



## Aufbau und Funktion einer FC-Einzelzelle

Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen (PEMFC) können aufgrund ihrer hohen Leistungsdichte, schnellen Startfähigkeit und Eignung für mobile Anwendungen einen wichtigen Beitrag für eine emissionsfreie Bereitstellung von elektrischer Energie leisten. Der Brennstoffzellenstapel ergibt sich durch die Stapelung einer bestimmten Anzahl von Einzelzellen und erzeugt eine kennlinienbasierte, definierte elektrische Leistung. Aufgrund der hohen Anzahl von Gleichteilen pro Brennstoffzellenstapel bestehen erhebliche Kostensenkungspotenziale durch serientechnologische Fertigungslösungen. Der Zell- und Komponentenaufbau und die Transportprozesse sind wichtige Aspekte, welche maßgeblich die Performance und den Wirkungsgrad beeinflussen. Dieses Factsheet ermöglicht einen Einblick in den Stand der Technik der elektrochemischen Abläufe, Funktionsweisen und Herstellungsverfahren einer FC-Einzelzelle.

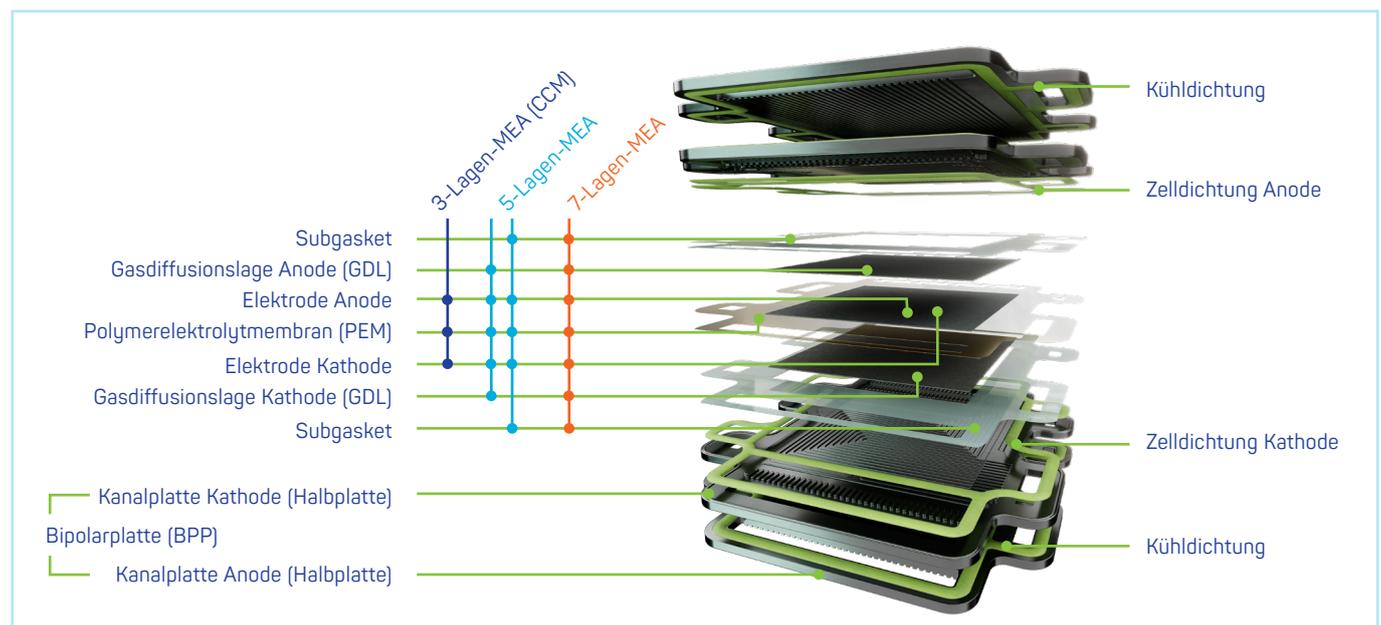
### Inhalte

- ⊕ Überblick zum Aufbau einer FC-Einzelzelle
- ⊕ Funktionsbereiche und Reaktionsabläufe einer FC-Einzelzelle
- ⊕ Leistungs- und Polarisationskurve einer FC-Einzelzelle
- ⊕ Anforderungen und Fertigungslösungen für Bipolarplatten
- ⊕ Anforderungen und Herausforderungen an Gasdiffusionslagen

### Überblick zum Aufbau einer FC-Einzelzelle

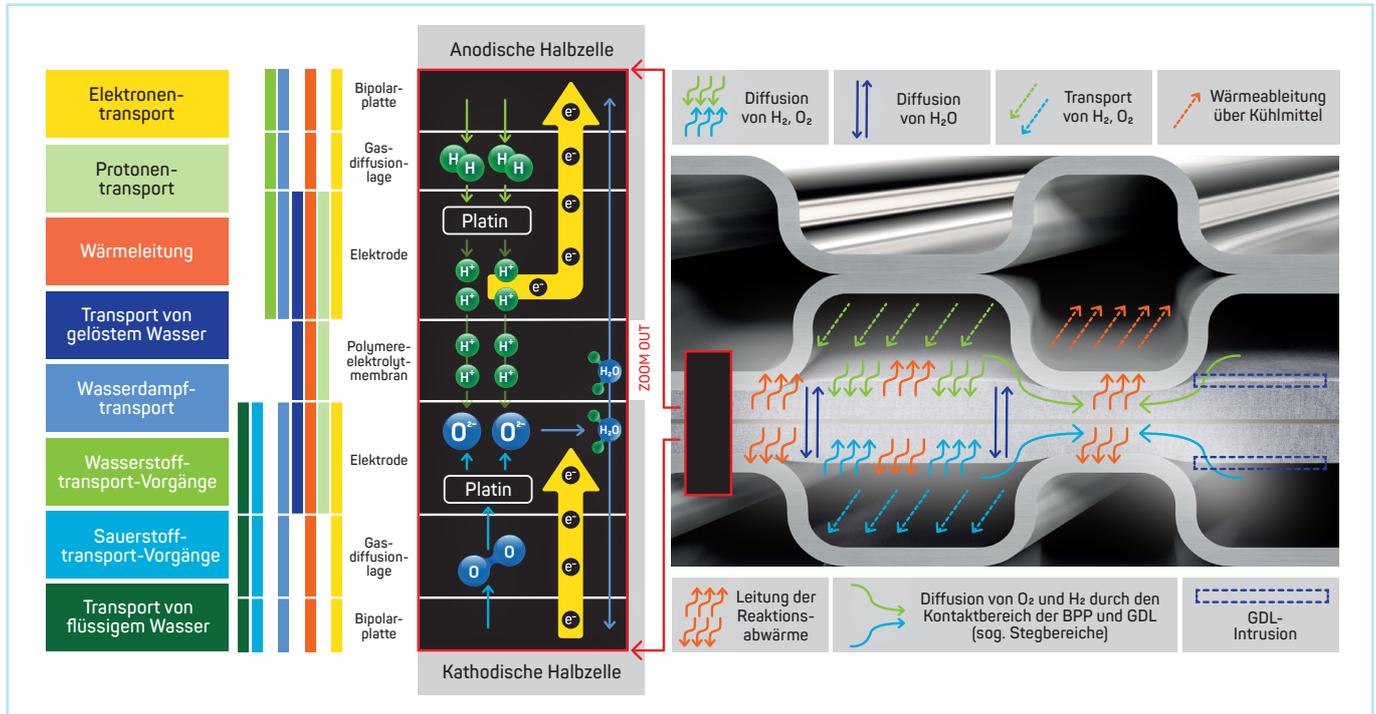
Eine Brennstoffzelle ist eine galvanische Zelle, in der die chemische Reaktionsenergie eines Reduktions- und eines Oxidationsmittels (Brennstoff) in elektrische Energie und Wärme umgewandelt wird. Die Trenn- und Reaktionszone wird durch die Membranelektroden-einheit (membrane electrode assembly – MEA) gebildet. Diesen Verbund aus Polymerelektrolytmembran (PEM) und beidseitig vorhandenen Elektroden bezeichnet man als 3-Lagen-MEA (three-layer-MEA oder catalyst coated membrane – CCM). Eine 5-Lagen-MEA ergibt sich durch die beidseitige Erweiterung mit Gasdiffusionslagen (GDL). Wird diese durch eine technische Stützfolie (subgasket) beid-

seitig ergänzt, spricht man von einer 7-Lagen-MEA. Bipolarplatten mit integrierten Flussfeldkanälen (flow field) übernehmen unter anderem die Verteilung der Reaktionsmedien zur MEA auf Anoden- und Kathodenseite. Die Struktur zwischen den Halbplatten dient der Kühlmediumsführung und somit dem Wärmeabtransport <sup>[1]</sup>. In der folgenden Abbildung ist der Aufbau einer Einzelzelle in Explosionsdarstellung des Open Source Stacks (OSS) dargestellt.



## Funktionsbereiche und Reaktionsabläufe einer FC-Einzelzelle

In einer FC-Einzelzelle laufen verschiedene Transportprozesse ab, um die elektrochemischen Prozesse im Bereich der aktiven Oberfläche der MEA und somit die kontinuierliche Stromerzeugung zu gewährleisten. Die wesentlichen Reaktionsabläufe und Transportvorgänge werden in der folgenden Abbildung beschrieben.



Reaktionsabläufe und Transportprozesse einer FC-Einzelzelle (Quelle: HZwo e.V.)

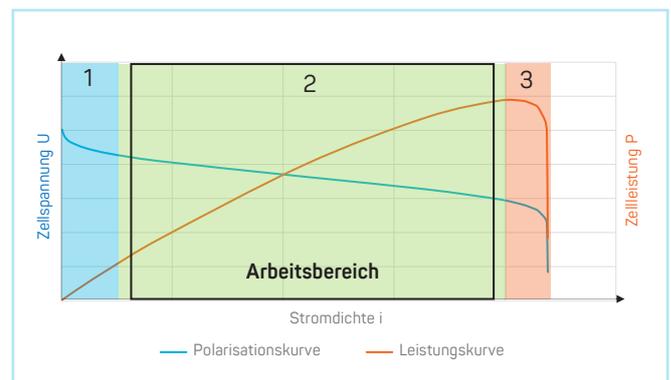
Die aktive Oberflächenschicht der Elektrode besteht meist aus porösem Trägermaterial auf Kohlenstoffbasis und den Katalysatorpartikeln (Platin, Platinlegierungen o.ä.). Hier finden die elektrochemischen Reaktionen statt, welche durch Redoxreaktionsgleichungen beschrieben werden. An der Drei-Phasengrenze, an welcher der Elektrolyt (z. B. Nafion), der Katalysator und der Anodengasraum gemeinsam vorliegen, kommt es zur Aufspaltung von  $H_2$  zu Protonen ( $H^+$ ) und Elektronen ( $e^-$ ). Der in erster Näherung elektrisch nichtleitende Elektrolyt ermöglicht den Übergang von Protonen hin zur Drei-Phasengrenze der Kathode. Durch die Reduktion des molekularen Sauerstoffs ( $O_2$ ) zu  $O^{2-}$  reagieren Wasserstoffprotonen, Sauerstoffionen und Elektronen zum Reaktionsprodukt Wasser. [2-4]

## Leistungs- und Polarisationskurve einer FC-Einzelzelle

Die Polarisationskurve (U-I-Kennlinie) resultiert durch die Abhängigkeit der Spannung zum Strom einer FC-Einzelzelle und spiegelt den Verlauf vom Ruhezustand (offene Zellspannung – OCV) bis zum höchsten Arbeitspunkt wider. Dabei ergeben sich im Wesentlichen drei Verlusteffekte, welche zur Bildung einer typischen Polarisationskurve beitragen:

1. Aktivierungsverluste (niedrige Stromdichte)
2. ohm'sche Verluste (mittlere Stromdichte)
3. Konzentrationsverluste (hohe Stromdichte)

Der Arbeitsbereich einer Brennstoffzelle liegt bevorzugt im Kennlinienbereich, in welchem die ohm'schen Verluste dominieren. Den Bereich der Aktivierungsverluste, welcher durch Durchtrittsspannung und möglicher Mischpotenzialbildungen verursacht wird, vermeidet man in der Regel durch geeignete Betriebsstrategien. Im Bereich der Konzentrationsverluste (auch Grenzstromverlustbereich genannt) treten häufiger Konzentrationsverluste auf, was zur Unterversorgung des reaktiven Bereiches führt und somit Verlustspannungen zur Folge hat. [3,4] Der Arbeitsbereich einer Brennstoffzelle wird, je nach Betriebsstrategie der Hersteller, üblicherweise im näherungsweise linearen Bereich der Polarisationskurve festgelegt, da hier eine praktikable Regelstrategie möglich ist.



Verlauf einer Polarisations- und der Leistungskurve des Open Source Stack (OSS) (Quelle: HZwo e.V.)

## Anforderungen und Fertigungslösungen für Bipolarplatten

Bipolarplatten (BPP) erfüllen eine Vielzahl an Funktionen, welche durch die konstruktive Auslegung und durch geeignete Materialkombinationen erreicht werden. Durch die meist hohe Anzahl der gestapelten Zellen können sich systematische Abweichungen in Ebenheit und Planparallelität aufsummieren und zu Herausforderungen bei Dichtigkeit und elektrischer Kontaktierung führen. Dazu kommt, dass die BPP einen wesentlichen Einfluss auf Kosten und Effizienz hat.



graphitische Bipolarplatte; Projekt: IGF-Vorhaben 22342N faserverstärkte Compound-Folien-Bipolarplatten (Quelle: ZBT GmbH)

### Wesentliche Funktionen der BPP sind:

- ⊕ mechanische Stabilisierung der MEA-Komponenten und somit der Einzelzelle bzw. des FC-Stapels
- ⊕ Gewährleistung der Dichtigkeit gegenüber Betriebsmedien (O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> und Kühlmittel)
- ⊕ homogene Verteilung der Reaktanten über Aktivflächenbereich
- ⊕ Abführung der Reaktionswärme mittels definierter Kühlung der Aktivfläche
- ⊕ elektrische Kontaktierung von Anoden- zur Kathodenseite

### Diese Funktionen sollten unter Beachtung der folgenden Anforderungen erfüllt werden:

- ⊕ hohe elektrische Leitfähigkeit
- ⊕ chemische, thermische und mechanische Stabilität
- ⊕ hohe Lebensdauer/Zuverlässigkeit des Dichtelements
- ⊕ geringes Komponentengewicht und hohe Stabilität
- ⊕ niedrige Material- und Herstellungskosten <sup>[1]</sup>

### Flussfeldtypen von Bipolarplatten

Eine wesentliche Funktion der Bipolarplatte übernimmt das Flussfeld, welches die homogene Verteilung der Medien, die elektrische Kontaktierung zur MEA und den auftretenden Druckverlust beeinflusst. Die Struktur des Flussfeldes, welches meist aus Einzelkanälen besteht, bestimmt das Strömungsverhalten der Medien (O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> und des Kühlmittels) und den Abtransport des kondensierten Produktwassers.

### Die Strukturierung lässt sich im wesentlichen unterscheiden in:

- ⊕ Mäander
- ⊕ Parallel
- ⊕ Pins
- ⊕ Verzweigt
- ⊕ Fraktal
- ⊕ Biometrisch
- ⊕ Kombination <sup>[5]</sup>

### Materialien für Bipolarplatten

Nach dem aktuellen Stand der Technik existiert eine Vielzahl an Basismaterialien und Materialkombinationen, die auf die unterschiedlichen Anforderungen der jeweiligen Anwendungsfelder zurückzuführen sind. Graphitische BPP bieten zum aktuellen Stand der Technik große Vorteile in der Langlebigkeit und werden bevorzugt in Heavy Duty Anwendungen verwendet. <sup>[5]</sup>

Metallische BPP sind aufgrund Ihrer Kompaktheit sowie des geringen Gewichts im Fokus für die Großserienproduktion. Die Materialarten der BPP lassen sich in folgende Arten unterteilen:

- ⊕ Nichtporöse Graphitplatten
- ⊕ Metallische Platten
- ⊕ Kompositplatten

### Beispiel einer Fertigungslösung für Bipolarplatten

Die Herstellung metallischer BPP umfasst mehrere Fertigungsverfahren. Teil dieser Fertigungsprozessschritte sind das Umformen, Trennen, Fügen, Beschichten und Prüfen. Als zentraler Prozessschritt kommen für das Umformen unter Einhaltung der Genauigkeitsanforderungen Verfahren wie z. B. Hohlprägen, Hohlprägwalzen und Hydroforming (Hochdruckumformung) zum Einsatz. Die Abbildung zeigt eine Anlage zum Hohlprägwalzen des Fraunhofer IWU (BPPflexRoll), welche eine kostengünstige, kontinuierliche Fertigung mit geringen Prozesskräften ermöglicht. Dies begünstigt eine Kostenreduktion mittels hochskaliger Fertigung durch kombinierte Prozessschritte zur Minimierung der Taktzeit. <sup>[6]</sup>



Anlage zum Hohlprägwalzen des Fraunhofer IWU; Projekt BPPflexRoll (Quelle: Fraunhofer IWU)

## Anforderungen und Herausforderungen an Gasdiffusionslagen

Gasdiffusionslagen (GDL) befinden sich in jeder FC-Einzelzelle zwischen Elektrode und Kanalstruktur der BPP. Die auf den Zellstapel definierte Vorspannkraft wirkt sich direkt auf spezifische Eigenschaften einer GDL aus. Ein weiterer Effekt der aufgetragenen Vorspannkraft ist das Eindringen (Intrusionsverhalten) der GDL in die Kanäle der BPP, womit ein Einfluss auf die Strömungsmechanik der Reaktionsmedien  $H_2$  und Luft ( $O_2$ ) hervorgerufen werden kann. Die Entwicklung von optimierten konstruktiven Lösungen für GDL sind ein aktives Forschungsgebiet, um die Effizienz und Zuverlässigkeit von Brennstoffzellen zu steigern.

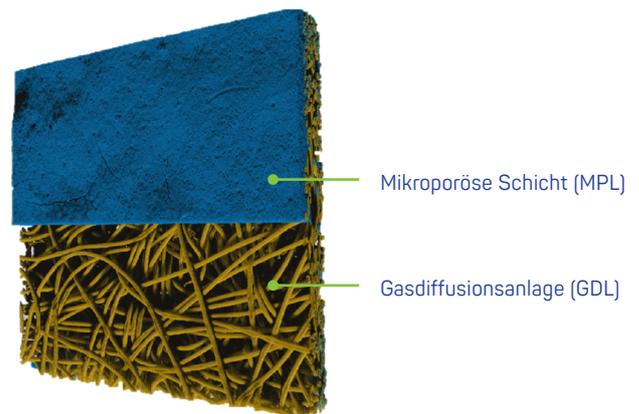
### Anforderungen an GDL

- ⊕ hohe Porosität zur Gewährleistung einer homogenen Verteilung der Reaktionsmedien insbesondere über den Stegbereichen zu den Reaktionszonen der PEM (siehe Abbildung auf S. 2: Reaktionsabläufe und Transportprozesse einer FC-Einzelzelle)
- ⊕ hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit
- ⊕ hoher Austrag von Produktwasser hin zur Kanalstruktur
- ⊕ Verbesserung der mechanischen Stabilität des Einzelzellaufbaus

### Arten von GDL

GDL werden in drei grundsätzliche Arten unterschieden:

- ⊕ Kohlenstofffaser-Papiere
- ⊕ Kohlenstofffaser-Vliese
- ⊕ Kohlenstofffaser-Gewebe



3D-Röntgenmikroskopieabbildung (XRM) einer GDL mit mikroporöser Schicht (Quelle: ZBT GmbH)



Sie möchten mehr erfahren?  
Besuchen Sie unseren Wissensbereich:  
[www.ch2ance.de/h2-wissen](http://www.ch2ance.de/h2-wissen)

Nutzen Sie auch  
unser interaktives  
3D-Modell des  
Brennstoffzellen-  
Antriebsstrangs



### Quellen

- [1] N. Keller, „Beitrag zur methodischen Auslegung von Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellensystemen,“ Dissertation, Technische Universität Chemnitz. [Online]. Verfügbar unter: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa2-876327>.
- [2] F. Barbir, PEM Fuel Cells: Theory and Practice. Academic Press, 2012.
- [3] P. Kurzweil, Hg. Brennstoffzellentechnik. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016.
- [4] M. Klell, H. Eichlseder und A. Trattner, Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018.
- [5] Fraunhofer IPT/WZL der RWTH Aachen. „Technologischer Deep-Dive Dive | Die Bipolarplatte der PEM-Brennstoffzelle.“ Zugriff am: 22. April 2025. [Online.] Verfügbar: [https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2022/10/Deep-Dive\\_Bipolarplatte.pdf](https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2022/10/Deep-Dive_Bipolarplatte.pdf).
- [6] Fraunhofer IWU. „Hohlprägwalzen: Neue Anlage revolutioniert die Herstellung von Bipolarplatten.“ [Online.] Verfügbar: <file:///D:/%23Downloads/iwu-hohlpraegewalzen-neue-anlage-revolutioniert-die-herstellung-von-bipolarplatten.pdf>
- [7] N. Keller, P. Hübner und v. U. Thomas. „Experimentelle Untersuchung des Intrusionsverhaltens von Gasdiffusionslagen in Kanalquerschnittkonturen von PEM-Brennstoffzellen.“ Zugriff am: 22. April 2025. [Online.] Verfügbar: <https://d-nb.info/1258951614/34#page=109>