



Brennstoffzellensysteme

8

Heiner Hans Heimes, Achim Kampker, Mario Kehrer,
Christoph Schön, Sebastian Hagedorn, Sebastian Biegler
und Philipp Reims

Bereits im Jahr 1839 wurde das Prinzip der Brennstoffzelle durch Christian Friedrich Schönbein und Sir William Grove entdeckt. Obwohl diese Form der elektrochemischen Energiewandlung demnach schon länger bekannt ist als beispielsweise der heutige Verbrennungsmotor, konnte die Brennstoffzelle über viele Jahrzehnte hinweg keine wirtschaft-

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

M. Kehrer

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

E-Mail: m.kehrer@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

S. Biegler · P. Reims

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

E-Mail: s.biegler@pem.rwth-aachen.de; p.reims@pem.rwth-aachen.de

liche Relevanz erzielen. Kommerziell kam die Brennstoffzelle erstmals in den 1960er-Jahren im Raumfahrtprogramm der NASA zum Einsatz. In den folgenden Jahrzehnten wurden verschiedene Typen für zahlreiche Anwendungen entwickelt. Diese Typen mit einem Fokus auf mobile Anwendungen werden in Abschn. 8.1 beschrieben. Heute ist die PEM-Brennstoffzelle der für mobile Anwendungen relevanteste Typ, so dass dessen Funktionsprinzip in Abschn. 8.2 erläutert wird. Der Aufbau von vollständigen Brennstoffzellensystemen wird abschließend in Abschn. 8.3 beleuchtet.

8.1 Typen von Brennstoffzellen für mobile Anwendungen

Grundsätzlich existieren verschiedene Varianten von Brennstoffzellen, die sich vorwiegend in der Zusammensetzung der ein- und ausgehenden Stoffströme sowie der Betriebstemperatur des Stacks unterscheiden. Bauart- und temperaturbedingt weisen die unterschiedlichen Varianten verschiedene Elektrolyte auf, die sich wiederum in der Materialbeschaffenheit, der Leitfähigkeit und der Art der Ladungsträger unterscheiden. Abb. 8.1 fasst den aktuellen Stand der Technik der Brennstoffzellentypen zusammen. SOFC (Solide Oxide Fuel Cell)- und MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell)-Systeme stellen die Hochtemperaturanwendungen dar und zeichnen sich durch eine hohe Kohlenstoffverträglichkeit aus, wodurch sie mit Erdgas betrieben werden können. Aufgrund dieser Eigenschaften sowie der thermischen Anforderungen eignen sich ebensolche Systeme darüber hinaus für stationäre Anwendungsbereiche.¹ Sowohl die PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell)- als auch die Hochtemperatur (HT)-PEMFC (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell) verwenden einen Elektrolyten aus einem mit Phosphorsäure durchtränkten Film

Brennstoffzellen-Typ		Anode ein/aus	Ionen-Transport	Kathode ein/aus	Temp.°C
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell (FC)	H_2 (aus) / CO (ein) CO_2 (aus) / H_2O (ein)	O^{2-} ←	O_2 (ein) / CO_2 (aus)	800
MCFC	Molten Carbonate FC	H_2 (aus) / CO (ein) CO_2 (aus) / H_2O (ein)	CO_3^{2-} ←	O_2 (ein) / CO_2 (aus)	650
PAFC	Phosphoric Acid FC	H_2 (aus)	H^+ →	H_2O gasförmig / O_2 (ein)	220
HT-PEMFC	High Temperature Polymer Electrolyte Membrane FC	H_2 (aus)	H^+ →	H_2O gasförmig / O_2 (ein)	160
DMFC	Direct Methanol FC	CH_3OH (aus) / CO_2 (ein)	H^+ →	H_2O flüssig / O_2 (ein)	90
LT-PEMFC	Low Temperature Polymer Electrolyte Membrane FC	H_2 (aus)	H^+ →	H_2O flüssig / O_2 (ein)	80
AFC	Alkaline FC	H_2 (aus) / H_2O (ein)	OH^- ←	O_2 (ein)	80

Abb. 8.1 Arten von Brennstoffzellen nach Einsatzgebiet und Leistungsklasse

¹Vgl. Péra et al. 2002.

aus Polybenzimidazol. Gegenwärtig erreichen diese Brennstoffzellen jedoch geringere Stromdichten als die Niedertemperatur (Low Temperature – LT)-PEMFC, die wie auch die DMFC (Direct Methanol Fuel Cell) einen festen Elektrolyten aus einer protonenleitenden Polymermembran beinhalten, deren Leitfähigkeit durch eine hinreichende Befeuchtung sichergestellt wird.² Die mit reinem Wasserstoff betriebene LT-PEM weist gegenüber der DMFC eine bessere Leistungsdichte und höhere Wirkungsgrade auf, die aus dem Umstand resultieren, dass die DMFC das deutlich größere Methanolkörmöl spaltet. Dieser Umstand bedeutet zugleich allerdings einen Hauptvorteil der DMFC, da mit Methanol ein flüssiger und somit leicht zu transportierender Energieträger zur Anwendung kommt.³ Wegen der Vorzüge eines festen Elektrolyten, des angepassten Temperaturniveaus und einer guten Leistungsdichte werden diese beiden Brennstoffzellentypen derzeit für mobile Anwendungen präferiert. Aufgrund einer vergleichsweise geringen Leistungsdichte und des Nachteils eines flüssigen Elektrolyten, der aus einer wässrigen Kaliumhydroxid-Lösung besteht, kommt AFC (Alkaline-Fuel-Cell)-Systemen im Bereich der mobilen Anwendungen trotz eines hohen Produktreifegrades aktuell keine Bedeutung zu.⁴

8.2 Funktionsprinzip der PEM-Brennstoffzelle

PEM-Brennstoffzellen-Stacks bestehen aus einer Vielzahl einzelner Brennstoffzellen, in denen die Oxidation und Reduktion des zugeführten Wasserstoffs unter Zuhilfenahme des in der Luft enthaltenen Sauerstoffs abläuft. Diese exotherme Reaktion vollzieht sich innerhalb der Brennstoffzelle in zwei kontinuierlichen und synchron verlaufenden Prozessen an der Anode sowie der Kathode. Der entsprechende Ionen- und Elektronenfluss ist in Abb. 8.2 schematisch dargestellt. Der Brennstoff wird über die Kanalstruktur der anodenseitigen Bipolar-Halbplatte zugeführt und gelangt über die Gas-Diffusionslage zur Katalysatorschicht. Dort stehen die Platin-Katalysatorpartikel, das Graphit als elektrisch leitfähiges Trägermaterial für den Katalysator und die Ionenaustauschmembran als sogenannte Dreiphasengrenze im Kontakt zueinander. An dieser Stelle wird nun das Wasserstoffmolekül unter Wärmefreigabe oxidiert und in seine Bestandteile zersetzt. Während das H^+ -Ion über die Ionenaustauschmembran zur Kathode gelangt, wird das Elektron über die elektrische Last außerhalb der Brennstoffzelle, etwa den Elektromotor eines Fahrzeugs, zur Kathode geleitet. Hier wird der im Oxidationsmittel „Luft“ enthaltene Sauerstoff an der kathodenseitigen Dreiphasengrenze mit den Wasserstoffprotonen zu flüssigem Wasser reduziert. Das Produktwasser verlässt zusammen mit einem Restanteil Luft die Kathode, während anodenseitig ein je nach Betriebsart unterschiedlich hoher Wasserstoffüberschuss die Brennstoffzelle verlässt.

²Vgl. Jafri und Gupta 2016.

³Vgl. Theenhaus und Bonhoff 1999–2000.

⁴Vgl. Lipman und Weber 2019.

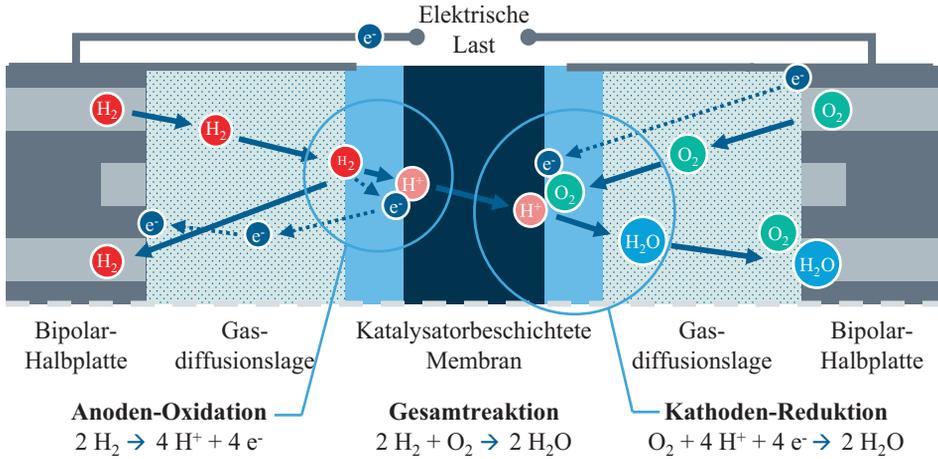


Abb. 8.2 Grundlegende Funktionsweise der PEM-Brennstoffzelle

Generell existieren mindestens drei für den Betrieb der Brennstoffzelle relevante Verlustmechanismen mit direktem Einfluss auf die Leistungskennlinie. Speziell im Bereich niedriger Stromdichten treten die sogenannten Aktivierungsverluste auf, die sich aus irreversiblen Einbußen und der endlich schnellen Reaktionsrate ergeben.⁵ Diese Verluste lassen sich sowohl durch die Betriebsparameter als auch durch die Materialeigenschaften beeinflussen. Ebenfalls stark von den Materialeigenschaften sind die ohmschen Verluste abhängig, die als Spannungsabfall aufgrund der elektrischen Widerstände der einzelnen Schichten zu verstehen sind.⁶ Auch die ionische Leitfähigkeit der Ionenaustauschmembran muss als ein Verlustbeiwert berücksichtigt werden. Wiederum von den Betriebsbedingungen und von der Gaszusammensetzung abhängige Verluste werden als „Konzentrationsüberspannungsverluste“ oder „Transportverluste“ bezeichnet. Besonders die entlang des Fluidkanals abnehmende Wasserstoffkonzentration im Brenngasstrom führt zu einem Abfall der erzielbaren Spannung, der auch durch einen trägen Abtransport der Produkte hervorgerufen werden kann.⁷

8.3 Aufbau von Brennstoffzellensystemen

In den vorherigen Kapiteln wurden das Funktionsprinzip einer Brennstoffzelle und der darin stattfindende chemische Ablauf beschrieben. Im Folgenden wird das Brennstoffzellensystem von der Einzelzelle bis zum vollständigen und funktionsfähigen System inklusive der Peripheriekomponenten erläutert. Kernstück des Brennstoffzellensystems

⁵Vgl. Lipman und Weber 2019.

⁶Vgl. Lipman und Weber 2019.

⁷Vgl. Lipman und Weber 2019.

bilden die gestapelten Zellen, die miteinander verbunden den sogenannten Brennstoffzellen-Stack ergeben und für die Bereitstellung der elektrischen Leistung sorgen. Die Peripheriekomponenten werden als „Balance-of-Plant“ (BoP) bezeichnet und versorgen den Brennstoffzellen-Stack mit den benötigten Reaktionsmedien „Wasserstoff“ und „Luft“ sowie mit Kühlmittel. Zusammen sind sie für einen je nach Lastanforderung optimalen Betriebszustand des Stacks verantwortlich.

Dem genauen Aufbau des Brennstoffzellen-Stacks sowie der Balance-of-Plant widmen sich die folgenden Unterkapitel.

8.3.1 Komponenten des Brennstoffzellen-Stacks

Ein Brennstoffzellen-Stack setzt sich aus mehreren in Reihe angeordneten Einzelzellen sowie abschließenden Strukturbauteilen zusammen. Eine Einzelzelle besteht aus mehreren Einzelschichten, wobei jede Schicht mehrere Funktionen erfüllt. Der Aufbau eines Brennstoffzellen-Stacks ist in Abb. 8.3 dargestellt.

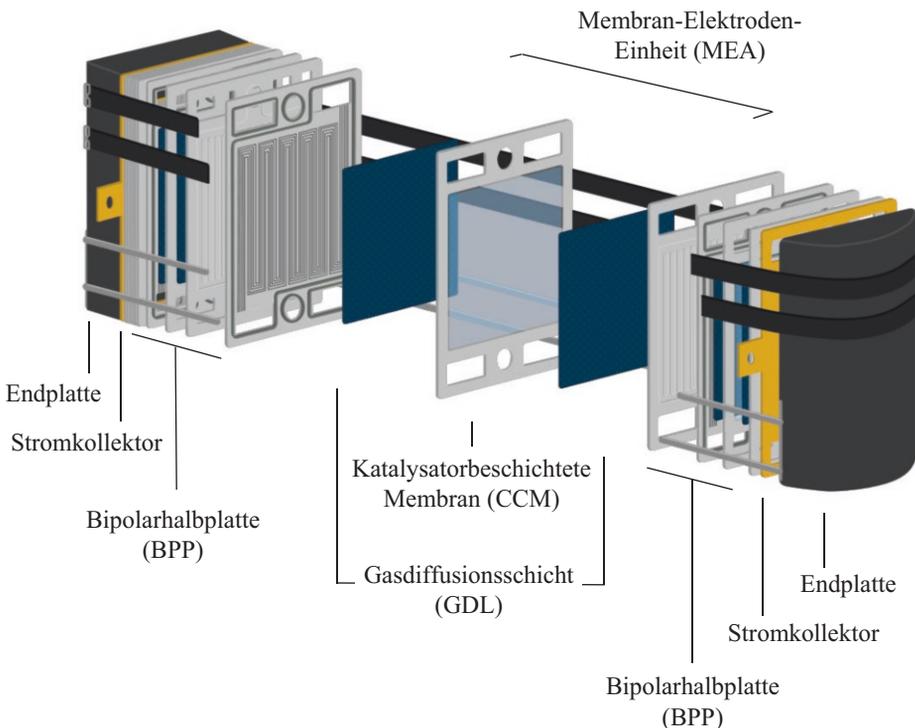


Abb. 8.3 Aufbau eines Brennstoffzellen-Stacks

Den Kern einer Zelle bildet die zwischen 15 und 180 μm dicke Polymer-Elektrolyt-Membran.⁸ Dort findet – wie in Abschn. 8.2 beschrieben – die chemische Redoxreaktion statt. Die Membran trennt die anoden- und kathodenseitigen Gasräume voneinander und ermöglicht gleichzeitig einen Protonenaustausch zwischen ihnen, weshalb sie gasdicht und protonenleitend sein muss. Neben der Gasdichtigkeit und der Protonenleitfähigkeit bilden eine hohe mechanische, chemische und thermische Langzeitstabilität weitere wichtige Anforderungen. Auf dem Markt hat sich ein PFSA-Polymer durchgesetzt, das eine unterschiedliche Protonenleitfähigkeit bei verschiedenen Feuchtigkeitsgraden aufweist.⁹ Bei zu niedrigem Feuchtigkeitsgehalt lässt die Protonenleitfähigkeit der Membran nach, und es besteht die Gefahr des Gasdurchbruchs, wodurch die Membran beschädigt wird. Ein zu hoher Feuchtigkeitsgehalt hat die Flutung der Diffusionsschicht und der Gaskanäle zur Folge, was den Zu- und Abtransport der Reaktanten und somit die Reaktion hemmt.

Um die Reaktion zu beschleunigen, befindet sich sowohl auf der Anodenseite als auch auf der Kathodenseite eine Katalysatorbeschichtung. Die katalysatorbeschichtete Membran wird als „Catalyst Coated Membrane“ (CCM) bezeichnet. Der Katalysator muss aufgrund der stark sauren Umgebung korrosionsresistent sein. Außerdem sind ein gutes Langzeitverhalten sowie eine hohe katalytische Aktivität und eine hohe Konvertierungsrate notwendig. Edelmetalle und ihre Legierungen eignen sich aus diesen Gründen besonders als Katalysator. Bei der Kathodenseite kommt als Katalysator häufig Platin zum Einsatz, während auf der Anodenseite Platin, versetzt mit Ruthenium, verwendet wird. Durch das Ruthenium wird die CO-Bindungsstärke verringert, was die Gefahr einer Vergiftung des Platins mit CO senkt. Die Katalysatorbeschichtung weist eine Dicke von 5 bis 15 μm auf.¹⁰

Beidseitig zu der CCM befindet sich jeweils eine Gasdiffusionslage (Gas Diffusion Layer – GDL). Diese sorgt für eine gleichmäßige Reaktantenverteilung sowie für einen kontinuierlichen Strom- und Wärmetransport zwischen der CCM und den angrenzenden Bipolarplatten. Übliche Dicken liegen im Bereich von 40 bis 120 μm .¹¹ Der Verbund aus CCM und einer GDL je Seite wird auch als „Membran-Elektroden-Einheit“ bezeichnet.

Die abschließende Schicht einer Zelle bilden die Bipolarplatten (BPP), die nicht nur die einzelnen Zellen voneinander abgrenzen, sondern auch für die mechanische Stabilität, die Reaktantenverteilung und die elektrische Verbindung der einzelnen Zellen sorgen. Eine Bipolarplatte besteht aus zwei Bipolarhalbplatten, die miteinander verschweißt oder verklebt werden. Auf der Innenseite der Halbplatte befinden sich Strömungskanäle für das Kühlmedium, auf der Außenseite die Strömungsfelder für die Reaktanten „Wasserstoff“ und „Luft“. Aufgrund der wässrig-sauren Umgebung, in der sich die BPP befinden, müssen sie korrosionsbeständig sein. Sie müssen außerdem elektrisch leitfähig sein und einen möglichst niedrigen Kontaktwiderstand zur Vermeidung elektrischer Verluste besitzen. In

⁸Vgl. Töpler und Lehmann 2017.

⁹Vgl. Kim et al. 2010.

¹⁰Vgl. Töpler und Lehmann 2017.

¹¹Vgl. Töpler und Lehmann 2017.

der Praxis haben sich mehrere Materialien durchgesetzt, die diese Anforderungen erfüllen. Zum einen werden BPP aus Metall verwendet – wobei sich die geforderten Eigenschaften durch eine Beschichtung mit Gold oder Titan zusätzlich verbessern lassen –, zum anderen werden BPP aus Graphit und Graphit-Polymer-Komposits verwendet. Wichtigster Vorteil gegenüber den BPP aus Metall ist die flexible Gestaltbarkeit der gegenüberliegenden Verteilfelder. In Bezug auf Gewicht und Volumen sind die metallischen BPP jedoch im Vorteil: Zwar besitzt Metall eine höhere Dichte im Vergleich zu den anderen Materialien, doch lassen sich mit Metall geringere Wandstärken realisieren, wodurch das Gewicht pro BPP bei Metallen geringer ausfällt. Die Dicke einer geformten BPP beträgt meist 0,8 bis 1 mm. Übliche Zelldicken mit metallischen BPP liegen zwischen 1,2 bis 1,5 mm.¹²

Die nutzbare Spannung einer Zelle ist unabhängig von ihrer Größe durch die chemische Reaktion und unvermeidbare Verlusteffekte auf ca. 0,7 V begrenzt. Aus diesem Grund werden mehrere Zellen in Reihe geschaltet, um technisch nutzbare Spannungsniveaus erreichen zu können. So sind, je nach Anwendung, Brennstoffzellen-Stacks mit bis zu 400 Zellen üblich. Die erreichbare Stromstärke einer Zelle korreliert mit ihrer Zellfläche, wird jedoch durch die benötigte homogene Verteilung der Reaktanten sowie eine gleichmäßige Temperaturverteilung begrenzt.¹³ Im Automotive-Bereich haben sich daher rechteckige Zellen mit einer Fläche von etwa 200 cm² durchgesetzt.

An den Enden der aneinandergereihten Zellen befindet sich jeweils eine Stromabnehmerplatte. Diese Platten sind an den Verbraucherstromkreis angeschlossen, wodurch die im Brennstoffzellen-Stack freigesetzte elektrische Leistung an die Verbraucher weitergeleitet werden kann. Die Stromabnehmerplatten bestehen aus einem elektrisch gut leitfähigen Material, beispielsweise Kupfer. An den Stromabnehmerplatten befindet sich jeweils eine Isolationsschicht, um eine unkontrollierte Spannungsausbreitung auf umliegende Komponenten zu verhindern. Je nach Auslegung des Brennstoffzellen-Stacks können Endzellheizter zwischen Stromabnehmerplatte und Isolationsschicht verbaut werden. Diese sorgen für eine homogene Temperaturverteilung über alle Zellen hinweg, da ansonsten in der Mitte des Brennstoffzellen-Stacks eine höhere Temperatur herrschen würde als an den Randbereichen.

Den Abschluss eines Brennstoffzellen-Stacks bilden die beiden Endplatten, über welche die Zellen zusammengedrückt werden und die interne sowie externe Dichtheit des Systems gewährleistet wird. Als Werkstoffe kommen in der Regel Metalle wie Aluminium, Titan oder rostfreier Stahl zum Einsatz.¹⁴ Die Anpresskräfte von rund 120 N/cm² werden mittels Zuganker oder Spannbänder zwischen den Endplatten aufgebracht.

¹²Vgl. Töpler und Lehmann 2017.

¹³Vgl. Wind et al. 2019.

¹⁴Vgl. Kim et al. 2008.

8.3.2 Komponenten der Balance-of-Plant

Die Balance-of-Plant besteht aus den drei Subsystemen zur Medienversorgung sowie der Leistungselektronik. Zu den Subsystemen der Medienversorgung zählen das Wasserstoff-, das Luft- und das Kühlmittelsystem. Der Gesamtsystemaufbau eines Brennstoffzellensystems ist in Abb. 8.4 dargestellt.

Das Wasserstoffsystem sorgt für die Bereitstellung des Kraftstoffs der Brennstoffzelle. Der Wasserstoff wird üblicherweise in einem Drucktank mit einem Druck von 350 oder 700 bar gespeichert. Ein solch hoher Druck ist notwendig, damit trotz der geringen volumetrischen Energiedichte von etwa 5 MJ/l (Benzin/Diesel rund 30 und 35 MJ/l) eine ausreichende Menge Kraftstoff mitgeführt werden kann.¹⁵

Im Pkw-Bereich werden derzeit Reichweiten von mehr als 500 km erzielt, wobei für eine 100-Kilometer-Strecke etwa 1 kg Wasserstoff benötigt wird. Weitere Wasserstoffspeichertechniken befassen sich mit der Kryogentechnik oder auch mit Absorptionsspeichern. Bei der Kryogentechnik wird der Wasserstoff bei einer Temperatur von etwa -253 °C und einem Druck von 4 bar flüssig gespeichert. Dadurch sind zwar hohe volumetrische Speicherdichten möglich, jedoch erschwert die äußerst niedrige Temperatur die Handhabung, und es werden hohe Kühlleistungen benötigt. Bei unzureichender Isolierung muss Wasserstoff an die Atmosphäre abgelassen werden. In Absorptionsspeichern wird der Wasserstoff in einem Feststoff oder einer Flüssigkeit eingelagert. Die gravimetrische Speicherdichte ist aufgrund des Absorptionsmaterials gering. Die letztgenannten Speichertechniken sind bisher unzureichend erforscht, weshalb der Druckspeicher den aktuellen Stand der Technik darstellt.^{16,17}

Vom Tankdruck wird zuerst auf einen Mitteldruck von etwa 30 bar und anschließend auf den Betriebsdruck von 1,5 bis 4 bar entspannt. Der Wasserstoff wird dem Brennstoffzellen-Stack überstöchiometrisch zugeführt, damit stets ausreichend davon für die Reaktion zur Verfügung steht. Dies führt dazu, dass nach dem Austritt aus dem Brennstoffzellen-Stack noch große Mengen unverbrauchten Wasserstoffs im Gasgemisch enthalten sind. Bei „Dead-End-Anode“-Systemen wird das Gasgemisch mit Restwasserstoff direkt aus dem System abgelassen, das aufgrund der Ineffizienz in der Praxis jedoch selten Anwendung findet. Meistens wird das Gasgemisch – zusammen mit frischem Wasserstoff aus dem Tank – dem Brennstoffzellen-Stack erneut zugeführt. Dieser Vorgang, der aktiv oder passiv erfolgen kann, wird als „Rezirkulation“ bezeichnet. Bei einer aktiven Rezirkulation wird ein elektrisches Gebläse zur Förderung des Gasgemisches mit dem Vorteil eingesetzt, dass eine einfache Regelung des Volumenstroms möglich ist und sich auch bei geringen Volumenströmen eine ausreichende Rezirkulation erreichen lässt. Bei passiven Systemen wird das Gasgemisch mittels des „Injector-Ejector“-Prinzips

¹⁵Vgl. Adolf et al. 2017.

¹⁶Vgl. Wind et al. 2019.

¹⁷Vgl. Töpler und Lehmann 2017.

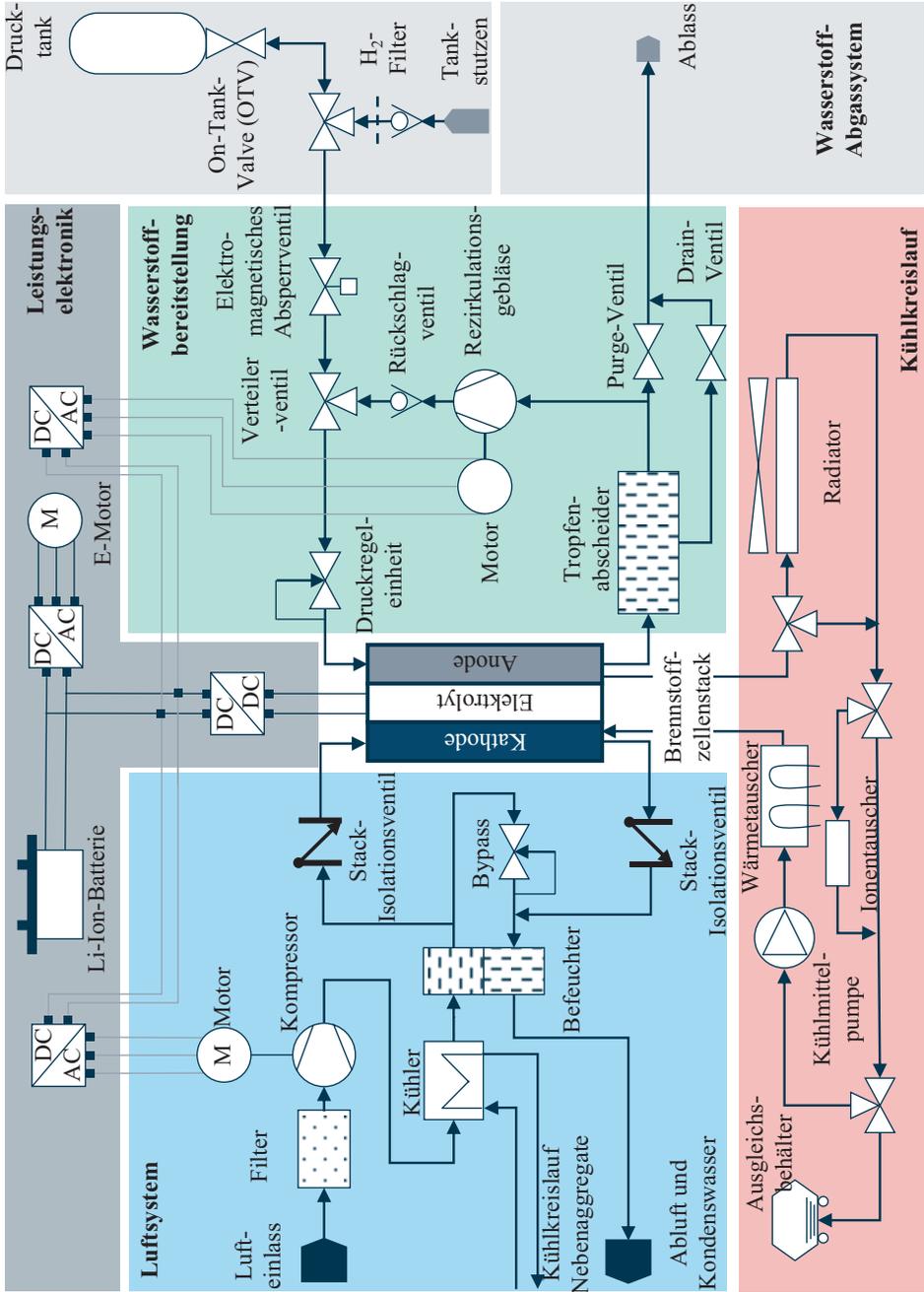


Abb. 8.4 Aufbau eines Brennstoffzellensystems

gefördert. In einer sogenannten Strahlpumpe wird frischer Wasserstoff durch eine Düse eingespritzt und mit Hilfe eines speziell geformten Diffusors ein Unterdruck erzeugt, wodurch das Gasgemisch angesaugt und gefördert wird. Vorteilhaft ist dabei, dass kein weiterer Energieverbraucher benötigt wird und Bauraum sowie Gewicht eingespart werden kann.¹⁸

Durch die Rezirkulation wird nicht nur Wasserstoff im Kreis gefördert, sondern auch Wasser und Inertgas wie Stickstoff, das von der Kathodenseite auf die Anodenseite durch die Membran diffundiert. Das Inertgas ist nicht an der Reaktion im Brennstoffzellen-Stack beteiligt und senkt dadurch den Wirkungsgrad. Aus diesem Grund ist ein regelmäßiges Ablassen des Gasgemisches notwendig, um eine ausreichend hohe Wasserstoffkonzentration auf der Anodenseite sicherzustellen. Dieser Vorgang wird „Purge“ genannt. Auch ein zu hoher Wasseranteil im Gasgemisch wirkt sich negativ auf die Effizienz aus, weshalb das überschüssige Wasser in regelmäßigen Abständen ebenfalls aus dem System entfernt werden muss. Dieser Schritt wird „Drain“ genannt. Die beiden Vorgänge „Purge“ und „Drain“ lassen sich auch gleichzeitig vornehmen.

Das Luftsystem lässt sich in die Luftfilterung und -komprimierung sowie die Luftbefeuchtung aufteilen. Da in der Umgebungsluft für den Brennstoffzellen-Stack schädliche Stoffe wie Staub und Schmutzpartikel enthalten sein können, muss die Luft im ersten Schritt gefiltert werden. Anschließend wird sie durch einen Kompressor gefördert und auf den Betriebsdruck verdichtet. Durch erhöhte Betriebsdrücke steigt die Leistung des Brennstoffzellen-Stacks. Übliche Drücke liegen im Bereich von 1,5 bis 4 bar. Aufgrund der Verdichtung muss die erwärmte Luft abgekühlt werden, bevor sie dem Brennstoffzellen-Stack zugeführt werden kann. Wie in Abschn. 8.3.1 beschrieben, spielt der Wassergehalt des Brennstoffzellen-Stacks eine zentrale Rolle, weshalb ein Luftbefeuchter zum Einsatz kommt. Das dafür notwendige Wasser entsteht bei der Reaktion im Brennstoffzellen-Stack und wird dem Luft-Abgasstrom entnommen.

Ähnlich wie bei der Wasserstoffzufuhr, wird auch die Luft überstöchiometrisch zugeführt. Dadurch wird sichergestellt, dass am Ende des Gaskanals noch eine ausreichend hohe Edukt-Konzentration vorhanden ist, was Spannungsverluste reduziert und somit die Effizienz des Brennstoffzellen-Stacks steigert.

Für die Regulierung der Temperatur im Brennstoffzellen-Stack ist das Kühlmittelsystem zuständig. Die Temperatur sollte idealerweise im Bereich zwischen 60 und 85 °C liegen. Der Wirkungsgrad einer Brennstoffzelle liegt – abhängig vom Betriebspunkt – zwischen 40 % und 65 %. Die restliche Energie fällt als Verlustwärme an, die durch das Kühlmittelsystem abgeführt werden muss. Anders als beim Verbrennungsmotor, entweicht nur wenig Wärme durch das Abgas, weshalb ein leistungsstarkes Kühlmittelsystem erforderlich ist. Dabei wird zwischen einem Hochtemperatur-Kreislauf und einem Niedertemperatur-Kreislauf unterschieden. Im Hochtemperatur-Kreislauf werden der Brennstoffzellen-Stack sowie seine Komponenten gekühlt. Die Kühlung der Leistungs-

¹⁸Vgl. Klell et al. 2018.

elektronik, der Batterie und weiterer Komponenten geschieht durch den Niedertemperatur-Kreislauf.¹⁹

Der Kühlkreislauf ist dabei ähnlich dem eines Verbrennungsmotors aufgebaut. Neben den Standardkomponenten „Pumpe“ und „Radiador“ wird ebenfalls ein Wärmetauscher verbaut, der für ein schnelles Aufheizen des Brennstoffzellen-Stacks beim Start sorgt. Da das Kühlmittel in direktem Kontakt mit den Bipolarplatten steht, ist es zur Vermeidung eines Kurzschlusses äußerst wichtig, dass es ursprünglich nicht leitfähig ist. Durch den Betrieb wird das Kühlmittel mit der Zeit stetig leitfähiger, weshalb mittels eines Ionentauschers sichergestellt wird, dass die Leitfähigkeit keinen kritischen Wert erreicht.

Zwischen den einzelnen Drücken der Medien besteht ein direkter Zusammenhang. Um die bereits erwähnte Diffusion von Inertgas von der Kathodenseite zur Anodenseite zu verringern, ist der Druck auf der Anodenseite stets höher als derjenige auf der Kathodenseite. Die Druckdifferenz darf jedoch nicht zu groß sein, damit die Membran nicht beschädigt wird. Der Druck im Kühlmittelsystem liegt über den Drücken der Anoden- und Kathodenseite, um eine Leckage von Wasserstoff oder Luft ins Kühlmittelsystem zu vermeiden.

Die Leistungselektronik leitet die elektrische Leistung vom Brennstoffzellen-Stack zum elektrischen Antriebsmotor. Ein Brennstoffzellensystem besitzt zusätzlich eine Batterie, die kurzfristig Leistung bereitstellt und Bremsenergie rekuperiert. Aufgrund verschiedener Spannungsniveaus und Spannungsarten kommen DC/DC-Wandler sowie DC/AC-Wandler zum Einsatz.

Literatur

Teil II: Elektrofahrzeugspezifische Systeme

- Adolf, J; Balzer, C. H; Louis, J; Schabla, U; Fishedick, M; Arnold, K; Pastowski, A; Schüwer, D.:** *Shell Wasserstoff-Studie. Energie der Zukunft? Nachhaltige Mobilität durch Brennstoffzelle und H2.* In: Hamburg: Shell Deutschland Oil GmbH 2017.
- Jafri, N. H; Gupta, S.:** *An overview of Fuel Cells Application in Transportation.* Piscataway, NJ: IEEE, 2016. 2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific) June 1–4, 2016, BEXCO, Busan, Korea
- Kim, J.-S; Park, J.-B; Kim, Y.-M; Ahn, S.-H; Sun, H.-Y; Kim, K.-H; Song, T.-W.:** *Fuel Cell End Plates: A review.* In: International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Jg. 9, 2008, Nr. 1, S. 39–46
- Kim, K.-H; Lee, K.-Y; Lee, S.-Y; Cho, E; Lim, T.-H; Kim, H.-J; Yoon, S. P; Kim, S. H; Lim, T. W; Jang, J. H.:** *The effects of relative humidity on the performances of PEMFC MEAs with various Nafion® ionomer contents.* In: International Journal of Hydrogen Energy, Jg. 35, 2010, Nr. 23, S. 13104–13110
- Klell, M; Eichsleder, H; Trattner, A. (Hrsg.):** *Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Erzeugung, Speicherung, Anwendung.* 4. Auflage Aufl., Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018

¹⁹Vgl. Klell et al. 2018.

- Lipman, T. E; Weber, A. Z. (Hrsg.):** *Fuel Cells and Hydrogen Production. A Volume in the Encyclopedia of Sustainability Science and Technology, Second Edition.* Encyclopedia of Sustainability Science and Technology Series, New York, NY: Springer New York, 2019
- Péra, M.-C; Hissel, D; Kauffmann, J.-M.:** *Fuel Cell Systems for Electrical Vehicle.* Piscataway, NJ: IEEE, 2002. IEEE 55th Vehicular Technology Conference
- Theenhaus, R; Bonhoff, K.:** *ZUKUNFTS- TECHNOLOGIE BRENNSTOFFZELLE. Brennstoffzellensysteme – ein Überblick.* <https://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Themenhefte/th1999/th1999.pdf>. Abruf 04.04.2022
- Töpler, J; Lehmann, J. (Hrsg.):** *Wasserstoff und Brennstoffzelle. Technologien und Marktperspektiven.* 2., aktualisierte und erweiterte Auflage Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2017
- Wind, J; Tschöke, H; Gutzmer, P; Pfund, T. (Hrsg.):** *Elektrifizierung des Antriebsstrangs. Grundlagen – vom Mikro-Hybrid zum vollelektrischen Antrieb.* 1. Auflage Aufl., Berlin: Springer Vieweg, 2019

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.

