dieselfahrzeugen, deutlich zugenommen hat. Die ökologischen Auswirkungen dieser Emissionen sind weitestgehend ungeklärt¹³. Auch dieser Ausstoß wird mit zunehmendem PGM-Gehalt in Abgaskatalysatoren steigen.

Die Aspekte des Platinrecyclings und dessen Auswirkungen auf die Verfügbarkeit und den Preis des Katalysa-

tormaterials in PEMFCs werden in der vorgestellten Studie nicht beachtet. Sie haben aber, neben der Vermeidung von PGM- und Abgas-Emissionen, ebenfalls einen deutlichen Einfluss auf die Zukunftsfähigkeit von FCEVs.

ALTERNATIVE PEMFC-MATERIALIEN In der von Roland Berger vorgestellten Studie beschränken sich die Autoren ausschließlich auf die Kostenanalyse von MEAs auf Basis von Perfluorsulfonsäuren (PFSA). Dieses perfluorierte Membranmaterial ist heute das Standardmaterial in Brennstoffzellensystemen, es ist jedoch nicht alternativlos. Wie in der Studie gezeigt wurde, ist die Synthese dieses Materials mit erheblichem Aufwand und hohen Kosten verbunden und wird nur von sehr wenigen Herstellern durchgeführt. Gerade dieser hohe Preis ist seit Jahren die Triebkraft für die intensive Entwicklung von sogenannten Hydrocarbon-Membranen.

Im Gegensatz zu PFSA bestehen Hydrocarbons nicht aus einem perfluorierten Backbone und können so ohne die Verwendung von fluorhaltigen Precursoren hergestellt werden. Um dennoch eine ausreichende chemische und elektrochemische Beständigkeit im Brennstoffzellenbetrieb zu gewährleisten, besitzen diese alternativen Membranmaterialien ein aromatisches Backbone. Analog zu PFSA-Membranen wird auch hier die Protonenleitung durch die Verwendung sulfonierter Seitenketten oder auch einer Sulfonierung der Backbones selbst gewährleistet. Einige dieser Materialien werden in reiner Form, als Copolymere oder Polymerblends bereits von verschiedenen MEA-Herstellern sowie in Demonstrationsfahrzeugen verwendet (Honda)¹⁴. Die Hydrocarbon-Materialien mit den höchsten resultierenden >>

33

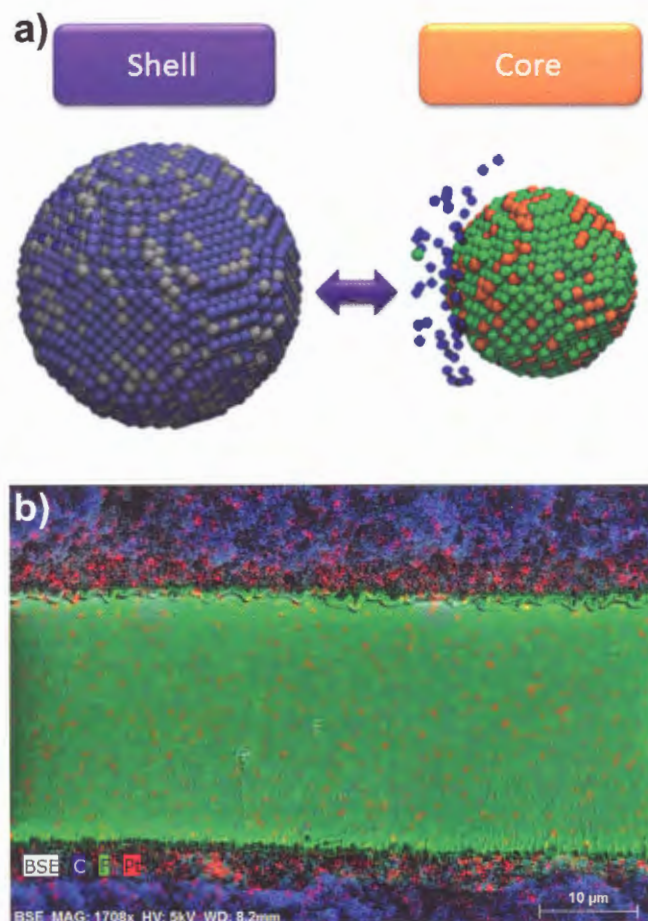


Abb. 2: (a) Aufbau eines Core-Shell-Partikels (Reprinted from ²⁰ with permission from Elsevier) und b) Ultra-Low-Loading-MEA von UNED/DLR²¹ (0,02 mg-Pt/cm²)

Leistungsfähigkeiten in der PEMFC stellen dabei die sulfonierten Formen von Polyphenylen (SPP), Polyetheretherketon (SPEEK), Polyimid (SPI) und Polysulfon (SPSf) dar^{15,16}.

Bezüglich der eingesetzten Katalysatormaterialien beschränkt sich die Studie auf die Verwendung von rußgetragertem Platin. Für eine ausreichende Leistungsfähigkeit kann Platin voraussichtlich nicht vollständig vermieden werden, aber durch die Verwendung neuer Katalysatorstrukturen sowie Legierungskatalysatoren ist eine weitere Kostenverringerung durch gesteigerte Aktivität und verringerte PGM-Beladung zu erwarten. Bezüglich der Katalysatorstrukturen zeigen beispielsweise Core-Shell-Partikel und nanostrukturierte Dünnschichtkatalysatoren eine deutlich verbesserte spezifische Aktivität bezüglich der Sauerstoffreduktion, welche die benötigte Katalysatorbeladung in PEMFCs wesentlich bestimmt¹⁷. Bei der Verwendung von Legierungskatalysatoren kann ähnlich wie bei der Entwicklung von Abgaskatalysatoren in CEVs ein Teil des Platins durch kostengünstigere Elemente ersetzt werden. Hierbei zeigen beispielsweise binäre, ternäre und quaternäre Legierungen aus Platin, Palladium, Cobalt und Eisen eine verbesserte Aktivität und eine deutliche Verringerung der Kosten, was vor allem bei Verwendung der unedlen Metalle Cobalt und Eisen leicht ersichtlich ist^{18,19}.

Durch die Verwendung dieser Materialien für Membran und Katalysator ist es somit möglich, die Kosten unter Gewährleistung der MEA-Leistungsfähigkeit weiter zu verringern, was die Zukunftsaussichten von FCEVs weiter verbessert und daher ebenfalls beachtet werden muss.

34

ZUSAMMENFASSUNG Nach unserer Meinung werden in der Studie von Roland Berger Strategy Consulting einige wichtige Aspekte bei der Betrachtung der Zukunftsfähigkeit von FCEVs nicht ausreichend beachtet. So wird zwar die benötigte Platinmenge pro FCEV herausgestellt. Es wird jedoch nicht beachtet, dass auch in CEVs ein hoher PGM-Gehalt für die Abgasreinigung notwendig ist. Dieser wird in den kommenden Jahren aufgrund strengerer Abgasnormen voraussichtlich weiter steigen, was zu einer weiteren Annäherung des PGM-Bedarfs in FCEVs und CEVs führen wird. Des Weiteren sind die zu erwartenden Recyclingraten für die verwendeten Membran- sowie Katalysatormaterialien in PEMFC-Systemen deutlich höher als im Falle von Abgasreinigungskatalysatoren von CEVs.

Ebenfalls findet sich die Entwicklung von kostengünstigen Hydrocarbon-Membranen als PEM-Material nicht in der Studie wieder. Auch die Einführung neuer Katalysatorstrukturen wie Core-Shell-Partikel und nanostrukturierte Dünnschichtkatalysatoren sowie die Entwicklung von platinarmen Legierungskatalysatoren bleiben in der Studie unbeachtet.

Alle diese Aspekte müssen nach unserer Meinung zwingend bei einer Bewertung von FCEVs berücksichtigt werden, da sie zum einen zu einer weiteren Kostenverringerung von PEMFC-Systemen führen und zum anderen den geführten Vergleich zwischen FCEVs und CEVs deutlich beeinflussen. Bezieht man diese Aspekte in die Beurteilung der Zukunftsfähigkeit von FCEVs mit ein, fällt diese deutlich positiver aus, als dies in der Studie dargestellt wird. Zweifellos sind für eine Markteinführung von FCEVs mit ökonomischer Konkurrenzfähigkeit zu CEVs noch viele Hindernisse zu überwinden und es bedarf einer Vielzahl an Weiterentwicklungen. Aber diese Systeme stellen noch immer eine der vielversprechendsten Möglichkeiten zur emissionsfreien Elektromobilität mit ausreichender Fahrzeugreichweite dar. ||

- [1] Edelmetallpreise nach www.boerse.de am 24.02.2014
- [2] Platinum 2013 – The components of autocatalyst demand, Johnson Matthey, Platinum Metals Review 2013, 57, (3), 215 www.platinum.matthey.com
- [3] PGM loading and recycling rates in autocatalysts, www.platinummetalsreview.com
- [4] Exhaustive demand for emission catalysts, Fidelity Worldwide Investment 2011
- [5] Cheaper catalyst cleans diesel-car fumes, Nature, doi:10.1038/news.2010.151
- [6] Palladium Fundamentals, Stillwater Mining Company 2012
- [7] Trends in Automotive Exhaust Aftertreatment and their Impact on Future PGM Demand, F. Rohr, Umicore, Precious Metals Conference 2012
- [8] The environmental costs of PGM mining and sustainability, B.J. Glaister et al., Minerals Engineering 2010, 23, 438-450
- [9] A review of PEM fuel cell durability, J. Wu et al., Journal of Power Sources 184 (2008) 104-119
- [10] PGM Recycling Technology Development, L. Shore, BASF Catalyst LLC, DoE Hydrogen Program Review 2008
- [11] Platinum Recycling Technology Development, S. Grot, W. Grot, Ion Power Inc., DoE Hydrogen Program Review 2008
- [12] Recycling the PGM: A European Perspective, C. Hagelüken, Umicore AG, Platinum Metals Review 2012, 56, (1), 29-35
- [13] Katalysatoren in Kraftfahrzeugen – Freund oder Feind für Umwelt und Gesundheit, U. Koller, GSF, 2004
- [14] Development of Aromatic PEM with High Conductivity and Durability for Fuel Cell, K. Goto et al., Polymer Journal 2009, 41, 2, 95-104
- [15] Cost effective cation exchange membranes, R.S.L. Yee et al., Chemical Engineering Research and Design, 2012, 90, (7), 950-959
- [16] US DOE Progress Towards Developing Low-Cost, High Performance, Durable PEMs, C. Houchins et al., Membranes 2012, 2, 855-878
- [17] Electrocatalyst approach and challenges for automotive fuel cells, K. Debe, Nature 2012, 486, 43-51
- [18] Activity benchmarks and requirements for Pt, Pt-alloy, and non-Pt oxygen reduction catalysts for PEMFCs, H.A. Gasteiger et al., Applied Catalysis 2005, 56, (1-2), 9-35
- [19] Low-platinum and platinum-free catalysts for the oxygen reduction reaction at fuel cell cathodes, A. Morozan, Energy Environ. Sci. 2011, 4, 1238-1254
- [20] Dealloying of platinum-based alloy catalysts, R. Callejas-Tovar et al., Electrochimica Acta 2013, 101, 326-333
- [21] Peak utilization of catalyst with ultra-low loaded PEMFC electrodes prepared by the electrospray method, S. Martin et al., Journal of Power Sources 2013, 229, 179-184



Autoren:

Dr. Jens Mitzel
→ Jens.Mitzel@dlr.deProf. Dr. K. Andreas Friedrich
→ Andreas.Friedrich@dlr.debeide vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)
Institut für Technische Thermodynamik
Elektrochemische Energietechnik