



Brennstoffzellen-System für einen DV-Camcorder

A. Bilsing, E. Born, B. Bresseler, A. Castell, Y. Congar, U. Groos, K. Hachmöller, R. Hahn, A. Hakenjos, C. Hebling, A. Kauffmann, M. Krumm, U. Maurieschat, M. Richter, A. Schmitz, S. Schöning, J. Schumacher, M. Schwan, S. Schwerzel, H. Uzun, S. Wagner, M. Walch, M. Zedda

Einleitung



Die Fraunhofer-Initiative Mikrobrennstoffzelle hat in einer Demonstrationsanwendung ein miniaturisiertes Komplettsystems auf Basis einer PEM-Brennstoffzelle realisiert. Für dieses System wurden Fertigungsverfahren für eine Serienherstellung entwickelt und demonstriert. Unter der Leitung des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg, wirkten folgende Partner an der Entwicklung mit:

- Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT, Aachen
- Fraunhofer Center for Manufacturing Innovation CMI, Boston
- Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT, Pfinztal
- Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration IZM, Berlin, zusammen mit dem Münchener Institutsteil IZM-M
- Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM, Bremen

Das Projekt wurde von der Fraunhofer-Gesellschaft finanziert.

Zusammenfassung

Die Fraunhofer-Initiative Mikrobrennstoffzelle hat als erster Akteur weltweit ein komplettes miniaturisiertes Brennstoffzellen-System für einen digitalen Camcorder aufgebaut und der Öffentlichkeit erfolgreich präsentiert. Gleichzeitig konnte die Kompetenz zur Fertigung von Bipolarplatten mit herkömmlichen als auch innovativen Polymermaterialien sowie die automatisierte Stackmontage demonstriert werden. Damit kann die Fraunhofer-Initiative Mikrobrennstoffzelle sämtliche erforderlichen Kompetenzen von der Prototypentwicklung bis hin zur Überführung in die Serienfertigung anbieten. Dies gelang durch Bündelung der Kompetenzen innerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft:

- Die Brennstoffzelle konnte gegenüber herkömmlichen Systemen in ihren Dimensionen weiter miniaturisiert werden. Dabei wurde die Leistungsfähigkeit gleichzeitig gesteigert. Diese Entwicklung wurde unterstützt durch Erkenntnisse aus Simulation und Charakterisierung.
- Die Konzentration auf die Systemtechnik führte zu einem ersten funktionstüchtigen Gesamtsystem inklusive Speicher, Peripherie und Regelungstechnik.
- Materialeitig wurden vielversprechende leitfähige Polymere entwickelt, die Kostenvorteile in einer Serienproduktion erwarten lassen.
- Erstmals werden der Öffentlichkeit Konzepte zur Serienfertigung und dem Aufbau von Produktionslinien vorgestellt. Damit wird ein Markteintritt portabler Brennstoffzellen entscheidend erleichtert.

Technische Ergebnisse

Die erzielten Fortschritte werden anhand einzelner Aspekte zusammenfassend erläutert.

Brennstoffzelle



Der Brennstoffzellen-Stack ist aus 15 Zellen aufgebaut mit Abmessungen von je $50 \times 25 \times 1 \text{ mm}^3$. Der Stack erzielte im Laborbetrieb eine maximale Leistung von 15 W, im Feldeinsatz werden 10 W sicher erzielt. In der Vermessung der Einzelzelle wurde eine maximale Leistung von 900 mW bei 0,5 V und

1,8 A realisiert. Die Leistungsdichte beträgt maximal 120 mW/cm^2 bei einer Stromdichte von 260 mA/cm^2 . Eine entscheidende Verbesserung zugunsten der Miniaturisierung war die Entwicklung eines geklebten und geklemmten Stacks. Dabei wird der Anpressdruck nicht wie bisher über Schraubverbindungen aufgebracht, sondern durch vorgespannte Klemmen. Neben der Volumen- und Gewichtsreduzierung wird auch die Flowfield-Geometrie wesentlich vereinfacht. Die Dichtung des Stacks gegenüber Wasserstoff wird über die Klebung realisiert. Dazu waren intensive Klebeversuche notwendig.

Materialtechnik



Hinsichtlich einer kostengünstigen Fertigung der Brennstoffzelle ist die Entwicklung von leitfähigen und leicht in einer Serienfertigung verarbeitbaren Polymermaterialien wünschenswert. Zunächst wurden Versuche zu Herstellungsverfahren und zur Optimierung von Polymer-Ruß-Mischungen bzw. Polymer-Graphit-Mischungen unternommen. Dazu wurden verschiedene Materialien mit unterschiedlichen

Mischtechniken verarbeitet und auf ihre Leitfähigkeiten sowie die Einsatzfähigkeit in Heißpräge-, Heißpress- oder Spritzgussverfahren untersucht. In diesem Zusammenhang wurden die notwendigen Werkzeuge konstruiert und hergestellt. Die Versuchsergebnisse zeigten die Machbarkeit auf:

- der spezifische Widerstand konnte auf $0,07 \text{ Ohm} \cdot \text{cm}$ verringert werden und die spezifische Leitfähigkeit von 4 S/cm auf 14 S/cm verbessert werden.
- die Materialien konnten im Heißpress-, Heißpräge-, Strangablege- und Spritzgussverfahren verarbeitet werden.

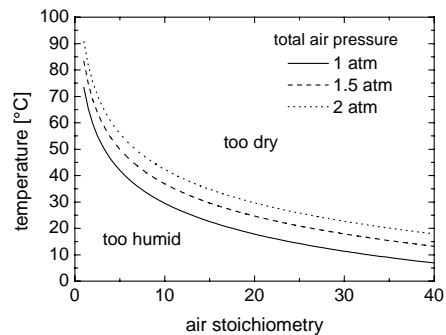
Herkömmliche Graphitmaterialien erreichen zwar eine etwas höhere Leitfähigkeit, sind aber nicht für formgebende Herstellungsverfahren geeignet, wie sie für kostengünstige Serienprozesse gewünscht werden. Da der spezifische Widerstand des Bipolarplattenmaterials jedoch gegenüber den Kontaktwiderständen zwischen Bipolarplatte und Diffusionsschicht bzw. zwischen Diffusionsschicht und Membranelektrodeneinheit gering ist, wird der Gesamtverlust aufgrund des Polymermaterials nur ca. 10% betragen. Im Gegensatz dazu sind erhebliche Kosteneinsparungen zu erwarten.

Dichtungstechnik



Zur Dichtung der Brennstoffzelle wurde ein Klebstoff identifiziert, der die beiden Gasseiten sicher und dauerhaft gegeneinander dichtet. Dieser Klebstoff ist für den Einsatz in einer automatisierten Montageeinheit geeignet.

Betriebsführung / Funktionen



Das Brennstoffzellen-System kann einen Camcorder betreiben und die Lastspitzen von 9 W bei 8 V abpuffern. Der durchschnittliche Energieverbrauch des Camcorders liegt je nach Nutzerverhalten zwischen 4 W und 5 W. Der Brennstoffzellen-Stack konnte ohne Lüfterregelung bereits über 100 min betrieben werden. Beim Betrieb entstehen im Stack Temperaturen von ca. 50°C, die sich jedoch nicht schädlich auf den weiteren Betrieb auswirken.

Systemtechnik



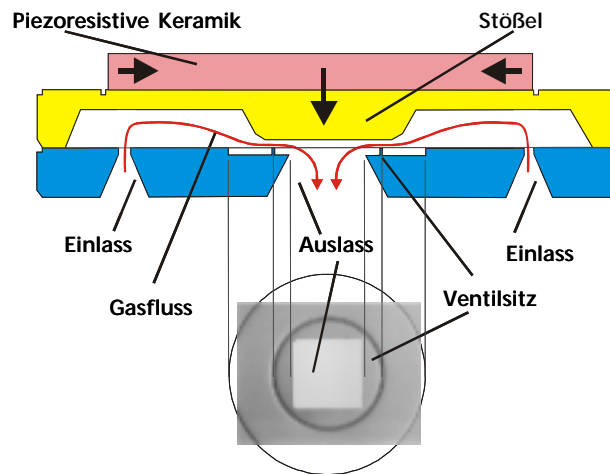
Es wurde eine Schaltung entwickelt, die das Betriebsverhalten der Brennstoffzelle an die Erfordernisse für den Einsatz als Batterieersatz des Camcorders anpasst. Der Schwerpunkt der Betrachtung wurde auf die Spannungsstabilisierung und den Überspannungsschutz gelegt. Als Grund-

lage für die Berechnungen wurde einerseits das Lastprofil des Camcorders und andererseits die U-I-Kennlinie einer Brennstoffzelle benutzt. Die Ablaufsteuerung wurde so realisiert, dass zum Starten des Systems zunächst mit Hilfe einer Knopfzelle ein normally-closed Mikroventil geöffnet wird und Wasserstoff aus dem Metallhydridspeicher in die Brennstoffzelle strömt. Das Mikroventil wird nach einem patentierten Prinzip ab Unterschreiten einer unteren Druckgrenze auf der Anode geöffnet und bei Überschreiten einer oberen Druckgrenze wieder geschlossen. Ei-

ne Lüfterregelung sorgt einerseits für eine ausreichende Sauerstoffversorgung der Kathode, andererseits für einen angemessenen Feuchteaustrag. Die Wärmeführung der Brennstoffzelle wird neben der Lüfterregelung durch eine thermische Kopplung von Metallhydridspeicher und Brennstoffzellen-Stack unterstützt. Ein hocheffizienter DC-DC-Wandler (Tiefsetzsteller) mit einem Wirkungsgrad über 95% erzeugt aus der Stackspannung, die in Abhängigkeit vom Betriebspunkt zwischen 7 V und 14 V schwankt, eine konstante Ausgangsspannung von 6 V bei einer Leistung von 8 W. Die Regelung wurde in kostengünstiger SMD-Bauweise umgesetzt.

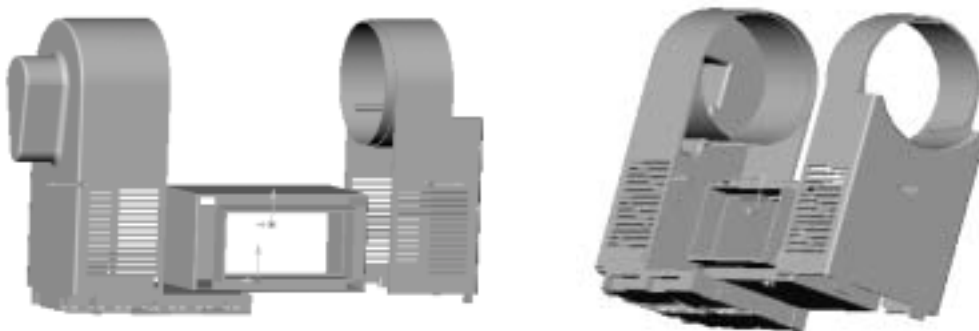
In Produkten ist ein zuverlässiger Betrieb des Brennstoffzellen-Systems unbedingt erforderlich. Die Gewährleistung dessen kann nur durch ein gutes Verständnis des technischen System-Verhaltens, der Anforderungen durch das Produkt und einer daraus resultierenden Systemsteuerung oder –regelung erfolgen. Dazu wurde ein 56-Kanal-Messplatz mit einer programmierbaren Regelung zur Bestimmung der elektrischen Parameter des Brennstoffzellen-Stacks bzw. des Gesamtsystems unter verschiedenen Einsatzbedingungen und Lastwechseln in Betrieb genommen. Außerdem wurde ein Klimaschrank mit Sicherheitsausstattung für Wasserstoff angeschafft, der für Langzeitversuche unter verschiedenen Klimabedingungen herangezogen werden kann. Des Weiteren wurde zur mikroskopischen Bestimmung der charakteristischen Kenngrößen innerhalb der Brennstoffzelle ein Teststand zur ortsaufgelösten Messung entwickelt und aufgebaut. Parallel dazu wurden intensive Aktivitäten zur theoretischen Modellbildung mit Hilfe von Programmen zur Strömungssimulation gestartet. Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen konnten neue Erkenntnisse hinsichtlich einer optimierten Luftanströmung liefern.

Peripheriebauteile



Das bisher eingesetzte Mikroventil weist eine etwas zu hohe Leckrate auf und ist störungsanfällig. Deshalb wurde ein Mikroventil entwickelt, das die Spezifikation einer sehr geringen Leckrate erfüllt. Aus Zeitgründen wurde diese Entwicklung zunächst für ein normally-open Ventil durchgeführt.

In Zukunft kann diese Entwicklung hinsichtlich eines normally-closed Mikroventils fortgeführt werden. Des Weiteren stehen Mikropumpen für die Luft- oder Methanolzufuhr bei Direktmethanolbrennstoffzellen zur Verfügung, die je nach Bedarf angepasst werden können.



Es wurde ein funktionsintegriertes und montageoptimiertes Gehäuse entwickelt und für erste Präsentationen durch Rapid-Prototyping umgesetzt. Das Gehäuse sorgt für eine Aufnahme der beiden Lüfter, eine optimierte Luftanströmung und ermöglicht die Integration einer thermischen Kopplung von Metallhydridspeicher und Brennstoffzelle.

Fertigungstechnik

Zunächst wurden geeignete Technologien zur Prototypenherstellung einerseits und Serienherstellung andererseits untersucht. Werkstoff und Geometrie der Bipo-

larplatten wurden im Laufe der Entwicklung hinsichtlich der Leistungsfähigkeit der Brennstoffzelle iterativ an die neuesten Erkenntnisse des Forschungsteams angepasst. Aus diesem Grund wurden für die Prototypenentwicklung Herstellungsverfahren identifiziert, die sich durch eine hohe Flexibilität und schnelle Umsetzbarkeit auszeichnen. Darüber hinaus wurde das Ziel verfolgt, den Anforderungen einer Serienproduktion gerecht zu werden. Bereits bei der Herstellung der Prototypen wurden daher zeitparallel verfügbare Produktionsverfahren für die Serienproduktion erprobt.

Grundsätzlich sind für die Technologieauswahl das zu verarbeitende Material, die Produkt- sowie die Prozesseignung zu berücksichtigen. Für die Bearbeitung der Bipolarplatten aus den in Frage kommenden Materialien (Graphit, Kunststoff, Edelstahl, Titan) wurden zunächst folgende Technologien recherchiert: Mikroschleifen, Ultraschallschwingläppen, Drahtläppen, Drahttrennschleifen, Mikrofräsen, 3D-Printing, Laserstrahlabtragen, Mikrostereolithographie, Lasersintern, Mikroumformtechnik, Pulverspritzgießen, Mikro-Funkenerosion, Mikrospritzgießen, Heißpressen und Heißprägen. Hinsichtlich der Produkteigenschaften wurde im nächsten Schritt betrachtet, ob durch die jeweilige Technologie die filigranen Strukturelemente des Gasfeldes bei extrem geringen Plattendicken realisiert werden können. Eine hohe Prozesseignung weisen Technologien auf, die gut automatisierbar sind und aus möglichst wenigen Prozessstufen bestehen. Produktionskosten sowie die erforderlichen Produktionsdauern sollten so gering wie möglich ausfallen. In Hinblick auf eine kurzfristige Technologieeinführung wurde außerdem die bis heute erreichte Prozessbeherrschung bewertet.

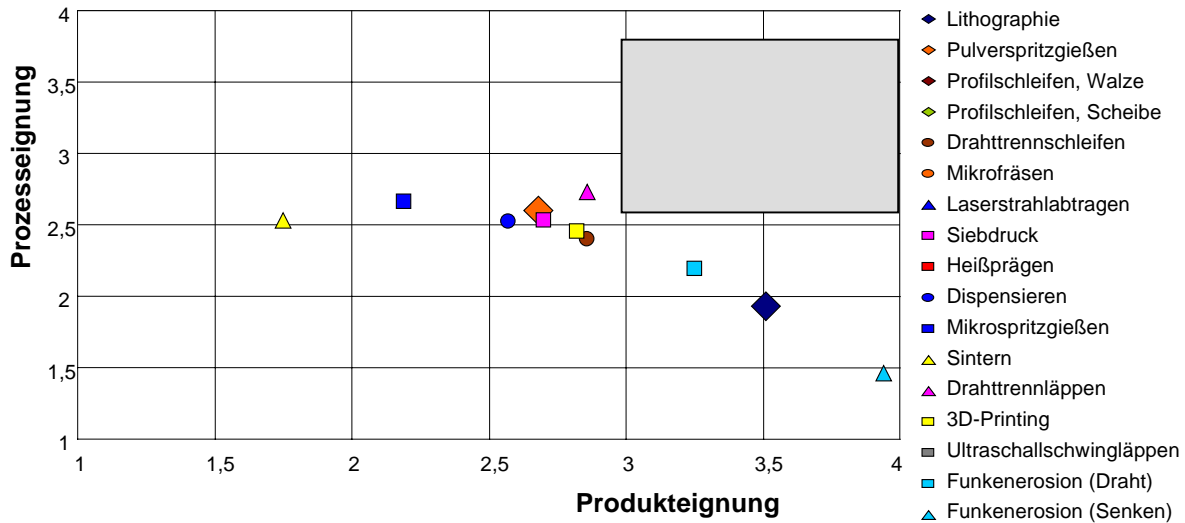


Abbildung 1: Technologieportfolio exemplarisch für Graphitwerkstoffe

Die Portfoliodarstellung verdeutlicht die Ergebnisse dieser Bewertungen anhand der gewichteten Kriterien für die Werkstoffgruppe Graphit. Auf den Achsen sind Produkt- und Prozesseignung dargestellt. Insbesondere Laserstrahlabtragen, Profilschleifen, Mikrofräsen und Ultraschallschwingläppen weisen hohe Prozesseignungen auf. Durch lithographische Prozesse und Funkenerosion sind gute Produkteigenschaften zu erzielen. Für die Verarbeitung von Werkstoffen auf Kunststoffbasis sind dagegen das Heißpressen, das Heißprägen und das Spritzgießen am besten geeignet.

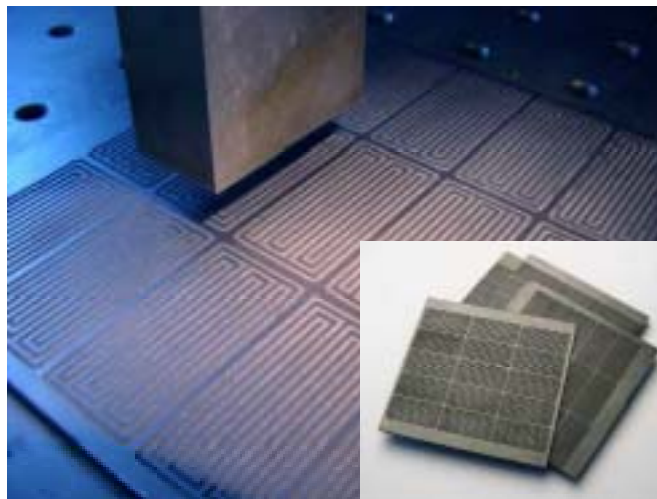
Mikrofräsen erzielt hinsichtlich der Erzeugung der gewünschten Produkteigenschaften eine gute Bewertung, weist jedoch eine weniger hohe Prozesseignung auf.

Für die Werkstoffgruppen Edelstahl und Titan, die sich aufgrund Ihrer Materialeigenschaften grundsätzlich ebenfalls für den Einsatz als Bipolarplatten in Brennstoffzellen eignen, wurde ebenfalls eine entsprechende Analyse durchgeführt. Auch hier wurden verschiedene Verfahren identifiziert, die eine Mikrostrukturierung der Platten erlauben. Fazit der Analyse war jedoch, dass keines der gefundenen Verfahren eine technologisch angemessene, wirtschaftlich effiziente Herstellung von Mikrobipolarplatten aus diesen Metallen erlaubt. Zudem qualifizieren sich

Kunststoff- und Graphit-Compound-Materialien zudem besonders für portable Anwendungen, da ihre geringere Dichte zu einer deutlichen Gewichtsersparnis führt. Bei der wirtschaftlichen Betrachtung wurde insbesondere geprüft, ob die jeweilige Technologie für die Serienproduktion (mind. 160.000 Bipolarplatten pro Jahr) geeignet ist. Dabei wurden die Kosten für Investitionen, Werkzeuge, Material, Raum- und Personal sowie für den Ressourcenverbrauch berücksichtigt und auf die Selbstkosten umgelegt.

Technologie
Ultraschallsenkbearbeitung

Randbedingungen
120 Einsenkvorgänge
 $v_{ra} = 0,6 \text{ mm/min}$
Strukturtiefe 300 μm



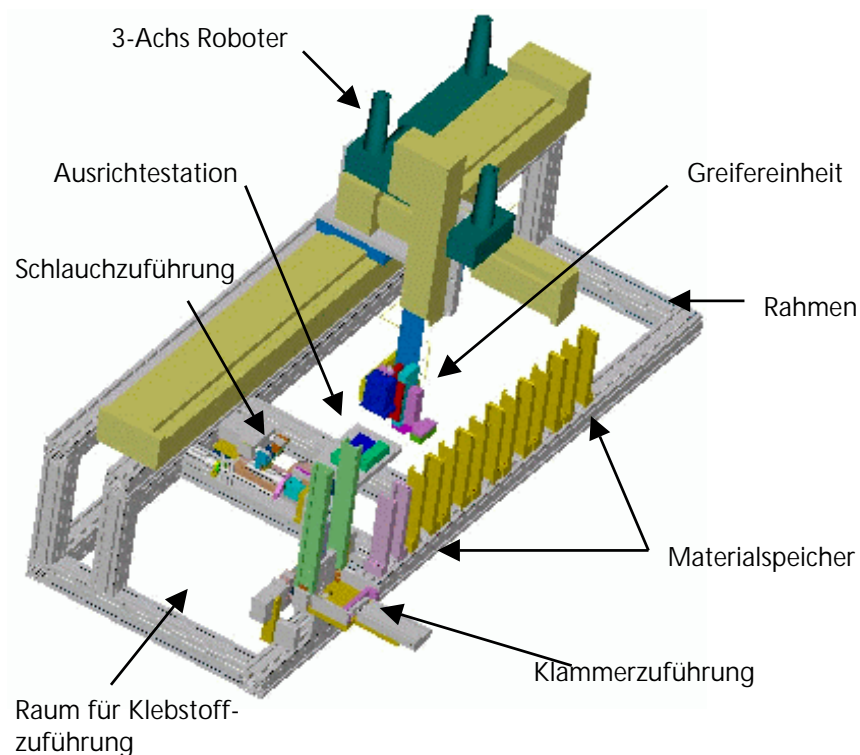
Abhängig von verschiedenen Flowfield-Geometrien wurden für die Werkstoffe Graphit-Compound und Edelstahl unterschiedliche Fertigungsmöglichkeiten untersucht und bewertet. Zur Herstellung von Prototypen eignet sich das Mikrofräsen. Mit diesem Verfahren können flexibel veränderte Geometrien in hoher Genauigkeit und Qualität gefertigt werden. Für die Serienfertigung wurden das Ultraschallschwingläppen bei komplexen Geometrien, sowie das Laserstrahlabtragen und das Profilschleifen identifiziert. Wie bereits angesprochen werden für entsprechende neue Werkstoffe die Heißpräge- und Heißpressverfahren favorisiert. Alle Verfahren zeichnen sich durch kostengünstige Herstellung und bis auf das Profilschleifen flexible geometrische Formgebung aus. Dies qualifiziert sie insbesondere für eine Produkteinführung, bei der mit häufig wechselnden Designs gerechnet werden muss.

Stackmontage



Zur Montage des Stacks wurde eine automatisierte Einheit aufgebaut. Das Konzept erfüllt die Anforderungen einer flexiblen Anlage, so dass schnell auf veränderte Bauteile und Komponenten der Brennstoffzelle eingegangen werden kann. Die Steuerung erfolgt über PC. Mit Hilfe der Montageeinheit kann

ein Stack in ca. 12 min aufgebaut werden gegenüber 1 Tag bei manueller Herstellung. Des weiteren wird die Qualität vor allem der Abdichtung erheblich verbessert.



Die beschriebenen Module sind in einem rein sequentiell ablaufenden Konzept zusammengesetzt. Bei der Gestaltung der Module wurde auf größtmögliche Vereinheitlichung der Module geachtet, um sowohl den Fertigungs- und Wartungs-

aufwand gering zu halten als auch eine einfache Erweiterung und Anpassung der Montageeinheit für mögliche Designänderungen zu gewährleisten. Die Handhabungsvorgänge werden mit einem kartesischen Dreiachs-Roboter umgesetzt. Dieser verfährt sowohl den Multifunktionsgreifer als auch die Mischdüse zur Klebstoffaufbringung. Der Multifunktionsgreifer nimmt die zu montierenden Bauteile in den Bauteilspeichern auf und führt sie der zentralen Ausrichtestation zu, wo die Bauteile an Referenzkanten ausgerichtet werden. Von dort werden die Einzelteile der Montagestelle zugeführt. Hier werden die Bauteile aufeinander gestapelt und der Klebstoff aufgebracht. Mit Hilfe der Schlauchzuführeinheit wird der Wasserstoffschlauch in die Bodenplatte des Brennstoffzellenstacks montiert. Nachdem ein kompletter Stack bestehend aus Kupferplatten, Bipolarplatten, Diffusionsschichten, MEAs und Wasserstoffschlauch zusammengesetzt ist, wird dieser vom Greifer aufgenommen und zur Klammerzuführeinheit gebracht. Dort werden zwei Metallklammern montiert, die den notwendigen Betriebsdruck auf den Stack umsetzen.

Kostenabschätzung

Die Kostenanalyse zeigte, dass eine Serienproduktion zu einem mit dem Li-Ionen-Akku vergleichbaren Preis führen könnte. Zur Markteinführung wird eine Nischenstrategie empfohlen, bei der zunächst Industriemärkte (z.B. kabellose Messtechnik) oder definierte Consumermärkte (Ausstattung einzelner Unternehmen mit Brennstoffzellen-Systemen) adressiert werden. Dies erleichtert die Lösung der Infrastrukturfrage für Wasserstoff. Erst in einem zweiten Schritt ist die breite Markteinführung für Consumer sinnvoll.

