



BRENNSTOFFZELLE

WASSERSTOFF EINSATZ

Brennstoffzelle - Energiewandler

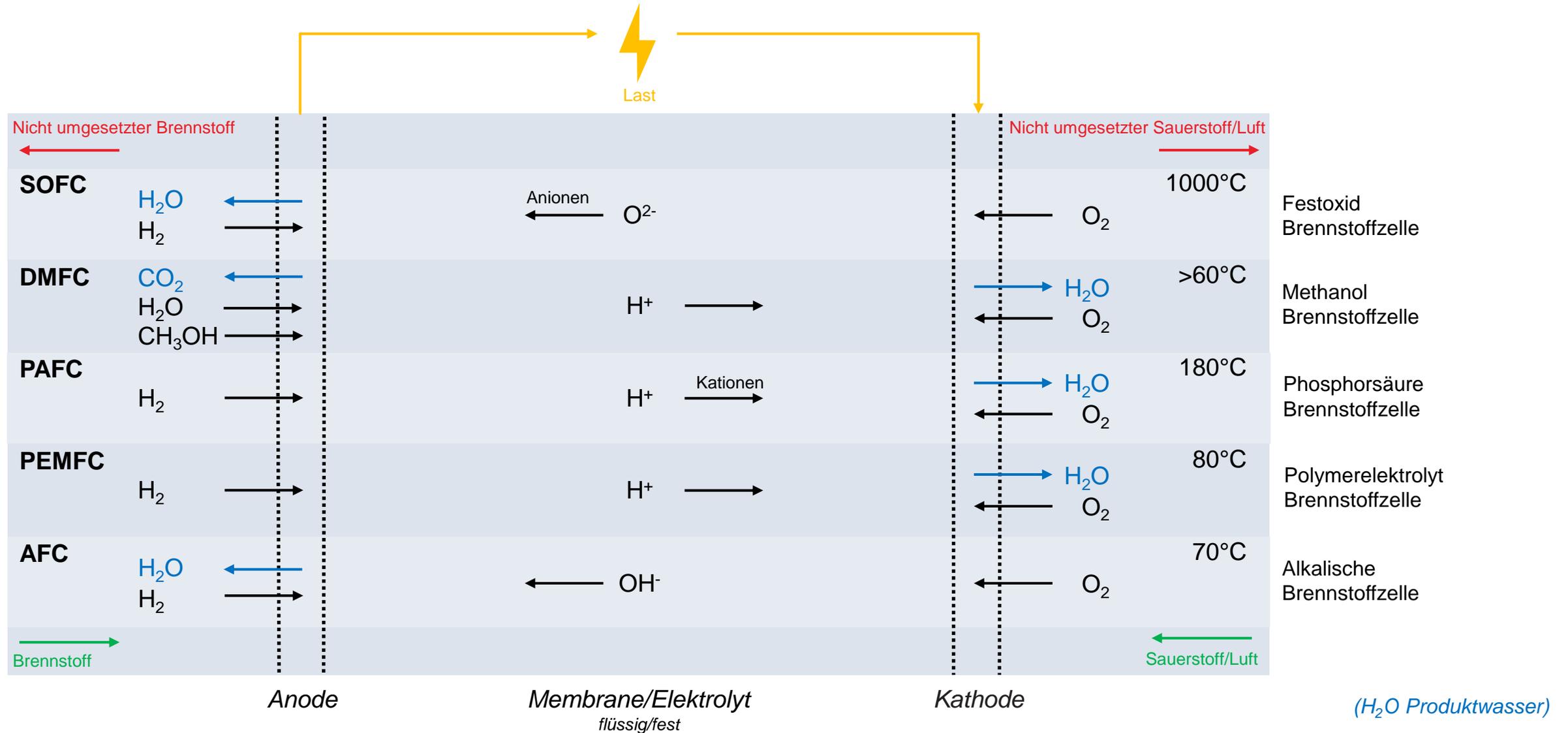
- Aus Wasserstoff und Luftsauerstoff wird in einem chemischen Prozess in den Stacks elektrische Energie erzeugt. Als **Emission** entsteht bei diesem Prozess **Wasser** und **Wärme**. In der Regel in Dampfform, das in den Leitungen kondensiert und in flüssiger Form abgeleitet wird.
- In Europa sind serienmässig verfügbare Fahrzeuge mit einer **PEMFC** (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) ausgerüstet
 - **Hohe Leistungsdichte**
 - **Niedrigere Betriebstemperaturen**
 - **Breiter Leistungsbereich**
 - **Einfaches Scale-up**
- Die PEM-Brennstoffzellen haben auf der Zellebene einen **Wirkungsgrad** von rund 60 %. Dieser wird aber durch die peripheren Systeme wie Kühlung weiter beeinflusst. Die **Betriebstemperaturen** liegen im Bereich von 60 – 90 ° C. Diese Abwärme wird für das Heizen von Fahrer- und Fahrgastraum genutzt.
- Ein kleiner **Partialdruck** führt zu einer geringeren **Leistung** und ein grösserer Partialdruck zu einer höheren Leistung.
- Der **Startdruck** einer Brennstoffzelle ist massgebend für die **Reichweite**, d.h. tiefer Startdruck bedeutet eine höhere Reichweite, ein hoher Startdruck eine kürzere Reichweite.
- Dies gilt auch für die Tankstelleninfrastruktur. Zum Starten des Tankvorgangs ist ein **minimaler Gegendruck** notwendig. Dieser variiert nach Tankstellenhersteller und Modell.

WASSERSTOFF EINSATZ

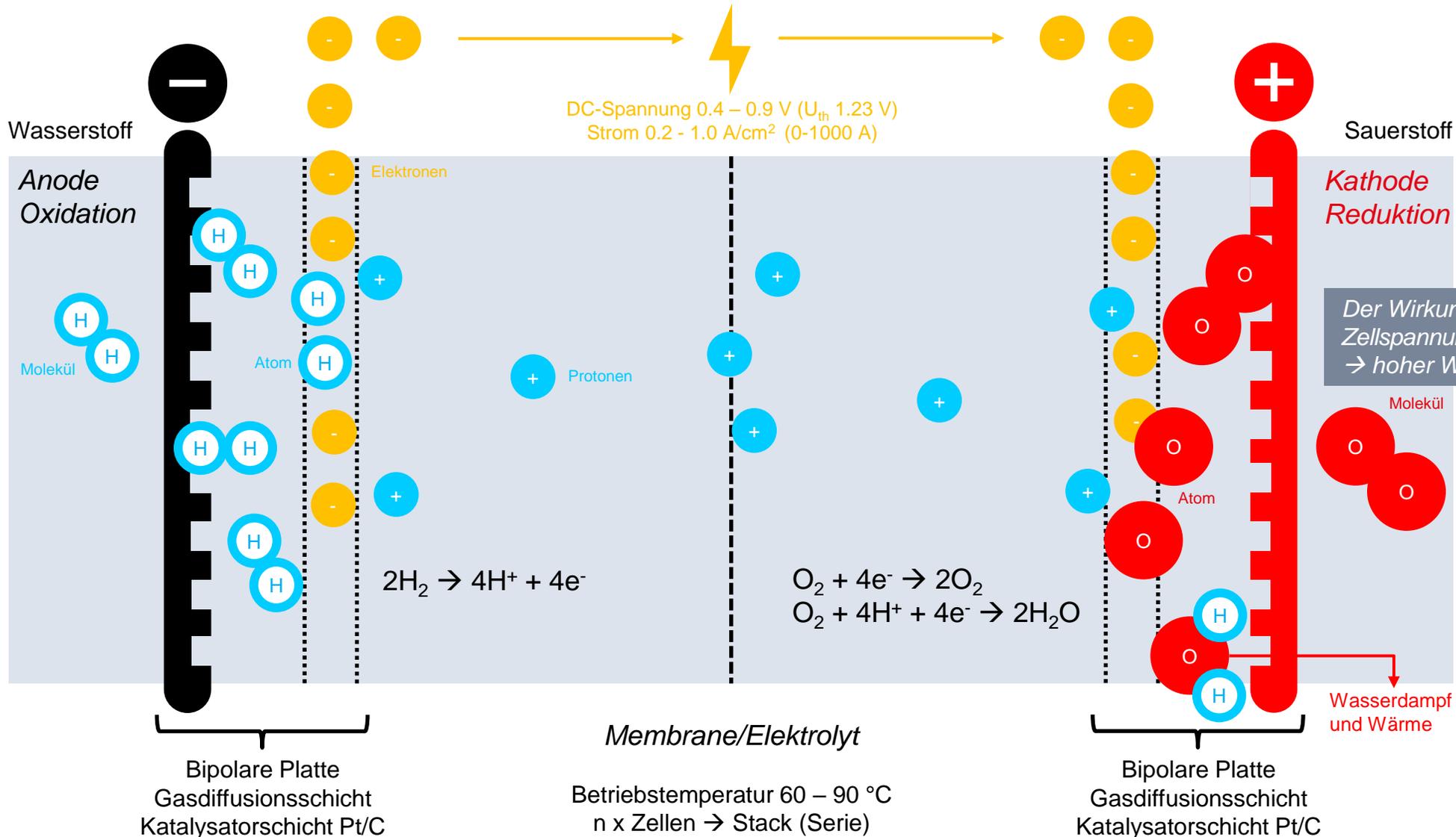
Brennstoffzelle - Energiewandler

	PEM	AFC	SOFC	DMFC	PAFC
	Polymer Elektrolyt Membrane	Alkaline Fuel Cell	Solid Oxide Fuel Cell	Direct Methanol Fuel Cell	Phosphoric Acid Fuel Cell
Ladungsträger	H+	OH-	O ²⁻	H+	H+
Temperaturen (°C)	80	23-70	700-1000	>60	180
Elektrolyt	Polymer Membrane	KOH/NaOH (flüssig)	Ceramics	Polymer Membrane	H ₃ PO ₄
Brennstoff	H ₂	H ₂	H ₂ /CO/CH ₄	Methanol	H ₂
Wirkungsgrad (%)	50-70	60-70	60-65	20-30	55
Leistungsbereich	1 W-500 kW	10 W-200 kW	5 kW-3 MW	100 mW-1 kW	50 kW-1 MW
Vorteile	Hohe Leistungsdichte Niedrige Betriebstemperatur Breiter Leistungsbereich Schnelle Inbetriebnahme/Start-up	Hohe Effizienz Hochaktiv Einfaches Wärmemanagement Schnelle Kinetik/chem. Reaktion	Hohe Effizienz Direkter fossiler Brennstoff Brennstoffvielfalt Hochaktiv	Hohe Leistungsdichte Niedrige Betriebstemperatur Tolerant gegenüber CO ₂	Beständigkeit gegenüber unreinem H ₂ Niedriger Druck Sehr stabil
Nachteile	Hohe Kosten Qualitätsanforderungen H ₂	Hohe Kosten Sensibel gegenüber CO ₂ Qualitätsanforderungen H ₂ Korrosion	Hohe Temperaturen Geringe Leistungsdichte Korrosion Auflösung der Kathode	Hohe Kosten Nebenprodukte CO ₂ Geringer Wirkungsgrad	Geringe Leistungsdichte Korrosion Geringe ionische Leitfähigkeit (>Temperatur/Elektrolyt flüssig)
Anwendungen	Mobilität Tragbare Geräte	Luft- und Raumfahrt U-Boote Flugzeuge	Stationäre Stromerzeuger Flugzeuge	Mobilität Tragbare Geräte Offshore Anwendungen	Stationäre Stromerzeuger

BRENNSTOFFZELLE - TYPEN



BRENNSTOFFZELLE – FUNKTIONSWEISE PEMFC

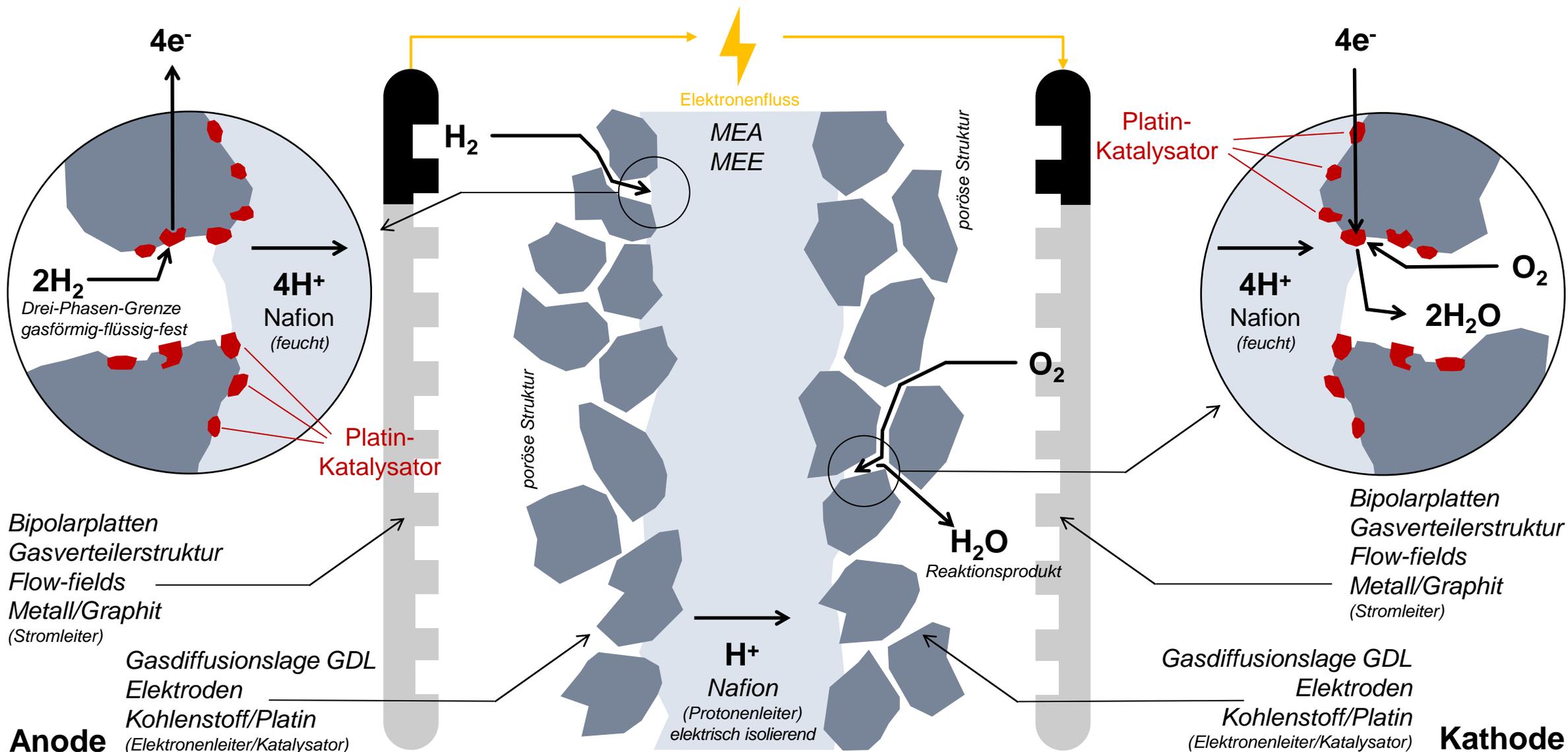


Der Wirkungsgrad fällt mit sinkender Zellspannung (steigender Strombelastung) → hoher Wirkungsgrad im Teillastbereich

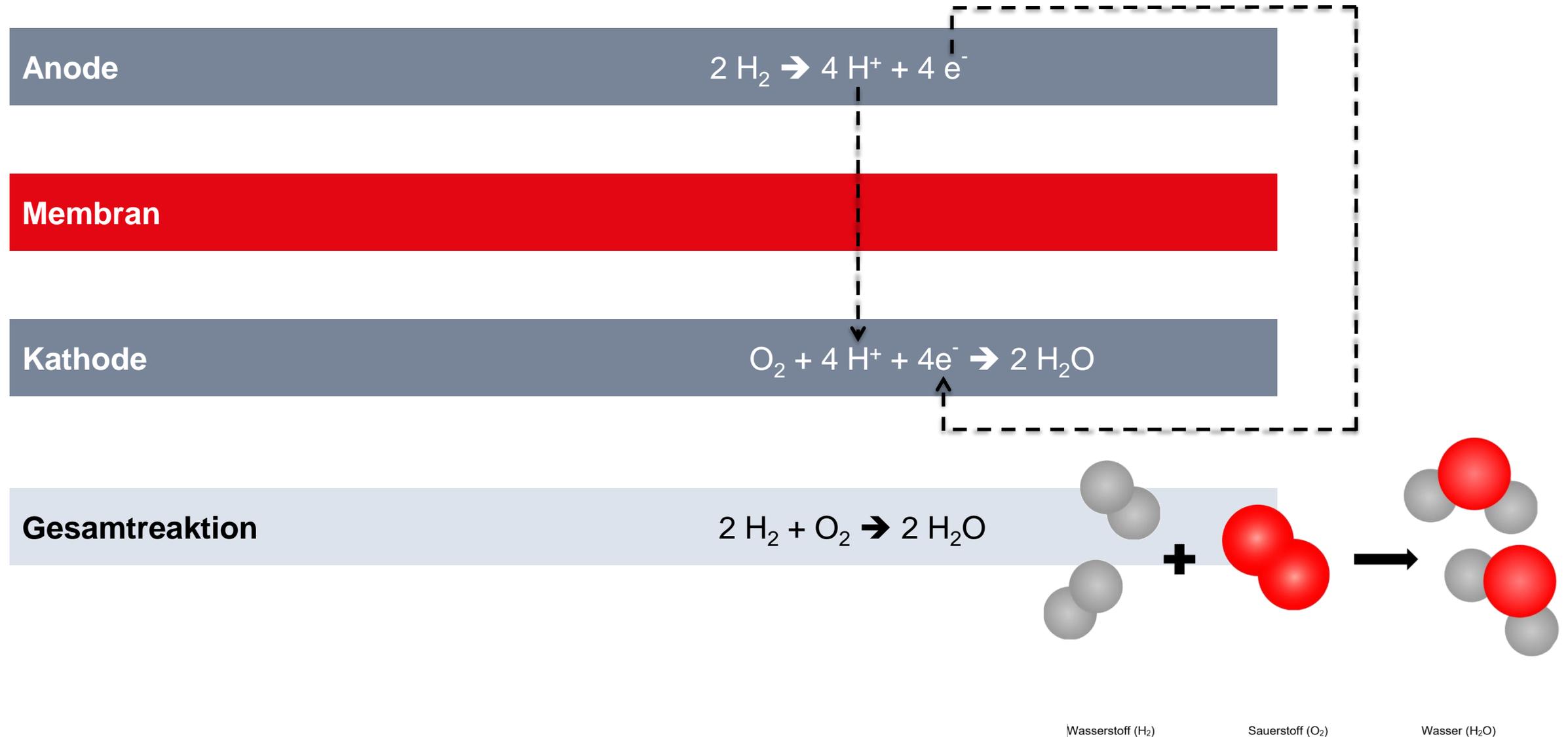
BRENNSTOFFZELLE – FUNKTIONSWEISE PEMFC

- Schritt 1** Sauerstoff (O_2) und Wasserstoff (H_2) diffundieren vom Gasraum (Bipolarplatte/Elektrode) zur Drei-Phasen-Grenze (Katalysator/Membrane).
- Schritt 2** Die Wasserstoffmoleküle werden auf der Anodenseite durch den Katalysator in Protonen (H^+) und Elektronen (e^-) getrennt. Das Wasserstoffatom gibt das Elektron ab.
- Schritt 3** Die Protonen (H^+) diffundieren durch den Elektrolyten (Membran) zur Kathodenseite.
- Schritt 4** Die Elektronen (e^-) werden über die Elektrode/Bipolarplatte/Endplatte) abgeleitet und führen so zu einem elektrischen Stromfluss, der einen Verbraucher mit elektrischer Energie versorgt.
- Schritt 5** Jeweils 4 Elektronen (e^-) werden an der Kathode mit einem Sauerstoffmolekül reduziert (Sauerstoff-Ion).
- Schritt 6** Die Sauerstoff-Ionen (elektrisch geladene Atome oder Moleküle) reagieren mit den durch die Membran diffundierten Protonen (H^+) zu Wasser (H_2O).

BRENNSTOFFZELLE – GASDIFFUSIONSELEKTRODE - KATALYSATOR



BRENNSTOFFZELLE – FUNKTIONSWEISE PEMFC



BRENNSTOFFZELLE – FUNKTIONSWEISE PEMFC

In der PEM-Brennstoffzelle werden Wasserstoff und Sauerstoff **elektrochemisch** zu Wasser umgewandelt. Durch einen externen Verbraucher kann der dabei entstehende **elektrische Strom** genutzt werden.

Durch die Membran, **räumlich** und **elektrisch** voneinander **getrennt**, wird der **Anode Wasserstoff** und der **Kathode Sauerstoff** bzw. Luft zugeführt. An der katalytisch aktiven Oberfläche beider Elektroden läuft je eine elektrochemische Reaktion ab (Oxidation/Reduktion). Nicht umgesetzter Wasserstoff wird über eine **Rezirkulation** dem Stapel erneut zugeführt.

Anodenseitig adsorbiert **Wasserstoff** am Platinkatalysator und wird in Protonen sowie Elektronen aufgespalten (Oxidation). Die **Membran** ist **leitend für Protonen**, jedoch isolierend gegenüber Elektronen. Die Protonen migrieren durch die PEM hindurch zur Kathode, wohingegen die **Elektronen** ausserhalb abgeführt werden und von einem **externen Verbraucher genutzt** werden.

An der katalytisch aktiven Oberfläche der positiv geladenen **Kathode** reagiert **Sauerstoff** mit den aus der Anodenseite freigesetzten **Protonen** und **Elektronen** zu **Wasser** (Reduktion)

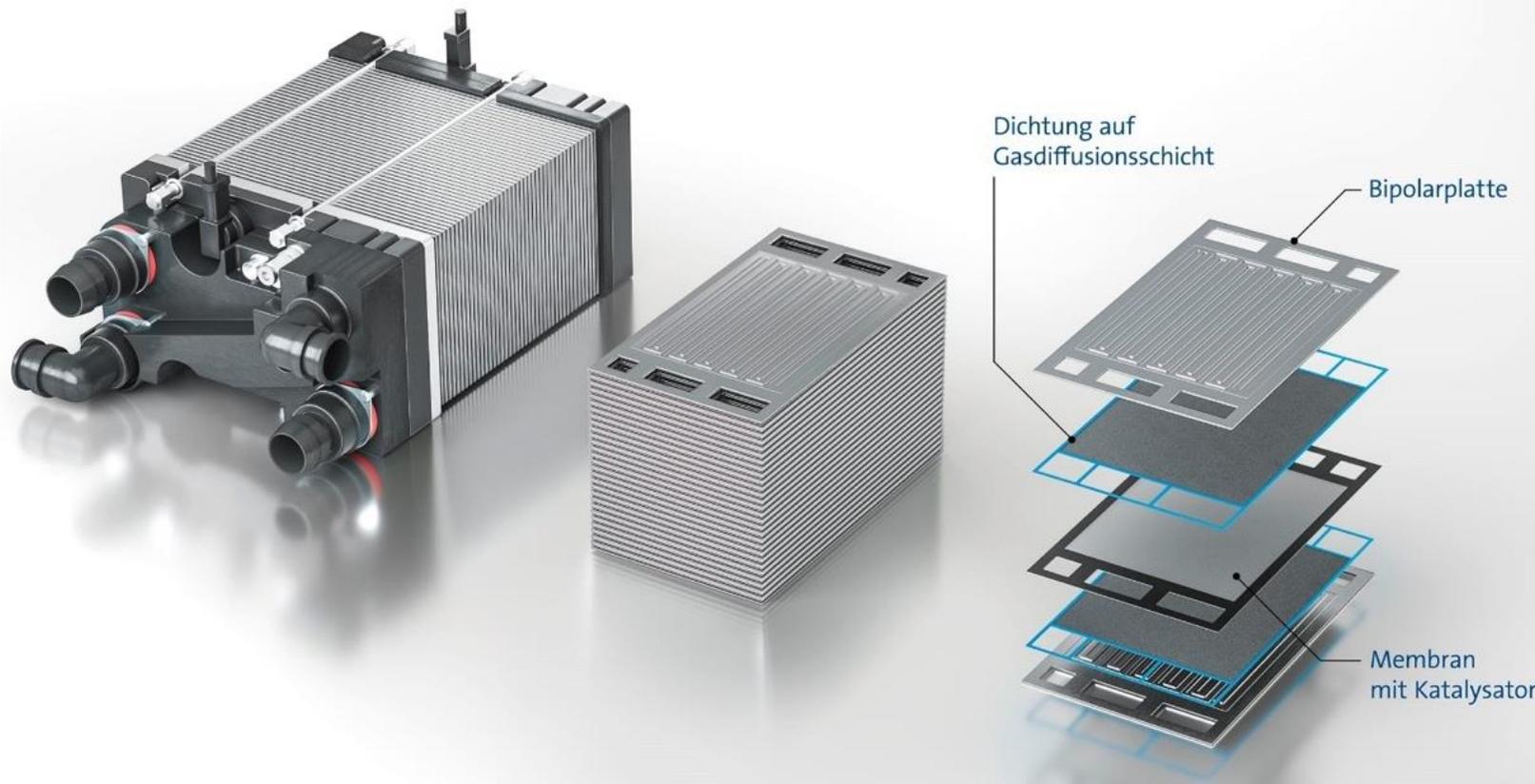
Doppelwandige **Bipolarplatten** ermöglichen einen **Kühlkreislauf** mit Kühlmittel zur Temperierung des Brennstoffzellenstapels.

In den meisten Anwendungsfällen werden mehrere Zellen elektrisch in Reihe zu einem **Brennstoffzellenstapel** (stack) zusammengeschaltet.

In Fahrzeuganwendungen wird die **Umgebungsluft** angesaugt, gefiltert und über einen **Verdichter** und einen **Befeuchter** dem Stack zugeführt.

Die **Wasserstoffversorgung** erfolgt über **Drucktanks**. Dabei wird der Gasdruck (350/700 bar) mittels Druckregelventilen auf den Betriebsdruck gedrosselt.

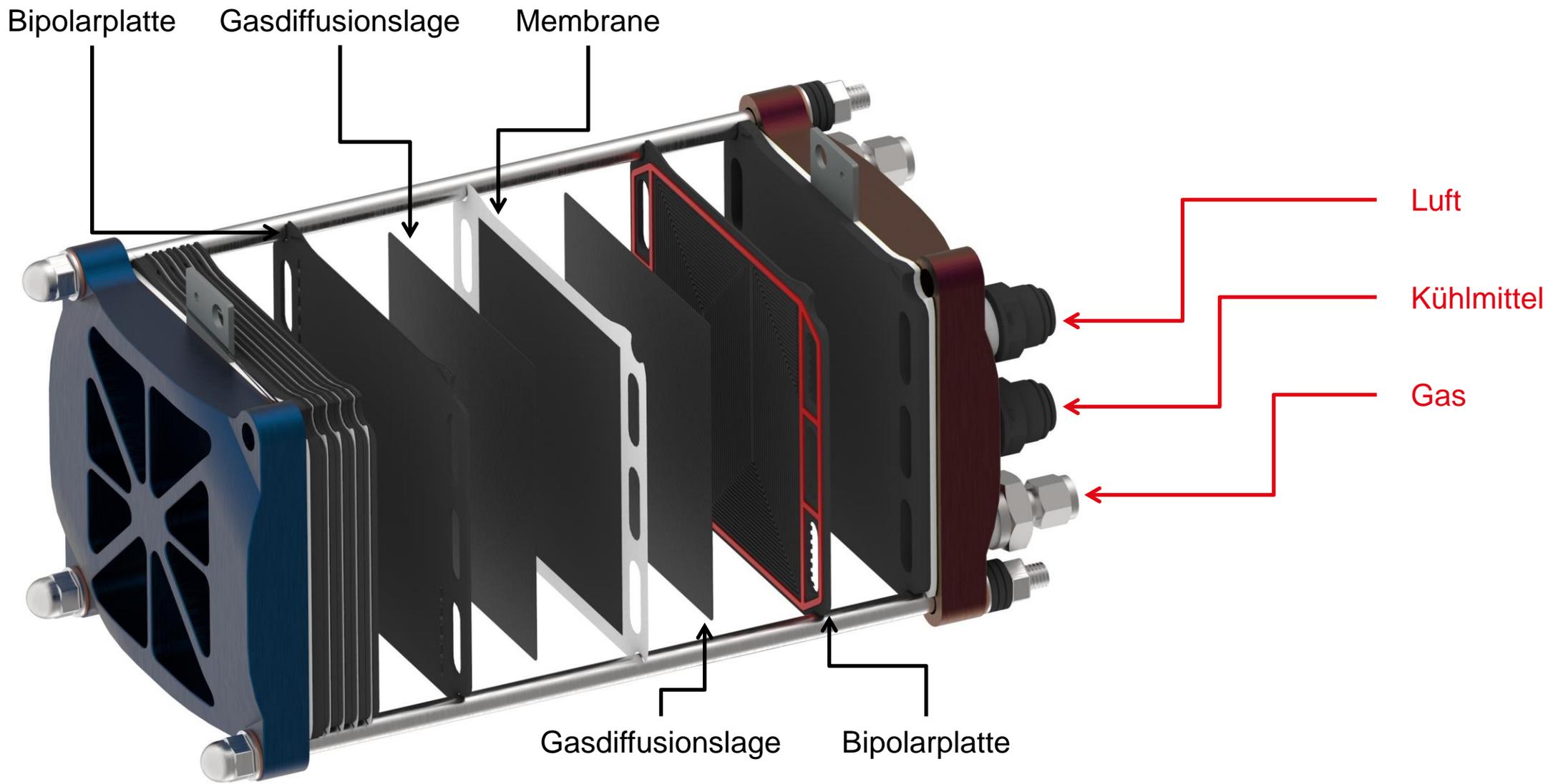
BRENNSTOFFZELLE – FUNKTIONSWEISE PEMFC



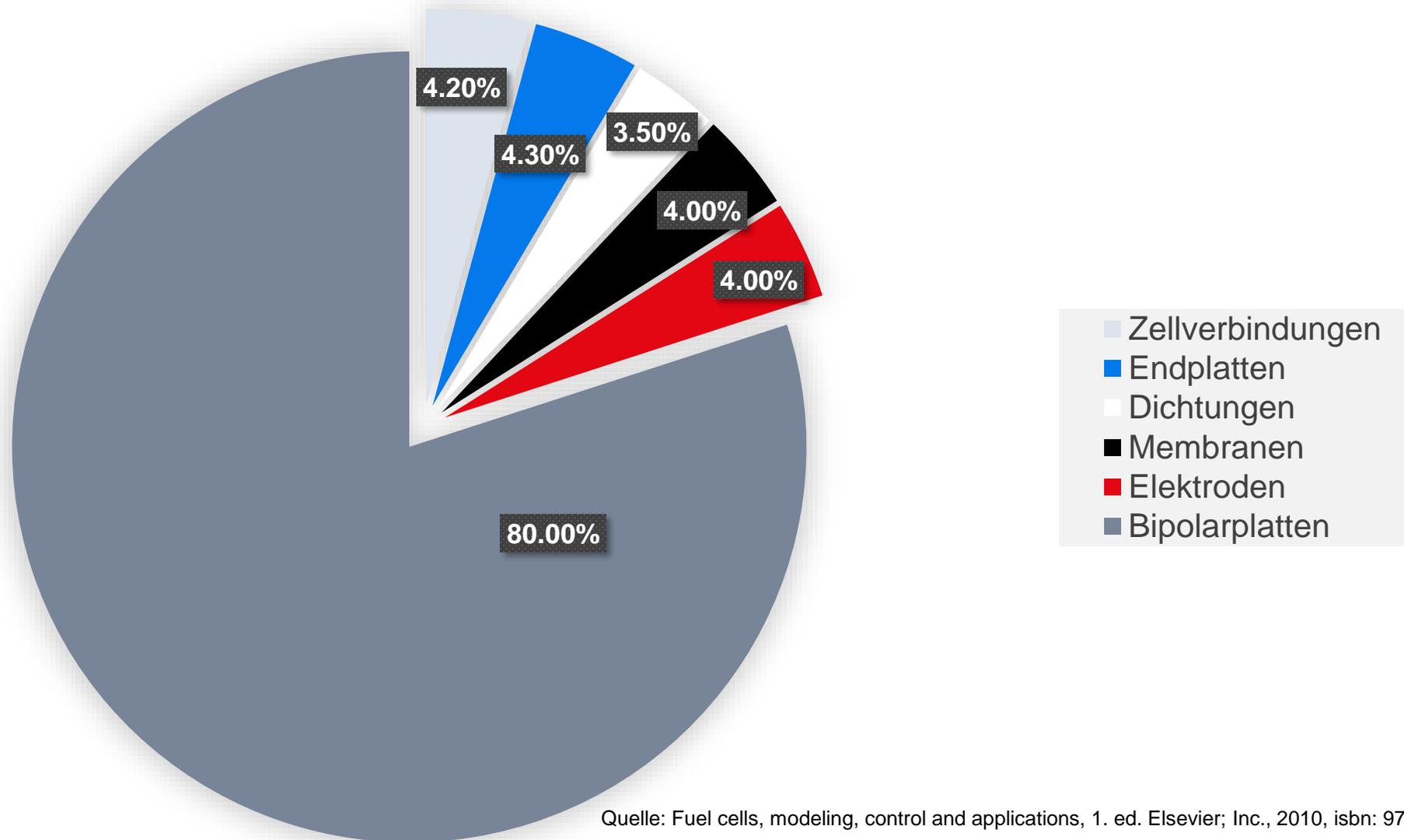
Beispiel von einer Brennstoffzelle zum Stack

- Bipolarplatten aus Metall oder Graphit
- Gasdiffusionsschicht dient als optimaler Verteiler der Gase an die Elektroden, Ableitung der Reaktionswärme und der Elektronen an der Anode
- Polymer-Membran als Elektrolyt, geringfügige Platinbeladung als Katalysator zur Beschleunigung der Reaktion (Zerlegung Wasserstoffatome in Elektronen und Protonen)

BRENNSTOFFZELLE – KOMPONENTEN



BRENNSTOFFZELLE – KOMPONENTEN – MASSENANTEIL PEMFC



BRENNSTOFFZELLE – KOMPONENTEN

Bipolarplatten

Die Bipolarplatte (Gasflussplatte) stellt **Gasversorgung**, **Wassertransport** und **Kühlung** der Membraneinheit MEA sicher. Als Werkstoff kommt Metall oder Graphit zum Einsatz.

Das Flussfeld der Bipolarplatte besteht aus Kanälen für den Transport der Reaktionsgase und aus Stegen für die elektrische Kontaktierung zur Gasdiffusionslage GDL (Elektrode). Eine doppelwandige Auslegung ermöglicht eine Flüssigkühlung mit Kühlmedium.

Anforderungen an die Bipolarplatten sind:

- *eine hohe thermische Leitfähigkeit*
- *hohe mechanische Festigkeit*
- *geringe Gasdurchlässigkeit*
- *gute Bearbeitbarkeit*
- *gute Korrosionsbeständigkeit*

Die zentrale Aufgabe der Gasverteilung kann durch unterschiedliche Strukturen in der Bipolarplatte realisiert werden. Die Optimierung der Kanal/Steg-Geometrien und der Verteilstruktur ist der Schlüsselfaktor für eine hohe Stapelleistung.

Auch die Beschichtung von Bipolarplatten für Elektrolyseure sowie Brennstoffzellen sind entscheidend. Denn diese müssen in einer chemisch aggressiven Umgebung lange und stabil funktionieren. Dafür müssen sie mit Beschichtungen versehen werden, die die Platten zuverlässig schützen und zugleich eine **elektrische Leitfähigkeit** gewährleisten.

BRENNSTOFFZELLE – KOMPONENTEN

Elektrode/Gasdiffusionslage GDL

Die Gasdiffusionslage ist das Verbindungsstück zwischen der Membran und der Bipolarplatte. Die Hauptaufgaben bestehen in der **Verteilung der Reaktionsgase** aus den Kanälen der Bipolarplatte auf die Katalysatorschicht, dem **Transport von Elektronen** sowie dem **Abtransport von Wärme** und **flüssigem Produktwasser** aus der Katalysatorschicht.

Anforderungen an die Gasdiffusionslage sind:

- *Transport und die homogene Verteilung der Reaktionsgase*
- *Abtransport von Produktwasser*
- *elektrische und thermische Leitfähigkeit*
- *mechanische Stabilität*

Durch ihre Kompressibilität sorgt die GDL für eine gleichmässige Anpressung und kann Toleranzen auf der Bipolarplatte ausgleichen. Eine GDL ist üblicherweise aus zwei Schichten aufgebaut, dem **Substrat** und der **mikro-porösen Schicht**. Das Substrat besteht aus Kohlenstofffasern im Größenbereich von 6 –10 µm. Um den Kontakt zur Katalysatorschicht zu verbessern sowie den **Wassertransport** zu optimieren ist das Substrat auf der einen Seite mit einer mikro-porösen Schicht beschichtet. Diese Schicht besteht aus einem Kohlenstoffgemisch, welches mit **Teflon** hydrophobiert wird.

Zukünftige Entwicklungen im Bereich der GDL konzentrieren sich auf dünnere GDL, gezielte Einstellung der Wassertransporteigenschaften sowie eine verbesserte elektrische Kontaktierung.

BRENNSTOFFZELLE – KOMPONENTEN

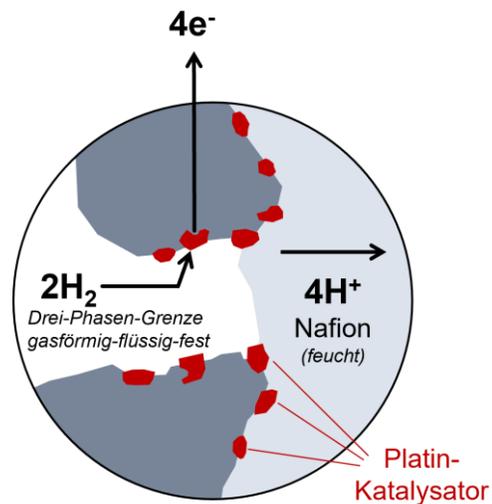
Elektrode/Gasdiffusionslage GDL

In den Elektroden laufen die Reaktionen Oxidation und Reduktion ab.

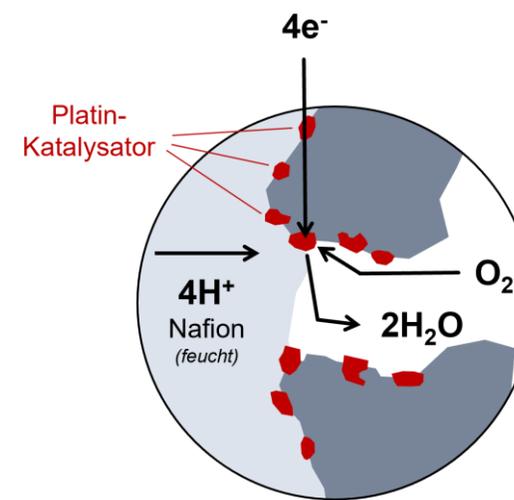
Eine Elektrode besteht aus einem Gemisch aus **Edelmetallkatalysatorpartikeln** (Platin oder Platinlegierungen), einem **hochporösen Kohlenstoff** als Trägermaterial und einem protonenleitfähigen Ionomer.

An der sogenannten **Dreiphasengrenze** des Gemischs finden die elektrochemischen Reaktionen der Brennstoffzelle statt.

Der Platingehalt heutiger PEM-Brennstoffzellen liegt unter $0,5 \text{ mgPt/cm}^2$ für Anode und Kathode. Ziel ist, eine möglichst hohe **aktive Oberfläche** pro Gramm Platin zu erreichen, die den Materialeinsatz des Edelmetalls senkt.



Anode



Kathode

BRENNSTOFFZELLE – KOMPONENTEN

Membran

Die Membran isoliert beide Halbzellen (Anode/Kathode) elektrisch und übernimmt als Elektrolyt den Protonentransport von Anode zu Kathode.

In PEM-Brennstoffzellen werden meist Membrane aus chemisch stabilisierten perfluorierten und sulfonierten Polymeren verwendet. Feuchtigkeit ermöglicht den Protonentransport. Die **Protonenleitfähigkeit** der Membran steigt mit Zunahme von **Temperatur** und **Wassergehalt**. Als Werkstoffe werden beispielsweise das Ionomer Nafion[®] der Firma DuPont oder vergleichbare Materialien anderer Hersteller eingesetzt. Membrane enthalten zusätzliche Stabilisierungsschichten, die sie gegenüber mechanisch Beanspruchungen robuster machen und das Aufquellen bei zunehmender Feuchte verringern.

Die Dicke der Membranen liegt im Bereich von 10 - 18 μm .

BRENNSTOFFZELLE – KOMPONENTEN

MEA

Der **Verbund** aus der Katalysator-beschichteten **Membran (CCM)** und **Gasdiffusionsschichten (GDL)** wird als Membran-Elektroden-Einheit (MEA, membrane electrode assembly) bezeichnet.

NachwuchswissenschaftlerInnen (ionysis GmbH) entwickelten Membran-Elektroden-Einheiten (MEAs), die ohne den Einsatz umweltschädlicher Fluorverbindungen, sogenannter PFAS (per- und polyfluorierte Chemikalien), auskommen, und zwar ohne Leistungs- oder Kosteneinbussen. Sie ersetzen dafür das bisherige Standardmaterial Nafion[®] durch Kohlenwasserstoffe.

BRENNSTOFFZELLE – WASSERMANAGEMENT

In der PEMFC wird dem **Wassermanagement** eine besondere Bedeutung zugeschrieben. Einerseits benötigt die Membran viel Wasser für die Einlagerung der Protonen in die wasseranziehende Oberfläche, auf der anderen Seite verhindert zu viel **Flüssigwasser** einen ausreichenden Gastransport der Edukte zum Katalysator. Verschiedene **Mechanismen** sorgen für einen **Wasseraustausch zwischen Anode und Kathode**.

Über **Elektroosmose** werden in Abhängigkeit vom Wassergehalt der Membran und der Temperatur Wassermoleküle direkt proportional zum Protonentransport von der Anode zur Kathode entgegen des Konzentrationsgradienten transportiert. Je nach Wassergehalt der Membran werden etwa 1-3 Wassermoleküle pro Proton transportiert. Bei hohen Stromdichten kommt es durch den elektroosmotischen Zug zu einem hohen Wasserstrom, welcher zu einer Austrocknung der Anode führen kann.

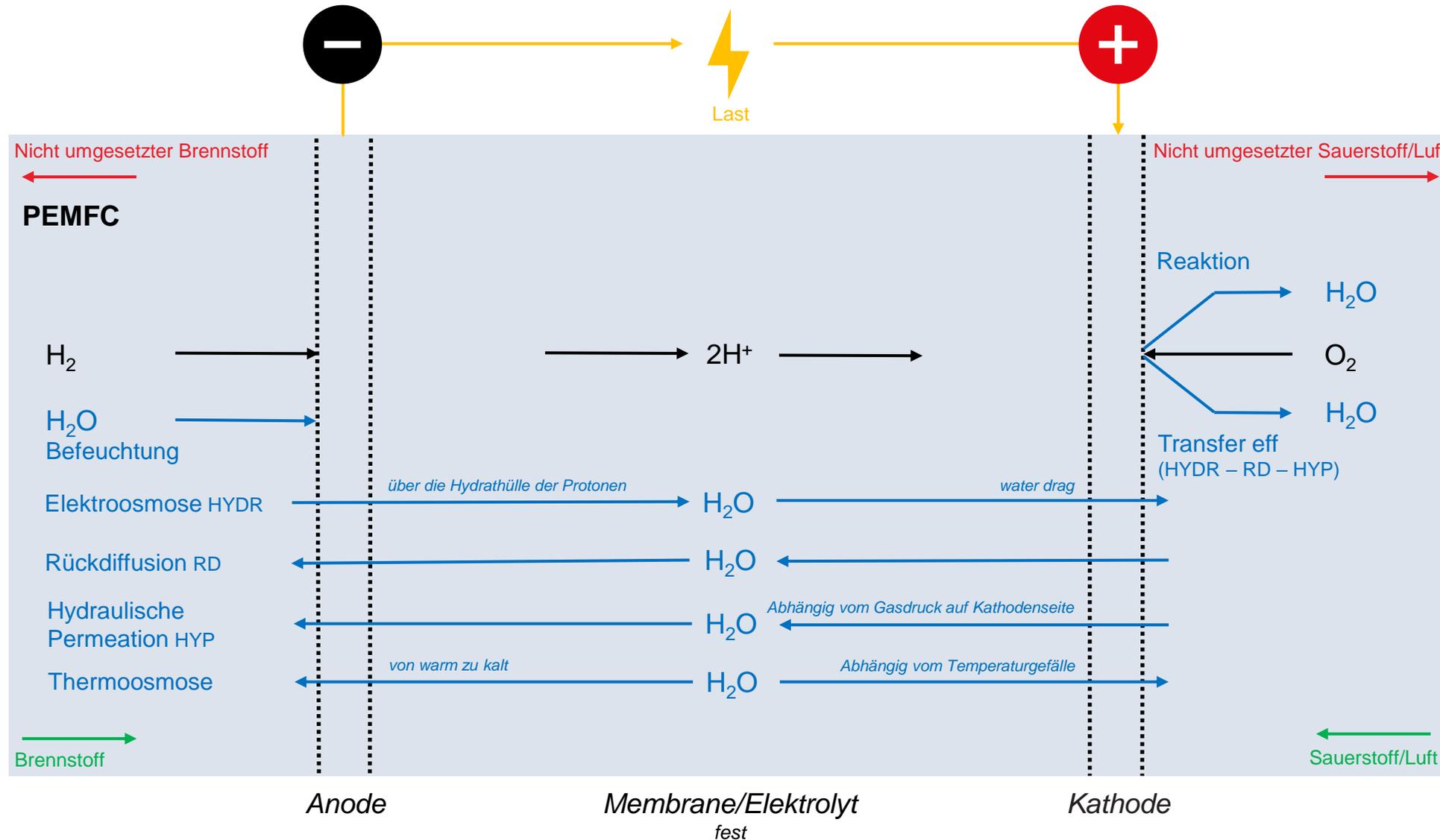
Ein Gradient (Gefälle) im Membranwassergehalt zieht einen weiteren Wassertransport durch **Diffusion** nach sich. Die Richtung des Stofftransportes ist **abhängig vom Konzentrationsgefälle**. An der Kathode kommt es zur höheren Konzentration von Wasser aufgrund des anfallenden Produktwassers der Reaktion. Zusätzlich erhöht sich die Wasseransammlung durch den elektroosmotischen Zug. In der Gegenrichtung entsteht dadurch ein Konzentrationsgradient, der für eine **Rückdiffusion** des Wassers von Kathode zur Anode sorgt. Die Rückdiffusion wirkt der Wasseransammlung an der Kathode entgegen und kann den Wassertransport durch Elektroosmose ausgleichen, wenn die Membran dünn und der **Diffusionskoeffizient** gross genug ist.

Der Wassertransport wird im Fall der **hydraulischen Permeation** durch eine Druckdifferenz zwischen der Anode und Kathode begünstigt, so dass sich ein Stoffstrom **zur Seite des niedrigeren Drucks** einstellt.

Aufgrund des Temperaturgefälles innerhalb der Zelle kann ein **thermoosmotischer Zug** für einen Stofftransport **von warm zu kalt** erfolgen.

Der Wasserhaushalt wird zudem über **Druck- und Temperaturunterschiede** beeinflusst.

BRENNSTOFFZELLE – WASSERMANAGEMENT



Der spezifische Widerstand der Membran ist stark vom Wassergehalt abhängig.

Durch Temperaturerhöhung steigt die Leitfähigkeit der befeuchteten Polymer-Membrane

Austrocknung →
Flutung →



(H₂O Produktwasser)

BRENNSTOFFZELLE – LUFTQUALITÄT

Eine grosse Rolle für die Lebensdauer einer Brennstoffzelle spielen die Luftreinheit, die klimatischen Bedingungen sowie das Einsatzgebiet. Die Alltagstauglichkeit der Brennstoffzelle hängt auch vom richtigen **Luftmanagement** und dem damit verbundenen Feuchtigkeits- und **Wassermanagement** ab.

Die angesaugte Luft muss rein sein. Zentrale Komponenten einer Brennstoffzelle reagieren äusserst empfindlich auf Partikel, Schadgase oder Wasser in der Ansaugluft. **Schadgase**, wie **Schwefeldioxid** (SO₂), **Ammoniak** (NH₃) oder **Stickoxide** (NO_x), wirken sich bereits bei **geringen Konzentrationen** negativ aus, indem sie den Platinkatalysator in der Brennstoffzelle „vergiften“. Je nach Konzentration und Dauer der Belastung können **irreversible Schäden** auftreten.

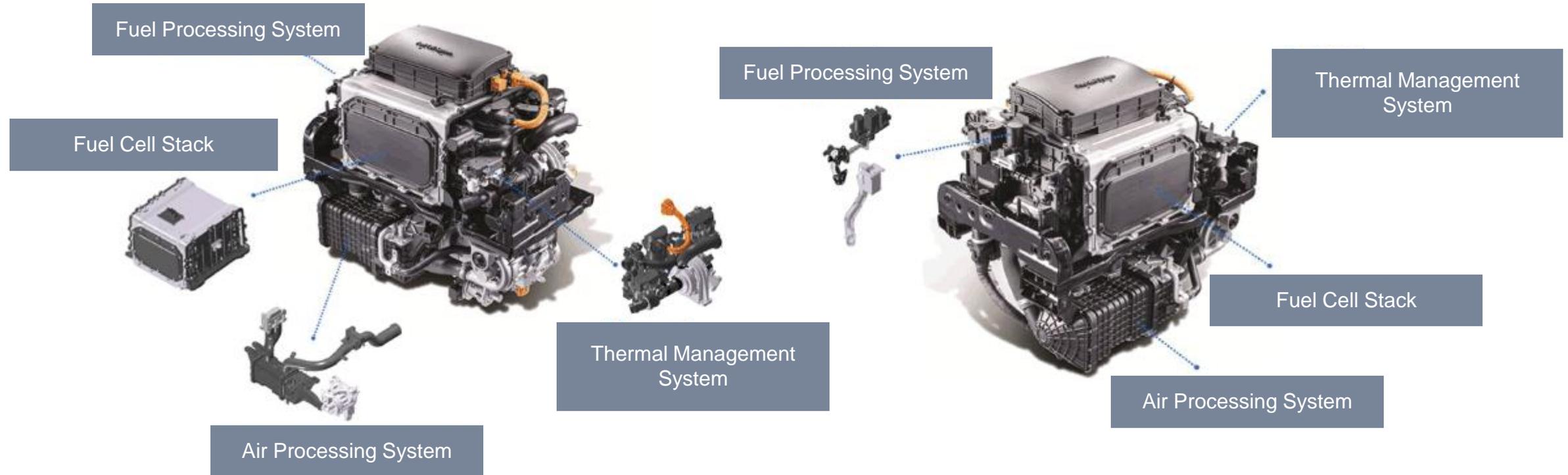
Ein Luftfilter schützt wirksam vor Partikeln. Um jedoch schädliche Gase aus der Luft zu adsorbieren, wird der Filter zusätzlich mit Aktivkohlelagen oder weiteren Adsorbermedien ausgestattet. Diese Adsorber „binden“ die Schadgase und sorgen so für den Schutz der Brennstoffzelle.

Auch das Thema Feuchtigkeit spielt bei der Brennstoffzelle eine zentrale Rolle. Die angesaugte Luft darf nicht zu trocken sein. Trockene Luft lässt die Membran im Brennstoffzellen-Stack austrocknen. Das ist weder gut für die mechanische Festigkeit der Membran noch für den Protonentransport, also für die Leistung der Brennstoffzelle. Über einen sogenannten Befeuchter kann das Reaktionsprodukt Wasser von der Abluft, der feuchten Seite, auf die Zuluft, die trockene Seite der Brennstoffzelle, übertragen werden.

Wenn die Feuchte jedoch zu Wassertröpfchen **kondensiert**, können diese die feinen Strukturen der Gasdiffusionslage blockieren. Ebenso sind Tröpfchen, die auf der Turbinenseite des **elektrischen Kompressors** auftreffen schädlich für dessen Dauerhaltbarkeit. Deshalb sind **Wasserabscheider** für die Trennung von flüssigen Wasserbestandteilen unverzichtbar.

WASSERSTOFF EINSATZ

Brennstoffzelle – Subsysteme (BoP – Balance of Plant)



Quelle: HYUNDAI

Systeme/Leistungselektronik

- Das Zusammenspiel der Systeme ist hochkomplex