



Aufbau und Funktion eines Brennstoffzellenstapels

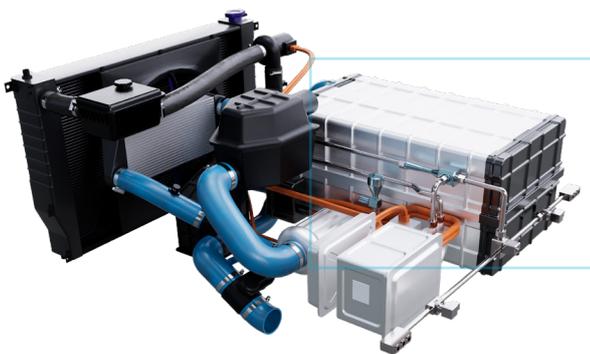
Wasserstoffbasierte Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen (PEM) spielen im Kontext des Ausbaues der erneuerbaren Energien eine besondere Rolle, da überschüssige elektrische Energie per Elektrolyse in Wasserstoff gespeichert werden kann. Wasserstoff kann unter anderem für Fahrzeugantriebe genutzt werden, in denen andere Antriebstechnologien Nachteile aufweisen. Brennstoffzellenantriebe, insbesondere die Baugruppe des Brennstoffzellenstapels, sind aufgrund fehlender Skalierungseffekte aktuell kostenintensiv. Die noch weitestgehend fehlende Hochskalierung des Produktionsvorganges bietet große Wertschöpfungspotenziale für Unternehmen. Durch kontinuierliche Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten werden Materialien, konstruktive Auslegungen, elektrochemische Prozesse und Systemintegrationen ständig angepasst, um Leistung, Effizienz und Langlebigkeit zu verbessern und Kosten zu reduzieren.

Inhalte

- ⊕ Überblick zum Aufbau eines Brennstoffzellenstapels
- ⊕ Produktionsschritte eines Brennstoffzellenstapels
- ⊕ Anforderungen und Umsetzungsmöglichkeiten von Dichtungen
- ⊕ Anforderungen und Lösungsvarianten von Verspannsystemen

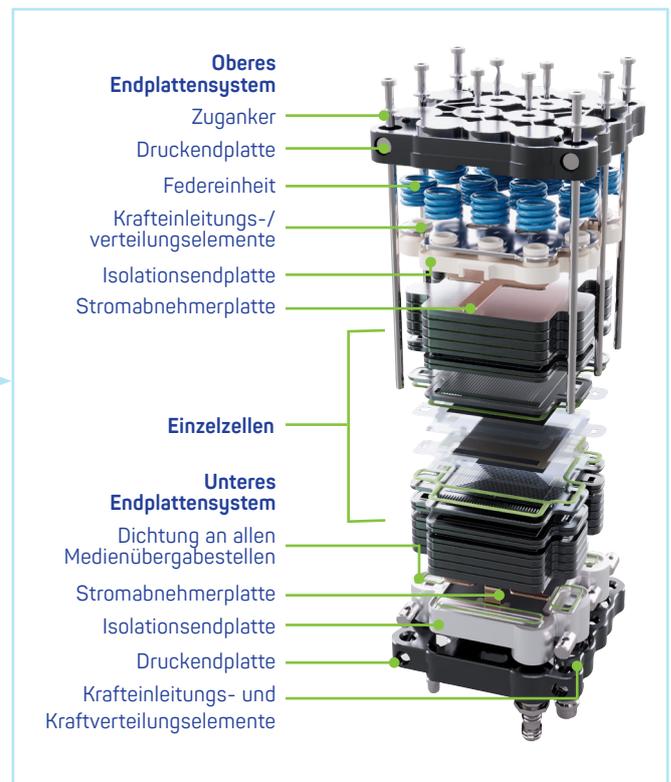
Überblick zum Aufbau eines Brennstoffzellenstapels

Die zentrale Komponente eines Brennstoffzellensystems ist der Brennstoffzellenstapel, welcher aus gestapelten, in Serie geschalteten Einzelzellen aufgebaut ist. Der Brennstoffzellenstapel generiert die elektrische Energie mittels einer Redoxreaktion, bei der Wasserstoff und Sauerstoff durch eine kontinuierliche Zuführung miteinander reagieren.



3D-Modell eines Brennstoffzellensystems (Quelle: eigene Darstellung)

Bei der Zellreaktion gibt der Wasserstoff Elektronen ab, welche als Energieversorgung in einem Stromkreislauf zum Beispiel einen Elektromotor antreiben können oder zur Ladung eines elektrischen Energiespeichers dienen. Zusammen mit Sauerstoff und den Elektronen reagiert der oxidierte Wasserstoff zu Reinstwasser und es entstehen keine Schadstoffe wie Partikel oder Stickoxide. Unter realen Bedingungen kann überschlägig eine Spannung bis zu $U = 1\text{ V}$ für eine Einzelzelle angenommen werden. Zur Spannungserhöhung werden beispielsweise bei Fahrzeuganwendungen teilweise über 400 Einzelzellen in einer Reihenschaltung zu einem Stapel verschaltet. An den Einzelzellen, die den Abschluss des Stapels bilden, befinden sich leitfähige Stromabnehmerplatten (Stromkollektoren), welche die Verbindung zum äußeren Stromkreis herstellen. Bei sehr hohen Leistungsbedarfen beispielsweise in Nutzfahrzeugen kann die Anzahl der Stapel erhöht werden.



Explosionsdarstellung eines Brennstoffzellenstapels (Quelle: eigene Darstellung)

Weitere Information zur Einzelzelle finden Sie im Factsheet: **Aufbau und Funktion einer FC-Einzelzelle**

Produktionsschritte eines Brennstoffzellenstapels

Der Stapelprozess für eine Brennstoffzelle lässt sich in grundsätzliche Montageschritte untergliedern, wobei die Verfahren von der jährlichen Stückzahl sowie der vorbestimmten Anwendung abhängen. Die aktuelle Produktion mit Manufakturcharakter soll durch Weiterentwicklung und Automatisierung der Produktionsprozesse besonders die Erhöhung der Stückzahlen ermöglichen und gleichzeitig Produktionskosten senken. Ein Beispiel der Prozessabfolge bietet die folgende Abbildung:



Teilschnitt eines Brennstoffzellenstapels (Quelle: eigene Darstellung)



beispielhafte Prozessschrittabfolge einer Brennstoffzellenstapelproduktion (Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an [1])

1. Stapeln und Vormontage

Die Vormontage umfasst die Positionierung der Einzelkomponenten (untere Endplatte, untere Stromabnehmerplatte) auf den dafür vorgesehenen Werkstückträger. Als nächster Arbeitsschritt werden Bipolarplatte (BPP) → Dichtung → Membranelektrodeninheit (MEA) → Dichtung → BPP auf die bestehende Vormontage gestapelt. Dieser Einzelzellaufbau ist exemplarisch und kann je nach Einzelzellendesign abweichen. Diese Reihenfolge wird nach Vorgabe wiederholt, sodass sich die geforderte Gesamtzellanzahl des Brennstoffzellenstapels ergibt. Darauf erfolgt die Montage der oberen Stromabnehmerplatte und der Endplatte samt Medienzugängen.

Eine exakte Ausrichtung der Komponenten zueinander kann durch Führungselemente sichergestellt werden. Das Temperaturmanagement ist immer im gesamten Kreislauf zu betrachten, da für die Wärmeabfuhr als Kernparameter die jeweiligen Temperaturdifferenzen, die spezifische Wärmekapazität des Kühlmittels (KM) und der KM-Massenstrom zu berücksichtigen sind. Dies hat einen direkten Einfluss auf die KM-Pumpendimensionierung. Die Wahl geeigneter Wärmeübertrager (Übertragungsfläche, Materialart, -dicke und Strömungsführung) sind von dem Temperaturniveau, Wärmemengen und Anströmverhältnissen abhängig.

2. Komprimieren

Das Komprimieren des Brennstoffzellenstapels dient der Verminderung der Kontaktwiderstände sowie der Stauchung der Dichtungen, um den Stapel abzudichten. Dazu wird über eine Pressvorrichtung (z. B.: Servopresse) ein möglichst gleichmäßiges flächiges Verpressen des Stapels vorgenommen. Dabei sollte die Presskraft und der Pressweg einer Regelstecke unterliegen, um den Brennstoffzellenstapel vor zu hoher Presskraft und resultierenden negativen Beeinflussung der Lebensdauer und Leistungsdichte zu schützen.

3. Verspannen

In diesem Arbeitsschritt wird die dauerhafte Kompression des Brennstoffzellenstapels durch dafür typische Spannmittel umgesetzt. Diese Spannmittel sind meist Spannbänder oder Zuganker, welche unter einer definierten Vorspannkraft in Pressrichtung gespannt werden müssen.

4. Dichtheitsprüfung

Für einen störungsfreien Betrieb eines Brennstoffzellenstapels muss bei der Brennstoffzellenstapelfertigung sichergestellt werden, dass die Dichtheit des Systems sowie der Durchfluss der Medien gegeben

ben ist. Dazu wird eine Druckabfallprüfung beziehungsweise Durchflussprüfung vorgenommen. Durch die Beaufschlagung des Brennstoffzellenstapels mit Prüfgas im jeweiligen Prüfaufbau kann eine Druckabfall- und Durchflussprüfung vorgenommen werden. Dies ermöglicht eine Einschätzung der Gesamtdichtheit sowie der Durchflussmenge und oder des Druckabfalls der einzelnen Medienkreisläufe.

5. Isolationsprüfung

Bei der Isolationsprüfung wird durch temporäre Überspannung getestet, ob die vorgesehenen isolierten Komponenten die erforderliche Durchschlagsfestigkeit aufweisen. Im Fehlerfall macht sich die Eigenschaft, dass Brennstoffzellen wie Kondensatoren wirken, negativ bemerkbar. Dadurch kann die Ursache eines Kurzschlusses nicht immer eindeutig detektiert werden.

6. Endmontage

Zur Endmontage des Brennstoffzellenstapels gehören folgende Arbeitsschritte:

- ⌚ Installation der Cell-Voltage-Monitoring Einheit (CVM) seitlich am Brennstoffzellenstapel sowie Befestigung der einzelnen Kontakte an den Bipolarplatten
- ⌚ Montage der Stromsammelschienen an den Stromkollektoren
- ⌚ Zusammenführung von Brennstoffzellenstapel und Gehäuse
- ⌚ Montage des Gehäusedeckels, welcher alle Ein- und Ausgänge der Medienkreisläufe sowie Sensorik und Hochvolt-Verkabelung beinhaltet

7. Einfahren und Prüfen

Als abschließender Prozessschritt wird der Brennstoffzellenstapel auf einem Leistungsprüfstand auf seine Leistungsfähigkeit getestet. Dabei spricht man von einer Aktivierung, da während des Prozesses Verunreinigungen und Lösemittelreste entfernt werden und die Befeuchtung der Membran stattfindet. Ein Einfahrprozess umfasst verschiedene Variationen von Mediendruck, Durchflussrate, Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit. Dabei steigt die Leistungsfähigkeit asymptotisch bis zu einem Optimum stetig an. Um eine Degradation während es Einfahrens gering zu halten, können Einfahrprotokolle in Leistungsfähigkeit und Aktivierungszeit modifiziert werden. [1]

Anforderungen und Umsetzungsmöglichkeiten von Dichtungen



Dichtungsapplikation mittels Dispenser (Quelle: ZBT GmbH)

Dichtungen in PEM-Brennstoffzellen sind Kernkomponenten für die Aufrechterhaltung der strukturellen Integrität und für die Gewährleistung eines effizienten Betriebs der Brennstoffzelle. Abhängig von der Konstruktion des Brennstoffzellenstapels werden verschiedene Dichtungen benötigt, welche folgende Funktionen gewährleisten müssen:

- ⊕ Vermeidung von Wasserstoff-, Luft- (Sauerstoff) und Kühlmittel-leckagen innerhalb des FC-Stapels und zur Umgebung
- ⊕ Fertigungstoleranzen ausgleichen
- ⊕ Oberflächenrauigkeiten der abzudichtenden Komponenten zuverlässig versiegeln

Dichtungen müssen Aufgaben wie die Gewährleistung der Beständigkeit gegenüber angrenzenden Medien (Reinstwasser, Luft, Wasserstoff, Kühlmittelzusätze) über die anwendungsbezogene Betriebsdauer (Langzeitstabilität) sowie unter variierenden Betriebsbedingungen (insbesondere Temperatur- und Druckschwankungen) erfüllen. Ein weiteres Kriterium ist die Fähigkeit, eine optimale Kompression und Flexibilität aufrechtzuerhalten, um der dynamischen Dehnung und Kontraktion der Brennstoffzellenkomponenten gerecht zu werden, die durch thermische Zyklen und mechanische Spannungen hervorgerufen werden.

Mögliche Materialien für Dichtungen in Brennstoffzellen

- ⊕ Fluorelastomer-Kautschuk (FKM)
- ⊕ Ethylen-Propylen-Dien-Monomer (EPDM)-Kautschuk
- ⊕ Silikonkautschuk
- ⊕ Polyurethanwerkstoffe (PUR)

Applikation von Dichtungen für Brennstoffzellen

Die Zeldichtungen werden nach ihrem grundlegenden Aufbau und den dazu eingesetzten Fertigungs- und Montagetechnologien in Festkörper-/Flachdichtungen und Flüssigdichtungen unterteilt. Flachdichtungen zeichnen sich durch eine einfache Fertigung aus und werden während des Stapelprozesses in der Montage zugeführt. Flüssigdichtungen werden je nach Gestaltung bereits im Fertigungsprozess auf die Bipolarplatte oder die Membran-Elektroden-Einheit aufgetragen, wodurch die spätere Montage vereinfacht wird. Beim Auftrag der Flüssigdichtung wird zwischen dem „formed-in-place gasket“ (FIPG) und „cured-in-place gasket“ (CIPG) Verfahren unterschieden. Im Gegensatz zum FIPG-Verfahren erfolgt bei der CIPG die Aushärtung der Dichtung im assemblierten Zustand. Typische Fertigungstechnologien sind das Siedruckverfahren, Dispensieren und Spritzgießen.^[2-4]

Sie benötigen Unterstützung bei der Entwicklung geeigneter Dichtungskonzepte für Brennstoffzellen? Das ZBT bietet Ihnen weitreichende Möglichkeiten dies zu simulieren, umzusetzen und zu testen.

Anforderungen und Lösungsvarianten von Verspannsystemen

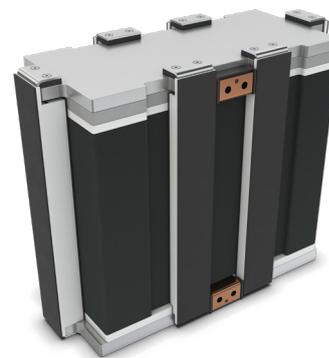
Das Verspannsystem bildet im Zusammenwirken mit der Endplatte den Abschluss des Brennstoffzellenstapels und gewährleistet die definierte Vorspannung des Brennstoffzellenstapels. Dies ist erforderlich, um eine homogene Verpressung der aktiven Fläche zu gewährleisten, niedrige Kontaktwiderstände zu erzielen und die Medienräume zuverlässig abzudichten. Zum einen wird dadurch die Dichtheit und damit der sichere Betrieb gewährleistet und zum anderen ist der Anpressdruck ein Einflusskriterium für die Zelleistung. Während des Betriebs schwankt die Vorspannung aufgrund von thermischen Dehnungen, Quellverhalten, Setzeffekten und äußeren mechanischen Einflüssen (Schwingungen). Diese Effekte müssen durch das Verspannsystem ausgeglichen werden.



Brennstoffzellenstapel mit Spannbändern (Quelle: HoKon GmbH & Co. KG)

Lösungsvarianten von Verspannsystemen

Die Funktion und der Aufbau des Verspannsystems stehen im direkten Zusammenhang mit der Gestaltung des Endplattensystems. Es wird dabei auf bestehende Lösungsvarianten zurückgegriffen, wobei eine Unterteilung nach Art der Verspann- und der Federelemente erfolgt. Das Aufbringen der Vorspannkraft (Verspannen) wird über Zuganker oder Spannbänder realisiert. Diese verbinden die obere und untere Endplatte und werden im Montageprozess auf eine präzise Vorspannkraft angezogen. Als Federelemente werden vorwiegend Schraubendruckfedern oder Tellerfedern eingesetzt. Teilweise werden federnde Strukturen durch Bleche eingebracht, um die Kraftleitung zu optimieren. Die Auslegung und Gestaltung der Verspann- und Federelemente ist abhängig vom Stapeldesign und muss individuell im Zusammenwirken mit der Endplatte durchgeführt werden. ^[5,6]



Brennstoffzellenstapel mit Zugankern (Quelle: Schaeffler Technologies AG & Co. KG)



Sie möchten mehr erfahren?
Besuchen Sie unseren Wissensbereich:
www.ch2ance.de/h2-wissen

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



Quellen

- [1] H. Heimes, M. Kehr, S. Hagedorn, J. Hausmann, G. Krieger und J. Müller. „Produktion von Brennstoffzellenkomponenten.“ Zugriff am: 3. April 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.vdma.org/documents/34570/4884699/Brosch%C3%BCre+Produktion+von+Brennstoffzellen-Komponenten+-+2.+Auflage.pdf/a8e19a67-456c-ddf5-4cc8-4c8022e8c081?t=1668181861912>.
- [2] Y. Wei, Y. Xing, X. Zhang, Y. Wang, J. Cao und F. Yang. „A Review of Sealing Systems for Proton Exchange Membrane Fuel Cells,“ WEVJ, Jg. 15, Nr. 8, S. 358, 2024, doi: 10.3390/wevj15080358.
- [3] D. Shi et al., „Fabrication methods, structure design and durability analysis of advanced sealing materials in proton exchange membrane fuel cells,“ Chemical Engineering Journal, Jg. 454, S. 139995, 2023, doi: 10.1016/j.cej.2022.139995.
- [4] J. Zhao et al., „A review on the sealing structure and materials of fuel-cell stacks,“ Clean Energy, Jg. 7, Nr. 1, S. 59–69, 2023, doi: 10.1093/ce/zkac096.
- [5] E. M. Khetabi, K. Bouziane, N. Zamel, X. François, Y. Meyer und D. Candusso, „Effects of mechanical compression on the performance of polymer electrolyte fuel cells and analysis through in-situ characterisation techniques - A review,“ Journal of Power Sources, Jg. 424, S. 8–26, 2019, doi: 10.1016/j.jpowsour.2019.03.071.
- [6] C. W. Wu, W. Zhang, X. Han, Y. X. Zhang und G. J. Ma, „A systematic review for structure optimization and clamping load design of large proton exchange membrane fuel cell stack,“ Journal of Power Sources, Jg. 476, S. 228724, 2020, doi: 10.1016/j.jpowsour.2020.228724.