

Aufbau und Funktion des Kathodensubsystems

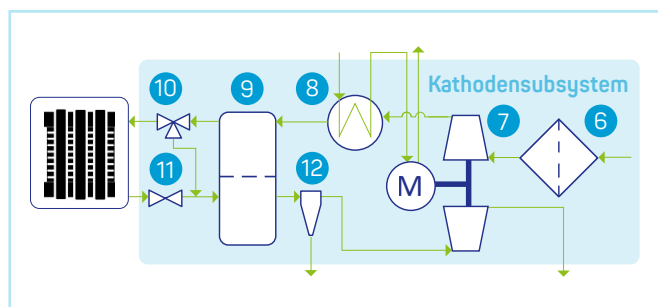
Der Brennstoffzellenstapel eines FCEVs (Fuel Cell Electric Vehicle) wird mit Sauerstoff aus der Umgebungsluft versorgt. Für einen effizienten Betrieb und eine Minimierung der Degradation wird die angesaugte Luft aufbereitet und konditioniert. In diesem Factsheet werden die dafür erforderlichen Komponenten mit deren spezifischen Anforderungen dargestellt. Weitere Informationen zu den Komponenten in den Subsystemen und ein 3D-Demonstrationsmodell finden Sie auf der ch2ance Webseite.

Inhalte

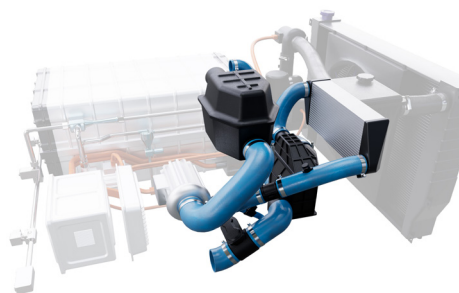
- ➡ Überblick zum Aufbau des Kathodensubsystems
- ➡ Betriebsbedingungen und allgemeine Anforderungen des Kathodensubsystems
- ➡ Aufbau und Funktion des Luftfiltersystems
- ➡ Kompression der Kathodenzuluft
- ➡ Zwischenkühlung der Kathodenzuluft
- ➡ Befeuchtung der Kathodenzuluft
- ➡ Flüssigwasserabscheidung im Kathodensubsystem

Überblick zum Aufbau des Kathodensubsystems

Das Kathodensubsystem versorgt den Brennstoffzellenstapel mit Sauerstoff, wobei Umgebungsluft angesaugt wird, um den darin enthaltenen Sauerstoffanteil zu verwenden. Weitere Aufgaben bestehen darin, die Luft zu filtern sowie den geforderten Druck, Massenstrom und Gastemperatur bereitzustellen. Außerdem erfolgt eine Feuchtekkonditionierung der zugeführten Luft. Dieses Factsheet stellt die dafür erforderlichen Kernkomponenten mit den jeweiligen Eigenschaften dar.



Flussschema eines Kathodensubsystems (Quelle: eigene Darstellung)



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

- | | |
|-----------------------------------|--|
| 6. Luftfiltersystem | Abscheidung von Schadstoffen wie Partikel und Schadgase aus der Umgebungsluft |
| 7. Verdichtereinheit | Bereitstellung des systemabhängigen erforderlichen Massenstroms und Vordrucks |
| 8. Zwischenkühler | Kühlung der verdichteten Zuluft zur Vermeidung einer Membranschädigungen im Befeuchter und Stapel |
| 9. Luftbefeuchter | Befeuchtung der Zuluft zur Optimierung der Zellmembranleitfähigkeit und Vermeidung einer Austrocknung mit daraus folgender Degradation des Brennstoffzellenstapels |
| 10. Absperr-, Bypassventil | Bereitstellung des erforderlichen Massenstroms sowie schnelle Lastwechsel und Herunterfahren des Systems ermöglichen |
| 11. Absperrventil | Isolation des Brennstoffzellenstapels während Stillstand, Herunterfahrprozess unterstützen |
| 12. Wasserabscheider | Flüssigwasserabscheidung zur Vermeidung einer Expanderschädigung |

Betriebsbedingungen und allgemeine Anforderungen des Kathodensubsystems

Der Betrieb von FCEVs mit Umgebungsluft bringt den Vorteil keine zusätzlichen Sauerstofftanks mitführen zu müssen. Aufgrund der Zusammensetzung der Umgebungsluft mit einem Sauerstoffanteil von etwa 21 % und der Empfindlichkeit der Brennstoffzellen gegenüber Schadgasen ist eine Aufbereitung der Umgebungsluft vor dem Eintritt in den Brennstoffzellenstapel erforderlich.

Grundlegende Betriebsparameter

Der Brennstoffzellenstapel wird mit einem Stöchiometrieverhältnis zwischen 1,5-3,0 und einem kathodenseitigen Betriebsdruck von bis zu etwa 2,5 bar(a) betrieben, um lokale Unterversorgungen zu vermeiden^[1,2]. Die Temperatur der Kathodenzuluft ist abhängig von den Umgebungsbedingungen und der Betriebsstrategie. Aufgrund der Verdichtung ist jedoch in den meisten Fällen eine Zwischenkühlung erforderlich. Die zulässige Höchsttemperatur für Niedertemperatur-Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen (NT-PEMFC) beträgt etwa 95 °C, da bei Temperaturen größer 100 °C die Membran austrocknet, folglich die Leitfähigkeit abnimmt und bei weiterer Erhöhung auch Membrandegradation auftritt^[3,4].

Erforderliche Gasreinheit

Der Einsatz von Umgebungsluft macht es erforderlich, Schadgase, welche beispielsweise aus Verbrennungsabgasen stammen, aus der Luft abzuscheiden, da diese sowohl die Katalysatoren belegen als auch die Membran in der Zelle schädigen können^[2]. Ebenso ist eine effektive Partikelabscheidung erforderlich, um eine Verstopfung der Gaskanäle im Stapel zu verhindern. Des Weiteren ist sicherzustellen, dass durch die Systemkomponenten keine Schadstoffe in Form von beispielsweise Produktionsrückständen, Auswaschungen oder Schmiermitteln in das System eingetragen werden.

Aufbau und Funktion des Luftfiltersystems

Das Luftfiltersystem übernimmt die Aufgabe sowohl Partikel als auch Schadgase aus der angesaugten Umgebungsluft abzuscheiden. Aktuell werden mehrstufige Filtersysteme eingesetzt, welche von der Partikelvorabscheidung über mehrstufige Partikelfilterlagen bis hin zu Adsorberlagen sowohl große Partikelmengen als auch Schadgase bei einem möglichst geringen Differenzdruck abscheiden können. Ebenso ermöglicht dieses Mehrlagenprinzip eine Anpassbarkeit auf unterschiedliche Umgebungsbedingungen. Nach dem heutigen Stand der Technik erfolgt die Schadgasabscheidung über Adsorption. Saure Schadgase (z. B. H₂S) werden mittels basischer und basische (z. B. NH₃) mittels saurer Adsorbentien abgeschieden. Außerdem können katalytische Lagen eingesetzt werden, um definierte Gase zu oxidieren (z. B. CO → CO₂). Die voraussichtliche Betriebsumgebung des Fahrzeugs ist entscheidend, um das Filtersystem auf die vorrangig auftretenden Schadgase sowie Partikelkonzentrationen und Größenverteilungen auszulegen.^[5]

Als Schadgasschädigungsmechanismen sind das Adsorbieren auf den Katalysatoren, das Belegen der für die Protonenleitfähigkeit zuständigen Sulfonsäuregruppen der Zellmembran und das Verändern hydrophober MEA Eigenschaften zu nennen^[6]. Die dargestellte Tabelle zeigt eine Auswahl an Schadstoffen, welche vorrangig im Straßenverkehr aufgrund von Verbrennungsabgasen und in der Landwirtschaft durch beispielsweise Dünge- und Pflanzenschutzmittel auftreten können. Auch Salze in Küstenregionen können Katalysatoren in der Zelle belegen. Der Einfluss kann durch Spülvorgänge reversibel sein aber auch eine irreversible Degradation zur Folge haben.^[7,8]

Die Ermittlung relevanter Schadstoffe für unterschiedliche On- und Off-Road Anwendungen sind Gegenstand von aktuellen F&E-Aktivitäten.

Beispiele unterschiedlicher Luftschadstoffe:

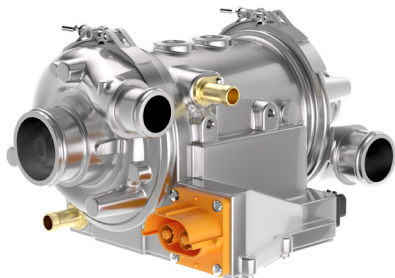
| Schadstoff | Strukturformel | Reversibilität |
|----------------------|---|-----------------------------|
| Schwefelverbindungen | H ₂ S, SO _x , weitere | irreversibel |
| Ammoniak | NH ₃ | irreversibel |
| Stickstoffoxide | NO _x | reversibel |
| Kohlenwasserstoffe | C _x H _y | irreversibel/ reversibel |
| Partikel und Salze | — | — |



Kathodenluftfilter mit zweistufiger Partikel- und Schadgaslage
(Quelle: Hengst SE)

Kompression der Kathodenzuluft

Aufgrund des Sauerstoffanteils von etwa 21 % in der Umgebungsluft ist eine Verdichtung erforderlich, um den Sauerstoffpartialdruck im Stapel zu erhöhen. Dies verhindert lokale Unterversorgung, erleichtert das Feuchtmanagement und führt zu einer Leistungssteigerung ^[1]. Mit einer Druckerhöhung steigt die erforderliche elektrische Verdichterantriebsleistung und reduziert bei zu großer Erhöhung die Systemeffizienz, sodass nach aktuellem Stand der Technik der Betriebsdruck auf der Kathodenseite bei bis zu 2,5 bar(a) liegt ^[1,2]. Die Verwendung eines Expanders wird vor allem im Nutzfahrzeugsektor erwartet und ermöglicht eine höhere Systemeffizienz und höhere Betriebsdrücke ^[10]. Nach dem aktuellen Stand der Technik setzen sich Radialverdichter gegenüber Verdrängerkompressoren durch. Diese sind ölfrei über Folien- oder Gaslager betreibbar, zeichnen sich durch hohe Drehzahlen aus, erfordern einen geringen Bauraum und ermöglichen einen pulsationsfreien Betrieb ^[2,11].



elektrischer Luftkompressor (Quelle: ZF Friedrichshafen AG)

Zwischenkühlung der Kathodenzuluft

Aus der Verdichtung der Kathodenzuluft resultiert eine Temperaturerhöhung, welche bei der Verwendung eines Membranbefeuchters sowohl die Befeuchtermembran als auch die Membranen im Brennstoffzellenstapel schädigen könnte. Daher sollte die Luft nach dem Kompressor durch einen Ladeluftkühler abgekühlt werden. Dieser Wärmetauscher wird in mobilen Anwendungen in den Nieder-temperatur-Kühlkreislauf eingebunden und ist auf die Umgebungsbedingungen sowie auf die Betriebsstrategie des Systems ausulegen. An das Kühlmedium werden dabei keine erhöhten Anforderungen gestellt.

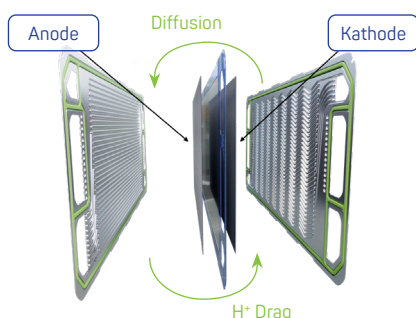
Als Bauform werden aufgrund der Kompaktheit und hohen Lebensdauer, vorrangig Plattenwärmeübertrager eingesetzt.



gelötete Plattenwärmetauscher (Quelle: HYDAC International GmbH)

Befeuchtung der Kathodenzuluft

Die Protonenleitfähigkeit (H^+) der Polymerelektrolytmembran (PEM) ist abhängig von der Membranfeuchtigkeit, sodass ein Austrocknen verhindert werden muss. Durch das kathodenseitige Produktwasser befeuchtet sich die Membran selbst. Diffusionsprozesse transportieren das Wasser von der Kathoden- zur Anodenseite (Diffusion). Die Protonen sind während des Transports von der Anode zur Kathode von einer Hydrathülle umgeben, sodass Wasser wieder zur Kathode transportiert wird (H^+ Drag). Detailinformationen sind in Fachveröffentlichungen zu finden ^[12-14]. Des Weiteren reichert sich trockene Eintrittsluft mit Feuchte an und trocknet die Kathodenseite aus. Um vor allem bei hohen Lasten eine Austrocknung zu verhindern wird die Zuluft befeuchtet. Anodenseitig befeuchtet sich der Stapel durch die Rezirkulation selbst. Aktuell setzt sich kathodenseitig für mobile Anwendungen die Membranbefeuchtertechnologie durch.



Wassertransportprozesse in einer Brennstoffzelle (Quelle: eigene Darstellung)

Diese zeichnet sich durch einen passiven Betrieb aus. Ebenso wird die Abluftfeuchte zur Befeuchtung verwendet, sodass kein Wasserreservoir erforderlich ist. Nachteilig sind jedoch ein hoher Bauraumbedarf und hohe Produktkosten. Aktuell setzen sich beim Aufbau Flachmembran- gegenüber Hohlfasermembranbefeuchtern aufgrund geringerer Druckverluste und höherer Übertragungseffizienz durch ^[15,16]. Weitere Befeuchungskonzepte alternativ zur Membranbefeuchtung wie beispielsweise eine Düseninspritzung, Blasenbefeuchter und stapelinterne Befeuchungskonzepte sind in Fachveröffentlichungen zu finden ^[17].



Membranluftbefeuchter (Quelle: FUMATECH BWT GmbH)

Flüssigwasserabscheidung im Kathodensubsystem

Flüssigwasser in Form von Tropfen kann im Kathodensubsystem an unterschiedlichen Stellen zu funktionellen Beeinträchtigungen führen. Eine Vorabscheidestufe kann zur Abscheidung von Tropfen eingesetzt werden, um die Funktion des Partikel- und Schadgasfilters zu gewährleisten. Die Abscheidung auskondensierter Tropfen am Stapeleintritt beugt einer Verstopfung der gasführenden Kanäle in der Bipolarplatte (FlowField) und der Gasdiffusionslage (GDL) vor. Auf der Stapelaustrittsseite kann bei der Verwendung eines Expanders eine Schädigung durch Tropfenschlag mittels eines Tropfenabscheiders verhindert werden ^[15,18].

Abhängig von der Systemauslegung und den zu erwartenden Betriebszuständen sind folglich Wasserabscheider im Kathodensubsystem vorzusehen. Die Abbildung zeigt einen Wasserabscheider ausgeführt als Gleichstromzyklon. Alternativ kann die Wasserabscheidung über Prallwände, Strömungsumlenkungen, gravimetrische oder aktive Abscheidung umgesetzt werden. ^[19–22]



Flüssigwasserabscheider (Quelle: MANN+HUMMEL International GmbH & 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] J. Hoefflinger und P. Hofmann, „Air mass flow and pressure optimisation of a PEM fuel cell range extender system,” International Journal of Hydrogen Energy, Jg. 45, Nr. 53, S. 29246–29258, 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.07.176.
- [2] Y. Zhao, Y. Liu, G. Liu, Q. Yang, L. Li und Z. Gao, „Air and hydrogen supply systems and equipment for PEM fuel cells: a review,” International Journal of Green Energy, Jg. 19, Nr. 4, S. 331–348, 2022, doi: 10.1080/15435075.2021.1946812.
- [3] S. Pischinger und U. Seiffert, Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021.
- [4] M. Feng, R. Qu, Z. Wei, L. Wang, P. Sun und Z. Wang, „Characterization of the thermolysis products of Nafion membrane: A potential source of perfluorinated compounds in the environment,” Scientific reports, Early Access, doi: 10.1038/srep09859.
- [5] D. Adamek, A. Dallas, M. A. Gogins, K. M. Graham und R. Skuster, „Air filter assembly for low temperature catalytic processes,” US000007758674B2, Jul 20, 2010.
- [6] O. A. Baturina, B. Dyatkin und T. V. Reshetenko, Influence of Air Impurities on the Performance of Nanostructured PEMFC Catalysts. Berlin, Heidelberg: Springer, 2018.
- [7] T. Beisel, „Zukunftsträchtige Antriebstechnologie benötigt komplexe Filter,” MTZ, 2021.
- [8] C. Özalp, P. Mauermann, S. Dirkes, P. Thiele, S. Sterlepper und S. Pischinger, „Investigation of Filtration Phenomena of Air Pollutants on Cathode Air Filters for PEM Fuel Cells,” Catalysts, Jg. 11, Nr. 11, S. 1339, 2021, doi: 10.3390/catal1111339.
- [9] U. Misz, A. Talke, A. Heinzl und G. Konrad, „Sensitivity Analyses on the Impact of Air Contaminants on Automotive Fuel Cells,” Fuel Cells, Jg. 16, Nr. 4, S. 444–462, 2016, doi: 10.1002/fuce.201500159.
- [10] D. Lückmann, A. Schloßhauer, J. Klütsch und L. Plum, „Effizienzsteigerung durch die Verwendung einer Turbine im Brennstoffzellensystem,” MTZ Motortech Z, Jg. 84, Nr. 12, S. 48–51, 2023, doi: 10.1007/s35146-023-1535-5, [Online]. Verfügbar unter: <https://link.springer.com/article/10.1007/s35146-023-1535-5>.
- [11] B. Blunier und A. Miraoui, „Proton Exchange Membrane Fuel Cell Air Management in Automotive Applications,” Journal of Fuel Cell Science and Technology, 2010.
- [12] T. E. Springer, T. A. Zawodzinski und S. Gottesfeld, „Polymer Electrolyte Fuel Cell Model,” J. Electrochem. Soc., Jg. 138, Nr. 8, S. 2334–2342, 1991, doi: 10.1149/1.2085971, [Online]. Verfügbar unter: <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/1.2085971/meta>
- [13] T. V. Nguyen und R. E. White, „A Water and Heat Management Model for Proton-Exchange-Membrane Fuel Cells,” J. Electrochem. Soc., Jg. 140, Nr. 8, S. 2178–2186, 1993, doi: 10.1149/1.2220792, [Online]. Verfügbar unter: <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/1.2220792/meta>
- [14] P. Kurzweil, Hg. Brennstoffzellentechnik. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016.
- [15] M. Harenbrock, A. Korn, A. Weber und E. Hallbauer, „Holistic Design of Innovative Cathode Air Supply for Automotive PEM Fuel Cells,” 21. Internationales Stuttgarter Symposium, S. 121–136, 2021, doi: 10.1007/978-3-658-33466-6_9, [Online]. Verfügbar unter: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-33466-6_9.
- [16] P. Geskes, S. Biba und M. Baumann, „Luftfilter und Befeuchter für Nutzfahrzeug-Brennstoffzellen mit hohen Lebensdauernanforderungen,” MTZ Motortech Z, Jg. 83, Nr. 6, S. 42–46, 2022, [Online]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1007/s35146-022-0824-8>
- [17] R. Huizing, Design and Membrane Selection for Gas to Gas Humidifiers for Fuel Cell Applications. University of Waterloo, 2007, [Online]. Verfügbar unter: <https://uwaterloo.ca/handle/10012/3048>.
- [18] Brian D. James, Jennie M. Huya-Kouadio, Cassidy Houchins, Daniel A. DeSantis: Strategic Analysis, Inc., „Mass Production Cost Estimation of Direct H2 PEM Fuel Cell Systems for Transportation Applications: 2018 Update,” 2018, [Online]. Verfügbar unter: www.sainc.com
- [19] J. Lissy, D. Gernand und E. Stitterich, „Störungsarmer rotierender Abscheider mit hoher Kompatibilität für den Einsatz in Brennstoffzellensystemen,” DE10202116944A1
- [20] M. Harenbrock, T. Grein, S. Kunze, L. Bachmann und M. Fasold, „Abscheideelement und Brennstoffzellensystem,” DE102015015715B4.
- [21] M. Kibler, P. Wisshak, S. Schmalzriedt, A. Matheis, T. Stark und P. Baumgartl, „LIQUID SEPARATOR,” US020230256369A1.
- [22] T. Falkenau und T. Bosch, „Wasserabscheider, Brennstoffzellensystem und Kraftfahrzeug,” DE10202200110A1, Jul 13, 2023.