



Produktionsverfahren von Brennstoffzellen und -systemen

16

Heiner Hans Heimes, Achim Kampker, Benjamin Dorn, Christoph Schön, Sebastian Hagedorn, Philipp Reims und Moritz Müller-Roden

Die Wertschöpfungskette von Brennstoffzellensystemen kann im Wesentlichen in drei übergeordnete Schritte unterteilt werden. Im ersten Schritt werden die Komponenten der Brennstoffzelle hergestellt, die den Kern des elektrochemischen Systems bilden. Die Produktion dieser Komponenten wird in Abschn. 16.1 erläutert. Im zweiten Schritt erfolgt die

H. H. Heimes

Mitglied der Institutsleitung, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: H.Heimes@pem.rwth-aachen.de

A. Kampker

Universitätsprofessor, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: A.Kampker@pem.rwth-aachen.de

B. Dorn

Oberingenieur, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: b.dorn@pem.rwth-aachen.de

C. Schön

E-Mobility Innovation Manager, LKQ Europe, Zug, Schweiz

E-Mail: Christoph.Schoen@lkqeuropa.com

S. Hagedorn (✉)

Gruppenleiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: s.hagedorn@pem.rwth-aachen.de

P. Reims · M. Müller-Roden

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: p.reims@pem.rwth-aachen.de; moritz.mueller-roden@rwth-aachen.de

Fertigung des Brennstoffzellen-Stacks, innerhalb dessen die Komponenten zu Zellen assembliert und in Reihe verschaltet werden. Dieser Produktionsprozess ist Gegenstand von Abschn. 16.2. Abschließend wird in Abschn. 16.3 der dritte Schritt beschrieben: die Assemblierung des Brennstoffzellensystems.

16.1 Herstellung der Stack-Komponenten

Die Komponenten des Brennstoffzellen-Stacks bestehen im Wesentlichen aus der Bipolarplatte (BPP), der Membran-Elektroden-Einheit (MEA) sowie weiteren Komponenten wie Stromkollektoren und Endplatten. Im Folgenden werden die Herstellungsprozesse der einzelnen Komponenten detailliert beleuchtet.

16.1.1 Produktion von Bipolarplatten

Metallische Bipolarplatten durchlaufen in der Regel sechs Bearbeitungsschritte, die in Abb. 16.1 dargestellt sind. Nach Aufbringung einer Korrosionsschutzschicht zur Lebensdauerverlängerung werden die herstellerepezifischen „Flowfields“ durch einen Umformprozess in das Metall eingebracht. Auf die anschließende Vereinzelung der Bandware folgt ein Fügeprozess, bei dem zwei Bipolarplattenhälften jeweils an ihrer Rückseite verbunden werden. Der dadurch entstandene „Innenraum“ der Bipolarplatten führt später das Kühlmedium, das für den hohen Wärmeabtransport verantwortlich ist. Die entstandene Fügeverbindung wird innerhalb eines Qualitätssicherungsprozesses auf Dichtheit geprüft. Abschließend erfolgt die Aufbringung einer kunststoffbasierten Dichtungsschicht (Flowfield-Dichtung) auf dem äußeren Rand der Bipolarplattenvorderseite. Im Folgenden werden die prozesstechnischen Details der beschriebenen Fertigungsfolge betrachtet.

Beim Beschichtungsprozess metallischer Bipolarplatten kommt die physikalische Gasphasenabscheidung („Physical Vapor Deposition“ – PVD) zum Einsatz. Das von Fremdpartikeln auf der Oberfläche befreite Bipolarplatten-Rohmaterial – im Folgenden „Substrat“ genannt – wird einer mit Argon gefüllten Vakuumkammer zugeführt. Innerhalb dieser Vakuumkammer befindet sich das Beschichtungsmaterial in festem Aggregatzustand – im Folgenden als „Target“ bezeichnet – zusammen mit einer positiven Elektrode oberhalb des Substrats. Unterhalb des Substrats befinden sich Magnetkörper in spezifischer Anordnung

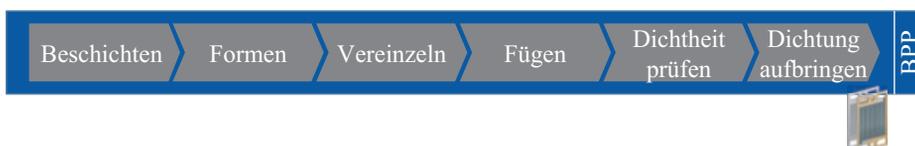


Abb. 16.1 Prozessschritte zur Herstellung von Bipolarplatten. (Vgl. Kampker et al. 2020, S. 5)

sowie eine negative Elektrode. Bei Prozessbeginn bildet sich durch Anlegen einer elektrischen Spannung zwischen den beiden Elektroden ein elektrisches Feld, das zu einer Ionisierung des Argons führt. Die entstandenen Ar^+ -Ionen lösen Atome des Targets, die in Richtung der Oberfläche des Substrats beschleunigt werden und dort die geforderte Korrosionsschutzschicht bilden. Nach Abschluss des Verfahrens und einer zerstörungsfreien Inline-Qualitätsprüfung gelangt die beschichtete Bandware in den Umformprozess.

Für die Einbringung der Flowfields auf die BPP-Außenseite und der Kühlmittelkanäle auf die BPP-Innenseite kommt innerhalb des BPP-Umformprozesses meist eine der beiden alternativen Prozesstechnologien „Sheet-Hydroforming“ und „Stanzen“ zur Anwendung. Beim Sheet-Hydroforming wird das Bandmaterial durch ein mit Hochdruck (rund 1000 bis 4000 bar) aufgebrachtes Fluid auf eine Matrize gepresst und somit umgeformt.¹ Der Prozess bietet eine hohe Umformqualität bei erhöhten Taktzeiten.² Der Stanzprozess findet meist mehrstufig statt und bringt die gewünschten Geometrien per Umformwerkzeug in das Rohmaterial ein.³ Vorteil des Stanzumformens ist eine hohe Prozessgeschwindigkeit.⁴ Auf die Einbringung der Flowfields folgt die Vereinzelung der Bandware, sofern dies noch nicht parallel mit dem Umformen geschehen ist.

Innerhalb des Fügeprozesses werden jeweils zwei halbe Bipolarplatten auf ihrer Kühlmittelseite miteinander verbunden. Dies geschieht zunächst durch eine Positionierung und gegebenenfalls Fixierung der beiden Komponenten, woraufhin über den äußeren Umfang per Laserschweißverfahren eine Schweißnaht erzeugt wird. Ist der Fügeprozess abgeschlossen, wird die Dichtheit des Innenraums der Bipolarplatte geprüft.

Für die Dichtheitsprüfung der Bipolarplatten existieren unterschiedliche Verfahren, die sich unter anderem durch das Prüfmedium, die Prüfdauer und den Prüfgrenzwert unterscheiden. Beispielsweise kann eine Akkumulationsprüfung unter Verwendung von Helium oder eine Vakuumprüfung unter Verwendung von Luft als Prüfgas erfolgen.⁵ Ausschlaggebend bei der Wahl einer passenden Prüfmethode sind die erforderlichen Prüfgenauigkeiten, die der Stack-Hersteller vorgibt. Nach einer erfolgreichen Dichtheitsprüfung wird die Flowfield-Dichtung auf die BPP-Außenseiten appliziert.

Die Aufbringung der Flowfield-Dichtungsschicht auf die Ober- sowie Unterseite der Bipolarplatte kann per Siebdruckverfahren oder Dispenser ausgeführt werden. Muss sich die Bipolarplatte beim Siebdruckverfahren unterhalb eines Schablonenträgers befinden, kann die Flowfield-Dichtung per Dispenser auch unter flexiblen Freiheitsgraden aufgebracht werden. In beiden Fällen müssen im Laufe des Applikationsprozesses beide Seiten der Bipolarplatte zugänglich gemacht werden. Die Dichtungsapplikation stellt den letzten Schritt der Bipolarplattenfertigung dar.

¹Vgl. Kampker et al. 2020, S. 20; Vgl. Bell et al. 2020, S. 791.

²Vgl. Koc et al. 2009, S. 1774.

³Vgl. Alo et al. 2019, S. 928.

⁴Vgl. Institute of Electrical and Electronics Engineers et al. 2010, S. 288.

⁵Vgl. Vinogradov et al., S. 100.

16.1.2 Produktion von Membran-Elektroden-Einheiten

Die Membran-Elektroden-Einheit entsteht durch die Verbindung einer katalysatorbeschichteten Membran (CCM) mit zwei Gasdiffusionsschichten (GDL).⁶ Die zugehörigen Bearbeitungsschritte sind Abb. 16.2 zu entnehmen. Dieser Verbindungsprozess erfolgt über das sogenannte Heißpressverfahren. Derzeit meist stückweise realisiert, entwickeln sich die Forschungsbestrebungen hin zu einem kontinuierlichen Rolle-zu-Rolle-Verfahren.⁷ Die Herstellung der katalysatorbeschichteten Membran mit dem sogenannten Decal-Verfahren und die Fertigung der Gasdiffusionsschicht – basierend auf einem klassischen Papierherstellungsprozess – werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

16.1.3 CCM

Durch den Mischprozess werden unter anderem die Materialverteilung und die Viskosität des Katalysator-Slurry für die Brennstoffzelle beeinflusst. Im Rahmen des Mischvorgangs werden das Katalysatorpulver, Ionomer, Lösungsmittel und gegebenenfalls weitere Produkte gerührt oder per Ultraschall dispergiert. Dabei ist es notwendig, dass sämtliche Katalysatorpartikel gleichmäßig in Kontakt mit den anderen Mischkomponenten kommen. Ist darüber hinaus die Viskosität des gemischten Slurry zu gering, besteht die Gefahr der Substratdurchdringung. Ist die Viskosität zu hoch, können Schwierigkeiten in der gleichmäßigen Materialverteilung oder beim Trocknen auftreten.⁸ Sobald der gewünschte Materialzustand durch den Mischprozess eingestellt ist, folgt die Substratbeschichtung.

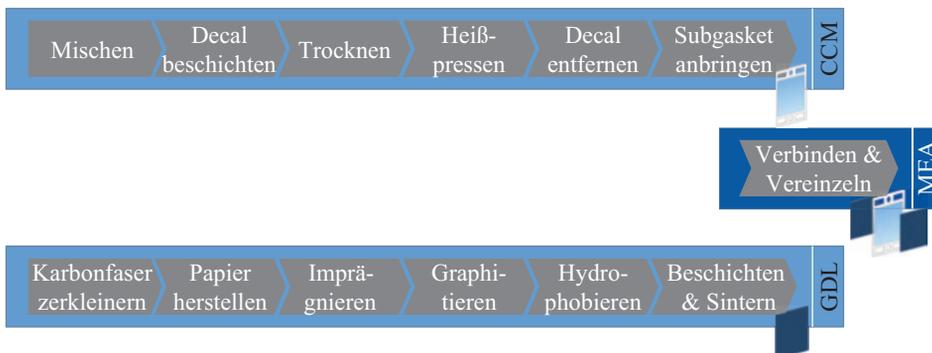


Abb. 16.2 Prozessschritte zur Herstellung von Membran-Elektroden-Einheiten. (Vgl. Kampker et al. 2020, S. 5)

⁶Vgl. Shahgaldi et al. 2018, S. 1023.

⁷Vgl. Mayyas und Mann 2019, S. 512.

⁸Vgl. Zhang 2008, S. 893.

Nach aktuellem Stand der Technik erfolgt die Substratbeschichtung per Decal-Verfahren. Aufgrund der hydrophilen Eigenschaften der Polymermembran wird das viskose Katalysator-Slurry zunächst auf einer Trägerfolie – dem sogenannten Decal (Aufkleber) – aufgebracht. Der Beschichtungsprozess kann per Schlitzdüse, Sprühverfahren oder Rakel erfolgen. Das beschichtete Decal, in der Regel aus Polytetrafluorethylen (PTFE) bestehend, wird im Anschluss einem Trocknungsprozess unterzogen, bei dem Lösemittel aus dem Katalysator-Slurry ausgedampft und das Material verfestigt wird.⁹ Beim anschließenden Heißpressverfahren wird bei einer Temperatur von etwa 140 °C die Katalysatorschicht vom Decal auf die Polymermembran übertragen. Um eine Produktion in Großserie zu gewährleisten, sollte dieses Verfahren in einem kontinuierlichen Prozess stattfinden. Im Anschluss an die Übertragung wird das Decal möglichst ohne Slurry-Rückstände entfernt. Es folgt die Applikation des Subgaskets.

Das Subgasket aus PET-Material wird im industriellen Maßstab beispielsweise in Anlehnung an ein Patent der Firma 3M über ein Rolle-zu-Rolle-Verfahren um die MEA appliziert.¹⁰ Zunächst werden CCM-Sheets auf die Unterseite des Subgasket-Bandmaterials gebracht. Im Anschluss erfolgt die Applikation eines zweiten Subgasket-Bands auf die CCM-Sheets. Nach Entfernen von überschüssigem Subgasketmaterial im Bereich der aktiven Fläche werden dort GDLs aufgebracht. Es entsteht Fünf-Lagen-MEA-Bandmaterial, das nach Vereinzelung und einem erneuten Heißpressvorgang in die auszuliefernden MEAs überführt wird. Die Herausforderung bei diesem Verfahren besteht in der korrekten Platzierung und Ausrichtung der CCM, Subgaskets und GDLs im Verhältnis zueinander, was eine komplexe Anlagentechnologie bedingt.¹¹

16.1.4 GDL

Die Gasdiffusionslage (GDL) besteht aus Karbonpapier. Nach der Zerkleinerung von PAN-Fasern erfolgt die Verarbeitung zu Papier.¹² Das etwa sechs bis zwölf Millimeter lange PAN-Schnittgut durchläuft anschließend die Verarbeitung zu einer Suspension. Daraufhin wird das Material über unterschiedliche Rollenführungen zu Nassvlies verpresst und getrocknet sowie kalandriert.¹³

Eine Nachbehandlung des Karbonpapiers mit duroplastischem Harz erzeugt die gewünschte Materialfestigkeit sowie Porosität. Nach Aufbringen einer Vorspannung und einer Vorbenetzung erfolgt das Eintauchen in das Harzbad, wobei der Harzgehalt durch

⁹Vgl. Kampker et al. 2020, S. 8.

¹⁰Vgl. Eric J. Iverson et al., S. 1.

¹¹Vgl. James et al. 2018, S. 140.

¹²Vgl. Vince Kelly, S. 2 f.

¹³Vgl. Christopher J. Biermann, S. 209.

das spezifische Gewicht und die Dichte der Harzlösung eingestellt wird.^{14, 15, 16, 17} Innerhalb eines nachgelagerten Trocknungsprozesses werden verbliebene Lösungsmittel bei zirka 150 °C verdampft und das Harz wird gehärtet.

Beim Graphitierungsprozess erfolgt die Umwandlung der Kohlenstoffstruktur des Karbonpapiers in Graphitstruktur, was ein höheres Elastizitätsmodul, höhere elektrische sowie thermische Leitfähigkeit und höhere oxidative Beständigkeit hervorruft. Bei Temperaturen zwischen 1400 und 3000 °C werden 99 % des PAN-Polymers in Kohlenstoffstruktur umgewandelt. Innerhalb des Graphitierungsovens herrscht Schutzgasatmosphäre unter Verwendung von Stickstoff, Argon oder Bor.¹⁸

Zur Verbesserung der hydrophoben Eigenschaften wird das GDL-Substrat in eine wässrige PTFE-Lösung getaucht. Dieser Prozess ähnelt dem Verfahren des Imprägnierens. Nach Benetzung des Materials folgt auf die Entfernung der Lösemittel durch Trocknung ein Sinterprozess, bei dem die PTFE-Partikel bei etwa 300 bis 350 °C an das Grundmaterial gebunden werden.¹⁹

Die mikroporöse Schicht (MPL) verbessert das Wassermanagement im Bereich der Katalysatorschichten. Sie führt flüssiges Wasser effektiv ab. Die MPL wird per Rakel mit einer Schichtdicke von rund 50 µm auf die GDL getragen. Alternativ dazu ist die Verwendung von Siebdruck oder Sprühen möglich. Der Prozess endet mit einer langsamen Verdampfung der Lösemittel (Vorwärmen) und einem anschließenden Sinterprozess, der für ausreichende Haftung zwischen Beschichtung und Grundmaterial sorgt.²⁰

16.1.5 MEA

Die Membran-Elektroden-Einheit entsteht durch Zusammenfügen der katalysatorbeschichteten Membran mit den Gasdiffusionslagen auf Anoden- und Kathodenseite (Sieben-Lagen-MEA). Das sogenannte MEA-Bonding findet – ähnlich zum Decal-Verfahren – per Heißpressvorgang statt. Bei der Auslegung des Prozesses kommt es darauf an, dass die Heißpresstemperatur nicht zu hoch gewählt wird. Übersteigt sie die Glasübergangstemperatur zu sehr, verliert die Polymermembran ihre wasserbindenden Eigenschaften und die Ionomer-Säuregruppe baut sich ab. Des Weiteren kann die Katalysatorschicht von der Membran abgelöst werden.²¹

¹⁴Vgl. Hauke Lengsfeld et al., S. 37.

¹⁵Vgl. Park 2018, S. 98.

¹⁶Vgl. Vielstich 2010, S. 1619.

¹⁷Vgl. Pilato 2010, S. 270 ff.

¹⁸Vgl. Morgan 2005, 304 ff.

¹⁹Vgl. Vielstich 2010, S. 1622.; Vgl. Kampker et al. 2020, S. 16.

²⁰Vgl. Vielstich 2010, S. 1622.

²¹Vgl. Zhang 2008, S. 911.

16.1.6 Produktion weiterer Komponenten

Für die Produktion des Brennstoffzellen-Stacks werden außerdem zwei Endplatten und zwei Stromkollektoren benötigt. Endplatten bestehen in der Regel aus Aluminium, Edelstahl oder Titan.²² Sie werden durch Fräsen oder Druckgießen hergestellt. Zu den Anforderungen an Endplatten gehören zum einen hohe mechanische Festigkeit und zum anderen geringer Bauraum und geringes Gewicht. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, sind besondere Geometrien erforderlich – beispielsweise Wabenstruktur.²³ Diese Geometrien sind derzeit vielfältig, weshalb ein Produktionsverfahren bevorzugt wird, das individuelle Geometrien verarbeiten kann. Stromkollektoren ermöglichen die Stromabnahme in Richtung Verbraucher. Da die Komponente eine hohe elektrische Leitfähigkeit besitzen sowie temperaturbeständig und druckfest sein muss, kommen häufig Kupfer, goldbeschichteter Edelstahl oder beschichtete Titanlegierungen zum Einsatz. Die 0,3 bis 1 mm dicken Stromkollektoren werden vorzugsweise gestanzt.

16.2 Fertigung des Brennstoffzellen-Stacks

Bei der Fertigung des Brennstoffzellen-Stacks werden die einzelnen Brennstoffzellen zu einer funktionalen Einheit verschaltet. Der Brennstoffzellen-Stack besteht aus einer beliebigen Anzahl einzelner Brennstoffzellen. Sie werden in Serie verschaltet und ermöglichen dadurch eine skalierbare Einstellung des Leistungsbereichs des Brennstoffzellensystems. Zusätzlich zu den verschalteten Zellen benötigt der Stack weitere Peripheriekomponenten, die die Funktionsweise der elektrochemischen Reaktion sicherstellen. Jeder Stack beinhaltet dazu Endplatten, Stromkollektoren, Verteilerplatten und eine Überwachungseinheit, wie in Abb. 8.3, Abschn. 8.3.1 dargestellt. Entlang des Fertigungsprozesses des Brennstoffzellen-Stacks werden diese Komponenten montiert und verschaltet.

Abb. 16.3 zeigt den Fertigungsprozess eines Brennstoffzellen-Stacks. Er untergliedert sich grob in sechs Prozessschritte des Stapelns und Montierens der Zellen, des Komprimierens des Stapels mit anschließender Verspannung, der Dichtheitsprüfung und des



Abb. 16.3 Fertigungsprozess eines Brennstoffzellen-Stacks

²²Vgl. Bendzulla 2010, S. 71.

²³Vgl. Dey et al. 2019, S. 4.

Finalisierungsprozesses. Abschließend wird der Stack eingefahren und geprüft. Die einzelnen Prozessschritte werden nachfolgend detaillierter beleuchtet.

Stapeln und Vormontieren

Der erste Schritt des Fertigungsprozesses ist das Vormontieren der Endplatte und des Stromkollektors, die die einzelnen Brennstoffzellen umschließen. In der Industrie werden zur vereinfachten Positionierung der Komponenten Führungsschienen verwendet. Im Anschluss werden die Brennstoffzellen übereinandergestapelt. Dabei werden die Zellen nicht als vollständige Einzelzelle übereinandergelegt, sondern alternierend zwei verschweißte Bipolarhalbplatten (siehe Abschn. 8.2) und eine MEA gestapelt. In Abhängigkeit von der Ausführung der MEA – fünf oder sieben Lagen – muss zwischen BPP und MEA noch eine Dichtung gestapelt werden. Ist die benötigte Anzahl von Zellen gestapelt, folgen ein zweiter Stromkollektor und die Verteilerplatte, die die Medienanschlüsse beinhaltet. Aufgrund der unterschiedlichen Formen und Strukturen der verschiedenen Komponenten ist eine hohe Positionierungsgenauigkeit zu gewährleisten, um die Dichtigkeit des Stacks sicherzustellen.

Komprimieren

Der vollständig gestapelte Stack muss im nächsten Prozessschritt komprimiert werden, um die Dichtigkeit und Eigensteifigkeit herzustellen. Dabei wird der Stapel mit Hilfe einer Presse und einer Presskraft von 40 kN bis 60 kN komprimiert. Es bestehen hohe Anforderungen an die Sauberkeit der Verspannungsanlage und die Präzision mit Blick auf Presskraft und Versatzweg.

Verspannen

Der komprimierte Stapel wird verspannt, um den Druck aufrechtzuerhalten. Dafür können Gewindestangen, Spannbänder oder ein spannungstragendes Gehäuse verwendet werden. Spannbänder weisen gegenüber den Gewindestangen Vorteile in Bezug auf Bauraum, Gewicht und Montagegeschwindigkeit auf – sie sind jedoch häufig nicht zerstörungsfrei demontierbar.

Dichtheit prüfen

Zur Überprüfung der Dichtheit des Stacks werden die Medienanschlüsse der Verteilerplatte an eine Prüfanlage angeschlossen. Bei der Durchführung von Druckabfall- und Durchflusstests wird sowohl die Gesamtdichtheit des Stacks als auch der einzelnen Medienkreisläufe überprüft. Vor allem für den wasserstoffführenden Anodenkreislauf bestehen hohe Anforderungen, zum Beispiel maximale Leckraten von $1 \times 10^{-2} \text{ Pa m}^3/\text{s}$.²⁴

²⁴DIN EN IEC 62282-2-100 (VDE 0130-2-100):2021-04, Brennstoffzellentechnologien – Teil 2–100: Brennstoffzellenmodule – Sicherheit (IEC 62282-2-100:2020); Deutsche Fassung EN IEC 62282-2-100:2020.

Finalisieren

Nach bestandener Dichtheitsprüfung werden die letzten Peripheriekomponenten des Stacks montiert. Dazu zählt insbesondere die „Control-Voltage-Module“ (CVM)-Einheit, die zur Spannungsüberwachung der einzelnen Zellen dient. Sie wird dafür mit den einzelnen Bipolarplatten unter Verwendung eines Epoxidharzes kontaktiert. An die Stromkollektoren des Stapels wird eine Stromsammelschiene montiert, die später den Anschluss für die HV-Verkabelung darstellt. Zuletzt wird der Stack in ein Gehäuse gefügt und isoliert.

Einfahren & Prüfen

Der abschließende Prozessschritt in der Produktion von Brennstoffzellen-Stacks dient vor allem der Herstellung ihrer Leistungsfähigkeit. Im Einfahrprozess („Break-in“) werden dem Stack Reaktionsmedien zugeführt sowie verschiedene Last- und Betriebszyklen durchlaufen. Die Leistungsfähigkeit des Stacks steigt dabei zu Beginn stark an und nähert sich anschließend asymptotisch einem Optimum. Die genauen Vorgänge während des Break-in-Prozesses sind noch nicht vollständig erforscht. Es treten verschiedene Wirkmechanismen auf, die zusammen zur Steigerung der Leistungsfähigkeit führen. So werden beispielsweise Übergangswiderstände durch die initiale Befeuchtung der Membran verringert und Verunreinigungen vom Katalysator entfernt. Da das Einfahren der zeitintensivste Prozessschritt ist, muss ein Optimum zwischen der Prozesszeit und der eingestellten Leistungsfähigkeit des Stacks definiert werden. Abschließend werden die Leistung, die elektrische Isolation und in manchen Fällen die Dichtheit überprüft.

16.3 Assemblierung des Gesamtsystems

Die Assemblierung des Brennstoffzellen-Gesamtsystems findet gemäß dem aktuellen Stand der Technik in drei Prozessschritten statt (vgl. Abb. 16.4). In der Montage der Balance-of-Plant werden die unterschiedlichen Systemkomponenten wie Stack, Luftbefeuchter, Verdichter und Rezirkulationsgebläse zu einem Brennstoffzellensystem mechanisch assembliert. Die elektrische Integration verbindet die Systemkomponenten mit dem Steuergerät. Beim End-of-Line-Testing werden Sicherheits- sowie Leistungstests vorgenommen. Im Folgenden werden die einzelnen Prozessschritte näher betrachtet.

Im Fertigungsschritt „Balance-of-Plant montieren“ werden alle Peripheriekomponenten des Brennstoffzellensystems befestigt (vgl. Abb. 16.5). Zunächst wird der Stack an einem Rahmen fixiert, der gleichzeitig zur späteren Anbindung ins Fahrzeug genutzt wird. Die



Abb. 16.4 Prozessablauf der System-Montage der Balance-of-Plant

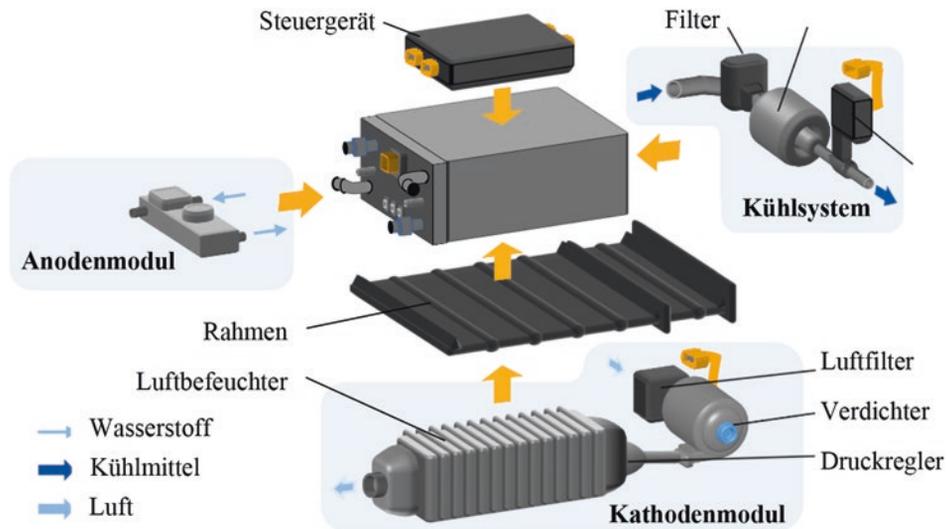


Abb. 16.5 Schematische Darstellung der Montage der Balance-of-Plant. (Vgl. Kampker et al. 2020)

einzelnen BoP-Komponenten werden anschließend entweder am Rahmen oder direkt am Stack montiert, was aufgrund heutiger geringer Stückzahlen und einer erhöhten Montagekomplexität meist in manueller Arbeitsweise erfolgt.²⁵ Als Alternative zur direkten Montage der einzelnen Komponenten an Rahmen oder Stack ist es möglich, zunächst die Vormontage der einzelnen Baugruppen umzusetzen. Die Montage der Balance-of-Plant ist im Detail stark vom Systemdesign abhängig, da sich sowohl die verwendeten Komponenten als auch deren Anordnung zueinander je nach Anwendungsfall und Leistungsspektrum fundamental unterscheiden können.

Die elektrische Integration umfasst den Anschluss des Kabelbaums sowie der HV-Ausgangsverkabelung. Das HV-Kabel, das zum Antriebsstrang führt, wird an den vorgesehenen Anschlüssen am DC/DC-Wandler kontaktiert. Außerdem wird der Kabelbaum an die Leistungsverteilung und die Regelung des Brennstoffzellensystems angebracht. Dieser enthält alle weiteren elektrischen Verbindungen zum Fahrzeug, zum Beispiel zum Hauptsteuergerät und zum Niedervolt-Stromkreis. Das Brennstoffzellensystem ist nun vollständig montiert.

Die „End-of-Line“ (EoL)-Prüfung bewertet nicht nur die Qualität und Sicherheit des fertigen Brennstoffzellensystems, sondern auch die Stabilität des Produktionsprozesses. Während die Detektion fehlerhafter Systemkomponenten das primäre Ziel der Prüfung ist, kann sie gleichzeitig durch die Analyse auftretender Fehlerbilder zu qualitätssichernden Maßnahmen im Produktionsprozess und einer Reduktion der Ausschussrate beitragen. Das assemblierte BZ-System wird einem Funktions- und Leistungstest unterzogen und dafür an einen EoL-Prüfstand angeschlossen. Der verwendete Prüfstand erfüllt dabei die Aufgaben der Medienzufuhr und elektrischen Last zur Simulation der Leistungsfähigkeit

²⁵Vgl. James et al. 2018.

des Systems im Fahrzeug. Das System, das in diesem Zustand nicht mit Wasserstofftanks verbunden ist, wird auf eine ordnungsgemäße Montage sowie die Erzielung der Nennleistung geprüft.²⁶

Anschließend wird außerdem die Dichtheit aller Medienkreisläufe sichergestellt. Dazu lässt sich ein Wasserstoffgemisch oder auch Helium als Prüfgas verwenden, da beide Optionen vergleichbare Leckraten feststellen.²⁷ Zuletzt wird eine optische Prüfung des Brennstoffzellensystems vorgenommen, um mögliche Beschädigungen oder sonstige Auffälligkeiten zu entdecken. Besteht das Brennstoffzellensystem sämtliche „Factory-Acceptance“-Tests, wird es zur Montage im Fahrzeug freigegeben. In der Fahrzeugintegration findet zudem die Verbindung der Leitungssysteme zu den Wasserstofftanks statt.

Die Produktion von Brennstoffzellen-Gesamtsystemen im Kontext der Automobilindustrie stellt noch eine recht junge Technologie dar und besitzt daher Optimierungspotenziale in der Großserienproduktion. Dabei sind Themen der Parallelisierung, der Automatisierung und der Teilereduktion hervorzuheben.

Für eine Parallelisierung in der Montage der Balance-of-Plant bietet es sich an, die Zahl der vormontierten Module zu erhöhen. Dadurch lassen sich Kreisläufe getrennt sowie parallel assemblieren. Eine verstärkt modularisierte Produktstruktur ermöglicht außerdem einen einfacheren Austausch defekter Komponenten und den Aufbau dezentralisierter Organisationsstrukturen im Service-Bereich.²⁸ Aufgrund der geringen Stückzahl der Produktion von Brennstoffzellenfahrzeugen läuft der Produktionsprozess meist manuell ab. Während die Leistungsüberprüfung nach der Kontaktierung mit dem Steuergerät des Brennstoffzellensystems automatisiert geschieht, werden die Sicherheitstests mit Blick auf austretenden Wasserstoff mit Hilfe eines Handprüfgeräts vorgenommen. Diese und andere manuelle Montage- und Prüfprozesse lassen sich durch einen höheren Automatisierungsgrad skalieren. Durch die Reduktion der Bauteilanzahl oder sogar komplette Neuauslegungen lassen sich Bauraum und Gewicht einsparen. Das Brennstoffzellensystem des Toyota Mirai I beispielsweise besitzt im Vergleich zu seinem Vorgängermodell einen bis zu 20 % reduzierten Bauraum bei gleichzeitiger Steigerung der Stack-Leistung um 27 %.²⁹ Die Speicherung des Wasserstoffs findet üblicherweise in zylindrischen Drucktanks statt, durch die hohe Einbußen mit Blick auf Bauraum und Fahrdynamik entstehen. Aktueller Forschungsschwerpunkt sind daher quaderförmige Drucktanks, die besser und platzsparender im Unterboden des Fahrzeugs integriert werden können.³⁰ Durch die beschriebenen Maßnahmen lassen sich die Montage und die Integration des Brennstoffzellensystems langfristig vereinfachen, so dass sich Potenziale zur Senkung der Systemkosten in der Produktion eröffnen.

²⁶ Vgl. Kampker et al. 2020.

²⁷ Vgl. Green Car Congress 2018.

²⁸ Vgl. Buchmüller 2019.

²⁹ Vgl. Nonobe 2017.

³⁰ Vgl. Hübner 2021.

Literatur

Teil III: Produktion von elektrofahrzeugspezifischen Systemen

- Alo, O. A.; Otunniyi, I. O.; Pienaar, H.:** *Manufacturing methods for metallic bipolar plates for polymer electrolyte membrane fuel cell*. In: *Materials and Manufacturing Processes*, Jg. 34, 2019, Nr. 8, S. 927–955
- Bell, C; Corney, J; Zuelli, N; Savings, D.:** *A state of the art review of hydroforming technology*. In: *Int J Mater Form*, Jg. 13, 2020, Nr. 5, S. 789–828
- Bendzulla, A.:** *Von der Komponente zum Stack: Entwicklung und Auslegung von HT-PEFC-Stacks der 5 kW-Klasse* (Schriften des Forschungszentrums Jülich Reihe Energie & Umwelt, Bd. 69). Jülich: Forschungszentrum Jülich, 2010. Zugl.: Aachen, Univ., Diss., 2010
- Buchmüller, M.:** *Nachhaltigkeit und Produktmodularisierung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019
- Christopher J. Biermann:** *Handbook of Pulping and Papermaking, Second Edition* (z-lib.org), Jg. 1996
- Dey, T; Deshpande, J; Singdeo, D; Ghosh, P. C.:** *Study of PEM Fuel Cell End Plate Design by Structural Analysis Based on Contact Pressure*. In: *Journal of Energy*, Jg. 2019, 2019, Nr. 4, S. 1–11
- Eric J. Iverson; Daniel M. Pierpont; Michael A. Yandrasits; Steven J. Hamrock; Stephan J. Obradovich; Donald G. Peterson:** *Fuel cell subassemblies incorporating subgasketed thrifted membranes*. <https://patents.google.com/patent/US20110151350A1/en?q=US2011%2f0151350A1>. Abruf 06.07.2021
- Green Car Congress:** *Producing the Mercedes-Benz GLC F-Cell fuel-cell SUV*. <https://www.greencarcongress.com/2018/03/20180321-glcfc.html>. Abruf 06.05.2021
- Hauke Lengsfeld; Hendrik Mainka; Volker Altstädt:** *Carbonfasern; Herstellung, Anwendung, Verarbeitung*
- Hübner, I.:** *Neuartige Drucktanks für Wasserstoff*. <https://www.elektroniknet.de/automotive/elektroniknet/neuartige-drucktanks-fuer-wasserstoff.185418.html>. Abruf 11.05.2021
- Institute of Electrical and Electronics Engineers; IEEE Robotics and Automation Society; Annual IEEE Conference on Automation Science and Engineering; IEEE International Conference on Automation Science and Engineering; IEEE CASE: IEEE Conference on Automation Science and Engineering (CASE), 2010. 21–24 Aug. 2010, Toronto, Ontario, Canada.** Piscataway, NJ: IEEE, 2010
- James, B. D; Huya-Kouadio, J; Houchins, C; Desantis, D.:** *Final SA 2018 Transportation Fuel Cell Cost Analysis -2020-01-23*: Unpublished, 2018
- James, B. D; Huya-Kouadio, J. M; Houchins, C; Desantis, D. A.:** *Mass Production Cost Estimation of Direct H2 PEM Fuel Cell Systems for Transportation Applications: 2017 Update*. Arlington, VA, 2018
- Kampker, A; Ayvaz, P; Schön, C; Reims, P.:** *Produktion von Brennstoffzellen-Systemen*. 1. Aufl. Aachen, 2020
- Kampker, A; Ayvaz, P; Schön, C; Reims, P.:** *Produktion von Brennstoffzellenkomponenten*. 1 Aufl. Aachen, Juli 2020
- Koc, M; Mahabunphachai, S; Dundar, F.:** *PEMFC Metallic Bipolar Plates: Effect of Manufacturing Method on Corrosion Resistance*. In: *ECS Trans.*, Jg. 25, 2009, Nr. 1, S. 1773–1782
- Mayyas, A; Mann, M.:** *Emerging Manufacturing Technologies for Fuel Cells and Electrolyzers*. In: *Procedia Manufacturing*, Jg. 33, 2019, S. 508–515
- Morgan, P.:** *Carbon fibers and their composites*. Boca Raton: Taylor & Francis, 2005

- Nonobe, Y.:** *Development of the fuel cell vehicle mirai*. In: IEEJ Trans Elec Electron Eng, Jg. 12, 2017, Nr. 1, S. 5–9
- Park, S.-J.:** *Carbon Fibers*. Singapore: Springer Singapore, 2018
- Pilato, L.:** *Phenolic Resins: A Century of Progress*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010
- Shahgaldi, S; Alaefour, I; Li, X.:** *Impact of manufacturing processes on proton exchange membrane fuel cell performance*. In: Applied Energy, Jg. 225, 2018, S. 1022–1032
- Vielstich, W.:** *Handbook of fuel cells. Fundamentals, technology and applications*. Hoboken, NJ: Wiley Interscience, 2010
- Vince Kelly:** *Chopped Carbon Fiber*, S. 1–4
- Vinogradov, M. L; Kostrin, D. K; Karganov, M. V; Tiskovich, V. Y.:** *How to choose a leak detection method*: IEEE NW Russia Young, S. 100–104
- Zhang, J.:** *PEM Fuel Cell Electrocatalysts and Catalyst Layers. Fundamentals and Applications*. London: Springer-Verlag, 2008

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

